

DIEU LINH NGUYEN

**LA MAISON TUBE
DES NOUVEAUX QUARTIERS D'HANOI :
EFFETS DE PARAMÈTRES ARCHITECTURAUX
SUR L'AMBIANCE THERMIQUE**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en Sciences de l'architecture
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

ÉCOLE D'ARCHITECTURE
FACULTÉ D'AMÉNAGEMENT, D'ARCHITECTURE ET DES ARTS VISUELS
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2011

Résumé

Dans les pays tropicaux, comme le Vietnam, les gens vivent en permanence avec la chaleur et l'humidité, deux causes principales de conditions inconfortables. L'architecture traditionnelle vietnamienne a réduit les impacts négatifs du climat sur l'ambiance thermique à l'aide d'espaces ouverts tels des jardins, des cours intérieures et des puits de lumière.

Toutefois, dans les maisons en milieu urbain, l'adaptation au climat a été minimisée à cause de leurs traits typologiques. Ces maisons, qui sont des habitations typiques de Hanoi depuis plusieurs décennies, sont étroites et profondes. De ces faits, pour les maisons de ville, en arriver à un design permettant d'obtenir à la fois le confort thermique et l'économie énergétique est toujours un défi pour l'architecte. Une bonne stratégie architecturale est donc particulièrement importante. Cette stratégie doit à la fois procurer une ambiance thermique intérieure confortable et minimiser l'utilisation d'appareils de climatisation, considérée comme une perte du point de vue énergétique.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'influence de différentes stratégies architecturales sur la qualité de l'ambiance thermique dans la maison tube des nouveaux quartiers d'Hanoi. Cette étude a été réalisée à l'aide de simulations thermiques dynamiques avec le logiciel Derob-LTH.

L'ensemble des résultats obtenus a permis de confirmer la plupart des hypothèses de recherche. Selon ces résultats, on peut conclure que les stratégies architecturales ont influencé l'ambiance thermique intérieure des maisons urbaines. De plus, on peut voir que certaines stratégies à faible coût et très simples à appliquer peuvent améliorer significativement l'ambiance thermique intérieure. Finalement, ce mémoire suggère une combinaison de stratégies architecturales pouvant augmenter significativement l'ambiance thermique intérieure des maisons urbaines.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de recherche, madame Marie-Claude Dubois, qui m'a permis d'avancer et qui a su détecter en moi le besoin d'être encouragée. Sa rigueur et sa passion pour le métier sont remarquables et ont été pour moi une grande source d'inspiration.

Je remercie monsieur Michel Dubois, pour avoir assumé - bénévolement et avec une grande générosité - la correction complète de la langue française dans le manuscrit final.

Je remercie sincèrement Maria Wall, directrice du Département Energy and Building Design de l'Université de Lund, en Suède, et son collaborateur Hasse Kvist, pour m'avoir très généreusement permis d'utiliser le logiciel Derob-LTH gratuitement pendant plus de trois ans ainsi que pour m'avoir fourni un support informatique lorsque nécessaire lors de l'utilisation de ce programme, et ce, sans aucun frais.

Je remercie aussi madame Denise Piché, madame Claude Demers et monsieur André Casault, mon co-directeur, pour leurs nombreux conseils tout au long de cette étude. Mérite d'être soulignée aussi, madame Geneviève Vachon, directrice du programme de maîtrise, pour sa vision positive et extrêmement motivante de la recherche étudiante étrangère.

Mes considérations vont aussi à mes parents pour leurs encouragements constants, à mes sœurs, Dieu Anh et Ha, pour leur soutien sans faille et à mon mari et meilleur ami, Duc, qui m'a donné la force et l'énergie nécessaires afin que je puisse poursuivre mon but.

Table des matières

Résumé	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des symboles	11
CHAPITRE 1 : Introduction et contexte climatique	
1.1. Problème de recherche : la maison tube	12
1.2. Objectifs	15
1.2.1. Objectifs généraux	16
1.2.2. Objectifs spécifiques	16
1.3. Questions de recherche	16
1.4. Caractère de la recherche	16
1.5. Variables d'analyse	17
1.5.1. Espace étudié : la pièce au troisième étage	17
1.5.2. Variables indépendantes	18
1.6. Hypothèses	20
1.6.1. Hypothèses générales	20
1.6.2. Hypothèses spécifiques	20
1.7. Contexte climatique	21
1.7.1. Températures	22
1.7.2. Humidité	22
1.7.3. Précipitation	23
1.7.4. Rayonnement solaire	23
1.7.5. Vent	25
CHAPITRE 2 : Cadre théorique	27
2.1. Adaptation architecturale en fonction du confort thermique	28
2.1.1. Ventilation naturelle	29
2.1.2. Protection contre le rayonnement solaire	33
2.1.3. Constructions	36
2.1.4. Matériaux et couleurs des surfaces	37
2.1.5. Toitures et hauteur des plafonds	39
2.1.6. Orientation	41
2.2. Confort thermique	43
2.2.1. Confort thermique dans l'habitation	43
2.2.2. Indicateurs thermiques	45
2.2.2.1. Température opérative (Top)	45
2.2.2.2. PMV (predicted mean vote – vote moyen prévisible)	49
CHAPITRE 3 : Méthodologie	51
3.1. Logiciel de simulation énergétique dynamique	51
3.1.1. Interface de modélisation, avantage et validation de l'outil	51
3.1.2. Équation fondamentale	54
3.2. Description du modèle de base dans DEROB-LTH	56
3.2.1. Géométrie et bâtiments voisins	56
3.2.2. Matériaux	60

3.2.3. Données climatiques et intrants.....	61
CHAPITRE 4 : Résultats	65
4.1. Analyse du modèle de base	65
4.1.1. Modèle de base en été.....	65
4.1.2. Modèle de base en hiver	69
4.1.3. Conclusion	73
4.2. Analyse des différentes stratégies architecturales passives.....	74
4.2.1. Influence de la ventilation	74
4.2.2. Murs	79
4.2.2.1. Influence de la couleur extérieure.....	79
4.2.2.2. Influence des matériaux isolants	83
4.2.3. Toiture.....	89
4.2.3.1. Influence des matériaux isolants	89
4.2.3.2. Influence de la deuxième toiture	93
4.2.4. Occultation.....	100
4.2.5. Orientation.....	111
4.2.6. Cas optimal.....	115
CHAPITRE 5 : Conclusions, limites et recherche future.....	120
5.1. Conclusions	120
5.2. Limites de la recherche et recherche future.....	125
BIBLIOGRAPHIE	126
Ouvrages cités.....	126
Ouvrages consultés.....	129
ANNEXE A : Paramètres de recherche	131

Liste des tableaux

Tableau 1.7.4.1: Intensité du rayonnement solaire moyen par jour (W/m^2) sur des façades différentes pour Hanoi en été (tiré de Pham, 2002).....	25
Tableau 2.1.1.1: Effets de la ventilation transversale sur la vitesse de l'air moyenne intérieure (% de la vitesse extérieure) (tiré de Givoni, 1978)	30
Tableau 2.1.2.1: Indice P recommandé en fonction de l'orientation des façades et du mois, d'après Brown et Dekay (2004)	34
Tableau 3.1.1.1: Intrants et extrants pour le programme de simulation DEROB-LTH (tiré de Persson et al, 2006).....	53
Tableau 3.2.1. 1: Description détaillée du modèle de base	59
Tableau 3.2.2. 1: Description détaillée des propriétés thermiques des matériaux	60
Tableau 3.2.3. 1: Description détaillée des échanges par advection du modèle	62
Tableau 3.2.3. 2: Changements d'air à l'heure	64
Tableau 4.1.2.1 : Température optimale d'après les équations de De Dear et Brager (2002)	72
Tableau 4.2.1.1: Détail du changement d'air à l'heure (Cah) pour chacun des cas	74
Tableau 4.2.1.2: Détail du changement d'air à l'heure (Cah) pour les différents cas	76
Tableau 4.2.2.1: Description détaillée des propriétés thermiques des matériaux	83
Tableau 4.2.3.1.1: Description détaillée des propriétés thermiques des matériaux	90
Tableau 4.2.3.2.1: Description détaillée des propriétés thermiques des matériaux	96
Tableau 4.2.4. 1: Détail du changement de superficie des fenêtres pour différents cas	101
Tableau 4.2.6.2: Description détaillée des paramètres choisis pour construire le cas optimal	115

Liste des figures

Figure 1.1.1: Nouveau quartier d'habitation de My Dinh, situé à l'extérieur d'Hanoi, photo de 2007	13
Figure 1.1.2: Exemple du plan d'implantation des maisons-tube dans les nouveaux quartiers	13
Figure 1.1.3 : Maisons tubes au quartier Dinh Cong – Hanoi – photo de 2005	14
Figure 1.1.4: Maison traditionnelle – design avec la nature, photo de 2007	15
Figure 1.5.1.1: Pièce de recherche sur le plan d'étage 3 (en gris)	17
Figure 1.5.1.2: Coupe A-A et position de la pièce étudiée (en gris)	18
Figure 1.7. 1: Carte d'Hanoi (source : Le, 2002)	21
Figure 1.7.1.1: Températures moyennes, minimales, maximales pour chaque mois (Source : données météorologiques transférées du programme Ecotect)	22
Figure 1.7.2.1: Humidité relative moyenne pour chaque mois (Source : données météorologiques transférées du programme Ecotect)	23
Figure 1.7.4.1: Rayonnement horizontal global, direct et diffus moyen pour chaque mois (Source : Pham, 2002)	24
Figure 1.7.4.2: Course du soleil d'Hanoi (Source : données météorologiques transférées du programme Ecotect)	24
Figure 1.7.5. 1: Rose des vents en été ; b : rose des vents en hiver (tirée de Pham, 2002)	26
Figure 2.1.1.1: Relation entre le pourcentage de la surface d'ouverture et la vitesse moyenne de l'air à l'intérieur pour la ventilation transversale (cross ventilation) et la ventilation latérale (single window), Evans (1980) tirée par Baker (1987)	31
Figure 2.1.1.2: Illustration du principe de la ventilation verticale, coupe transversale de l'édifice à bureaux du Building Research Establishment, Angleterre (tirée de Brown et Dekay, 2004)	32
Figure 2.1.1.3: Relation entre la distance verticale des ouvertures et le pourcentage de surfaces d'ouvertures par rapport à la surface de plancher et gains de chaleur à évacuer ou taux de ventilation désiré (tirée de Brown et Dekay, 2004)	33
Figure 2.1.2.1: Schéma illustrant les variables de hauteur de fenêtre Y et profondeur de la projection horizontale X exprimées dans le tableau 4 (tiré de Brown et Dekay, 2004)	34
Figure 2.1.2.2: British Council, New Dehli, Inde, de Charles Correa, illustrant la stratégie d'ombrage des murs extérieurs (tiré de Brown & Dekay, 2004)	36
Figure 2.1.2.3: Maison Zimmerman, Fairfax County, Virginie, illustrant la stratégie d'ombrage des murs extérieurs (tiré de Brown & Dekay, 2004)	36
Figure 2.1.5.1 : Exemple de composition de toiture avec feuille d'aluminium pour réduire le transfert par rayonnement (tiré de Dreyfus, 1960)	40
Figure 2.2.2.1.1: Norme 55a de ASHRAE, 2004 (tiré de ASHRAE, 2004)	46
Figure 2.2.2.1.2: Proposition de modèle adaptatif du confort (ACS) pour la norme 55a (ASHRAE, 2004) (tiré de De Dear & Brager, 2001)	48
Figure 2.2.2.2.1: Le PMV indicateur (tiré de Hamdi et al, 1999)	49
Figure 3.1. 1: Les modules de calcul de DEROB-LTH (tiré de Persson et al., 2006)	52
Figure 3.1.2. 1: Illustration de la température opérative du programme Derob-LTH (tirée de Derob-LTH, User's manual, 2006)	55
Figure 3.2.1. 1: Plan d'implantation de la maison étudiée en gris	57
Figure 3.2.1. 2: Modèle de base dans Derob-LTH	58

Figure 3.2.3.1: Échange par advection entre deux volumes (tiré de Derob-LTH, User's manual, 2006)	62
Figure 4.1.1.1: Températures extérieure, intérieure et opérative moyenne pendant juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	66
Figure 4.1.1.2: Température intérieure moyenne des murs, fenêtres, plafond et plancher, et température moyenne extérieure en juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	67
Figure 4.1.1.3: Température opérative à 1,2m du plancher à différentes heures le 15 juin, pièce au 3 ^e étage	68
Figure 4.1.1. 4: Indice PMV pour différentes heures le 15 juin, pièce au 3 ^e étage	68
Figure 4.1.2.1: Températures extérieure, intérieure et opérative moyenne durant janvier dans la pièce étudiée au troisième étage	69
Figure 4.1.2.2: Température intérieure moyenne des murs, fenêtres, plafond et plancher, et température moyenne extérieure durant janvier dans la pièce étudiée au troisième étage	70
Figure 4.1.2.3 : Température opérative à 1,2 m du plancher pour différentes heures le 15 janvier, pièce au 3 ^e étage	71
Figure 4.1.2.4: Indice PMV pour différentes heures le 15 janvier, pièce au 3 ^e étage	72
Figure 4.1.2.5: Relation entre la température opérative moyenne intérieure et la zone optimale (De Dear et Brager, 2001) durant juin et juillet	73
Figure 4.2.1.1: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure notée lors des changements d'air à l'heure pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	75
Figure 4.2.1.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents changements d'air à l'heure pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	77
Figure 4.2.1.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure du mur intérieur pour les différents changements d'air à l'heure pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	78
Figure 4.2.1.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure des surfaces dans le cas M06 pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	79
Figure 4.2.2.1.1: Température extérieure, opérative moyenne intérieure pour différentes absorptivités pendant juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	80
Figure 4.2.2.1.2: Température extérieure, moyenne intérieure pour différentes absorptivités durant janvier dans la pièce étudiée au troisième étage	81
Figure 4.2.2.1.3: Température extérieure, du plafond moyenne pour différentes absorptivités pendant juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	83
Figure 4.2.2.1.4: Température extérieure, du plafond moyenne pour différentes absorptivités durant janvier dans la pièce étudiée au troisième étage	82
Figure 4.2.2.2.1: Description détaillée du mur extérieur des différents cas	84
Figure 4.2.2.2.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour différentes épaisseurs de matériaux isolants et du mur aux mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	85
Figure 4.2.2.2.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	86

Figure 4.2.2.2.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.....	87
Figure 4.2.2.2.5: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.....	88
Figure 4.2.3.1.1: Description détaillée de la toiture pour les différents cas.....	90
Figure 4.2.3.1.1: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.....	91
Figure 4.2.3.1.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.....	92
Figure 4.2.3.1.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différentes positions des matériaux isolants durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.....	93
Figure 4.2.3.2.1: La tôle sur la toiture dans un projet d'architecture au Vietnam – la villa (Photo tirée d'Internet).....	94
Figure 4.2.3.2.2: Modèle avec la deuxième toiture dans Derob-LTH.....	95
Figure 4.2.3.2.3: La tôle et ses différentes couleurs utilisées en construction au Vietnam (photo tirée de l'Internet : www.tonthanhcong.com).....	96
Figure 4.2.3.2.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les deuxièmes toitures selon les différentes couleurs pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.....	96
Figure 4.2.3.2.5: Température extérieure et température moyenne du plafond pour les deuxièmes toitures selon les différentes couleurs pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.....	97
Fig. 4.2.3.3.6 : Description de la position et de l'épaisseur de chaque couche de matériaux des différents cas.....	98
Figure 4.2.3.2.7: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les deuxièmes toitures avec les différents matériaux pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.....	99
Figure 4.2.3.2.8: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différentes positions des matériaux isolants durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.....	100
Figure 4.2.4.1: Détail de la géométrie des fenêtres pour chacun des cas.....	102
Figure 4.2.4. 2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différentes grandeurs de fenêtres pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.....	103
Figure 4.2.4.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différentes grandeurs de fenêtres durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.....	103
Figure 4.2.4.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure en fonction des différentes grandeurs de brise-soleil pour le cas de base pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième.....	104
Figure 4.2.4.5: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure en fonction des différentes grandeurs de brise-soleil pour le cas de base durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.....	105

Figure 4.2.4.6: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure en fonction des différentes grandeurs de brise-soleil pour le cas (d) pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	105
Figure 4.2.4.7: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure en fonction des différentes grandeurs de brise-soleil pour le cas (d) durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage	106
Figure 4.2.4.8: Les volets pour chacun des cas	107
Figure 4.2.4.9: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas (a) et le cas (a) + volets, pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	107
Figure 4.2.4.10: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas (a), le cas (d) et le cas (d) + volets pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	108
Figure 4.2.4.11: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les cas (a), (a) + volets, (d) et (d) + volets durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage	109
Figure 4.2.4.12: Le cas (d) avec l'occultation plate parallèle devant la fenêtre (par l'auteur, 2009)	109
Figure 4.2.4.13: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas (a), le cas (d), le cas (d) + volets et le cas (d) + occultation plate pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	110
Figure 4.2.5.1: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas de base en fonction des différentes orientations pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	112
Figure 4.2.5.1: Température extérieure et température opérative intérieure pour le cas dans lequel la fenêtre est plus grande en fonction des différentes orientations pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	112
Figure 4.2.5.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure dans le cas où la fenêtre est la plus grande en fonction des différentes orientations durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage	113
Figure 4.2.5.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure dans le cas où la fenêtre est la plus grande en fonction des différentes orientations durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.	114
Figure 4.2.6.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas optimal et le cas de base pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	116
Figure 4.2.6.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour chacun des cas pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage	117
Figure 4.2.6.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour chacun des cas durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage	118

Liste des symboles

A	Superficie de l'ouverture (m^2)
A_b	Aire (superficie) total du corps (m^2)
cah	Changement d'air à l'heure
d	Distance (m)
E	Coefficient de l'efficacité de l'ouverture
f_{cl}	Rapport entre la surface du corps vêtu et la surface du corps exposé
h_c	Coefficient d'échange thermique par convection ($W/m^2\text{°C}$)
I_{cl}	Résistance thermique des vêtements (clo)
M	Métabolisme (W/m^2)
P_a	Pression de vapeur d'eau (Pa)
PMV	Vote moyen prévisible (index)
Q	Débit d'air (m^3/s)
T_a	Température de l'air ($^{\circ}C$)
$T_{a,out}$	Température sèche moyenne extérieure du mois ($^{\circ}C$)
T_b	Température de la surface du corps ($^{\circ}K$)
T_{cl}	Température de la surface des vêtements ($^{\circ}C$)
T_{comf}	Température confortable optimale ($^{\circ}C$)
T_j	Température de la surface j ($^{\circ}K$)
T_{mrt}	Température moyenne radiante ($^{\circ}C$)
T_n	Température confortable intérieure ($^{\circ}C$)
T_r	Température radiante ($^{\circ}K$)
T_{mo}	Température moyenne extérieure du mois pendant la période chaude ($^{\circ}C$)
V	Volume de la pièce étudiée (m^3)
v	Vitesse du vent (m/s)
V_{air}	Vitesse de l'air (m/s)
W	Travail extérieur, nul (0) pour la plupart des activités (W/m^2)
σ	Constante de Stephan Boltzmann ($= 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2, K^4$)
ε_b	Émittance du corps

CHAPITRE 1 : Introduction et contexte climatique

L'ambiance thermique confortable a toujours été le désir et le défi de l'architecte, spécialement dans les pays tropicaux, comme le Vietnam, où l'homme habite en permanence dans des conditions inconfortables (Givoni, 1978). En raison de la crise de l'énergie, l'ambiance thermique intérieure devient un des principaux thèmes de recherche en matière d'architecture. Un climat intérieur inconfortable peut mener à l'ajout d'appareils de climatisation, ce qui serait considéré comme une perte du point de vue énergétique. En effet, ayant constaté que le confort thermique est toujours en demande dans l'architecture, vu le contexte du climat inclément d'Hanoi, la capitale du Vietnam, on a décidé d'effectuer cette recherche dont un des objectifs principaux vise à comprendre les effets des interventions architecturales sur l'ambiance thermique au milieu du bâtiment.

1.1. Problème de recherche : la maison tube

Hanoi se trouve à proximité de la mer et dans une zone de mousson. Son climat présente donc une caractéristique extrêmement chaude et humide. Cette ville est présentement en pleine expansion. L'effet global de la rénovation politique en 1986 sur la structure urbaine et sur l'aspect architectural a été assez visible dans le remplacement rapide par des nouvelles constructions. Les nouveaux quartiers, comme Dinh Cong, My Dinh, Trung Hoa et Ciputra (voir fig. 1.1.1), ont rapidement été construits autour d'Hanoi afin de se joindre à son agrandissement. Ces quartiers ont entièrement répondu au besoin d'habitation des gens dans le contexte de la croissance de population et de la concentration dans le milieu urbain. Dans ces quartiers, on peut constater qu'il y a trois types principaux d'habitation : la tour d'habitation, la villa ou maison de luxe et la maison tube. Ces nouveaux quartiers, spécialement la maison tube contemporaine, ont fourni un environnement de recherche intéressant qui attire de nombreux architectes, urbanistes et chercheurs.



Figure 1.1.1: Nouveau quartier d'habitation de My Dinh, situé à l'extérieur d'Hanoi, photo de 2007.

La maison tube contemporaine a été choisie comme objet de cette recherche car elle est très répandue et populaire. En effet, la superficie relative à ce type de construction constitue jusqu'à 50% de la superficie totale des habitations dans ces quartiers. Ces constructions occupent presque 100% de leur parcelle (leur dimension étalée est généralement de 4 à 6 mètres de largeur et de 10 à 18 mètres de profondeur). Elles ont une même typologie, i.e. elles sont étroites, longues, contiennent trois murs mitoyens, ont parfois des puits de lumière et de trois à cinq étages (la hauteur de chaque étage étant de 3 à 3,6 mètres). Une parcelle rectangulaire de terrain est divisée également pour chaque maison : même nombre d'étages, même largeur et profondeur, même style architectural (voir fig. 1.1.2)

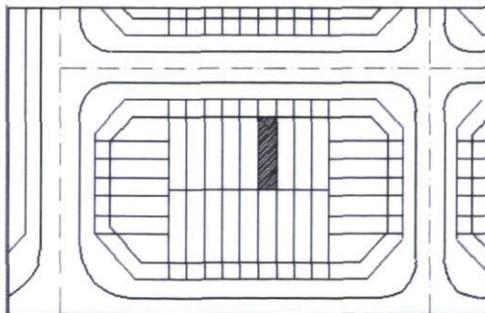


Figure 1.1.2: Exemple du plan d'implantation des maisons tube dans les nouveaux quartiers.

La maison tube (fig.1.1.3) devient une tendance dans l'architecture résidentielle d'Hanoi. En outre, sa typologie est presque similaire à celle des maisons qui ont été renouvelées dans les quartiers centraux. Alors, cette maison devient un objet architectural urbain typique. La maison tube contemporaine est présentée dans la fig. 1.1.3. Ce sont les maisons tube dans le quartier de Dinh Cong situé au sud d'Hanoi.



Figure 1.1.3: Maisons tubes du quartier Dinh Cong – Hanoi – photo de 2005.

La deuxième raison qui justifie cette étude est le problème d'inconfort thermique qui se présente assurément dans la maison tube contemporaine. En consultant les données collectées par Fredette (2002), lors de son stage sur le terrain dans le quartier central d'Hanoi, il est possible de constater une température intérieure moyenne de 34 °C dans une maison contemporaine. La température opérative est de 36,3 °C tandis que la température extérieure est seulement de 31 °C. La maison contribue donc à réduire le confort thermique plutôt que de jouer son rôle de protection contre les éléments climatiques. Il faut utiliser les systèmes mécaniques pour obtenir un environnement intérieur acceptable.

L'amélioration thermique de l'habitat doit alors commencer par l'amélioration de l'ambiance extérieure. Celle-ci dépend essentiellement du climat comme le rayonnement intense, la

température élevée et l'humidité élevée (Givoni, 1978). Dans la condition urbaine en général et dans la condition de la maison tube en particulier, l'amélioration de l'ambiance physique par les méthodes traditionnelles, comme l'utilisation de la végétation ou l'organisation du plan d'implantation, s'avère une tâche impossible à accomplir. D'un autre côté, l'architecture traditionnelle témoigne d'une connaissance en ce qui concerne l'adaptation de l'architecture avec la nature. À cet effet, l'utilisation des arbres vise à contrer l'intensité du rayonnement solaire dans les maisons traditionnelles (fig. 1.1.4)



Figure 1.1.4: Maison traditionnelle – design avec la nature, photo de 2007

Dans le cadre de cette recherche, la maison tube étudiée est celle possédant trois murs mitoyens. Il s'agit de la maison identifiée en gris dans la figure 1.1.2. Elle a été choisie parce qu'elle représente la maison tube la plus commune à Hanoi. Des détails supplémentaires à propos de cette maison seront présentés au chapitre 3.

1.2. Objectifs

La maison tube d'Hanoi présente certains problèmes liés à l'ambiance thermique. De ce fait, les objectifs de cette recherche sont présentés ci-dessous :

1.2.1. Objectifs généraux

- Analyser et décrire l'état thermique dans la maison tube contemporaine des nouveaux quartiers d'Hanoi;
- Démontrer l'influence relative des interventions architecturales de différents niveaux (coûts, implications matérielles, etc.) sur le contrôle des ambiances thermiques intérieures;

1.2.2. Objectifs spécifiques

- Explorer les meilleures interventions architecturales pour maximiser le confort thermique dans la maison tube;
- Étudier les impacts des interventions architecturales sur l'ambiance thermique dans la maison tube;

1.3. Questions de recherche

- Quelle est l'ambiance thermique actuelle des maisons tube des nouveaux quartiers d'Hanoi?
- Quelles stratégies de conception et de construction matérielle peuvent contribuer à l'amélioration de la situation, dans quelle mesure?

1.4. Caractère de la recherche

Afin d'atteindre ces objectifs, la construction d'un modèle informatisé à l'aide du logiciel de simulation énergétique Derob-LTH permettra de constituer une base de données quantifiant le comportement de la propriété thermique des maisons. La démarche de simulation vise à reproduire le plus fidèlement possible les phénomènes physiques en vue de prédire la demande en énergie, les heures d'inconfort, etc. C'est aussi une démarche quasi-expérimentale qui porte sur l'analyse qualitative et quantitative des différentes interventions architecturales sur l'ambiance thermique. Cette démarche est qualitative dans la mesure où elle qualifie les ambiances physiques. Elle est également quantitative car elle présente les effets relatifs des interventions architecturales et du confort thermique. Le logiciel de simulation utilisé est présenté au chapitre 3.

1.5. Variables d'analyse

1.5.1. Espace étudié : la pièce au troisième étage

Une pièce située au troisième étage a été choisie pour fin d'analyses car elle est la plus importante dans la maison. Cette pièce est normalement la chambre des parents dans une famille où les gens peuvent travailler le jour et dormir la nuit. Dans le contexte de la maison de trois murs mitoyens, cette pièce reçoit une grande partie de la chaleur provenant de la toiture et elle est la seule pièce qui a à la fois une façade verticale et une toiture exposée à l'extérieur. Or, elle comporte certainement le problème du confort thermique le plus critique pendant l'été. Les fig. 1.5.1.1 et 1.5.1.2 illustrent les plans et la coupe de cette maison.

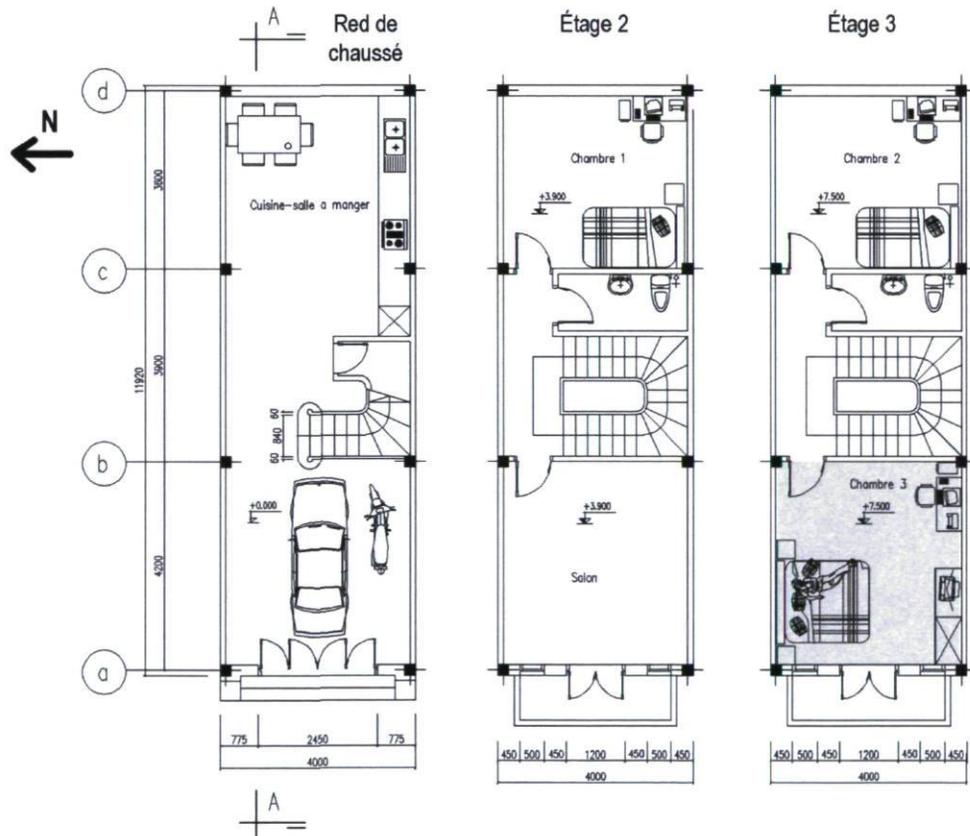


Figure 1.5.1.1: Pièce de recherche sur le plan d'étage 3 (en gris).

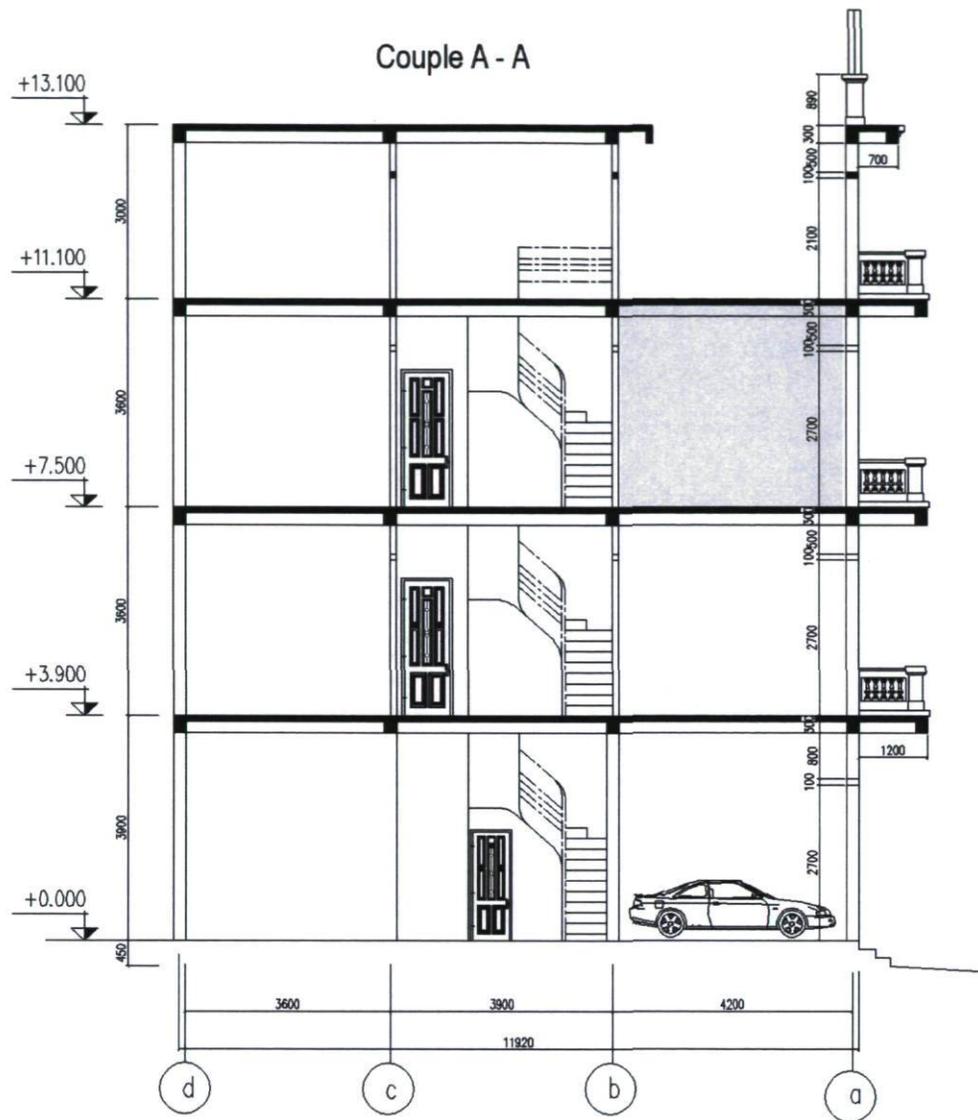


Figure 1.5.1.2: Coupe A-A et la position de la pièce étudiée (en gris).

1.5.2. Variables indépendantes

En constatant que le mur extérieur est toujours en brique de 220 mm, ce qui correspond à la méthode de construction usuelle au Vietnam, il faut confirmer que le problème du confort s'avère évident en été. D'après Givoni (1978), en été, le rayonnement solaire incident sur un mur est absorbé par la surface externe et le flux de chaleur qui en résulte traverse le matériau composant le mur de l'extérieur vers l'intérieur. Il s'ensuit que le confort de nuit pose un problème difficile à résoudre pour les constructions à forte inertie car toute la chaleur

absorbée par les parois réchauffe l'intérieur avec un déphasage de 10 heures ou plus. Janot et Djiako (1993) ont démontré les interventions fondamentales dans l'habitat en zone tropicale chaude et humide qui sont résumées ci-après :

- Il faut agir prioritairement sur la température de l'air : il faut donc limiter les apports de chaleur à travers les murs et le toit des habitations ;
- Il est également possible d'agir sur la température radiante moyenne en isolant le plafond qui est un véritable radiateur en période chaude ;
- L'utilisation d'un ventilateur pour augmenter la vitesse de l'air réduit également la contrainte thermique.

Pour la maison tube, la protection des murs contre le rayonnement solaire est aussi importante que celui de la protection des ouvertures ou du rayonnement sur la toiture. D'après Baker (1987), on peut minimiser le rayonnement solaire par les stratégies suivantes :

- Utiliser des protections solaires afin de réduire une grande partie du rayonnement incident sur la maison ;
- Réduire la transmission de chaleur par l'utilisation de matériaux réfléchissants ;
- Utiliser des matériaux isolants thermiques pour la toiture et les murs.

En étudiant les adaptations architecturales en fonction du confort thermique, on poursuit l'objectif de vérifier les impacts des interventions architecturales sur la façade extérieure et la toiture dans cette recherche. Cette vérification permet de comprendre :

- Les impacts des interventions architecturales sur la toiture en regard de l'ambiance thermique, spécialement sur la température de l'air et la température radiante moyenne dans la pièce à l'étude;
- Les impacts des interventions architecturales appliquées aux murs extérieurs sur l'ambiance thermique et la relation entre les interventions thermiques dans cette pièce.

Dans cette étude paramétrique, les variables indépendantes manipulées font partie du mur ou de la toiture :

- Le mur extérieur :
- La superficie des fenêtres;

- L'ombrage des fenêtres;
- La couleur externe;
- Les matériaux isolants.
- La toiture :
 - L'ombrage des toitures;
 - La couleur externe;
 - Les matériaux isolant sur la toiture.

Les variables indépendantes vont être présentées en détail au chapitre 2.

1.6. Hypothèses

1.6.1. Hypothèses générales

1. L'utilisation de matériaux isolants thermiques pour la toiture et les murs extérieurs permet d'améliorer significativement le confort thermique;
2. L'augmentation de la superficie des fenêtres permet d'améliorer le confort thermique (malgré la surchauffe en été, mais avec plus d'ombrage et de ventilation) dans la pièce;
3. L'ombrage des fenêtres permet d'augmenter le confort thermique;
4. Une couleur externe claire permet d'améliorer le confort thermique à faible coût.

1.6.2. Hypothèses spécifiques

5. Pour une ouverture et une construction de mur données, la température intérieure est élevée lorsque l'intensité du rayonnement solaire est grande. On peut améliorer le confort thermique dans une pièce en utilisant une couleur externe claire et un dispositif d'occultation solaire sur la fenêtre;
6. Il est possible d'améliorer le confort thermique pendant l'été en utilisant des matériaux isolants sur les murs et la toiture avec l'aide de ventilation. Mais ceci pourrait contribuer à réduire le confort thermique en hiver puisqu'on n'utilise jamais le chauffage au Vietnam;
7. Une deuxième toiture en tôle est la meilleure solution d'ombrage au contexte vietnamien en été et hiver. Il semble plus facile de réduire la température de l'air et la

température opérative de la pièce étudiée en évitant complètement le rayonnement incident sur la toiture.

1.7. Contexte climatique

Une recherche approfondie sur le climat d'Hanoi permet de définir les paramètres reliés aux situations les plus critiques. La ville d'Hanoi est située sur le delta du fleuve Rouge, à environ 100 kilomètres de la mer de Chine; la latitude de la ville est 21° nord (voir la fig. 2.1). L'élévation de la ville varie entre 4 et 11 mètres au-dessus du niveau de la mer. Hanoi signifie en vietnamien « au sein des eaux » à cause de ses liens étroits avec le fleuve Rouge et les nombreux lacs environnants.

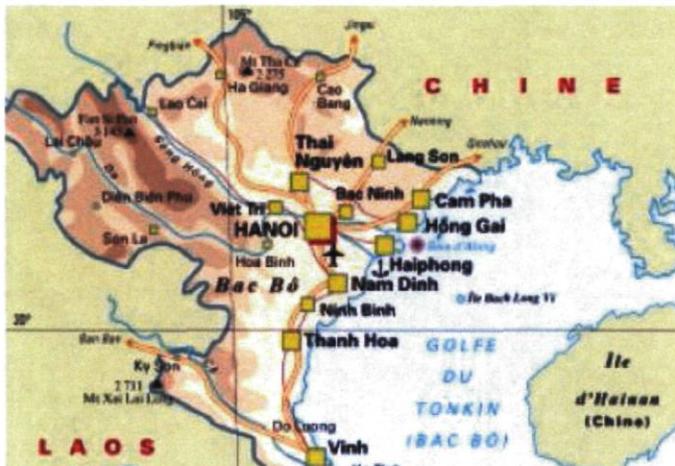


Figure 1.7.1: Carte d'Hanoi (source : Le, 2002).

Le climat caractéristique d'Hanoi est extrêmement chaud et humide. Deux grandes saisons peuvent y être constatées. Un été qui dure de mai à septembre et qui est dominé par la chaleur, l'humidité et la pluie. Par contre, l'hiver, qui s'étend de novembre à janvier, est caractérisé par un climat froid. Selon Givoni (1978), le climat d'une région donnée est déterminé par les régimes de variations de plusieurs éléments et par leurs combinaisons. Par conséquent, lors de la conception des bâtiments, les principaux éléments climatiques à considérer sont : la température de l'air, l'humidité, le vent, le rayonnement solaire et les précipitations. Les données climatiques suivantes à propos d'Hanoi sont extraites des données météorologiques et sont transférées par le programme Ecotect, un outil de simulation de l'environnement des bâtiments.

1.7.1. Températures

La température moyenne d'Hanoi oscille entre de 30 et 34 °C en été. Les mois les plus chauds sont juin et juillet. La température maximale monte jusqu'à 39 – 40 °C pendant cette période. En hiver, la température moyenne varie de 15 à 22 °C. Le mois le plus froid est janvier où la température peut baisser jusqu'à 8 °C. À cause de l'humidité importante et du vent froid qui vient du Nord et du Nord-Est, lorsque la température est assez élevée, l'hiver à Hanoi est très froid. La température moyenne ainsi que les températures maximale et minimale mensuelles sont présentées dans la fig. 1.7.1.1 :

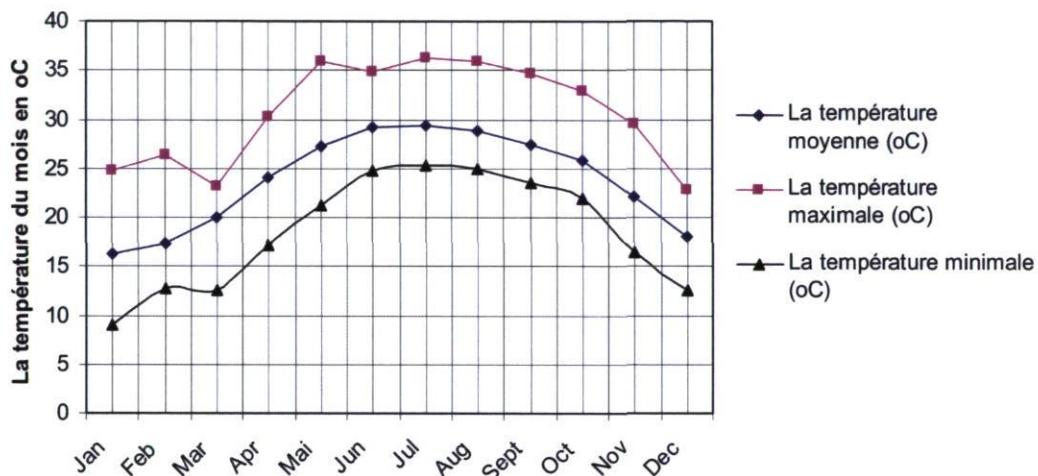


Figure 1.7.1.1: Températures moyennes, minimales, maximales pour chaque mois (Source : données météorologiques transférées du programme Ecotect).

1.7.2. Humidité

L'humidité relative moyenne oscille entre 80% à 87%. La période la plus humide est en mars et pendant la saison des pluies, à savoir de mai à septembre. L'humidité relative annuelle est très élevée parce qu'elle est soumise à l'influence des moussons qui sont des vents chargés de l'air humide de l'océan. L'humidité relative moyenne à 9h et à 15h est présentée dans la fig.1.7.2.1.

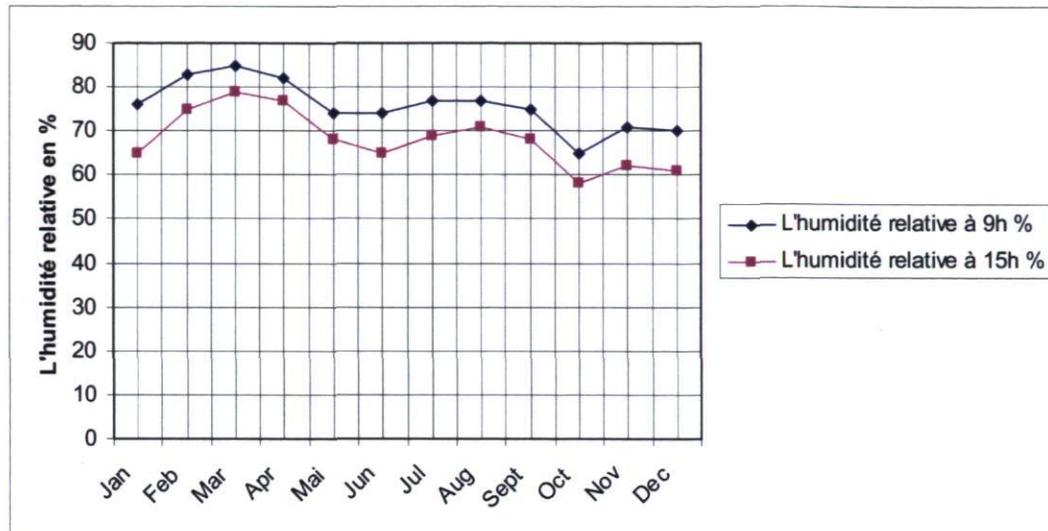


Figure 1.7.2.1: Humidité relative moyenne pour chaque mois (Source : données météorologiques transférées du programme Ecotect).

1.7.3. Précipitations

Les précipitations moyennes annuelles sont assez élevées, soit 1000 mm au total. Les mois les plus pluvieux sont juillet, août et septembre. Les précipitations peuvent atteindre jusqu'à 300 à 500 mm par mois. La précipitation élevée exige donc une protection pour les constructions de maison.

1.7.4. Rayonnement solaire

Le climat d'Hanoi est caractérisé par un ensoleillement important. La richesse de lumière y favorise l'éclairage naturel mais elle risque également de causer la surchauffe. L'intensité du rayonnement horizontal global annuel est assez élevée : 1200 - 1450 kWh/m². D'ailleurs, le rayonnement diffus peut atteindre jusqu'à 40 à 50% du rayonnement global à cause des nuages. La valeur maximale apparaît en mai, juin, juillet et août. L'intensité du rayonnement global horizontal, direct et diffus moyen pour chaque mois est montrée dans la fig. 1.7.4.1 :

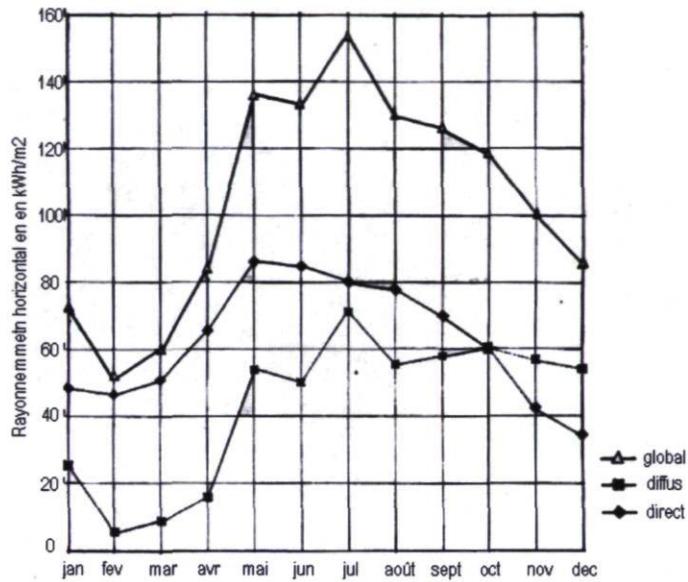


Figure 1.7.4.1: Rayonnement solaire horizontal moyen global, direct et diffus pour chaque mois (Source : Pham, 2002).

La course du soleil annuelle permet de comprendre mieux l'influence du rayonnement solaire sur les différentes façades (fig. 1.7.4.2).

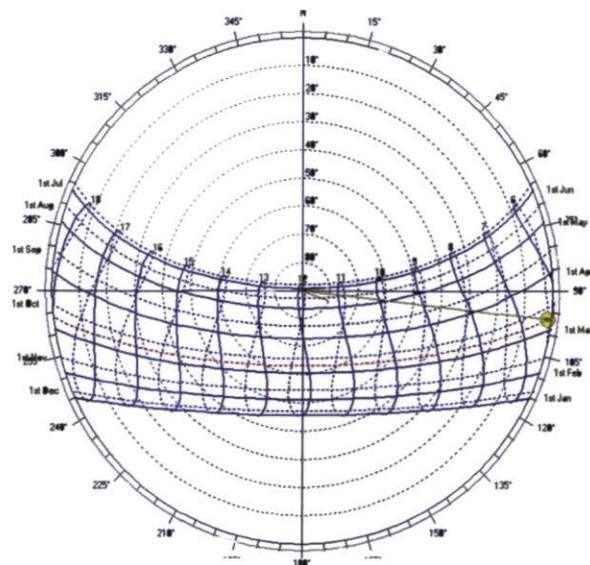


Figure 1.7.4.2: Course du soleil pour Hanoi (Source : données météorologiques transférées du programme Ecotect).

Le tableau 1.7.4.1 présente l'intensité du rayonnement global moyen pour différentes façades en été à Hanoi où on peut constater que la quantité du rayonnement solaire global sur les surfaces horizontales est presque le double du rayonnement sur les surfaces verticales.

Tableau 1.7.4.1:L'intensité du rayonnement solaire moyen par jour (W/m^2) sur des façades différentes pour Hanoi en été (tiré de Pham, 2002).

Indicateur	Horizontal	Vertical				
		Sud	Est Ouest	Sud -Est Sud-Ouest	Nord-Est Nord-Ouest	Nord
Intensité du rayonnement solaire moyen par jour (W/m^2)	425	87	182	144	176	133
Moment de l'intensité solaire maximale (h)	12	12	8 ou 16	9 ou 15	8 ou 16	8 ou 16

Dans ce cas, ce sont particulièrement la toiture et les façades Est, Ouest, Sud-Est, Nord-Ouest, Sud-Ouest et Nord-Est qui nécessitent une protection. La façade Sud reçoit relativement peu de rayonnement solaire à cause de l'altitude solaire élevée. La toiture et la façade Ouest sont plus critiques en été parce qu'elles reçoivent plus de rayonnement solaire. Sur la façade Ouest, la combinaison de la température élevée et du rayonnement solaire important qui apparaît à 16h est la cause principale d'inconfort dans la nuit car une partie de ce rayonnement est absorbée par cette façade, élevant davantage la température intérieure de la pièce.

1.7.5. Vent

La distribution et les caractéristiques du vent sur une région sont déterminées par plusieurs facteurs globaux et locaux. À Hanoi, en été, sous effet de la masse d'air maritime, le vent frais dominant vient du Sud – Est. Les vents frais secondaires sont ceux de l'Est et du Sud.

Durant l'hiver, le vent froid vient du Nord et Nord-Est ; il a son origine dans la masse d'air continentale froide d'Asie. Ce vent arrive de façon subite et il est susceptible d'abaisser la température jusqu'à 8 °C. Le vent chaud et humide qui vient du Sud et du Sud – Est apporte un climat agréable en hiver. Une rose des vents exprimant la fréquence et la vitesse moyenne des vents selon leur direction est présentée à la fig. 1.7.5.1. (1mm de longueur du trait correspond à une fréquence du vent de 2%). Le numéro au centre de la rose indique la fréquence de l'absence de vent (en %), quand il n'y a pas de vent. Les fléchettes à la fin des traits présentent la vitesse moyenne de vent ; donc, chaque tracé correspond à une vitesse de 1m/s.

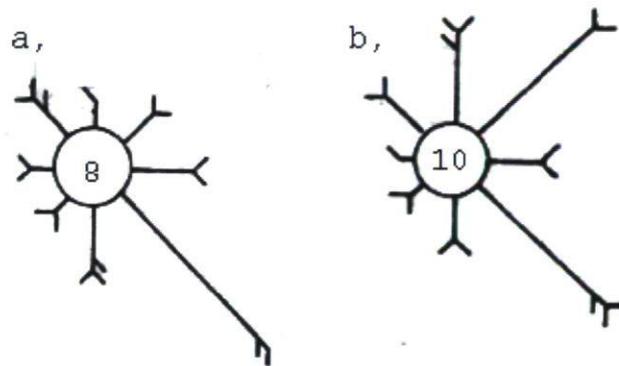


Figure 1.7.5.1: Rose des vents en été et en hiver (droite) (tiré de Pham, 2002)

Résumé

En consultant les données climatiques d'Hanoi, il faut confirmer que le problème du confort thermique apparaît évident pendant juin et juillet. La combinaison de la température, de l'humidité relative élevée et du rayonnement solaire important pendant ces mois constitue la cause principale des conditions inconfortables. En effet, une humidité de 85 à 90% avec une température de l'air de 37 °C, rend l'évaporation à partir de la peau impossible. En été, le rayonnement solaire, qu'il soit direct, diffusé par le ciel ou réfléchi par des surfaces environnantes, cause un stress important sur le bâtiment. Une partie de ce rayonnement est réfléchi, mais le reste est absorbé par les surfaces, élevant encore plus la température jusqu'à un niveau supérieur à celui de l'air ambiant (Givoni, 1978). La position de la surface détermine l'intensité du rayonnement solaire incident, ce qui se traduit par différentes valeurs de températures pour le toit et pour chaque mur. Dans ce cas, ce sont particulièrement la toiture et les façades Est, Ouest, Sud-Est, Nord-Ouest, Sud-Ouest et Nord-Est qui nécessitent

une protection. De plus, Givoni (1994) remarque que la protection solaire dans les zones chaudes et humides est plus importante et plus difficile à réaliser adéquatement qu'en climat chaud et sec pour deux raisons :

- Les fenêtres doivent être plus grandes pour une ventilation adéquate;
- Le rayonnement diffus d'un ciel couvert (plus abondante en climat chaud et humide) est toujours plus difficile à occulter que le rayonnement direct.

L'hiver qui dure seulement pendant trois mois, de novembre à janvier, est dominé par des températures moyennes de 15 °C à 22 °C. Bien que la température ne soit pas aussi basse, l'humidité élevée et le vent froid du Nord - Est rendent l'hiver très froid à Hanoi. Toutefois, les stratégies architecturales au Vietnam se concentrent généralement sur la surchauffe en été. Cette étude va également considérer la problématique du confort en hiver.

Pour bien comprendre qu'une ambiance favorable à l'intérieur du logement est obtenue tout d'abord par une conception de l'enveloppe extérieure qui protège l'intérieur de l'ensoleillement intense, de la température et de l'humidité élevée, une recherche approfondie sur le climat d'Hanoi met la problématique en contexte. Dans le but d'améliorer le confort thermique dans la maison tube au Vietnam où le climat en été est très sévère, il apparaît nécessaire de conduire une recherche des effets relatifs de différentes interventions architecturales.

CHAPITRE 2 : Cadre théorique

Ce chapitre a mené à l'identification de recherches discutant des stratégies architecturales passives connues permettant l'atteinte ou l'amélioration du confort thermique en climat chaud et humide. Cette partie considère les ressources nécessaires pour gérer l'ensemble des variables architecturales qu'on va manipuler afin d'évaluer leurs influences sur la performance de l'ambiance thermique intérieure.

Les stratégies architecturales qu'on poursuit sont les stratégies qui favorisent l'utilisation de sources d'énergie naturelles, directement disponibles sur le site, tout en assurant un niveau de confort acceptable dans la maison. Le refroidissement passif est effectivement une des stratégies de base à explorer dans le détail. D'après Murdi et al (2000), les nouvelles technologies s'appliquent le plus souvent à l'éclairage artificiel et à la ventilation mécanique alors qu'il est généralement admis que l'éclairage et la ventilation naturels sont plus plaisants et agréables pour l'occupant.

De plus, le présent chapitre permet dans un premier temps de bien définir la notion de qualité de l'ambiance thermique.

Finalement, il permet d'identifier une série de paramètres à considérer afin de porter un jugement précis sur la qualité thermique d'un espace. Une liste d'indicateurs conduisant à quantifier avec précision et rigueur a ensuite pu être dressée. Étant donné que l'objectif premier du projet de recherche est de comparer objectivement la performance de plusieurs stratégies passives en fonction de la qualité de leur ambiance thermique, les indicateurs ont été sélectionnés parce qu'ils permettent de comparer aisément plusieurs situations.

2.1. Adaptation architecturale en fonction du confort thermique

En zone tropicale humide, d'après Dreyfus (1960), il importe d'assurer une protection contre le rayonnement solaire. Cette position est aussi partagée par Givoni (1978), directeur du département de climatologie des constructions au centre de recherche du Bâtiment Technique (Haïfa, Israël), qui prétend que les stratégies qui doivent être privilégiées dans la conception et la construction d'un bâtiment sous les climats chauds et humides sont : la possibilité d'une ventilation permanente et efficace, la protection contre le soleil, la pluie et les insectes, ainsi que la prévention de l'élévation des températures intérieures pendant la journée et la réduction de celles-ci pendant la soirée et la nuit.

En consultant les recherches des auteurs précédents i.e. Dreyfus (1960), Givoni (1978), Lechner (2001), il est possible d'établir que le confort thermique est largement influencé par six variables importantes. Ce sont la ventilation, la protection contre le rayonnement solaire,

la construction à forte ou faible inertie, les matériaux associés à la couleur des surfaces, la toiture et la hauteur sous le plafond ainsi que l'orientation.

2.1.1. Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est considérée comme la stratégie principale à utiliser en climat tropical chaud et humide. Selon Merder et al (2000), dans les régions tropicales humides, le contrôle du soleil et la ventilation naturelle apparaissent comme les meilleures stratégies de refroidissement passif. La ventilation naturelle est considérée effectivement comme une solution préalable. Cette position est aussi partagée par Dreyfus (1960), Givoni (1978), Baker (1987).

Dans une recherche expérimentale pour répondre à des questions visant à comprendre les influences des stratégies de climatisation climatique ou de refroidissement passif telles l'utilisation de la ventilation naturelle transversale et l'utilisation de matériaux isolants dans la composition des murs et fenêtres, Takahashi et al (2000) ont démontré que les occupants adoptent un comportement actif afin de rechercher le confort dans une pièce ventilée naturellement. Cette recherche a aussi démontré que le comportement des occupants était plutôt uniforme et passif dans une pièce climatisée mécaniquement. Il a aussi été démontré que la température confortable d'été est inférieure à la température environnementale réelle dans la pièce climatisée. À l'inverse, dans la chambre ventilée naturellement, les occupants semblaient mieux supporter la chaleur, alors la température confortable était plus élevée.

Dans la zone tropicale humide, l'orientation des locaux doit être déterminée prioritairement en fonction de la ventilation naturelle. L'orientation privilégiée du point de vue de la ventilation sera la plupart du temps défavorable du point de vue de la protection contre le rayonnement solaire; selon Dreyfus (1960), e.g. à Hanoi, l'orientation Sud-Est est à la fois l'orientation privilégiée de la ventilation et l'orientation défavorable de la protection contre le rayonnement solaire en été. Selon Givoni (1978), les meilleures conditions de ventilation sont réunies lorsque le flux d'air change de direction à l'intérieur de la pièce, et particulièrement lorsque le flux se déplace directement de l'entrée à la sortie. Pour le contexte à l'étude (maison tube), la ventilation transversale et la ventilation verticale (i.e. ventilation par effet de cheminée, appelée « stack ventilation » en anglais) sont toujours désirables.

Ventilation transversale

En ce qui concerne la ventilation transversale, Givoni (1978) soutient que les dimensions des fenêtres déterminent une grande part de l'efficacité de la ventilation transversale. Si les fenêtres sont disposées sur un seul mur, les dimensions de ces fenêtres ont très peu d'effet sur la vitesse de l'air intérieur, spécialement avec un vent perpendiculaire à l'entrée. L'utilisation de ventilation transversale par des ouvertures dans des murs opposés fait plus que doubler les vitesses moyennes et maximales, même sans augmentation de la surface d'ouverture (Givoni, 1978; Baker, 1987). Givoni (1978) a aussi démontré que lorsque la pièce possède une seule fenêtre centrale, les vitesses moyennes de l'air sont très faibles soit à peu près 4% de la vitesse extérieure avec une petite fenêtre et 10% avec une grande fenêtre. Dans le tableau 2.1.1.1.1 (Givoni, 1978), il est possible de constater l'influence de la ventilation transversale sur la vitesse moyenne de l'air à l'intérieur pour une pièce carrée.

Tableau 2.1.1.1: Effets de la ventilation transversale sur la vitesse de l'air moyenne intérieure (% de la vitesse extérieure) (tiré de Givoni, 1978).

Ventilation transversale	Position des ouvertures	Direction du vent	Dimensions totales des ouvertures			
			2/3 du mur		3/3 du mur	
			Moy.	Max.	Moy.	Max.
nulle	1 seule ouverture zone surpression	perpend.	13	18	16	20
		oblique	15	33	23	26
	1 seule ouverture zone dépression	oblique	17	44	17	39
	2 ouvertures zone dépression	oblique	22	56	23	50
existante	2 ouvertures sur murs adjacents	perpend.	45	68	51	103
		oblique	37	118	40	110
	2 ouvertures murs opposés	perpend.	35	65	37	102
		oblique	42	83	42	94

Cette augmentation de la vitesse de l'air intérieur peut aussi être constatée dans la figure 2.1.1.1

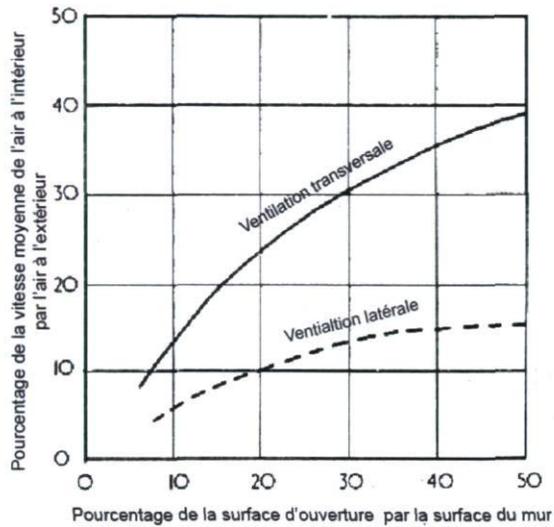


Figure 2.1.1.1: Relation entre le pourcentage de la surface d'ouverture et la vitesse moyenne de l'air à l'intérieur pour la ventilation transversale (cross ventilation) et la ventilation latérale (single window), Evans (1980) tirée par Baker (1987).

En conclusion, il importe de prévoir idéalement deux ouvertures sur deux murs opposés afin de fournir une ventilation transversale efficace. Dans la maison tube d'Hanoi, il y a trois murs mitoyens et en conséquence, une seule possibilité d'ouverture sur l'extérieur.

Un deuxième aspect à considérer dans la stratégie de ventilation naturelle est l'angle entre les ouvertures et la direction du vent dominant. D'après Givoni (1978), cet angle doit être compris entre 20° et 70° . À Hanoi, en été, le vent frais dominant vient du Sud – Est. Alors, la possibilité d'avoir un vent frais par les façades Sud – Ouest, Ouest, Nord, Nord – Ouest est faible.

Givoni (1978) a également conclu que l'effet de la ventilation transversale en vue de la réfrigération ou l'échauffement, dépend du gradient de température entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment. Pendant les heures où la température intérieure est supérieure à la température extérieure, la ventilation a pour effet d'abaisser la température intérieure, alors que lorsque les conditions sont inverses, les effets sont inversés : la ventilation fait augmenter la température intérieure. Toujours d'après cet auteur, l'amplitude des effets de la ventilation sur la température intérieure dépend de la couleur extérieure des murs et de la dimension des ouvertures ainsi que des protections solaires.

Ventilation par effet de cheminée (stack ventilation)

Selon Brown et Dekay (2000), le principal problème de la ventilation transversale est qu'elle n'est pas toujours disponible, particulièrement pendant la nuit, où la température intérieure est inférieure à la température extérieure. De plus, les vents sont souvent bloqués en amont de la maison par des obstacles urbains ou topographiques. Dans ce cas, la ventilation verticale ou par effet de cheminée apparaît comme une stratégie de refroidissement passif indépendante de l'orientation et du contexte. Cette stratégie consiste à utiliser la convection naturelle de l'air chaud qui est moins dense que l'air froid et a naturellement tendance à monter vers le haut. La masse d'air chaud est éliminée par une ouverture dans la partie supérieure de la pièce. Le taux de changements d'air obtenu dépend de la distance verticale entre les ouvertures inférieure et supérieure, de la dimension des ouvertures et de la différence entre la température extérieure et intérieure. La figure 2.1.1.2 illustre le principe de la ventilation par effet de cheminée, qui est utilisé dans l'édifice à bureaux du Building Research Establishment, en Angleterre (Brown et Dekay, 2004).

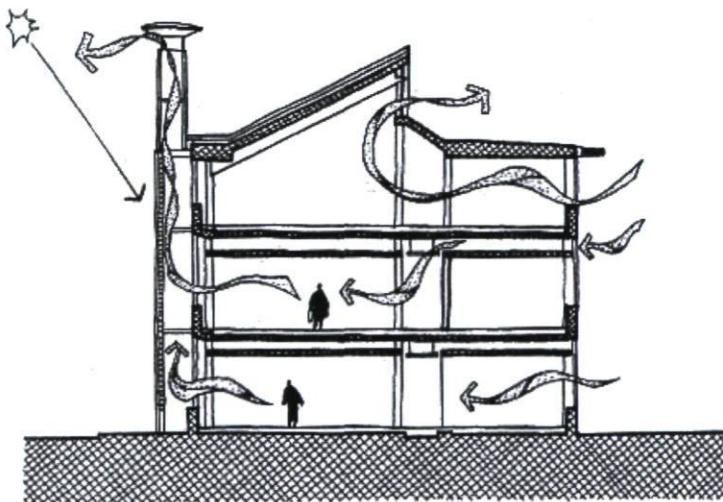


Figure 2.1.1.2.: Illustration du principe de la ventilation par effet de cheminée, coupe transversale de l'édifice à bureaux du Building Research Establishment, Angleterre (tirée de Brown et Dekay, 2004).

Brown & Dekay (2004) présentent également une figure qui permet d'estimer la distance verticale des ouvertures et le pourcentage de la surface des ouvertures par rapport à la surface

de plancher en fonction des gains de chaleur interne qui doivent être évacués ou du taux de ventilation désiré (fig.2.1.1.3). Les valeurs contenues dans ce tableau assument une différence de 1,7°C entre la température extérieure et intérieure.

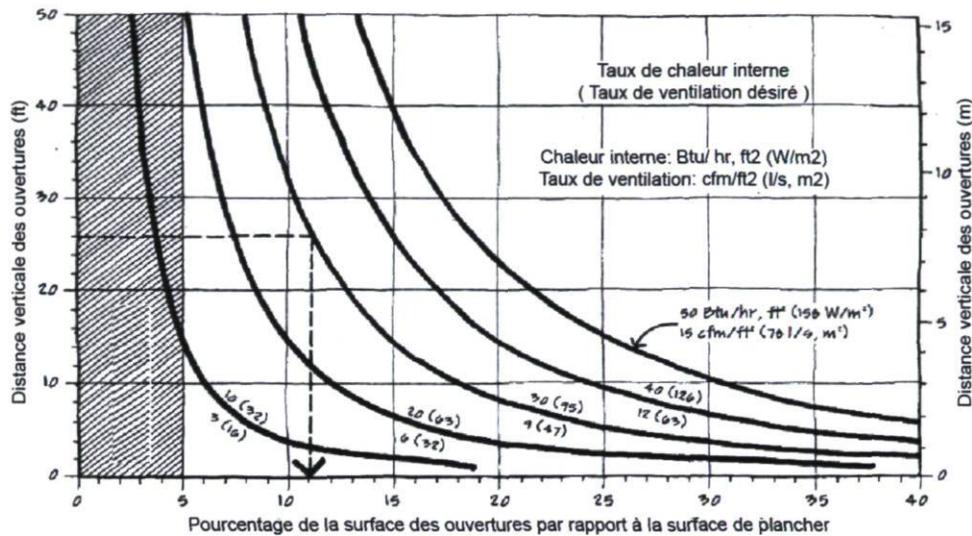


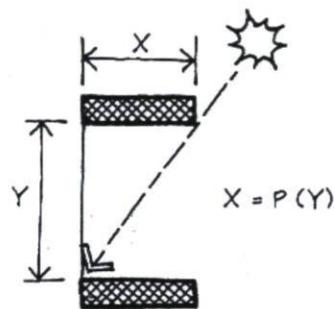
Figure 2.1.1.3: Relation entre la distance verticale des ouvertures et le pourcentage de surfaces d'ouvertures par rapport à la surface de plancher et les gains de chaleur à évacuer ou le taux de ventilation désiré (tirée de Brown et Dekay, 2004).

2.1.2. Protection contre le rayonnement solaire

Tel qu'énoncé précédemment, le rayonnement solaire est une nuisance en climat tropical chaud et humide. D'après Lechner (2001), c'est la première stratégie à mettre de l'avant pour le confort en été.

Pour les fenêtres, Dreyfus (1960) soutient que la protection contre le rayonnement solaire direct doit être totale entre 8 et 16 heures. En ce qui concerne le rayonnement diffus, il suggère de prévoir également une forme de protection pour toutes les ouvertures. La variété des types et formes d'ouvertures entraîne un grand nombre de solutions de protections solaires, associées à des coûts et un degré de satisfaction variables. L'essentiel est de s'assurer que les rayons solaires directs ne rencontrent pas directement les surfaces vitrées. Finalement, les protections doivent satisfaire aux exigences du point de vue esthétique, structural (solidité, robustesse), fonctionnel et sécuritaire (vandalisme) tout en favorisant

l'utilisation de l'éclairage naturel. Givoni (1970) décrit aussi quelques règles de base qui s'appliquent aux différentes orientations. En façade sud, les éléments horizontaux sont plus efficaces. Sous les climats chauds et aux latitudes assez proches de l'Équateur, des galeries ou avancées de toiture constituent une réponse adéquate, de même que les lames horizontales mobiles (stores vénitiens). Brown et Dekay (2004) présentent des valeurs de projections horizontales de brise-soleil, en fonction de la latitude du site et de la hauteur des fenêtres. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 2.1.2.1, qui est accompagné de l'illustration de la figure 2.1.2.1.



Valeurs de projections horizontales de brise-soleil (X), en fonction de la latitude du site (le coefficient P) et de la hauteur des fenêtres (Y)

Figure 2.1.2.1: Schéma illustrant les variables de hauteur de fenêtre Y et profondeur de la projection horizontale X exprimées dans le tableau 2.1.2.1 (tiré de Brown et Dekay, 2004).

Le tableau 2.1.2.1 présente le coefficient P permettant de calculer les dimensions X et Y pour les façades Sud, Est et Ouest et latitude de 20° N (Hanoi) :

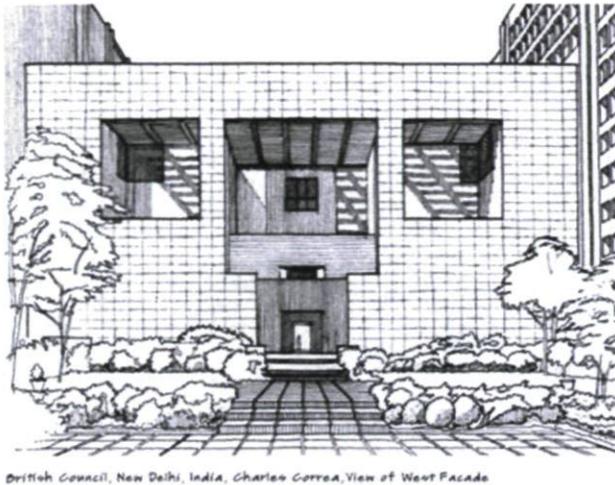
Tableau 2.1.2. 1: Indice P recommandé en fonction de l'orientation des façades et du mois, d'après Brown et Dekay (2004).

	Décembre	Novembre Janvier	Octobre Février	Septembre Mars	Août Avril	Mai Juillet	Juin
Façade Sud	1,26	1,08	0,70	0,36	0,15	0,0	Pas de soleil sur la façade
Façade Est - Ouest	1,37	1,31	1,18	1,06	0,96	0,90	0,87

Les plans verticaux sont plus efficaces dans la protection des façades Est et Ouest bien que Dubois (2001) ait démontré que c'est au moment où le soleil est directement en face des façades Ouest et Est, soit en début ou en fin de journée, qu'il importe d'occulter car l'angle solaire proche de la normale au vitrage fait en sorte qu'une grande partie du rayonnement incident est transmise à l'intérieur, les problèmes d'éblouissement sont alors importants en condition d'occupation. Dubois (2001) explique qu'il est difficile d'occulter une façade Ouest ou Est avec un plan vertical perpendiculaire au vitrage : il faut avoir recours à un plan vertical parallèle au vitrage recouvrant la fenêtre complètement (écran déroulable, store vénitien fermé ou autre dispositif du genre).

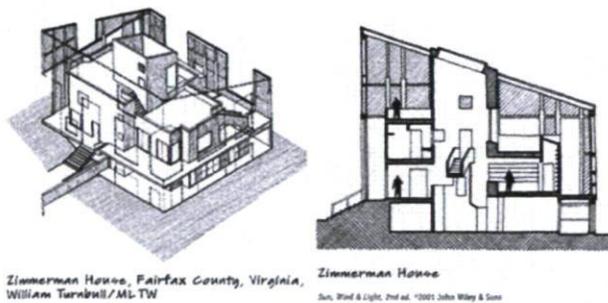
D'après Givoni (1994) l'occultation à l'extérieur du vitrage est toujours plus efficace que l'occultation intérieure. En effet, une occultation extérieure efficace peut éliminer jusqu'à 90% du rayonnement solaire, alors que dans le cas d'un système inefficace (système intérieur de couleur sombre), il faut s'attendre à ce que 75 à 80% du rayonnement solaire incident pénètre dans le bâtiment par la fenêtre. En plus, lorsque la protection est intérieure, le rayonnement solaire est transmis à travers la vitre avant d'être réfléchi et absorbé. L'énergie absorbée par le matériau est retransmise vers l'intérieur par rayonnement et convection et la presque totalité de cette chaleur est emprisonnée à l'intérieur de la pièce.

En terminant cette partie, il faut ajouter que la protection des murs contre le rayonnement solaire est aussi recommandée par Brown & Dekay (2004, voir figures 8 et 9). D'après Dreyfus (1968), ce problème est moins important que celui de la protection des ouvertures ou du rayonnement sur la toiture. La protection solaire des murs est aussi moins importante pour une construction légère que pour une construction à forte inertie. Quelques solutions intéressantes sont proposées par Givoni (1994) e.g. un rideau d'arbres ou une haie haute le long du mur à protéger, un système de claustras ou de lames brise-soleil sur la façade. Dans ce cas, ce sont particulièrement les façades Est, Ouest, Sud-est, Nord-Ouest, Sud-ouest et Nord-est qui nécessitent une protection. Brown & Dekay (2004) présentent aussi quelques exemples de projets où une stratégie d'occultation de la toiture est mise en application (fig. 2.1.2.2).



British Council, New Delhi, India, Charles Correa, View of West Facade

Figure 2.1.2.2: British Council, New Dehli, Inde, de Charles Correa, illustrant la stratégie d'ombrage des murs extérieurs (tiré de Brown & Dekay, 2004).



Zimmerman House, Fairfax County, Virginia, William Turnbull/ML-TW

*Zimmerman House
Sun, Wind & Light, 2nd ed. ©2001 John Wiley & Sons*

Figure 2.1.2.3: Maison Zimmerman, Fairfax County, Virginie, illustrant la stratégie d'ombrage des murs extérieurs (tiré de Brown & Dekay, 2004).

2.1.3. Constructions

Les constructions à forte inertie en béton ou en brique ont tendance à offrir des parois intérieures plus fraîches pendant les heures de surchauffe de la journée que les constructions légères mais le confort de nuit pose un problème difficile à résoudre pour les constructions à forte inertie car toute la chaleur absorbée par les parois réchauffe l'intérieur avec un déphasage de 10 heures ou plus (Givoni, 1978). En climat chaud et humide, il n'y pratiquement pas de variation de température entre le jour et la nuit, et donc le déphasage n'est pas une stratégie appropriée.

Machado (2000) a présenté le résultat d'une recherche en simulation réalisée pour le mois d'août 1997 au Venezuela. Dans cette recherche, différents degrés d'inertie thermique ont été étudiés en plus de variations pour les ouvertures, les protections solaires et la ventilation. Les résultats de cette recherche démontrent que l'augmentation de la surchauffe suit le pattern de ventilation, pour les deux types de constructions : à faible et forte inertie thermique. Dans le cas des maisons où les fenêtres sont ouvertes 24 heures sur 24, la surchauffe est le produit du changement de l'air entre l'intérieur et l'extérieur. Par conséquent, les recommandations visent à réduire la chaleur de l'air qui pénètre dans la maison. En ce cas, il faut se préoccuper du choix des matériaux et du traitement de l'air venant de l'extérieur.

Dans la même foulée, Givoni (1994) et Cheng (2005), avec leurs travaux portant sur la construction, présentent des visions similaires concernant la construction à forte inertie thermique en climat chaud et humide. Ces auteurs constatent que la construction légère est toujours plus performante dans les zones chaudes et humides et qu'elle favorise effectivement la ventilation naturelle, qui constitue la stratégie principale d'adaptation climatique. Toutefois Cheng (2005) a mentionné que la construction à forte inertie dans le bâti peut créer une ambiance plus confortable dans la zone chaude et humide, si des ventilateurs mécaniques sont utilisés pendant la nuit.

2.1.4. Matériaux et les couleurs des surfaces

Toujours dans le but de déterminer les stratégies efficaces de contrôle climatique, en terme d'utilisation de matériaux, Givoni (1978) soutient que les choix spécifiques de conception et de matériaux de construction affectent la réponse d'un bâtiment face aux éléments du climat : la quantité de rayonnement solaire absorbée et pénétrant dans le bâtiment, les températures de l'air et des surfaces, la vitesse de l'air et la tension de vapeur d'eau (l'humidité). D'après Cheng (2005) et Givoni (1978), une réduction significative de la température intérieure peut être obtenue par l'utilisation de surfaces dont les couleurs sont plus claires. Les surfaces blanches absorbent seulement environ 15% du rayonnement incident, alors que les couleurs sombres moyennes (gris foncé, vert, rouge) absorbent entre 60 et 70% du rayonnement solaire (Givoni, 1978). En conséquence, une utilisation abondante de couleurs claires constitue effectivement une stratégie simple, peu coûteuse et adéquate pour la zone chaude et humide.

Deux des principes importants lors du choix des matériaux ont été énoncés par Givoni (1978) :

- La capacité calorifique (chaleur spécifique) des matériaux doit être aussi faible que possible de manière à empêcher l'accumulation de chaleur pendant la journée;
- La résistance thermique des parois extérieures est avantageuse dans certaines limites car elle permet de réduire le transfert de chaleur en provenance des surfaces externes échauffées par le soleil.

En ce qui concerne l'isolation thermique, Mohammad (2005) soutient que les matériaux isolants constituent une solution évidente et logique pour économiser l'énergie de chauffage (en hiver) et de refroidissement (en été). Les matériaux isolants réduisent la transmission de chaleur par l'enveloppe.

Selon Mohammad (2005), il existe trois types de matériaux isolants: les matériaux inorganiques, organiques et métalliques. Le matériau métallique (à faible émissivité) permet de réduire la transmission de chaleur due au rayonnement. La plus grande réflexion et faible émissivité de ces matériaux tend à réduire de façon significative le rayonnement entre les surfaces. À ce sujet, il importe de mentionner que les matériaux métalliques doivent faire face à une surface d'air ou de vide. L'application de matériaux métalliques est plus efficace dans les régions où le climat est chaud et où l'intensité du rayonnement solaire élevée.

Une autre stratégie est l'utilisation de la masse thermique à l'extérieur de l'isolant. La masse extérieure accumule de la chaleur pendant le jour et cette chaleur n'est pas ou peu transmise vers l'intérieur car elle est bloquée par l'isolant. Dans une recherche par simulation visant à évaluer des charges de climatisation d'appartements à Hong-Kong, Bojic et al. (2005) ont démontré que l'utilisation de masse thermique combinée à l'isolant intérieur permet de réduire la dépense énergétique pour la climatisation jusqu'à 38%. Le potentiel d'économies dépend de la position et de la composition des masses thermiques.

Toutefois, Mohammad (2005) mentionne que l'utilisation de matériaux isolants à l'intérieur peut aussi être liée à certains désavantages, surtout si l'isolant n'est pas protégé par un pare-vapeur. La condensation de la vapeur de l'eau à l'intérieur de l'isolant peut engendrer des

problèmes de moisissure, ce qui est la cause de problèmes de santé et réduit la performance thermique de l'isolant. Il importe donc de bien contrôler les flux hygrothermiques dans l'enveloppe par l'utilisation d'un pare-vapeur et pare-air continu et par une ventilation adéquate des locaux (Mohammad, 2005).

2.1.5. Toitures et hauteur des plafonds

Il existe deux types de toitures : les toitures massives ou à forte inertie thermique et les toitures légères, à faible inertie thermique. Dans le cadre de cette recherche, on s'intéresse seulement aux toitures légères parce qu'elles sont souvent utilisées dans la maison tube contemporaine de Hanoi.

Dans le cadre d'un groupe de recherche sur les énergies renouvelables, Soubdanhan (2005) ont fait une recherche expérimentale qui vise à évaluer l'influence des matériaux isolants pour les toitures en zone tropicale. On a trouvé que la toiture reçoit environ 60% de la chaleur totale transmise par l'enveloppe du bâtiment. La toiture légère est préférable en zone tropicale humide mais elle est aussi la cause de certains inconvénients, qui proviennent de l'écart de température entre la sous-face de la toiture (le plafond) et l'air intérieur. Lorsque cet écart est élevé, la température radiante moyenne dans le local est élevée. Il en résulte un inconfort marqué dès que les conditions de ventilation intérieure sont insuffisantes (Dreyfus, 1960).

Selon Givoni (1978), les facteurs qui ont une influence sur les performances thermiques des toitures légères sont :

- La matière et la couleur externe de la toiture;
- Les conditions de ventilation de l'espace intermédiaire entre la surface extérieure et intérieure (plafond);
- La résistance thermique des deux parties.

Givoni (1978) fait remarquer que l'utilisation de badigeon de couleur claire (e.g. le blanc, le beige, etc.) sur les toits en tuiles peut réduire la température diurne du plafond d'environ 3°C. C'est le résultat d'une recherche expérimentale pour évaluer les influences de la hauteur des plafonds sur le confort thermique en Beer-Sheva (1962). D'après Dreyfus (1960), la

résistance thermique du vide d'air constitué par le comble est cinq fois plus élevée, en utilisant l'aluminium comme matériau de couverture, grâce à sa faible émissivité, qu'avec les autres matériaux de couverture. Il est évidemment possible de réduire les écarts de température entre la sous-face de toiture et l'air intérieur en installant un isolant ou en plaçant une feuille d'aluminium par-dessus le plafonnage, faisant face à un espace d'air, tel qu'illustré par la figure 2.1.1.5.1 (Dreyfus, 1960).

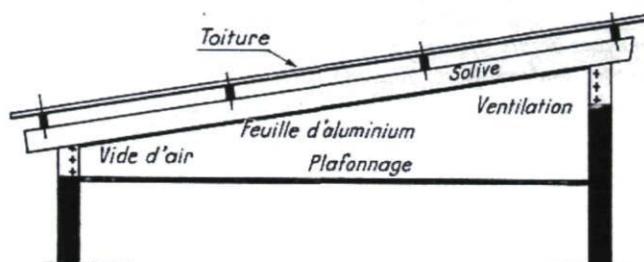


Figure 2.1.5.1 : Exemple de composition de toiture avec feuille d'aluminium pour réduire le transfert par rayonnement (tiré de Dreyfus, 1960).

Soubdanh (2005) présentent les résultats d'une étude expérimentale visant à évaluer la performance des matériaux isolants en toiture en zone tropicale. Ces auteurs ont démontré que la barrière radiative a des effets significatifs. Les matériaux isolants utilisés habituellement sont des matériaux dont la conductivité thermique est faible. En comparaison avec ces matériaux, la barrière radiative (feuille d'aluminium) est efficace. Elle permet de réduire la température intérieure dans tous les cas, avec ou sans ventilation. L'effet de réduction du flux de chaleur de 33% à 37% dépend de la valeur d'absorption des surfaces extérieures.

La ventilation du comble est également une stratégie importante dans l'architecture tropicale. Elle permet de réduire le flux de chaleur entrant dans la construction (Dreyfus, 1960). Dans une étude expérimentale réalisée en Israël, Givoni (1978) a trouvé que la ventilation des combles affectait la température de la manière suivante :

- La température de la face intérieure des tuiles a été réduite d'environ 1°C en avant midi et d'environ 2°C dans l'après-midi lorsque la vitesse du vent était à son maximum;

- La température de l'air dans le comble a été réduite d'environ 1°C. Cependant, les effets de la ventilation du comble sur la température de l'air intérieur ont été de l'ordre de grandeur de l'erreur expérimentale et n'ont pu être quantifiés avec certitude;
- Les températures des faces inférieures et supérieures du plafond ont été réduites d'à peu près 0,5°C.

En ce qui concerne la hauteur des plafonds, une étude expérimentale de Gupta et al en 1959 (tirée par Givoni, 1978) a été conduite au cours de laquelle les températures de l'air intérieur prises avec thermomètre à bulbe ont été mesurées dans quatre unités expérimentales de 3x2,5 mètres avec une véranda à l'Ouest. Les unités étaient identiques sauf pour leurs hauteurs de plafond qui étaient de 2,4 – 2,7 – 3 mètres. Par les résultats de cette recherche, Givoni (1970) a conclu que dans les régions chaudes, les pièces à plafond bas (i.e. environ 2,5 mètres) ne sont pas thermiquement inférieures aux pièces à plafonds plus élevés (i.e. jusqu'à 3,3 mètres). Cette opinion est partagée par Dreyfus (1960), qui prétend que la hauteur du sous-plafond n'a aucune incidence sur le confort.

2.1.6. Orientation

D'après Givoni (1978), l'orientation des bâtiments affecte le climat intérieur des bâtiments de deux manières, via l'influence de deux facteurs climatiques distincts :

- Le rayonnement solaire et ses effets d'échauffement sur les murs et pièces orientés selon différentes directions;
- La ventilation en rapport avec la direction des vents dominants, la position des ouvertures et l'orientation de la construction.

De plus, Givoni (1978) fait aussi remarquer que les effets de l'orientation touchent les deux aspects suivants : les températures de surfaces externes et les températures intérieures. Lorsque la couleur de la surface externe est claire, l'absorption est faible et la température de l'air ambiant domine dans le bilan du confort thermique. Dans ce cas, l'orientation a moins d'influence sur le confort à l'intérieur. Dans le cas contraire i.e. lorsque les couleurs externes sont foncées, les influences de l'orientation sur les conditions thermiques intérieures sont remarquables. Sous une exposition au rayonnement solaire, qu'il soit direct, diffus ou

réfléchi, la température de ces surfaces augmente proportionnellement à la quantité de rayonnement absorbé.

Pour un bâtiment dont les surfaces externes sont claires, les températures intérieures suivent celles de l'air extérieur, et sont affectées par la capacité calorifique de la structure, par la résistance thermique des matériaux constituant les bâtiments et par la direction du vent; elles sont donc très peu affectées par l'orientation. Par contre, la direction du vent a beaucoup d'influence sur la température intérieure. Par exemple, dans un site où les vents dominants viennent de l'Ouest, l'élévation de température intérieure au-dessus du niveau ambiant de la température de surface sera plus élevée pour un mur Est le matin que pour un mur Ouest l'après-midi, alors que l'intensité du rayonnement est pratiquement la même dans les deux cas. Il a été possible de constater que dans un bâtiment dont les surfaces extérieures sont de couleur blanche, il y a des différences négligeables (de l'ordre de 1°C) entre le mur le plus chaud (Est ou Ouest) et le plus froid (Nord). Lorsque la surface externe était grise, les différences de température entre les murs d'orientation et d'épaisseur différentes étaient plus marquées : environ 2,7°C (Givoni, 1978).

2.1.7 Conclusion

À travers des recherches discutant des stratégies architecturales passives connues qui peuvent améliorer le confort thermique en climat chaud et humide, on peut finalement tirer les paramètres que l'on va simuler pour connaître ses impacts sur l'ambiance thermique intérieure de la pièce de recherche. Ce sont :

- Ventilation
- Le mur extérieur :
 - La couleur externe;
 - Les matériaux isolants;
 - L'ombrage des fenêtres;
- La toiture :
 - L'ombrage des toitures;
 - La couleur externe;
 - Les matériaux isolants sur la toiture.

2.2. Confort thermique

2.2.1. Confort thermique au milieu d'habitation

D'après ASHRAE (1997) – (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), le confort est une notion complexe et intangible, qui n'est pas mesurable directement comme le sont par exemple les variables de température de l'air ou d'humidité relative. Le confort est obtenu quand l'humidité à la surface de la peau est faible et l'effort de régulation thermique du corps est minimal. Le confort est aussi défini comme cette condition psychologique de satisfaction avec l'environnement thermique.

Givoni (1978) a annoncé que le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales conditions de base pour le maintien de la santé, du bien-être et du confort. Les conditions dans lesquelles cet équilibre est obtenu dépendent de la conjugaison de facteurs primaires et secondaires. Les facteurs primaires comprennent : le métabolisme, la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse de l'air, la tension de vapeur d'eau et le type de vêtements et matériaux. Les facteurs secondaires comportent six éléments : la température des vêtements, le mouvement d'air sous les vêtements, la température de la peau, le taux de sudation, l'humidité de la peau et des vêtements et la capacité de refroidissement par la transpiration. De plus, toujours d'après Givoni (1978), les facteurs primaires peuvent varier de façon autonome générant des modifications au niveau des facteurs secondaires. Cette idée est aussi partagée par Lechner (2000) et Dreyfus (1960).

Alors que certains facteurs primaires (e.g. le métabolisme et le type de vêtements) sont individuels et subjectifs, certains facteurs (e.g. la température et vitesse de l'air) sont de nature environnementale. Ils sont mesurables, ce qui permet d'évaluer leur influence sur le taux d'échange de chaleur entre le corps et l'environnement thermique. Ce sont des variables qui influencent de façon importante la manière dont une personne ressent la chaleur ou le froid dans un environnement donné (McIntyre, 1980).

Selon Lechner (2000), la température de l'air affecte le taux d'échange de chaleur « sèche » du corps par convection et rayonnement avec l'environnement. L'étendue de la zone de confort selon l'axe de la température de l'air passe de 20 °C (68°F) en hiver à 25°C (78°F)

en été (considérant un taux d'acceptabilité de 80% des personnes interrogées). Cette position est aussi partagée par Stein et Reynolds (2000), la température de l'air de 20 °C à 25 °C est aussi considérée comme température confort pour un ingénieur mécanique. La sensation d'humidité de la peau augmente également avec la température de l'air lorsque le niveau de l'humidité est élevé et la vitesse de l'air faible (Givoni, 1978). Cette notion est fondamentale au développement de stratégies architecturales dans les climats chauds et humides.

Toujours selon Givoni (1978), l'humidité de l'air peut être exprimée de diverses façons : en terme d'humidité relative ou tension de vapeur d'eau. L'humidité relative et la température de l'air ambiant sont les facteurs qui déterminent l'évaporation de l'humidité de la peau. L'air sec absorbe facilement l'humidité de la peau, ce qui résulte en une évaporation rapide et un refroidissement efficace du corps. À l'intérieur de certaines limites de températures de l'air, par exemple, entre 20 et 25 °C, les variations d'humidité relative comprises entre 30 et 85% sont pratiquement imperceptibles par l'humain. Cette position est aussi partagée par De Dear et al (1991). Par contre, lorsque la température de l'air augmente au-dessus de 25 °C, l'influence de l'humidité sur la sensation de confort thermique devient plus importante. Ce point de vue devient plus important vu la condition du climat d'Hanoi. Lorsque la haute humidité relative se conjuguant avec la haute température en été, l'obtention du confort thermique est plus difficile. Finalement, il importe de retenir que l'humidité relative doit être inférieure à 60% en été et 80% en hiver et supérieure à 20% en toute saison, d'après Lechner (2000).

C'est bien connu, la température moyenne radiante (T.M.R) est une moyenne pondérée de la température des surfaces d'une pièce. La pondération est fonction de l'aire projetée des surfaces de la pièce sur le point de mesure. Dans une étude des effets de l'élévation de la T.M.R sur les réactions physiologiques de sujets vêtus seulement en short, McPherson (1973) a trouvé qu'une augmentation de la T.M.R de 1°C élève le taux de sudation de 11g/h en moyenne. L'effet de l'élévation de la T.M.R est plus marqué à une température d'air plus élevée, ce qui a des conséquences importantes pour le maintien du confort thermique et le développement de stratégies bioclimatiques en climat chaud et humide.

La vitesse de l'air affecte le taux d'échange de chaleur du corps avec l'environnement de deux façons : par la convection et l'évaporation. La convection est le processus de transport de l'air chaud à proximité du corps; il s'agit essentiellement d'un transport de masse d'air. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus ce transport s'effectue efficacement. L'évaporation de la vapeur d'eau est aussi accélérée par le mouvement d'air ambiant car le transport de la masse d'air saturée de vapeur d'eau s'effectue plus efficacement aussi. Il existe une valeur optimale de vitesse de l'air pour laquelle le mouvement de l'air a un effet optimal de refroidissement. La réduction de la vitesse de l'air au-dessous de cette valeur est souvent cause d'inconfort. Cette vitesse optimale n'est pas une constante; elle dépend de la température, de l'humidité, du métabolisme et des vêtements. D'après Lechner (2000), la zone de confort se situe entre 0,1 et 0,3 m/s (20 à 60 pieds/minute). Des vitesses entre 0,3 et 1 m/s (60 à 200 pieds/minute) sont acceptables, mais cela dépend des types d'activités.

En résumé, il est impossible d'exprimer les réponses de l'organisme aux conditions thermiques en fonction d'une seule variable de l'environnement telle que la température, l'humidité relative ou la vitesse de l'air. C'est l'effet combiné de ces variables qui détermine le confort thermique. Ces interdépendances sont bien exprimées par une série de formules, dont le résultat est communément appelé un « indicateur thermique » (Givoni, 1978). Le but de ces indicateurs thermiques est de permettre une estimation des effets combinés des facteurs de l'environnement sur le confort thermique. Un grand nombre de recherches ont été effectuées afin de développer ces indicateurs thermiques. Dans le cadre de cette recherche, les indicateurs thermiques qui tiennent compte des variables environnementales mesurables directement telles que température de l'air, la TMR, l'humidité et la vitesse de l'air sont considérés. Il s'agit des indicateurs suivants :

- La température opérative (Top);
- Le PMV (predicted mean vote, Fanger, 1970).

2.2.2. Indicateurs thermiques

2.2.2.1. La température opérative (Top)

La température opérative (Top) est l'indicateur thermique le plus connu et le plus couramment utilisé par les ingénieurs en mécanique. La température opérative est la moyenne entre la température de l'air d'un espace (bulbe sec) et la moyenne de la température des

surfaces environnant cet espace, pondérée par l'aire projetée de chaque surface sur le point de mesure (ou la température moyenne radiante, TMR) (Stein & Reynolds, 2000). La norme 55a (ASHRAE, 2004, voir fig.2.2.2.1.1), établit la zone de confort thermique qui permet l'atteinte de 80% d'acceptabilité des répondants en fonction de l'humidité relative et de la température opérative en été et en hiver. Cette norme assume que l'activité est légère (1.2 met), que l'habillement consiste en 0.9 clo (en hiver) et 0.5 clo (en été), et que le mouvement d'air est 0.15 m/s (en hiver) et 0.25 m/s (en été). La température opérative optimale est 22.7 °C en hiver et 27.2 °C en été.

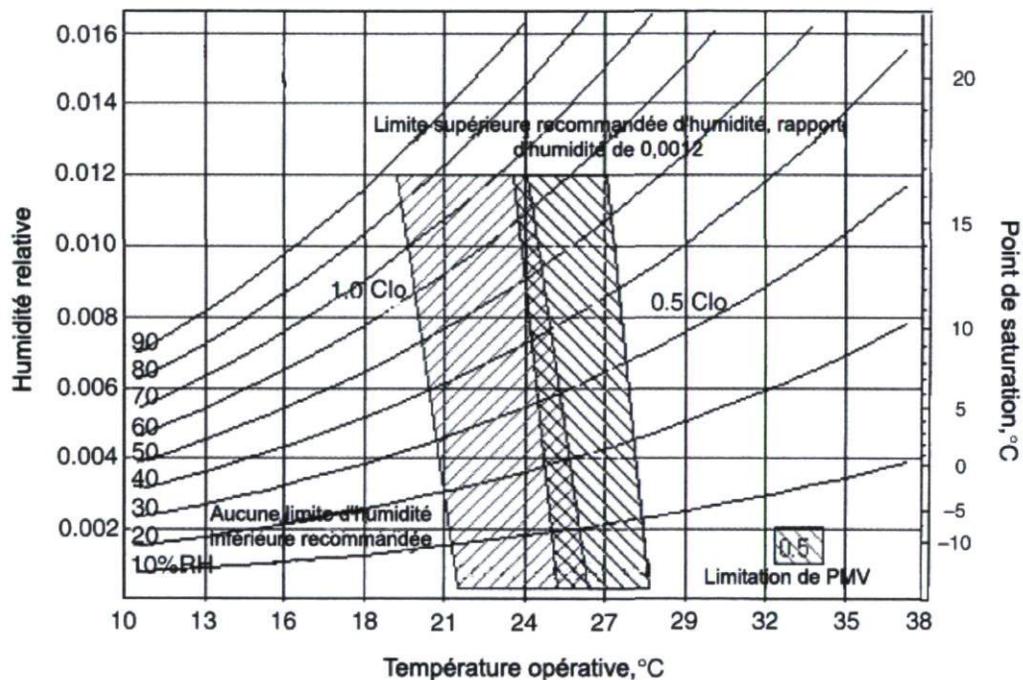


Figure 2.2.2.1.1: Norme 55a de ASHRAE, 2004 (tiré de ASHRAE, 2004)

Cependant, des chercheurs du ASHRAE ont établi la zone confortable pour un bâtiment de type exclusif i.e. un bâtiment ventilé et climatisé par des moyens mécaniques, toute forme de ventilation naturelle étant exclue. Celui-ci insiste sur la nécessité de déterminer de nouveaux critères d'analyse pour la qualité des ambiances thermiques pour la maison ventilée naturellement. En réponse aux besoins, une équation permettant de calculer la température confortable optimale pour une maison ventilée naturellement a été établie par De Dear et Brager (2001) :

$$T_{\text{comf}} = 0,31 T_{\text{a,out}} + 17,8 \quad (2)$$

Où

T_{comf} (°C): Température confortable optimale

$T_{\text{a,out}}$ (°C): Température sèche moyenne extérieure du mois

Cette équation est basée sur la norme ASHRAE 55a. Les résultats de recherches récentes démontrant que la température confortable intérieure est significativement plus élevée dans les localités où le climat est chaud, l'inverse étant également observé en climat froid. Ces recherches démontrent que ce phénomène n'est pas simplement influencé par les différentes couches de vêtements portés. La température intérieure confortable augmente approximativement d'un degré pour une élévation de trois degrés de la température extérieure (De Dear & Brager, 2001). Ce résultat est ainsi appuyé par le modèle adaptatif d'Auliciems (1983). Il faut noter que dans le modèle d'Auliciems, l'équation (1) considère la valeur de base de 17,6°C, alors que dans la recherche de De Dear & Brager (2001), la valeur 17,8°C, est utilisée.

- Une équation permettant de calculer la limite supérieure de température permettant l'atteinte de 80% d'acceptabilité des répondants :

$$T_{\text{comf}} = 0,31 T_{\text{a,out}} + 21,3 \quad (^\circ\text{C}) \quad (3)$$

(2,5°C de plus que la température confortable optimale)

- Une équation permettant de calculer la limite supérieure de température conduisant à l'atteinte de 90% d'acceptabilité des répondants :

$$T_{\text{comf}} = 0,31 T_{\text{a,out}} + 20,3 \quad (^\circ\text{C}) \quad (4)$$

(3,5°C de plus que la température confortable optimale)

- Une équation permettant de calculer la limite inférieure de température conduisant à l'atteinte de 80% d'acceptabilité des répondants :

$$T_{\text{comf}} = 0,31 T_{\text{a,out}} + 14,3 \quad (^\circ\text{C}) \quad (5)$$

(2,5°C de moins que la température confortable optimale)

- Une équation permettant de calculer la limite inférieure de température conduisant à l'atteinte de 90% d'acceptabilité des répondants :

$$T_{\text{comf}} = 0,31 T_{\text{a,out}} + 15,3 \quad (^\circ\text{C}) \quad (6)$$

(2,5°C de moins que la température confortable optimale).

Il faut noter que l'application de ce nouveau modèle de confort adaptatif est limité pour les zones extrêmes chaudes et humides, où la température moyenne du mois est élevée et souvent située à l'extérieur de la zone de confort. Dans cette condition, un humain peut tolérer une température de l'air extérieure plus élevée que 32°C et donc, la ligne supérieure délimitant la zone de confort peut être déplacée dans ce cas. La relation entre la température opérative et la moyenne de la température de l'air extérieur du mois est présentée à la fig.2.2.2.1.2.

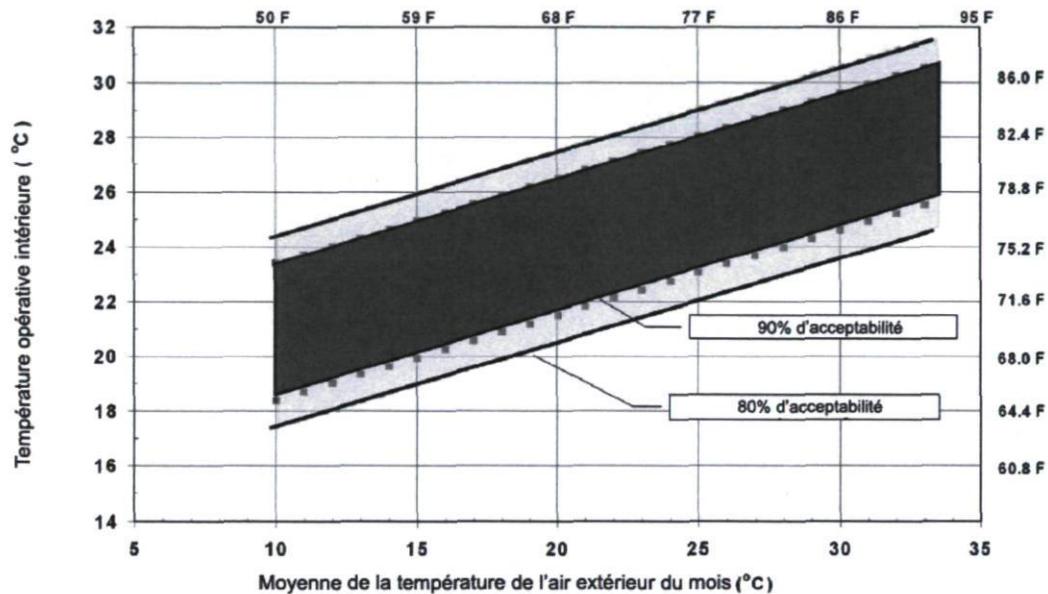


Figure 2.2.2.1.2: Proposition de modèle adaptatif du confort (ACS) pour la norme 55a (ASHRAE, 2004)

Humphreys & Nicol (2000) ont également proposé un modèle adaptatif de confort servant à déterminer la relation entre la température confortable intérieure et la température extérieure pour une maison ventilée naturellement. Ce modèle a permis de développer l'équation suivante :

$$T_n = 0,534 T_{\text{rmo}} + 12,9 \quad (^\circ\text{C}) \quad (7)$$

Où :

T_n : Température confortable intérieure (°C)

T_{rmo} : Température moyenne extérieure du mois pendant la période chaude (°C)

Nicol (2004) a démontré qu'avec l'utilisation d'un ventilateur, la température de confort peut être augmentée de 2°C. Lorsque l'humidité relative est élevée, il est nécessaire de diminuer de 1°C la température confortable. Par une analyse théorique, si le mouvement de l'air est de plus de 0,1 m/s et constant, la température confortable peut augmenter de plus de : $7 - [(50 / (4 + 10v^{0.5}))]$ °C, où v est la vitesse de l'air (m/s).

2.2.2.2. Le PMV (predicted mean vote – vote moyen prévisible)

Le PMV de Fanger (1970) est un indicateur thermique qui permet d'évaluer si le climat d'une pièce crée un environnement thermique confortable pour les occupants (Hamdi et al, 1999). Fanger a publié une équation permettant d'évaluer l'influence de la combinaison des variables de l'environnement telles que la température de l'air, l'humidité relative, la température moyenne radiante et la vitesse de l'air, en considérant le métabolisme (niveau d'activité) et les vêtements portés. La valeur de PMV permet d'évaluer la sensation thermique du sujet selon la correspondance représentée à la fig.2.2.2.2.1.

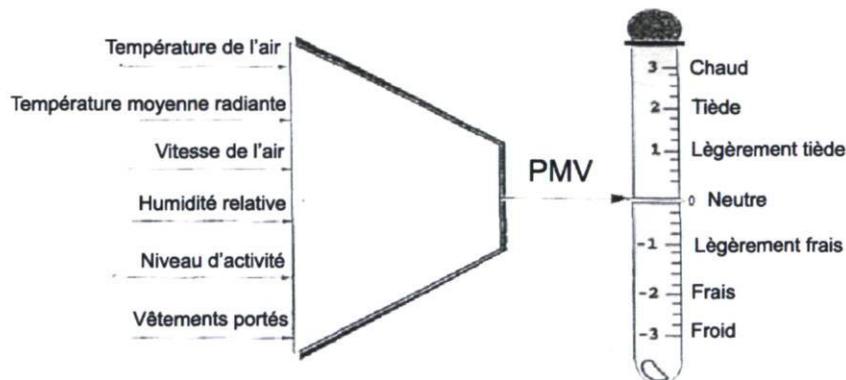


Figure 2.2.2.2.1: Le PMV indicateur (tiré de Hamdi et al, 1999).

Le standard ISO 7730 (1994) indique que le PMV doit être maintenu entre -0,5 et 0,5 afin d'assurer un climat confortable à l'intérieur d'une maison. L'équation permettant de calculer le PVM est la suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & (0,028 + 0,3033 e^{-0,036M}) [(M - V) - 3,05[5,733 - 0,000699(M - V) - P_a] \\
 & - 0,42[(M - V) - 58,15] - 0,0173M (5,867 - P_a) - 0,0014M (34 - T_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{nrt} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c(T_{cl} - T_a)] \quad (8)
 \end{aligned}$$

Où :

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028(M - V) - 0,155 I_{cl} [3,9610 - 3 f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] - f_{cl} h_c(T_{cl} - T_a)]$$

$$h_c = 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} \quad \text{si} \quad 2,38 (T_{cl} + T_a)^{0,25} > 12,1 V_{air}^{-2}$$

$$h_c = 12,11 V_{air}^{-2} \quad \text{si} \quad 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} < 12,1 V_{air}^{-2}$$

$$M = \text{Métabolisme} \quad (\text{W/m}^2)$$

$$W = \text{Travail extérieur, nul (0) pour la plupart des activités} \quad (\text{W/m}^2)$$

$$I_{cl} = \text{Résistance thermique des vêtements} \quad (\text{clo})$$

$$f_{cl} = \text{Rapport entre la surface du corps vêtu et la surface du corps exposée}$$

$$T_a = \text{Température de l'air} \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_{mrt} = \text{Température moyenne radiante} \quad (^\circ\text{C})$$

$$V_{air} = \text{Vitesse de l'air} \quad (\text{m/s})$$

$$P_a = \text{Pression de vapeur d'eau} \quad (\text{Pa})$$

$$h_c = \text{Coefficient d'échange thermique par convection} \quad (\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C})$$

$$T_{cl} = \text{Température de la surface des vêtements} \quad (^\circ\text{C})$$

Nicol (2004) dans une recherche du modèle adaptatif en zone tropicale chaude et humide a démontré la faiblesse de l'indicateur PMV pour évaluer le confort en climat chaud et humide. La problématique apparaît donc clairement. Une combinaison de la température de l'air de 30°C avec la vitesse de l'air de 1m/s amène toujours la conclusion de la condition chaude (un indicateur de PMV est supérieur à 2). Effectivement, quelques recherches expérimentales ont montré que cette température est encore confortable pour les gens. En effet, l'auteur suggère que le PMV indique une sensation thermique plus chaude que ce que les gens ressentent en réalité. Selon Nicol, les résultats du calcul de PMV tendent à encourager l'utilisation de climatiseur alors que cela n'est pas nécessaire en réalité.

CHAPITRE 3 : Méthodologie

3.1. Logiciel de simulation énergétique dynamique

DEROB (Dynamic energy response of building) a été à l'origine développé par le laboratoire de Simulation Numérique de l'Université de Texas aux États-Unis (Arumi-Noé, 1979). La version de DEROB, utilisée dans cette étude, sous l'appellation DEROB-LTH (Lund Tekniska Högskolan) a été modifiée par le département de Sciences du Bâtiment de l'Université de Lund en Suède. DEROB-LTH est un outil de simulation dynamique pour étudier la performance énergétique des bâtiments (Källblad, 1999).

3.1.1. Interface de modélisation, avantage et validation de l'outil

DEROB-LTH possède une interface facile à utiliser. La forme du bâtiment peut être modélisée d'une manière flexible. Le rayonnement solaire incident est calculé en détail. L'influence des occultations solaires sur les surfaces du bâtiment est également calculée selon un modèle détaillé. DEROB-LTH est en mesure de traiter les systèmes d'occultation de manière bidirectionnelle. L'ombrage des murs peut être placé dans le système de coordonnées, qui permet de décrire l'environnement immédiat à savoir les bâtiments voisins, les arbres, etc. Certains systèmes d'occultation comme l'isolation mobile et les rideaux sont aussi calculés par le programme. Ces systèmes peuvent être décrits en précisant leurs propriétés thermiques telles que le facteur d'absorption et la résistance thermique. Le rayonnement solaire transmis par un rideau est traité comme rayonnement parfaitement diffus (Wall et Wallentén, 1999).

L'avantage de DEROB-LTH est que, en fonction des données d'entrée qui ont été changées, seulement le module où les modules affectés par le changement doivent être remis en marche pour un nouveau calcul. Les modules sont exécutés séparément, ce qui permet de reprendre les calculs au milieu de la routine complète si nécessaire. Par exemple, si un nouveau fichier climatique est défini dans le modèle, la géométrie du bâtiment n'a pas à être recalculée : celle-ci peut être utilisée conformément à la simulation précédente. Ceci a comme effet de réduire le temps de calcul. Le rayonnement solaire diffus et direct est traité séparément. Le traitement du rayonnement solaire détaillé dans le processus de calcul, qui est plus exact que dans les autres programmes énergétiques typiques, est aussi un des principaux avantages de DEROB-LTH (Wall, 1996). Le désavantage principal du programme est une description des

systèmes mécaniques (ventilation, chauffage, refroidissement) relativement simplifié. Cela a toutefois peu d'incidence pour les considérations de la présente recherche puisque l'étude porte sur le design passif.

Le programme comprend six modules fonctionnant de façon itérative. Il comporte également trois modules de traitement des résultats (Persson et al., 2006) (voir la fig. 3.1.1.1).

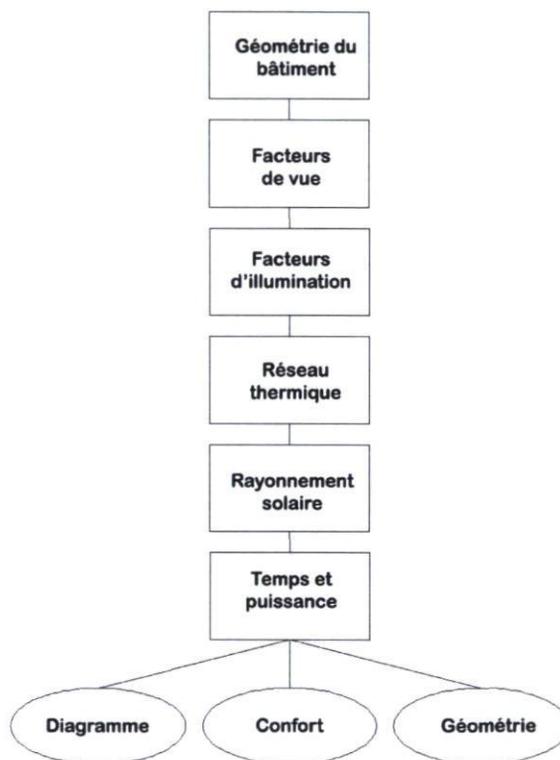


Figure 3.1.1 : Les modules de calcul de DEROB-LTH (tirée de Persson et al., 2006).

Le premier module calcule la géométrie du bâtiment avec les données d'entrée. À la deuxième étape, les facteurs de vue pour le transfert de chaleur radiante entre les surfaces du bâtiment sont calculés. Le troisième module détermine les facteurs de distribution pour le rayonnement à longueurs d'onde courtes ou longues. Le quatrième module gère les propriétés de transfert thermique et le cinquième module calcule la distribution horaire du rayonnement solaire. La quantité d'énergie nécessaire pour refroidir ou chauffer le bâtiment ainsi que la température horaire sont sauvegardées dans le sixième module. Finalement, les trois derniers modules permettent de représenter des diagrammes, des images du confort et la géométrie du bâtiment.

Le programme utilise les données horaires de la température extérieure et de l'intensité du rayonnement solaire. La position horaire du soleil est mise à jour quatre fois par mois. La fenêtre et le modèle d'ombrage ont les caractéristiques principales décrites ci – dessous (Wallentén, 2000) :

- Utilisation du lancer du rayon et calcul de Fresnel pour le rayonnement direct ;
- Utilisation de facteur de vue et calcul de Fresnel pour le rayonnement diffus ;
- Un seul nœud thermique pour chaque verre composant la fenêtre ;
- Les systèmes d'occultation solaire transmettent et reflètent le rayonnement diffus et direct;
- Un seul nœud thermique pour estimer l'équilibre thermique pour tous les systèmes d'occultation ;
- Le rayonnement infrarouge vers le ciel est considéré.

Le bâtiment est défini en tant qu'un ensemble de différents volumes avec une ou plusieurs pièces dans chaque volume. En considérant les gains solaires et les gains internes ainsi que les propriétés thermiques et optiques de l'enveloppe, il est possible de calculer l'énergie nécessaire pour refroidir et chauffer le bâtiment afin d'obtenir la température intérieure désirée (voir le tableau 3.1.1.1).

Tableau 3.1.1.1: Intrants et extrants pour le programme de simulation de DEROB-LTH (tirée de Persson et al., 2006).

Intrants	Extrants
Géométrie du bâtiment	Demande d'énergie totale pour refroidir ou chauffer (kWh)
Propriétés thermiques et optiques des matériaux	Charges maximales pour refroidir et chauffer (W) (Demande de pointe)
Données climatiques horaires (sous forme de fichier)	Température de l'air (°C), température opérative (°C), PMV (indice du confort)
Ventilation, infiltration, exfiltration	Température des surfaces
Température de consigne pour le chauffage et le refroidissement	Rayonnement solaire incident, absorbé, transmis
Gains internes (des occupants et des appareils)	

Les résultats sont présentés pour chaque volume et chaque heure. La demande d'énergie nécessaire pour refroidir ou chauffer afin de conserver une température donnée est calculée et présentée en Wh/h ou W.

Puisque la présente recherche ne vise pas la validation d'un outil de simulation, mais bien l'évaluation des conditions thermiques à l'aide de ce dernier, il suffit de confirmer que cet outil a été validé scientifiquement. Il existe plusieurs publications rapportant des résultats de recherche obtenus avec DEROB-LTH, i.e. les travaux de Källblad (1998), Wall (2001), etc. Les résultats de recherche et l'utilisation de l'énergie dans les atria de Wall (1996) ont permis de conclure que le logiciel de simulation DEROB-LTH permet de prédire adéquatement la performance énergétique des bâtiments. La validation du logiciel est vérifiée par les comparaisons des températures intérieures mesurées et simulées dans divers espaces étudiés. Les résultats de ces comparaisons présentent une bonne concordance entre le calcul de DEROB-LTH et les températures mesurées dans les espaces étudiés. Il faut noter que seules les stratégies architecturales passives sont appliquées dans ces espaces. Une autre comparaison entre les simulations et mesures dans le cadre d'une recherche sur les systèmes d'ombrage des bâtiments a permis de renforcer la validation du programme (Wall, 2001). L'erreur relative moyenne entre les résultats mesurés et simulés était de 1% à 5% (Wall, 2001), ce qui démontre la validité du programme.

Bien qu'il existe plusieurs programmes dynamiques de simulation énergétique, le programme DEROB-LTH domine par ses avantages, sa simplicité ainsi que la précision et le détail attribué au rayonnement solaire ou à l'occultation solaire; aussi, son processus de validation s'avère un outil adéquat qui permet de rencontrer les objectifs et hypothèses de recherche. Ce programme a le potentiel de prédire de façon suffisamment précise les conditions thermiques d'un espace, à condition que ce dernier soit modélisé avec précision (géométrie, matériaux) et que seules des stratégies architecturales passives y soient étudiées. Le rayonnement solaire est un des éléments affectant de façon importante le confort thermique à Hanoi. Or, cet aspect est traité de façon détaillée dans DEROB-LTH.

3.1.2. Équation fondamentale

Comme on l'a mentionné, la température opérative et le PMV sont les indicateurs thermiques qui permettent d'évaluer si le climat de la pièce étudiée crée un environnement thermique

confortable pour les occupants. De par ses avantages, le programme DEROB-LTH permet d'illustrer la distribution des indicateurs par les graphiques (Källblad, 1998).

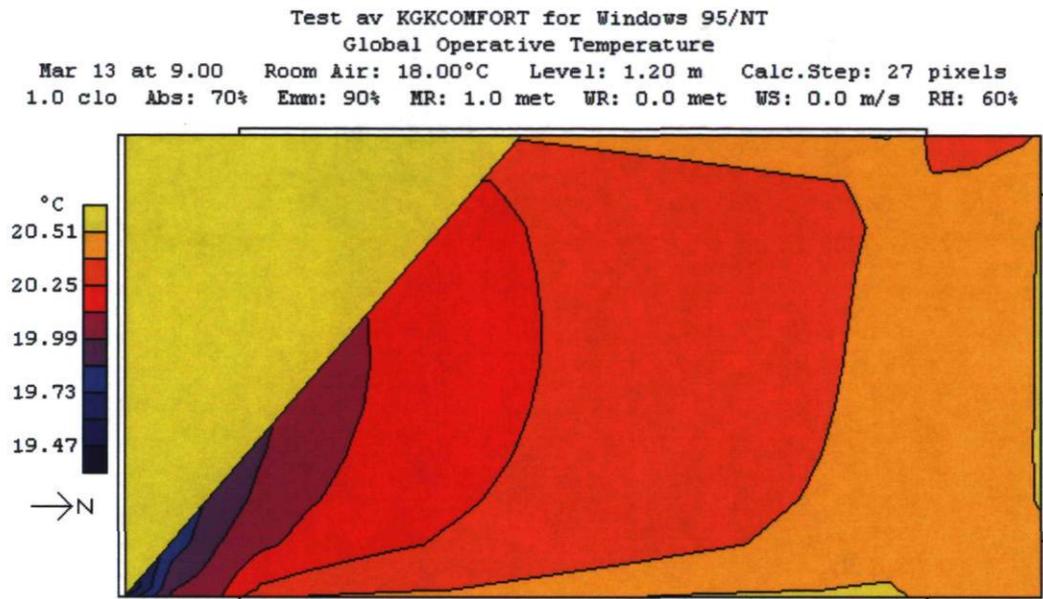


Figure 3.1.2.1: Illustration de la température opérative du programme Derob LTH (tirée de Kvist H, 1999).

Le PMV est calculé en conformité avec le standard d'ISO 7730 (1974) comme l'équation 8, sauf deux petites exceptions (Källblad, 1998) :

- L'équation permettant de calculer h_c est changée pour éviter les problèmes quand la température de l'air est plus élevée que la température des vêtements :

$$h_c = \max \{ 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25}, 12,11 V_{air}^{-2} \} \quad (9)$$

- L'équation pour calculer le rapport entre la surface du corps vêtue et la surface du corps exposée (f_{cl}) est déterminée comme suit :

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 I_{cl} \text{ si } I_{cl} \leq 0,075 \quad (10)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 6,045 I_{cl} \text{ si } I_{cl} > 0,075 \quad (11)$$

La température opérative est déterminée en conformité avec le standard d'ISO 7730 (1974). Si la température radiante est calculée par le transfert total de chaleur dans un environnement non-uniforme, elle est déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$Q = \epsilon_b \sigma A_b (T_b^4 - T_r^4) + h_c A_b (T_b - T_a) \quad (12)$$

Dans un environnement bien hermétique où les températures des surfaces sont égales à la température opérative, le transfert total de chaleur est converti :

$$Q' = \varepsilon_b \sigma A_b (T_b^4 - T_o^4) + h_c A_b (T_b - T_o) \quad (13)$$

En considérant que Q doit être égal à Q', on peut déterminer la température opérative par cette équation :

$$T_o^4 - T_r^4 + \frac{h_c}{\varepsilon_b \sigma} (T_o - T_a) = 0 \quad (14)$$

Donc, la température opérative d'environnement des six directions au point d'observation est définie par cette équation :

$$T_{o,i}^4 - T_r^4 + \frac{h_c}{\varepsilon_b \sigma} (T_{o,i} - T_a) = 0 \quad (15)$$

Ou :

A_b	Aire (superficie) total du corps	(m^2) ;
T_a	Température de l'air	$(^{\circ}K)$;
T_r	Température radiante	$(^{\circ}K)$;
T_b	Température de la surface du corps	$(^{\circ}K)$;
T_j	Température de la surface j	$(^{\circ}K)$;
ε_b	Émittance du corps ;	
σ	Constante de Stephan Boltzmann	$(5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2, K^4)$;
$h_c =$	Coefficient d'échange thermique par convection	$(W/m^2 \cdot ^{\circ}C)$.

3.2. Description du modèle de base dans DEROB-LTH

3.2.1. Géométrie et bâtiments voisins

Comme mentionné dans le chapitre 1, la maison étudiée (en gris dans la fig. 3.2.1.1) est une maison située dans un nouveau quartier d'habitation d'Hanoi possédant trois murs mitoyens. Les bâtiments voisins ont la même typologie et sont semblables à la maison choisie en termes de superficie, de construction et de matériaux, etc. Par conséquent, la température intérieure est approximativement égale dans toutes les maisons pour un même étage et une même orientation. On peut donc considérer qu'il n'y a pas de transfert de chaleur entre deux pièces de maisons voisines au même étage et pour la même orientation. La figure 3.2.1.1 montre qu'il y a une petite rue en béton d'une largeur de 7,5 m à l'extérieur de la maison. Il s'agit en effet d'une distance de 10,5 m entre deux parcelles qui inclut les trottoirs d'une largeur de 3 m (1,5 m à chaque côté) et la rue de 7,5 m de largeur.

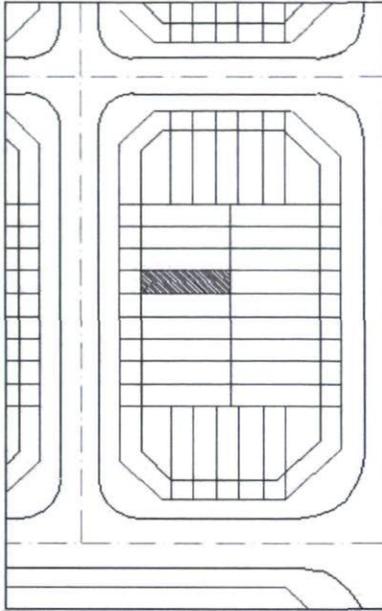


Figure 3.2.1.1: Plan d'implantation de la maison étudiée-en gris.

La maison faisant l'objet de cette recherche comporte quatre étages dont le deuxième et troisième sont identiques, i.e. chaque étage comporte deux chambres, une salle de bain et la hauteur standard de l'étage est 3,3 mètres. Le rez-de-chaussée abrite le garage et la cuisine à proximité de la salle à manger. La hauteur de cet étage est de 3,6 mètres. Le quatrième étage, ne comporte qu'une salle de lavage. La pièce étudiée – la chambre au troisième étage – est la seule pièce possédant une façade extérieure et une toiture (voir les fig. 1.5.1.1 et 1.5.1.2). Dans cette recherche, on considère que la pièce de recherche est complètement vide. Mais en réalité, l'action de l'homme et la présence d'équipements tels que la télévision ou l'ordinateur peuvent augmenter un peu la température intérieure. Alors, l'iLa présence des meubles peut réduire la vitesse de ventilation. Dans le cas de base, l'orientation d'ouest a été retenue pour faire les simulations car elle est l'orientation la plus défavorable en été à Hanoi.

Dans le programme DEROB-LTH, le modèle de base de cette maison est construit en quatre volumes. Le volume 1 représente la pièce étudiée – la chambre des maîtres. Deux murs mitoyens latéraux sont assumés en tant que murs adiabatiques (pas d'échange thermique avec les maisons voisines). Les volumes 2, 3, 4 sont ajoutés afin de représenter réellement la maison tube. Le volume 2 contient deux pièces au-dessous de la pièce étudiée : le salon et le

garage. Le volume 3 est modélisé afin de représenter l'escalier qui constitue l'axe vertical de ventilation du bâtiment. Il est simplifié comme un bloc vertical du rez-de-chaussée à la toiture. Le volume 4 représente la partie au fond de la maison qui contient les pièces différentes, comme la cuisine, les chambres au deuxième et troisième étages et la salle de lavage. Le modèle de base dans le programme DEROB-LTH est présenté à la fig. 3.2.1.2. Cette configuration a été déterminée afin de prendre en considération les échanges thermiques dans le sens vertical et dans le sens de la profondeur de la maison. On assume que les échanges latéraux sont négligeables et les murs mitoyens sont construits comme parois adiabatiques

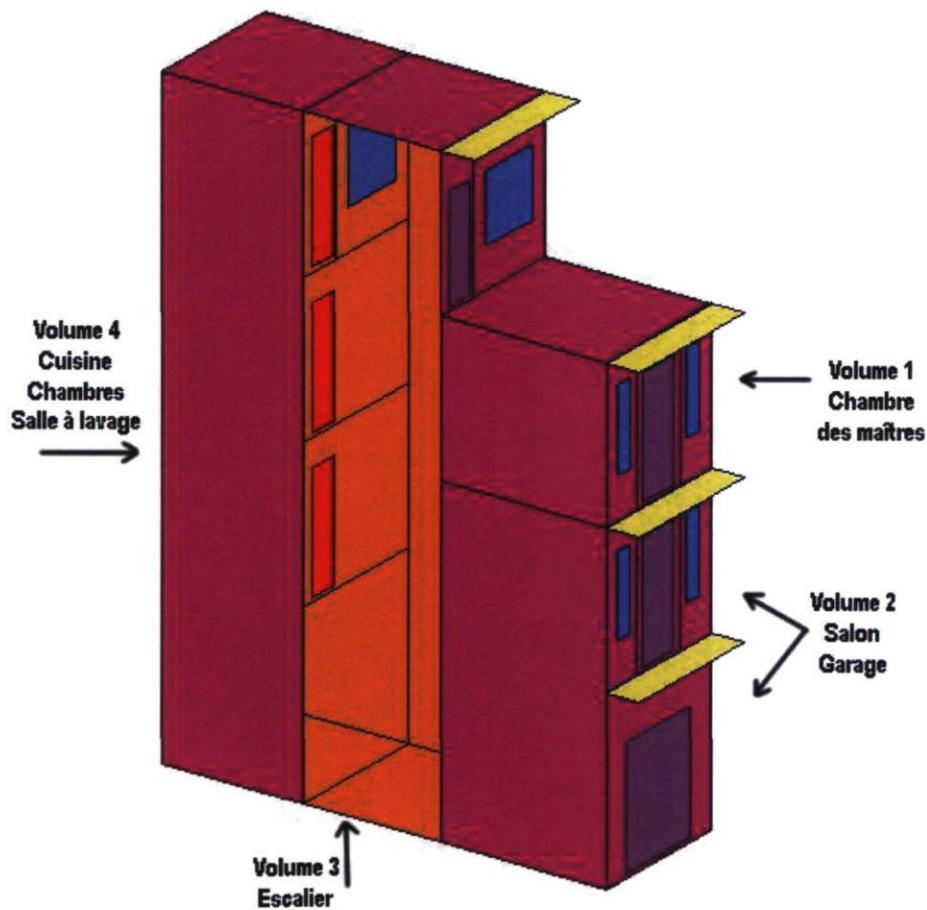


Figure 3.2.1.2: Modèle de base dans Derob-LTH.

Un tableau synthèse qui présente la composition du mur extérieur et de la toiture dans les différents cas étudiés est disponible en annexe. Le tableau 3.2.1.1 présente une description détaillée des volumes pour le cas de base.

Tableau 3.2.1.1: Description détaillée du modèle de base.

Cas de base M00	Dimension	Description	
Volume 1 Chambre des maîtres	Largeur : 4m Profondeur : 4,42m Hauteur : 3,3 m	Mur extérieur W1-M00	- Orientation : Ouest. - Mur : 220 mm en brique. - Fenêtre : 1,8m ² , à 0,9m du plancher. - Verre simple – persienne en bois.
		Mur latéral W2-M00	- Mur : 110 mm adiabatique.
		Mur arrière W3-M00	- Mur : 110mm en brique. - Porte : 2,16 m ² , en bois.
		Toiture R1-M00	- Toiture : 100 mm béton avec l'isolation traditionnelle – brique creuse.
		Plancher R2-M00	- Plancher : 100 mm béton.
Volume 2 Salon et garage	Largeur : 4m Profondeur : 4,42m Hauteur : 6,9 m	Mur extérieur W1-M00	- Orientation : Ouest. - Mur : 220 mm brique. - Fenêtre : 1,8 m ² , à 0,9 m du plancher. - Verre simple – persienne bois. - Porte : 6,48 m ² , en bois.
		Mur latéral W2-M00	- Mur : 110 mm adiabatique.
		Mur arrière W3-M00	- Mur : 110 mm en brique. - Porte : 2,16 m ² . En bois.
		Plancher R2-M00	- Plancher : 100 mm en béton.
Volume 3 Escalier	Largeur : 4m Profondeur : 3,68m Hauteur : 13,2m	Plancher R3-M00	- Plancher : 100 mm en béton par terre.
		Mur latéral W2-M00	- Mur : 110 mm adiabatique.
		Toiture R2-M00	- Plancher : 100 mm en béton.
		Plancher R3-M00	- Plancher : 100 mm en béton par terre.
		Mur extérieur W1-M00	- Orientation : Ouest. - Mur : 220 mm en brique. - Fenêtre : 1,6 m ² , à 0,9 m du plancher. - Verre simple – persienne en bois.
Volume 4 Cuisine, chambres et salle de lavage	Largeur : 4m Profondeur : 3,82m Hauteur : 13,2 m	Mur avant W3-M00	- Mur : 110 mm en brique - Porte : 2,16 m ² chaque mur, en bois.
		Mur latéral W2-M00	- Mur : 110 mm en brique.
		Mur arrière W4-M00	- Mur : 220 mm en brique.

		Toiture-Plancher R2-M00	- Plancher : 100 mm en béton.
		Plancher R3-M00	- Plancher : 100 mm dalle sur sol.

3.2.2. Matériaux

Une sélection plus méticuleuse des propriétés thermiques du programme Derob-LTH permet de décrire fidèlement les matériaux utilisés au Vietnam. Chaque couche de matériaux de chaque paroi est décrite dans le tableau 3.2.2.1. Le mur adiabatique est construit dans le programme comme un matériau à conductivité très faible avec une épaisseur importante (1000 mm). Un facteur d'absorption de 0,4 correspondant à la couleur crème légère est appliqué pour les deux façades extérieure et intérieure, le plancher a une absorptance de 0,6 et le plafond de 0,5. Le tableau 3.2.2.1 présente une description détaillée des matériaux ainsi que les propriétés thermiques et optiques de chaque élément des volumes étudiés.

Tableau 3.2.2. 1: Description détaillée de propriété thermique des matériaux (Pham, 2002)

Élément de volume	Couche des matériaux	Densité (kg/m ³)	Conductivité λ (W/mK)	Chaleur spécifique (Wh/kgK)	Épaisseur (mm)	Absorptance (%)		Émittance (%)	
						Côté intérieur	Côté extérieur	Côté intérieur	Côté extérieur
Mur									
Mur extérieur W1-M00	Crépis	2000	1,2	0,28	15	40	40	80	80
	Brique	1800	0,96	0,26	200				
	Crépis	2000	1,2	0,28	15	40	40	80	80
Mur arrière W3-M00	Crépis	2000	1,2	0,28	15	40	40	80	80
	Brique	1800	0,96	0,26	100				
	Crépis	2000	1,2	0,28	15	40	40	80	80
Mur latéral W2-M00	Adiabatique	0,01	0,01	0,01	1000	0	0	0	0
	Brique	1800	0,96	0,26	100				
	Crépis	2000	1,2	0,28	15				
Mur arrière W4-M00	Adiabatique	0,01	0,01	0,01	1000	0	0	0	0
	Brique	1800	0,96	0,26	200				
	Crépis	2000	1,2	0,28	15	40	40	80	80
Toiture									
Toiture R1-M00	Céramique	600	0,23	0,55	10	70	70	80	80
	Crépis	2000	1,2	0,28	20				
	Brique creuse + ciment	1350	0,43	0,18	150				
	Béton	2300	1,7	0,25	100				
Plancher R2-M00	Crépis	2000	1,2	0,28	15	60	60	80	80
	Béton	2300	1,7	0,25	100				

	Crépis	2000	1,2	0,28	15				
	Céramique	600	0,23	0,55	10				
R3-M00	Terre	1300	1,4	0,22	500	60	60	80	80
	Béton	2300	1,7	0,25	100				
	Crépis	2000	1,2	0,28	15				
	Céramique	600	0,23	0,55	10				

3.2.3. Données climatiques et intrants

Le fichier climatique utilisé par le programme Derob-LTH est réalisé grâce aux données produites par le programme Meteonorm de la compagnie Meteotest à Bern, en Suisse. Ce fichier fournit toutes les informations dont le programme a besoin i.e. la température de l'air (bulbe sec) ($^{\circ}\text{C}$), l'humidité de l'air extérieur, le rayonnement diffus ainsi que le rayonnement global sur une surface horizontale (W/m^2), le rayonnement normal (W/m^2) et la température du ciel ($^{\circ}\text{C}$). Le fichier inclut également l'information concernant la latitude et la longitude du site ainsi que les coordonnées horaires (heure, mois, jour). Dans le cadre de cette recherche, les données climatiques s'étendent du 1^{er} janvier au 31 décembre 1995.

Comme mentionné plus haut, les deux mois les plus chauds (juin et juillet) de l'année ainsi que le mois le plus froid (janvier) ont été choisis comme cas d'étude dans cette recherche. Ainsi, les données climatiques du 1^{er} juin au 31 juillet et du 1^{er} janvier au 31 janvier ont été sélectionnées pour les simulations.

Déplacement d'air entre les volumes

Dans le programme DEROB-LTH, il est possible de déterminer les déplacements d'air entre les volumes. Le programme assume le transfert entre deux volumes via deux ouvertures ayant une superficie égale. L'ouverture est spécifiée uniquement afin de déterminer le changement d'air entre deux volumes. Elle n'a donc pas d'influence sur la superficie du mur, le rayonnement solaire ou le transfert thermique par conduction. La méthode suivie pour déterminer les intrants dans le module advection-connexion est présentée dans la fig. 3.2.3.1.

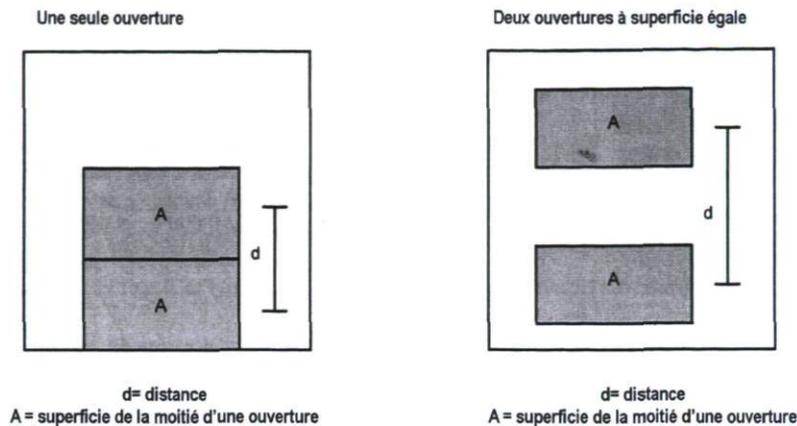


Figure 3.2.3.1: Échange par d'advection entre deux volumes (tiré de Derob-LTH, User's manual, 2006).

Le tableau 3.2.3.1 montre qu'il y a trois types d'échange par advection entre les volumes. Ces valeurs sont retenues pour tous les cas ultérieurs.

Tableau 3.2.3.1: Description détaillée des échanges par advection du modèle.

Échange par advection entre deux volumes	Aire A (m ²)	Distance d (m)	Explication
Volume 1- Volume 3 Connecteur : Une porte de 2,16 m ² (0,8 x 2,7)	0,21	1,35	La porte ne s'ouvre pas souvent (20% du total d'heures par jour), on assume que $A=20\% \times 1,08 = 0,21$ et $d = 1,35$
Volume 2 – Volume 3 Connecteur : Une porte - de 2,16 m ² (0,8 x 2,7) au deuxième étage; Trou de 15,6 m ² (3,9 x 4) au premier étage	9,01	3,3	La porte est ouverte plus souvent (70% du total d'heures par jour), on assume que $A=70\% \times 1,08=1,21$ et $d = 1,35$ Trou : $A= 15,6/2 = 7,8$; $d = 3,9/2 = 1,95$ $A \text{ total} = 7,8+1,21 = 9,01$ $d \text{ total} = 1,95 + 1,35 = 3,3$
Volume 4 – volume 3 Connecteur : Trois portes de 2,16 m ² . Une fenêtre de 3,24 m ² (1,8 x 1,8) Un trou de 15,6 m ² (3,9 x 4) au premier étage	10,05	4,2	La porte ne s'ouvre pas souvent (20% du total d'heures par jour), on assume que $A=20\% \times 1,08 = 0,21$ et $d = 1,35$ pour chaque porte. $A = 0,21 \times 3 = 0,63$; $d = 1,35 \times 3 = 4,05$ La fenêtre est souvent ouverte : $A = 3,24/2 = 1,62$; $d = 1,8/2 = 0,9$

			Le trou : $A = 15,6/2 = 7,8$; $d = 3,9/2 = 1,95$ $A \text{ total} = 0,63 + 1,62 + 7,8 = 10,05$ $d \text{ total} = 1,35 + 0,9 + 1,95 = 4,2$
--	--	--	---

Ventilation transversale

La ventilation transversale est toujours considérée comme une stratégie architecturale importante dans le contexte vietnamien. En consultant les données climatiques qui sont générées par le programme Meteonorm (Rosenlund, 2006), on constate que la vitesse du vent est de 1,5 m/s pour le vent du sud pendant juin et juillet et elle est de 2,5 m/s pour le vent du nord en janvier. Pour la situation particulière de la pièce de recherche, où la ventilation ne peut être générée que par une seule façade (*single-sided ventilation*), la formule d'ASHRAE (1977) (Rosenlund, 1993) est utilisée pour estimer le débit d'air de l'extérieur à l'intérieur des volumes :

$$Q = E \times A \times v \quad (16)$$

Où

Q : le débit d'air (m^3/s);

E : coefficient de l'efficacité de l'ouverture;

0,25 – 0,35 pour le vent diagonal;

0,5 – 0,6 pour le vent perpendiculaire;

A : superficie de l'ouverture (m^2);

v : vitesse du vent (m/s).

Le tableau 3.2.3.2 présente à la fois le résultat du débit d'air et le changement d'air à l'heure (cah), de l'extérieur à l'intérieur pour les différents volumes du modèle, pour deux périodes de simulation. Le changement d'air à l'heure est déterminé comme suit :

$$\text{cah} = Q/V \times 3600 \text{ sec} \quad (17)$$

Où

Cah : changement d'air à l'heure;

Q : débit d'air (m^3/s);

V : volume de la pièce étudiée (m^3).

E de 0,35 est utilisé pour le vent diagonal car l'orientation de la maison dans le cas de base est l'orientation Ouest.

Tableau 3.2.3. 2: Changements d'air à l'heure

	Débit d'air – Q m³/s	cah
Période chaude		
De l'extérieur au volume 1	0,675	43
De l'extérieur au volume 2	0,675	43
De l'extérieur au volume 3	1	64
Période froide		
De l'extérieur au volume 1	1,125	73
De l'extérieur au volume 2	1,125	73
De l'extérieur au volume 3	1,69	110

Les résultats calculés sont uniquement applicables aux maisons dans un espace vide où le vent n'est pas bloqué par des constructions. Toutefois, la maison étudiée est située dans un milieu urbain dense. En plus, le vent change souvent de direction dans une journée. Les données de la vitesse moyenne du vent par mois ne sont pas suffisantes pour calculer le changement d'air à l'heure et aucune donnée additionnelle n'est disponible. À cette étape, en consultant les recherches antérieures réalisées avec DEROB-LTH dans le climat d'Hanoi (Tran, 2001; Phan, 2000), on peut assumer la ventilation transversale comme suit pour le cas de base:

- Période chaude : 6 cah pendant la nuit (de 19 h à 5 h); 8 cah pendant la journée (de 6 h à 18 h);
- Période froide : 0,6 cah pendant la nuit (de 19 h à 5 h); 0,8 cah pendant la journée (de 6 h à 18 h).

Ces valeurs sont plus réalistes en regard du contexte urbain très dense. En considérant que l'équation à l'intérieur est équivalente à la vitesse de l'air de 0,17 m/s pendant la nuit et de 0,2 m/s pendant la journée et que la superficie des ouvertures est de 1,8 m². En hiver, cette vitesse est de 0,017 m/s pour la nuit et 0,02 m/s pendant la journée. Les valeurs sont identiques pour tous les cas sauf les cas sous influence de la ventilation. Et il n'y a pas de

ventilation mécanique dans cette recherche, sauf pour un cas nocturne où on utilise un ventilateur pour réchauffer la pièce au 3^e à partir du premier.

CHAPITRE 4 : Résultats

4.1. Analyse du modèle de base

Le modèle de base (code M00) présente fidèlement la maison tube et la pièce étudiée au troisième étage (les constructions à forte inertie avec deux ouvertures de 1,8 m² sur 13,2 m² de la façade extérieure - voir 3.2.2), sans ventilation mécanique (voir 3.2.3). En été, une ventilation minimale est assumée (0,2 m/s) et en hiver, la pièce est complètement fermée donc la vitesse de l'air est seulement 0,02 m/s.

4.1.1. Modèle de base en été

Les résultats de la température moyenne extérieure, intérieure et de la température opérative moyenne pendant les mois juin et juillet pour le modèle de base sont présentés à la fig.4.1.1.1. La fig.4.1.1.1 montre que la température moyenne intérieure est toujours plus élevée que la température extérieure. La température intérieure oscille entre 28 à 30°C. Comme le montre la fig. 4.1.1.1, la différence entre la température intérieure et extérieure est plus importante pendant la nuit car la chaleur est absorbée pendant le jour par les constructions à forte inertie et rayonnée vers l'intérieur la nuit. Par conséquent, le confort de nuit pose un problème. Ceci indique que deux pistes sont à explorer pour améliorer le confort : une réduction du rayonnement solaire sur la toiture et les façades pendant le jour accompagnée d'une augmentation de la ventilation pendant la nuit. Il faut rappeler qu'en été, l'inconfort augmente également avec la température de l'air, lorsque le niveau d'humidité est élevé, l'humidité relative étant de 65 à 75% pendant cette période tandis que la vitesse de l'air est faible.

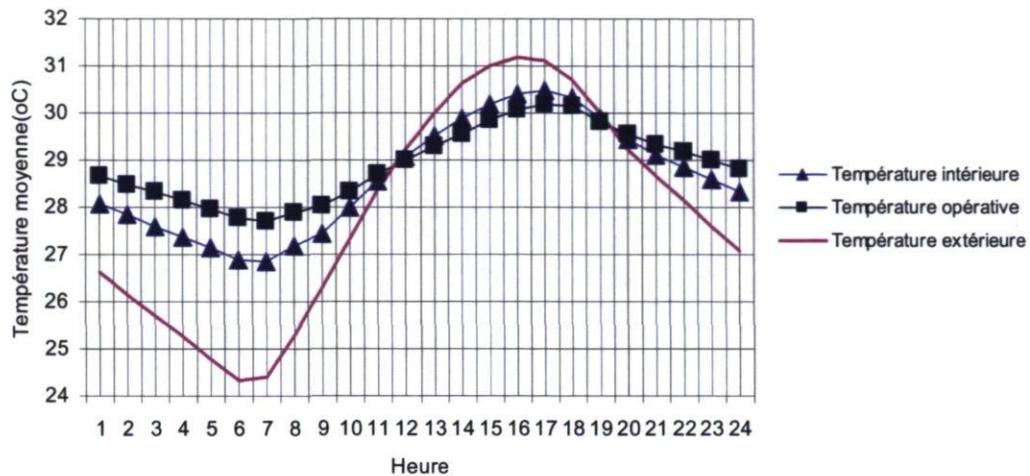


Figure 4.1.1.1: Températures extérieure, intérieure et opérative moyenne pendant juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La fig.4.1.1.2 présente la température moyenne intérieure des murs, du plancher, du plafond et la température moyenne extérieure pendant les mois de juin et juillet. Cette figure montre que les températures intérieures des murs ne sont pas très différentes. Le mur ouest a la température intérieure la plus faible le matin car il ne reçoit pas de rayonnement solaire le matin. Les murs intérieurs et le plancher, quant à eux, ne reçoivent pas de rayonnement direct et leurs températures sont assez stables. La grande différence entre les températures intérieures des murs et la température extérieure (environ 5°C durant la nuit) démontre que chaque mur peut contribuer à créer une ambiance intérieure inconfortable, surtout durant la nuit (fig. 4.1.1.2). En plus, on trouve que la fluctuation de température de la fenêtre suit pratiquement la température extérieure. Ceci laisse penser qu'une amélioration de la valeur de résistance thermique de la fenêtre pourrait avoir un impact sur les températures opératives intérieures.

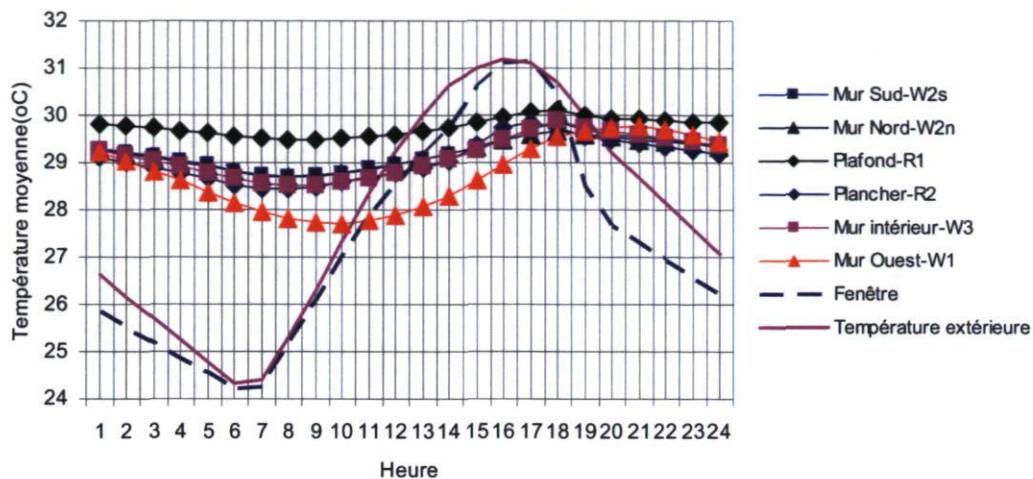


Figure 4.1.1.2: Température intérieure moyenne des murs, fenêtres, plafond et plancher, et température moyenne extérieure en juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

Le résultat de la simulation a démontré que la toiture produit plus de chaleur par rapport aux murs, et cela, bien que la brique creuse ait été utilisée sur la toiture pour l'isoler de la chaleur de l'extérieur en été (fig.4.1.1.2). La température intérieure de la toiture est stable et plus élevée que les températures intérieures des murs et du plancher. Ce résultat est dû à la construction à forte inertie de la toiture et au rayonnement solaire considérable durant l'été sur la toiture. Le plancher ne reçoit pas de rayonnement solaire direct et a une température moins élevée.

Pour ce qui est du mois de juin, un graphique montrant la distribution intérieure des températures opératives a été produit en utilisant le module confort (Källbald, 1998) qui est un post processeur de DEROB-LTH. Ce graphique (fig. 3.1.3.3) montre que ces températures opératives sont toujours plus élevées que la température opérative optimale en été (27,2°C) (fig. 4.1.1.3). La température opérative la moins élevée est de 31,11 °C à 9 h et la plus élevée, de 33,5 °C à 18h. La simulation est réalisée pour le 1^{er} juin, à 1,2 m du plancher, en assumant une activité légère (1,2 met), un habillement correspondant à 0,5 clo et un mouvement d'air de 0,2 m/s.

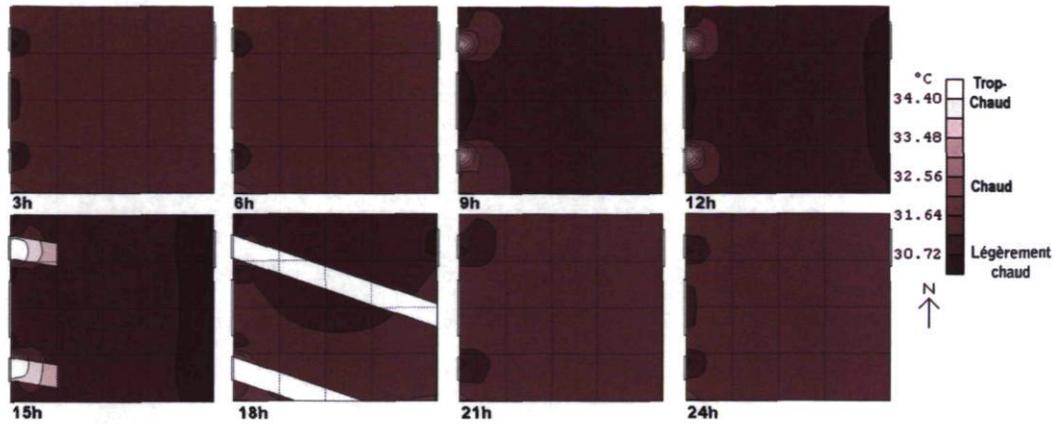


Figure 4.1.1.3: Température opérative à 1,2m du plancher à différentes heures le 15 juin, pièce au 3^e étage.

La fig. 4.1.1.4 montre que le PMV le plus faible (1,98) est constaté à 9h. Cette valeur augmente à 2,2 à midi et à 2,83 à 18h, un indice de 3 correspond à la sensation chaude (fig. 4.1.1.4).

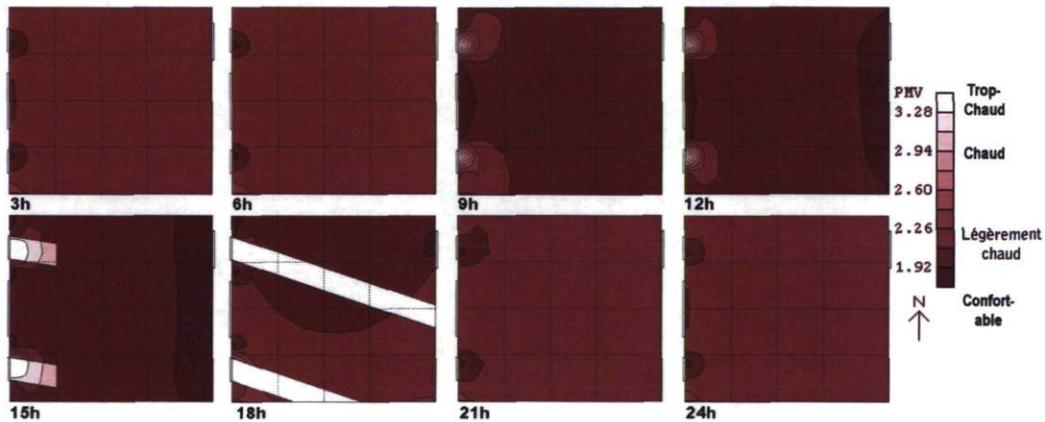


Figure 4.1.1. 4: Indice PMV pour différentes heures le 15 juin, pièce au 3^e étage.

En analysant les températures intérieures et opératives ainsi que celles de l'intérieur des surfaces, du plafond et du plancher et l'indice PMV, il est possible d'établir les constats suivants :

- Une contrainte thermique est assurément présente dans la pièce, spécialement pendant la nuit;
- Les apports de chaleur à travers la toiture sont importants;

- Les accumulations de chaleur dans les murs intérieurs, le plafond et le plancher transforment les parois en véritables radiateurs en période chaude;
- Pour l'ouverture de $1,8 \text{ m}^2$ et la construction de mur de base, une vitesse de vent de $0,2 \text{ m/s}$ durant le jour et de $0,17 \text{ m/s}$ pendant la nuit n'est pas suffisante pour refroidir les constructions et ainsi améliorer le confort thermique.

4.1.2. Modèle de base en hiver

Les résultats de la simulation concernant la température moyenne extérieure, la température moyenne intérieure et la température opérative moyenne pendant la période froide de janvier sont présentés à la fig. 4.1.2.1. La fig. 4.1.2.1 montre que la température moyenne intérieure oscille entre 15 et 16 °C et qu'elle est plus élevée que la température extérieure sauf autour de midi. La différence entre les températures intérieure et extérieure est plus importante pendant la nuit car la chaleur absorbée par les constructions à forte inertie est rayonnée vers l'intérieur la nuit. Contrairement à l'été, ces résultats démontrent que les constructions à forte inertie apportent certains avantages pouvant améliorer les conditions thermiques en hiver.

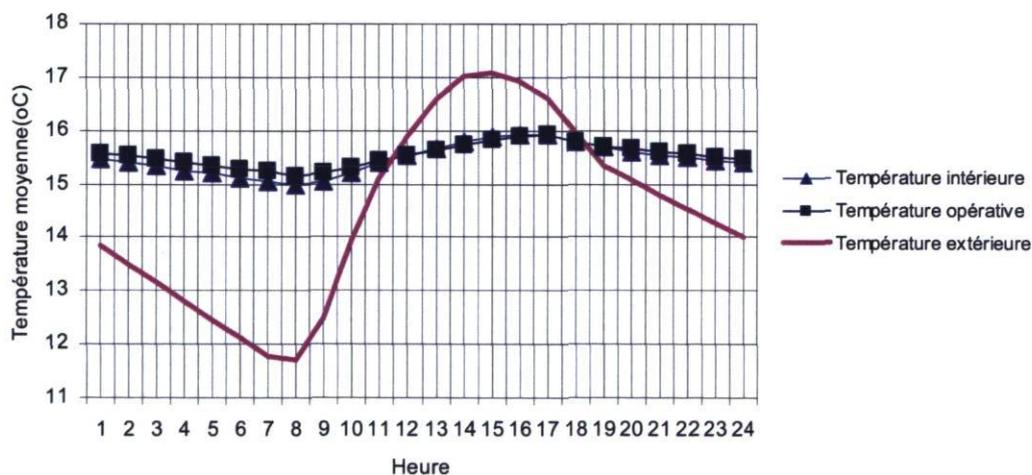


Figure 4.1.2. 1: Températures extérieure, intérieure et opérative moyenne durant janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

La fig.4.1.2.2 présente la température moyenne intérieure des murs, du plancher, du plafond et la température moyenne extérieure pendant janvier. Cette figure montre que les températures intérieures des murs ne sont pas très différentes sauf pour le mur ouest qui a la

température la moins élevée le matin car il est exposé à l'extérieur et refroidi au contact de l'air froid. Les murs intérieurs ne sont pas en contact avec l'air extérieur et leurs températures sont donc assez stables. La différence entre les températures intérieures des murs et la température extérieure (environ 3°C durant la nuit) montre que chaque mur peut contribuer à améliorer les conditions thermiques en hiver, surtout durant la nuit (fig. 4.1.2.2).

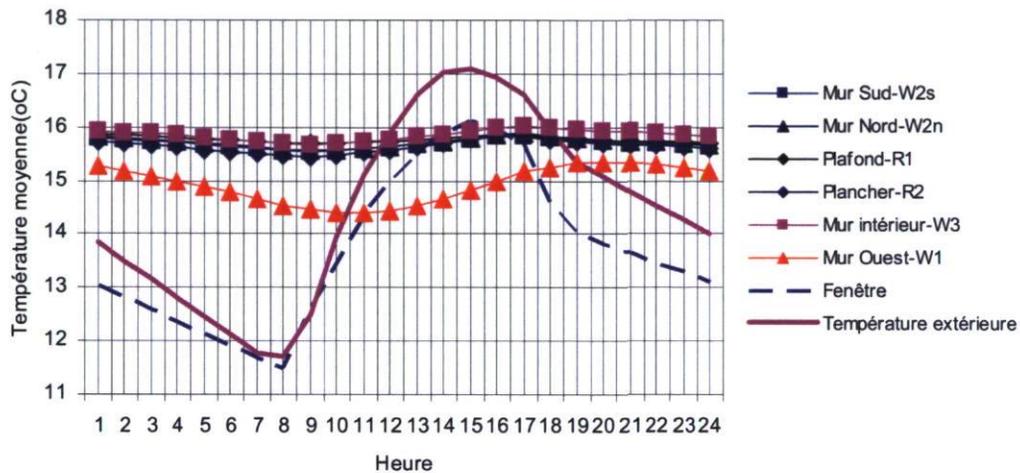


Figure 4.1.2.2: Température intérieure moyenne des murs, fenêtres, plafond et plancher, et température moyenne extérieure durant janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

Pour la toiture et le plancher, le résultat de la simulation indique que la toiture ne produit pas plus de chaleur par rapport aux murs (fig.4.1.2.2). La température intérieure de la toiture est stable et plus élevée que la température extérieure sauf entre 13 – 17h. Ce résultat est dû aussi à la construction à forte inertie de la toiture et au rayonnement solaire sur la toiture durant l'hiver. Même si le plancher ne reçoit pas de rayonnement solaire direct, il a une température presque égale à celle la toiture. Comme les murs, la toiture et le plancher ont une influence positive sur l'ambiance thermique intérieure de la pièce étudiée.

Pour le 15 de janvier, un graphique montrant la distribution intérieure des températures opératives est obtenue avec le module confort du programme DEROB-LTH. Ce graphique (fig. 4.1.2.3) montre qu'en hiver, même si la vitesse de l'air a été réduite à 0,017 m/s la nuit et 0,02 m/s le jour, la température opérative à 1,2 m du plancher est très faible, soit environ 18 °C. La température optimale en hiver, d'après la norme 55a (ASHRAE, 2004), est 22,7 °C.

Cette simulation est faite en assumant une activité légère (1.2 met), un habillement de 0,9 clo (tel que recommandé par la norme 55a). La fig. 4.1.2.3 présente la température opérative à différentes heures de la journée.

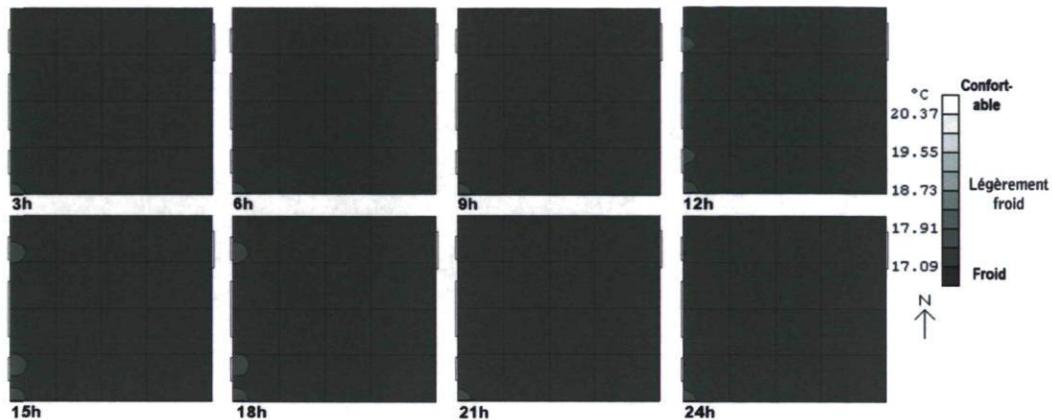


Figure 4.1.2.3: Température opérative à 1,2 m du plancher pour différentes heures le 15 janvier, pièce au 3^e étage.

La fig. 4.1.2.4 présente les indices PMV obtenus. Cette figure montre que l'indice PMV oscille entre - 0,8 et -1 ce qui correspond à une sensation thermique froide. L'indice PMV est assez stable au cours de la journée (fig. 4.1.2.4).

Les résultats indiquent donc les conditions thermiques inconfortables (froides) en hiver mais ce problème est relativement moins critique que le problème de surchauffe en été. De plus, l'hiver dure seulement trois mois (de novembre à janvier) et la température n'est pas très faible (de 15 °C à 22 °C) pendant cette période. Comme mentionné précédemment, les stratégies architecturales au Vietnam se concentrent généralement sur la surchauffe en été. Le froid est surtout associé au vent froid du Nord-Est, alors en hiver, la protection contre le vent froid du Nord-Est devient une stratégie architecturale à privilégier.

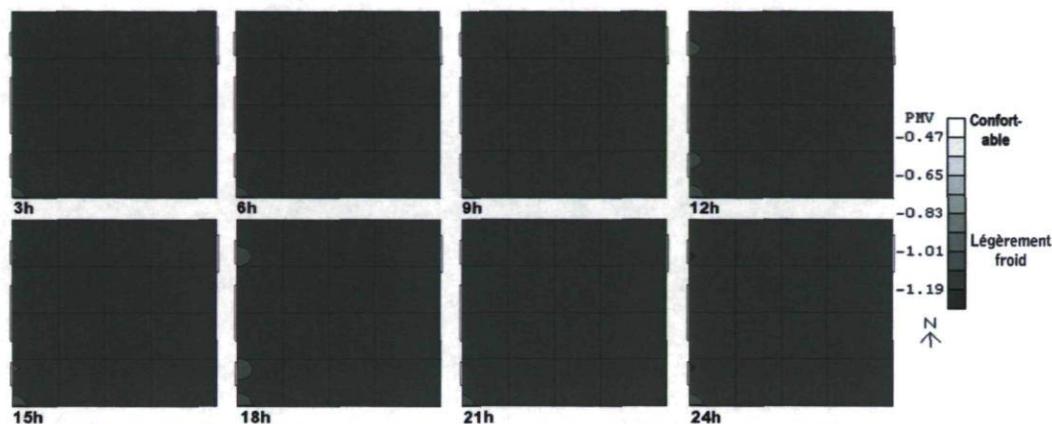


Figure 4.1.2.4: Indice PMV pour différentes heures le 15 janvier, pièce au 3^e étage.

Comme mentionné précédemment, les températures opératives de 22,7 °C en hiver et de 27,2 °C en été de la norme 55a d'ASHRAE ont été établies en fonction d'un bâtiment ventilé et climatisé par des moyens mécaniques. La température confortable pour une maison ventilée naturellement est recalculée en utilisant l'équation de De Dear et Brager (2002) (équation 2.2.2.2) (voir 2.2.2).

Tableau 4.1.2.1: Température optimale d'après les équations de De Dear et Brager (2002).

Période	Température moyenne extérieure du mois (°C)	Température optimale (°C) (équation 2.2.2.2)
Période froide – janvier	14,44	22,27
Période chaude – juin et juillet	27,88	26,44

Les résultats de la température optimale pour deux périodes différentes indiquent une ambiance thermique inconfortable. Elles sont un peu moins élevées que la température optimale de la norme 55a d'ASHRAE pour un bâtiment conditionné mécaniquement. La température intérieure autour de 30 et 31°C est toujours plus élevée que la température optimale de 22,27 °C. En hiver, les résultats sont à l'inverse, la température intérieure se situant entre 15 et 16 °C, ce qui est plus faible que la température optimale. Il en résulte ainsi une ambiance thermique froide en hiver.

La fig. 4.1.2.5 présente la relation entre la température opérative moyenne intérieure et la zone confortable que De Dear et Bager (2002) ont établi pendant la période chaude. La figure montre que la température opérative de la pièce étudiée en juin et juillet est toujours à l'extérieure de la zone confortable. Le graphique démontre alors une ambiance thermique inconfortable en été.

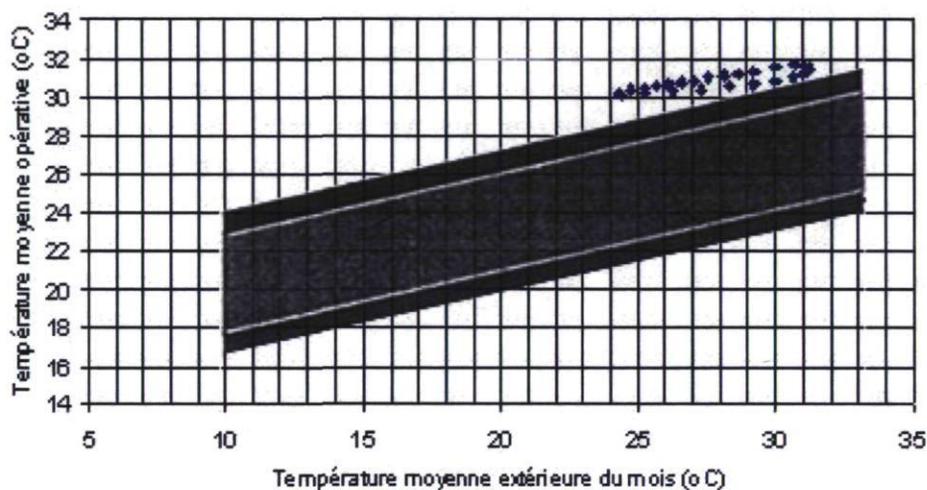


Figure 4.1.2.5: Relation entre la température opérative moyenne intérieure et la zone optimale (De Dear et Brager, 2001) durant juin et juillet.

Le résultat de la température confortable par l'équation 2.2.2.7 de Humphreys et Nicol (1998) (voir 2.2.2) permet d'arriver aux mêmes conclusions concernant l'ambiance thermique de la pièce étudiée. D'après les auteurs, une température confortable de 27,78 en été et de 20,6 °C en hiver est la condition pour une ambiance thermique confortable dans le contexte du climat d'Hanoi.

4.1.3. Conclusion

Les résultats présentés permettent d'affirmer que la température intérieure est assez stable et toujours plus élevée par rapport à la température extérieure (sauf l'après-midi, de 12h à 18h). La différence entre la température intérieure et extérieure est plus importante pendant la nuit car le rayonnement solaire est accumulé dans la construction à forte inertie. Le plancher et les murs intérieurs génèrent plus de chaleur en été alors que le mur Ouest est plus froid étant donné qu'il ne reçoit pas de rayonnement solaire le matin.

En constatant les résultats des simulations, la norme 55a pour la température opérative et l'indice PMV, ou la température optimale de De Dear et Brager (2001), Humphreys et Nicol (1998), on peut conclure que la température intérieure est trop élevée en été et un peu faible en hiver dans ce type de maison. Le problème du confort thermique est plus critique en été qu'en hiver. La partie suivante présente les résultats des simulations pour différentes stratégies architecturales passives.

4.2. Analyse des différentes stratégies architecturales passives

4.2.1. L'influence de la ventilation

Tel que mentionné au chapitre deux, la ventilation naturelle est toujours considérée comme la stratégie principale à utiliser en climat tropical chaud et humide. S'il faut, en hiver, limiter la pénétration de l'air extérieur parce que le froid arrive par le vent du nord-est, en été, la ventilation est toujours souhaitable, particulièrement pour les bâtiments avec une forte inertie thermique. La prochaine section se concentre sur l'analyse de l'influence de la ventilation transversale en été, puisque la ventilation en hiver est totalement inutile.

Premièrement, le ratio de changement d'air à l'heure est modifié à chaque heure par rapport au cas de base (M00). En suivant une approche plutôt théorique, la superficie de l'ouverture n'est pas être modifiée pour déterminer la vitesse de l'air qui doit être obtenue pour assurer une ambiance plus confortable en été. La nuit est déterminée de 19h.00 à 05.00h. Le tableau 4.2.1.1 présente chaque cas en détail.

Tableau 4.2.1.1: Détail du changement d'air à l'heure (Cah) pour chacun des cas.

Cas	cah du jour (6.00-18.00h)	Vitesse de l'air (m/s)	cah de la nuit (19.00 – 5.00h)	Vitesse de l'air (m/s)	Superficie d'ouverture (m ²)
M00	8	0.2	6	0.17	1.8
M01	16	0.4	12	0.34	1.8
M02	32	0.8	24	0.78	1.8
M03	24	0.6	32	0.8	1.8
M04	16	0.4	40	1	1.8

La figure 4.2.1.1 présente la température opérative moyenne pour chacun des cas pendant les mois de juin et juillet. Dans les deux cas modifiés (M01, M02), la figure 4.2.1.1 montre que l'augmentation de la ventilation diminue légèrement la température de 12.00h à 19.00h par rapport au cas de base. Par contre, la température intérieure est diminuée de façon plus significative (environ 0,3 °C durant la nuit et 0,6 °C au matin (de 5.00h à 9.00h)) pour le cas M02, pour lequel la vitesse de l'air est plus grande. La diminution de la température durant la nuit et au matin est relativement plus grande que l'augmentation notée le midi. La ventilation transversale affecte donc l'ambiance thermique intérieure seulement pendant la nuit. Mais pour la journée, ce n'est pas une bonne solution.

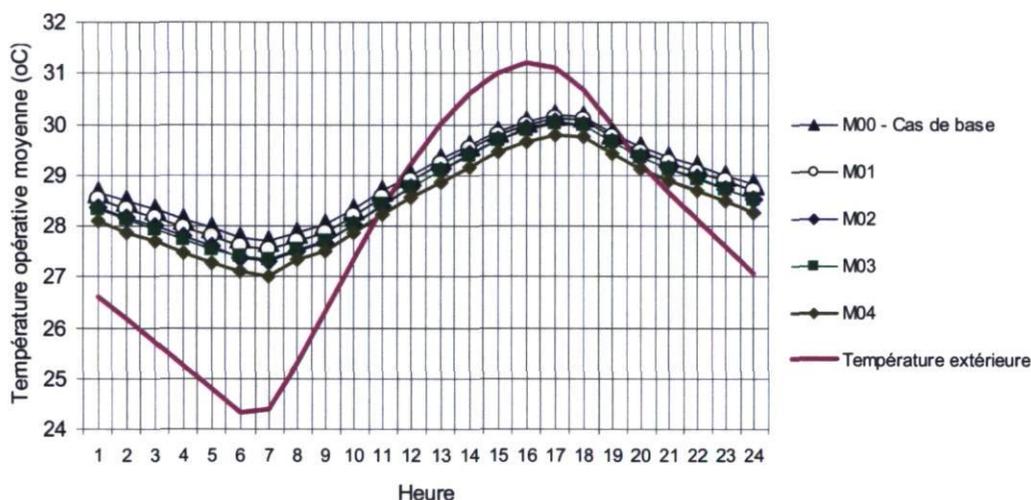


Figure 4.2.1.1: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure notées lors des changements d'air à l'heure pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

Il est donc clair que la ventilation dans la journée n'est pas souhaitable. Son influence est négative, car elle permet le transfert de la chaleur extérieure vers la chambre. Ce problème n'est pas vraiment grave pour les résidences, où les gens ne sont pas à la maison dans la journée, mais cette ventilation va chauffer l'air intérieur et les constructions. Enfin, elle va affecter le confort des gens lorsqu'ils retournent chez eux. Une ventilation sélective de nuit devient donc nécessaire. La fermeture des fenêtres dans la journée en été est utile pour contrer la pénétration de la chaleur. Par contre, la ventilation la nuit et à la fin de la journée pourrait améliorer le confort thermique en tirant profit du refroidissement de la température

extérieure. La ventilation peut être obtenue facilement par l'ouverture des fenêtres ou l'utilisation de ventilateurs. Pendant la nuit, la pièce est ainsi refroidie. Pendant la journée, lorsque la chaleur extérieure affecte l'ambiance intérieure, on ferme les ouvertures pour minimiser la pénétration de l'air chaud. On peut alors améliorer l'ambiance thermique intérieure de la pièce ce que les cas suivants visent à vérifier. On y diminue la ventilation dans la journée et on l'augmente pendant la nuit. Si on augmente la vitesse de l'air durant la nuit jusqu'à 0,8 - 1 m/s (cas M03, M04), et si on diminue le cah de 24 à 16 (complètement fermé), l'ambiance thermique intérieur s'en trouve clairement améliorée. Une diminution de la température opérative intérieure de 0,5 °C à 1 °C pour toute la journée est constatée. En comparant les cas M03 et M04, on constate que plus on limite la ventilation dans la journée, plus la température intérieure baisse.

Un changement de cédule d'opération pour vérifier cette stratégie est présenté dans les cas M05, M06 et M07. La vitesse de l'air pendant la nuit est gardée à 1m/s avec le cah de 40 approximativement. Après Nguyen (2002), cette vitesse de l'air est acceptable pour obtenir une ambiance thermique confortable. Si cette vitesse est plus grande de 1m/s, le sommeil dans la nuit sera influencé. Alors, le cah de 40 a été choisi comme la limite supérieure. Cette valeur n'est pas vraiment réaliste dans le contexte de recherche mais on la choisi comme une valeur optimale. On diminue le cah l'après-midi dans les cas M05 et M06 alors qu'on le ferme complètement le jour dans le cas M07 pour éliminer l'influence négative de la température extérieure i.e. la chaleur. Le tableau 4.2.1.3 présente chaque cas en détail.

Tableau 4.2.1.2: Détail du changement d'air à l'heure (Cah) pour chacun des cas.

Cas	cah du jour				cah de la nuit		Superficie d'ouverture (m/s)
	8h - 11h	Vitesse de l'air (m/s)	12h - 17h	Vitesse de l'air (m/s)	18h - 7h	Vitesse de l'air (m/s)	
M05	16	0.4	6	0.4	40	1	1.8
M06	16	0.4	1	0.025	40	1	1.8
M07	1	0.025	1	0.025	40	1	1.8

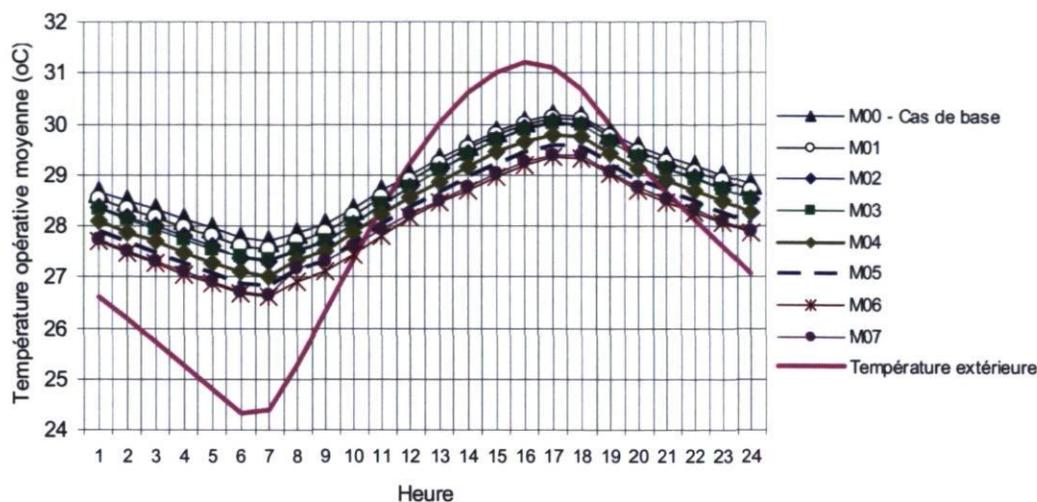


Figure 4.2.1.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents changements d'air à l'heure pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La figure 4.2.1.2 présente la température extérieure et la température opérative moyenne intérieure pour les différents cas pendant les mois de juin et juillet. La température intérieure du cas M06 est moins élevée par rapport à celle de tous les autres cas. Cela montre qu'une ventilation pendant la nuit est vraiment une bonne stratégie. Un taux de ventilation élevé pendant la nuit et une bonne fermeture des fenêtres le jour (fermées de 8.00h – 17.00h) pour contrer la pénétration de la chaleur de l'extérieur peut améliorer l'ambiance thermique intérieure. Par contre, une fermeture complète n'est pas nécessaire puisqu'elle ne donne pas un meilleur résultat comme le démontre le cas M07.

La figure 4.2.1.3 présente la température extérieure et la température opérative moyenne intérieure sur le mur intérieur de la pièce de recherche pendant les mois de juin et juillet pour cinq cas : M00, M03, M04, M05, M06. Cette vérification permet d'expérimenter plus d'une fois l'efficacité de la ventilation transversale pendant la nuit. La ventilation a la capacité de diminuer la température des surfaces intérieures : jusqu'à 1 °C pour le mur intérieur (le cas M06) par rapport au cas de base. (Voir fig.4.2.1.3).

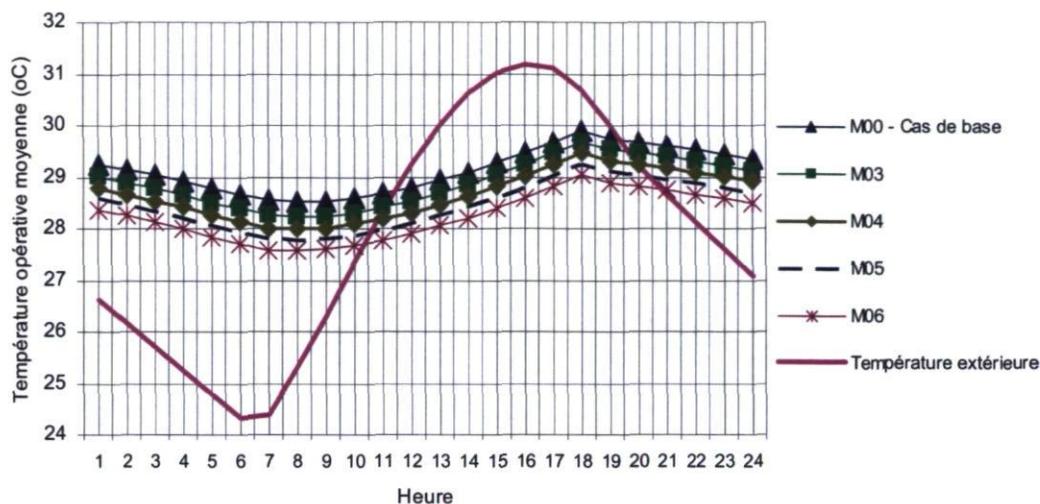


Figure 4.2.1.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure du mur intérieur pour les différents changements d'air à l'heure pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

En observant le cas M06 – le cas qui montre la plus forte corrélation entre la ventilation nocturne et l'ouverture contrôlée dans la chambre de recherche, on constate que le mur et le plancher obtiennent les températures les moins élevées par rapport aux autres surfaces de la pièce. Le plafond présente toujours la température la plus élevée et ce, spécialement pendant la nuit ; il est affecté par le rayonnement solaire important en été. Cette problématique liée au plafond impose donc une solution pour améliorer l'ambiance thermique intérieure.

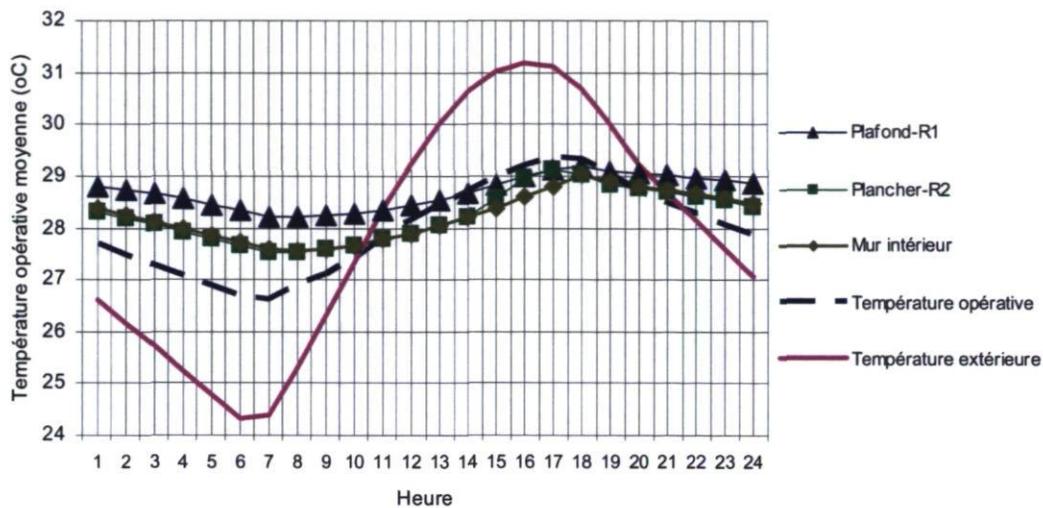


Figure 4.2.1.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure des surfaces dans le cas M06 pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

Pour conclure cette partie, il faut rappeler qu'une ventilation transversale pendant la nuit est très importante pour obtenir un confort thermique en été dans le contexte de la recherche. Maximiser la ventilation pendant la nuit, mais minimiser celle-ci pendant la journée serait une bonne solution pendant la période chaude pour la pièce étudiée. De plus, cette recherche vise à élaborer une méthodologie d'application d'une solution simple pour les architectes et les habitants ; bien fermer les fenêtres pendant la journée (de 8.00h à 17.00h) pendant que les gens sont au travail. Pendant la nuit (de 18.00h à 7.00h) par contre, il faut profiter de l'air frais de l'extérieur pour refroidir les surfaces de la chambre et diminuer la température intérieure. Une moustiquaire de fenêtre est suggérée pour empêcher les insectes d'entrer en été dans le contexte de recherche, c'est-à-dire un pays tropical.

4.2.2. Murs

4.2.2.1. Influence de la couleur externe

L'influence de la couleur externe est représentée par l'absorptivité du rayonnement de courte longueur d'onde par l'enveloppe du bâtiment qui oscille entre 0,2 (blanc) et 0,8 (gris foncé,

vert, rouge...). Cette valeur pour le cas de base et celui des façades intérieures pour tous les cas est 0,4 tandis que l'absorptivité du plancher est 0,5.

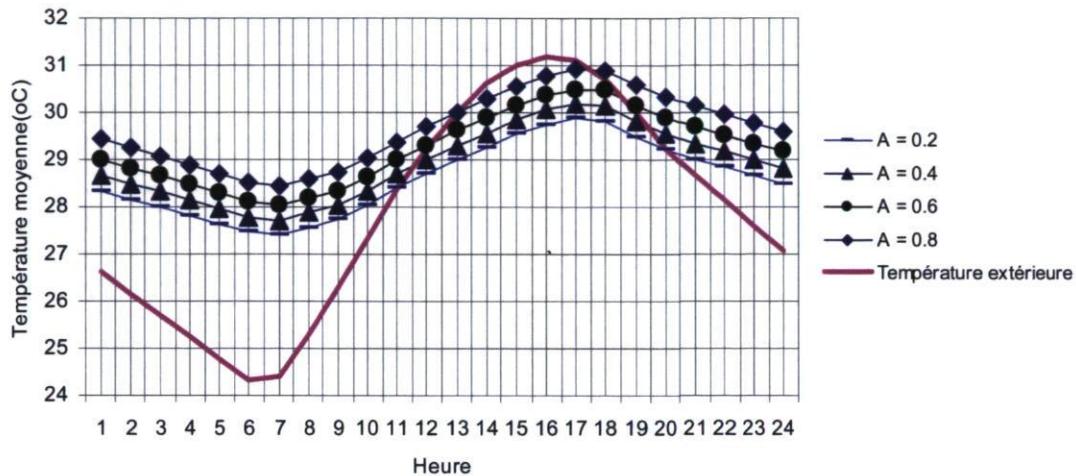


Figure 4.2.2.1.1: Températures extérieure et opérative moyenne intérieure pour les différentes absorptivités pendant juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La fig. 4.2.2.1.1 présente la température moyenne intérieure dans la pièce étudiée par les absorptivités différentes des surfaces extérieures et la température moyenne extérieure pendant les mois de juin et juillet. Cette figure montre que la différence de la température intérieure entre les couleurs claires et sombres de la façade extérieure est considérable. Elle est environ 1 °C dans la période chaude. Ce qui a permis d'affirmer que le bâtiment devrait être blanchi pour obtenir une ambiance plus confortable en été. Il est à noter que la superficie de la façade extérieure dans ce cas n'est pas très grande, seulement 13,2 m² (voir le tableau 3.2.1.1) par rapport à la superficie totale d'enveloppe qui est de 86,76 m². Si la façade extérieure devenait plus grande, la pièce recevrait plus de rayonnement. Dans ce cas, l'utilisation d'une couleur sombre sur les façades extérieures serait un réel obstacle pour l'ambiance thermique confortable du bâtiment. À la suite de la comparaison, il a été possible de considérer que la couleur claire de la façade extérieure joue un rôle important pour améliorer l'ambiance thermique en été. En hiver, la différence est aussi de 1 °C mais les résultats par contre démontrent que la couleur sombre est plus désirable que la couleur claire (voir la fig.4.2.2.1.2).

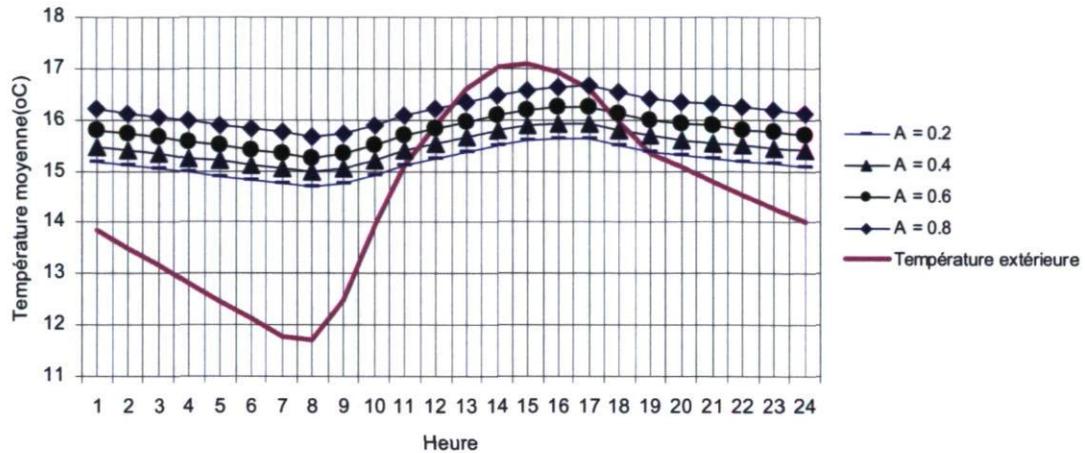


Figure 4.2.2.1.2: Températures extérieure et moyenne intérieure pour les différentes absorptivités durant janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

Les résultats des simulations indiquent que la température du plafond est influencée par la couleur extérieure du bâtiment. En été, une température élevée est obtenue pendant la nuit, ce qui peut créer une ambiance très inconfortable pour le sommeil. Le plafond devient un radiateur de la pièce qui accumule la chaleur de l'après-midi et réchauffe l'intérieur dans la nuit. Pour la façade la plus sombre ($A = 0,8$), la température du plafond oscille toujours de $30,8^{\circ}\text{C}$ à $31,4^{\circ}\text{C}$. Par contre, la température de la façade la plus claire ($A = 0,2$) oscille seulement autour de $29,5^{\circ}\text{C}$. (Voir fig.4.2.2.1.3). En hiver, on trouve comme phénomène que la variation de la température du plafond est négligeable et à l'inverse, la façade blanchie abaisse la température du plafond mais n'améliore pas l'ambiance thermique (voir fig.4.2.2.1.4).

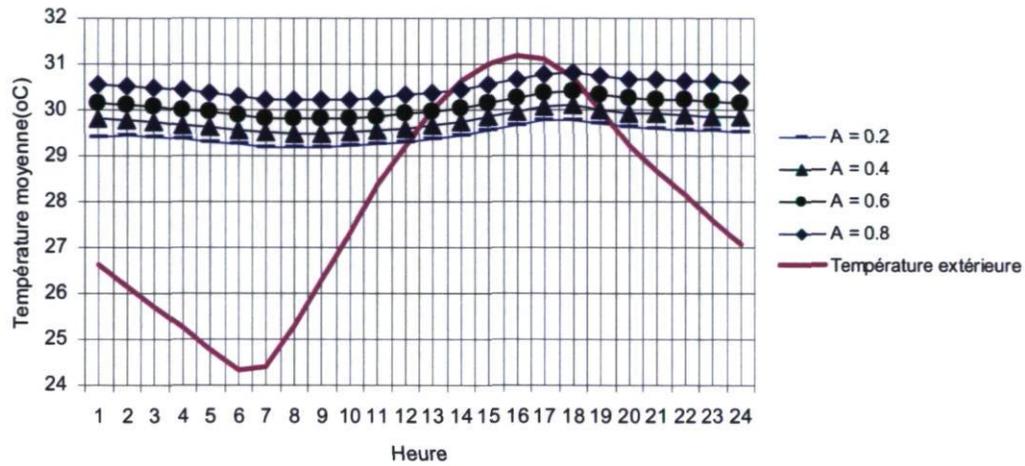


Figure 4.2.2.1.3: Température extérieure et du plafond moyenne pour les différentes absorptivités pendant juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

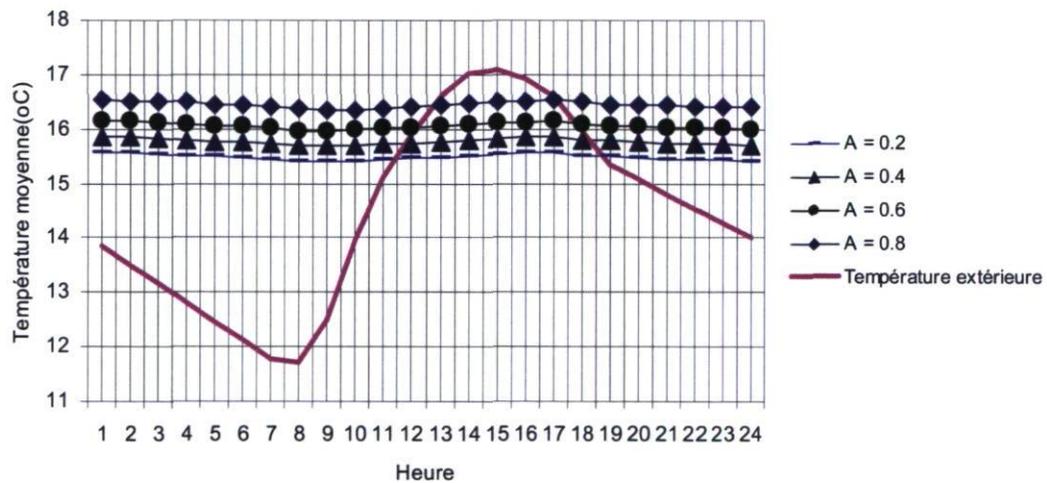


Figure 4.2.2.1.4: Température extérieure, du plafond moyenne pour les différentes absorptivités durant janvier dans la pièce étudiée au troisième étage

En terminant cette partie, on souligne qu'il faut tenir compte de l'utilisation d'une couleur claire sur les façades extérieures pour améliorer l'ambiance thermique du bâtiment, spécialement dans le contexte au Vietnam, où la surchauffe en été est toujours un grand défi. Les résultats montrent que la couleur claire a un impact assez important (jusqu'à 1°C en

température opérative) sur le confort thermique. De plus, cette stratégie est abordable et elle risque de permettre d'augmenter le niveau d'éclairage extérieur au niveau de la rue par la réflexion de la lumière par les façades extérieures.

4.2.2.2. Influence des matériaux isolants

Tel que mentionné précédemment, l'utilisation des matériaux isolants peut réduire la transmission de chaleur par l'enveloppe. Cette idée est aussi partagée par Oke, Taesler et Olsson (1990), idée démontrant que les matériaux isolants jouent un rôle important en matière de stratégie active dans le domaine de l'architecture. Aujourd'hui, les techniques de construction tendent à encourager les multicouches de murs avec des matériaux isolants (Roselund, 1993). En général, cette stratégie n'est pas encore appliquée en architecture vietnamienne. Peut-être est-ce parce que l'on doit payer plus cher et que la construction se complique. Les matériaux isolants sont utilisés surtout en architecture d'intérieur, comme pour les studios, les salles d'acoustique, les salles de concert, etc. Conséquemment, ces matériaux s'apparentent aux matériaux isolants acoustiques.

Toutefois, les recherches de Mohammad (2005) et Rosenlund (1993) suggèrent que les matériaux isolants peuvent être utilisés au Vietnam à un coût raisonnable. Cette prochaine partie vérifiera l'influence des matériaux isolants sur les murs extérieurs dans plusieurs cas différents. Le polystyrène extrudé a été choisi comme matériau isolant. Deux épaisseurs du matériau isolant sont étudiées : 50 et 100 mm. Deux épaisseurs diverses de la couche en brique sont aussi simulées : 110 et 220 mm. Il s'agit des deux épaisseurs les plus populaires en construction vietnamienne. Le tableau 4.2.2.2.1 présente une description détaillée des matériaux ainsi que des propriétés thermiques du mur extérieur du bâtiment de recherche.

Tableau 4.2.2.2.1: Description détaillée des propriétés thermiques des matériaux.

Élément de volume	Couche des matériaux	Densité (kg/m ³)	Conductivité λ (W/mK)	Chaleur spécifique (Wh/kgK)	Facteur d'absorption (%)		Coefficient d'émissivité (%)	
					Côté intérieur	Côté extérieur	Côté intérieur	Côté extérieur
Mur extérieur	Crépis	2000	1,2	0,28	40	40	80	80
	Brique	1800	0,96	0,26				
	Polystyrène extrudé	50	0,03	0,47				
	Crépis	2000	1,2	0,28				

Quatre cas différents sont vérifiés et nommés (a), (b), (c), (d). La fig. 4.2.2.2.1 présente une description de l'épaisseur de chaque couche des matériaux du mur extérieur pour les différents cas. La couche de polystyrène extrudé est placée à l'intérieur dans tous les cas (a), (b), (c), (d). Ce sont les tests très théoriques pour savoir si le polystyrène extrudé a vraiment les influences sur la température intérieure.

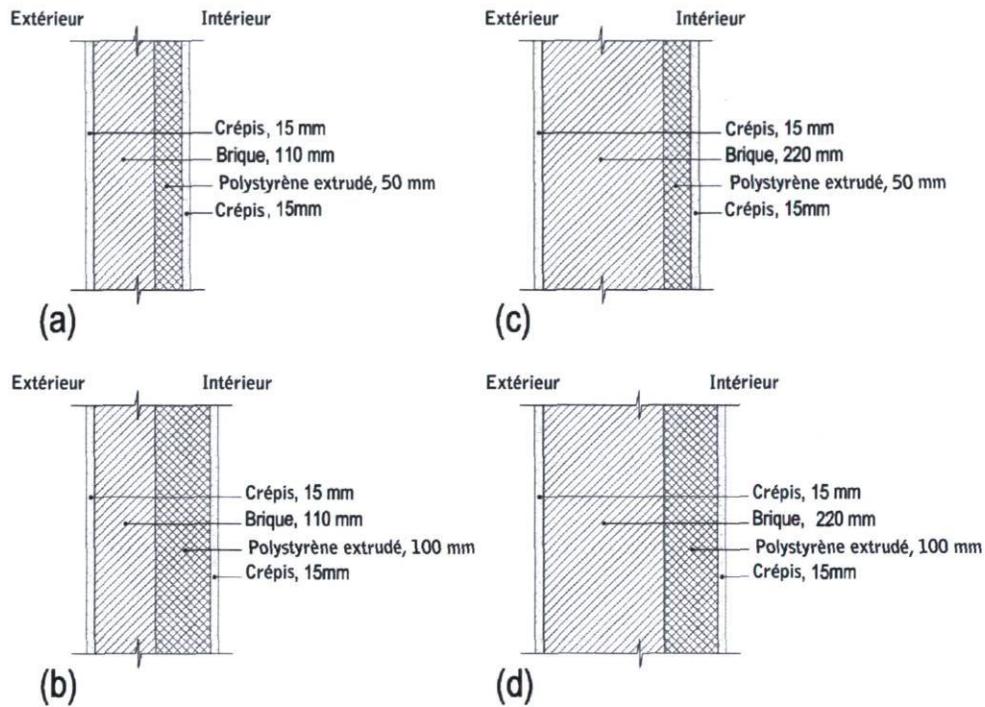


Figure 4.2.2.2.1: Description détaillée du mur extérieur des différents cas.

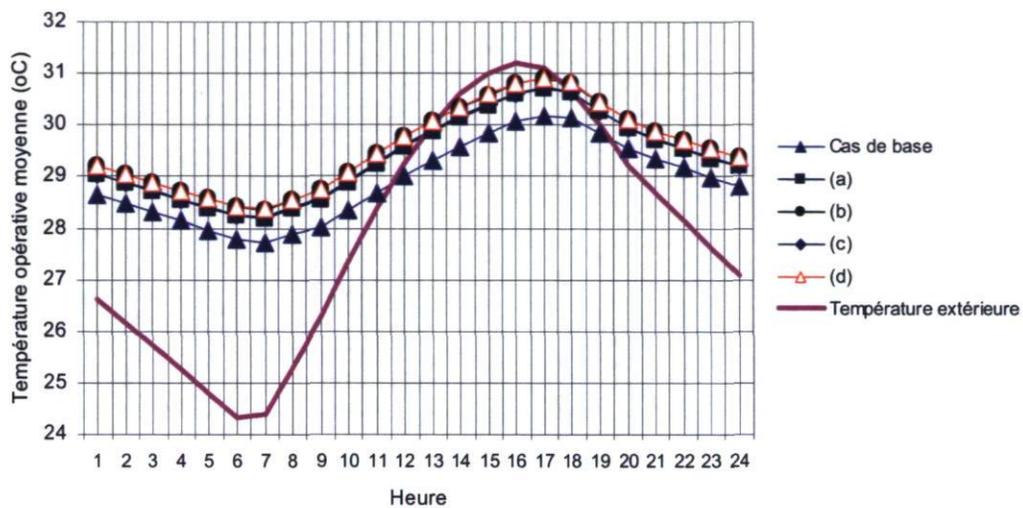


Figure 4.2.2.2.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour différentes épaisseurs de matériaux isolants et du mur aux mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La fig. 4.2.2.2.2 présente la température opérative moyenne dans la pièce étudiée pour différentes épaisseurs de matériaux isolants et du mur pendant les mois de juin et juillet. Cette figure indique que la différence de température intérieure n'est pas très grande entre les différents cas. Il semble que l'épaisseur du mur et des matériaux isolants ne soit pas un facteur majeur influençant la température de l'espace en contexte de recherche. Une vérification de l'influence de l'épaisseur de la couche des matériaux isolants a démontré qu'un isolant plus épais donnera une température intérieure plus élevée. Peut-être que l'utilisation de la masse thermique est plus significative dans les pays chauds et secs, où la variation de la température entre la nuit et le jour est grande comme le proposaient Mohammad (2005). Où peut-être que les matériaux isolants sont mal placés par rapport à la masse thermique. Le cas (d) a été choisi pour construire un nouveau cas, le cas (e) avec la masse thermique à l'intérieur et l'isolant (le polystyrène extrudé) à l'extérieur. Les couches des matériaux du cas (e) de l'extérieur à l'intérieur sont placées par ordre suivant :

- Crépis : 15 mm;
- Polystyrène extrudé : 100 mm – l'isolant thermique;
- Brique : 220 mm – la masse thermique;
- Crépis : 15 mm;

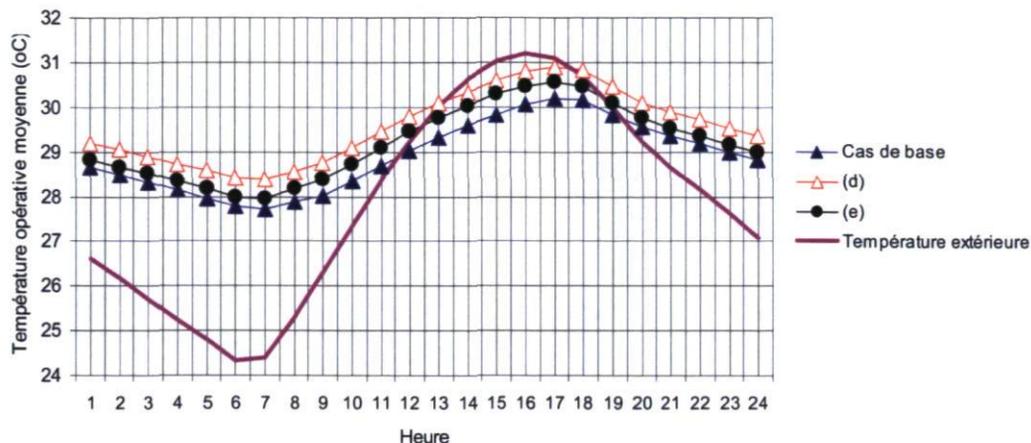


Figure 4.2.2.2.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure dans les différents cas aux mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La fig. 4.2.2.2.3 présente la température opérative moyenne dans la pièce étudiée avec les positions différentes des matériaux isolants sur les murs extérieurs pendant les mois de juin et juillet. Cette figure montre que le cas (e), où l'isolant est placé à l'extérieur en rapport avec la masse thermique, a donné un meilleur résultat en comparant avec le cas (d). Il faut noter que les deux cas ont une même épaisseur de masse thermique et d'isolant. La différence est seulement la position des couches de matériaux.

Cependant, le mur extérieur du cas de base donne une température intérieure un peu plus basse que celle des autres cas soit une différence d'environ 0,5 °C. Ce résultat a permis de relever une forte corrélation entre l'utilisation de matériaux isolants et la ventilation de l'espace. En été, avec une faible ventilation, (seulement 0,17 m/s pendant la nuit et de 0,2 m/s durant la journée), la chaleur accumulée par le mur et la couche des matériaux isolants a chauffé l'intérieur de la pièce. Cette idée est aussi partagée par Mohammad (2005). Donc, une vérification du cas (e) avec une ventilation nocturne devient intéressante pour la compréhension des conditions causant le confort thermique selon l'utilisation des matériaux isolants. Trois situations de changement d'air à l'heure (cah) par journée sont vérifiées (comme le cas M06) : de 8.00h – 11.00h : 16 cah, de 12.00h – 17.00h : 1 cah; de 18.00h – 7.00h : 40 cah.

La figure 4.2.2.2.4 montre que la température opérative est diminuée significativement: environ 0,3 à 0,6 °C en comparaison au cas (e). L'influence de la ventilation sur l'ambiance thermique intérieure est déjà analysée dans la partie précédente. Dans cette partie, on considère que la ventilation devrait aller au-delà du concept de confort thermique, puisqu'elle influence directement la performance thermique des bâtiments, spécialement dans les pays tropicaux chauds et humides. Par ailleurs, on affirme aussi que l'utilisation des matériaux isolants peut être réalisée dans le contexte vietnamien à condition qu'une ventilation adéquate soit prévue.

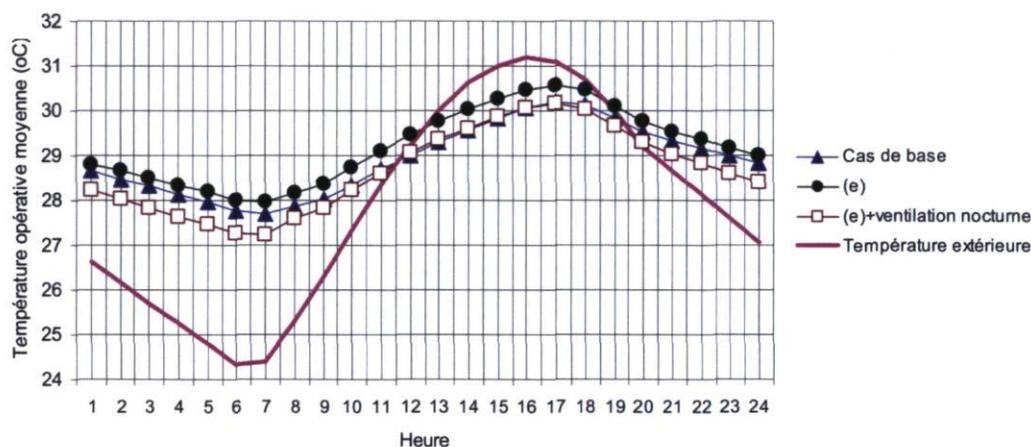


Figure 4.2.2.2.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

En hiver, les matériaux isolants affectent plus fortement l'ambiance thermique comme le démontre la figure 4.2.2.2.5. Une température intérieure plus élevée de 0,5 °C dans les cas utilisant les matériaux isolants correspond à une ambiance plus chaude en hiver.

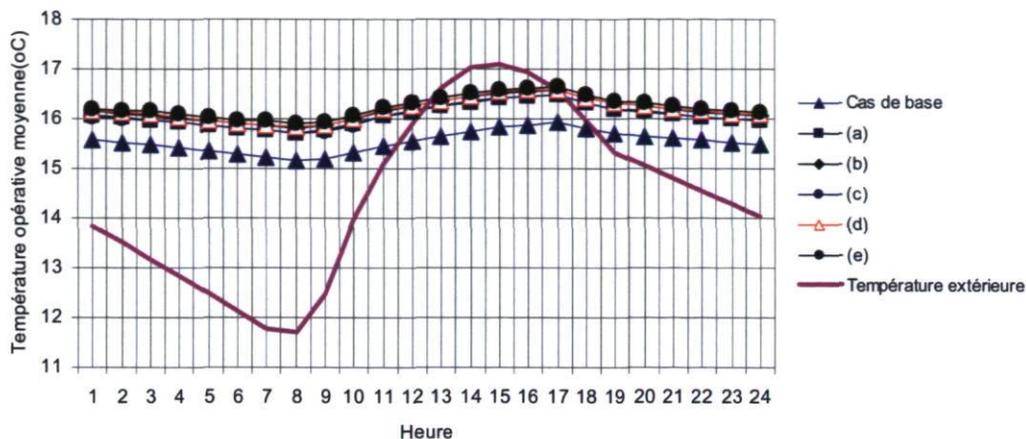


Figure 4.2.2.2.5: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

À la lumière des résultats des différentes simulations, on peut conclure que l'utilisation des matériaux isolants est acceptable dans le contexte de la recherche si on assure une ventilation adéquate. Il est à noter que la position des matériaux isolants soit le polystyrène extrudé à l'extérieur par rapport à la masse thermique donne un meilleur résultat. Pendant la nuit, il fait plus froid à l'extérieur qu'à l'intérieur et l'isolant empêche alors les déperditions thermiques vers l'extérieur tout en conservant la chaleur à l'intérieur du bâtiment. D'un autre côté, pendant le jour i.e lorsque la température extérieure est supérieure à la température intérieure, le petit retard de transfert de chaleur causé par l'isolant ne parvient pas à compenser pour la chaleur retenue pendant la nuit. Cette stratégie ne serait donc valable seulement que si elle était couplée avec une bonne stratégie de ventilation nocturne. On voit dans la figure 4.2.2.2.4 que l'effet de l'isolant est seulement intéressant s'il est couplé avec une bonne stratégie de ventilation nocturne. Avec cette ventilation, la température opérative intérieure a été améliorée pendant la nuit (de 21.00h au matin). De plus, les matériaux isolants montrent une capacité d'améliorer significativement l'ambiance thermique en hiver. Alors, une combinaison judicieuse entre cette stratégie et la ventilation nocturne produira une structure architecturale passive intéressante.

4.2.3. Toiture

Évidemment, la toiture requiert une attention particulière lors de la mise en place de stratégies adaptées au climat tropical chaud et humide. En effet, tout près de 60% de la chaleur d'une maison se transfère par la toiture (Soubdhan, 2005). Les recherches récentes démontrent que l'utilisation de matériaux isolants différents peut améliorer significativement l'ambiance thermique intérieure (Soubdhan, 2005; Mohammad, 2005). Au Vietnam, on utilise souvent une deuxième toiture en tôle pour protéger la toiture principale. L'utilisation de matériaux isolants sur les toitures n'est pas encore intégrée dans l'architecture vietnamienne. Cela s'explique probablement par les coûts élevés de cette mesure qui complique en même temps la construction.

Cette partie est destinée à analyser les différentes stratégies utilisées pour la construction de la toiture (c'est-à-dire les matériaux isolants et la deuxième toiture) et vise à répondre aux questions suivantes :

- Est-ce qu'on peut utiliser les matériaux isolants sur la toiture au Vietnam pour améliorer le confort thermique ? Si oui, comment ?
- Au Vietnam, comment peut-on bien profiter de la deuxième toiture pour améliorer le confort thermique ?

4.2.3.1. Influence des matériaux isolants

Dans une recherche effectuée en 2005, Mohammad a suggéré quelques méthodes pour disposer les matériaux isolants sur la toiture. Les deux méthodes suivantes ont été choisies dans le cadre de cette recherche, car elles peuvent être appliquées facilement en architecture vietnamienne (voir fig. 4.2.3.1.1). Comme sur le mur extérieur, le polystyrène extrudé a également été choisi comme matériau isolant. Deux épaisseurs différentes de polystyrène sont aussi simulées : 50 et 100 mm. Le tableau 4.2.3.1.1 présente une description détaillée des matériaux ainsi que les propriétés thermiques de la toiture du bâtiment faisant l'objet de recherche. Seulement les valeurs d'absorption et d'émissivité de céramique sont présentées car les autres ne sont pas applicables au cas étudié.

Tableau 4.2.3.1. 1: Description détaillée des propriétés thermiques des matériaux (Pham, 2002).

Élément de volume	Couche des matériaux	Densité (kg/m ³)	Conductivité λ (W/mK)	Chaleur spécifique (Wh/kgK)	Facteur d'absorption (%)		Coefficient d'émissivité (%)	
					Côté intérieur	Côté extérieur	Côté intérieur	Côté extérieur
Toiture	Crépis	2000	1,2	0,28				
	Polystyrène extrudé	50	0,03	0,47				
	Brique creuse + ciment	1350	0,43	0,18				
	Béton	2300	1,7	0,24				
	Céramique	600	0,23	0,55	70	70	80	80

Ainsi, deux cas différents sont étudiés : (a), (b). La fig. 4.2.3.1.1 présente une description de la position et de l'épaisseur de chaque couche des matériaux ainsi que la position des matériaux isolants dans certains cas.

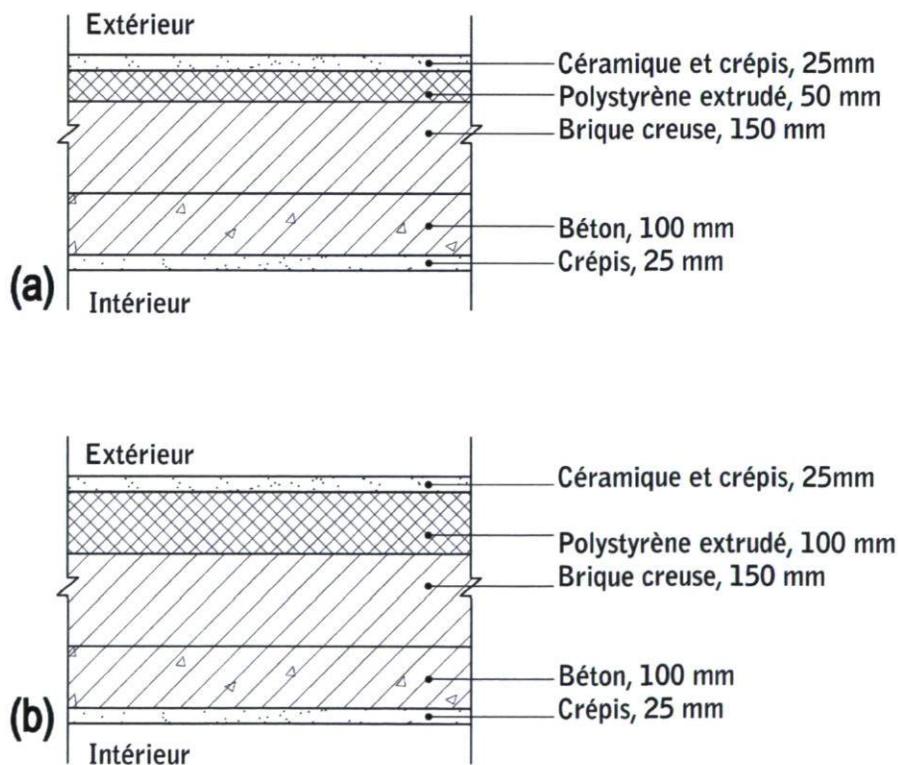


Figure 4.2.3.1.1: Description détaillée de la toiture pour les différents cas.

La fig. 4.2.3.1.2 présente la température opérative moyenne dans la pièce étudiée pour les différentes épaisseurs de matériaux isolants sur la toiture pendant les mois de juin et juillet. Cette figure montre que la différence de température intérieure n'est pas significative entre les cas. Il apparaît donc que les épaisseurs ne constituent pas un facteur majeur influençant la température de l'espace en contexte de recherche où la toiture est une construction à forte inertie. L'ajout d'une couche de polystyrène extrudé de 100 mm dans le cas (b) ne donne pas le résultat désiré même si ce cas résulte en une température plus basse. Ce cas permet de réduire la température intérieure de 0,3 °C. Donc, l'utilisation des matériaux isolants sur la toiture de forte inertie, avec une faible ventilation (seulement 0,17 m/s lors de la nuit et de 0,2 m/s durant la journée) n'est pas une bonne solution en été.

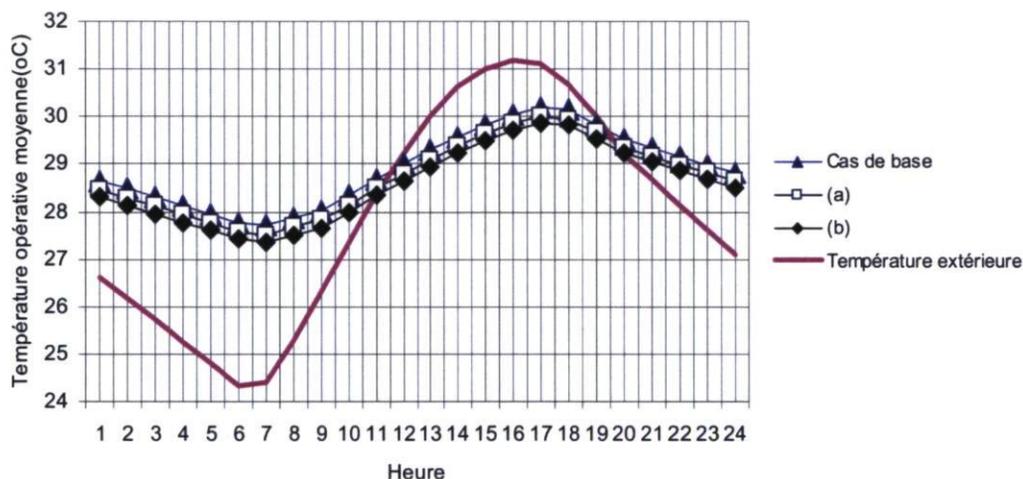


Figure 4.2.3.1.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

Comme pour l'étude des murs, les simulations avec stratégies de ventilation nocturne sont aussi vérifiées. L'isolation pourrait être plus efficace si elle était couplée avec une stratégie de ventilation nocturne. Donc, une vérification du cas (b) (le meilleur cas) avec une ventilation nocturne plus forte devient intéressante pour la compréhension des conditions causant le confort thermique lors de l'utilisation des matériaux isolants. Comme sur le mur extérieur, trois situations de changement d'air à l'heure (cah) par journée sont vérifiées (comme le cas M06) : de 8.00h – 11.00h : 16 cah, de 12.00h – 17.00h : 1 cah, de 18.00h – 7.00h : 40 cah.

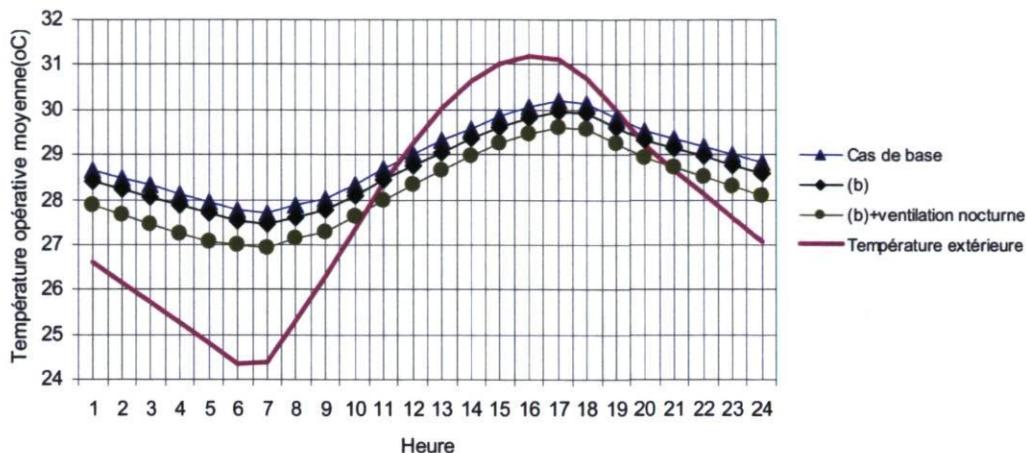


Figure 4.2.3.1.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différents cas pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La figure 4.2.3.1.3 montre que la température opérative est significativement diminuée. Pendant la nuit (de 21.00h à 7.00h), une réduction de 0,4 à 0,6 °C a été constatée pour le cas (b) + ventilation nocturne par rapport au cas (b), et de 0,6 à 0,8 °C par rapport au cas de base. En analysant les résultats obtenus par cette simulation, il a été possible d'affirmer que la ventilation nocturne a le potentiel d'augmenter adéquatement le confort thermique de la pièce étudiée, à condition que cette ventilation soit suffisante (de 12 cah). Alors, l'utilisation de polystyrène extrudé comme matériau isolant sur la toiture peut être acceptable si elle est couplée avec une ventilation nocturne adéquate.

La fig. 4.2.3.1.4 présente la température opérative moyenne dans la pièce étudiée pour les différentes positions de matériaux isolants sur la toiture durant le mois de janvier. En hiver, les matériaux isolants ont une influence plus forte sur l'ambiance thermique, comme le montre la figure 4.2.3.1.4. Une température intérieure plus élevée de 0,3 °C (le midi) et 0,7 °C (pendant la nuit) dans les cas utilisant les matériaux isolants résulte en une ambiance plus chaude en hiver.

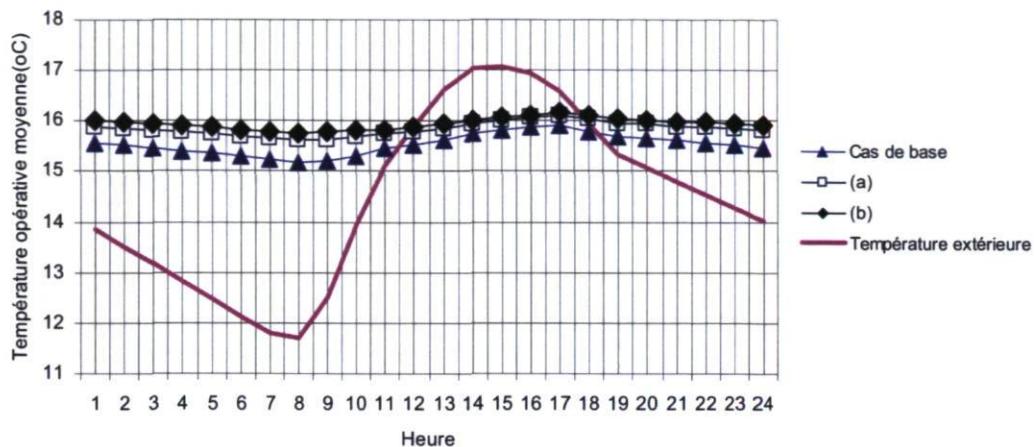


Figure 4.2.3.1.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différentes positions des matériaux isolants durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

À la lumière des résultats obtenus pour chacun des cas, on peut conclure que l'utilisation de matériaux isolants sur la toiture de forte inertie est acceptable dans le contexte de la recherche. Même si elle augmente le prix de construction, l'utilisation de matériaux isolants peut améliorer le confort thermique. De plus, l'utilisation du polystyrène extrudé sur la toiture offre une résistance à l'humidité et à l'eau. Elle peut donc fournir une bonne solution pour contrer l'infiltration de l'eau de pluie, spécialement en été.

4.2.3.2. Influence de la deuxième toiture

De façon générale, la deuxième toiture devient intéressante dans la mesure où elle bloque le rayonnement solaire. Deux façons de couper efficacement le rayonnement solaire sont :

- De le réfléchir pour les longueurs d'ondes courtes (donc choisir une couleur claire ayant un facteur de réflexion de l'ordre de 70-80%).
- D'utiliser un matériau à faible émissivité (faible absorption pour les infrarouges éloignés) comme l'aluminium, par exemple, qui a une émissivité de l'ordre de 10 - 30%.

Au Vietnam, la deuxième toiture en tôle est utilisée assez souvent parce qu'elle comporte beaucoup d'avantages. Premièrement, elle peut contrer l'effet de chaleur durant l'été. Deuxièmement, c'est bien connu que les précipitations moyennes annuelles sont très élevées

au Vietnam pouvant atteindre jusqu'à 300 et même 500 mm par mois. Or, l'utilisation de la deuxième toiture peut diminuer l'infiltration de l'eau de pluie dans la toiture en béton. Il s'agit là d'un point important dans les stratégies architecturales car la condensation de l'eau dans les constructions peut causer des problèmes graves et difficiles à résoudre. Troisièmement, le coût d'utilisation est moindre par rapport à l'utilisation des autres matériaux isolants, d'autant plus que la tôle est très durable. Compte tenu des avantages que ce matériau offre, la tôle est souvent recommandée dans les projets des architectes comme la meilleure solution pour la toiture, et cela, même pour les maisons de luxe ou les villas.



Figure 4.2.3.2.1: Tôle sur la toiture dans un projet d'architecture au Vietnam – la villa (Photo tirée d'Internet).

En général, les Vietnamiens utilisent la tôle dans la construction de deux façons différentes : soit, on la dépose directement sur la toiture en béton, avec une inclinaison de $1,5^\circ$ pour l'évacuation de l'eau ou bien, on utilise une deuxième toiture. Dans le contexte de cette recherche, on retient seulement la deuxième toiture en tôle, car elle est appliquée partout en milieu urbain. Dans les maisons tubes, on veut profiter au maximum de l'espace. La toiture en béton devient alors une petite terrasse en haut pour sécher les vêtements.

Dans ce cas, une deuxième toiture en tôle est disposée directement sur la toiture en béton qui est inclinée de 20° . Cette toiture a une dimension de 4 mètres x 11,92 mètres et elle couvre toute la superficie de cette maison, comme le montre la figure 4.2.3.2.2. Trois couleurs différentes sont étudiées ici : gris, bleu foncé, rouge. Ce sont les couleurs les plus fréquemment utilisées au Vietnam.

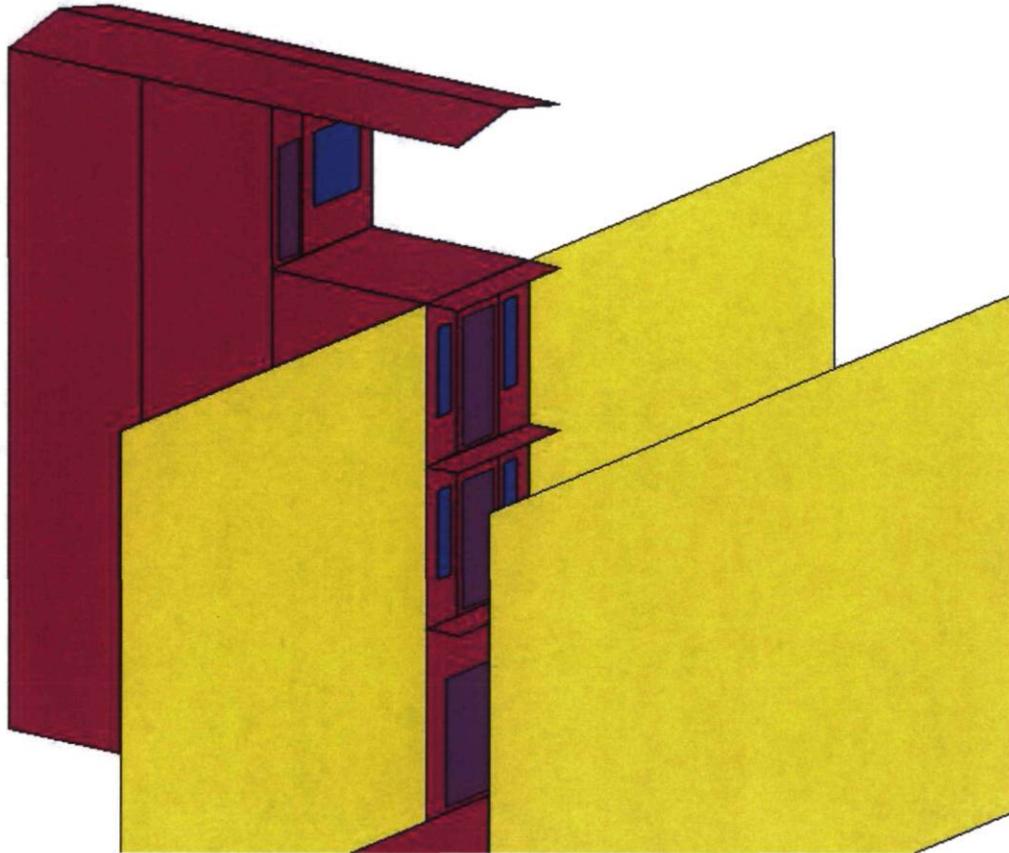


Figure 4.2.3.2.2: Modèle avec la deuxième toiture dans Derob-LTH.

Le tableau 4.2.3.2.1 présente une description détaillée des matériaux ainsi que les propriétés thermiques de la deuxième toiture en tôle du bâtiment avec les couleurs différentes. (Evans, 1980). Les facteurs d'absorptions et les coefficients d'émissivité sont pareils pour tous les deux côtés de la deuxième toiture.

Tableau 4.2.3.2. 1: Description détaillée des propriétés thermiques des matériaux.

Élément de volume	Couche de matériau	Densité (kg/m ³)	Conductivité λ (W/mK)	Chaleur spécifique (Wh/kgK)	Facteur d'absorption (%)	Coefficient d'émissivité (%)
Deuxième Toiture	Tôle neuve	2700	204	0.23	20	20
	Tôle grise	2700	204	0.23	30	30
	Tôle bleu foncé	2700	204	0.23	50	30
	Tôle rouge	2700	204	0.23	70	30

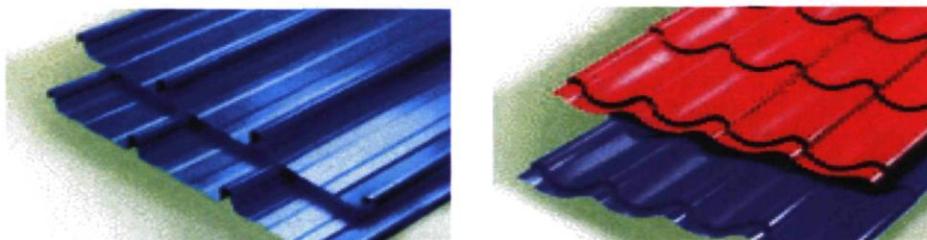
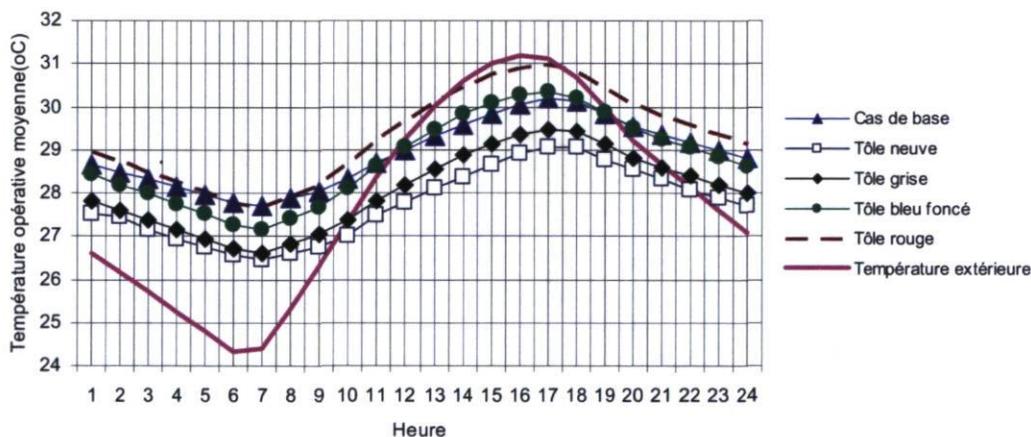
Figure 4.2.3.2.3: Tôle et ses différentes couleurs utilisées en construction au Vietnam (photo tirée de l'Internet : www.tonthanhcong.com).

Figure 4.2.3.2. 4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les deuxièmes toitures selon les différentes couleurs pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La fig. 4.2.3.2.4 présente la température opérative moyenne dans la pièce étudiée pour les différentes couleurs des deuxièmes toitures pendant les mois de juin et juillet. Cette figure

montre que la tôle neuve dont la coefficient d'émissivité le plus faible est plus performante que les autres, car on peut alors diminuer la chaleur de plus de 1 degré par rapport au cas de base et ce, durant toute la journée. Par contre, il est généralement admis que l'utilisation de couleurs sombres sur les façades extérieures n'est pas favorisée. À compter de 12.00h et jusqu'à 17.00h, la deuxième toiture en tôle rouge augmente la température opérative jusqu'à atteindre celle de l'extérieur. Une différence d'environ 1,5 à 2 °C est constatée en comparant le cas le plus sombre (tôle rouge) et le cas le plus clair (tôle neuve). Les avantages de la deuxième toiture sont plus évidents en observant les températures du plafond pour chacun des cas.

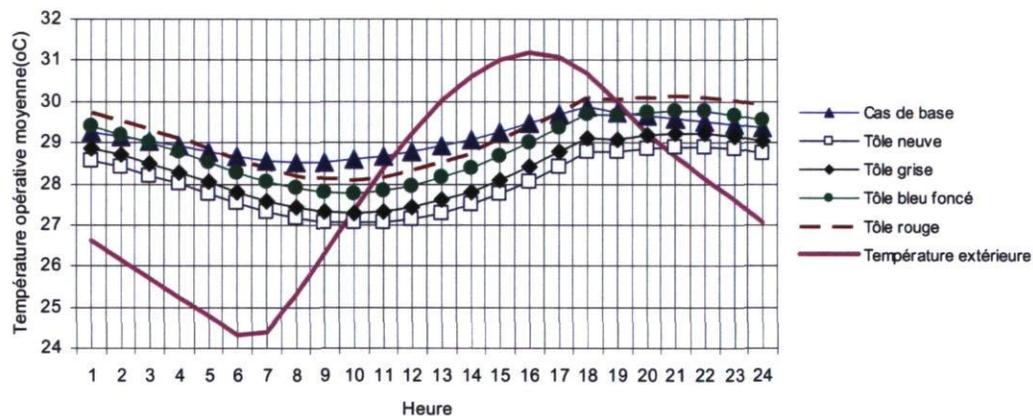


Figure 4.2.3.2.5: Température extérieure et température moyenne du plafond pour les deuxièmes toitures selon les différentes couleurs pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La fig. 4.2.3.3.5 présente la température moyenne du plafond dans la pièce étudiée pour les différentes couleurs des deuxièmes toitures pendant les mois de juin et juillet. On peut observer clairement que la différence de 1,7 °C entre le cas avec la tôle neuve et le cas de base est obtenue de 9.00h du matin jusqu'à 15.00h. Seule la toiture en tôle neuve et en tôle grise font diminuer un peu la température du plafond pendant la nuit. Le cas utilisant la tôle rouge génère une température approximativement égale à celle du cas de base. Pendant le jour, la deuxième toiture en tôle s'avère aussi une bonne solution pour diminuer la température du plafond d'environ 1 °C– le radiateur de la chaleur principale de la pièce de recherche (voir chapitre 4.1.1).

Une combinaison entre la tôle et les matériaux isolants sera vérifiée pour connaître son impact sur la deuxième toiture. La tôle grise a été choisie. Comme sur le mur et sur la toiture principale, le polystyrène extrudé est aussi choisi comme matériau isolant et il est installé directement sous la toiture en tôle. Deux épaisseurs différentes de polystyrène extrudé sont étudiées. La fig. 4.2.3.3.6 présente une description de la position et de l'épaisseur de chaque couche de matériaux dans chacun des cas.

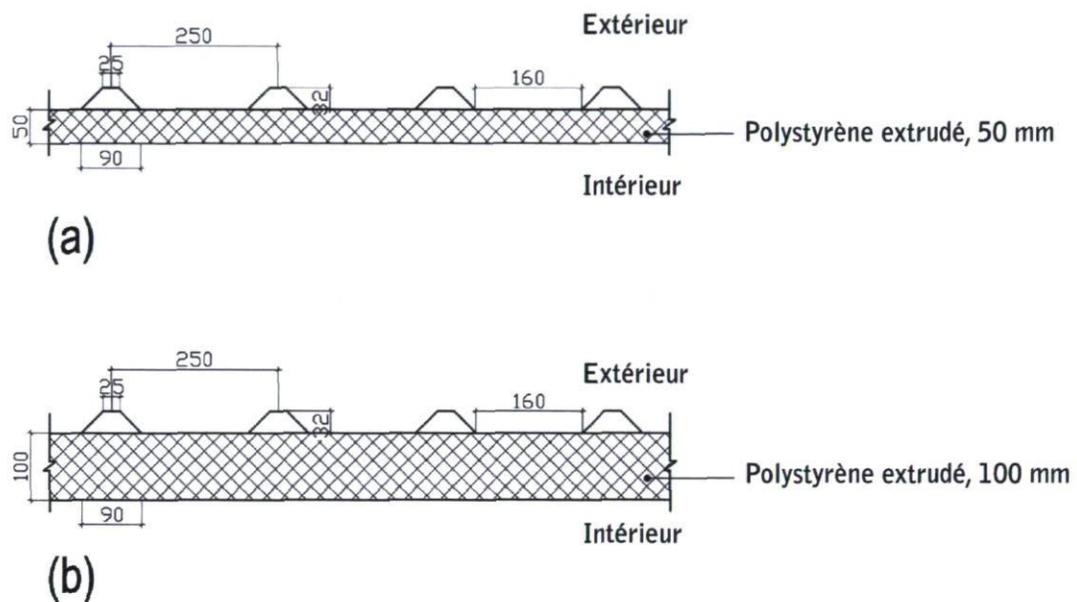


Fig. 4.2.3.3.6 : Description de la position et de l'épaisseur de chaque couche de matériaux des différents cas.

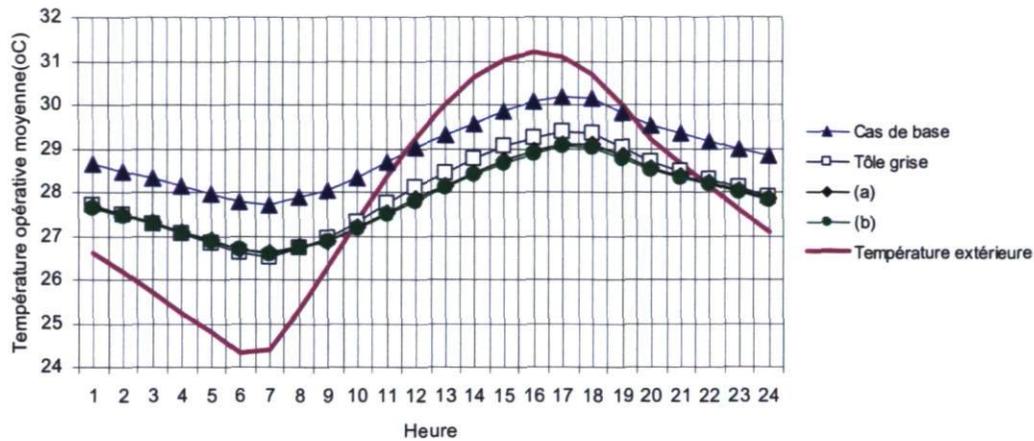


Figure 4.2.3.2.7: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les deuxième toitures avec les différents matériaux pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La fig. 4.2.3.3.7 présente la température moyenne du plafond dans la pièce étudiée pour les différentes épaisseurs de polystyrène extrudé sur la deuxième toiture pendant les mois de juin et juillet. Les résultats ne démontrent pas de changement significatif entre les cas étudiés. Il apparaît que la combinaison entre la deuxième toiture et les matériaux isolants n'est pas utile. En plus, elle augmenterait le coût de construction.

En hiver, l'impact de la deuxième toiture sur le confort thermique n'est pas significatif. Les différences entre les couleurs des matériaux étant très petites, on peut considérer que l'influence de la couleur de la deuxième toiture est la même pour chacun des cas. Ce résultat est dû au faible rayonnement solaire pendant le mois de recherche : le mois de janvier.

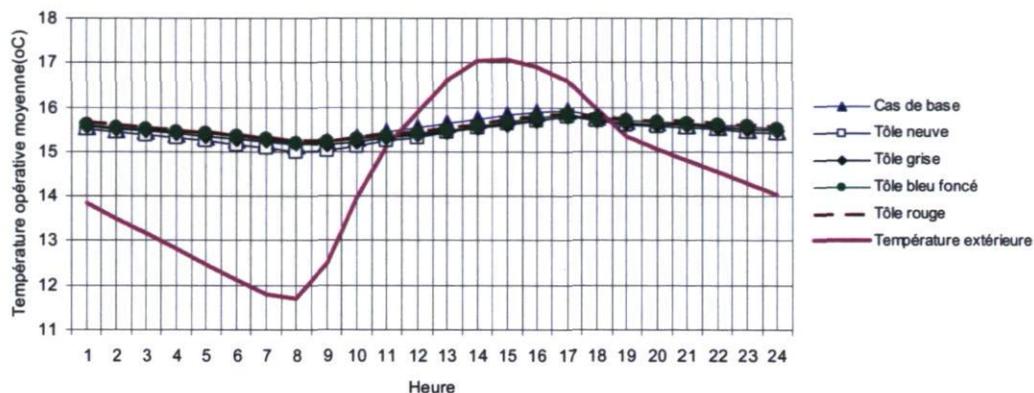


Figure 4.2.3.2.8: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour différentes positions de matériaux isolants durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

Il faut toujours se rappeler que, vu les conditions climatiques au Vietnam, les solutions architecturales sont pensées en fonction de l'été plutôt qu'en fonction de l'hiver. L'utilisation de la deuxième toiture en tôle offre donc en général une bonne solution pour l'ambiance thermique intérieure de la pièce étudiée. Les matériaux dont le coefficient d'émissivité est le plus faible vont donner un meilleur résultat. La couleur externe de cette deuxième toiture exige également une attention particulière puisqu'une couleur gris pâle offre un meilleur résultat par rapport aux couleurs plus foncées et plus sombres. En plus, cette solution est facile à construire. L'utilisation des matériaux isolants sur la deuxième toiture n'est pas utile puisqu'elle ne donne pas de résultats significativement meilleurs et qu'elle augmente certainement le coût de construction. On peut donc considérer que les deux principaux avantages que la deuxième toiture apporte sont :

- Protection contre les rayons du soleil qui sont très forts en été au Vietnam. Ainsi, la deuxième toiture en tôle crée une légère couverture pour la toiture principale en béton;
- Protection contre la pluie. Un soin particulier doit être apporté aux toitures pour protéger les maisons, spécialement dans les pays tropicaux et humides comme le Vietnam.

4.2.4. Occultation

En observant la trajectoire du soleil d'Hanoi (latitude 21° Nord, dans la zone située entre l'équateur et le tropique du Cancer) sur une base annuelle, on remarque qu'il passe au zénith

deux fois par année : une fois au solstice d'été (intensité maximum) et l'autre fois au solstice d'hiver (intensité minimum). En été, la température de l'air se trouve augmentée par le rayonnement solaire intense, spécialement par le rayonnement diffus (réfléchi par les nuages). Donc, l'utilisation des occultations constitue l'une des solutions indispensables dans les stratégies architecturales au Vietnam. En plus, la ventilation naturelle est toujours souhaitable pour refroidir les constructions et créer une ambiance confortable et hygiénique dans les bâtiments. Il y aurait donc deux aspects contradictoires reliés aux fenêtres : l'efficacité de la ventilation naturelle (plus on augmente la superficie des fenêtres, plus le vent peut pénétrer dans l'habitation) et la pénétration du rayonnement solaire dans la journée.

Dans le chapitre 4.2.1, on a démontré que l'ouverture des fenêtres est seulement favorisée pendant la nuit car dans la journée, celle-ci peut augmenter la température intérieure. Par contre, il serait agréable d'ouvrir les fenêtres dans la journée pour obtenir une ambiance bien ventilée. En effet, même si cela peut augmenter la température intérieure, nous avons besoin d'être en contact avec l'extérieur. De ce fait, une recherche d'occultation qui permettrait, d'une part, d'identifier les besoins d'utilisation des occultations dans l'architecture tropicale et, d'autre part, de mesurer avec précision la capacité de celles-ci à améliorer l'ambiance thermique intérieure serait souhaitable.

Dans le cas de base, la superficie des fenêtres est de 1,8 m², le verre est simple avec des persiennes en bois. Le balcon de béton est conçu comme un brise-soleil et a une profondeur de 0,9m. Il s'étend sur toute la largeur de la maison, c'est-à-dire 4 mètres. Le tableau 4.2.4.1 présente une description détaillée de cas où les superficies des fenêtres sont différentes.

Tableau 4.2.4. 1: Détail du changement de superficie des fenêtres pour différents cas.

Cas	Superficie	Pourcentage de superficie fenêtre/ superficie de mur	cah du jour - Été	cah de la nuit - Été	cah du jour - Hiver	cah de la nuit - Hiver
	d'ouverture (m ²)	(%)	(8.00-19.00h)	(1.00-7.00h; 19.00-24.00h)	(8.00-19.00h)	(1.00-7.00h; 19.00-24.00h)
M00-(a)	1.8	13.6	8	6	0.8	0.6
(b)	2.52	19	11	9	1.1	0.9
(c)	3.78	28.6	16	14	1.6	1.4
(d)	4.78	36.2	20	17	2	1.7

Même la plus grande superficie (soit $4,78 \text{ m}^2$) ne correspond pas aux fenêtres extrêmement grandes que l'on retrouve au Vietnam ; la plus grande fenêtre étudiée représente seulement 36,2% de la surface extérieure de la pièce étudiée. Pour chaque superficie de fenêtre étudiée, on va obtenir un changement d'air à l'heure (cah) équivalent, en fonction de l'équation 17 (le tableau 4.2.4.1). La figure 4.2.4.1 présente les différentes géométries des fenêtres étudiées.

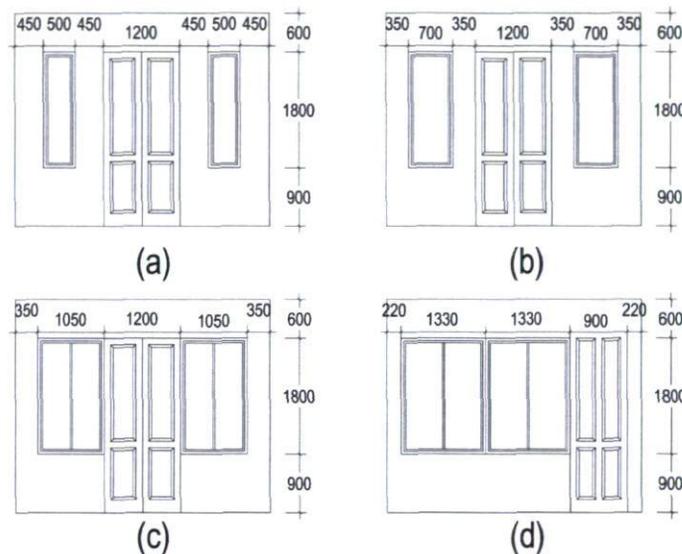


Figure 4.2.4.1: Détail de la géométrie des fenêtres pour chacun des cas.

La figure 4.2.4.2 présente la température opérative moyenne pour les différents cas pendant les mois de juin et juillet. Cette figure nous permet d'observer clairement l'influence de la dimension des fenêtres sur l'ambiance thermique intérieure. En été, cette influence est plus marquée de 15.00h à 19.00h, car les fenêtres sont orientées vers l'ouest. La température opérative maximale (presque $31,5 \text{ }^\circ\text{C}$, à 17.00h) est obtenue avec le cas (d) où la superficie des fenêtres est la plus grande, c'est-à-dire $4,78 \text{ m}^2$. Durant la nuit, en comparant le cas (a) et (d), on remarque que la différence de température opérative est d'environ de $0,5$ à $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ alors que pour les trois autres cas (a), (b), (c), la température intérieure est presque identique pendant la nuit. La différence de la température intérieure opérative pendant la nuit et au matin est plus petite que l'augmentation notée durant l'après-midi, de 13.00h à 19.00h, en comparant entre le cas de base et le cas (d).

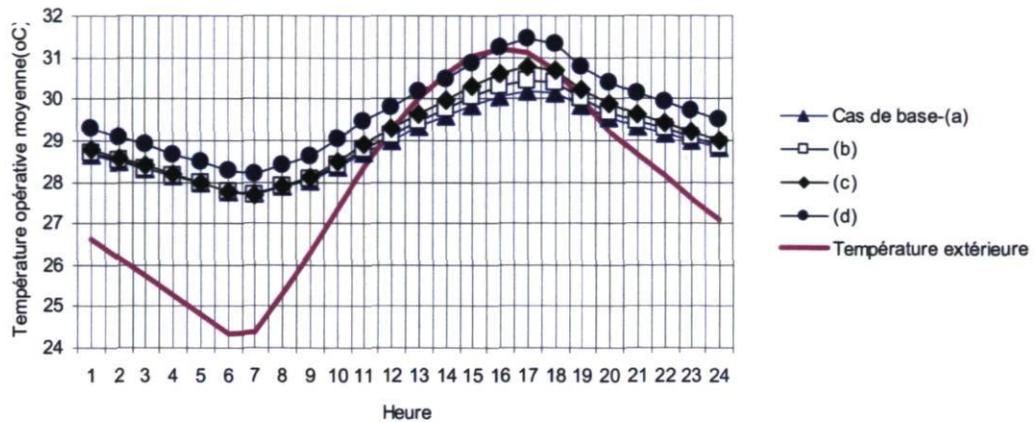


Figure 4.2.4.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différentes grandeurs de fenêtres pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

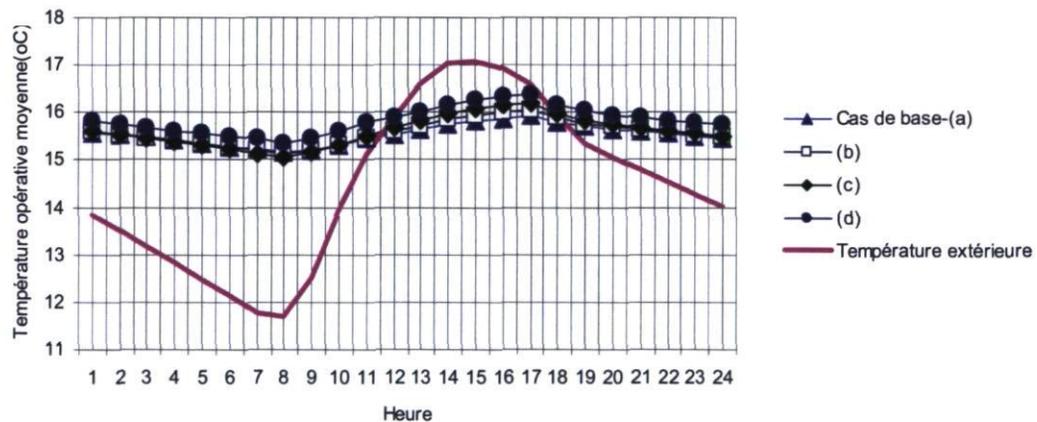


Figure 4.2.4.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les différentes grandeurs de fenêtres durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

La figure 4.2.4.3 présente la température opérative moyenne pour chacun des cas durant le mois de janvier. En hiver, l'influence de la dimension des fenêtres sur la température opérative intérieure est moins importante qu'en été. Seulement une petite différence de la température opérative intérieure de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a été constatée de 13.00h à 17.00h, entre le cas (d) et le cas de base (a). Donc, une grande fenêtre orientée à l'ouest peut servir à augmenter la

température opérative intérieure en hiver, mais elle peut aussi causer des problèmes de surchauffe lors des après-midi d'été et cela, même si on a déjà utilisé un brise-soleil en béton d'une largeur de 0,9 m. Ce problème deviendra plus grave si la ventilation nocturne est faible.

En lien avec l'objectif d'améliorer l'ambiance thermique intérieure de la pièce de recherche, des balcons en béton de 1,2 m et 1,5 m de largeur sont disposés à l'extérieur pour servir de brise-soleil. Il est à noter que ce type de brise-soleil est très courant au Vietnam. On utilise souvent le balcon pour protéger les façades du rayonnement du soleil. Dans notre étude, seuls le cas de base et le cas (d) ont été choisis pour faire les simulations.

Pour le cas de base (a) (où la fenêtre est plus petite), la dimension du brise-soleil n'a pas d'influence significative sur la température opérative intérieure, comme on le voit dans la figure 4.2.4.4 pour l'été et dans la figure 4.2.4.5 pour l'hiver.

En fait, en utilisant un balcon de 1,5 m, le changement de température opérative intérieure est difficilement appréciable autant en été qu'en hiver.

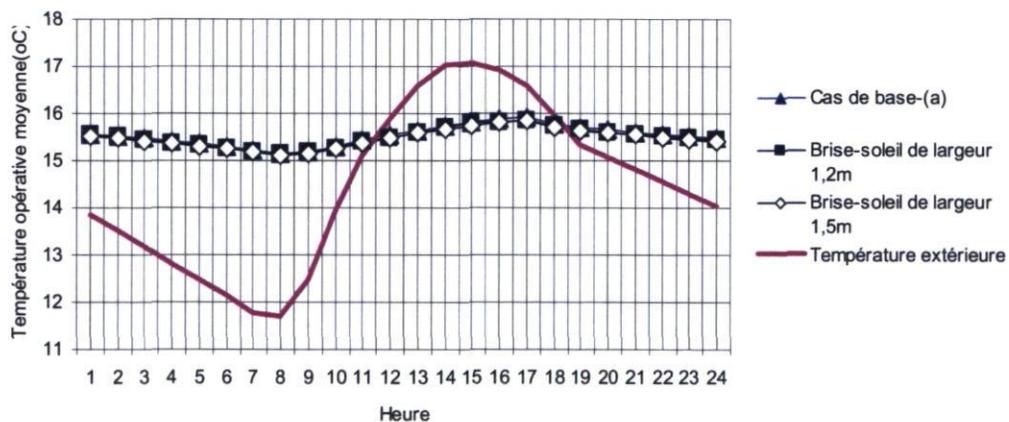


Figure 4.2.4.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure en fonction des différentes dimensions de brise-soleil pour le cas de base pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

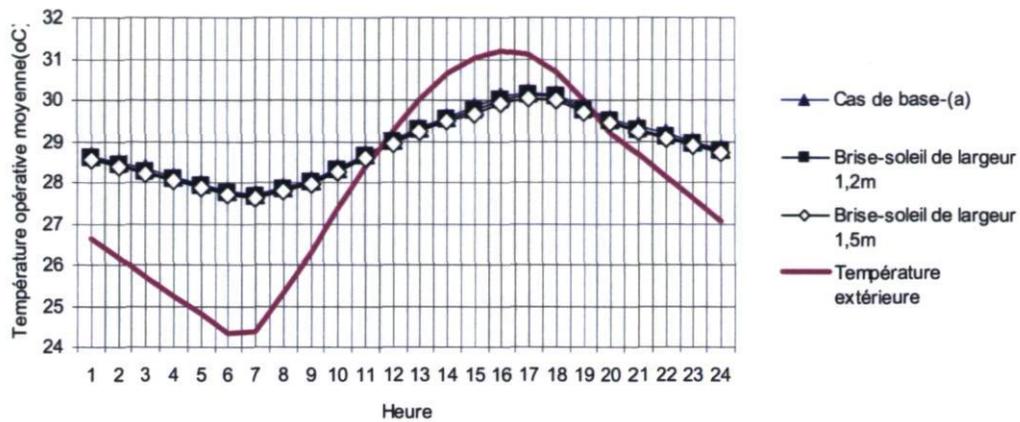


Figure 4.2.4.5: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure en fonction des différentes dimensions de brise-soleil pour le cas de base durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

Pour le cas (d), où la fenêtre est plus grande, les mêmes dimensions de brise-soleil sont vérifiées. En été, un brise-soleil d'une largeur de 1,5 m aide à réduire légèrement la température opérative intérieure (voir fig. 4.2.4.6), mais cette réduction est négligeable. Vers 17h, la température opérative intérieure est plus élevée que celle du cas de base d'environ 1 °C. Cela veut dire que ce type de brise-soleil n'est pas efficace pour contrer la pénétration des rayons du soleil.

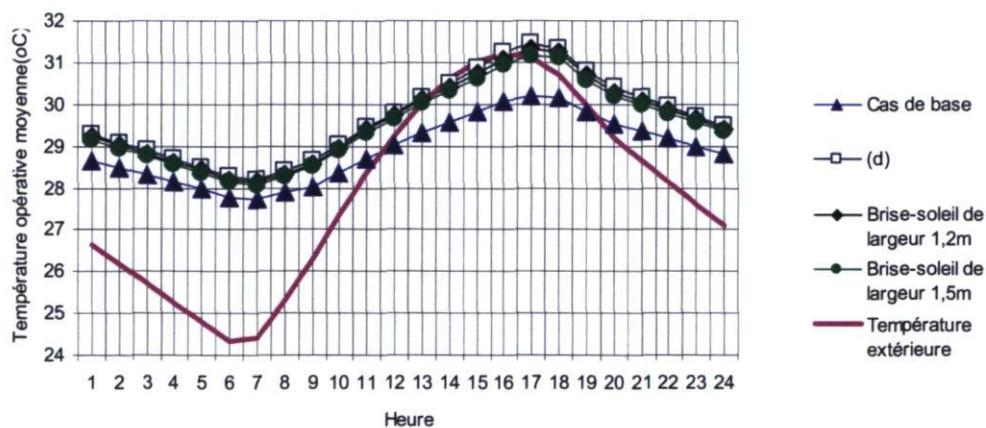


Figure 4.2.4.6: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure en fonction des différentes dimensions de brise-soleil pour le cas (d) pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

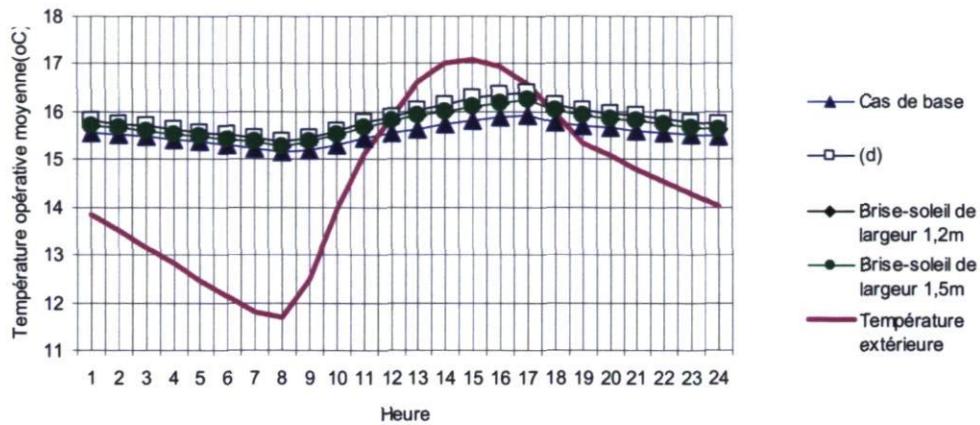


Figure 4.2.4.7: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure en fonction des différentes dimensions de brise-soleil pour le cas (d) durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

En hiver, le brise-soleil entraîne un résultat inverse : il augmente un peu la température opérative intérieure en permettant la pénétration des rayons du soleil dans la pièce (la fig. 4.2.4.7). Alors, ce brise-soleil peut améliorer un peu l'ambiance thermique intérieure. Cependant, cette influence n'est pas très marquée.

Comme second type de brise-soleil, un volet en bois a été étudié. Ce volet est disposé devant la fenêtre avec les lames inclinées à 45 °C. Une distance de 150 mm entre les lames peut favoriser la ventilation naturelle durant toute la journée. Le cas de base (a) et le cas (d) ont été choisis pour faire les simulations. La figure 4.2.4.8 montre les modèles de fenêtres avec les volets.

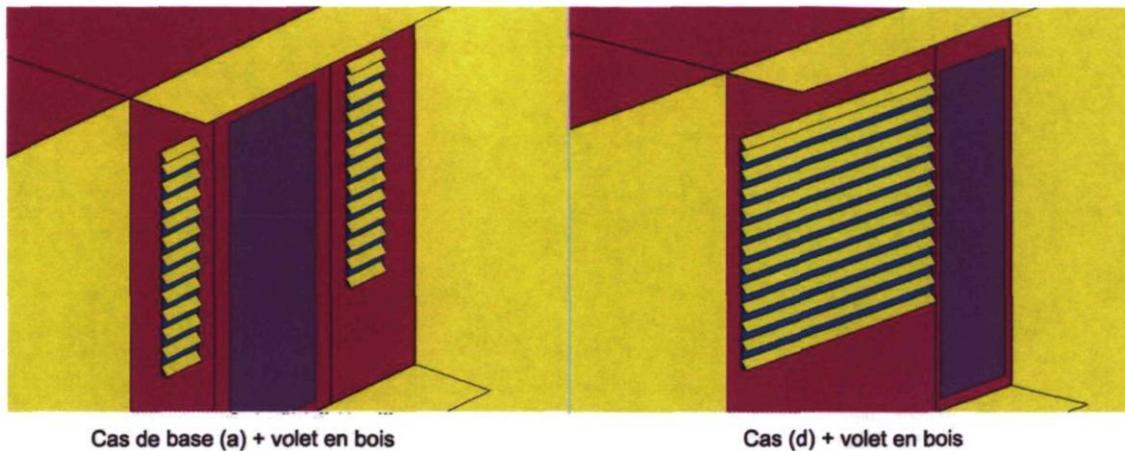


Figure 4.2.4.8: Volets pour chacun des cas.

La figure 4.2.4.9 présente la température opérative moyenne pour le cas de base (a) et le cas (a) avec volets, pendant les mois de juin et juillet. Une diminution de 0,4 °C est constatée en comparant le cas (a) avec volets avec le cas de base. Cette réduction n'est pas importante car les volets proposés ne coupent pas complètement le rayonnement solaire en fin de journée. Mais ce résultat peut confirmer que les volets sont plus efficaces quand même que le balcon comme brise-soleil pour une pièce orientée vers l'ouest.

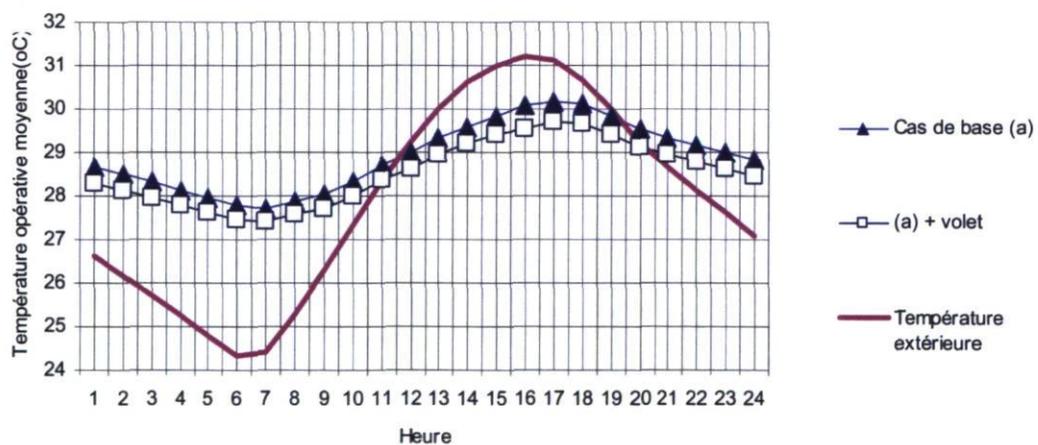


Figure 4.2.4.9: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas (a) et le cas (a) + volets, pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

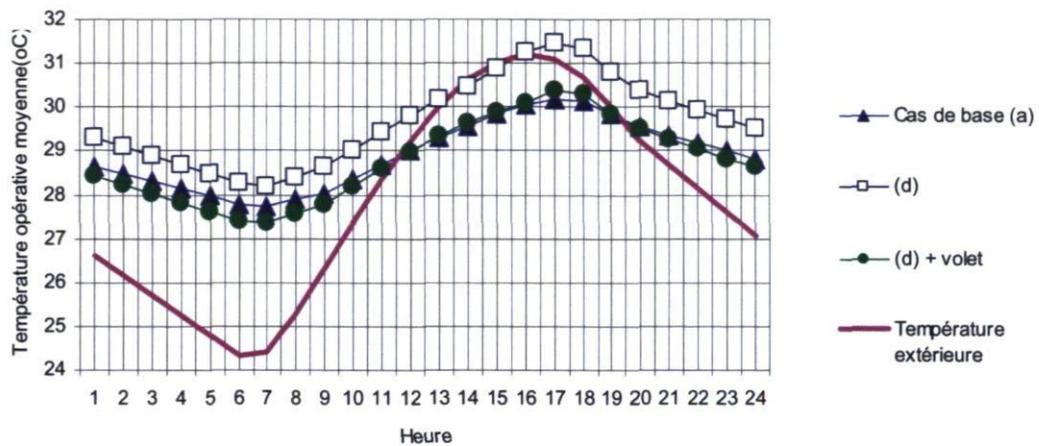


Figure 4.2.4.10: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas (a), le cas (d) et le cas (d) + volets pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage

La figure 4.2.4.10 présente la température opérative moyenne pour le cas de base (a), le cas (d) et le (d) avec volets pendant les mois de juin et juillet. Il faut rappeler que le cas (d) est le cas où la fenêtre est la plus grande. Le résultat montre que les volets peuvent améliorer la température opérative intérieure de la pièce de recherche pendant la période chaude. Une réduction de 0,5 à 0,6 °C a été constatée pendant la journée. Cette réduction est plus importante de 15.00h à 19.00 h : 0,8 à 1 °C. À la suite de ces résultats, on peut conclure aussi que les volets peuvent réduire la température intérieure mieux que le balcon. Cette stratégie est assez intéressante, car elle est efficace et très simple à appliquer. En outre, elle aide à maximiser l'ouverture sur la seule façade de la maison et ainsi favoriser la ventilation nocturne.

En hiver, les volets sont aussi acceptables car ils n'influencent pas trop la température intérieure comme le montre de la figure 4.2.4.11.

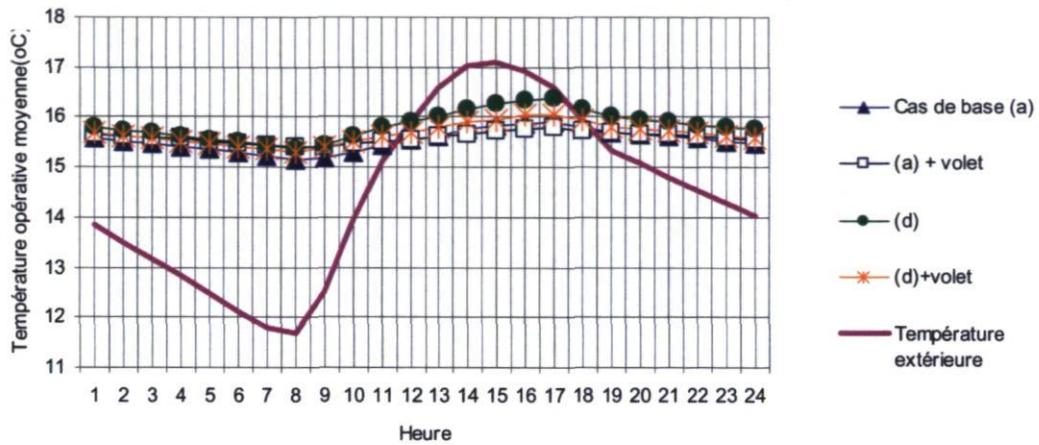


Figure 4.2.4.11: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour les cas (a), (a) + volets, (d) et (d) + volets durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

Une occultation plate parallèle devant la fenêtre est la dernière stratégie qu'on veut vérifier pour savoir s'il elle est capable de contrer complètement le rayonnement solaire en fin de journée. On peut imaginer que les gens pourraient simplement tirer un store déroulant devant la fenêtre avant de partir travailler. Seulement le cas (d) ont été choisis pour faire les simulations. La figure 4.2.4.12 montre les modèles de fenêtres avec les occultations plates.

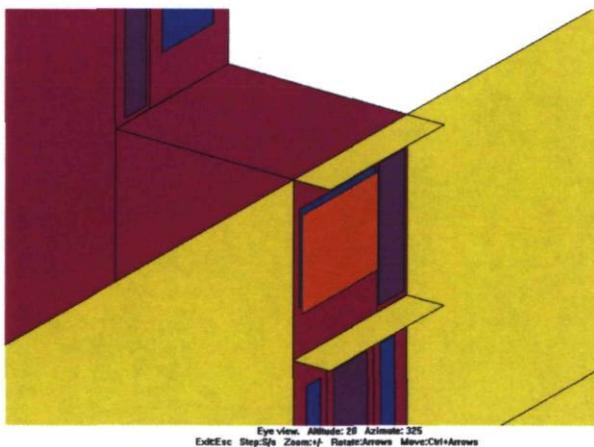


Figure 4.2.4.12: Le cas (d) avec l'occultation plate parallèle devant la fenêtre.

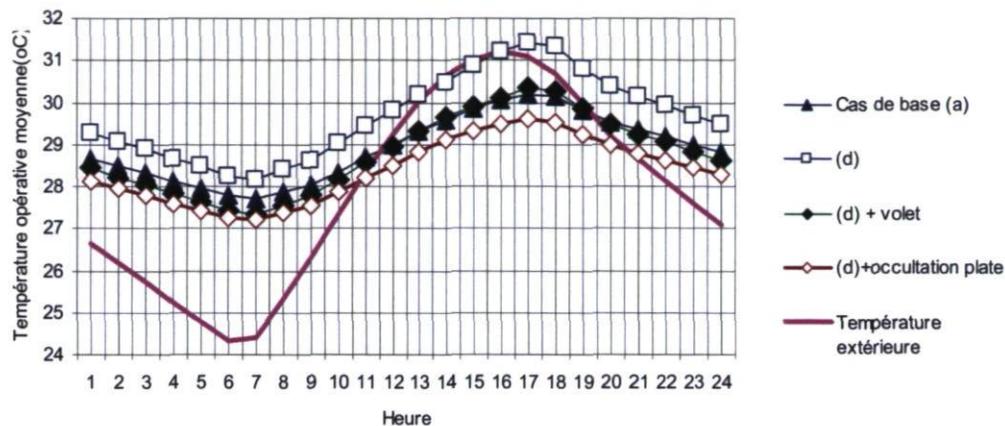


Figure 4.2.4.13: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas (a), le cas (d), le cas (d) + volets et le cas (d) + occultation plate pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La figure 4.2.4.13 présente la température opérative moyenne pour le cas de base (a), le cas (d), le cas (d) avec volets et le cas (d) + occultation plate pendant les mois de juin et juillet. Il faut dire que l'occultation plates est surtout valable pour les orientation ouest et est à cause de la géométrie solaire. Le résultat montre que l'occultation plate peut améliorer plus significativement la température opérative intérieure de la pièce que les autres solutions. Une réduction de 0,8 degrés a été constatée pendant la journée en comparant le cas (d) + volet et le cas (d) + occultation plate. Cette réduction est plus importante de 15h à 19 h : 1,5 °C. À la suite de ces résultats, on peut conclure que ce type d'occultation peut réduire la température intérieure de façon plus efficace que le balcon et les volets.

Avant de conclure cette section, il faut rappeler qu'une ouverture à l'extérieur est toujours souhaitable au Vietnam, un pays tropical où l'humidité relative moyenne oscille normalement entre 80% et 87%. Cette ouverture devient encore plus importante, car elle est la seule ouverture de la pièce de recherche. Les résultats des simulations pour chacun des cas ont permis de relever une forte corrélation entre les occultations et le confort thermique, spécialement en été. Plus la superficie de la fenêtre est grande, plus il faut faire attention pour contrer le rayonnement du soleil. Trois types de brise-soleil ont été étudiés : le balcon, les volets et l'occultation plate. L'occultation plate offre une meilleure efficacité avec une

réduction de température de 1 – 1,5 °C en comparaison avec le cas (d). On peut donc affirmer que ce système d'occultation contribue à améliorer l'ambiance thermique intérieure, spécialement pour les bâtiments pour lesquels on veut utiliser de grandes ouvertures.

4.2.5. Orientation

Cette section de la recherche est consacrée à l'évaluation de l'impact de l'orientation des fenêtres. Généralement, les orientations sud et sud-est sont considérées comme les meilleures pour les maisons situées au Nord du Vietnam, car elles comportent les avantages suivants (Pham, 2006) :

- Contrer le rayonnement du soleil en été;
- Favoriser la pénétration des vents frais en été et empêcher la pénétration des vents froids en hiver.

L'orientation vers l'ouest est à éviter, car elle peut causer des problèmes de surchauffe en été. Notre maison de recherche possède les caractéristiques spécifiques que nous avons déjà analysées au début : elle compte une seule façade extérieure, longue et étroite ; une vérification de l'influence de diverses orientations sur l'ambiance thermique de ce type de maison va certainement aboutir à des résultats intéressants. Cet indicateur s'avère pertinent pour l'étude, car il permettra de comprendre le rôle de l'orientation sur l'ambiance thermique de la maison de recherche. En plus, dans le contexte urbain, lorsque le choix de l'orientation pour une maison est très difficile, la recherche devient alors nécessaire afin d'obtenir une vue générale des impacts de l'orientation sur l'environnement thermique intérieur. Deux cas spécifiques ont été choisis aux fins d'analyse dans le cadre de cette recherche : le cas de base et le cas (d) où la fenêtre est plus grande (4.78 m²). Il est important de noter que dans les deux cas les fenêtres sont orientées vers l'ouest. Cette vérification vise à comprendre si la corrélation entre deux variables (orientation et dimension de fenêtre) est considérable.

La figure 4.2.5.1 présente la température opérative moyenne pour le cas de base avec différentes orientations des fenêtres pendant les mois de juin et juillet. En observant le résultat, avec une dimension de fenêtre de 1,8 m², l'orientation vers l'ouest donne une température opérative un peu plus élevée par rapport aux autres orientations. Cette différence de température est encore plus marquée en après-midi et durant la nuit. Par ailleurs, la

différence de température opérative entre les trois autres orientations n'est pas significative. En été, le sud constitue une meilleure orientation avec cette dimension de fenêtre.

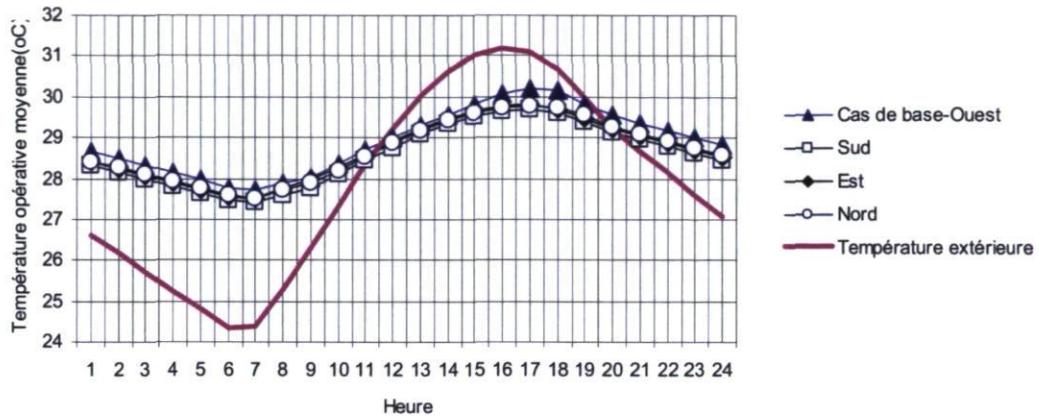


Figure 4.2.5.1: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure dans le cas de base en fonction des différentes orientations pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

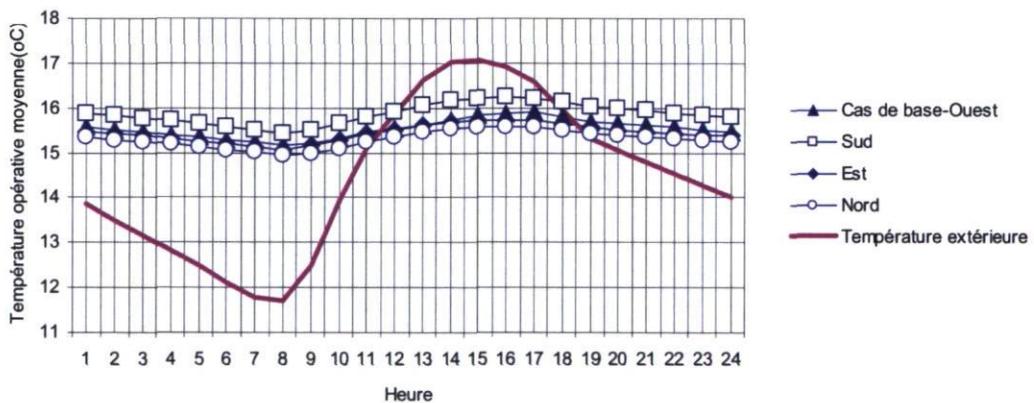


Figure 4.2.5.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas de base en fonction des différentes orientations durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

En observant la fig. 4.2.5.2, on constate que l'avantage donné par l'orientation vers le sud est plus marqué en hiver qu'en été. Cette figure présente la température opérative moyenne pour le cas de base en fonction de différentes orientations durant le mois de janvier. On peut constater une différence de température de $0,8^{\circ}\text{C}$ pour l'orientation sud par rapport à

l'orientation nord, où la température opérative moyenne est moins élevée. Outre le sud, toutes les orientations favorisent une température opérative plus basse, ce qui veut dire que seulement le sud offre la meilleure orientation pour le confort thermique à toutes les deux saisons : l'hiver et l'été dans le contexte de recherche.

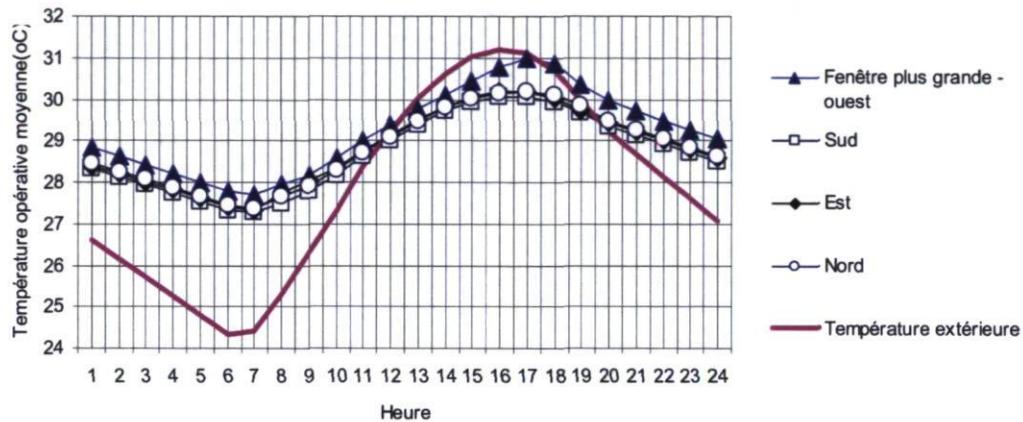


Figure 4.2.5.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas dans lequel la fenêtre est plus grande en fonction des différentes orientations pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La figure 4.2.5.3 présente la température opérative moyenne avec la fenêtre la plus grande ($4,78 \text{ m}^2$) en fonction des différentes orientations pendant les mois de juin et juillet. En été, en observant la figure 4.2.5.3, on constate que l'influence de l'orientation devient plus significative. Cette figure montre que l'orientation vers l'ouest est moins intéressante, car la température opérative moyenne est plus élevée par rapport aux autres cas et ce, durant toute la journée. Cette température monte même jusqu'à 31 °C vers 17h, ce qui équivaut presque à la température extérieure. Au niveau de la température opérative, on ne constate pas de grandes différences entre les trois autres orientations. Évidemment, le sud est encore la meilleure orientation pour l'été, même si la grande fenêtre a augmenté un peu la température intérieure dans la pièce de recherche en comparaison avec le cas de base. Par contre, en hiver, ces influences sont semblables au cas de base.

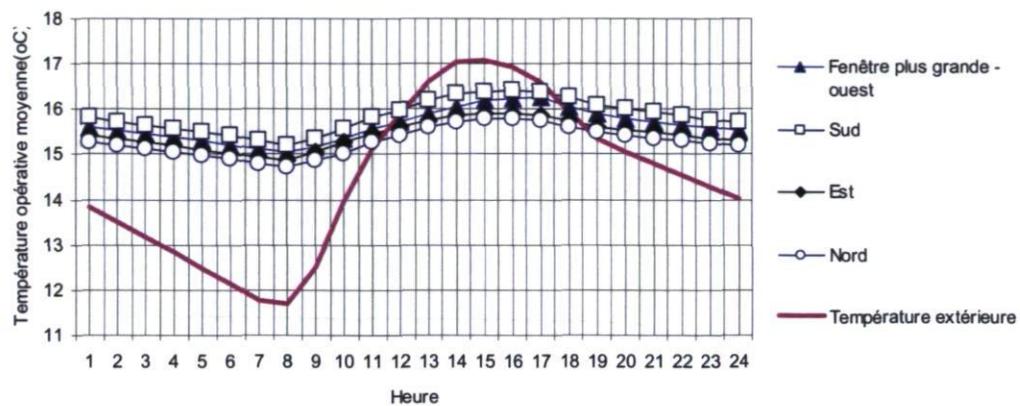


Figure 4.2.5.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure dans le cas où la fenêtre est la plus grande en fonction des différentes orientations durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

En observant la figure 4.2.5.4, on constate qu'en hiver les résultats sont inverses : la température intérieure dans le cas de base n'est pas plus élevée que dans les autres cas en été. Le sud offre toujours la meilleure orientation pour l'ambiance thermique intérieure qui fournit la température intérieure la plus élevée. Le nord demeure sans doute la pire orientation pour le confort thermique intérieur. Il faut noter que le vent dominant en hiver vient du nord-est et qu'il est la cause principale du froid en hiver à Hanoi. Avec l'orientation des fenêtres vers le nord, la température opérative baisse de presque 1°C en comparaison avec l'orientation de la fenêtre vers le sud. Après le sud, l'orientation ouest va être considérée, car elle devient la deuxième meilleure orientation pour l'hiver au Vietnam.

Afin de conclure cette section, on peut affirmer que le sud fournit toujours la meilleure orientation pour la maison dans le contexte de recherche, comportant un avantage thermique tant pour l'été que pour l'hiver. Par contre, l'environnement intérieur sera plus chaud en été si l'ouverture s'oriente à l'ouest tandis qu'en hiver, il serait possible de tolérer cette orientation. En été, ce problème devient encore plus grave, particulièrement dans l'après-midi, si la superficie des ouvertures est importante. En hiver, le nord offre une orientation indésirable. Même si l'hiver ne dure pas longtemps à Hanoi, il ne faut pas oublier que le froid arrive avec le vent. Comme on n'y utilise pas de chauffage, le fait de contrer le vent en hiver pourra contribuer à améliorer le confort thermique. Pour conclure, nous constatons que l'orientation

des maisons a une influence certaine sur l'ambiance thermique intérieure. Bien que le choix de l'orientation dans le contexte urbain soit difficile, on peut tout de même surmonter ces inconvénients en appliquant des stratégies architecturales différentes, par exemple un brise-soleil comme un volet en été pour l'orientation ouest.

4.2.6. Cas optimal

En tenant compte des résultats obtenus lors des simulations, on peut se servir de ces données pour construire une pièce représentant le cas optimal en contexte de recherche. L'utilisation de matériaux isolants sur l'enveloppe de la maison de recherche a donné de bons résultats, mais, contrairement aux autres stratégies, cette option n'est pas facile à appliquer au Vietnam. C'est pour cette raison que l'on n'utilisera pas les matériaux isolants dans l'élaboration du cas optimal, malgré les bons résultats obtenus. Sur les fenêtres, le volet a été gardé en construisant le cas optimal car il est appliqué souvent au Vietnam. De même, l'orientation de la pièce de recherche ne sera pas considérée dans le cas optimal puisqu'il est très difficile de la choisir en milieu urbain au Vietnam. L'orientation ouest sera donc conservée comme orientation de la maison. Le tableau 4.2.6.1 présente les stratégies qui ont été retenues pour construire le cas optimal.

Tableau 4.2.6.1 : Description des paramètres choisis pour construire le cas optimal.

Stratégie	Détail
Ventilation nocturne	8h - 11h: 16 cah (changement d'air à l'heure)
	12h - 17h: 1 cah
	18h - 7h: 40 cah
Couleur externe de mur	Absorptivité: 0,2
Deuxième toiture	Tôle – coefficient d'émissivité de 10 %
Occultation sur fenêtre	Volet

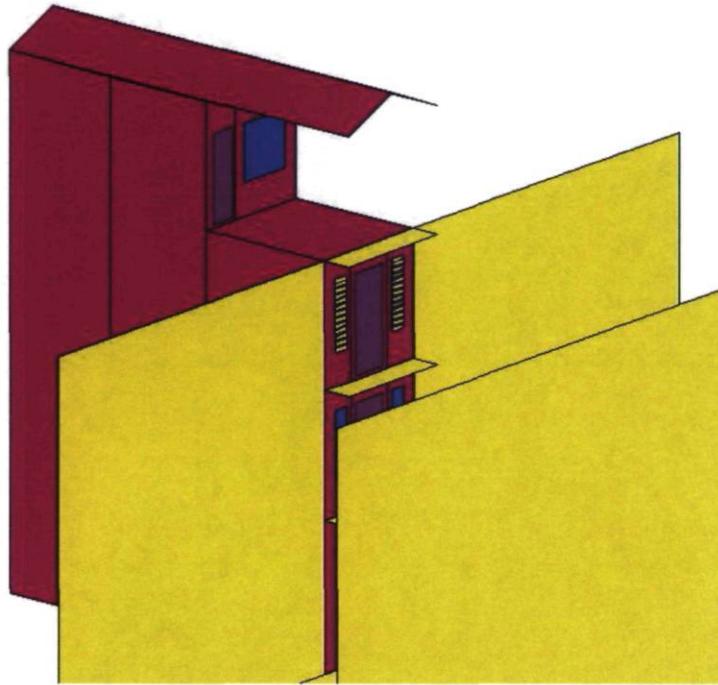


Figure 4.2.6.1 : Modèle du cas optimal.

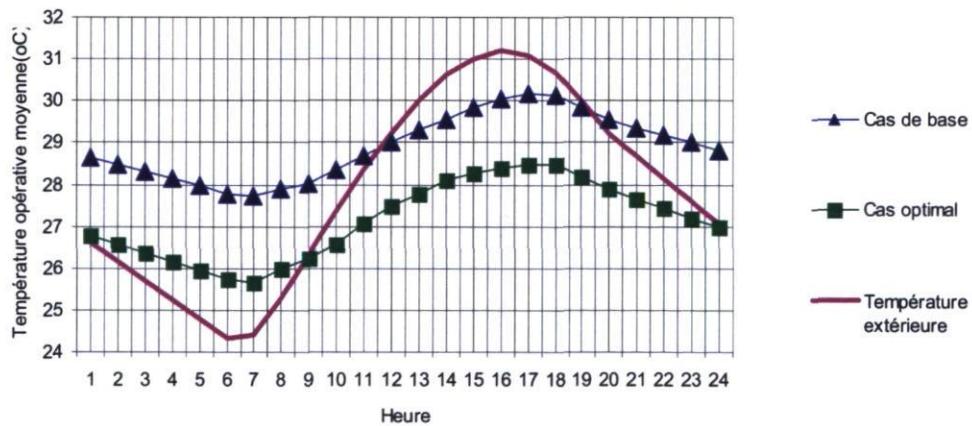


Figure 4.2.6.2: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour le cas optimal et le cas de base pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage.

La figure 4.2.6.2 présente la température opérative moyenne du cas de base et du cas optimal pendant les mois de juin et juillet. Tel que démontré par cette figure, la combinaison de bonnes stratégies pour le cas optimal a donné des résultats intéressants : une réduction de 1,5 à 2 °C a été constatée presque toute la journée dans la pièce de recherche. Cette réduction de température est plus marquée pendant la nuit, de 23h à 7h, où elle atteint son maximum (presque 2 degrés). C'est la période importante où les usagers se reposent. D'après Humphreys et Nicol (1998), une température de 27,78 °C en été et de 20,6 °C en hiver est considérée comme une ambiance thermique confortable dans le contexte climatique d'Hanoi. En observant la fig. 4.2.6.3, on trouve qu'il y a 18 heures sur 24 où la température opérative intérieure est inférieure à 27,78 °C. Ceci signifie que la température opérative moyenne est confortable pour les usagers 75% du temps sur une période de 24h, alors que pour le cas de base, cette proportion est de seulement 4%.

La figure 4.2.6.3 présente la température opérative moyenne du cas de base, du cas optimal et des meilleures stratégies de façon isolées. Cette comparaison permet de mettre l'emphase sur l'avantage de la combinaison des stratégies.

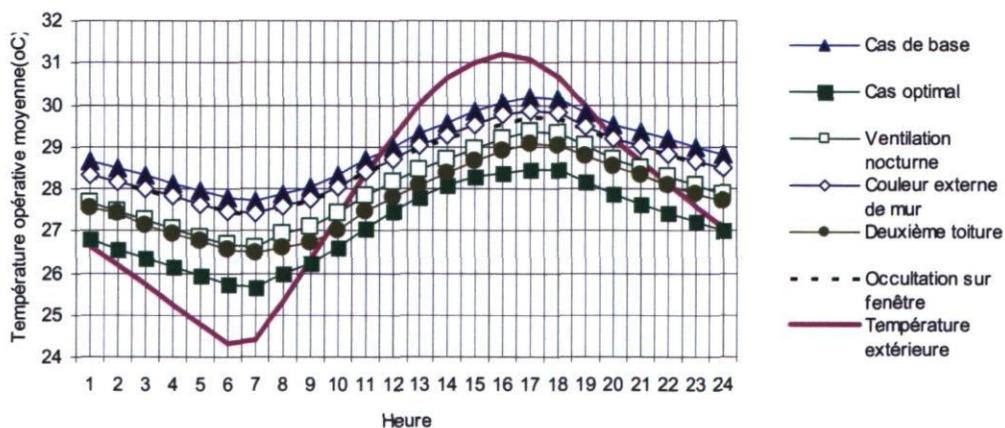


Figure 4.2.6.3: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour chacun des cas pendant les mois de juin et juillet dans la pièce étudiée au troisième étage .

En étudiant la fig. 4.2.6.3, on remarque que deux stratégies ont de plus grands impacts sur la température opérative intérieure : la ventilation nocturne et la deuxième toiture. On peut conclure que ce sont ces deux stratégies qui sont les plus utiles pour améliorer l'ambiance

thermique intérieure en contexte de recherche. Une combinaison des meilleures stratégies permet de diminuer l'amplitude d'oscillation de la température opérative intérieure diurne et nocturne. En plus, cette combinaison permet à la température opérative intérieure d'être inférieure à celles de tous les autres cas. On peut donc dire que le cas optimal a amélioré significativement l'ambiance thermique de la pièce de recherche. Ce cas optimal devient donc une nouvelle stratégie architecturale passive qui est plus efficace que toutes les autres stratégies que nous avons vérifiées au cours de cette recherche.

La figure 4.2.6.4 présente la température opérative moyenne du cas de base et du cas optimal pendant le mois de janvier. En hiver, la différence de la température intérieure opérative moyenne entre le cas de base et le cas optimal n'est pas aussi marquée qu'en été. Cette différence est acceptable, car la période de froid à Hanoi ne dure pas longtemps. Elle arrive avec le vent froid du nord-est et dure de 7 à 10 jours. Ce qu'il faut pour contrer le froid en hiver, c'est contrer le vent. Bien fermer les fenêtres devient alors une stratégie intéressante. Dans le cas optimal, la température opérative intérieure de la pièce est inférieure à celle du cas de base d'environ $0,5^{\circ}\text{C}$. Alors, si en été, la combinaison des stratégies retenues pour le cas optimal est une bonne solution pour améliorer l'ambiance thermique intérieure, en hiver, par contre, cette combinaison abaisse un peu la température intérieure, ce qui n'est pas souhaitable en hiver.

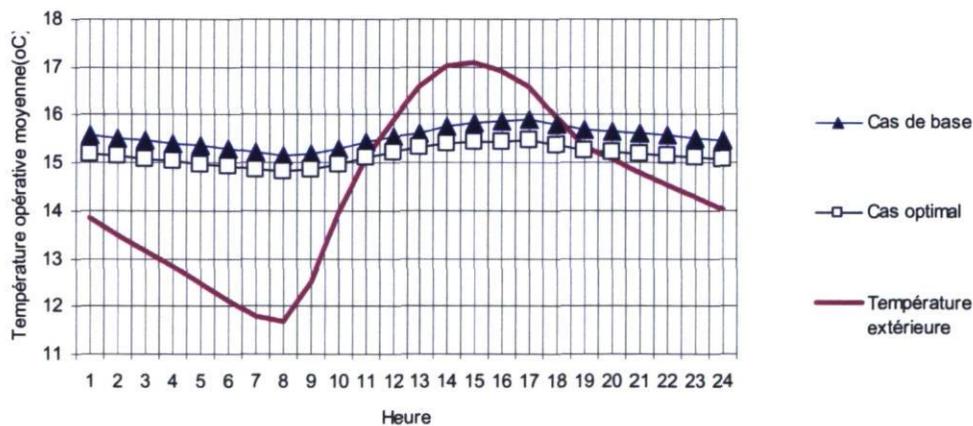


Figure 4.2.6.4: Température extérieure et température opérative moyenne intérieure pour chacun des cas durant le mois de janvier dans la pièce étudiée au troisième étage.

Tel que mentionné auparavant, le confort thermique au Vietnam est beaucoup plus critique en été qu'en hiver. Même si le cas optimal a réduit légèrement la température intérieure en hiver, il présente tout de même le cas le plus intéressant, car il offre une ambiance thermique intérieure plus acceptable en été, la période la plus désagréable au Vietnam due à la chaleur et à l'humidité. Les stratégies que nous avons retenues pour le cas optimal sont facilement applicables dans la vie de tous les jours parce que :

- Le coût de construction est faible ;
- Les applications sont simples à construire ;
- Les stratégies permettent d'économiser sur les coûts de climatisation en été ;
- Les stratégies sont respectueuses de l'environnement ;
- Une des stratégies permet aussi de contrer la pluie et de protéger l'enveloppe de la maison (deuxième toiture).

CHAPITRE 5. Conclusions, limites et recherche future

5.1. Conclusions

L'influence des cinq stratégies retenues sur l'ambiance thermique intérieure de la pièce de recherche, i.e une chambre à trois étages de la maison tube à Hanoi, a été examinée par des simulations en utilisant le programme de Derob-LTH. Les résultats de recherche montrent que la température opérative intérieure peut être améliorée par certaines stratégies. Voici les cinq stratégies que nous avons vérifiées :

- Ventilation transversale ;
- Mur : influence de la couleur externe et des matériaux isolants ;
- Toiture : influence de la deuxième toiture et des matériaux isolants ;
- Fenêtre : influence de l'ombrage ;
- Orientation.

Pour chaque stratégie, différents cas sont simulés dans le but de trouver la solution optimale pour réduire la température opérative intérieure pendant la période chaude, c'est-à-dire du 1^{er} juin au 31 juillet. Les résultats des différentes simulations de stratégie de ventilation transversale montrent qu'une bonne solution pour améliorer l'ambiance thermique intérieure est une ventilation transversale nocturne. Le cas M06 (le cas qui montre la plus forte différence entre la ventilation nocturne et l'ouverture contrôlée durant le jour (8 à 11h : 16 cah, 12h à 17h : 1 cah, 18h à 7h : 40 cah) peut réduire la température intérieure opérative de 1 °C par rapport au cas de base. Ce résultat est intéressant puisqu'il offre une stratégie très simple à appliquer dans la vie quotidienne soit maximiser la ventilation pendant la nuit tout en minimisant celle-ci pendant la journée durant la période chaude. En termes clairs, cela veut dire de bien fermer les fenêtres pendant la journée (de 8h à 17h) pendant que les gens sont au travail. Par contre, pendant la nuit (de 18h à 7h), il faut profiter de l'air frais de l'extérieur pour refroidir les surfaces de la chambre et diminuer la température intérieure. En outre, il importe de rappeler que la ventilation naturelle est toujours considérée comme la première stratégie architecturale dans les pays chauds et humides comme le Vietnam. Donc, le résultat de cette recherche supporte l'utilisation de la ventilation naturelle dans le bâtiment.

La composition du mur extérieur a été vérifiée à l'aide de deux stratégies différentes : la couleur externe et les matériaux isolants. Dans la stratégie de la couleur externe, quatre

couleurs correspondant aux quatre absorptivités différentes (0.2, 0.4 (celle du cas de base), 0.6 et 0.8) sont vérifiées. En été, la couleur claire est suggérée comme une solution pour réduire la température opérative intérieure. La différence de la température intérieure entre la couleur la plus claire (absorptivité 0.2) et la plus sombre (absorptivité 0.8) de la façade extérieure est considérable ; elle est d'environ 1 °C durant toute la journée. Ceci permet donc d'affirmer que le bâtiment devrait être blanchi pour obtenir une ambiance plus confortable en été. En hiver, la différence est aussi de 1 °C, mais les résultats démontrent par contre que la couleur sombre est plus désirable que la couleur claire, car elle permet d'augmenter la température intérieure. Mais, dans le contexte urbain du Vietnam où la surchauffe en été est toujours un problème plus critique, la couleur claire est toujours préférée à la couleur sombre. Ce résultat devient encore plus intéressant pour les maisons qui ont des murs extérieurs plus grands. Si le mur est plus grand, son influence sur l'ambiance thermique est plus grande, car la superficie de ce mur qui peut recevoir le rayonnement du soleil va augmenter. Dans ce cas, il faut faire attention de choisir la bonne couleur externe. En plus, cette stratégie est abordable et elle peut permettre d'augmenter le niveau d'éclairage extérieur au niveau de la rue par la réflexion de la lumière sur les façades extérieures, ce qui peut permettre de réduire l'éclairage électrique (intérieur et extérieur). Cela peut aussi contribuer à réduire l'îlot de chaleur urbain.

En ce qui a trait à la stratégie des matériaux isolants, le polystyrène extrudé a été choisi comme matériau isolant. Deux épaisseurs du matériau isolant ont été étudiées : 50 mm et 100 mm. Deux épaisseurs de la couche de briques ont été aussi simulées : 110 et 220 mm. D'abord, précisons que lorsque l'on n'utilise pas la ventilation, la différence de température intérieure n'est pas significative entre chacun des cas. Les résultats des simulations montrent que l'épaisseur du mur et des matériaux isolants n'est pas un facteur influençant la température intérieure de façon significative. Après, nous avons fait une vérification supplémentaire en changeant la position du matériau isolant. La masse thermique, i.e la brique, a été déposée à l'intérieur par rapport au matériau isolant (le polystyrène extrudé). Cette modification dans le cas (e) a donné un meilleur résultat. Une combinaison entre le cas (e) avec une ventilation nocturne a donné un meilleur résultat. Trois situations de changements d'air à l'heure (cah) par journée sont étudiées (comme le cas M06) : de 8h à 11h : 16 cah, de 12h à 17h : 1 cah; de 18h à 7h : 40 cah. Le confort de la pièce de recherche s'en est trouvé amélioré car la température opérative a diminué d'environ 0,3 à 0,6 °C en

comparaison au cas (e). En hiver, les matériaux isolants montrent une capacité d'améliorer significativement l'ambiance thermique si il y a une stratégie de ventilation associée.

Comme pour les murs, deux stratégies ont été vérifiées pour la toiture : les matériaux isolants et la deuxième toiture. Deux épaisseurs de polystyrène extrudé ont été simulées : 50 mm et 100 mm. En été, la différence de température intérieure n'est pas significative entre chacun des cas. Les épaisseurs ne constituent donc pas un facteur majeur influençant la température intérieure où la toiture est une construction à forte inertie. L'ajout d'une couche de polystyrène extrudé de 100 mm dans la couche des matériaux de la toiture ne donne pas le résultat désiré. Même que ce cas (b) démontre un meilleur résultat car il permet de réduire la température intérieure de 0,5 °C en comparaison avec le cas de base. Nous essayons alors de coupler cette stratégie avec une stratégie de ventilation nocturne. Trois situations de changement d'air à l'heure (cah) par journée ont été étudiées (comme le cas M06) : de 8h à 11h : 16 cah, de 12h à 17h : 1 cah; de 18h à 7h : 40 cah.

Pendant la nuit (de 21h à 7h), une réduction de 0,4 à 0,6 °C a été constatée pour le cas (b) + ventilation nocturne par rapport au cas (b), et de 0,6 à 0,8 °C par rapport au cas de base.

En analysant les résultats obtenus par cette simulation, il a été possible d'affirmer que la ventilation nocturne a le potentiel d'améliorer le confort thermique de la pièce étudiée, à condition que cette ventilation soit assez importante (de 12 cah). Donc, l'utilisation de polystyrène extrudé comme matériau isolant sur la toiture peut être acceptable si elle est couplée avec une stratégie de ventilation nocturne adéquate. En hiver, les deux épaisseurs de matériaux isolants ont une influence plus forte sur l'ambiance thermique. Une température intérieure plus élevée de 0,3 °C (le midi) et 0,7 °C (pendant la nuit) dans les cas utilisant les matériaux résulte en une ambiance plus chaude en hiver.

Comme seconde stratégie pour la toiture, une deuxième toiture en tôle est ajoutée sur le modèle de base. Trois couleurs de toiture : gris (absorptivité : 0,3), bleu foncé (absorptivité : 0,5) et rouge (absorptivité : 0,7) et une tôle dont le coefficient d'émissivité de 10% ont été étudiées. La tôle dont le coefficient d'émissivité la plus faible soit 10%, est celle représentant la meilleure solution pour diminuer la température intérieure. Elle amène une diminution de plus de 1°C par rapport au cas de base et ce, durant toute la journée. Une différence d'environ

1,5 à 2°C est constatée en comparant le cas le plus sombre (tôle rouge) au cas le plus clair (tôle grise). De midi jusqu'à 17 heures, la deuxième toiture en tôle rouge augmente la température opérative jusqu'à atteindre celle de l'extérieur. Alors, il est généralement admis que l'utilisation de couleurs sombres sur les surfaces extérieures n'est pas favorisée. En hiver, l'impact de la deuxième toiture sur le confort thermique n'est pas significatif. Les différences entre les résultats obtenus avec les trois couleurs de matériaux étant négligeables, on peut considérer que l'influence de la couleur de la deuxième toiture est la même pour chacun des cas. Ce résultat est dû au faible rayonnement solaire pendant le mois de recherche, le mois de janvier.

Un ajout de polystyrène extrudé sur la deuxième toiture en tôle grise a été vérifié. Deux épaisseurs différentes de polystyrène extrudé sont simulées : 50 mm et 100 mm. Le résultat est décevant. L'utilisation des matériaux isolants sur la deuxième toiture n'est pas favorisée puisqu'elle ne donne pas de meilleurs résultats et qu'elle augmente le coût de construction.

Pour la stratégie d'occultation, quatre types de fenêtres ont été vérifiés. Sans brise-soleil, le cas où la fenêtre est la plus grande donne une température opérative maximale (presque 31,5 °C, à 17h). Durant la nuit, cette situation augmente aussi la température intérieure de 0,5 à 0,7 °C en comparaison avec les autres cas. Ce résultat permet de conclure que l'influence de la dimension des fenêtres sur l'ambiance thermique intérieure est significative. Dans un premier temps, des balcons en béton de 1,2 m et 1,5 m de largeur sont disposés à l'extérieur pour servir de brise-soleil ; cette stratégie ne donne pas les résultats escomptés. Dans un second temps, des volets en bois avec les lames inclinées à 45 °C ont été disposés devant la fenêtre comme deuxième type de brise-soleil. Seuls le cas de base et le cas avec la fenêtre la plus grande sont vérifiés. Les résultats montrent que les volets peuvent améliorer la température opérative intérieure de la pièce de recherche pendant l'été. Une réduction de la température opérative de 0,5 à 0,6 °C a été constatée pendant la journée. Cette réduction est plus importante de 15h à 19h (0,8 à 1 °C). En hiver, les volets sont aussi acceptables, car ils n'influencent pas trop la température intérieure. Une occultation plate parallèle devant la fenêtre est la dernière stratégie étudiée pour savoir s'il elle est capable de contrer complètement le rayonnement solaire en fin de journée. Seulement le cas avec la plus grande fenêtre a été choisi pour les simulations. Le résultat montre que l'occultation plate peut

réduire la température opérative intérieure de la pièce de façon plus importante que les autres solutions (le cas de base, le cas (d), le cas (d) + volet). Une réduction de 0,8 °C a été constatée pendant la journée en comparant le cas (d) + volet et le cas (d) + occultation plate. À la suite de ces résultats, on peut conclure que ce type d'occultation peut réduire la température intérieure plus efficacement que le balcon et les volets. En outre, elle offre une nouvelle idée soit, trouver une solution pour contrer le rayonnement solaire pour les ouvertures à la maison au Vietnam.

Pour la stratégie d'orientation, quatre orientations ont été simulées : ouest (le cas de base), sud, nord et est. Le sud représente la meilleure orientation pour la maison dans le contexte de recherche, puisqu'il comporte un avantage thermique tant en été qu'en hiver. Par contre, l'environnement intérieur sera plus chaud en été si l'ouverture s'oriente à l'ouest tandis qu'en hiver, il serait possible de tolérer cette orientation. En été, cette hausse de température devient encore plus importante, particulièrement dans l'après-midi, si la superficie des ouvertures est importante. En hiver, le nord offre une orientation indésirable. Même si l'hiver ne dure pas longtemps à Hanoi, il ne faut pas oublier que le froid arrive avec le vent. Mais bien que le choix de l'orientation dans le contexte urbain soit difficile, on peut tout de même surmonter ces inconvénients en appliquant des stratégies architecturales différentes, par exemple un volet comme brise-soleil en été pour l'orientation ouest.

En conclusion, l'influence de cinq stratégies pour contrôler l'ambiance thermique intérieure de la pièce de recherche (une chambre à trois étages de la maison tube à Hanoi) a été évaluée grâce à des simulations en utilisant le programme de Derob-LTH. L'ambiance thermique intérieure a été évaluée par la température intérieure opérative. Les résultats suggèrent que l'utilisation de la ventilation nocturne, l'application d'une couleur pâle sur les façades extérieures, l'utilisation de l'ombrage sur les fenêtres et l'installation d'une deuxième toiture peuvent améliorer l'ambiance thermique intérieure. La recherche montre qu'une combinaison des stratégies est la meilleure solution pour réduire la température intérieure en été.

5.2. Limites de la recherche et recherche future

Toutes les conclusions de cette recherche sont basées uniquement sur les résultats qui ont été obtenus avec des simulations par ordinateur. Les résultats supportent les limitations et la précision du programme utilisé. Alors, cette recherche doit être complétée par des études plus poussées pour confirmer les conclusions.

De plus, il reste encore les variations intéressantes n'ait pas été étudiée dans le mémoire, comme la ventilation par effet de cheminée, aussi les matériaux à faible émissivité face à l'air etc. Par ailleurs, la pièce de recherche est complètement vide, ce qui n'est pas représentatif de la réalité. L'action de l'homme et la présence d'équipements tels que la télévision ou l'ordinateur peuvent augmenter la température intérieure. La présence des meubles peut réduire la vitesse de ventilation. Alors, une comparaison des résultats avec des mesures serait intéressante et permettrait de confirmer les conclusions de cette recherche.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages cités

Arumi-Noé F (1979). *The DEROB System Volume II. Explanatory Notes and Theory*. Numerical Simulation Laboratory, University of Texas, Austin (Texas).

ASHRAE (1992). *Standard 55 – thermal environment conditions for human occupancy*. ASHRAE Inc. Atlanta.

ASHRAE, (1997), *ASHRAE Handbook-Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Baker NV (1987). *Passive and low energy building design for tropical island climates*. London: Commonwealth Secretariat.

Bojic M; Yik F (2005). *Cooling energy evaluation for high-rise residential buildings in Hong Kong*. Energy and buildings, 37, 4, 345-351.

Brown GZ; Dekay M (2000). *Sun, wind and light, architectural design strategies*. New York: Wiley.

Cheng V; Givoni B (2005). *Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate*. Solar energy, 78, 4, 528-534.

De Dear RJ (2002). *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revision of ASHRAE standard 55*. Energy and buildings, 34, 6, 549-561.

De Dear RJ, Leow KG, Ameen A (1991). *Thermal comfort in the humid tropics (part I and part II)*. ASHRAE Transactions, 874 – 886.

De Dear RJ; Bager GS (2001). *The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment*. International journal of biometeorology, 45, 6, 100-108.

Dreyfus J (1960). *Le confort en pays tropical; la protection des constructions contre la chaleur, problèmes de ventilation*. Paris: Eyrolles.

Dubois MC (2001). *Impact of shading device on daylighting quality in office. Simulation with Radiance*. Lund: Departement of energy and buildings design, Lund university.

Evans M (1980). *Housing, Climate and Comfort*. Architectural Press, London (1980).

Fredette MA (2002). *Modes et moyens de contrôle des environnements intérieurs et semi intérieurs des habitations vietnamiennes à Hanoi*. Projet de recherche en coopération et

développement entre l'École d'Architecture- Uni.Laval et l'École Nationale Supérieure de Génie-Civil de Hanoi.

Givoni B (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris: Moniteur.

Givoni B (1994). *Passive and low energy cooling of building*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Hamdi M, Lachiver G, Michaud F (1999). *A new predictive thermal sensation index of human response*. Energy and buildings, 29, 5, 167-178.

Humphreys M, Nicol F (2000). *Effects of measurement and formulation error on thermal comfort indices in the ASHRAE database of field studies*. ASHRAE Trans 106: 493 – 502.

ISO 7730 (1994). *Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*.

Jannot Y; Djiako T (1993). *Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale: Energy saving and thermal comfort for habitations in a tropical climate*. International journal of refrigeration, 17, 3, 166-173.

Källblad K (1998). *Thermal Models of buildings*. Lund: Department of energy and buildings design, Lund University (Sweden).

Kvist H (1999). *User manual for DEROB-LTH*. Lund University, Lund, Sweden.

Le LH (2001). *Hight density Housing in a Central District in Hanoi*. Paper final. Lund: Department of energy and buildings design, Lund University (Sweden).

Lechner N (2001). *Heating Cooling Lighting: design strategies for architects*. New York: Wiley.

McIntyre DA (1980). *Indoor climate*. London: Applied science.

McPherson RK (1973). *Thermal stress and thermal comfort*. Ergonomics, 16, 611 – 623.

Merder S, Olgyay V, Furuhashi J (2000). Residential energy guideline for Hawaii. *Proceedings of PLEA: Architecture city environnement*. Edité par Steemers K et Yannas S. UK: James & James.

Mohammad, S (2005). *Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials*. Building and Environment, 40, 3, 353 - 366.

Nikos F (2004). *Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics*. Energy and buildings, 36, 7, 628–637.

Oke T.R, Taesler R, Olsson LE (1990). *The tropical urban climate experiment (TRUCE)*. Energy and buildings, 15, 1, 67 – 73.

Persson ML, Roos A, Wall M (2006). *Influence of window size on the energy balance of low energy house*. Energy and Buildings, 38, 3, 181-188.

Pham DN, Nguyen TH, Tran QB (2002). *Cac giai phap Kien truc khi hau Viet Nam (Stratégies architecturales en climat de Vietnam)*. Nha xuất bản Khoa hoc va Ky thuat (Viet Nam) (en Vietnamienne).

Phan TT (2000). *Comfort level in Hanoi Tunnel House*. Paper final. Lund: Department of energy and buildings design, Lund University (Sweden).

Rosenlund H (1993). *Desert Buildings A Parametric study on passive climatisation*. Thesis. Lund: Departement of energy and buildings design, Lund University (Sweden).

Rosenlund H (2006). *The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka*. Paper Presented at ICUC6.

Soubdhan T (2005). *Experimental evaluation of insulation material in roofing system under tropical climate*. Solar energy, 79, 3, 311-320.

Stein B; Reynolds JS (1992). *Mechanical and electrical equipment for buildings*. New York: Wiley

Takahashi, Itaru M (2000). *Difference in thermal sensation and behavioral pattern of occupants between passive and active cooling strategies*. Proceedings of PLEA: Architecture city environment. Edité par Steemers K et Yannas S. UK: James & James.

Tran QT (2001). *Buffer Space – a Solution for Climatic Design in Hanoi. A parametric study on a Tube-house*. Paper final. Lund: Department of energy and buildings design, Lund University (Sweden).

Wall M (1996). *Climate and Energy Use in Glazed Space*. Lund: Department of energy and buildings design, Lund University (Sweden).

Wall M, Wallentén P (1999). *Performance of Shading Devices in Buildings. A Collaboration between Lund University and Nordic Manufacturers*. 5th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Chalmers University of Technology, Göteborg (Sweden).

Wall M, Bülow-Hübe H (2001). *Solar protection in buildings*. Lund: Department of energy and buildings design, Lund University (Sweden).

Wallentén P, Kvist H, Dubois MC (2000). *Parasol-Lth: a user-friendly computer tool to predict the energy performance of shading devices*. Proceedings of the International Building Physics Conference: Tools for design and engineering of buildings. Eindhoven University of Technology, the Netherlands.

Ouvrages consultés

Livres

Givoni B (1998). *Climate considerations in building and urban design*. New York: Wiley

Heschong L (1979). *Thermal delight in architecture*. London: the MIT press

Thèses

Hassein-Bay H (1987). *Le confort thermique dans l'habitat du sud algérien : vers une approche bioclimatique*. Thèse de maîtrise. Québec, Université Laval.

Miranda Vasquez P (1990). *Le confort thermique dans l'habitat tropical humide (micro forme) : le cas de la ville de Panama*. Thèse de maîtrise. Québec, Université Laval.

Roselund H (1995). *Design for Desert, an architect's approach to passive climatisation in hot and arid regions*. Division of Architecture and Development Studies, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund.

Articles

Givoni B (1992). *Comfort, climate analysis and building design guidelines*. Energy and buildings, 18, 1, 11-23.

Grag NK (1991). *Passive options for thermal comfort in building envelopes – an assessment*. Solar energy, 47, 6, 437-441.

Murakami S (2004). *Design of a porous-type residential building model with low environmental load in hot and humid Asia*. Energy and Buildings, 36, 12, 1181 - 1189.

Pfafferott J (2005). *Thermal building behavior in summer: long-term data evaluation using simplified models*. Energy and Buildings, 37, 8, 844 - 852.

Song D, Kato S (2004). *Radiational panel cooling system with continuous natural cross ventilation for hot and humid regions*. Energy and Buildings, 36, 12, 1273 - 1280.

Van De Linden AC, Raue AK (2006). *Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands. A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate*. Energy and buildings, 38, 1, 8 – 17.

Waal D (1999). *New recommendations for building in tropical climates*. Building and Environment, 28, 3, 271 - 285.

Xu Xu, Yinping Zhang, Kunping Lin, Hongfa Di and Rui Yang (2005). *Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings*. Energy and Buildings, 37, 10, 1084 -1091.

Yoshino H, Yoshino Y (2006). *Indoor thermal environment and energy saving for urban residential buildings in China*. *Energy and buildings*, 38, 11, 1308 - 1319.

Publications gouvernementales

Allard F (2003). *Natural ventilation for health, comfort and energy efficiency*. ENCAC – COTEDI 2003.

Bonneaud F (2001). *Simulation of the wind in hot and humid climates cities: evaluation of the natural ventilation potential of the housing in urban blocks*. Seventh International IBPSA Conference.

Charbonneau JY (2004). *Confort thermique à l'intérieur d'un établissement*. Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec.

Sherman M (2001). *The Residence ventilation standard*. EEDT Newsletter.

Sites Internet

Ecotech homepage

<http://www.squ1.com/site.html>

US Department of Energy. Energy Efficiency and renewable Energy

http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weatherdata/weather_request_search.cfm?sortKey=country&opt=1

Architecture, Energy & Environment, Compendium of Independent Studies by the Course Participant. Lund University

<http://www.hdm.lth.se/TRAINING/Postgrad/AEE/Papers/2003/index.HTM>

Architecture et le climat. Université catholique de Louvain

<http://www-climat.arch.ucl.ac.be/index.html>

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)

<http://www.ashrae.org/template/Index;jsessionid=aaa-fhCdbYpR-8>

Innovation in building envelopes and environmental systems, Harvard Design School, Massachusetts Institute of technology

<http://www.buildingenvelopes.org/>

Advanced building, Technologies & Practice

<http://www.advancedbuildings.org/>

ANNEXE A : Paramètres de recherche

