

UNIVERSITÉ D'ABOMEY CALAVI

N° d'ordre : 12/DU

Faculté des Sciences et Techniques
(FAST)



Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi
(EPAC)

FORMATION DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du Grade de
Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Spécialité :
ENERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENT

Par
Gédéon CHAFFA

Thème :

**CONTRIBUTION A LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE
DES HABITATIONS DANS LA RÉGION SUD DU BÉNIN**

Soutenue publiquement le 22 octobre 2004 devant la Commission d'Examen composée de :

M. EDEE Emmanuel,	Université de Lomé,	Président
M. GBADAMASSI Moussiliou,	Université d'Abomey-Calavi,	Directeur de Thèse
M. N'GUESSAN M'Gbra,	Econoler International, Québec	Codirecteur de Thèse
M. ADOTEVI-AKUE Kpakpo,	Université de Lomé,	Rapporteur
M. AZILINON Dorothé,	Université Cheikh Anta Diop, Dakar	Rapporteur
M. BOKO Michel,	Université d'Abomey-Calavi	Examineur
M. AKICHI Agboué,	Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Yamoussoukro	Examineur

**Si l'Éternel ne bâtit la maison,
Ceux qui la bâtissent travaillent en vain.
Si l'Éternel ne garde la ville,
En vain travaille la sentinelle.**

DEDICACE

A mes parents et grand-parents,
en hommage très reconnaissant pour tous les sacrifices consentis
pour faire de moi un Homme,
et les sages préceptes qu'ils m'ont enseignés ;

A mes sœurs Rachel et Jeanne,
et mes frères Djima et Samuel,
pour leur bonne volonté et leur ardeur à poursuivre cette œuvre
dont ils n'ont malheureusement pu voir l'aboutissement ;

A Tehe Mathilde, Djangbo Marie et Olou Hilarion,
Afin que leurs âmes reposent en Paix.

A ma tante Elisabeth Idohou,
en hommage très reconnaissant pour toute l'affection
et l'amour maternels qu'elle nous a toujours donnés,
afin qu'elle ait la fierté d'avoir dignement assumé cette tâche.

A mes frères, sœurs, oncles et tantes,
en hommage très reconnaissant pour leur soutien moral et matériel,
afin de leur donner l'assurance que le grain a germé.

A mes filles Adebomi et Adeola,
A Bola, Leeza, Grâce et Ireti,
A Shegun, Ashraf, Yan et Adechina,
A Annissath, Doradjath, Roukayath et Nafissath,
A tous mes enfants,
A tous mes neveux, nièces, cousins et cousines,
Afin que ce travail leur serve de modèle de Foi, de courage,
de détermination et de persévérance.

A tous mes amis et toutes mes amies,
A Edith, Esther, Yolande, Véronique, Grâce et Christiane,
en reconnaissance pour leurs soutien et encouragement permanents
afin que se resserrent davantage nos liens.

A Lolita.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à témoigner toute ma reconnaissance à l'Éternel, Dieu des Armées, qui renouvelle en nous chaque jour le souffle de vie, pour toutes ses grâces infinies afin qu'Il fasse encore davantage dans notre vie.

Je voudrais ensuite remercier très chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué au travail dont les résultats sont présentés dans ce mémoire.

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma grande reconnaissance à Monsieur Moussiliou Gbadamassi, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin), et à Monsieur Jean Lucas, Directeur du Laboratoire de Thermique Industrielle au Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris (France), qui m'ont accordé leur confiance et suivi de près ma démarche scientifique dans le cadre de l'élaboration de cette thèse ; ils m'ont prodigué de précieux conseils et apporté l'encouragement nécessaire pour mener à bien ce travail ; ils m'ont fait partager leur très riche expérience dans le domaine de la thermique et de la physique du bâtiment. Malgré leurs multiples charges, ils ont fait preuve de disponibilité et de sollicitude permanentes. Qu'ils veuillent bien recevoir l'expression de mes vifs sentiments de gratitude et de profond respect.

Monsieur N'Guessan M'Gbira, Directeur de Recherche à Econoler International (Québec, Canada) a suivi l'ensemble de mes travaux avec attention et m'a assuré un encadrement très efficace ; sa grande disponibilité, le soutien permanent et l'aide très remarquable qu'il m'a constamment apportés, surtout au plus fort de mes problèmes techniques et sociaux, m'ont permis de faire aboutir le présent travail. Je voudrais lui rendre ici –ainsi qu'à sa famille– un hommage sincère pour tant de sacrifices et de marques d'amitié ; je les prie de trouver ici le vif témoignage de ma sincère et profonde reconnaissance.

Je mesure tout l'honneur que me fait Monsieur Edée Ekeba Emmanuel, Professeur à la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Lomé (Togo), en acceptant de présider la Commission d'Examen de ma thèse. Je tiens à lui adresser très chaleureusement et respectueusement mes sincères remerciements pour sa sollicitude permanente, ses conseils et son précieux soutien.

Monsieur Adotevi-Akue Kpakpo, Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de l'Université de Lomé (Togo), m'a guidé pour le choix du présent domaine de travail, la définition du sujet de recherche et m'a prodigué les conseils les plus utiles tout au long de mes travaux. Il a aussi accepté d'évaluer mes résultats et de faire un rapport de présoutenance. Espérant que ces résultats répondent bien aux objectifs fixés et qu'ils sont à la mesure de nos attentes, je le prie de trouver ici l'expression de mes vifs sentiments de gratitude et de profond respect pour la grande confiance dont il m'a investi et son précieux soutien.

Je présente également mes sincères remerciements à Monsieur Azilimon Dorothé, Professeur à l'École Supérieure Polytechnique de l'Université Cheikh Anta Diop, Dakar (Sénégal), qui a accepté d'évaluer mes résultats et de faire un rapport de présoutenance. Qu'il veuille trouver ici mes vifs sentiments de profonde gratitude pour sa disponibilité permanente et le précieux soutien qu'il m'a toujours apporté.

Monsieur Boko Michel, Directeur de la Recherche à l'Université d'Abomey-Calavi, m'a apporté un soutien exceptionnel dans le cadre de mes travaux de recherche ainsi que dans mes démarches administratives. Par ailleurs, il a accepté de siéger à la Commission d'examen de ma soutenance de thèse et a apporté une grande contribution à l'enrichissement de ce travail et à l'amélioration du présent mémoire. Je le prie de trouver ici l'expression de mes vifs sentiments de gratitude et de profond respect pour sa disponibilité permanente et ses conseils très utiles et fort appréciés.

Je remercie Monsieur Akichi Agboué, Professeur à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), pour avoir accepté de siéger à la Commission d'examen de ma soutenance de thèse.

J'adresse mes sentiments de vive gratitude et de profond respect à l'équipe rectorale de l'Université d'Abomey-Calavi et à la Direction de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi pour le précieux soutien qu'elles m'ont apporté tout au long de mes travaux.

Ce travail doit également beaucoup aux fructueux échanges avec certaines personnes qui m'ont fait bénéficier de leurs connaissances et de leur expérience ; je citerai particulièrement :

Monsieur Alain Grelat, Directeur de Recherche au Centre d'Etudes Expérimentales des Bâtiments et des Travaux Publics (Saint Rémy-les-Chévreuses, France) et au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (Marne-la-Vallée, France),

Monsieur René Gilles, Directeur du Groupe l'ERG et SIGMA Consultants,

Monsieur Gérard Cougny, ancien Professeur à l'École Nationale Supérieure des Travaux Publics de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), Directeur Région Afrique DIII Eau & Environnement s.a.r.l,

Monsieur André De Herde, Doyen de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université catholique de Louvain (Belgique),

Monsieur Jacques Jullien, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) et Directeur du Laboratoire de Mécanique Physique de Saint-Cyr-l'École (France),

Monsieur Iskender Gökalp, Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique d'Orléans, (France),

Monsieur Gérard Krauss, Professeur à l'Institut des Sciences Appliquées de Lyon (France) et ancien Directeur des Etudes à l'École Nationale des Travaux Publics de N'Djaména (Tchad),

Monsieur Youssef Sfaxi, Professeur à l'Université de Créteil-Val de Marne (Paris 12),

Monsieur Pierre N'Gae, Professeur à l'Université d'Evry-Val d'Essonne,

Monsieur Fassassi Liadi Didi, Professeur à l'École Supérieure de Technologie de Libreville (Gabon),

Messieurs Sandé Oladélé et Gougou Antoine, Professeurs à l'École Supérieure des Travaux Publics, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

Messieurs Badama Ndoye, Fadel Niang et Salif Gueye, Professeurs à l'Université de Technologie de Thiès (Sénégal),

Monsieur Marcellin Faye et Madame Awa Niang, Professeurs à l'École Supérieure Polytechnique de l'Université Cheikh Anta Diop, Dakar (Sénégal),

Monsieur Alexis Kémajou, Professeur à l'École Nationale Supérieure de Douala (Cameroun),

Monsieur Bankolé Taïo Fakambi, Coordonnateur du Groupe de Recherche "Etude, Architecture et Urbanisme" à Cotonou (Bénin).

Je les prie de bien vouloir trouver ici le vif témoignage de mes sentiments de profonde gratitude pour leur disponibilité permanente et leur précieux soutien.

Je voudrais saisir cette occasion pour adresser mes sincères remerciements à :

Monsieur Dramane Karim, Professeur, ancien Ministre de l'Éducation Nationale de la République du Bénin, Directeur du Laboratoire de Pharmacodynamie à la Faculté des Sciences et Techniques,

Monsieur Elègbè Amos, Professeur à la Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, ancien Ministre de la Culture, de l'Artisanat et du Tourisme de la République du Bénin,

Monsieur Padonou Djijoho, Professeur à la Faculté des Sciences de la Santé, ancien Ministre de l'Éducation Nationale de la République du Bénin,

Monsieur Seydou Sy Sall, Ministre de l'Urbanisme et de l'Aménagement du Territoire de la République du Sénégal,

Monsieur Adjati Mètowanou Albert, Professeur à l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi, ancien Directeur de Cabinet du Ministre de l'Éducation Nationale du Bénin,

Monsieur Takpara Issifou, Professeur à la Faculté des Sciences de la Santé, ancien Recteur de l'Université d'Abomey-Calavi,

Monsieur Aminou Taofiki, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, ancien Vice-Recteur de l'Université d'Abomey-Calavi,

Monsieur Tombiano Geoffroy, Professeur, Conseiller à l'Énergie du Premier Ministre du Burkina Faso,

Monsieur Tchabi Alphonse, Professeur à l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi, ancien Directeur du Collège Polytechnique Universitaire,

Monsieur Basile Louèkè, ancien Directeur-Adjoint du Collège Polytechnique Universitaire,

Messieurs Adéoti Ibrahim, Chonibarè Tidjani, Afoudah Abel, Olatundji Latifou, Accrombessi Georges, El Hadj Tidjani Mamadou et Akouiègninou Akpovi Emmanuel, Professeurs à la Faculté des Sciences et Techniques,

Messieurs M'Bessa Benoît, Iroko Félix, Quenum François José, Dossou Léopold et Houssou Christophe, Professeurs à la Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines,
Monsieur Fayomi Benjamin, Professeur à la Faculté des Sciences de la Santé,
Directeur de l'Institut Supérieur de Biologie Avancée, Université d'Abomey-Calavi,
Monsieur Alphonse Sèzan, Maître-Assistant au Département de Biologie Animale,
Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi,
Monsieur Tokpanou Adolphe, Maître Assistant au Département de Biologie Humaine, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi,
Monsieur Koné Mamadou, Directeur de Projet au Programme des Nations Unies pour le Développement, Dakar (Sénégal).

Leurs marques d'attention particulière, leurs mots d'encouragement et leurs conseils très utiles ont été très déterminants dans l'aboutissement de ces travaux. Je voudrais les assurer de mes sentiments de reconnaissance et de profond respect.

J'adresse mes sincères remerciements et mes sentiments de profonde gratitude aux autorités académiques et administratives de l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) pour leur précieux soutien et leurs multiples conseils ; je voudrais nommer particulièrement :

Monsieur le Professeur Kpodékon Marc, Directeur de l'EPAC,
Monsieur Mèdenou Daton, Directeur-Adjoint de l'EPAC,
Monsieur le Professeur Vianou Antoine, Chef du Service des Etudes du 3^{ème} Cycle et de la Recherche,
Monsieur le Professeur Sohounhloùé Koko Dominique, Directeur du Laboratoire de Recherche en Biologie Avancée,
Monsieur le Professeur Claude Martinez, Directeur du Laboratoire d'Etudes et Recherches en Techniques Industrielles.

Je saisis cette occasion pour rendre un hommage très reconnaissant à mes parents et amis pour leur soutien permanent et leur aide quotidienne ; il s'agit de :

Messieurs Chaffa André Joseph, Esaïe et Zachée,
Messieurs Fakorédé Azaria, Yabi Elie, Afouda Gomez Emmanuel, Biaou Afolabi Amos, Chaffa Labiyi Joseph, Liamidi Adéchian,
Messieurs Adjobo Michel, Adjobo Pierre, Adjobo Innocent, Adéoti Moïse, Adjobo Innocent, Adjobo James et Adjobo Séraphin,
Messieurs Balogoun Joab, Amadou Tidjani, Kotchoni Amos, Kotchoni Yaï Jean, Oloukou Alphonse, Oloukou Laurent et Tchabi Moïse,
Messieurs Alloba Ezéchiël, Ayédoun Marc Abel, Ilougbadé Marcellin, Akin Alfred, Afouda Kolawolé Emmanuel, Biaou Gauthier, Tchabi Yessoufou, Ahanchédé Adam et Moussa Aliou,
Messieurs Akpona Simon, Lalèyè Mouftaou, Tchédé François et Grégoire Alayé,
Messieurs Apo Alphonse, Tchabi Issaou, Babio Saïd Moctar et Amadou Sanni Wabi,
Messieurs Fanoudh Georges, Tokplo Pierre et Yessoufou Soulé,

Messieurs Adjé Labiyi Albert, Naï Bossina Honoré, Adjihou Raymond, Kongo Kuassi, Ayégnon Philippe et Beugré Martial,

Mesdames Biao Cécile, Fakorédé Salomé, Biauou Bernadette, Dembo Gado Habiba, Coulibaly Mama Aïssatou, Bachabi Nafissatou, Tchabi Sidonie, Yayi Eléonore, Yabi Antoinette, Tchabi Abimbola, Naï Geneviève, Kongo Esther, N'Zi Kouadio Sylvie Yolande, Kpèdé Emilienne, Coffi Véronique, Bikpo Adahi Christiane, Mètonou Diane, Biauou Adélaïde, Bouraïma Alaga, Edoun Chantal, Elègbè Victoire, Dannou Joëlle et Yodoman Adukè Naïmath.

Je leur adresse mes sentiments de profonde reconnaissance –ainsi qu'à leurs familles respectives– pour tous les sacrifices consentis pour ce travail et leur soutien qui ne m'a jamais fait défaut.

J'adresse mes sentiments de reconnaissance à tout le personnel et à tous mes collègues de l'École Polytechnique d'Abomey Calavi (Bénin), de l'Université d'Abomey-Calavi, de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), de l'École Supérieure Polytechnique de Dakar (Sénégal), de l'Université Polytechnique de Thiès (Sénégal), de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris (France), de l'École Supérieure de l'Énergie et des Matériaux d'Orléans (France), du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris (France), des Instituts Universitaires de Technologie de Sénart (Liesaint, France), d'Evry (France) et de Lokossa (Bénin), pour leur soutien et leurs conseils très amicaux.

J'adresse aussi mes sincères remerciements au personnel du Projet Régional PNUD/FEM RAF/93/G32 (Bureaux d'Abidjan et de Dakar) et du Bureau Régional d'Econoler International à Abidjan pour leur accueil cordial, leur appui technique et leur soutien très amical.

J'ai eu la chance de rencontrer des condisciples très formidables qui m'ont encouragé et soutenu au cours de ces dernières années, particulièrement à Evry, à Liesaint, à Paris, à Abidjan et à Dakar. Je leur adresse mes sincères remerciements et les assure de mon attachement très amical.

Pendant mes longues années de recherche, Messieurs Chaffa Afolabi Fidèle, Gado Abdou Karimou, Elègbè Omokèyèdé Roger, Sanya Adjibadé Emile, Dagba Ibisanya Basile, Awessou Boniface, Coffi Maximin, Adanminankou Jean-Marie, Kanko C. Maxime, Chabi Sika Karimou et Mesdames Ali Nouratou, Salifou Edith, Ligan Gandonou Honorine, Dan Baï Céline, Dangou Justine –et leurs familles respectives– m'ont apporté un appui très remarquable et m'ont été d'un grand recours ; je les prie de recevoir le vif témoignage de ma profonde reconnaissance.

La nouvelle expérience commune qui a permis de mener à bien ce travail, faite d'amour et de solidarité, est une preuve supplémentaire de notre indéfectible attachement ; je leur en suis très reconnaissant.

J'adresse mes vifs sentiments de gratitude à Mesdames Oulaye Rébecca Hortense, Odjo Mounirath, Kishiko Sophie, Agonvi Woboubé Fanny, Afidji Nassirath et Akanni Lambertine pour leur précieux soutien.

Que Lolita veuille bien trouver ici l'expression de mes sentiments de profonde reconnaissance pour son soutien permanent et tous les sacrifices consentis pendant ces longues années d'attente. Je garde l'assurance que quelles que soient la longueur et la profondeur de la nuit, le jour se lèvera ; car dans la Foi, notre Espérance ne sera pas vaine.

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION	1
Chapitre 1 : Etudes bibliographiques	
1.1- Généralités sur le confort thermique	6
1.1.1- Réponses physiologiques et sensorielles	
1.1.2- Paramètres et zones de confort	7
1.1.3- Indices de confort	8
1.1.4- Echelles de sensation	12
1.2- Etat de l'art en matière de conception bioclimatique de l'habitat	13
1.2.1- Développement de l'architecture climatique	14
1.2.2- Travaux récents dans notre région	18
Chapitre 2 : Données générales sur le climat et l'habitat au Bénin	
2.1- Données climatologiques du Bénin	22
2.1.1- Données climatiques usuelles	
2.1.2- Recueil et traitement des données climatologiques	24
2.2- Outils d'interprétation des données climatologiques	29
2.2.1- Diagramme de Givoni	
2.2.2- Méthode de Mahoney	31
2.3- Interprétation des données vis à vis de la conception de l'habitat bioclimatique	35
2.4- Données générales sur l'habitat	38
2.2.1- Quelques données statistiques	
2.2.2- Proposition d'une typologie de l'habitat au Bénin	
Chapitre 3 : Outils numériques de simulation	
3.1- Méthodes de simulation. Choix du logiciel Bilga et justification	43
3.2- Description sommaire du logiciel Bilga	44
3.3- Rappels des algorithmes de calculs	46
3.3.1- Echanges convectifs extérieurs	
3.3.2- Echanges convectifs intérieurs	49
3.3.3- Echanges dans les parois opaques planes	
3.3.4- Calculs des échanges par rayonnement dans un local	51
3.3.5- Estimation des vitesses d'air	53

Chapitre 4 : Etude paramétrique du comportement thermique de l'habitat	
4.1- Problématique du confort thermique dans l'habitat bioclimatique	56
4.2- Méthodologie de l'étude	
4.3- Prise en compte du climat et réponses architecturales	57
4.3.1- Eléments de bilan thermique d'un local	
4.3.2- Facteurs de contrôle des conditions d'ambiance dans l'habitat	58
4.3.3- Stratégies architecturales	60
4.4- Etude paramétrique du comportement thermique de l'habitat	62
4.4.1- Données du bâtiment et hypothèses de base	
4.4.2- Simulations et résultats	64
Influence de l'inertie et de la teinte des parois sur le comportement thermique de l'habitat	
Influence de l'orientation des bâtiments	67
Influence de la toiture	69
Influence de la ventilation des locaux	74
Influence des masques de protection solaire	79
Cumul des facteurs d'amélioration des conditions d'ambiance	
Chapitre 5 : Application à l'amélioration du confort dans l'habitat économique	
5.1- Etude de cas n° 1 : Habitat économique de 3 pièces, type ADE-3P	85
5.2- Etude de cas n° 2 : Habitat économique de 4 pièces, type OLA-4P	92
5.3- Etude de cas n° 3 : Habitat économique de 4 pièces, type BOLA-4P	100
5.4- Etude de cas n° 4 : Habitat économique de 4 pièces, type SHEGUN-4P	105
Chapitre 6 : Recommandations pour la conception d'un habitat adapté au climat	
6.1- Solutions de confort dans l'habitat	
6.1.1- Protection des constructions	111
6.1.2- Ventilation des locaux	112
6.1.3- Inertie des parois	
6.2- Synthèses constructives	114
CONCLUSION	118
Références Bibliographiques	122
ANNEXES	
Annexe 1 : Méthode d'évaluation du confort thermique	
Annexe 2 : Présentation sommaire de la République du Bénin	
Annexe 3 : Données climatologiques du Bénin	
Annexe 4 : Caractéristiques des matériaux de construction utilisés	

Liste des Figures :

Figure 1.1 : Zone de confort

Figure 2.1 : Données caractéristiques du climat à Cotonou

- a- Température extérieure moyenne
- b- Humidité spécifique
- c- Vitesse de vent

Figure 2.2 : Données caractéristiques du climat à Savè

- a- Température extérieure moyenne
- b- Humidité spécifique
- c- Vitesse de vent

Figure 2.3 : Données pluviométrique et interprétation des données climatologiques

- a- Régime Hauteur de pluie dans la région sud du Bénin (Période 1961 à 2000)
- b- Besoins de froid par climatisation (Cotonou, Savè, Bimbèrèkè)
- c- Diagramme bioclimatique pour la ville de Cotonou
- d- Diagramme bioclimatique pour la ville de Bohicon

Figure 2.4 : Répartition de l'habitat au Bénin suivant le nombre de pièces

Figure 3.1 : Définition des angles servant à calculer l'angle d'incidence

Figure 3.2 : Caractéristiques d'un mur à couches multiples

Figure 4.1 : Echanges thermiques dans un local

Figure 4.2 : Influence de l'inertie et de la teinte des parois

- a- Parois lourdes
- b- Parois légères
- c- Teinte des parois

Figure 4.3 : Influence de l'orientation de la construction sur les conditions d'ambiance

- a- Vitesse d'air dans le local
- b- Température résultante dans le local

Figure 4.4 : Charge thermique dans le comble

- a- Charge thermique dans le comble suivant la nature et la teinte du matériau de couverture
- b- Charge thermique dans le comble suivant la nature et la teinte du matériau de couverture

Figure 4.5 : Influence de la nature et de la teinte du matériau sur les conditions d'ambiance

- a- Influence de la nature du matériau de couverture sur les conditions d'ambiance
- b- Influence de la teinte du matériau de couverture sur les conditions d'ambiance

Figure 4.6 : Influence de la ventilation du comble sur les conditions d'ambiance

Figure 4.7 : Ventilation du comble vs isolation de la toiture

Figure 4.8 : Influence de la ventilation des locaux suivant le scénario des ouvertures

- a- Vitesse d'air dans le local
- b- Température résultante
- c- Mouillure cutanée

Figure 4.9 : Influence de la ventilation des locaux suivant les dimensions des ouvertures

- a- Vitesse d'air dans le local
- b- Température résultante
- c- Mouillure cutanée

- Figure 4.10 : Influence des masques de protection solaire
- a- Flux solaires entrants
 - b- Température résultante
- Figure 4.11 : Cumul des facteurs d'amélioration des conditions d'ambiance
- a- Température de surface du mur Ouest (Chambre)
 - b- Température résultante dans la chambre
 - d- Mouillure cutanée dans les conditions d'ambiance
- Figure 5.1 : Amélioration du niveau de confort au Salon
- a- Vitesse d'air
 - b- Température résultante
 - c- Niveau de confort suivant la nature des murs
- Figure 5.2 : Amélioration du niveau de confort dans la chambre 2
- a- Vitesse d'air
 - b- Température résultante
 - c- Niveau de confort suivant la nature des murs
- Figure 5.3 : Influence de la nature des matériaux de construction
- a- Température résultante au Salon
 - b- Niveau de confort au Salon
- Figure 5.4 : Amélioration du niveau de confort au Salon
- a- Température résultante
 - b- Vitesse d'air
 - c- Niveau de confort
- Figure 5.5 : Amélioration du niveau de confort dans la chambre 3
- a- Température résultante
 - b- Vitesse d'air
 - c- Niveau de confort
- Figure 5.6 : Influence de la nature des matériaux de construction
- a- Température résultante
 - b- Niveau de confort
- Figure 5.7 : Amélioration du confort au Salon
- a- Vitesse d'air
 - b- Température résultante
 - c- Niveau de confort
- Figure 5.8 : Amélioration du confort dans la chambre
- a- Température résultante
 - b- Vitesse d'air
 - c- Niveau de confort
- Figure 5.9 : Amélioration du niveau de confort au Salon
- a- Température résultante au Salon
 - b- Vitesse d'air au Salon et dans la chambre
 - c- Niveau de confort au Salon suivant la nature des murs
- Figure 5.10 : Amélioration du niveau de confort dans la chambre 3
- a- Température résultante suivant la nature des murs
 - b- Niveau de confort suivant la nature des murs

Liste des Tableaux :

- Tableau 1.1 : Zones de confort
- Tableau 1.2 : Différentes échelles de sensation
- Tableau 1.3 : Définition de l'échelle TSFENS
- Tableau 2.1 : Quelques données climatiques du Bénin
- a- Données globales
 - b- Température extérieure moyenne
 - c- Ecart diurne moyen
 - d- Régime des pluies (Cotonou, Bohicon)
- Tableau 2.2 : Recommandations générales pour des constructions adaptées au climat (Méthode de MAHONEY)
- Tableau 2.3 : Répartition de l'habitat au Bénin suivant une combinaison des critères
- Tableau 4.1 : Identification des principaux facteurs et dispositifs d'amélioration des conditions d'ambiance
- Tableau 4.2 : Stratégies architecturales pour les constructions en région chaude
- Tableau 4.3 : Température résultante dans le local suivant l'inertie et la teinte des parois
- Tableau 4.4 : Récapitulation des conditions d'ambiance et de confort dans les locaux suivant l'orientation de la construction
- Tableau 4.5: Caractéristiques thermiques des matériaux de couverture
- Tableau 4.6 : Performances de la toiture et données d'ambiance suivant la teinte de la toiture
- Tableau 4.7 : Données moyennes d'ambiance et niveau de confort suivant différents paramètres de la toiture
- Tableau 4.8: Données moyennes d'ambiance et niveau de confort suivant le débit de ventilation des locaux
- Tableau 4.9 : Flux solaires entrants et température résultante
- Tableau 4.10 : Comparaison des données d'ambiance
- Tableau 4.11 : Données d'amélioration du niveau de confort dans les locaux
- Tableau 5.1 : Récapitulation des performances des locaux (Construction ADE-3P)
- Tableau 5.2 : Synthèse de l'amélioration des conditions d'ambiance et niveau de confort (Construction ADE-3P)
- Tableau 5.3 : Récapitulation des performances des locaux (Construction OLA-4P)
- Tableau 5.4 : Synthèse de l'amélioration des conditions d'ambiance et niveau de confort (Construction OLA-4P)
- Tableau 5.5 : Récapitulation des performances des locaux (Construction BOLA-4P)
- Tableau 5.6: Récapitulation des performances des locaux (Construction SHEGUN-4P)

NOMENCLATURE

a	Diffusivité thermique (m^2/s)	A :	Aire d'une paroi (m^2)
A_z :	Azimut du soleil par rapport au sud	c :	Chaleur massique ($J/kg.°C$)
D :	Largeur des masques (m)	e :	Épaisseur d'une paroi (m)
F_{ij} :	Facteur de forme	H_{rel} :	Humidité relative
H_{spec} :	Humidité spécifique (g/kg air sec)	$H_{s,max}$:	Humidité spécifique maximale (g/kg air sec)
$H_{s,mini}$:	Humidité spécifique minimale (g/kg air sec)	h_c, h_e, h_i :	Coefficient de convection ($W/m^2°C$)
I_{DFP} :	Flux diffus sur un plan quelconque (W)	I_{DF} :	Flux diffus sur un plan horizontal (W)
I_{DRP} :	Flux direct sur un plan quelconque (W)	I_{DR} :	Flux direct sur un plan perpendiculaire aux rayons solaires (W)
J_i :	Radiosité d'une surface (W/m^2)	M_{cut}, W_{et} :	Mouillure cutanée (%)
N_{ij} :	Fonction d'échange	p :	Perméabilité d'une façade
Q :	Débit d'air (m^3/s)	q_{net} :	Flux grande longueur d'onde absorbée (W)
q_i :	Flux venant des surfaces environnantes sur une paroi i (W)	S :	Section transversale d'un local
T_c :	Température du ciel ($°C$)	T_{res} :	Température résultante ($°C$)
T_e, T_{ext} :	Température de l'air extérieur ($°C$)	T_{eq} :	Température équivalente ($°C$)
T_i, T_{si} :	Température de surface d'une paroi ($°C$)	T_{int} :	Température à l'intérieur ($°C$)
T_{max} :	Température maximale ($°C$)	T_{min} :	Température minimale ($°C$)
T_{moy} :	Température moyenne ($°C$)	V_{max} :	Vitesse maximale (m/s)
u, V_{air} :	Vitesse d'air moyenne (m/s)	V_{moy} :	Vitesse moyenne (m/s)
u_{ref} :	Vitesse à la hauteur de référence (m/s)	V_{mini} :	Vitesse minimale (m/s)

Lettres grecques

α :	Coefficient d'absorption	λ :	Conductivité thermique du matériau ($W/m.°C$)
ϵ :	Emissivité du matériau	δ_{ij} :	Symbole de Kronecker
ρ :	Masse volumique (kg/m^3)	σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($=5,68.10^8 W/m^2K^4$)
Φ_{CL} :	Flux courte longueur d'onde (W)	Φ_{GL} :	Flux grande longueur d'onde (W)

INTRODUCTION

L'objectif premier de la politique d'habitat de chaque pays sera de garantir un niveau de vie minimal, notamment de fournir tous les produits et services de base à toute sa population présente et future et de freiner l'excès de consommation des groupes privilégiés tant que ces niveaux minimaux n'auront pas été atteints.

Groupe Intergouvernemental ad hoc HABITAT

Conférence des Nations Unies sur les Etablissements Humains,
Septembre 1975

L'explosion urbaine dans les pays en développement s'accompagne généralement de l'émergence de quartiers précaires n'offrant guère de réponses adéquates aux conditions de vie des populations.

La qualité thermique médiocre de l'habitat dans ces zones urbaines a des conséquences néfastes sur le confort et la santé des usagers. Il est donc impérieux d'apporter des solutions viables aux problèmes liés à la conception de l'habitat à travers une vision globale et la compréhension de la construction comme une enceinte devant procurer aux usagers des conditions d'ambiance favorables à leur bien-être.

Dans le contexte économique et socioculturel de l'Afrique de l'Ouest, les professionnels du bâtiment doivent développer des solutions techniques simples faisant recours à des procédés de climatisation passive peu coûteux.

L'habitat bioclimatique trouve une place de choix dans cet environnement et paraît d'autant plus recommandable qu'il procure un confort peu coûteux et une meilleure hygiène aux usagers des logements économiques.

La complexité du problème de conception de logements adaptés au climat peut être généralement contournée en élaborant une série d'habitats types répondant aux exigences de chaque zone climatique.

La conception bioclimatique requiert une bonne connaissance de l'environnement géographique (climat, topographie), la maîtrise des notions de confort thermique dans l'habitat, la prise en compte des données techniques du site et l'intégration des impératifs socio-économiques du pays.

Au cours des dernières décennies, le développement de l'habitat climatique a connu un essor prodigieux dans le Tiers-Monde, à un niveau variable suivant les pays, allant de réalisations ponctuelles d'intérêt limité à des programmes ambitieux de logement. Les actions initiées dans le cadre du Programme Interministériel Français de Recherche Expérimentale en Coopération (REXCOOP) sur le thème "Habitats climatiques" ont notamment permis de réaliser des avancées sur les notions de confort thermique et la maîtrise du phénomène de ventilation naturelle, de mettre au point des outils de simulation adaptés aux préoccupations actuelles et d'attirer réellement l'attention des acteurs locaux de la construction sur les problèmes de l'habitat et de jeter les bases d'opérations exemplaires.

Les travaux effectués sur le thème de confort dans l'habitat en région tropicale visent essentiellement à faire progresser les connaissances scientifiques et technologiques afin que la construction puisse bénéficier des avancées dans ce domaine. Les principales études menées ont trait à l'ensoleillement, au transfert de chaleur à travers les murs du bâtiment, aux critères de confort selon le type de climat et à l'abaissement de l'humidité et de la température de l'air dans les locaux.

Plusieurs outils ont été mis au point pour l'étude du comportement hygrothermique du bâtiment, notamment des logiciels de simulation, plus adaptés les uns que les autres à l'évaluation correcte du confort humain dans les bâtiments en région chaude.

Différents travaux effectués dans le cadre du Programme REXCOOP-Habitats climatiques ont permis de valider certains outils numériques pour la simulation du comportement hygrothermique des bâtiments, particulièrement dans les régions tropicales humide et sèche (Casamo-Clim, Oasis et Bilga). La comparaison des résultats expérimentaux, relevés in situ dans l'habitat en Côte d'Ivoire et au Sénégal, avec ceux obtenus par simulation à l'aide de ces logiciels donne une bonne concordance des données d'ambiance et de confort thermique, qualifiant ainsi ces outils pour l'analyse des bâtiments en Afrique de l'Ouest.

Au Bénin, quatre raisons justifient l'actualité et la pertinence du présent travail :

- Dans le cadre des actions devant soutenir le développement des connaissances spécifiques et la recherche pluridisciplinaire nécessaires à la réalisation des objectifs de mieux-être dans les logements économiques, nous devons réunir des informations scientifiques et techniques capables de permettre aux professionnels et utilisateurs des bâtiments de se familiariser avec les problèmes de conception de l'habitat adapté au climat.

- Au plan technique, il est impérieux de mettre à la disposition des concepteurs de bâtiments les moyens méthodologiques et technologiques pour optimiser réellement les caractéristiques d'un projet de construction en fonction des contraintes locales, en particulier climatiques.

- Au plan économique et social, la nécessité d'améliorer les conditions d'ambiance et le confort dans l'habitat et de réduire, dans des conditions économiques satisfaisantes, la consommation énergétique due aux appareils de climatisation incite à la vulgarisation des principes de bioclimatisme, à la généralisation et au développement de l'habitat climatique.

Aussi, les problèmes socio-économiques liés aux constructions déficientes exigent-ils des actions de recherche systématiques devant déboucher sur une vision globale des aspects encore inexpliqués de la relation habitat-santé.

- Au plan réglementaire, il est impérieux de jeter les bases de calcul pour l'élaboration d'un Code Régional de confort thermique dans l'habitat. En effet, les connaissances ont beaucoup progressé dans notre sous-région mais les réalisations sont rares ; il convient donc d'engager des actions dans le sens de l'acquisition et de la valorisation d'une large expérience et d'un savoir-faire de très bon niveau sur le plan international.

Ces diverses situations donnent la clé nécessaire à la définition d'une politique adéquate de logements économiques au profit des couches sociales moyennes, politique susceptible d'apporter des solutions viables et durables à l'amélioration des conditions de vie des populations.

L'objectif du présent travail est de contribuer à combler progressivement le vide scientifique et technique constaté dans notre région en matière de recherche dans ce domaine (thermique du bâtiment, conception bioclimatique de l'habitat, efficacité énergétique des bâtiments), et à sensibiliser les utilisateurs et professionnels du bâtiment.

En nous basant sur les données climatiques du Bénin, nous avons procédé à une analyse paramétrique du comportement des constructions ou des parties de constructions en vue de développer des modèles simples de logements basés sur les principes bioclimatiques en région tropicale. Des études de cas et applications pratiques sur des plans de constructions existantes ou de projets de construction ont permis de proposer des modifications pour améliorer les conditions d'ambiance dans les locaux.

En première instance nous avons choisi pour site la région sud du Bénin compte tenu de sa très forte concentration démographique et des problèmes inhérents au rythme de développement régional. Notre ambition est d'étendre ultérieurement cette étude aux autres régions du pays dans le cadre d'une vaste prospection des solutions de constructions adaptées aux climats locaux.

Le présent mémoire fait le point des principales études bibliographiques dans le domaine de l'amélioration du confort thermique en région tropicale et propose une approche climatique originale de la conception de l'habitat dans la région sud du Bénin (climat tropical humide).

Dans le premier chapitre, la synthèse d'études générales sur le confort thermique en région chaude et d'analyse des performances de l'habitat en région tropicale nous ont permis de dégager les lignes directrices d'une architecture bioclimatique capable de servir de guide à la conception et la construction d'un habitat plus adapté au climat en vue de réduire l'inconfort dans les habitations.

Dans le deuxième chapitre, nous avons procédé au traitement des données climatiques de quelques villes du Bénin (Cotonou, Bohicon, Savè et Bimbèrèkè) sur la période allant de 1961 à 2000 ; l'interprétation des données pour les sites de Cotonou et Bohicon vis à vis de la construction de l'habitat et leur analyse par les méthodes de Givoni et de Mahoney ont permis de recenser, à première vue, les caractéristiques des constructions les plus adaptées pour cette région.

La ville de Cotonou est située dans la bande côtière (région tropicale humide), Bohicon à l'orée de la bande de transition entre la zone humide et la zone sèche.

Nous nous sommes appuyés sur des données statistiques et une analyse sommaire de la typologie de l'habitat au Bénin pour définir l'échantillon le plus représentatif de l'habitat dans la région sud du Bénin : c'est cet échantillon qui a servi de base à l'étude paramétrique du comportement thermique des locaux au chapitre 4.

Dans le chapitre 3, nous présentons les outils numériques utilisés pour notre étude.

L'étude paramétrique du comportement thermique des locaux (Chapitre 4) a permis de recenser les solutions d'amélioration des conditions d'ambiance et du confort des occupants dans une construction à deux pièces, pendant les périodes chaudes de l'année. L'application des résultats de cette étude à quelques plans de constructions existantes ou de projets de constructions nous a permis d'une part de dégager des solutions simples et peu coûteuses pour améliorer les conditions d'ambiance et le confort des usagers (Chapitre 5), et d'autre part, de faire des recommandations pour des constructions adaptées au climat du site (Chapitre 6).

CHAPITRE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Face aux contraintes climatiques, l'homme s'adapte en créant des conditions susceptibles de convenir à son bien-être.

L'homme a la faculté de maintenir sa température interne constante (environ 37°C) dans une très large plage de variation des conditions climatiques : c'est un homéotherme.

En effet, l'organisme humain est normalement en état d'équilibre sous l'effet de la quantité de chaleur produite à l'intérieur du corps (métabolisme), variable en fonction de l'activité du sujet et des échanges avec son environnement. Cet équilibre thermique est maintenu par les mécanismes thermorégulateurs de l'individu parmi lesquels les mécanismes de sudation.

Si l'individu peut maintenir l'équilibre thermique avec l'ambiance sans trop solliciter ces mécanismes de thermorégulation, il se trouve alors dans une situation dite de confort thermique.

Tout individu se trouve en état de stress thermique lorsque son organisme n'a pas atteint le point de stabilisation de son métabolisme.

Les réponses physiologiques du corps vis à vis du stress thermique sont la régulation circulatoire, le changement de température interne et la perte de chaleur par transpiration. La sensation de confort, basée sur l'équilibre entre le corps qui produit de la chaleur (métabolisme) et l'ambiance, est très variable d'un individu à l'autre.

1.1- Généralités sur le confort thermique

Le confort thermique résulte de l'interaction permanente entre les conditions d'ambiance (température de l'air, température radiante de l'environnement, vitesse de l'air), l'activité (métabolisme) et la tenue vestimentaire (isolation thermique).

Bien que la perception du confort soit relativement subjective, il est possible aujourd'hui, grâce aux progrès de la recherche, de relier la réaction psychologique d'un individu aux fonctions de l'organisme [réf. 1 à 5].

Le confort thermique est fonction de la facilité avec laquelle la chaleur issue du corps humain peut être évacuée. L'équilibre de la production d'énergie métabolique et des échanges thermiques avec l'environnement doit être atteint sans que soient mis en jeu, de façon excessive, les mécanismes thermorégulateurs ; ce qui n'est pas toujours le cas en région chaude. En effet, dans les régions chaudes, l'équilibre physiologique de l'homme doit faire appel au processus d'évapotranspiration pour compléter les échanges avec l'ambiance.

1.1.1- Réponses physiologiques et sensorielles

La thermorégulation est un système complexe de réponses automatiques et volontaires qui gouvernent le taux de perte de chaleur du corps et, dans certains cas, la production de chaleur. Bien que dépendant de facteurs physiques tels que les différences de tension de vapeur d'eau et de température entre la peau et l'environnement, l'échange de chaleur à la surface du corps peut être contrôlé par une régulation dynamique des divers systèmes physiologiques et des modes vestimentaires.

Les principales réponses physiologiques et sensorielles sont : la modification de la température cutanée, le taux de sudation et la sensation thermique et d'humidité de la peau [réf. 1 à 8]. Plusieurs équipes ont souligné l'importance des facteurs de sudation et de mouillure cutanée en région tropicale.

La mouillure cutanée est un indice de la sensation d'inconfort liée à la difficulté d'évaporation de la sueur qui recouvre la peau. Elle est liée aux conditions d'ambiance et aux caractéristiques physiologiques du sujet [réf. 9 à 16]. C'est un facteur important dans la sensation d'inconfort en climat tropical humide : une sensation d'inconfort se manifeste dès que la température dépasse 28 ou 29°C et que la mouillure atteint 25 à 30% avec une vitesse d'air relativement faible (0,25 m/s).

Le débit sudoral représente la quantité horaire de sueur produite par un individu placé dans des conditions d'ambiance chaude. Il peut être relié à la fatigue qu'accuse l'organisme pour se mettre dans un état de confort acceptable : c'est un bon indicateur de l'inconfort vécu en climat chaud.

1.1.2- Paramètres et zone de confort

Le confort thermique est lié à plusieurs facteurs intervenant dans le bilan thermique du corps humain ; ce sont :

- les variables liées à l'individu : l'isolement vestimentaire et l'activité
- les variables caractérisant l'ambiance : la température de l'air, la température radiante moyenne, la vitesse de l'air, la tension de vapeur d'eau dans l'air.

Pour une activité et une vêtue données, il existe une zone de valeurs des paramètres d'ambiance à l'intérieur de laquelle les mécanismes régulateurs fonctionnent de façon optimale : c'est la zone de confort.

La figure 1.1 indique le polygone de confort (zone C).

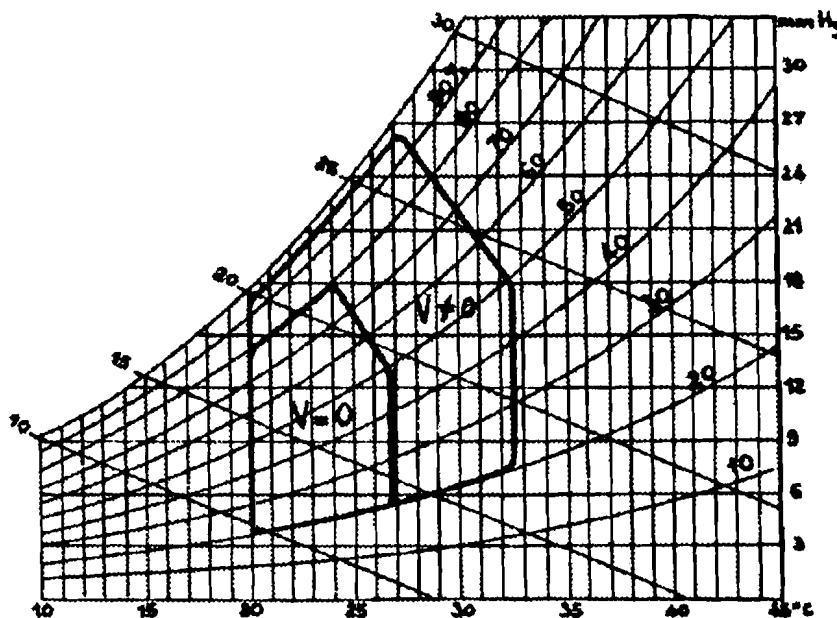


Figure 1.1 : Zone de confort (Source : réf 17)

Le polygone de confort est établi pour des sujets acclimatés, au repos ou engagés dans une activité sédentaire, avec une tenue vestimentaire légère. Son application se limite au cas des bâtiments non climatisés. Il est délimité comme suit :

$$20^{\circ}\text{C} < T_{\text{sèche}} < 27^{\circ}\text{C} ;$$

$$20\% < H_{\text{rel}} < 80\%$$

$$A (27^{\circ}\text{C}, 0\%) ; B (24^{\circ}\text{C}, 80\%)$$

Il peut être élargi suivant le niveau de ventilation des locaux (zone V).

1.1.3 - Indices de confort

a- Indices bioclimatiques :

Pour étudier les effets des climats et des changements de temps sur l'organisme humain, et surtout pour quantifier le degré de confort ou d'inconfort, les biométéorologues ont mis au point une série d'indices bioclimatiques associant divers éléments du temps ; ils rendent compte, sous forme chiffrée, des sensations de l'homme et permettent de mettre en évidence l'agressivité d'un climat ou d'un type de temps pour l'homme [18 à 28].

Escourrou [18], Besancenot [19, 20] et Boko [21, 22] font la synthèse des indices climatiques couramment utilisés pour l'étude des bioclimats humains. Ce sont :

- l'indice thermohygométrique (*Temperature Humidity Index*) : THI (E. C. Thom, 1959) ;
- le pouvoir réfrigérant de l'air ;
- la tension superficielle de vapeur d'eau
- la contrainte relative (*Relative strain*) : (D. H. K. Lee, 1965) ;
- l'enthalpie de l'air ;
- l'humidité physiologique.

Nous définissons ci-dessous les indices bioclimatiques les plus usités :

L'indice thermohygométrique (*Temperature Humidity Index*) :

L'indice thermohygométrique (THI) mesure la température effective, c'est à dire celle qui déterminerait la même sensation thermique dans un air saturé de vapeur d'eau.

L'utilisation de l'indice thermohygométrique fait apparaître qu'en allant vers une sécheresse de plus en plus accentuée les températures élevées semblent plus fraîches et les températures basses plus chaudes : la sécheresse est ainsi considérée comme amenant une rémission pour la grande chaleur.

Le pouvoir réfrigérant de l'air :

Le pouvoir réfrigérant est une notion qui combine l'effet de la température de l'air et de la vitesse du vent ; elle donne la valeur de la déperdition de chaleur du corps humain, au contact de l'air.

A titre d'exemple, on constate que par 0°C, sans vent, la perte de chaleur est de 345 kcal/m²/h, tandis qu'avec un vent de 5m/s (soit 18 km/h) cette perte atteint 918 kcal/m²/h, et 1058 kcal/m²/h lorsque le vent souffle à 10 m/s (36 km/h).

La tension superficielle de vapeur d'eau : La tension de vapeur d'eau détermine le stress hydrique pulmonaire, selon que l'air respiré est trop riche ou trop pauvre en vapeur d'eau, ce qui détermine soit la déshydratation soit un excès d'eau dans les voies respiratoires (noyade).

La contrainte relative (*Relative strain*): La contrainte relative rapporte la quantité de chaleur accumulée dans le corps humain à la déperdition maximale permise par le contexte thermohygro-métrique.

L'enthalpie de l'air : L'enthalpie de l'air évalue la capacité calorifique du mélange air-vapeur d'eau au-dessus des points arbitraires figurant le zéro, soit -18°C pour l'air sec et 0°C pour le contenu de vapeur. C'est la somme de la chaleur sensible correspondant à l'élévation de température de zéro à T°C et de la chaleur latente U correspondant à l'évaporation d'une même quantité d'eau.

L'humidité physiologique : L'humidité physiologique (HP) exprime le rapport de la tension de vapeur réelle à la tension saturante à celle de la peau et des muqueuses, soit en moyenne 35°C.

Dans l'optique de restituer des ambiances bioclimatiques, Boko [21] a calculé les indices climatiques sur différents sites au Bénin. Et pour ce faire, étant donné que les paramètres météorologiques n'agissent pas isolément ou successivement mais en synergie, il a combiné les indices climatiques instantanés

Cette étude a mis en lumière une zonalité des bioclimats humains que l'on ne peut pas retrouver dans une classification fondée sur la climatologie physique. Appliquée à différents sites au Bénin, elle a permis de mesurer la plus ou moins grande pénibilité de l'effort physique, de confirmer quantitativement les observations qualitatives sur les facteurs de confort et de l'inconfort en ambiance tropicale, et de proposer ainsi une rationalisation des horaires et des calendriers de travail en vue d'améliorer l'efficacité du labeur humain [23, 25, 26].

Houssou [28] a mis un accent particulier sur les distorsions flagrantes souvent observées entre les indices utilisés en bioclimatologie humaine et les sensations des populations et proposé quelques pistes de réflexion sur les sensations humaines et le choix des indices bioclimatiques en zone tropicale pluvieuse. Dans une étude basée sur les données météorologiques de la ville de Natitingou (bassin intra-montagnard de la chaîne de l'Atacora à l'extrême nord-ouest du Bénin) sur la période allant de 1969 à 1985, il s'est interrogé sur le bien-fondé des indices bioclimatiques et à la pertinence des paramètres qu'ils prennent en compte.

De manière classique, l'évaluation du confort humain consiste à matérialiser toute situation thermohygro-métrique par un point sur un bioclimogramme et à en faire l'interprétation par rapport à la courbe de touffeur (ou courbe de temps lourd) [26]. Houssou a pointé du doigt une source d'erreur souvent négligée par les

bioclimatologues : celle-ci tient au fait que nombre d'indices ou de classifications ont un domaine relativement limité

Analysant l'application des indices bioclimatiques, il a montré que ceux susceptibles de s'appliquer en tous lieux et en toutes circonstances sont rares, de même que ceux qui s'avèrent à eux seuls capables de donner une image exhaustive du confort et de l'inconfort. Ce qui l'a amené à proposer la prise en compte séparée des différents éléments du climat peut restituer plus fidèlement la façon dont l'état de l'atmosphère est perçu.

b-Indices de confort thermique :

Pour comparer des ambiances entre elles et évaluer leurs niveaux respectifs de confort, on utilise des indices qui servent de mesure de l'effet des différents apports et pertes de chaleur sur l'organisme humain [réf. 29 à 37]. On connaît aujourd'hui une dizaine d'indices de confort (ou d'inconfort) dont la plupart sont basés sur l'équivalence de sensation de confort [réf. 38 à 44]. Ce sont :

- la température effective (Houton, 1923 ; Yaglou, 1927 ; Gagge, 1937) ;
- la température résultante (Missenard, 1948) ;
- la température opérative (Wislor, 1949 ; Gagge, 1937) ;
- l'indice de contrainte thermique (Givoni, 1963) ;
- le vote moyen prévisible (*Predicted Mean Vote*) et le pourcentage prévisible d'insatisfaits (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) : le PMV et le PPD (Fanger, 1970) ;
- la température effective standard (Gagge, 1981) ;
- l'indice d'inconfort IND (Grelat et al., 1987) ;
- l'indice d'inconfort DISC (Sangkertadi, 1994) ;

Nous présentons ci-dessous les principaux indices de confort thermique :

La température effective (TE) : Elle indique la sensation ressentie par un individu dans une ambiance saturée en humidité, en air calme. Les parois du local et l'ambiance sont supposées à la même température ($T_{air} = T_m$) ; l'habillement et l'activité du sujet sont définis de façon standard.

Elle est généralement déterminée sur un abaque à partir des températures lues respectivement sur un thermomètre sec et un thermomètre humide.

Plusieurs équipes ont montré que la température effective surestime l'influence du degré hygrométrique pour des conditions d'ambiance fraîches et confortables ; par contre, elle la sous-estime lorsque la température de l'air est élevée. C'est pourquoi elles ont défini de nouveaux indices dérivés de TE : la température effective corrigée (TEC), et la nouvelle température effective (NTE).

La température résultante sèche (T_{rs}) : Missenard a montré que la sensation thermique d'un individu dans un local ne dépend pas strictement de la température de l'air mais également des échanges par rayonnement et convection entre l'individu, les parois du local et l'air ambiant.

La température résultante sèche (T_{rs}) peut être déterminée sur un abaque ou par des formules approchées rencontrées dans la littérature spécialisée. Elle s'appuie sur la température et la mouillure de la peau comme indicateurs de confort.

La température opérative (T_o) : C'est la moyenne pondérée de la température d'air et de la température moyenne radiante des parois environnantes. Elle permet d'évaluer l'impact des effets convectifs et radiatifs sur le confort humain dans une ambiance.

Se basant sur la température opérative, Gagge a développé deux autres indices : la température opérative humide (TOH) et la température opérative standard (TOS).

La température opérative humide se réfère à un corps noir placé dans une atmosphère saturée ($H_{rel} = 100\%$) ; l'indice TOS permet d'apprécier l'effet de la sudation dans les conditions standard.

L'indice de contrainte thermique (ITS) : Il permet de prévoir la contrainte thermique de l'organisme en tenant compte des échanges de chaleur entre un individu et son environnement, particulièrement du rendement évaporatoire de la sudation. Exprimée en grammes par heure (g/h), elle est proportionnelle au rapport du débit sudoral requis pour ramener le corps dans un état de confort acceptable (E_{req}) et de l'efficacité de la sudation dans la recherche du confort (η).

Le vote moyen prévisible (*Predicted Mean Vote* : PMV) : L'indice PMV a été proposé par FANGER [réf. 4 à 6] à partir d'une étude statistique en chambre bioclimatique ; c'est l'indice le plus utilisé dans les régions froides et tempérées. Dans une ambiance chaude, le vote moyen prévisible tend à donner des résultats surestimés pour une humidité faible (< 20%) et sous-estimés pour une humidité élevée (> 80%) ; il n'est donc pas adapté pour la qualification du confort thermique en région chaude.

Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (*Predicted Percentage of Dissatisfied* : PPD) : Les personnes satisfaites s'expriment peu, contrairement aux sujets qui sont dans une situation inconfortable ; il est donc plus facile de quantifier l'inconfort en évaluant le pourcentage des sujets insatisfaits dans une ambiance. Ici, la satisfaction des sujets constitue le critère de confort ; une ambiance est reconnue confortable lorsque le pourcentage d'insatisfaits est inférieur à 10%.

La température effective standard (SET) : Elle se définit comme la température d'une enceinte isotherme ($T_{air}=T_{tm}$) dans laquelle un individu au repos, légèrement vêtu (0.6 clo) et exerçant une activité sédentaire ($act=1.1met$), aurait les mêmes pertes de chaleur pour une même température de peau et une même mouillure cutanée que dans son environnement habituel après 1h d'exposition ; la vitesse de l'air est fixée à 0.15m/s et le niveau d'humidité à 50%.

Indice d'inconfort (IND) : A partir des travaux du CNRS [réf. 1, 2], Grelat et ses collaborateurs [réf. 42, 43] ont estimé les notes de confort en fonction des variations de la mouillure cutanée et du débit sudoral.

Le tableau 1 fait état des valeurs repères vis à vis du confort déclaré. Un indice d'inconfort, analogue à un pourcentage d'insatisfaits, a été obtenu en attribuant de

manière arbitraire 0% à la zone 1, 100% à la zone 4 et une valeur calculée pour les zones 2 et 3 ; la formule de calcul est la suivante :

$$IND(\%) = 100 \times \text{Sup} \left[\frac{M_{cut} - 0.06}{0.19}, \frac{D_s - 50}{200} \right] > 0$$

Pendant les périodes d'occupation, une valeur moyenne journalière peut donc être calculée pour chaque local permettant ainsi une notation des bâtiments existants ou des projets de construction (Voir Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Zones de confort d'après Grelat et al [réf. 42]

MOUILLURE CUTANÉE	25%	4	4	4	4	ZONE 1 : agréable ZONE 2 : légèrement désagréable ZONE 3 : désagréable ZONE 4 : très désagréable
	15%	3	3	3	4	
	6%	2	2	3	4	
		1	2	3	4	
		0	50	100	250	

DEBIT SUDORAL (g/h)

Indice DISC-Sangkertadi : A partir des résultats expérimentaux du CNRS et de De Dear [réf. 34 à 36], Sangkertadi a développé une nouvelle corrélation de l'indice DISC, fonction de la mouillure cutanée et du taux de sudation en établissant des corrélations linéaires entre la sensation de confort, la mouillure cutanée et le taux de sudation [réf. 44]. Comparé aux indices PMV, SET, ECI, DISC et aux résultats expérimentaux de Deval, le nouvel indice DISC donne l'écart moyen le plus petit entre les résultats expérimentaux et ceux déterminés par calcul (l'écart moyen est égal à 0.3).

La comparaison des indices de confort en région tropicale a permis de tirer une conclusion essentielle : les indices qui rendent le mieux compte de l'inconfort ressenti en ambiance chaude sont ceux qui se réfèrent aux critères de la mouillure cutanée et du débit sudoral.

1.1.4- Echelles de sensation :

De nombreux travaux ont été effectués pour développer des échelles de sensation en référence aux différentes réponses physiologiques et sensorielles.

Ces échelles sont basées sur l'équilibre thermique entre le corps produisant de la chaleur dû à l'activité (métabolisme), les conditions d'ambiance (température de l'air, température radiante, humidité relative et vitesse de l'air) et la résistance thermique du vêtement du sujet. Le tableau 1.2 définit une échelle sémantique subjective et deux échelles numériques (PMV, Disc).

Le tableau 1.3 compare deux échelles numériques de vote de sensation (SET, TSENS).

Tableau 1.2 : Définition de quelques échelles de vote de sensation.

Auteurs	Modèle d'échelle	Définition
Mac INTYRE	Echelle sémantique subjective	- plus chaud» « je préfère - pas de changement» - plus frais »
FANGER, ASHRAE	Echelle numérique adimensionnelle (connue sous le terme PMV)	3 : très chaud 2 : chaud 1 : tiède 0 : neutre -1 : frais -2 : froid -3 : très froid
GAGGE, BERGLUND	Echelle numérique adimensionnelle pour l'ambiance chaude (connue sous le terme Disc)	0 : agréable 1 : légèrement désagréable 2 : désagréable 3 : inconfortable 4 : intolérable

Tableau 1.3 : Définition des échelles SET et TSENS [Source : réf. 45].

S.E.T.	TSENS	Niveau d'inconfort
40		Limite de tolérance
	Très chaud —————→ 4	Très inconfortable
	Chaud —————→ 3	Inconfortable
35	Tiède —————→ 2	Légèrement inconfortable
30	Légèrement tiède —→ 1	
25	Neutre —→ 0	Confortable
	Légèrement frais —→ 1	
20	Frais —————→ 2	Légèrement inconfortable
15	Froid —————→ 3	
10	Très froid —————→ 4	Inconfortable

1.2- Etat de l'art en matière de conception bioclimatique des bâtiments

L'architecture climatique suppose un développement de la connaissance climatologique, une connaissance des concepts de base à intégrer, une redéfinition des notions de confort et d'inconfort et une remise en question du rapport entre les usagers et les rythmes climatiques.

Elle vise deux objectifs essentiels [réf. 46, 47, 48] :

- le premier objectif revient à chercher une adéquation entre la conception et la construction de l'habitat, le climat du site et l'environnement dans lequel il doit être implanté. La conception est comprise ici comme la création et l'agencement des

espaces, tandis que la construction recouvre les matériaux utilisés, leurs caractéristiques physiques et leur mise en œuvre.

- le second objectif est l'adéquation entre la construction, le mode d'occupation et le comportement de l'habitant.

Ces objectifs replacent l'Homme dans l'habitat et leur prise en compte permet la création et la construction d'une architecture bioclimatique sans surcoût.

De façon générale, six concepts de base sous-tendent l'architecture climatique : capter, stocker, distribuer, conserver, protéger et dissiper.

En région chaude, ce sont les exigences de protection et de dissipation qui sont prioritaires ; en effet, la conception de l'habitat bioclimatique sous notre climat passe par le contrôle d'une part de la température d'air et des parois, et d'autre part, des vitesses d'air dans le local, principaux paramètres du confort sur lesquels il est possible d'agir.

Les résultats expérimentaux ou/et de simulation du comportement hygrothermique des bâtiments indiquent l'influence des différents facteurs climatiques et constructifs sur les performances thermiques des constructions.

1.2.1 - Développement de l'architecture climatique

Période de 1950 à 1973 :

L'analyse de l'habitat vernaculaire dans toutes les régions du globe permet d'admirer l'acuité de la perception de l'environnement par les Anciens et leur ingéniosité dans la mise en œuvre de solutions adaptées à des constructions dépourvues de climatisation ou de chauffage efficace.

Le vingtième siècle a été marqué par une perte importante de savoir-faire en matière de conception thermique des bâtiments et la prolifération de bâtiments "n'arrivant pas à la hauteur des constructions traditionnelles", tant dans les pays développés que dans ceux en développement.

Les effets conjugués d'une croissance rapide, d'une énergie bon marché, de nouveaux courants architecturaux ou urbanistiques, de l'apparition de matériaux (verre) ou de procédés constructifs utilisés trop systématiquement n'ont pas été favorables au développement de l'architecture bioclimatique.

La prise en compte de principes simples aurait pu permettre la réalisation, à confort égal, de constructions moins coûteuses.

Aussi, celles réalisées "sans le climat" n'ont-elles pas toujours contribué à améliorer le confort des occupants : les exemples de projets de bâtiments hâtivement transposés de la métropole aux colonies et inhabitables en cas de panne du système de conditionnement d'air sont nombreux.

Néanmoins, à côté de constructions parfois irrationnelles basées sur l'usage de grandes surfaces vitrées et cédant sans hésitation à la mode "High Tech", il existe des réalisations architecturales qui reprennent parfois les solutions héritées de la tradition. On peut citer dans ce cadre les travaux d'architectes célèbres tels que Walter Gropius, Marcel Breuer, Le Corbusier et Antonin Raymond [réf. 49].

Pendant la même période plusieurs travaux ont été effectués par des architectes, thermiciens et chercheurs en vue de préserver et accroître les connaissances en matière de conception thermique des bâtiments. Le contexte n'était certes pas favorable à une large diffusion de ces connaissances mais il n'a pas pour autant ralenti l'ardeur des différentes équipes comme en témoignent plusieurs publications [réf. 50 à 54].

Dans les colonies françaises, à l'instigation notamment du génie militaire, de nombreuses études ont été entreprises pour mieux appréhender l'influence des divers paramètres climatiques ou constructifs sur le confort dans les bâtiments et obtenir ainsi des niveaux de confort satisfaisants malgré la rigueur des données naturelles.

Les principales motivations de ces travaux sont la volonté de lutter contre l'effet dépressif de la chaleur et le souci d'offrir à la main d'œuvre un confort qui l'attache et lui assure un meilleur rendement.

Plusieurs manuels et guides ont été ainsi publiés au cours de cette période reflétant les progrès accomplis dans le domaine. Ces publications ont par ailleurs étayé la réalisation d'innombrables constructions dans les secteurs résidentiel (logements pour européens, habitat des économiquement faibles) et tertiaire (bâtiments administratifs, hôtels).

Période de 1974 à 1986 :

Dans les pays industrialisés, la crise pétrolière de 1973 à 1985 a favorisé le développement de l'habitat climatique ; la problématique d'un habitat construit en fonction des contraintes climatiques et susceptible de large diffusion a été étudiée : les efforts ont été canalisés dans le sens de l'identification des typologies, de la mesure précise de l'influence de divers paramètres (forme du bâtiment, caractéristiques thermophysiques des matériaux, organisation intérieure et protection des locaux) sur les performances de l'habitat.

Les travaux sur le confort, surtout le confort d'été (inertie des parois, protections solaires, ventilation), se sont intensifiés, témoignant d'une attention plus grande portée à la demande du marché. Ce développement a été suscité par de nombreux organismes publics et divers centres de recherche y ont joué un rôle de premier plan [réf. 53 à 71].

L'accroissement des connaissances et l'amélioration des techniques sur la période de 1973 à 1986 est surtout mesurable au niveau des outils de conception bioclimatique des bâtiments. Dans le cadre des travaux de Recherche Expérimentale en Coopération, René Gilles a décrit les progrès accomplis en matière de vitrage, d'isolation thermique et de modèles de calculs.

Dans les pays en développement, le concept d'habitat climatique s'est développé très lentement ; il a cependant sous-tendu de nombreuses réalisations intéressantes et a été dans plusieurs pays à l'origine de programmes ambitieux. Cette évolution a suivi en grande partie les développements des travaux des pays industrialisés dans le domaine des bâtiments économes en énergie bien que dans un premier temps ceux-ci aient eu tendance à considérer les pays en développement

plutôt comme fournisseurs d'habitats vernaculaires intéressants à étudier que comme terrain d'expression de l'habitat climatique moderne.

La fondation au plan mondial de l'Association "Passive and Low Energy Architecture" (PLEA) en 1982 a facilité la coopération entre architectes, thermiciens et professionnels du bâtiment pour la définition de programmes de travail et l'institution d'échanges internationaux visant à favoriser le renforcement et la diffusion des connaissances dans le domaine de la science, de l'art, la planification et la gestion de la conception de l'environnement bâti.

Enfin, le Premier Congrès International d'Architecture Climatique, organisé en juillet 1986 par l'Unité "Architecture et Climat" de l'Université catholique de Louvain (Belgique) a donné lieu à la présentation de l'état de la question de l'architecture et de l'urbanisme dans le monde [réf. 68]. Il s'est penché de façon particulière sur les démarches de conception architecturale et urbanistique, les outils d'aide à la conception, les audits énergétiques et la conception climatique dans les pays en développement.

La qualité des travaux et des réalisations présentés à ce congrès démontre d'une part l'intérêt que portent les nations au domaine et, d'autre part, la maîtrise définitive des outils et des méthodes nécessaires pour son application effective.

Bilan des actions REXCOOP-Habitats climatiques

Le Programme Interministériel Français de Recherche Expérimentale en Coopération (REXCOOP) a permis d'initier de nombreuses actions consacrées aux problèmes énergétiques, au développement urbain dans les pays en développement, particulièrement à l'habitat climatique [réf. 63, 70 à 73].

Dans le cadre d'actions conjointes de recherche, de réalisation et d'évaluation d'opérations, l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie et le Plan Construction ont organisé en mai 1983 une consultation sur le thème "Habitats Climatiques-Du calcul à la conception", considérée comme la première d'une série de consultations portant sur l'amélioration du confort thermique dans l'habitat économique des pays en développement, sans surcoût significatif d'investissement et de fonctionnement. Trois thèmes de recherche sont été proposés ; ce sont :

- Analyse de la notion de confort visant à sélectionner des critères communs d'appréciation
- Mise au point de méthodes simplifiées et largement diffusables d'aide à la conception climatique d'habitats économiques en climat méditerranéen, tropical humide ou tropical sec
- Etablissement d'un cahier de charges relatif au suivi thermique des programmes expérimentaux d'habitat climatique dans les pays en développement.

Les actions entreprises dans ce cadre ont donné des résultats très significatifs, surtout sur le plan de l'accroissement des connaissances (ventilation naturelle et confort thermique) et de la mise au point d'outils de simulation opérationnels.

Elles ont notamment permis :

- de réaliser des avancées sur les notions de confort thermique ou la maîtrise des phénomènes de ventilation naturelle
- de mettre au point des outils de simulation adaptés
- d'attirer l'attention d'acteurs locaux sur les problèmes de l'habitat climatique
- de jeter les bases nécessaires au lancement d'opérations exemplaires.

Dans le cadre spécifique des travaux sur les méthodes de calcul, les différentes équipes ont développé ou adapté des programmes de simulation : Casamo-Clim (Ensmc-Cerer), Oasis (Dialogic), Bilbo et Bilga (Cebtp). Ces outils opérationnels, décrits en détail dans la référence 70, ont été suffisamment validés par des mesures in situ. On mentionnera ici l'important travail réalisé par le Centre d'Etudes et de Recherches Expérimentales des Bâtiments et des Travaux Publics (Cebtp) de Saint Rémy-les-Chevreuse en France sur l'acquisition et l'exploitation de données expérimentales en Côte d'Ivoire et au Sénégal [réf. 42, 70 à 75]. Celles-ci ont servi de base pour le calage des différents modèles développés.

A l'issue de ces travaux, le Cebtp a établi une liste de recommandations relatives à la méthodologie et à la pratique du suivi thermique des bâtiments en région tropicale.

Période de 1987 à 2000 :

Les quinze dernières années ont consacré les compétences des différentes équipes de travail sur l'architecture bioclimatique en région chaude (humide, sèche ou désertique) et sur l'efficacité énergétique des bâtiments ; en témoigne la profusion des publications dans ces domaines et les différents programmes de construction de logements économiques surtout dans les pays en développement, de bâtiments efficaces au plan énergétique et des programmes de réhabilitation des bâtiments [réf. 75 à 95].

Le Onzième Congrès du Conseil International du Bâtiment sur le thème "Qualité pour les usagers des bâtiments à travers le monde" [réf. 78] a mis un accent particulier sur la nécessité de replacer les usagers au centre des recherches pour le confort dans l'habitat ; il a recommandé que soient pris en compte les exigences et les besoins des utilisateurs afin que les habitations soient conçues de façon à répondre aux conditions locales. Les experts ont montré qu'il est essentiel d'améliorer la conception des bâtiments et, à cet effet, de reformuler les critères requis pour l'amélioration conséquente des normes.

Sangkertadi a construit un code d'évaluation du comportement thermoaérodynamique des bâtiments multizones dans une structure d'accueil modulaire, le TRNSYS, basé sur la modélisation simplifiée des phénomènes de transfert dans les constructions [réf. 44] ; ce code a été validé par comparaison avec d'autres codes et des résultats de mesures in situ.

L'utilisation de ce code pour une étude spécifique sur la qualité aéraulique d'une maison indonésienne standard a permis de mettre en évidence l'évolution des vitesses d'air dans les locaux pour plusieurs configurations correspondant à différentes directions et vitesses de vent et de proposer des corrélations de coefficient de vitesse moyenne d'air. Les résultats obtenus dans le cadre du confort humain montrent qu'il est possible d'éviter l'usage de la climatisation artificielle dans les constructions en

région tropicale humide pour autant que le site est bien venté et que l'habitat est conçu de manière à profiter des atouts climatiques du lieu.

1.2.2- Travaux récents dans notre région :

Les études relatives au confort dans l'habitat dans notre région se subdivisent en trois grands groupes :

- les enquêtes sur la sensation de confort en situation réelle
- la mise au point de dispositifs technologiques pouvant favoriser de meilleures conditions d'ambiance dans l'habitat en région chaude
- l'analyse des performances des constructions en vue de recommandations pour la conception de constructions adaptée au climat.

Les travaux du troisième groupe, basés sur des outils de simulation, ont abouti à des méthodes simples permettant d'apprécier, dès le stade de projet, les conditions d'ambiances dans les locaux et le niveau de confort prévisible dans l'habitat ; en conséquence, il est donc possible d'agir sur les différents éléments des constructions pour améliorer leurs performances thermiques.

Le treizième congrès du PLEA, tenu à Louvain-la-Neuve en juillet 1996 [réf. 48, 88 à 90], a mis un accent particulier sur le caractère primordial des données climatiques du site et des besoins de confort des habitants et, par conséquent, la nécessité d'intégrer ces différents facteurs dans l'analyse des projets de construction.

Néanmoins, le niveau de mise en pratique de l'architecture climatique dans notre pays demeure très faible ; il est donc nécessaire de faire une large diffusion des principes de bioclimatisme et de vulgariser les résultats des diverses expériences dans le domaine de la conception des bâtiments en fonction des données du site.

Dans notre région, divers travaux ont été entrepris par des chercheurs de nos universités, des laboratoires spécialisés et des organisations non gouvernementales. Parmi les plus représentatifs, nous pouvons citer les résultats dus :

- au Laboratoire de Climatologie de la Faculté des Lettres, arts et Sciences Humaines, Université d'Abomey-Calavi [réf. 21 à 23, 25, 26, 28],
- au Centre d'Etudes et de Recherche sur les Energies Renouvelables (Cerer), Dakar [réf. 61],
- au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics d'Abidjan [réf. 74] et à l'Association Ivoirienne pour l'Etude et le Développement de l'Habitat Economique [réf. 95],
- aux équipes de chercheurs de nos écoles et universités [réf. 75, 96 à 101],
- au Groupe d'Etude et de Recherche Energie-Environnement pour le Développement [réf. 102]
- au Projet Régional PNUD/FEM RAF/93/G32.

En Côte d'Ivoire, les équipes du Cebtp et du Lbtp ont procédé à l'analyse du confort thermique dans l'habitat en se basant sur les divers types d'habitations

rencontrés au sud du pays. Cette analyse a permis de mettre en évidence les variantes de construction et de comportement capables d'améliorer le confort des usagers.

N'Guessan a étendu cette étude à la région du centre et du nord de la Côte d'Ivoire et analysé l'influence de différents paramètres de construction sur les performances thermiques des bâtiments et le confort dans l'habitat [réf. 71 et 75] ; il a insisté particulièrement sur l'efficacité des protections des façades et l'incidence de la taille des ouvertures sur le confort en fonction des caractéristiques climatiques du site.

Le Bulletin du LBTP "Spécial Thermique et Energétique" [réf. 74] fait état des bases conceptuelles qui ont présidé à la mise au point d'outils d'analyse adaptés aux contextes climatiques des pays tropicaux et relate les travaux expérimentaux réalisés en Côte d'Ivoire pour valider les différents modèles ; Grelat, Fauconnier et N'Guessan indiquent des solutions simples permettant d'améliorer le confort thermique dans les bâtiments [réf. 72].

Coulibaly a analysé le comportement thermique d'une cellule-test en vue de dégager les principaux facteurs d'influence des conditions d'ambiance suivant les données climatiques et les critères de confort des usagers des bâtiments [réf. 96].

Kongo a expérimenté un modèle de bardage thermique capable de minimiser le flux solaire direct reçu par les murs des constructions tout en favorisant la ventilation efficace des locaux [réf. 97].

Dans le cadre d'une étude d'amélioration du confort thermique dans les habitations en zone tropicale, Jannot et Djiako [réf. 98] ont défini les conditions acceptables pour un sujet suivant l'activité. Ils ont fait des recommandations relatives à l'architecture en insistant sur les matériaux de construction les mieux adaptés à chaque type de climat. Après analyse des limites des réponses architecturales susceptibles de favoriser l'amélioration des conditions d'ambiance pour un meilleur confort des usagers, ils ont dressé un inventaire des moyens complémentaires de refroidissement à mettre en œuvre dans certains cas tout en soulignant l'intérêt économique et écologique d'équipements simples tels que les ventilo-humidificateurs.

Kémajou a réalisé une enquête sur le confort en situation réelle dans les ambiances intérieures (logements, salle de classes et bureaux) aux fins d'analyser le comportement des bâtiments suivant les conditions climatiques et de définir les solutions de construction donnant les meilleures performances de confort pendant les mois chauds de l'année [réf. 99]. Il a constitué une base de données climatiques pour la conception bioclimatique de l'habitat dans les différentes régions du Cameroun.

Au Burkina Faso, le Groupe d'Etude et de Recherche Energie-Environnement pour le Développement (GERED) et le Development Advisory Group Aps ont initié trois séminaires-ateliers entre 1997 et 1999 sur le thème "Efficacité énergétique dans la construction". Les communications présentées à ces rencontres ont donné lieu et à la publication, sous l'égide du Ministère des Affaires Etrangères du Danemark, d'un guide de conception des bâtiments en région tropicale sèche ou humide [réf. 102].

Le Projet Régional "Réduction de gaz à effet de serre grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments en Afrique de l'Ouest", communément appelé

Projet Energie-Construction-Environnement, a finalisé en septembre 2001 la Réglementation Energétique et Thermique des Bâtiments Neufs en Côte d'Ivoire et au Sénégal avec une série de Normes de Conception Energétique et Thermique des Bâtiments et des guides d'application. Ces documents serviront de base à l'élaboration d'une réglementation régionale pour des constructions adaptées aux données climatiques des différentes régions de chaque pays d'Afrique de l'Ouest.

Adjibola a constitué une base de données climatiques dans le sens d'une approche climatique de la conception de l'habitat dans les différentes régions du Nigéria [réf. 100].

Les multiples travaux entrepris sur l'habitat climatique en Afrique Occidentale constituent une importante base de données dans les différents domaines de recherche relatifs au bâtiment. De façon particulière, l'étude du confort en région tropicale humide a montré le rôle primordial de la ventilation dans l'amélioration du confort dans l'habitat. Les travaux entrepris dans ce cadre [réf. 103 à 113] ont permis de faire des recommandations pour favoriser une vitesse d'air adéquate (au moins égale à 0.5m/s) dans le sens d'un confort agréable des usagers par accélération de l'évaporation de la sueur et le rafraîchissement de la structure de l'enveloppe des constructions.

Dans le cadre des recommandations du Projet "Energie-Construction-Environnement", il est impérieux d'étendre les études relatives à la conception de l'habitat climatique au Bénin en vue de jeter les bases de calcul pour l'élaboration d'une Réglementation adaptée aux climats spécifiques de notre pays.

A cet effet, dans le sens de la prospection des solutions de confort dans l'habitat économique dans la région Sud du Bénin, nous nous appuyerons sur les résultats des travaux précités pour dégager les lignes directrices d'une architecture bioclimatique capable de servir de guide à la conception et la construction d'un habitat adapté au climat du site.

CHAPITRE 2: DONNEES GENERALES SUR LE CLIMAT ET L'HABITAT AU BENIN

Toute réalisation architecturale concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec l'environnement auquel il appartient. L'expression de ce microcosme, en osmose avec son environnement, donne au climat une juste place parmi les dimensions fondamentales de toute intervention de l'homme sur son environnement : l'architecture ainsi définie inclut la notion de climatisme et la dynamique qu'elle contient.

LE PAIGE M., GRATIA E., DE HERDE A.
Guide d'aide à la conception bioclimatique,
Architecture et Climat. SPPC, Bruxelles 1986

2.1. Données climatologiques du Bénin

De même que la physiologie du corps humain permet de définir les conditions d'ambiance nécessaires pour le confort de l'homme, et par conséquent les caractéristiques requises pour les constructions en région chaude, l'étude de la répartition des climats et des conditions qui leur ont donné naissance révèle les voies et moyens pour pallier leurs effets par un ensemble de mesures concertées.

Plusieurs ouvrages indiquent globalement les mesures à prendre, suivant les sites géographiques, pour apporter les réponses adéquates aux contraintes climatiques par la conception d'un habitat adapté.

En climatisation naturelle, le climat reproduit à l'intérieur des locaux, à l'effet de filtrage de l'enveloppe près, le profil des conditions extérieures ; les possibilités d'action de conception dépendent des variables climatiques et des phénomènes de transfert de chaleur à travers l'enveloppe des constructions.

Les données climatiques sont donc indispensables pour la conception bioclimatique des bâtiments. Pour les besoins de la recherche, ces données sont disponibles auprès des services de la Météorologie Nationale ou d'autres organismes spécialisés.

Des travaux effectués dans le domaine ont permis de faire une classification des zones climatiques du Bénin.

Du point de vue de la conception thermique des bâtiments, on distingue trois principales zones climatiques au Bénin (voir Annexe 4):

- le sud à climat subéquatorial ou guinéen (latitude : $6^{\circ}3$ à $7^{\circ}2$),
- la zone de transition entre le sud et le nord (latitude : $7^{\circ}2$ à 9°), dont le climat présente des traits intermédiaires entre le climat guinéen et le climat soudanien (climat guinéen de transition ou guinéo-soudanien),
- le nord à climat soudanien (latitude : 9° à 12°).

Certaines régions du pays présentent des caractéristiques spécifiques sortant de ce cadre dû aux particularités du site ; ces sites requièrent donc une étude précise des données climatiques en vue d'une approche plus rationnelle des méthodes de construction.

2.1.1- Données climatologiques usuelles :

Dans les bâtiments, la sensation de confort ou d'inconfort thermique semble, à priori, être directement rattachée à la température de l'air ambiant. Néanmoins, ce paramètre ne constitue pas à lui seul une unité de confort ; en fait, c'est l'effet conjoint du rayonnement solaire, de la température ambiante, de l'humidité et de l'agitation de l'air qui détermine le confort de l'homme dans son environnement proche. Il est donc raisonnable que la conception de bâtiments adaptés au climat repose sur une analyse correcte de ces données climatiques enregistrées sur le site.

Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire global reçu par les parois de construction est la somme du rayonnement direct issu du soleil, du rayonnement diffusé par le ciel et les nuages et du rayonnement réfléchi par l'environnement. C'est par temps de ciel clair que le rayonnement sur un plan horizontal est le plus important. Pour les parois verticales, le rayonnement dépend de l'orientation et du coefficient de réflexion de l'environnement (albédo). Pour une valeur d'albédo de 0.20, le rayonnement global sur les parois verticales d'orientation Est, Ouest ou Sud est environ la moitié de celui reçu sur un plan horizontal et d'environ le tiers pour une façade orientée au Nord.

Les principales actions architecturales reposent essentiellement sur la réduction des apports solaires dans l'habitat par la conception de dispositifs de protection des ouvertures ou des parois (occultation des ouvertures, masques architecturaux).

Température extérieure :

La température extérieure conditionne l'évolution de la température dans les locaux : il n'est donc pas possible de s'isoler des conditions de température extérieure par des moyens naturels. Les principales actions possibles dans le domaine architectural visent à atténuer l'amplitude des températures et à décaler le moment d'occurrence des températures maximales atteintes dans les bâtiments.

Humidité de l'air :

Les moyens d'action naturels sur l'humidité sont très limités : c'est une variable climatique que l'on subit et sur laquelle toute action directe sans consommation d'énergie est en pratique très difficile.

L'humidité de l'air joue un rôle fondamental au niveau des échanges de chaleur cutanés par sudation et des échanges de chaleur par les voies respiratoires. Il est bien connu que l'air sec et chaud entraîne l'assèchement de la peau tandis que l'air humide et chaud se traduit par une production intense de sueur.

De toutes les façons, il est clair que le degré hygrométrique de l'air est un facteur important dans la recherche des solutions de confort humain. Néanmoins les effets d'inconfort générés par une forte humidité de l'air peuvent être atténués par la ventilation efficace des locaux.

Vent :

Dans les bâtiments, la vitesse de l'air conditionne les échanges thermoconvectifs entre l'homme et l'air ambiant d'une part, et entre l'air et les parois des locaux. Le vent constitue donc un facteur très important dans la conception de l'habitat car il affecte le confort des occupants, dirige les précipitations et modifie les échanges par convection sur l'enveloppe des constructions.

En région tropicale humide, le vent est utilisé pour le refroidissement de l'enveloppe du bâtiment et l'amélioration des conditions d'ambiance dans les locaux. Les limites d'action du vent dans l'habitat dépendent du potentiel venteux du site ; de plus les possibilités de refroidissement de l'enveloppe par ventilation sont limitées par le profil de température extérieure.

Couverture nuageuse :

La température varie également suivant la couverture nuageuse. Lorsque les journées sont claires, la température a tendance à s'élever car les radiations reçues à la surface de la terre sont plus importantes ; par contre, lorsque les nuits sont claires l'atmosphère se refroidit.

Pour les études de projets de construction, on dispose d'une série de cartes du continent africain établies en fonction de l'inconfort ressenti dans l'habitat [réf. 38, 67]. Les principaux facteurs pris en compte sont la température et l'humidité ; on sait en effet qu'une ambiance chaude et sèche est moins pénible qu'une ambiance moins chaude mais très humide ; d'où la notion de température équivalente qui permet de rassembler en une seule valeur les données de température et d'humidité.

De façon analogue, Douglas Lee a confectionné des cartes du monde classant les climats en fonction de leur "caractère tropical" [réf. 54]. La carte du monde se trouve ainsi divisée en plusieurs bandes définies chacune par la température et la tension de vapeur suivant la saison (janvier, juillet).

2.1.2. Recueil et traitement des données climatiques

Les tableaux 2-1 résument les données du climat (température moyenne, écart diurne moyen, régime des précipitations) pour une année-type dans différentes régions du Bénin : villes de Cotonou et de Bohicon dans la région sud, Savè dans la région du centre et Bimbèrèkè dans la région septentrionale.

Tableau 2.1-a : Données globales du climat pour la construction de l'habitat dans différentes régions du Bénin

	Situation géographique	Température (°C)	Ecart diurne moyen (°C)	Humidité spécifique (g/kg air sec)	Régime de vent (m/s)
Cotonou	Littoral, Longitude : 2°28 E Latitude : 6°26 N	22 à 30 °C	3 à 7.3°C	16 < H _{spec} < 21	2.8 à 5.2
Bohicon	Centre-Bénin, Longitude : 2°04 E Latitude : 7°N	22 à 32°C	5.6 à 11.9°C	10 < H _{spec} < 17	1.5 à 2.6
Savè	Centre-Bénin, Longitude : 2°26 E Latitude : 7°6 N	19 à 34°C	7.8 à 12.3°C	7 < H _{spec} < 16	0.8 à 1.7
Bimbèrèkè	Nord-Bénin, Longitude : 2°40 E Latitude : 10°12 N	19 à 36°C	8.8 à 17.3	5 < H _{spec} < 14	1.5 à 2.8

Les figures 2.1 montrent l'évolution de quelques facteurs climatiques dans les villes de Cotonou et Savè pendant les différentes saisons de l'année.

La figure 2.2-a compare les besoins de froid par climatisation dans les villes de Cotonou, Savè et Bimbèrèkè sur la base de la notion de degrés-jour.

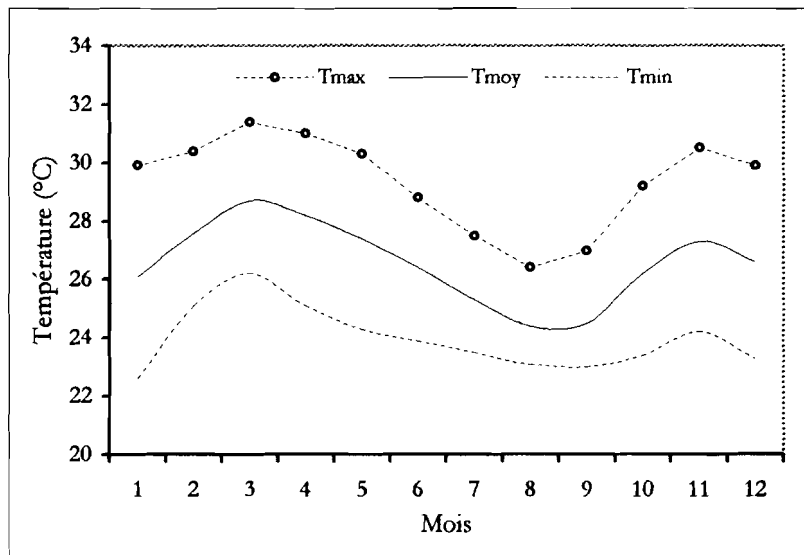


Figure 2.1-a : Température extérieure à Cotonou

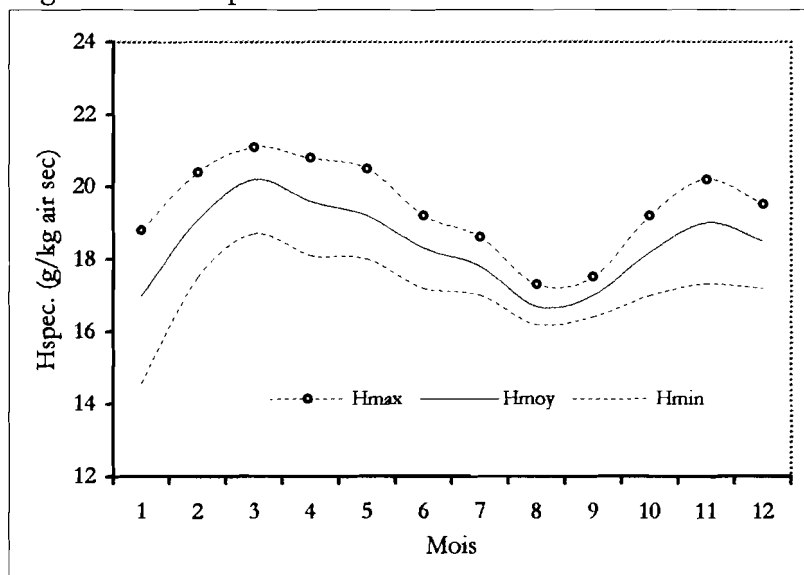


Figure 2.1-b : Humidité spécifique à Cotonou

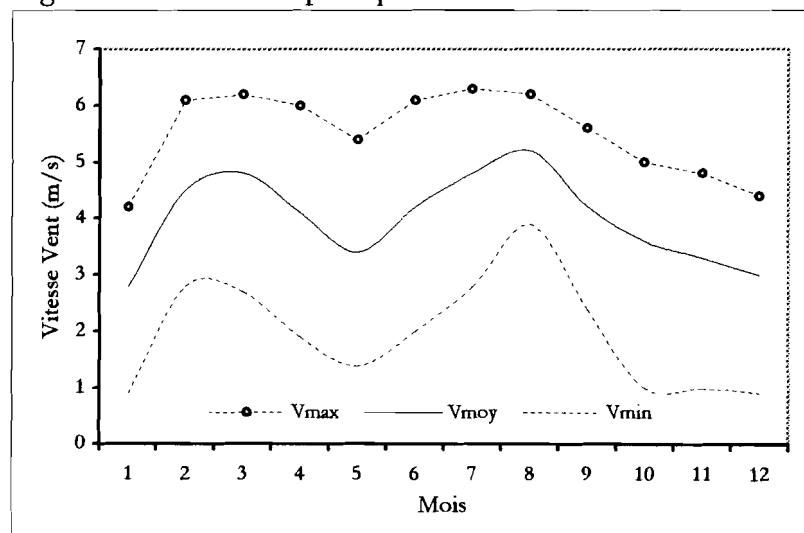


Figure 2.1-c : Vitesse de vent à Cotonou

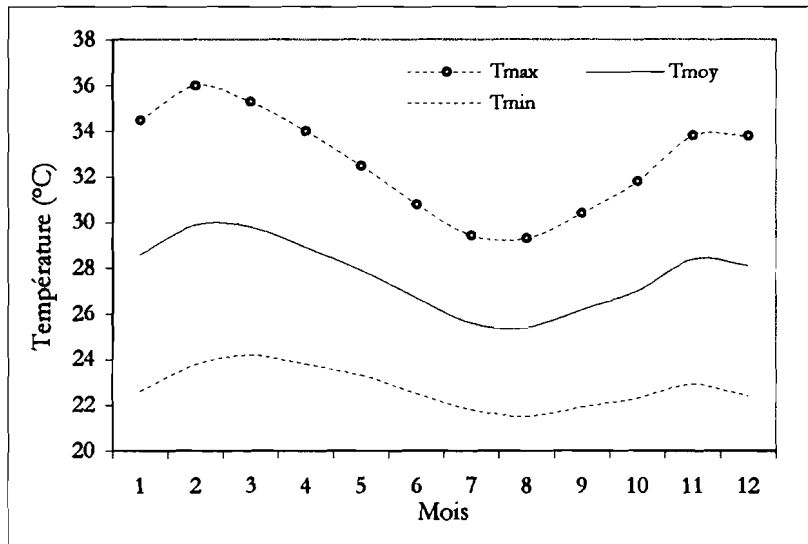


Figure 2.2-a : Température extérieure à Savè

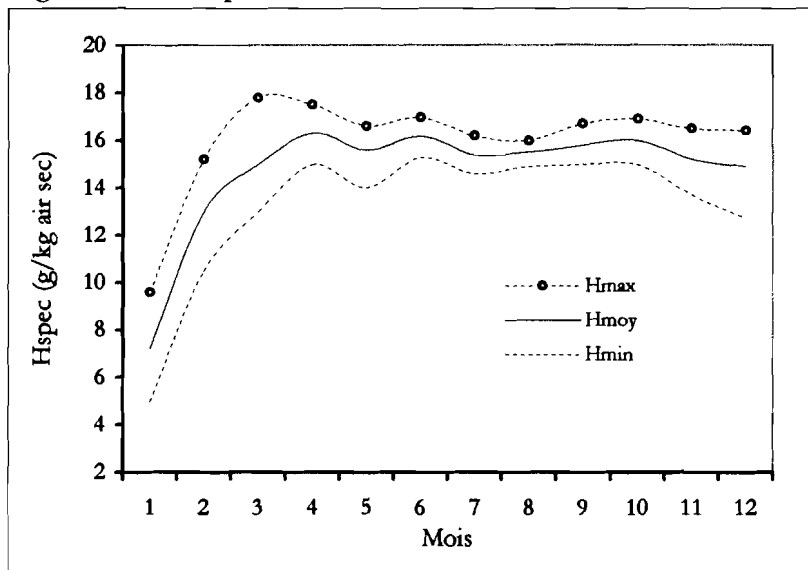


Figure 2.2-b : Humidité spécifique à Savè

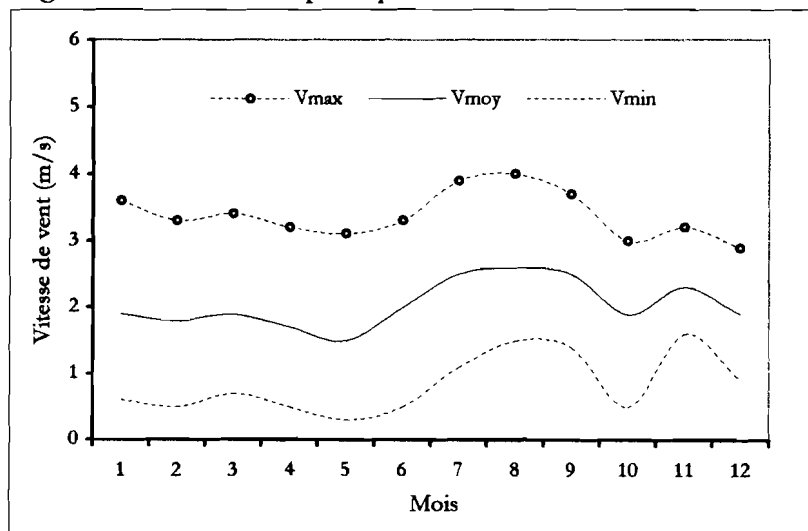


Figure 2.2-c : Vitesse de vent à Savè

Tableau 4-b : Température moyenne (°C)

Mois	Cotonou	Bohicon	Savè	Bimbèrèkè
Janvier	26,1	27,7	28,6	32,3
Février	27,6	28,8	29,9	35,6
Mars	28,7	29,3	29,8	24,5
Avril	28,2	28,3	28,9	33,8
Mai	27,4	27,5	27,9	31,7
Juin	26,4	26,1	26,7	30,7
Juillet	25,3	24,7	25,6	27,6
Août	24,4	24,2	25,4	28,6
Septembre	24,5	25	26,2	28,4
Octobre	26,2	25,7	27	30,4
Novembre	27,3	27,5	28,4	31,3
Décembre	26,6	26,3	28,1	32,3

Tableau 4-c : Ecart diurne moyen (°C)

Mois	Cotonou	Bohicon	Savè	Bimbèrèkè
Janvier	7,3	11,9	12,3	17,3
Février	5,3	10,9	12,2	15
Mars	5,2	10	11,1	12,8
Avril	5,9	8,5	10,2	12,2
Mai	6	8	9,2	11,1
Juin	4,9	7,1	8,3	9,5
Juillet	4	5,6	7,9	8,8
Août	3,3	7,4	7,8	7,5
Septembre	4	6,5	8,5	9,1
Octobre	5,8	4,5	9,5	12
Novembre	6,3	9,3	10,9	14
Décembre	6,6	9,2	11,4	16,8

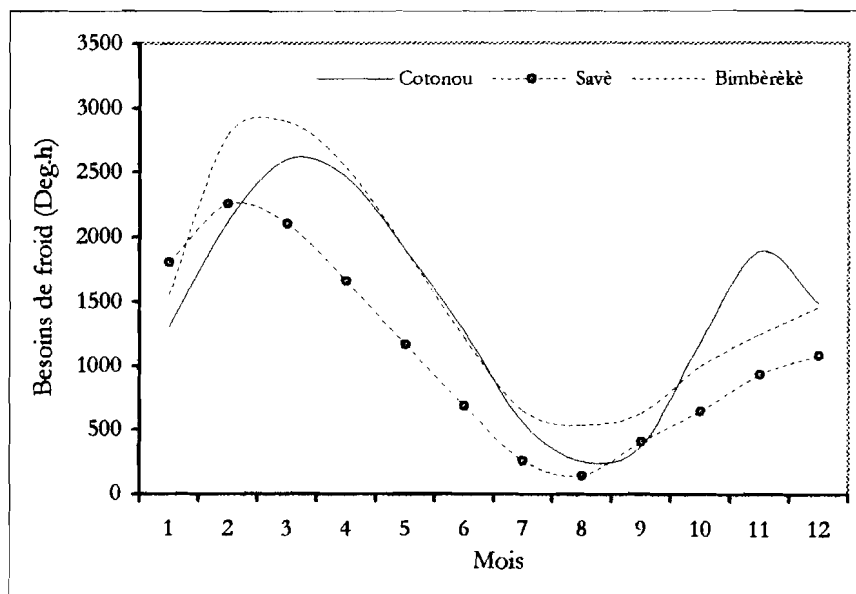


Figure 2.3-a : Besoins de froid par climatisation

Données pluviométriques :

Dans la région sud du Bénin (zone comprise entre les 6^{ème} et 9^{ème} degrés de latitude Nord), on dénombre quatre saisons par an :

- deux saisons sèches couvrant les mois de juillet-août à octobre (la petite saison sèche) et les mois de novembre-décembre à mars (la grande saison sèche)
- deux saisons pluvieuses s'étendant d'avril-mai à juillet (la grande saison pluvieuse) et d'octobre à novembre (la petite saison pluvieuse).

Le tableau 2.1-d et la figure 2.3-b rendent compte des régimes de pluie dans la région sud du Bénin.

Tableau 2.1-d : Données des précipitations au Sud-Bénin

	Bohicon	Cotonou
Janvier	3,2	12,2
Février	32	38,2
Mars	72,7	79
Avril	140,6	139
Mai	181	203,7
Juin	311	343,8
Juillet	155	149,7
Août	118	60,2
Septembre	259	103
Octobre	146	131,5
Novembre	132,5	40
Décembre	15,1	18,3

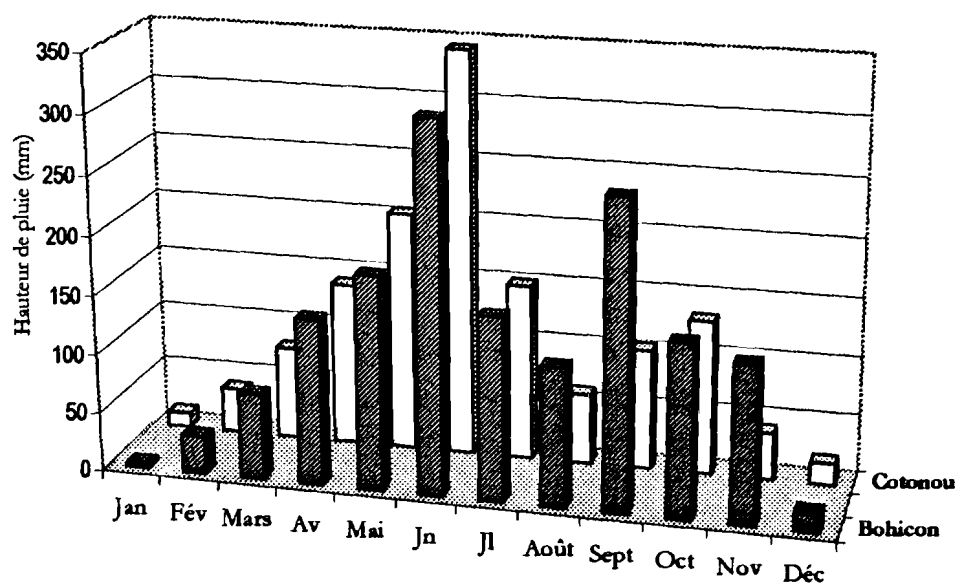


Figure 2.2-b : Régime des pluies dans la région sud du Bénin (Période de 1961 à 2000)

2.2- Outils d'interprétation des données climatologiques vis à vis de la conception des habitations

2.2.1- Le diagramme de Givoni

Les moyens d'intervention sur les effets du climat extérieur par des dispositifs architecturaux ou techniques sont illustrés par leurs zones d'influence sur le diagramme psychrométrique représenté ci-dessous :

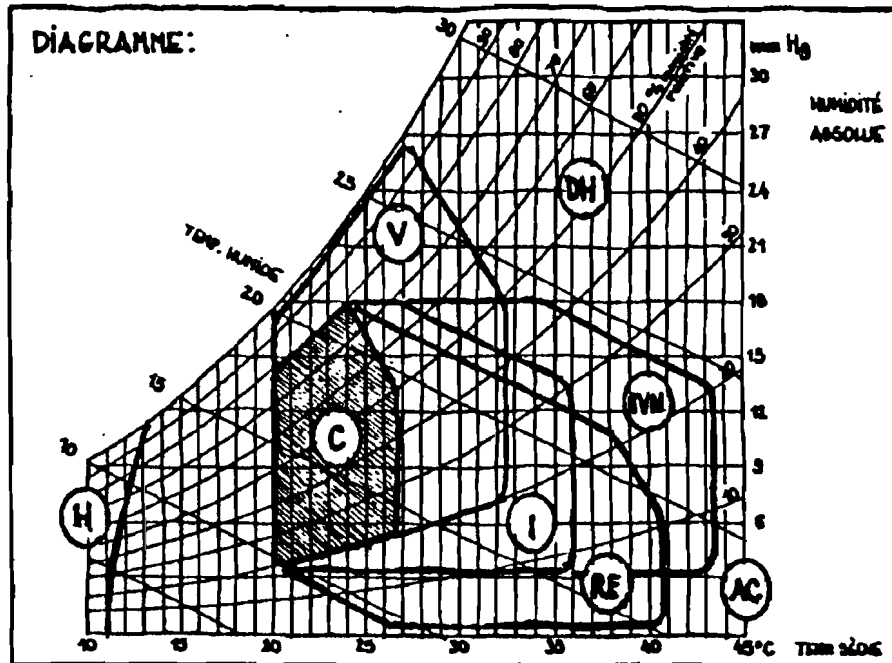


Figure 2.2.c : Diagramme bioclimatique et différentes zones d'influence des dispositifs architecturaux (Source : réf. 67)

Le diagramme comprend :

- le polygone de confort : zone C (air calme, $v < 0.1 \text{ m/s}$)
- la zone d'influence de la ventilation ou polygone de confort élargi : zone V (air circulant à une vitesse inférieure à 1.5 m/s)
- les zones d'influence des principaux dispositifs architecturaux et techniques (forte inertie thermique : I, forte inertie thermique avec ventilation nocturne : IVN, etc.)

Conditions et limites d'emploi :

Le diagramme bioclimatique est établi pour des sujets acclimatés, au repos ou engagés dans une activité sédentaire, avec une tenue vestimentaire légère. Son application se limite au cas des bâtiments non climatisés

Les valeurs extrêmes de température qu'il donne dans les zones de ventilation ou d'inertie ne peuvent être retenues que pour des bâtiments dont la protection solaire est maximale : pare-soleil efficaces vis à vis du rayonnement solaire global et/ou surfaces extérieures quasi-réfléchissantes. Ainsi les bâtiments concernés constituent

une référence à partir de laquelle on peut déduire les zones d'influence à retenir pour des bâtiments dont les protections solaires sont moins efficaces.

Utilisation du diagramme :

Le climat local est représenté mois par mois par deux points dont les coordonnées sont les moyennes mensuelles des valeurs extrêmes du couple température et humidité journalières de l'air extérieur.

En superposant le polygone de confort, le climat local ainsi représenté et les zones d'influence des divers moyens de climatisation naturelle ou artificielle, on peut lire instantanément les réponses appropriées au climat du site étudié.

Pour les niveaux d'activité et d'habillement indiqués ci-dessus, la zone de confort s'étend de 20 à 27°C en température et de 20 à 80% en humidité relative. Si les conditions extérieures sous abri (température et humidité pour une vitesse de vent nulle) sont à l'intérieur de la zone de confort, alors les conditions climatiques à l'ombre sont confortables.

En dehors de cette situation idéale, lorsque les conditions extérieures sont partiellement ou complètement en dehors de la zone de confort, il y a lieu d'envisager des dispositifs architecturaux ou techniques dont les domaines d'influence sur le confort sont indiqués sur la Figure 2.2.a :

- Zone d'influence de l'inertie des parois : Zones I et IVN

Le diagramme donne les limites climatiques extérieures qui permettent d'obtenir des conditions intérieures confortables pour un bâtiment inerte protégé efficacement contre le rayonnement solaire, avec une ventilation adaptée.

Zone I : La solution de la forte inertie sera retenue lorsque la moyenne mensuelle des températures maximales journalières est dans la zone I et que la moyenne mensuelle journalière est dans la zone de confort.

Zone IVN : Quand seules les températures minimales sont dans la zone de confort, la solution est retenue. En dehors de la ventilation nocturne, la ventilation pendant les heures chaudes ne peut être qu'artificielle (ventilateurs).

La toiture des bâtiments concernés doit être particulièrement soignée. Elle peut être légère et isolée plutôt que lourde, et protégée du rayonnement solaire. Quant à la masse thermique intérieure, on recherchera une grande surface d'échange plutôt que de fortes épaisseurs de cloisons intérieures.

Les climats concernés sont ceux à forts écarts diurnes de température, donc secs.

- Zone d'influence de la ventilation : V

C'est la zone de confort étendue à des températures et humidité plus fortes, où la sensation de confort subsiste du fait d'un plus grand rafraîchissement dû à la vitesse de l'air.

En effet, la ventilation accélère la perte de chaleur de l'organisme quand l'air n'est pas plus chaud que la température de la peau et qu'il n'est pas saturé en vapeur d'eau. Cette zone d'influence est caractéristique des climats chauds et très humides.

- Zone d'influence du refroidissement par évaporation : RE

L'humidification de l'air provoque son refroidissement jusqu'à ce qu'il soit saturé en humidité. Ce type de refroidissement concerne les climats chauds et secs, en l'occurrence les climats désertiques où l'humidité est très faible pendant une grande partie de l'année.

Dans ces régions, la technique consiste à humidifier et refroidir l'air extérieur après son passage à travers un matériau poreux maintenu humide en permanence. Il est ensuite introduit dans les locaux où il se mélange à l'air intérieur de façon à créer des conditions confortables.

- Zone de climatisation artificielle : DH, AC, H

Quand les dispositifs architecturaux et techniques simples se révèlent inefficaces pour restituer le confort dans les bâtiments, on a recours à des dispositifs de climatisation artificielle pour ramener les conditions intérieures dans le polygone de confort correspondant à la situation locale.

- Zone DH : zone de déshumidification (climats très chauds et humides)
- Zone AC : zone de refroidissement (climats très chauds et secs)
- Zone H : zone de chauffage (climat méditerranéen pendant l'hiver)

2.2.2- La méthode de Mahoney :

La méthode de Mahoney est exposée dans la référence 53 ; elle consiste à interpréter les données climatiques à l'aide d'une série de tableaux qui permettent d'aboutir à des recommandations concernant les éléments architecturaux d'un projet de construction.

Des indicateurs sont définis mois par mois par comparaison des données climatiques minimales et maximales à des limites de confort préétablies. Ces indicateurs relatifs à l'humidité et l'aridité du climat orientent vers les éléments architecturaux appropriés.

Les limites de confort adoptées par Mahoney sont fonction des données de température, d'humidité et de la période d'occupation des locaux (jour, nuit).

La méthode se rattache aux différentes étapes d'un projet :

- L'étude des projets au stade de l'esquisse
- L'élaboration du projet
- Les détails d'exécution des ouvrages.

Les phases d'esquisse et de détail d'exécution font intervenir les tableaux de Mahoney. Un exemple d'application de la méthode au Sud-Bénin est présenté aux pages 32 à 35.

La phase d'élaboration du projet présente une série de systèmes de plans types (logement individuel, semi-collectif, collectif) pour différents climats [réf. 53, 67] et traite des espaces intérieurs et extérieurs. C'est dans cette dernière partie que sont présentés les diagrammes d'activité.

La démarche consiste à remplir les Tables 1 à 4 pour obtenir les indicateurs et les reporter dans le Tableau des recommandations architecturales. Dans le cadre du diagnostic relatif au stress thermique, la Table 3 est confectionnée à partir des Tables 1 et 2 : on introduit les limites de confort diurne et nocturne en se référant au groupe hygrométrique (G.H.) correspondant ainsi à la température moyenne annuelle du site (T_{ma}).

On compare les moyennes mensuelles maximales avec les limites de confort diurne et les moyennes minimales avec les limites de confort nocturne et on porte les notations conventionnelles ci-après sur les lignes se rapportant au Stress thermique (respectivement de jour et de nuit) :

- Chiffres supérieurs à la limite du confort C (trop chaud ou torride)
- Chiffres compris entre les limites du confort - (confort)
- Chiffres inférieurs à la limite du confort F (trop froid)

Table 2.2-1 : Températures

	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
T _{max}	30.8	31.4	31.7	31.6	30.9	29.3	27.8	26.4	28.3	29.4	31	30.7
T _{min}	23.7	25.5	26.2	25.8	24.7	24	23.7	23.5	23.6	24.1	24.5	23.8
Ecart	7.1	5.9	5.5	5.8	6.2	5.3	4.1	2.9	4.7	5.3	6.5	6.9

Température moyenne annuelle : T_{moy} = 27.6°C

Ecart annuel : 8.2°C

Table 2.2-2 : Humidité, pluie, vent

- H_{moy} < 30% : G.H. = 1
- 30% < H_{moy} < 50% : G.H. = 2
- 50% < H_{moy} < 70% : G.H. = 3
- H_{moy} > 70% : G.H. = 4

	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
H _{max}	92	91.3	89.9	90.4	92.6	92.8	91.5	92.6	93.4	92.5	92.5	93.9
H _{min}	55	60.4	66.5	70	71.3	73.8	76.4	75	74.7	72	66.2	64.1
H _{moy}	73.5	75.9	78.2	80.2	82	83.3	84	83.8	84.1	82.3	79.4	78.9
G.H.	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Pluie												
Vent												

Table 2.2-3a : Limites de confort

G.H.		T _{ma} < 15°C		15°C < T _{ma} < 20°C		T _{ma} > 20°C	
Humidité	Groupe	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
0 – 30%	1	21 – 30	12 – 21	23 – 32	14 – 23	26 – 34	17 – 25
30 – 50%	2	20 – 27	12 – 20	22 – 30	14 – 22	25 – 31	17 – 24
50 – 70%	3	19 – 26	12 – 19	21 – 28	14 – 21	23 – 29	17 – 23
70 – 100%	4	18 – 24	12 – 18	20 – 25	14 – 20	22 – 27	17 – 21

Table 2.2-3b : Confort

	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
G.H.	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Températures

T _{max.}	30.8	31.4	31.7	31.6	31	29.3	28	26.4	28.3	29.4	31	30.7
Confort diurne	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
T _{min.}	23.7	25.5	26.2	25.8	24.7	24	23.7	23.5	23.6	24.1	24.5	23.8
Confort nocturne	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17

Stress thermique

Jour	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Nuit	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C

Certains symptômes relatifs au stress thermique, associés aux conditions hygrométriques (d'humidité ou de sécheresse) permettent de définir le cadre des solutions architecturales recommandables.

Table 2.2-4 : Indicateurs

	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Total
H ₁	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	11
H ₂								X					1
H ₃													0
A ₁													0
A ₂													0
A ₃													0

	Stress thermique	G.H.	Ecart diurne	Pluie
H ₁	C diurne	4		
	C diurne	2 ou 3	< 10°	
H ₂	Confort nocturne	4		
H ₃				> 200
A ₁		1 à 3	> 10°	
A ₂	Confort nocturne	1 ou 2		
	Confort diurne, nocturne	1 ou 2	> 10°	
A ₃	Froid diurne et nocturne			

H₁ : Ventilation essentielle
H₂ : Ventilation désirable
H₃ : Protection contre la pluie
A₁ : Inertie thermique
A₂ : Dormir dehors
A₃ : Problème en saison froide

TABLEAU DES RECOMMANDATIONS ARCHITECTURALES

Totaux Indicateurs (d'après la Table 2.2-4)					
HUMIDE			ARIDE		
H1	H2	H3	A1	A2	A3

1. Plan- Masse

			0-10			Bâtiments orientés suivant un axe Est-Ouest afin de diminuer l'exposition au soleil
			11 ou 12		5-12	
					0-4	Plans compacts avec cours intérieures

2. Espacement entre bâtiments

11 à 12						Grands espacements pour favoriser la pénétration du vent
2-10						Comme ci-dessus, mais avec protection contre vent chaud ou froid
0-1						Plans compacts

3. Circulation d'air

3-12						Bâtiments à simple orientation. Dispositions permettant une circulation d'air permanente
1 ou 2			0-5			
0	2-12		6-12			Bâtiments à double orientation permettant une circulation d'air permanente
	0-1					Circulation d'air inutile

4. Dimension des ouvertures

			0-1		0	Grandes : 40 à 80% des façades Nord et sud
					1-12	Moyennes : 25 à 40% de la surface des murs
			2-5			Intermédiaires : 20 à 35% de la surface des murs
			6-10			
			11 ou 12		0-3	Petites : 15 à 25% de la surface des murs
					4-12	Moyennes : 25 à 40% de la surface des murs

5. Position des ouvertures

3-12						Ouverture dans les murs Nord et Sud, à hauteur d'homme du côté exposé au vent
1 à 2			0-5			
0	2-12		6-12			Comme ci-dessus mais avec des ouvertures pratiquées dans les murs intérieurs

6. Protection des ouvertures

					0-2	Se protéger de l'ensoleillement direct
		2-12				Prévoir une protection contre la pluie

TABLEAU DES RECOMMANDATIONS ARCHITECTURALES (suite)

7. Murs et planchers

			0-2			Constructions légères : faible inertie thermique
			3-12			Construction massive : déphasage supérieur à 8h

8. Toiture

10-12			0-2			Construction légère, couverture à revêtement réfléchissant et vide d'air
			3-12			Légère et bien isolée
0-9			0-5			
			6-12			

9. Espaces extérieurs

				1-12		Emplacement pour le sommeil en plein air
		1-12				Drainage approprié des eaux de pluie
		3-12				Protection contre les pluies violentes

Les diagrammes d'activité :

Le but des diagrammes d'activité est de relier l'occupation d'un emplacement aux conditions climatiques qui prévalent à la période considérée de la journée. La connaissance de cette relation est nécessaire au moment où l'on élabore le projet pour pouvoir déterminer facilement la physionomie générale du plan, la position relative des pièces et des espaces extérieurs. Cela permet par ailleurs de déterminer aisément les spécifications à respecter pour la conception des murs, des baies, des planchers et plafonds.

Un diagramme d'activités comprend deux parties : un graphe des températures extérieures et intérieures pendant 24 heures, au-dessous duquel sont consignées les activités des membres du ménage.

Les périodes d'occupation des espaces et les limites de confort, combinées avec les informations relatives aux données de température ambiante, servent de base à la conception des bâtiments.

Dans les zones de transition, le cycle des activités journalières peut varier avec les saisons : il est donc nécessaire de dresser un diagramme par saison.

2.3- Interprétation des données vis à vis de la conception de l'habitat

Le diagramme de Givoni

Le diagramme de Givoni est un outil qui synthétise les zones thermohygro-métriques que peuvent couvrir les performances des principales options architecturales, ou les modes d'utilisation des locaux : ventilation, inertie thermique des parois, refroidissement, déshumidification. Le report des conditions climatiques du site sur le diagramme bioclimatique permet de voir la meilleure solution architecturale à mettre en œuvre.

Les figures 2.3-d et 2.3-e montrent les résultats d'interprétation des facteurs climatiques des sites de Cotonou et Bohicon vis à vis de la conception des bâtiments :

- à Cotonou, pendant les mois chauds de l'année (de novembre à avril), les valeurs moyennes de température se situent dans la zone de ventilation nécessaire, ce qui correspond bien aux caractéristiques du climat tropical humide. Les conditions extrêmes de température (valeurs maximales) indiquent qu'il est nécessaire de déshumidifier l'air.

- à Bohicon, les valeurs moyennes de température se situent dans la zone de confort et les valeurs maximales orientent vers des murs à inertie moyenne.

La méthode de Mahoney

Les différentes étapes de la méthode sont présentées en Annexe 3. Les résultats d'interprétation des données climatiques pour les villes de Cotonou et Bohicon sont répertoriés sur le tableau 2.3. Au plan de la conception de l'habitation, les tendances observées sur le site de Bohicon montrent bien que cette ville est située à la limite de la région humide (zone de transition entre la zone humide et la zone sèche).

Tableau 2.3 : Recommandations générales pour la conception des constructions adaptées au climat du Sud-Bénin

	COTONOU	BOHICON
Orientation des bâtiments	Orienter les grandes façades des constructions au Sud et au Nord	Orienter les grandes façades des constructions au Sud et au Nord
Inertie des parois	Concevoir les murs et les planchers en construction légère (faible inertie thermique)	Murs et planchers à inertie moyenne
Protection solaire	Protéger les murs et les ouvertures contre l'ensoleillement direct	Protéger les murs et les ouvertures contre l'ensoleillement direct
Toiture	Toiture légère sur comble bien ventilé	Toiture légère sur comble bien ventilé
Ouvertures, ventilation	Aménager de grandes ouvertures sur les façades principales (40 à 80% de l'aire des murs) pour favoriser une circulation d'air permanente. les constructions à une seule rangée de locaux sont recommandées.	Aménager des ouvertures de taille moyenne sur les façades principales (30 à 40% de l'aire des murs) pour favoriser une circulation d'air efficace

En nous fondant sur ces résultats, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Dans la région sud du Bénin, le stress thermique résultant de la combinaison des fortes valeurs d'humidité et de température est la principale source d'inconfort dans l'habitat en saison chaude (novembre-décembre et mars-avril).

La ventilation des locaux constitue une des principales solutions pour améliorer les conditions d'ambiance et restituer les conditions de confort thermique dans les habitations [réf. 103 à 113].

- La deuxième solution pour améliorer le confort dans les habitations est la protection des constructions contre l'ensoleillement direct (masques de protection).

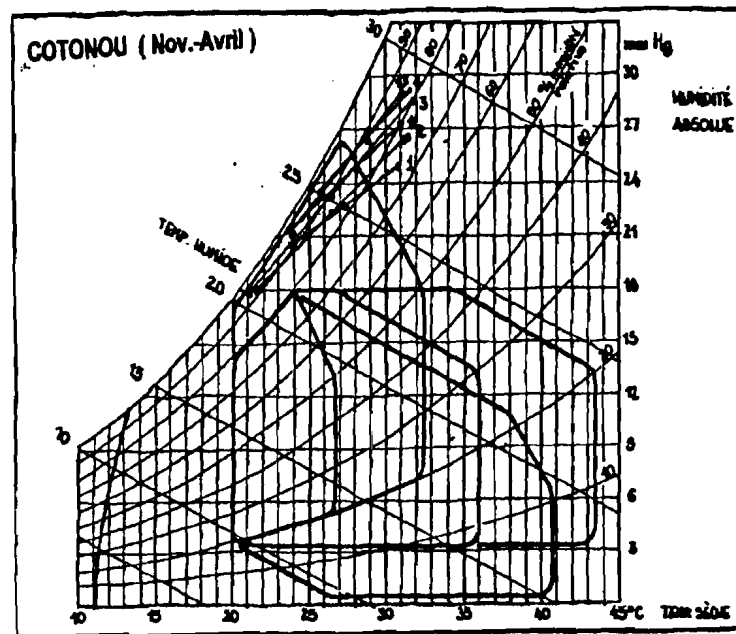


Figure 2.3-a : Interprétation des données climatiques de Cotonou

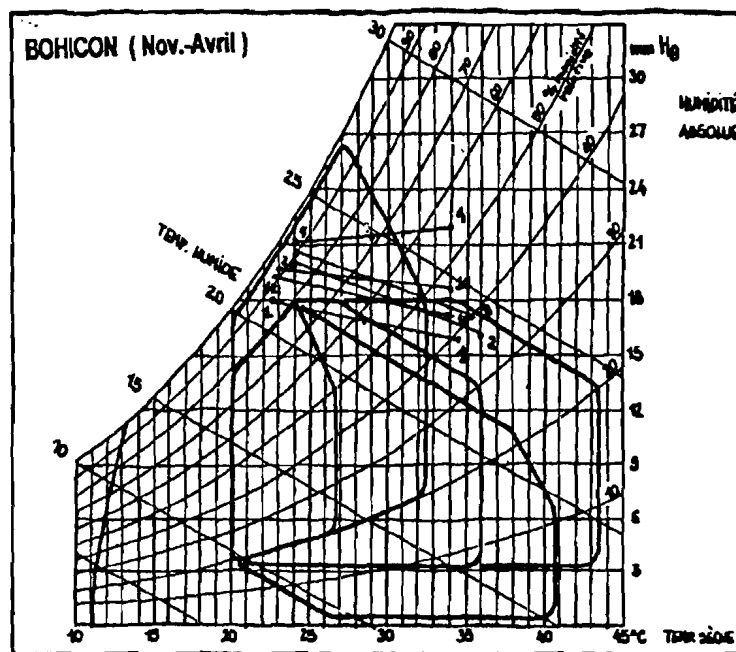


Figure 2.3-b : Interprétation des données climatiques de Bohicon

Dans la région allant de Cotonou jusqu'à la latitude de Bohicon, il est recommandable de créer des zones d'ombre sur les façades et les ouvertures, et d'assurer la ventilation permanente des locaux en saison chaude. Le régime des vents ($3.0\text{m/s} < V_{\text{moy}} < 5.0\text{m/s}$) est suffisant pour une ventilation efficace des locaux ; il convient donc d'envisager, à la phase de conception des logements, les solutions architecturales pouvant favoriser un courant d'air traversant de l'ordre de 0.5 à 1m/s dans les habitations.

2.4-Données générales sur l'habitat

2.4.1-Données statistiques

Dans le cadre du Recensement Général de la Population et de l'Habitat au Bénin, l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (Insaec) a mené une étude générale sur les ménages et l'habitat au Bénin. L'intérêt de cette étude réside dans sa contribution à la prise de décision pour une politique de logement ou d'aménagement du territoire qui intègre notamment l'utilisation des matériaux locaux de construction.

L'analyse des caractéristiques de l'habitat au niveau national est faite à travers une étude typologique qui prend en compte les formes des unités d'habitation, les matériaux de construction et l'usage (mode d'occupation).

Les types d'unités d'habitation retenus pour le milieu rural et le milieu urbain sont : la maison en bande, la maison isolée, la villa, l'immeuble, etc. Le tableau 2.4 indique la répartition des types d'habitation selon la combinaison de certains critères (nature des matériaux du toit, des murs et du sol) ; la figure 2.4 montre les classes d'habitations suivant le nombre de pièces.

2.4.2. Proposition d'une typologie de l'habitat au Bénin

Dans le cadre de l'étude et de l'amélioration du confort dans l'habitat, il est utile de comprendre le contenu réel que recouvrent ces désignations typologiques afin de déterminer les classes les plus représentatives de l'habitat.

A cet effet, en nous basant sur les travaux du Projet Plans d'Urbanisme du Bénin et des cabinets Imoteph et Planurba, nous avons retenu trois critères essentiels de classification ; ce sont : la conception architecturale des constructions, les matériaux de construction utilisés et le niveau d'équipement du logement. On distingue ainsi cinq classes d'habitations :

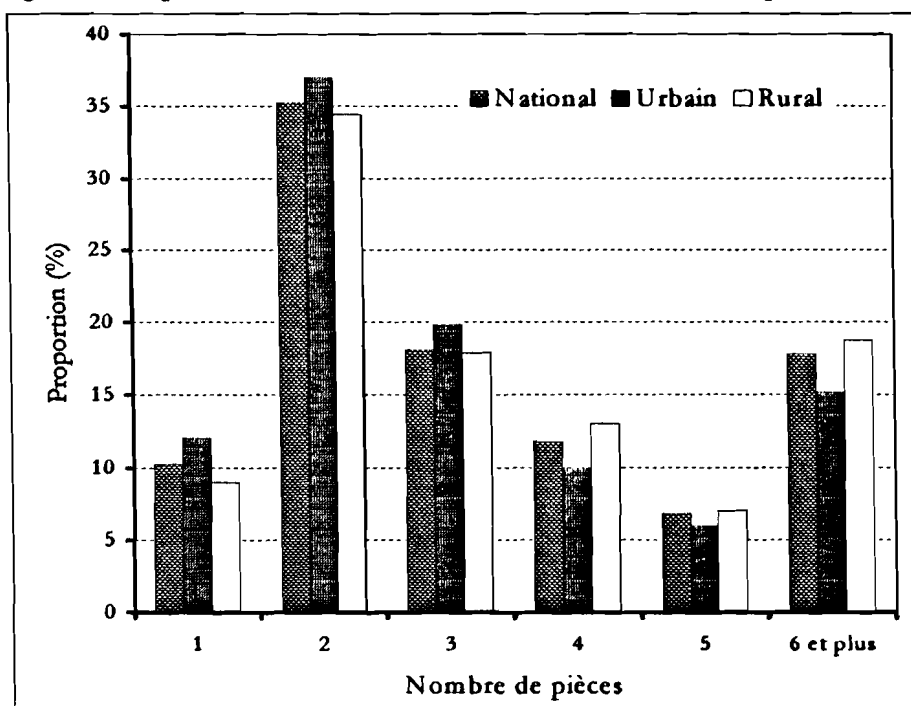
Habitat précaire

C'est le type d'habitat rencontré dans les quartiers périphériques des grandes agglomérations urbaines. Généralement construit avec des matériaux précaires ou de récupération (bois, tôle, caisse etc.), il est dépourvu de tout équipement (électricité, eau et installation sanitaire) et la légèreté de sa structure laisse penser à un logement temporaire disposé à un éventuel déguerpissement.

Tableau 2.4 : Répartition de l'habitat au Bénin suivant une combinaison de critères

Nature			Proportion (%)
Toit	Murs	Sol	
Tôle	Terre	Terre	22.8
Paille	Terre	Terre	20.6
Tôle	Brique/Pierre	Ciment	20.9
Tôle	Terre	Ciment	15.7
Autres			20

Figure 2.4 : Répartition des unités d'habitation suivant le nombre de pièces



Habitat traditionnel

Au Bénin, l'habitat traditionnel est très varié et marqué par l'empreinte ethnique [réf 109] ; il tire ses matériaux de son environnement immédiat et l'adaptation des techniques traditionnelles de construction est très significative dans toutes les régions. Dans la forme classique de l'habitat traditionnel, les matériaux couramment utilisés sont : - la terre, le bois, le bambou et le roseau pour les murs, - la paille ou les nervures de palme pour la toiture, - le bambou, le roseau et la terre pour le plafond.

De nos jours, l'influence du secteur moderne est très remarquable sur l'habitat traditionnel, particulièrement à travers la forme des bâtiments et les matériaux de construction : forme rectangulaire, dimensions plus réduites, utilisation très généralisée de la toiture en tôle et des murs en terre crépis avec du ciment (construction en semi-dur).

En milieu rural les bâtiments, regroupés en concessions, clôturées ou non selon les régions, disposent de plus en plus d'installations électriques et sont raccordés au réseau de distribution d'eau, généralement sommaire.

Habitat populaire (ou de base)

Le logement de base représente environ 65% du parc de logement urbain. Il comporte généralement plusieurs appartements alignés en barres sur une même parcelle (habitations en bande) ; ses caractéristiques générales sont :

- 1 à 3 pièces par unité de logement (souvent 4 pièces),
- les murs en matériaux définitifs (crépis ou non)
- la toiture couverte de tôle (avec parfois des locaux à toiture-terrasse).

Les douches et cuisines sont installées à l'arrière-cour de chaque appartement. Les latrines, communes à tous les habitants, sont installées généralement à l'entrée de la parcelle ou au fond de la concession. Les installations d'électricité et d'eau sont très sommaires.

Habitat économique

Le logement économique est réalisé suivant une architecture relativement simple, souvent compacte, qui intègre toutes les fonctions du logement sous le même toit.

En général, il est édifié sur des parcelles relativement petites ou moyennes et laisse très peu d'espace aux activités extérieures ; le modèle courant est implanté de manière à libérer deux petits espaces à l'avant et à l'arrière du bâtiment (cour avant et cour arrière).

En dehors des éléments de structure et ceux de couverture (tôle ou tuile) utilisés dans les logements de moyen standing, les matériaux qui rentrent dans la réalisation du logement économique sont de qualité moyenne.

Les logements économiques sont dotés d'équipements essentiels (électricité, eau, installation sanitaire) n'excédant pas le strict minimum.

Ils constituent actuellement un ensemble réduit du parc immobilier national béninois (Cité Vie Nouvelle, Cité Houéyiho 1 à Cotonou et réalisations privées dans les centres urbains ou ruraux) mais voué à s'accroître très rapidement compte tenu du taux de croissance du cadre bâti au Bénin et de la nouvelle politique de l'habitat en faveur des couches sociales moyennes.

Habitat de haut ou moyen standing

Logement individuel ou jumelé (villa, duplex, immeubles d'appartements), il est construit en dur avec des murs crépis, peints ou revêtus, une toiture en dalle (toiture terrasse) ou avec comble, recouverte de tuile ou d'onduline. Le plancher est carrelé ou traité.

C'est généralement une unité de logement de 4 à 6 pièces (ou plus dans certains cas) disposant d'une installation intérieure complète des commodités : eau courante, électricité et téléphone.

Il est conçu de façon à intégrer toutes les commodités. Les espaces du bâtiment sont généralement spécialisés : séjour commun, séjour privé, séjour pour enfants, salle à manger, bureau etc. Les locaux sont plus grands que dans les autres types de logement. La conception architecturale tient beaucoup plus compte des critères de confort et d'esthétique (ventilation ou climatisation, éclairage naturel, isolation acoustique etc.) ; les commodités sont rassemblées dans un même corps de bâtiment (garage, salles d'eau, buanderie, débarras).

Lorsqu'il est sous forme de villa, l'habitat de standing est isolé ou au plus jumelé ; il dispose d'un espace extérieur suffisant pour l'aménagement d'espaces verts.

En nous référant aux données statistiques disponibles, il ressort que les types d'habitat les plus courants au Bénin sont : la maison en bande (38.3%), la concession (31.9%) et la maison isolée (21.5%). Les unités d'habitations à 2 pièces (35.3%), à 3 pièces (18.1%), à 4 pièces (15.6%) constituent la plus grande partie de l'habitat au Bénin mais les habitations les plus répandues dans la région sud sont celles à 2 ou 3 pièces.

Au vu de ces données, notre étude du comportement thermique de l'habitat (Chapitre 4) sera basée sur l'échantillon le plus représentatif de l'habitat économique dans la région sud du Bénin : il est constitué des logements à 2, 3 ou 4 pièces.

**CHAPITRE 3 : OUTILS NUMERIQUES DE SIMULATION DU
COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DE
L'HABITAT**

Le confort des usagers et le potentiel d'économie d'énergie dans les constructions sont strictement liés aux échanges thermiques ayant lieu dans les locaux (enveloppe, ambiances) ; c'est ce qui explique l'importance qui doit être accordée à l'aspect énergétique dans la conception des bâtiments.

Pour répondre aux besoins exprimés par les professionnels du bâtiment, plusieurs équipes de recherche ont élaboré des méthodes de calculs et mis au point des outils adaptés à la nature des problèmes abordés.

Dans ce domaine, on distingue :

- les outils graphiques,
- les outils d'évaluation des charges thermiques prévisibles sur le bâtiment ; ce sont généralement des méthodes de calcul agréées ou des règles unifiées, simples à l'utilisation (DTU, Méthode Carrier, Méthode AICVF, Méthode 5000) qui permettent de dimensionner les systèmes énergétiques
- les outils de simulation bien adaptés à la recherche de solutions performantes ou à l'optimisation des solutions constructives existantes.

3.1. Méthodes de simulation. Choix du logiciel de travail

Les outils de simulation sont basés sur des méthodes de calcul plus sophistiqués et orientés vers l'analyse des performances des éléments et des équipements du bâtiment ainsi que la détermination plus fine des bilans énergétiques. Ces méthodes de calcul procèdent généralement par la résolution des équations décrivant les phénomènes physiques agissant sur l'enveloppe du bâtiment.

On les subdivise en deux grands groupes :

- les modèles lourds : ils s'appuient sur des lois élémentaires très élaborées conduisant à des schémas de calcul complexes.

Ils décrivent finement les composantes du bâtiment, les phénomènes de transfert thermique et constituent le cœur de la simulation ; ils permettent de suivre pas à pas la dynamique des échanges avec des espaces de temps variant de quelques minutes à une heure. On peut citer dans cette catégorie : Trnsys, Blast, Doe-2, Bilga, Tsbi etc.

- les modèles légers ou simplifiés : ce sont des méthodes de calcul moins complexes dérivées des modèles lourds ; elles suivent l'évolution des phénomènes thermiques dans le temps mais s'appuient sur des hypothèses plus simplifiées. Entrent dans cette catégorie les modèles Bilbo, Codyba, Casamo etc.

L'Académie des Sciences Architecturales des Etats-Unis d'Amérique met à la disposition des professionnels du bâtiment (concepteurs, chercheurs, architectes, entrepreneurs), sur Internet, une gamme variée de logiciels relevant des modèles lourds ou légers ; ce sont des outils régulièrement mis à jour par différents laboratoires à travers le monde.

Brejon a comparé les performances des logiciels d'énergétique des bâtiments [réf. 114]. Pour Bilga, la comparaison des mesures expérimentales effectuées en Côte d'Ivoire et au Sénégal [réf. 70 à 75] et des résultats de simulation, avec le concours du

Laboratoire des Bâtiments et des Travaux Publics, a permis de valider ce logiciel ; ce qui autorise son utilisation pour l'analyse des performances des constructions en région chaude.

Pour notre étude, ce modèle a été choisi pour les performances du logiciel et la disponibilité des sources d'informations sur le climat. Avec Bilga, il nous a été possible de reconstituer des fichiers complets de données compatibles avec une analyse fine de l'influence des facteurs climatiques sur le confort des usagers des constructions en région tropicale ; ce qui nous a permis d'appliquer le logiciel à la simulation du comportement thermique des constructions sur une large bande de zones climatiques (une douzaine de sites) en Afrique Occidentale et Centrale.

3.2. Description sommaire du logiciel BILGA

Le logiciel Bilga a été mis au point par le Centre d'Etudes et de Recherches Expérimentales des Travaux Publics et des Bâtiments (CEBTP) et la Fédération Nationale des Bâtiments (FNB) ; il permet de faire des simulations du comportement hygrothermique et aéraulique des bâtiments.

Il s'agit d'un modèle de type détaillé, multizone, opérationnel pour la simulation du comportement thermique de locaux et l'étude du confort sous tous les types de climats. Nous résumons ci-dessous ses principales caractéristiques :

- les données météorologiques sont issues des fichiers météorologiques disponibles ;
- la conduction dans les parois est traitée par la méthode des différences finies ;
- les échanges convectifs et radiatifs au niveau des parois sont découplés ;
- la ventilation (naturelle ou mécanique) est simulée simultanément aux échanges thermiques à partir des sollicitations extérieures (surpression et dépression engendrées par le vent sur les faces du bâtiment avec prise en compte du tirage thermique) ;
- un bilan massique est effectué, à chaque pas de temps, sur la vapeur d'eau ainsi qu'un bilan enthalpique sur l'air de chaque zone, en tenant compte des échanges d'air humide dans les locaux et avec l'extérieur, et des échanges avec les occupants ;
- il est possible de simuler les échanges d'humidité entre l'air, les parois et le mobilier avec les versions récentes de Bilga.

Le programme Bilga nécessite une description très détaillée du projet de construction et de son environnement intérieur ; la description détaillée du projet se fait en huit différentes étapes :

- les données générales ;
- les propriétés thermiques des différentes parois se trouvant dans le bâtiment ;
- les propriétés thermiques des différentes ouvertures (fenêtres, portes) ;
- les propriétés des différents ponts thermiques ;
- les ambiances ;
- description des ventilateurs et enregistrement des données complémentaires pour le système de ventilation ;
- description de l'environnement extérieur et données complémentaires pour le calcul ;
- description des masques opaques.

Les entrées du logiciel

Les entrées comportent trois ensembles de données : les données météorologiques, la caractérisation du site et la description du bâtiment.

Les données météorologiques

La simulation vise à reconstituer l'évolution réelle des ambiances au cours du temps. Elle utilise donc des données météorologiques fines, issues des fichiers météorologiques standard :

- données synoptiques trihoraires (température et humidité relative à l'extérieur, orientation et vitesse du vent, nébulosité, pression atmosphérique),
- données horaires d'ensoleillement interpolées en fonction de leur nature propre pour correspondre au pas de temps de calcul.

Les données météorologiques portent, entre autres, sur la température de l'air, la direction et la vitesse du vent, le flux solaire, l'hygrométrie, la nébulosité, etc.

La caractérisation du site

Elle porte sur la station météorologique, la période de simulation, le classement aérodynamique du site, l'albédo moyen du sol, les cotes du groupe de locaux étudiés, etc.

La description du bâtiment

Elle porte sur les propriétés thermiques des différents types de parois, d'ouvertures et de ponts thermiques rencontrés dans le bâtiment. La description des locaux englobe :

- la description paroi par paroi : type de paroi, nombre et nature des ouvertures, leurs statuts heure par heure y compris les fermetures et les protections,
- le fonctionnement thermique du local (libre évolution, chauffage, rafraîchissement),
- les scénarios horaires d'occupation, d'apport interne de chaleur, d'humidité et d'éclairage,
- la description éventuelle du système de ventilation : ventilation naturelle ou mécanique (ventilateurs, bouches d'entrée et d'extraction) et les statuts des différentes composantes,
- la description des masques des parois vis-à-vis de l'ensoleillement.

Les résultats

Compte tenu de la nature détaillée des entrées, divers types de résultats peuvent être obtenus du simulateur à partir d'un large choix d'options :

Les résultats de type énergétique

Toutes les puissances instantanées intervenant dans le bilan thermique des zones sont accessibles, en particulier les besoins ou les consommations en chaud ou en froid nécessaires aux prestations.

Les résultats de type aéraulique

Evolution des débits d'air instantanés entre zones, échanges d'air avec l'extérieur, pressions relatives dans les différentes pièces.

Les résultats de type état des zones

Evolution des températures d'air, de l'hygrométrie intérieure, de la température résultante, des températures de surfaces intérieures, points de rosée, risques de condensation.

Les résultats de type confort thermique

Indices de confort établis d'après les éléments précédents ; dans le cas du climat tropical, une vitesse d'air moyenne par pièce est estimée d'après les débits d'air calculés, et divers éléments du confort spécifiques aux ambiances chaudes (mouillure cutanée, débit sudoral, indice d'inconfort) sont établis de manière instantanée.

Les résultats de type comportement d'éléments de construction

L'évolution des températures de surface, des flux thermiques, éventuellement des températures à l'intérieur des matériaux constituant l'enveloppe peut être analysée à des fins technologiques ou pédagogiques.

3.3. Algorithmes de calcul

L'ensemble des algorithmes de Bilga a été présenté en détail dans la référence 42. Nous en rappelons ici les grandes lignes.

3.3.1. Echanges superficiels extérieurs

Les échanges de chaleur entre les parois du bâtiment et leur environnement se font par convection et rayonnement :

$$\phi_{SE} = h_c(\theta_e - \theta_s) + \phi_{CL} + \phi_{GL}$$

Les termes de rayonnement ϕ_{CL} et ϕ_{GL} sont étudiés dans les pages suivantes.

3.3.1.1. Echanges convectifs extérieurs

Le flux convectif s'exprime comme suit : $\phi_c = h_c(\theta_e - \theta_s)$.

Pour évaluer h_c , Bilga utilise une formulation issue des travaux de Sharples :

$$h_c = 1,7v + 5,1 \text{ en W/m}^2\cdot\text{K} \quad \text{avec } v = 1,8v_{ref} + 0,2 \text{ façade au vent}$$

$$v = 0,2v_{ref} + 1,7 \text{ façade sous le vent.}$$

3.3.1.2. Echanges par rayonnement Courte longueur d'onde

Le flux surfacique absorbé par une paroi quelconque est donné par la relation :

$$\phi_{CL} = \alpha \cdot I_{DFP} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

α et I_{DFP} représentent respectivement le coefficient d'absorption et le flux surfacique incident.

Les flux solaires sur un plan quelconque sont calculés à partir du flux direct sur un plan perpendiculaire aux rayons solaires, du flux sur un plan horizontal et de l'angle d'incidence.

Calcul de l'angle d'incidence :

L'angle d'incidence est l'angle formé par le rayon solaire et la normale au plan dans lequel on désire calculer le flux.

Dans un système d'axes constitué de la verticale du lieu orienté vers le ciel et de deux horizontales se dirigeant vers l'ouest et vers le sud (voir figure ci-dessous), la direction des rayons du soleil peut être définie par la connaissance des angles ν, s, w .

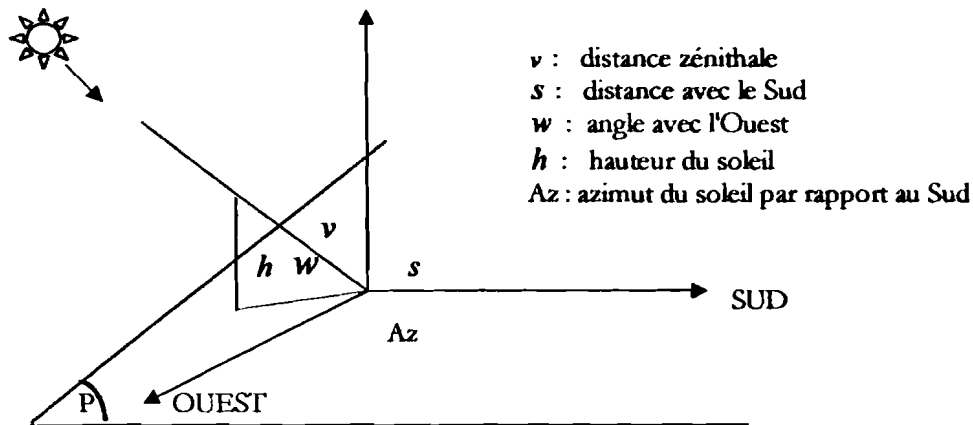


Figure 3.1 : Définition des angles servant à calculer l'angle d'incidence

$\beta = 0^\circ$: plan horizontal

$\nu = 90^\circ$: plan vertical

$\nu = 0$: plan orienté vers le Sud

$\nu = -90^\circ$: plan orienté vers l'Est

$\nu = 180^\circ$: plan orienté vers le Nord

θ : latitude, A_h : angle solaire

δ : déclinaison (angle que fait la direction du soleil avec le plan de l'équateur).

Les différents angles sont reliés entre eux par les formules suivantes :

$$\cos \nu = \sin h = \sin \theta \cdot \sin \delta + \cos \theta \cdot \cos \delta \cdot \cos A_h$$

$$\cos w = \cos \delta \sin A_h$$

$$\cos s = \cos \delta \sin \theta \left(\cos A_h - \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \theta} \right)$$

$$\cos i = \cos \nu \cdot \cos \beta + \sin \nu \cdot \sin \beta \cdot \cos w + \cos \nu \cdot \sin \beta \cdot \cos s$$

Calcul du flux direct sur un plan quelconque :

$$I_{DRP} = I_{DR} \cdot \cos i$$

I_{DR} est le flux direct incident sur un plan perpendiculaire aux rayons solaires.

Calcul du flux diffus sur un plan quelconque :

Le flux diffus reçu sur une paroi quelconque I_{DFP} provient pour une partie du flux émis par le ciel et du flux réémis par le sol par l'intermédiaire du coefficient de réflexion du sol ou albédo $\bar{\rho}$.

Il est exprimé par la relation suivante :

$$I_{DFP} = I_{DF} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{\rho} \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) (I_{DR} \cdot \cos i_s + I_{DF})$$

I_{DF} : flux diffus sur un plan horizontal

i_s étant l'angle d'incidence du soleil avec le sol ; souvent on considère le sol horizontal, ce qui implique : $\cos i_s = \cos \nu$

3.3.1.3. Echanges par rayonnement Grande longueur d'onde

Tout corps chauffé à une température T_s émet une quantité d'énergie M exprimée par la relation : $M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$

avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ (constante de Stéfán-Boltzman)

ε : émissivité de la surface.

L'environnement lointain du bâtiment émet un rayonnement de même nature M_e ; donc le flux surfacique incident ϕ_{GL} sur une paroi s'écrit :

$$\phi_{GL} = \varepsilon M_e - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

Beaucoup d'études expérimentales ont été entreprises pour la mesure de M_e et des essais de simplification ont été effectués à partir de la relation donnant ϕ_{GL} .

Dans Bilga, les échanges à la surface d'un bâtiment (sans présence de soleil) sont calculés à partir de la relation :

$$\phi_{GL} = h_{\alpha} (\theta_e - \theta_s) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{e,q}^4 - T_s^4) \text{ en } (\text{W}/\text{m}^2)$$

avec h_{α} : coefficient d'échange convectif

$T_{e,q}$ est la température équivalente (K) de l'environnement ; elle prend en compte la température du ciel et la température de la surface du sol (prise égale à celle de l'air) ; elle est calculée par la relation :

$$T_{e,q}^4 = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) T_c^4 + \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) T_s^4$$

β : inclinaison de la paroi

T_c : température du ciel (K) ; pour le calcul de T_c , on prend en compte la température de l'air, la nébulosité et la température du point de rosée

θ_s : température de surface de la paroi

h_{α} : coefficient d'échange convectif

T_s : température de l'air extérieur en (K).

En utilisant la relation approchée de la température $T^4 = 10^8 \cdot (\theta + 55)$, on peut linéariser la relation du flux :

$$\phi_{GL} = h_{ce} \cdot (\theta_e - \theta_s) + 5,68 \cdot \varepsilon \cdot (\theta_{eq} - \theta_s) ;$$

En regroupant les termes, on a :

$$\phi_{GL} = (h_{ce} + 5,68 \cdot \varepsilon) (\theta_e - \theta_s) + Q$$

avec $Q = 5,68 \cdot \varepsilon \cdot (\theta_{eq} - \theta_e)$

3.3.2. Echanges convectifs intérieurs

Les échanges sur une paroi interne se font également par convection et rayonnement ; ils sont exprimés par la formule :

$$\phi_{si} = h_i (\theta_i - \theta_s) + q_{net} + q_i \text{ en (W/m}^2\text{)}$$

$\theta_i - \theta_s$: écart de température entre l'ambiance intérieure et la surface de la paroi

q_{net} et q_i sont respectivement les flux de grande et de courte longueur d'onde absorbés ;

h_i : coefficient de convection ; il est fonction de l'inclinaison de la paroi, du sens du flux thermique et de l'écart de température.

Pour h_i , nous avons adopté les résultats des mesures faites sur les bâtiments du Cebtp ; les valeurs de h_i retenues pour les périodes chaudes sont les suivantes :

Parois verticales : $h_i = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$,

Plancher : $h_i = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$,

Plafond : $h_i = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3.3.3. Echanges dans les parois opaques planes

Soit une paroi réelle composée de n couches, chaque couche ayant des propriétés thermiques différentes mais constantes.

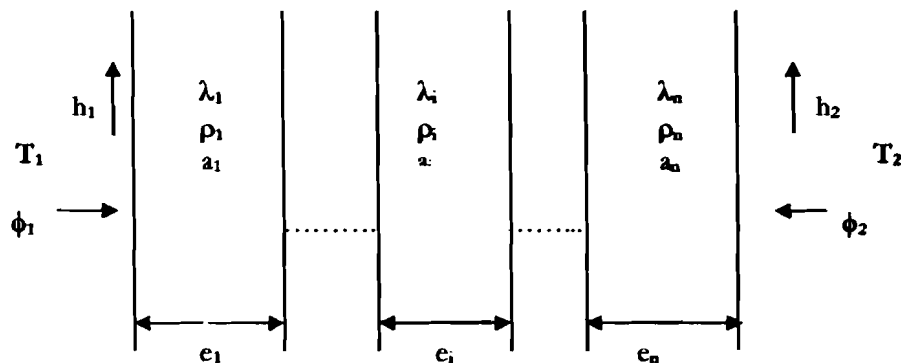


Figure 3.2 : Définition des caractéristiques d'un mur à couches multiples

Chaque couche l est discrétisée en k_l tranches d'épaisseur $\Delta x_l = \frac{e_l}{k_l}$; la première et la dernière ont une épaisseur $\frac{\Delta x_l}{2}$; il y a donc $(k_l + 1)$ nœuds dans chaque couche l . La température prise au nœud situé au milieu de chaque tranche est supposée constante dans l'épaisseur de la tranche. Dans chaque couche, le transfert de chaleur se fait par conduction ; il est régi par l'équation de Fourier : $\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = a_l \frac{\partial^2 \theta_l}{\partial x_l^2}$.

Les conditions aux limites sont :

- à la surface extérieure : $-\lambda_1 \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} = h_1 (T_1 - \theta_{x=0}) + \phi_1$

- à la surface intérieure : $-\lambda_n \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=E} = h_2 (T_2 - \theta_{x=E}) + \phi_2$

- aux intercouches : $\lambda_{l-1} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{i-1} = \lambda_l \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_i$

En développant les différents termes de ces équations, on est amené à résoudre un système de j équations à j inconnues, j étant le nombre de nœuds.

La dérivée première de la température par rapport au temps au point i est approximée

par : $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \delta_t \theta = \frac{\theta_i^{t+1} - \theta_i^t}{\Delta t}$

La dérivée seconde par rapport à l'espace au temps t' est approximée par :

- En partie courante : $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \delta_x^2 \theta = \frac{\theta_{i-1}^{t'} - 2\theta_i^{t'} + \theta_{i+1}^{t'}}{\Delta x^2}$

- En surface (en contact avec l'air à la température θ_a) :

$$\delta_x^2 \theta = 2 \left[\theta_{i+1}^{t'} + \frac{\Delta x h}{\lambda} (\theta_a - \theta_i^{t'}) - \theta_i^{t'} \right] / \Delta x^2 + \frac{2}{\Delta x} \frac{\theta_a}{\lambda}$$

- A l'interface de deux couches :

Milieu 1 : $\delta_x^2 \theta_1 = 2 [\theta_{i-1}^{t'} - \theta_i^{t'} + \Delta x_1 \delta_x \theta_1] / \Delta x_1^2$

Milieu 2 : $\delta_x^2 \theta_2 = 2 [\theta_{i+1}^{t'} - \theta_i^{t'} - \Delta x_2 \delta_x \theta_2] / \Delta x_2^2$

avec $\frac{\delta_x \theta_1}{\delta_x \theta_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; $\delta_x \theta_1 = \frac{\theta_i^{t'} - \theta_{i-1}^{t'}}{\Delta x_1}$; $a_1 \delta_x^2 \theta_1 = a_2 \delta_x^2 \theta_2$;

$$\delta_x \theta_2 = \frac{\theta_{i+1}^{t'} - \theta_i^{t'}}{\Delta x_2} ; \quad \delta_t \theta = a_2 \delta_x^2 \theta_2 .$$

On suppose : $\theta^t \leq \theta^{t'} \leq \theta^{t+1}$ et $\theta^{t'} = k\theta^t + (1-k)\theta^{t+1}$ ($0 \leq k \leq 1$).

Sous forme matricielle, le système d'équations s'écrit : $[M] \cdot [\theta] = [D]$.

$[M]$ est une matrice carrée d'ordre j (tridiagonale)

$[\theta]$ matrice colonne des températures (inconnues)

$[D]$ matrice colonne contenant les termes constants.

Il est résolu par la méthode des différences finies.

Ici, nous prenons $k = 0$; ce qui revient à résoudre le problème de la conduction de la chaleur dans la paroi par la méthode implicite.

La matrice $[M]$ est inversible. La solution du système d'équations est donnée par les éléments de la matrice $[\theta]$: $[\theta] = [M]^{-1} [D]$.

3.3.4 Calcul des échanges par rayonnement dans un local

Le local est considéré comme une enceinte complètement fermée dont les différentes surfaces sont planes, délimitées et à des températures constantes. Les coefficients d'émission et d'absorption ne varient pas avec la température et sont uniformes pour une même surface.

Les hypothèses sont les suivantes :

- les surfaces sont grises, isotropes, opaques aux rayonnements Grande Longueur d'Onde (Glo)
- les densités de flux et les températures des surfaces formant l'enceinte sont uniformes
- l'air contenu dans l'enceinte n'absorbe pas les rayonnements (milieu parfaitement transparent).

Le comportement d'une surface n'étant pas le même selon les longueurs d'onde, on distingue deux cas :

- les phénomènes de rayonnement à grandes longueurs d'onde ($\lambda < 5\mu$), la surface est alors caractérisée par son coefficient d'émission ϵ ;
- les phénomènes de rayonnement à courtes longueurs d'onde ($\lambda > 5\mu$), la surface est alors caractérisée par ses coefficients d'absorption, de transmission et de réflexion (α, τ, ρ).

Les propriétés intrinsèques des surfaces vis à vis du rayonnement ne sont pas suffisantes pour caractériser les échanges ; la géométrie du local a un rôle tout aussi important et intervient par l'intermédiaire des coefficients caractérisant la position relative des différentes surfaces : ce sont les facteurs de forme.

On peut les calculer soit par la méthode des fonctions générales d'échanges, soit par la méthode des radiosités, soit par une méthode simplifiée (employée optionnellement dans Bilga), qui consiste à répartir la puissance venant d'une surface au prorata des aires des autres surfaces.

Dans le modèle Bilga, les échanges par rayonnement sont calculés par la méthode des radiosités. Le rayonnement direct entrant est supposé tomber sur le plancher qui en absorbe une partie (variable), le reste est réfléchi et réparti au prorata de l'aire des autres surfaces qui l'absorbent totalement.

Fonction d'échange

Soient deux éléments de surface dA_i et dA_j se faisant face ; on appelle fonction d'échange entre ces deux éléments la grandeur dN_{ij} définie par :

$$dN_{ij} = \frac{dA_i \cdot dA_j \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \beta_j}{r^2}$$

β_i et β_j sont respectivement les angles que font les normales aux surfaces et l'axe passant par leurs centres.

Par intégration, cette grandeur peut être étendue à des surfaces non élémentaires S_i et S_j ; on obtient donc la fonction d'échange

$$N_{ij} = \iint_{S_i, S_j} \frac{\cos \beta_i \cdot \cos \beta_j \cdot dA_i \cdot dA_j}{r^2}$$

Par définition, la fonction d'échange est symétrique : $N_{ij} = N_{ji}$.

Facteur de forme

On définit la notion de facteur de forme à partir de la formule donnant N_{ij} . Par exemple, le facteur de forme de S_j par rapport à S_i est défini par : $F_{ji} = \frac{N_{ij}}{A_i}$ avec A_i aire de S_i .

Dans la réalité physique, le facteur de forme correspond au rapport entre l'énergie en provenance de la surface S_i et celle incidente sur la paroi S_j .

Radiosité

Soit une enceinte fermée ayant n surfaces, d'aire A_i , de température θ_{si} et d'émissivité ε_i . Si on considère la surface i ayant une température θ_{si} , la radiosité J_i s'exprime par la relation : $J_i = \rho_i q_i + \varepsilon_i \sigma T_{si}^4$ (en W/m^2) ;

q_i est le flux venant des autres surfaces

$$\sigma = 5.68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \text{ et } T_{si} = \theta_{si} + 273 \text{ K}$$

Calcul des rayonnements Grande Longueur d'Onde :

En faisant le bilan des flux sur la surface élémentaire i , il vient :

$$q_{net,i} = \phi_{GL} = \varepsilon_i q_i - \varepsilon_i \sigma T_{si}^4 \text{ (en } W/m^2)$$

On peut exprimer la radiosité par la formule :

$$J_i = \rho_i q_i + \varepsilon_i \sigma T_{si}^4 \text{ (en } W/m^2)$$

$$\text{ou } A_i J_i = (1 - \varepsilon_i) A_i q_i + A_i \varepsilon_i \sigma T_{si}^4 \text{ (en } W).$$

La somme des flux venant des autres surfaces est donnée par :

$$A_i q_i = \sum_{j=1}^N N_{ij} J_j \text{ avec } N_{ij} = A_i F_{ji} \text{ et } n \text{ le nombre de surfaces du local.}$$

En remplaçant dans l'expression donnant la radiosité, il vient :

$$A_i \cdot J_i = (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^N N_{ij} \cdot J_j + A_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma T_{si}^4 \quad (\text{en W})$$

ce qui donne : $\sum_{j=1}^N [(\varepsilon_i - 1) \cdot N_{ij} + A_i] \cdot J_j = A_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma T_{si}^4$ (en W) pour $j=1$ à n

$$\delta_{ij} = 0 \text{ pour } i \neq j \text{ et } \delta_{ii} = 1.$$

T_{si} étant connue, nous obtenons un système de n équations à n inconnues ; sous forme matricielle, on a : $[F] \cdot [J] = [D]$.

Sous forme matricielle détaillée, on a :

$$\begin{bmatrix} A_1 & (\varepsilon_1 - 1)N_{12} & \dots & \dots & (\varepsilon_1 - 1)N_{16} \\ (\varepsilon_2 - 1)N_{21} & A_2 & \dots & \dots & (\varepsilon_2 - 1)N_{26} \\ (\varepsilon_3 - 1)N_{31} & (\varepsilon_3 - 1)N_{32} & A_3 & \dots & (\varepsilon_3 - 1)N_{36} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\varepsilon_6 - 1)N_{61} & (\varepsilon_6 - 1)N_{62} & \dots & \dots & A_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ \dots \\ \dots \\ J_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma T_{s1}^4 \\ A_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma T_{s2}^4 \\ A_3 \cdot \varepsilon_3 \cdot \sigma T_{s3}^4 \\ \dots \\ \dots \\ A_6 \cdot \varepsilon_6 \cdot \sigma T_{s6}^4 \end{bmatrix}$$

La matrice F est inversible ; son inverse $[F]^{-1}$ est constante pour toute la simulation.

La solution du système est donnée par les éléments de la matrice $[J] = [F]^{-1} \cdot [D]$.

Lorsque la matrice $[J]$ est connue, il est possible de calculer le flux net $q_{net,i}$ absorbé par la paroi (positif lorsqu'il entre dans la paroi) : $q_{net,i} = \phi_{GL} = \varepsilon_i \cdot q_i - \varepsilon_i \cdot \sigma T_{si}^4$ (en W/m²) et

$$q_i = \frac{J_i - \varepsilon_i \cdot \sigma T_{si}^4}{1 - \varepsilon_i}$$

L'équation précédente devient : $q_{net,i} = \frac{\varepsilon_i}{(1 - \varepsilon_i)} J_i - \frac{\varepsilon_i^2}{(1 - \varepsilon_i)} \sigma T_{si}^4 - \frac{(1 - \varepsilon_i)}{(1 - \varepsilon_i)} \varepsilon_i \sigma T_{si}^4$

$$q_{net,i} = \frac{\varepsilon_i}{(1 - \varepsilon_i)} (J_i - \sigma T_{si}^4)$$

En pratique T_{si} dépend de $q_{net,i}$; $q_{net,i}$ est donc calculé par une méthode itérative.

3.3.5- Estimation des vitesses d'air :

Une étude fondamentale pour l'étude du confort est celui du bilan thermique de l'organisme humain dans ses échanges avec son environnement.

Dans un local, l'organisme humain est le siège d'une production de chaleur, dissipée vers l'environnement par convection, rayonnement et évaporation (voir Méthode d'évaluation du confort humain en Annexe 1).

Or les échanges par convection et évaporation sont liés à la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu dans le local : la vitesse moyenne d'air dans la zone centrale d'une pièce constitue donc un paramètre important dans l'évaluation du confort thermique des habitants d'un logement, particulièrement en climat tropical humide

La méthode présentée ici consiste à établir, à partir des résultats expérimentaux, des corrélations entre les vitesses d'air moyennes et les débits traversant les différentes pièces d'un bâtiment.

De l'ensemble des résultats proposés par le Centre Scientifique et Technique des Bâtiments, il a été retenu principalement une série de formules concernant les effets relatifs aux perméabilités des façades au vent et sous le vent, pour un axe aérodynamique perpendiculaire à celles-ci. Ces résultats concernent la vitesse d'air moyenne à l'intérieur d'une pièce, rapportée à la vitesse moyenne du vent, référence prise à la hauteur de la toiture :

$$C_{\bar{u}} = \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}}$$

La perméabilité d'une façade se définit comme le rapport de la surface des ouvertures béantes à celle de la façade.

Soient p_1 la perméabilité de la façade au vent

p_2 la perméabilité de la façade sous le vent

p_3 et p_4 celles des deux autres façades

Q est le débit d'air calculé et S la section transversale de la pièce offerte au débit traversant ;

les relations exprimant \bar{u} et Q en fonction des perméabilités sont :

$$\bar{u} = 1.55 \frac{p_1 p_2}{p_1 + 0.058 p_2} \bar{u}_{ref} ; \quad Q = 0.83 \frac{p_1 p_2}{p_1 + p_2} S \bar{u}_{ref}$$

Pour l'intégration au modèle Bilga, on généralise les relations pour les échanges d'air entre les locaux en posant $p_1 = \frac{\sum_i p_i S_i}{S}$; $p_2 = \frac{\sum_j p_j S_j}{S}$

p_i et p_j sont respectivement les perméabilités relatives offertes au débit entrant et sortant, S est la surface de la coupe transversale de la pièce traversée par le débit. La vitesse est donnée en fonction du débit d'air Q (m^3/s) par la relation :

$$\bar{u} = 1.9 \frac{Q}{S} \frac{p_1 \cdot p_2}{p_1 + 0.058 p_2} \quad (\text{en m/s})$$

Cette méthode simplifiée donne une valeur acceptable de la vitesse moyenne d'air au centre d'un local.

Remarque : Pour un calcul plus précis de la vitesse d'air en un point d'un logement de configuration donnée, dans des conditions connues de température et d'exposition, on se réfère aux équations de Mécanique des fluides de type tridimensionnel mettant en jeu une description détaillée du logement, des équations plus complexes et de résolution plus laborieuse.

**CHAPITRE 4 : ETUDE PARAMETRIQUE DU COMPORTEMENT
THERMIQUE DU BÂTIMENT AU SUD-BENIN**

4.1- Problématique du confort thermique dans les habitations

Parmi les préoccupations majeures en matière de conception de l'habitat en région tropicale, celles relatives aux conditions d'ambiance intérieures occupent une place prépondérante en raison des contraintes climatiques en période chaude : il est impératif de concevoir les constructions de façon à maintenir les locaux dans des conditions de confort sans recourir nécessairement au conditionnement artificiel (climatisation).

Particulièrement, dans les logements de type économique, il n'est pas envisageable de remédier aux déficiences de qualité thermique des bâtiments par des moyens sophistiqués et consommateurs d'énergie.

Les performances de l'habitat traditionnel donnent une image saisissante et vivante des qualités atteintes dans les bâtiments anciens. Il est donc nécessaire, pour les architectes et autres professionnels du bâtiment, de produire un habitat qui, tout en profitant du progrès technologique au niveau constructif, maintient des conditions d'ambiance compatibles avec le climat.

En nous intéressant au secteur du bâtiment neuf, il est facile de dégager un certain nombre de pratiques architecturales et constructives représentatives de la production du milieu bâti. On peut donc en déduire les composantes d'une architecture propre, dans le cadre du développement dans les domaines du savoir-faire et des matériaux disponibles (richesse propre de la région, matériaux importés), qui concilie les conditions d'ambiance dans les maisons d'habitation avec les données du climat et les besoins de confort des usagers : l'architecture bioclimatique.

L'objectif visé est d'optimiser les éléments de l'enveloppe du bâtiment et de faire des recommandations susceptibles de favoriser l'amélioration des conditions d'ambiance et la réduction de l'inconfort dans les locaux en région tropicale humide (région sud du Bénin) sans recourir au système de conditionnement d'air.

4.2- Méthodologie de l'étude :

En nous basant sur l'échantillon le plus représentatif des pratiques de construction dans la région sud du Bénin, nous avons choisi quatre modèles d'habitations susceptibles, par leur relative simplicité, de donner lieu à la généralisation des résultats des études paramétriques du comportement hygrothermique de l'habitat.

L'analyse de l'influence des paramètres essentiels a permis d'établir progressivement des solutions d'amélioration des conditions d'ambiance et du confort ressenti dans l'habitat, surtout pendant les périodes les plus inconfortables de l'année, et de faire des recommandations à l'intention des professionnels du bâtiment pour la conception d'un habitat adapté au climat.

Pour arriver à ces fins, nous avons procédé à la simulation thermique de quelques types de constructions à l'aide de logiciels élaborés. Deux outils d'aide à la conception nous ont paru les plus adaptés pour cette étude :

- Bilga pour l'analyse du comportement thermique des constructions
- Doe 2 pour l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments.

En appliquant ces logiciels à l'étude du comportement dynamique de l'habitat, nous avons comparé les performances thermiques de différentes variantes de constructions et fait des recommandations appropriées pour la construction d'un habitat adapté aux caractéristiques climatiques de la région.

4.3- Prise en compte du climat et réponses architecturales

4.3.1- Eléments du bilan thermique d'un local

Nous prendrons comme point de départ de notre étude un local d'habitation, schématiquement décrit par la figure 4.1. Le bilan thermique du local consiste à l'inventaire des échanges énergétiques pendant une période comportant des heures chaudes et fraîches par alternance.

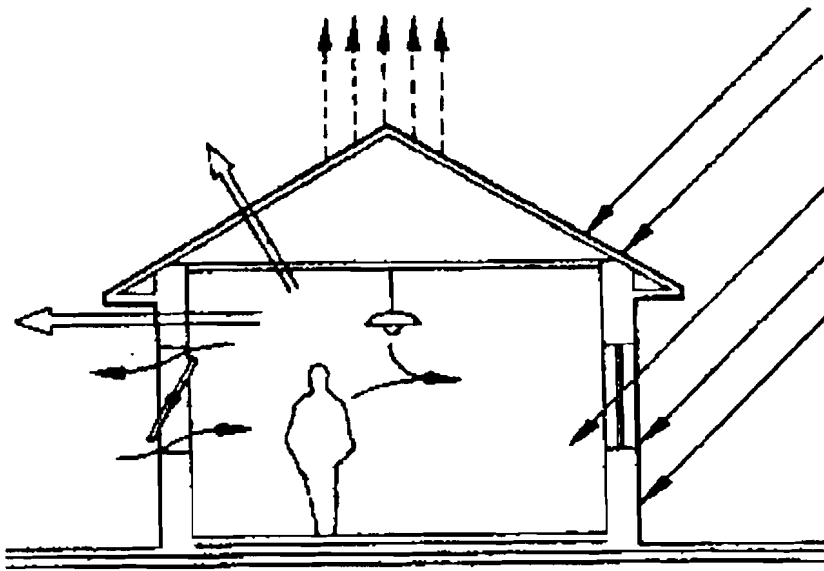


Figure 4.1: Echanges thermiques dans un local (Source : Réf. 115).

Gains de chaleur: Aux heures chaudes de la journée, l'identification des énergies mises en jeu englobe l'ensoleillement pénétrant par les ouvertures et à travers les parois vitrées, la chaleur transmise à travers les parois, la chaleur dégagée par les équipements (éclairage, appareils ménagers etc.) et celle dégagée par les occupants, variable suivant leur nombre.

Les mécanismes mis en jeu sont les suivants :

- les échanges de chaleur par convection entre l'air extérieur et les parois extérieures et par rayonnement entre ces parois et les surfaces avoisinantes
- les échanges de chaleur par conduction au sein des parois (à travers les divers matériaux qui les constituent)
- les échanges de chaleur par convection entre l'air intérieur et les parois et par rayonnement entre les différentes parois du local
- les pertes de chaleur par ventilation
- les pertes par infiltration.

Le rayonnement solaire est d'abord absorbé à la surface extérieure des parois ; les températures superficielles s'élèvent et il se produit un échange de chaleur par conduction dans la masse du matériau, par convection avec l'air et par rayonnement grande longueur d'onde avec les surfaces environnantes.

Les parois opaques ont une capacité calorifique non négligeable : une grande partie des gains instantanés se trouve emmagasinée dans les murs et restituée à l'air du local par convection après un certain temps ; ce temps (déphasage) et l'amortissement de chaleur sont d'autant plus importants que l'inertie thermique de la paroi est plus grande. Cette notion d'inertie thermique des parois fournit un élément d'interaction entre l'enveloppe d'un bâtiment et le climat extérieur.

Pertes de chaleur : Aux heures fraîches de la journée, le local étant plus chaud que l'environnement extérieur il se produit un transfert de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur à travers l'enveloppe du bâtiment.

Au total, la température résultante T_{res} dans le local, significative du confort thermique est la moyenne arithmétique de la température d'air T_{ai} et la température radiante moyenne des parois T_{rm} ; on peut la calculer par les relations suivantes :

$$T_{res} = \frac{1}{2}(T_{ai} + T_{rm})$$

$$T_{rm} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{pi} \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

T_{pi} et A_i sont respectivement la température et la surface de la paroi i .

4.3.2- Facteurs de contrôle des conditions d'ambiance dans l'habitat

En région chaude, la température intérieure d'un bâtiment non climatisé évolue librement suivant les conditions de température extérieure. Elle dépend d'un ensemble de facteurs liés à l'architecture (apports solaires) et à l'occupation du bâtiment (apports internes).

En région tropicale, les apports solaires constituent la principale source de chaleur dans l'habitat et, par conséquent, le facteur prépondérant à prendre en compte dans le cadre du bilan thermique des locaux.

Néanmoins, les apports de chaleur directement produits à l'intérieur des locaux doivent aussi être pris en compte. Inévitables une fois que les locaux sont occupés, ils proviennent des occupants (métabolisme), de l'éclairage et des appareils électriques, de la cuisson des aliments et de l'utilisation d'eau chaude (apports internes) ; on retient généralement pour l'ensemble de ces apports une valeur moyenne de 90 Wh par jour et par mètre carré de surface habitable : cette valeur correspond à une élévation moyenne de température de l'ordre de 1°C si le bâtiment est peu ventilé, inférieure à 0.5°C s'il est bien ventilé [réf 48].

Ces apports ayant lieu principalement aux heures de repas ou en soirée, les augmentations instantanées peuvent être élevées pendant ces périodes. Ils constituent un facteur de dégradation des conditions d'ambiance et du confort dans les bâtiments.

Les lois physiques qui régissent l'évolution de la température intérieure des locaux sont très complexes. Plusieurs équipes de chercheurs [réf 17] en donnent une expression simplifiée qui a le mérite de tenir compte des divers facteurs d'influence pour être assez représentative des phénomènes de transfert de chaleur dans les locaux.

En première approximation, la température intérieure T_{int} dans un local non climatisé est la résultante de la température moyenne extérieure ($T_{\text{e,moy}}$), la variation diurne de la température intérieure autour de la valeur moyenne (ΔT_i) et le supplément moyen de température intérieure dû aux apports solaires et internes ($T_{\text{a,i}}$) :

- la température moyenne extérieure ($T_{\text{e,moy}}$) est une caractéristique du site ; elle est fournie par les Services de la Météorologie ;

- la variation diurne de la température intérieure (ΔT_i) est liée aux variations de la température extérieure (ΔT_{ext}) et dépend essentiellement de l'inertie thermique utile du local, des apports solaires et du niveau de ventilation du local : plus l'inertie du local est forte, plus l'amplitude de la température extérieure est amortie ; il en résulte une faible température intérieure.

Par ailleurs, les apports solaires contribuent à relever sélectivement la température intérieure pendant la journée ; cette augmentation est d'autant plus marquée que l'inertie thermique est faible ; nous pouvons donc dire, à priori, que la température résultante dans un local et ses variations diurnes sont d'autant plus élevées le jour que les apports solaires sont intenses et l'inertie thermique du local faible ;

- les sources internes de chaleur favorisent l'échauffement de l'ambiance intérieure ; ce phénomène dépend de la puissance des sources de chaleur et des déperditions dont le bâtiment est le siège.

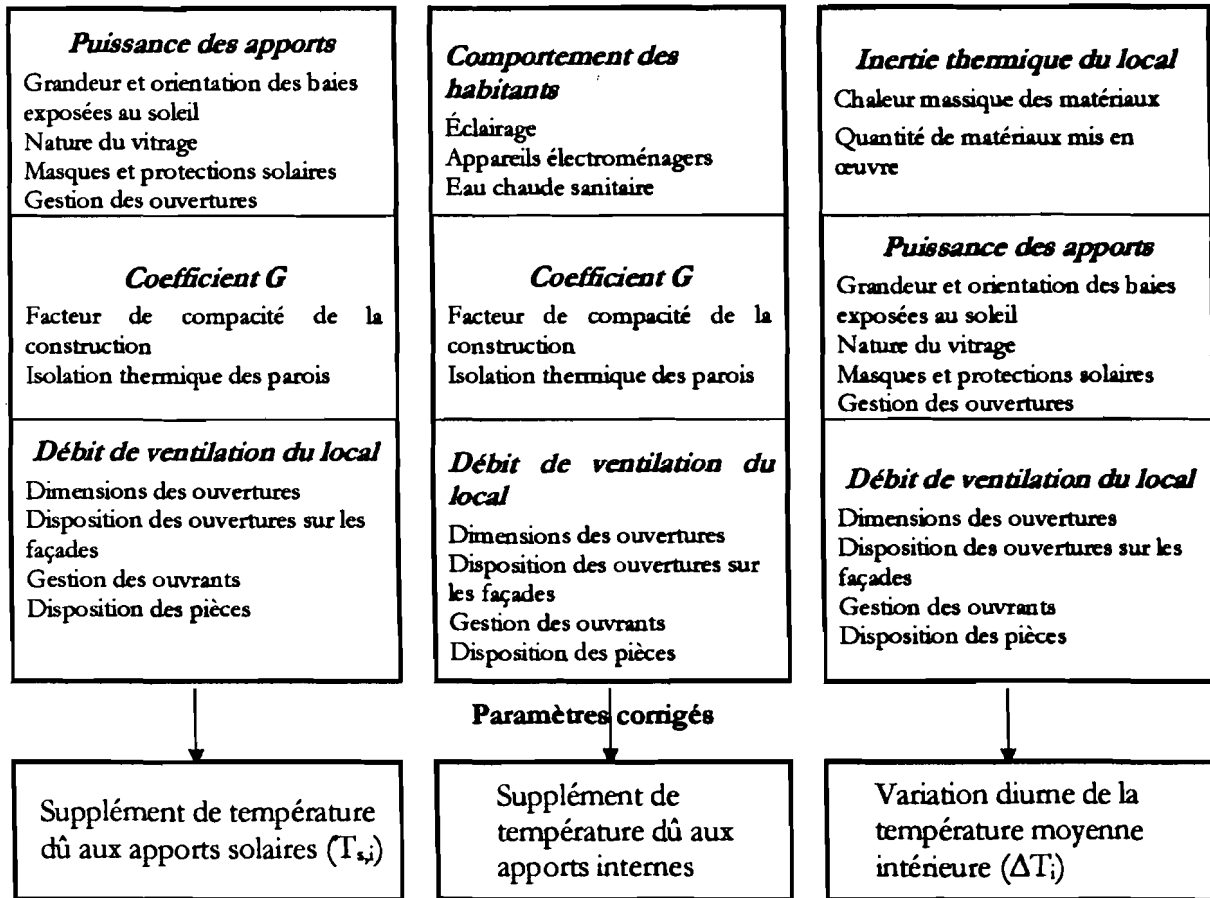
En somme, la variation des conditions d'ambiance dans l'habitat croît avec la puissance des apports solaires et internes ; elle est inversement proportionnelle au taux de ventilation des locaux et des déperditions à travers l'enveloppe du bâtiment.

Le tableau 4.1 indique les principaux facteurs de contrôle des conditions d'ambiance dans un local ; on peut en déduire les dispositifs adéquats pour atténuer les effets des sources d'inconfort : les efforts pour maintenir la température résultante à une valeur proche de celle de la température moyenne extérieure doivent viser à contrôler les apports solaires, à réduire les apports internes et à augmenter le taux de ventilation des locaux aux heures où la température extérieure est plus basse que celle à l'intérieur.

Pour maintenir l'amplitude de la température dans certaines limites, on s'intéressera donc au système de construction et aux caractéristiques physiques des matériaux utilisés.

Tableau 4.1 : Identification des principaux facteurs et dispositifs de contrôle des conditions d'ambiance dans un local

Facteurs et dispositifs d'amélioration des conditions d'ambiance



4.3.3- Stratégies architecturales

La complexité du problème de la conception thermique du bâtiment peut être contournée en le traduisant sous forme de principes généraux ; ceux-ci n'ont pas pour but d'élaborer un modèle unique pour chaque zone climatique mais ils visent à doter le concepteur de moyens permettant de valoriser les atouts du site en vue de proposer des constructions favorisant le confort thermique des usagers.

La conception des bâtiments adaptés au climat d'un site consiste à contrôler autant que possible les flux de chaleur échangés et stockés par l'enveloppe, c'est-à-dire :

- gérer les échanges thermiques avec les sources naturelles (soleil, ciel),
- gérer l'énergie interne de l'enveloppe et du bâtiment (apports calorifiques).

Suivant la nature et le sens des échanges de chaleur du bâtiment avec les sources naturelles, on déduit les deux principes bioclimatiques suivants en pays chauds : limiter les gains de chaleur et favoriser les pertes thermiques.

L'intensité des échanges avec les sources naturelles variant suivant les caractéristiques du climat, les différences climatiques nécessitent des réponses architecturales spécifiques pour chaque zone.

Dans ce cadre, deux stratégies fondamentalement différentes sont mises en jeu :

- En région tropicale humide, le climat plutôt clément incite à rechercher des conditions d'ambiance proches de celles de l'extérieur. Ici, l'objectif d'une architecture adaptée est de reproduire dans les locaux des conditions semblables à celles régnant à l'extérieur, à l'ombre sous une brise légère. Cette stratégie, exprimée en choix architecturaux, confirme les options "protection solaire", "parois légères" et "ventilation permanente des locaux" ;

- En région tropicale sèche, les excès climatiques (pointes de température très élevées) rendent les conditions extérieures inconfortables le jour. Ici, l'objectif d'une architecture adaptée est de créer un microclimat intérieur plus confortable, découplé des conditions extérieures. Dans ce cadre, le rôle de l'inertie thermique devient fondamental, de même qu'une protection solaire poussée (ouvertures réduites). De grandes surfaces rayonnantes et une ventilation nocturne adéquate favorisent les meilleures conditions d'ambiance aux heures chaudes de la journée.

Le tableau 4.2 indique les dispositions architecturales à mettre en œuvre pour des constructions adaptées au climat en région tropicale.

Tableau 4.2: Stratégies architecturales pour les constructions en région chaude

Facteurs	Climat tropical humide	Climat tropical sec
1. Ensoleillement	Protection solaire : masques horizontaux sur la façade Sud (ou Nord suivant la position par rapport à l'Equateur) ; dispositifs spéciaux pour les façades Est et Ouest	Protection solaire : masques horizontaux sur la façade Sud (ou Nord suivant la position par rapport à l'Equateur) ; dispositifs spéciaux pour les façades Est et Ouest
2. Niveau de température	Rapprocher les conditions à l'intérieur des locaux de celles prévalant à l'extérieur	Niveau de température élevé ⇒ nécessité de créer un microclimat intérieur découplé des conditions ambiantes extérieures
3. Amplitude diurne	Faible amplitude thermique jour/nuit ⇒ construction légère	Forte amplitude thermique jour/nuit ⇒ construction lourde
4. Humidité	Développer la ventilation transversale efficace des locaux	Possibilité de climatisation par évaporation
5. Ventilation	Ventilation permanente	Ventilation nocturne

4.4. Etude paramétrique du comportement thermique de l'habitat

Nous étudions ici l'influence de quelques paramètres architecturaux sur le confort des usagers des constructions de type économique sur le site de Cotonou et ses environs (région tropicale humide).

4.4.1- Données du bâtiment et hypothèses de base

Un module d'habitation courant à deux (2) pièces a servi de base à notre étude. Il est supposé construit sur terre-plein avec ses grandes façades orientées au Nord et au Sud (voir Plan n° 1-a). Les murs sont généralement construits en parpaing de sable-ciment de 12 cm d'épaisseur ; cependant, nous testerons d'autres types de parois pour déterminer les plus performantes dans la région de notre étude. Les ouvertures sont disposées sur les façades principales. Le choix des caractéristiques des ouvrants reste conforme avec les produits disponibles sur place et utilisés dans l'habitat économique.

Dans le cas de base, les dimensions et la nature des ouvrants sont : Portes en bois (la partie haute porte des persiennes) : 2.05m × 1.00m ; fenêtres en vitrage simple à lamelles orientables : 1.00m × 0.90m. La perméabilité des portes et fenêtres en position fermée est estimée à 17%.

Conditions climatiques :

La construction est supposée implantée dans la banlieue de Cotonou. Par rapport aux données de vent, le site retenu est estimé de type 4 (zone urbaine) avec des constructions identiques dans le voisinage. Cette hypothèse permet de définir les caractéristiques du vent (vitesse moyenne et fluctuation) sur le site en vue d'estimer les vitesses d'air probables dans les locaux au cours de la journée.

La période météorologique de référence choisie est caractéristique des périodes d'inconfort maximum sur le site (Figure 3-a). Les journées présentent les mêmes caractéristiques : temps légèrement couvert, température ambiante et humidité spécifique élevées (respectivement $26^{\circ}\text{C} < T_{\text{ext}} < 31.5^{\circ}\text{C}$ et $H_{\text{spéc}} \approx 20 \text{ g/kg air sec}$), force de vent modérée ($V_{\text{moy}} \approx 5\text{m/s}$).

Occupation du bâtiment et gestion des ouvertures :

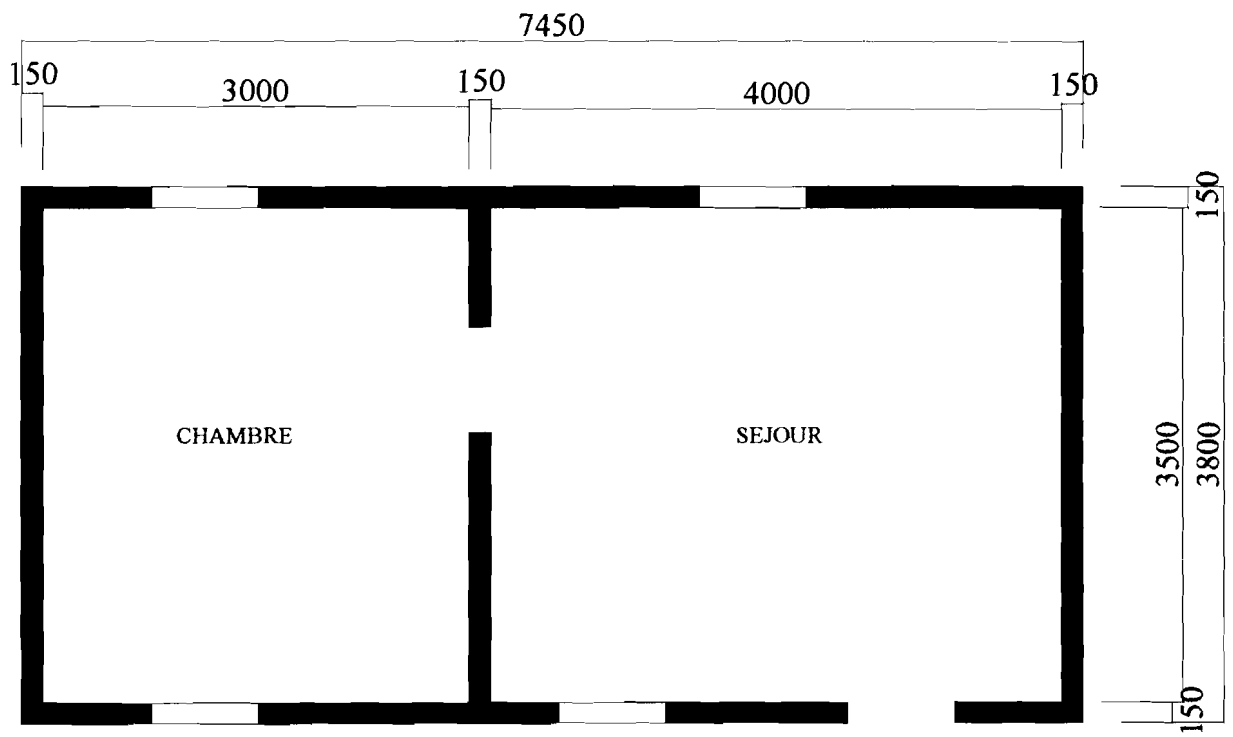
Les conditions d'occupation sont constantes ; elles sont établies sur la base de certaines enquêtes effectuées dans la région [réf 70, 75] de manière à correspondre aux situations réelles dans les habitations économiques :

- occupation nocturne (23h à 7h) : 2 personnes dans la chambre et 3 au séjour,
- occupation à mi-journée (11h à 17h) : 2 personnes par local,
- occupation en soirée (20h à 23h) : 5 personnes au séjour.

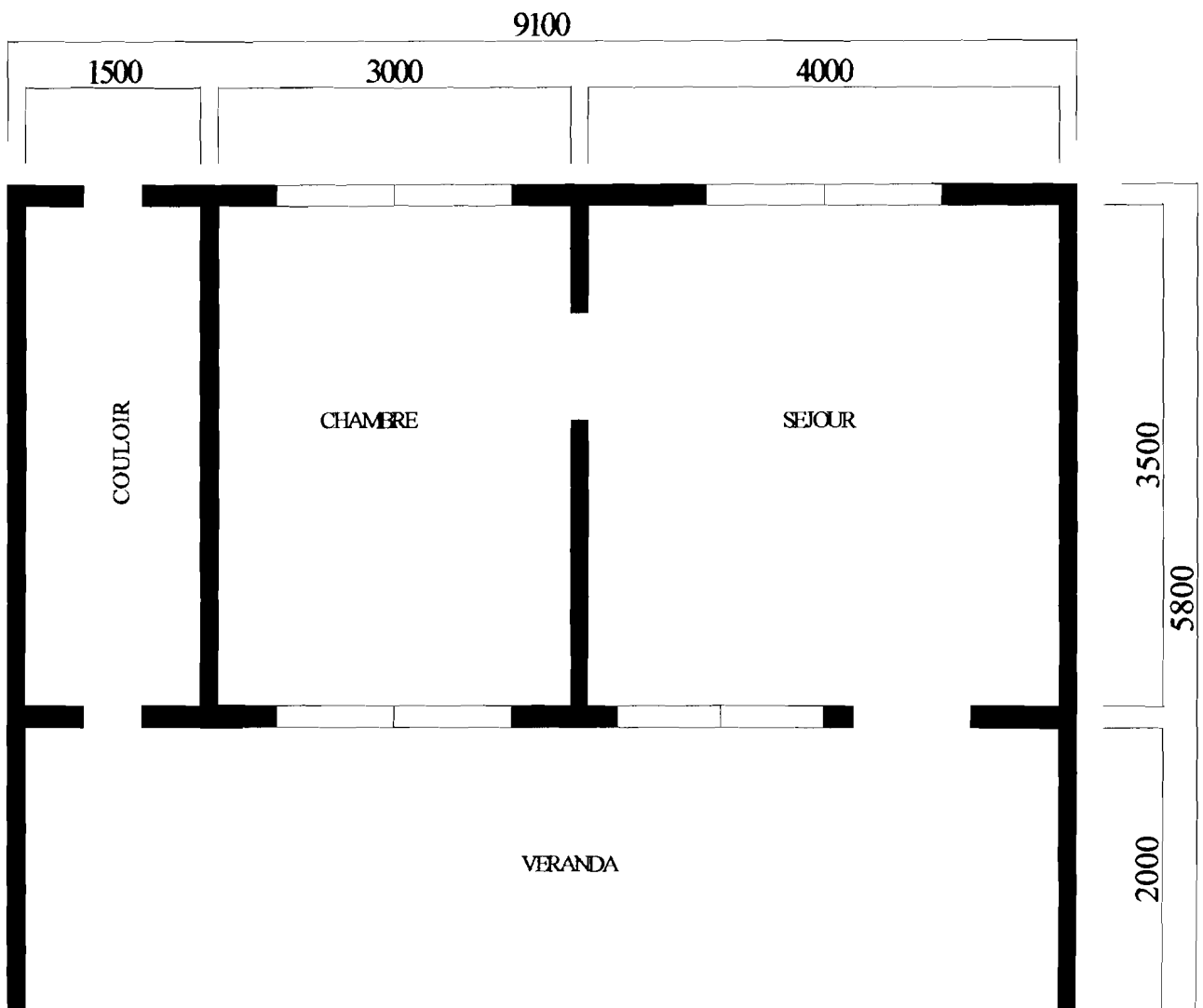
Scénario d'ouverture des portes et fenêtres 1 : Porte du salon fermée de 20h à 8h, ouverte à 100% de 8h à 20h, fenêtres fermées de 20h à 8h, ouvertes à 50% de 8h à 20h.

Scénario d'ouverture des portes et fenêtres 2 : Porte du salon fermée de 20h à 8h, ouverte à 100% de 8h à 20h, fenêtres ouvertes à 50% de 20h à 8h, à 100% de 8h à 20h).

Scénario d'ouverture des portes et fenêtres 3 : Porte du salon fermée de 20h à 8h, ouverte à 100% de 8h à 20h, fenêtres ouvertes à 100% toute la journée.



Plan 1-a : Projet de construction IRETI-2P



Plan 1-b : Projet de construction IRETI-2P amélioré

4.4.2-Simulations et résultats

Les simulations ont été conduites en cinq étapes suivant les paramètres d'étude ; les principaux facteurs testés sont : l'inertie et la teinte des parois, l'orientation de la construction, la nature et la configuration de la toiture, la ventilation, la protection des façades et des ouvertures contre l'ensoleillement. Les résultats recueillis (température de l'air, température moyenne radiante, température résultante, vitesse d'air dans les locaux) sont traités sous forme de tableaux qui ont de base au tracé des figures.

La référence 101 fait état des résultats de l'étude paramétrique du comportement thermique de l'habitat dans la région sud du Bénin.

Série 1 : Influence de l'inertie et de la teinte des parois

En région tropicale, le rôle des parois murales du logement est de réduire les apports de chaleur dus au rayonnement solaire en réfléchissant au maximum le flux solaire incident, en stockant le moins possible la chaleur et en favorisant son élimination ou tout au moins en limitant les flux transmis vers les locaux.

Le niveau de confort thermique dans les locaux est très influencé par la température de surface des parois murales.

Pour des conditions climatiques données, la température de surface des parois dépend de la perméabilité thermique des parois (exprimée par le coefficient de transmission thermique k), du coefficient d'échange de surface entre la paroi et l'air ambiant et de la température de l'air dans le local.

La transmission de chaleur à travers une paroi est très liée aux caractéristiques thermophysiques des matériaux et à l'épaisseur des murs ; nous prendrons en compte deux paramètres essentiels des murs pour l'évaluation de l'influence des caractéristiques de l'enveloppe sur le confort thermique dans l'habitat : il s'agit de l'inertie thermique (nature du matériau, épaisseur des murs) et de la teinte des murs.

a- Inertie des parois

Dans un bâtiment, l'enveloppe doit servir de filtre pour créer, à partir de l'ambiance extérieure, un microclimat aussi agréable (confortable) que possible pour les occupants des locaux. Le rôle de filtre sera d'autant plus efficace que l'inertie des murs extérieurs du bâtiment est adaptée aux conditions climatiques du site.

L'inertie d'une paroi représente la résistance qu'elle oppose au transfert de chaleur, donc sa capacité à atténuer la température dans un local en accumulant dans sa structure une partie de la chaleur reçue sur sa face extérieure, pendant un certain temps, en fonction des conditions thermiques. Cette capacité se traduit par un déphasage entre la sollicitation thermique extérieure et la réponse correspondante sur la face interne de la paroi. Elle dépend essentiellement des caractéristiques thermophysiques des matériaux mis en œuvre et de l'épaisseur de la paroi (Annexe 3).

Les figures 4.2 illustrent l'évolution de la température résultante dans les locaux pour différents types de parois (légères ou lourdes) et suivant différentes teintes (teinte claire ou foncée). Le tableau 4.3 récapitule les données moyennes de température dans le local 2 suivant l'inertie et la teinte des parois.

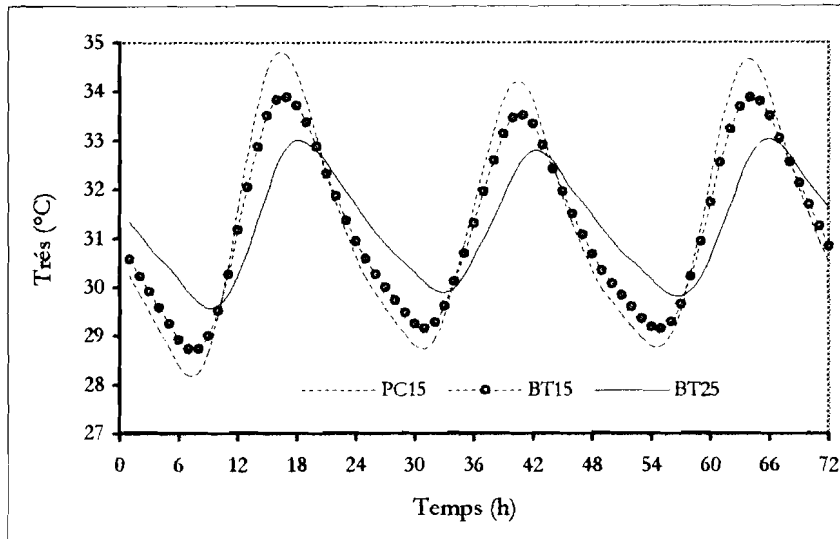


Figure 4.2-a : Influence de l'inertie des parois (parois lourdes)

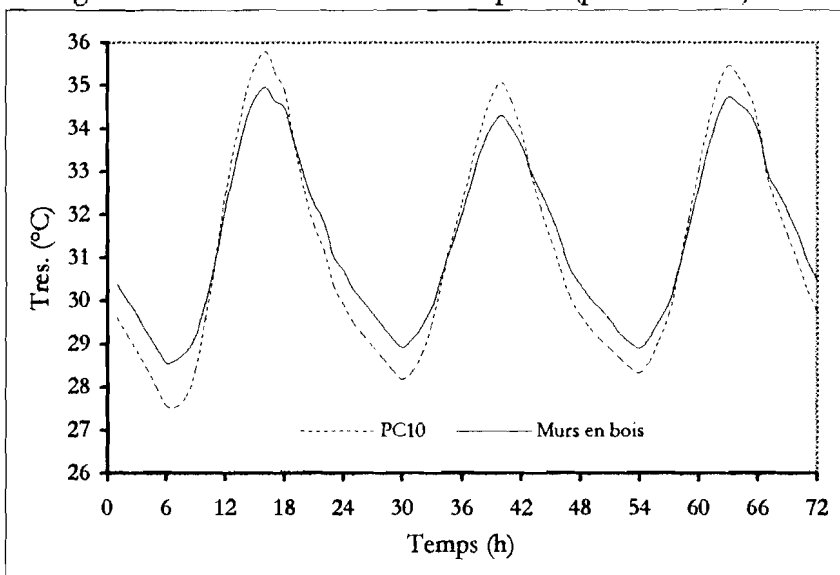


Figure 4.2-b : Influence de l'inertie des parois (parois légères)

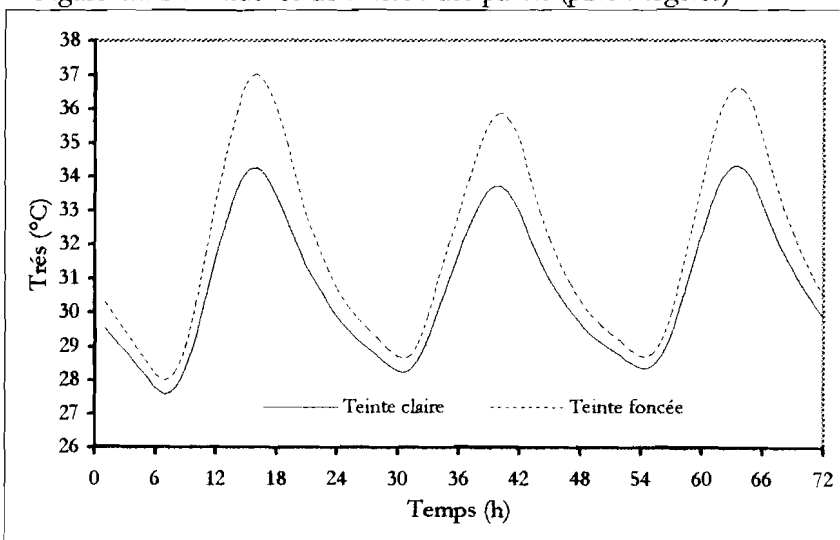


Figure 4.2-c : Influence de la teinte des parois

Lorsqu'on considère l'évolution de la température dans les locaux, les solutions les plus performantes sont les parois en parpaing creux de 12 ou 15cm (PC 12, PC 15) et celles en béton de terre de 15 ou 25cm (BT 15, BT 25).

Les parois en parpaings creux de 12 cm et de 15 cm donnent des niveaux de température et de confort du même ordre de jour ou de nuit.

En rapprochant les figures 4.2-a et 4.7-b, les parois lourdes ont l'avantage d'écrêter les températures ambiantes dans les locaux aux heures chaudes de la journée ; par contre elles présentent l'inconvénient d'accumuler la chaleur pendant cette période et de la restituer la nuit, compromettant ainsi le confort des usagers dans les locaux pendant les heures nocturnes. Ce phénomène est d'autant plus remarquable que les parois ont une grande inertie.

Par exemple, le comportement des parois lourdes s'inverse à partir de 22h : plus elles sont inertes, plus elles s'opposent à l'équilibre des températures entre l'extérieur et les ambiances intérieures aussi bien le jour que la nuit.

Tableau 4.3 : Température résultante dans le local suivant l'inertie et la teinte des parois

	Inertie des parois					Teinte des parois	
	PC 10	Bois	PC 15	BT 15	BT 25	Claire	Foncée
T_{max} (°C)	35.9	34.9	34.7	33.9	32.9	34.3	37
$T_{rés}$ Jour (°C)	34	33.5	33.1	32.5	32.2	33	34.9
$T_{rés}$ Nuit (°C)	29.3	30	29.9	30.3	30.6	29.3	29.9
T_{min} (°C)	27.6	28.6	28.3	28.7	29.6	27.6	28

Dans les conditions climatiques du site, les constructions légères ou lourdes présentent quelques inconvénients suivant les différentes périodes de la journée :

- les murs extérieurs minces et légers (de faible inertie thermique) protègent peu des variations importantes de température ;
- par contre, les murs extérieurs épais (forte inertie) accumulent de la chaleur pendant la journée et en restituent une partie pendant la nuit. Il en résulte une situation d'inconfort à l'intérieur des locaux aux heures nocturnes, surtout aux périodes très ensoleillées de l'année.

Les solutions lourdes conviennent au confort thermique de la matinée et de la mi-journée mais elles présentent l'inconvénient majeur de favoriser de fortes températures dans les locaux aux heures nocturnes. Cette situation est d'autant plus inconfortable qu'en région tropicale humide les nuits sont calmes (vitesses d'air très faibles) et chaudes.

Les parois lourdes sont donc très inadaptées pour le climat du site, et pour la région tropicale humide en général. Néanmoins, il est envisageable de concevoir les parois des constructions suivant la période d'occupation : des murs inertes pour les locaux à occupation diurne, des murs légers pour les locaux à occupation nocturne).

b- Teinte des parois

Pour les teintes étudiées, l'effet du coefficient d'absorption se traduit par la translation des courbes de température, très remarquable aux heures chaudes de la journée : la réduction de la température résultante est d'autant plus grande que les parois absorbent la chaleur, c'est-à-dire que leur coefficient d'absorption est faible

A la mi-journée, il a été possible d'obtenir une baisse de la température résultante ($T_{rés}$) de l'ordre de 3,2°C dans le local avec des murs en parpaing creux de 12 ou 15 cm peints en blanc (ou en blanc crème) par rapport à des murs de teinte foncée.

Série 2 : Influence de l'orientation des constructions

Deux types de parois ont été testés pour les murs extérieurs du bâtiment suivant l'orientation des bâtiments : les parois légères et les parois lourdes. Pour chaque type de paroi, le projet de construction a été placé dans huit (8) positions correspondant à différentes orientations par progression de 45°.

Les figures 4.3-a et 4.3-b montrent respectivement l'évolution de la vitesse d'air et de la température résultante dans la chambre (local 2) pour différentes orientations du bâtiment ; les parois essayées sont légères.

Le tableau 4.4 récapitule l'évaluation des conditions d'ambiance et le niveau de confort dans le local suivant l'orientation des pièces pendant une journée : l'orientation des grandes façades au Sud et au Nord donne les meilleures performances pour les paramètres étudiés. Par contre, la disposition des grandes façades de la maison à l'Est et à l'Ouest favorise les apports solaires dans les locaux : il en résulte des niveaux de température élevés et une situation d'inconfort. Il est donc recommandable de réduire les surfaces des parois situées à l'Est et à l'Ouest et de minimiser ainsi les surfaces de captage du flux solaire ; les bâtiments en forme de barre allongée suivant l'axe E/O ou SE/NO conviennent bien au climat du site.

Tableau 4.4 : Récapitulation des données d'ambiance et de confort dans le local

	Sud/Nord	SE/NO	SO/NE	Est /Ouest
T_{max} (°C)	34.3	34.9	34.8	35.4
$T_{rés}$ Jour (°C)	33	33.7	33.4	34.1
$T_{rés}$ Nuit (°C)	28	28.5	28.2	28.8
T_{min} (°C)	26.8	26.9	26.6	27.1
V_{air} (m/s)	0.34	0.18	0.215	0.1
M_{cut} Jour	0.15	0.16	0.16	0.2
M_{cut} Nuit	0.11	0.12	0.115	0.12

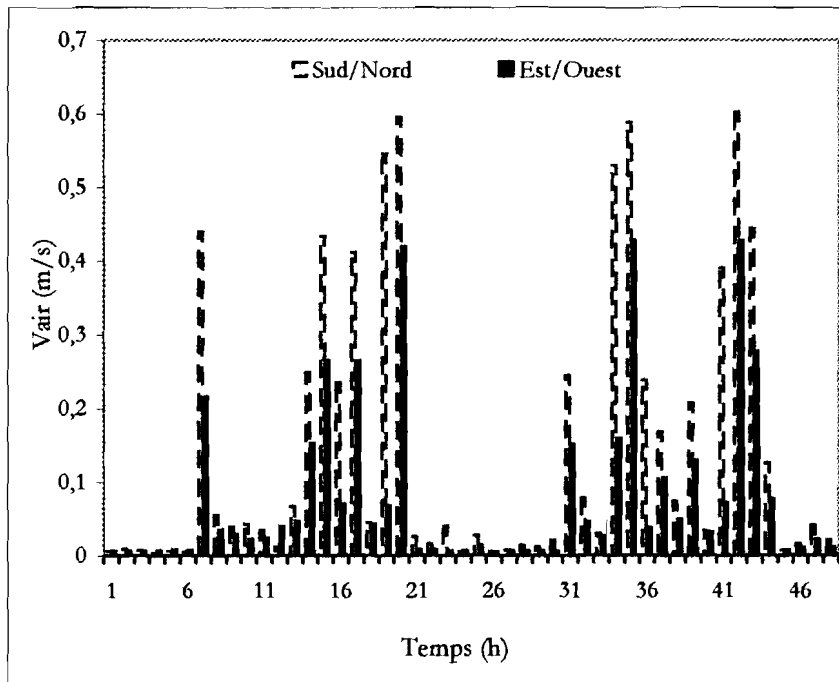


Figure 4.3-a : Evolution de la vitesse d'air dans le local

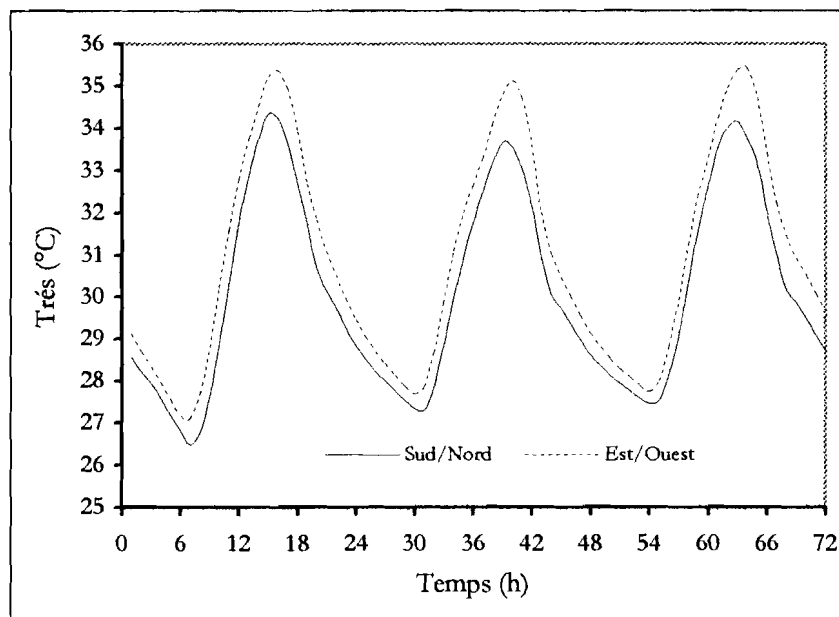


Figure 4.3-b : Evolution de la température résultante dans le local

Série 3 : Influence de la toiture

L'étude de la typologie de l'habitat au Bénin a permis de tirer quelques conclusions en ce qui concerne les matériaux de construction les plus courants ; il en résulte que le type de toiture le plus répandu, en zone urbaine et en zone rurale, est la toiture métallique. La toiture-terrasse est plutôt réservée aux logements de moyen standing ou haut standing.

Compte tenu du fort ensoleillement en région tropicale, l'utilisation des toitures métalliques engendre une situation d'inconfort dans les habitations aux heures chaudes de la journée : il est d'usage d'interposer un faux plafond en bois pour éviter les flux directs.

Dans le cadre de la présente étude, nous avons procédé à l'analyse des performances thermiques des toitures légères suivant la nature et la teinte du matériau de couverture, de même que la ventilation du comble.

Pour mettre en évidence les apports de chaleur transitant par la toiture, nous avons analysé la charge thermique qui lui est due, ainsi que la température de la surface intérieure du plafond, en fonction de différents paramètres [référence 114].

Le tableau 4.5 présente les caractéristiques thermiques des matériaux de couverture utilisés.

Tableau 4.5 : Caractéristiques thermiques des matériaux de couverture

Matériau	Emissivité sous-face	Absorptivité surface		
Toiture légère sur comble, avec faux plafond en contreplaqué (bois, épaisseur : 0.5cm)				
Bac aluminium	0.15	0.3	0.5	0.7
Tôle d'acier	0.90	0.3	0.5	0.7
Tôle en alliage d'aluminium et de zinc	0.94	0.5	0.7	

Les figures 4.4 à 4.7 montrent l'influence de la nature du matériau de couverture, la teinte de la toiture, la ventilation du comble et l'isolation de la toiture sur les performances de la toiture et leurs impacts respectifs sur la température résultante dans la chambre.

Les différents paramètres analysés montrent que la toiture a une forte influence sur les conditions d'ambiance intérieures (température résultante dans le local) ; ils constituent donc de bons facteurs pour améliorer les conditions d'ambiance et le confort thermique dans l'habitat.

Nature et teinte du matériau de couverture :

Les figures 4.4 illustrent l'évolution des charges thermiques dans le comble suivant la nature et la teinte du matériau de couverture. Les paramètres physiques pris en compte ici sont respectivement l'émissivité de la sous-face (ϵ) du matériau de couverture et son coefficient d'absorption (α).

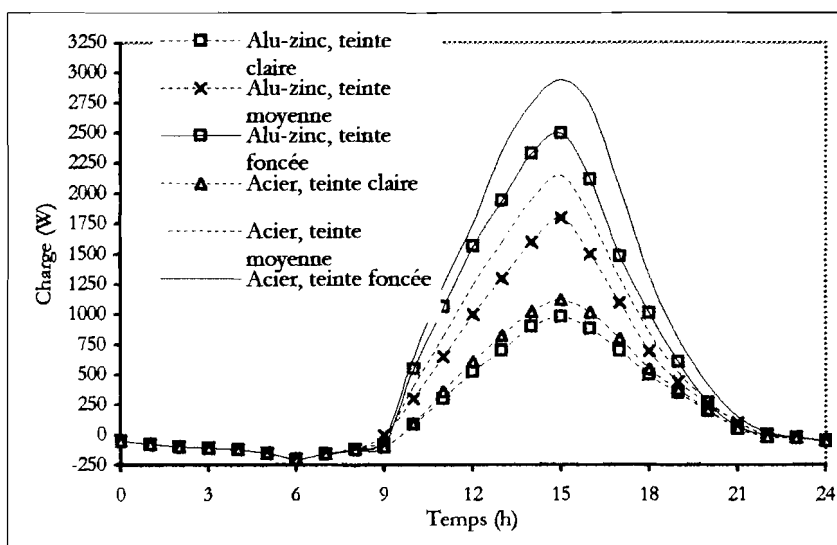


Figure 4.4-a : Charge dans le comble suivant la nature et la teinte du matériau

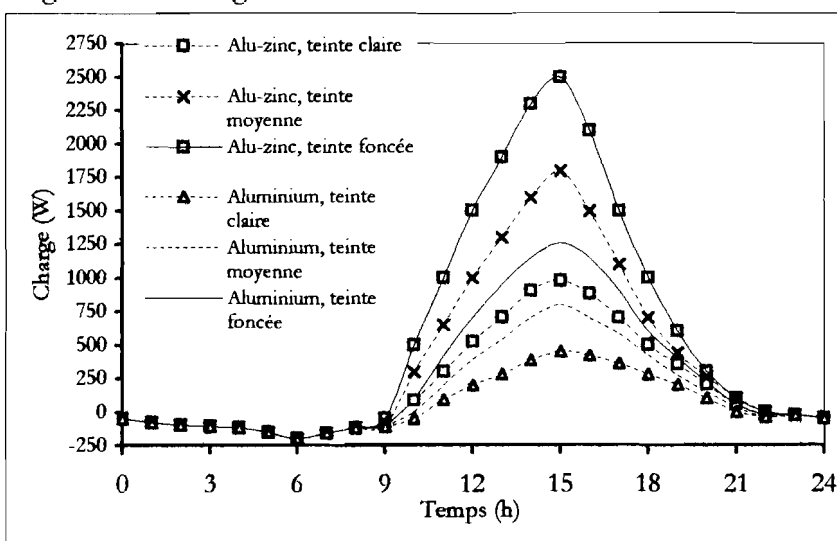


Figure 4.4-b : Charge dans le comble suivant la nature et la teinte du matériau

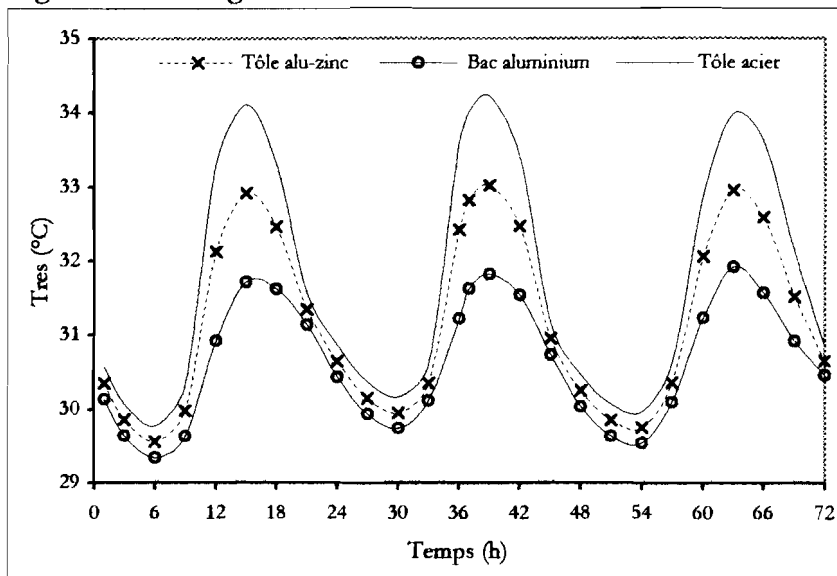


Figure 4.5-a : Température dans le local pour différents matériaux (teinte moyenne)

La figure 4.5-a compare l'évolution de la température dans la chambre pour différents matériaux de couverture de teinte moyenne : la tôle en acier, en alliage d'aluminium et de zinc et le bac en aluminium.

La figure 4.5-b montre l'influence de la teinte du matériau sur la température résultante pour une toiture en alliage d'aluminium et de zinc.

Ces figures révèlent que la charge thermique dans le comble est d'autant plus intense, et la température plus élevée dans les locaux, que le matériau de couverture a un fort coefficient d'absorption et une forte émissivité en sous-face : en passant d'une toiture en alliage d'aluminium et de zinc ($\epsilon=0.94$) à une toiture en bac aluminium ($\epsilon=0.15$), ces deux matériaux étant de teinte moyenne, nous avons enregistré une réduction des charges de 1000 W dans le comble aux heures les plus chaudes de la journée ; l'avantage va au matériau le moins émissif en sous-face, ici le bac en aluminium. Il s'ensuit une baisse moyenne de température de 1.2 °C dans la chambre.

Le tableau 4.6 indique les performances de la toiture et les données d'ambiance pour une toiture en tôle en alliage d'aluminium et de zinc.

Tableau 4.6 : Performances de la toiture et données d'ambiance (tôle en alliage d'aluminium et de zinc sur comble non ventilé)

- Température de la surface intérieure du toit

	Teinte foncée	Teinte moyenne	Teinte claire
$T_{\text{surf,max}} (^\circ\text{C})$	65	61	49
$T_{\text{moy}} \text{ Jour } (^\circ\text{C})$	54	48	45
$T_{\text{moy}} \text{ Nuit } (^\circ\text{C})$	27.7	27.7	27.7
$T_{\text{surf,min}} (^\circ\text{C})$	25.8	25.8	25.8

- Charge thermique dans le comble

$P_{\text{th}} \text{ Jour}$	2950	2470	2325
$P_{\text{th}} \text{ Nuit}$	1400.	1399.6	1398.5

- Température dans le local (Local 2)

$T_{\text{rés}} \text{ Jour } (^\circ\text{C})$	34.2 °C	33.7°C	33.3°C
$T_{\text{rés}} \text{ Nuit } (^\circ\text{C})$	27.8°C	27.5°C	27°C

Pour un même matériau de couverture, la tôle en alliage d'aluminium et de zinc par exemple, le passage d'une toiture de teinte foncée ($\alpha = 0.7$) à une toiture de teinte claire ($\alpha = 0.3$) favorise une baisse de température résultante de l'ordre de 2 à 3°C dans la chambre à mi-journée.

La toiture de teinte claire réfléchit les rayons solaires ; il s'ensuit une baisse de la température de surface intérieure de la couverture de 20°C par rapport au cas de base (bac aluminium, teinte foncée), la diminution des charges thermiques dans le comble ($\Delta P_{\text{th}} \approx 800\text{W}$) et des conditions d'ambiance plus douces dans les locaux ($\Delta T_{\text{rés}} \approx 3^\circ\text{C}$).

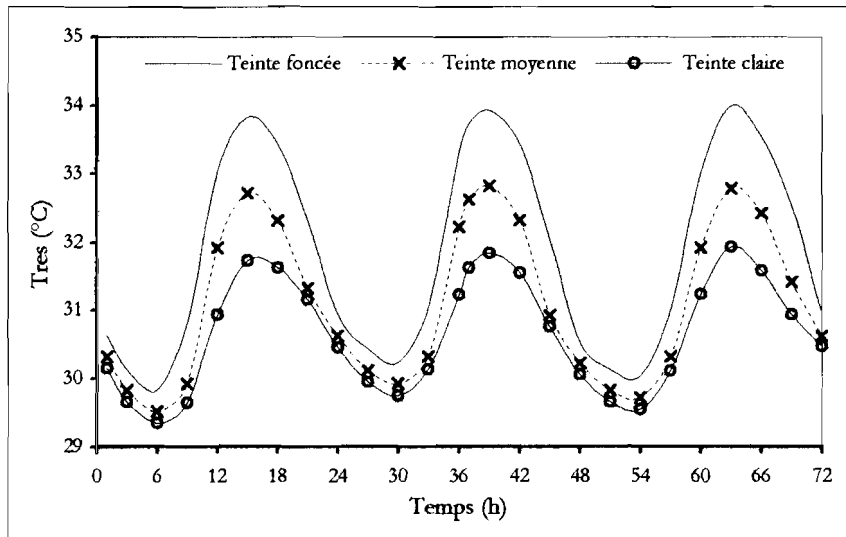


Figure 4.5-b : Température dans le local suivant la teinte du matériau

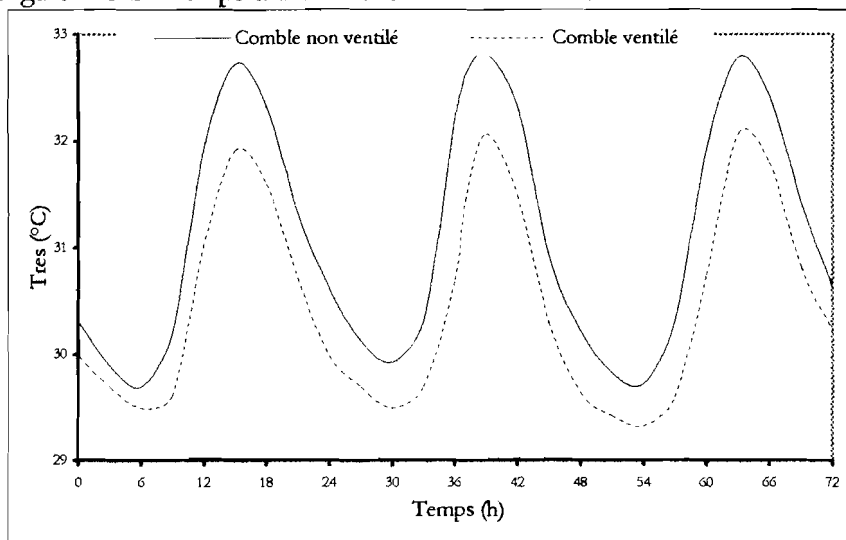


Figure 4.6 : Influence de la ventilation du comble sur la température dans le local

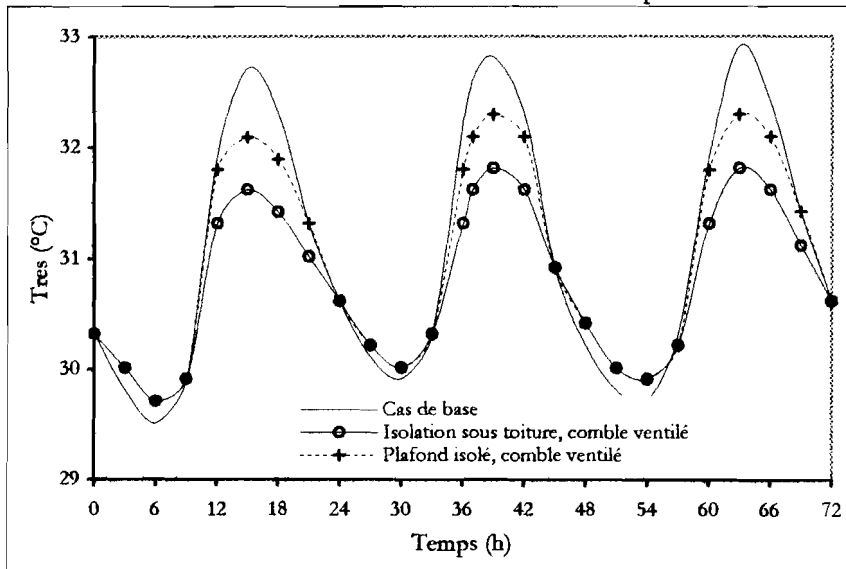


Figure 4.7 : Influence de l'isolation de la toiture sur la température dans le local

Ventilation du comble :

La figure 4.6 compare les températures dans le local pour un comble non ventilé (débit d'air inférieur à 10 vol/h), légèrement ventilé ($d=30$ vol/h) et bien ventilé ($d=50$ vol/h).

Dans le cas d'une toiture en alliage d'aluminium et de zinc, le comble bien ventilé permet de réduire la température dans le local de l'ordre de 1 à 1.5 °C à la mi-journée : une bonne aération de la toiture favorise donc l'amélioration des conditions d'ambiance intérieure.

De façon analogue, il a été possible de réduire les charges transitant par la toiture de plus de moitié aux heures chaudes de la journée, avec une couverture en bac aluminium, en aménageant des orifices de ventilation de surface $s = 0.2\text{m}^2/\text{mètre}$ linéaire sur les façades principales du bâtiment. En conséquence, la température résultante dans le local s'est trouvée réduite de 2.6°C par rapport au projet de base.

Au plan de l'amélioration des conditions d'ambiance et de confort dans les locaux, la toiture en bac aluminium de teinte claire ou moyenne, sur un comble bien ventilé, est plus adaptée aux conditions climatiques du site et donc très recommandable.

Le tableau 4.7 récapitule les valeurs moyennes de température résultante dans la chambre 1, ainsi que le niveau de confort qui en résulte (mouillure cutanée) pour un sujet légèrement vêtu et au repos.

La figure 4.7 compare les données d'ambiances résultant respectivement de la ventilation du comble et de l'isolation de la toiture ou du comble.

Isolation du comble :

Au plan thermique, l'isolation de la toiture n'a pas permis d'enregistrer une baisse sensible de température dans les locaux. Nous avons donc testé le cumul de l'isolation de la toiture avec la ventilation du comble : dans cette nouvelle approche, la pose d'une couche d'isolant directement sous la couverture donne une légère réduction de la température dans le local (voir Figure 4.7).

Dans le cadre du cumul des effets de la ventilation du comble et de l'isolation de la toiture sur les conditions d'ambiance et de confort, nous avons analysé les performances d'une toiture légère en tôle d'alliage d'aluminium et de zinc sur un comble moyennement ventilé ($d=30$ vol/h), isolée par la pose d'une couche de polystyrène ($e=5\text{cm}$) directement sous la couverture.

En comparant ce résultat avec celui d'une simple ventilation du comble, on peut conclure que la ventilation est suffisante pour améliorer le confort dans l'habitat économique (voir Tableau 4.7).

Le tableau 4.7 récapitule les valeurs moyennes de température résultante dans la chambre 1 ainsi que le niveau de confort qui en résulte pour un sujet légèrement vêtu et au repos.

Les différents paramètres analysés révèlent une forte influence de la toiture sur la température résultante dans le local ; ils constituent donc de bons facteurs pour améliorer les conditions d'ambiance et le confort thermique dans l'habitat.

Tableau 4.7 : Données moyennes d'ambiance et niveau de confort suivant différents paramètres de la toiture

- Nature du matériau de couverture

	Tôle Acier	Tôle en aluzinc	Bac en aluminium
T_{max} (°C)	34.1	33	32
$T_{rés}$ Jour (°C)	33.6	32.5	31.5
$T_{rés}$ Nuit (°C)	30.1	30.4	30.2
T_{min} (°C)	29.7	28.8	28.4
M_{cut} Jour (%)	18	14	8.2

- Teinte de la toiture

	Teinte foncée	Teinte moyenne	Teinte claire
T_{max} (°C)	33.9	32.8	31.8
$T_{rés}$ Jour (°C)	33.4	32.5	31.4
$T_{rés}$ Nuit (°C)	30.7	30.4	30.1
T_{min} (°C)	29.0	28.4	28.4
M_{cut} Jour (%)	16.5	14	9

- Ventilation du comble

	Comble non ventilé	Comble ventilé	
		d= 30 vol/h	d= 50 vol/h
P_{th} Jour (W)	2948.5	2720	1388
T_{max} (°C)	32.9	32.3	32.0
$T_{rés}$ Jour (°C)	32.5	31.8	31.5
P_{th} Nuit (W)	1300.3	1298.3	1285.4
$T_{rés}$ Nuit (°C)	30.4	29.9	29.2
T_{min} (°C)	29.5	29.3	29.0
M_{cut} Jour (%)	14	8.6	8

Ces résultats démontrent qu'un matériau de couverture bien réfléchissant et peu émissif en sous-face, sur un comble bien ventilé, présente un fort potentiel de réduction des flux thermiques dans l'habitat et favorise l'amélioration des conditions d'ambiance et le confort thermique : à titre d'exemple, en remplaçant une toiture en tôle d'acier de teinte moyenne ($\alpha = 0.50$) sur un comble non ventilé par une toiture en bac d'aluminium de même teinte sur un comble ventilé, la température dans le local se trouve réduite d'environ 4 à 5°C.

Série 4 : Influence de la ventilation des locaux

Dans la présente étude, l'influence de la ventilation sur le comportement thermique des constructions est évaluée à travers l'impact des dimensions des portes et fenêtres et de leur statut d'ouverture sur l'amélioration des conditions d'ambiance intérieures.

Les figures 4.8 montrent l'évolution des paramètres d'ambiance (vitesse d'air, température résultante) suivant le scénario des ouvertures pour des fenêtres de petite taille (1.00m×1.20m).

Les figures 4.9 indiquent l'influence des dimensions des portes et fenêtres sur les conditions d'ambiance dans le local ainsi que le niveau de confort qui en résulte pour un sujet légèrement habillé et au repos.

Dans le cas de base, les fenêtres de dimensions très restreintes (1.00m×1.25m), même ouvertes à 100%, n'ont pas permis d'obtenir des vitesses d'air capables d'induire l'amélioration sensible des conditions d'ambiance.

Avec des fenêtres de dimensions moyennes (1.00m×1.25m), nous avons enregistré une vitesse moyenne d'air de l'ordre de 0.5m/s dans le local, vitesse minimale requise pour espérer annihiler les effets néfastes des contraintes climatiques en région tropicale humide. Ici, l'augmentation des dimensions des fenêtres (1.25m×1.60m) a permis d'accroître la vitesse d'air dans le local et d'améliorer les conditions d'ambiance : les larges ouvertures favorisent l'égalisation de la température d'air dans le local et celle de la surface des parois, et accélère le rafraîchissement du corps humain par évaporation de la sueur, d'où leur intérêt dans notre région.

La ventilation est d'autant plus efficace que les ouvertures sont plus grandes, qu'elles sont situées de manière à favoriser un courant d'air traversant, et que celles au vent sont légèrement plus réduites que celles sous le vent.

La combinaison des facteurs tels que la perméabilité des ouvertures, les dimensions des ouvertures et le scénario d'ouverture des portes et fenêtres a favorisé l'obtention des vitesses d'air de l'ordre de 1.2 m/s dans la chambre ainsi qu'une réduction de la température intérieure de 3°C par rapport au cas de base.

Le tableau 4.8 récapitule les données d'ambiance et le niveau de confort dans le local suivant le débit de ventilation.

La mouillure cutanée des usagers des locaux est calculée suivant la procédure indiquée à l'Annexe 1 et présentée sous forme de courbes en vue de comparer son évolution suivant les conditions de simulation. Dans le présent cas, la mouillure cutanée a certes baissé mais elle est encore à la limite de la zone de confort acceptable.

La ventilation du local constitue donc un moyen efficace pour l'amélioration du confort dans l'habitat sur le site considéré. Par conséquent, elle mérite qu'on y accorde une attention particulière lors de l'élaboration des projets de construction en vue de les faire bénéficier des atouts du climat local.

Ces résultats peuvent être améliorés par la mise en place de dispositifs de protection des parois et des ouvertures ; ils ont pour rôle de réduire voire d'empêcher la pénétration des rayons solaires dans le local ou le transfert de chaleur par les murs, sources d'élévation de la température intérieure.

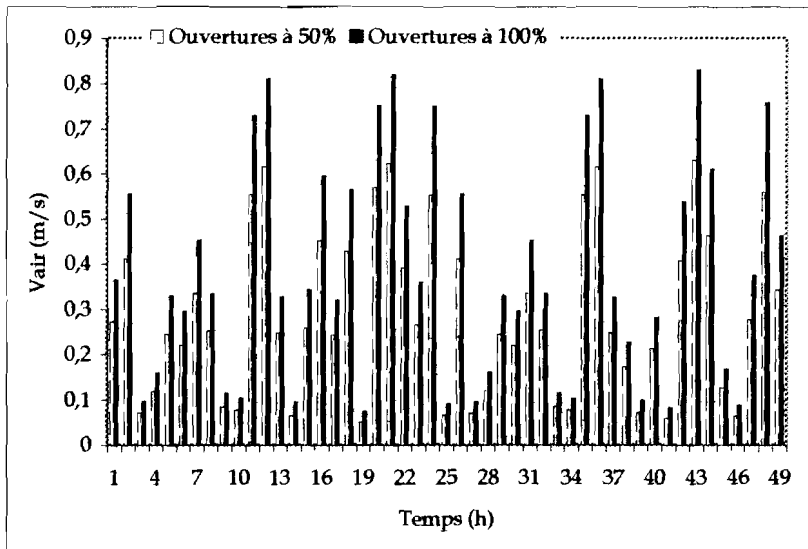


Figure 4.8-a : Vitesse d'air suivant le statut des ouvertures

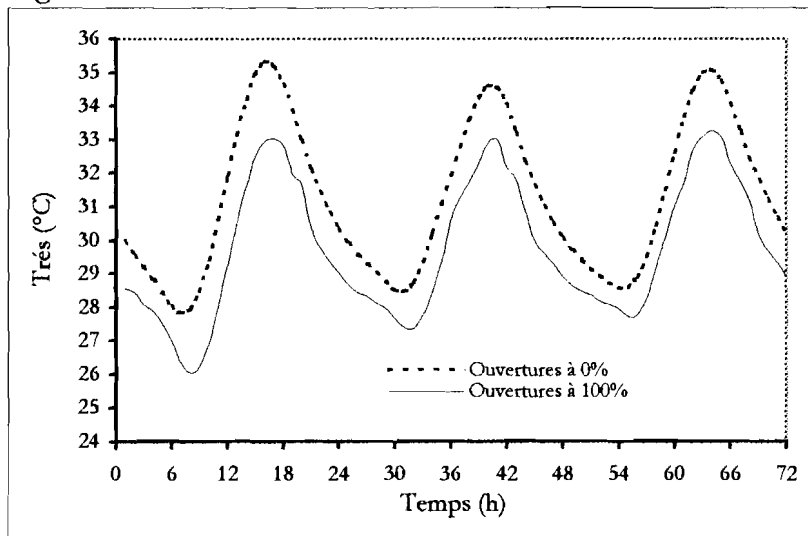


Figure 4.8-b : Température résultante suivant le statut des ouvertures

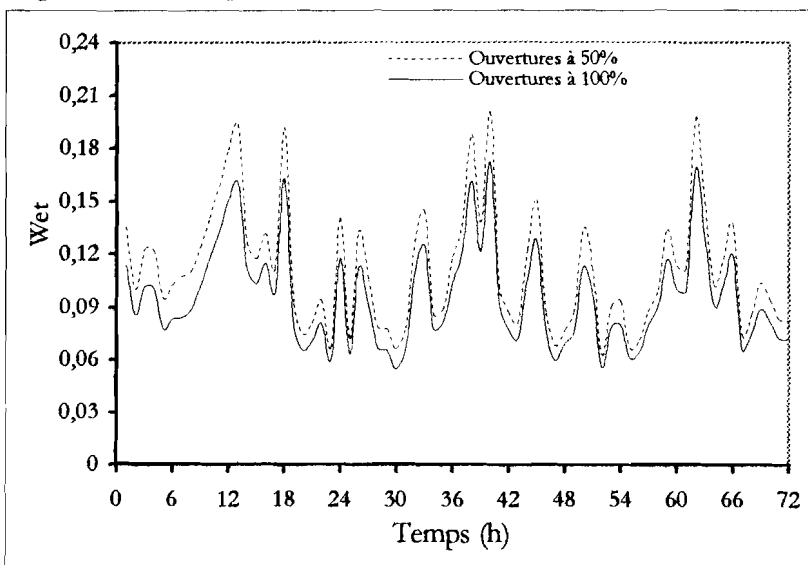


Figure 4.8-c : Mouillure cutanée dans les conditions d'ambiance

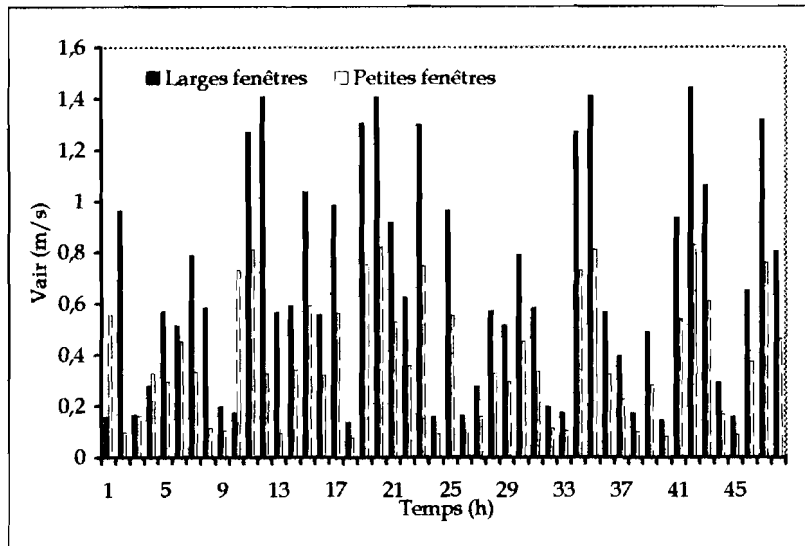


Figure 4.9-a : Vitesse d'air suivant les dimensions des ouvertures

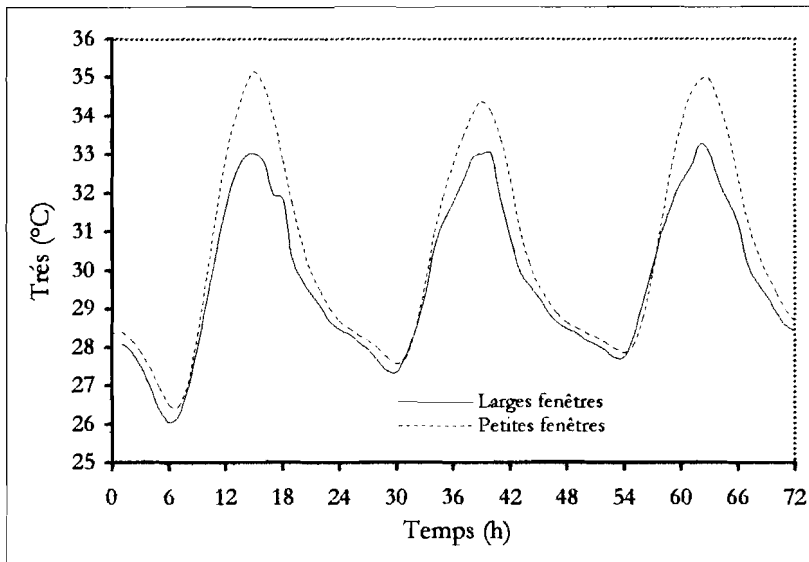


Figure 4.9-b : Evolution de la température résultante dans le local

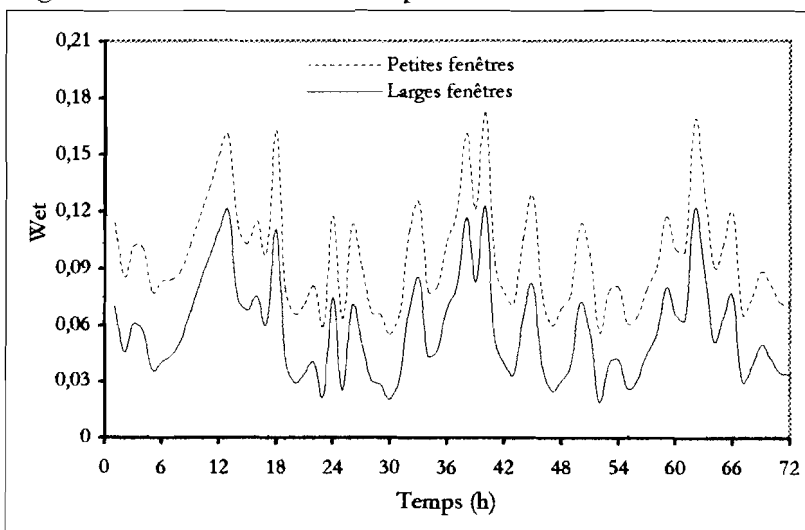


Figure 4.9-c : Mouillure cutanée dans les conditions d'ambiance

Tableau 4.8 : Données moyennes d'ambiance et niveau de confort suivant le débit de ventilation du local

• Statut des ouvertures

	0%	50%	100%
T_{max} (°C)	35.2	35	33.3
T_{res} Jour (°C)	33.6	32.4	31.6
T_{res} Nuit (°C)	29.6	29	28.5
T_{min} (°C)	27.8	26.95	26
V_{air} (m/s)	-	0.29	0.48
M_{cut} Jour	0.3	0.14	0.12
M_{cut} Nuit	0.17	0.095	0.087

• Dimensions des ouvertures (Statut : ouverture à 50%)

	Petites fenêtres	Fenêtres moyennes	Largees fenêtres
T_{max} (°C)	35	33.7	33.3
T_{res} Jour (°C)	33.13	33.0	32.6
T_{res} Nuit (°C)	28.46	28.43	27.9
T_{min} (°C)	26.9	26.7	26
V_{air} Jour (m/s)	0.29	0.34	0.48
V_{air} Nuit (m/s)	0.26	0.30	0.38
M_{cut} Jour	0.14	0.13	0.11
M_{cut} Nuit	0.095	0.09	0.07

• Dimensions des ouvertures (Statut : ouverture à 100%)

	Petites fenêtres	Fenêtres moyennes	Largees fenêtres
T_{max} (°C)	35	34.8	32.3
T_{res} Jour (°C)	31.6	30.7	30.5
T_{res} Nuit (°C)	28.5	28.2	28
T_{min} (°C)	26.4	26.4	26
V_{air} Jour (m/s)	0.38	0.51	0.84
V_{air} Nuit (m/s)	0.34	0.45	0.55
M_{cut} Jour	0.12	0.11	0.063
M_{cut} Nuit	0.087	0.07	0.042

Série 5 : Influence des masques de protection solaire

En région tropicale, les contraintes thermiques dues au rayonnement solaire constituent l'une des principales sources d'inconfort dans l'habitat. La protection des façades et des ouvertures contre l'ensoleillement constitue une bonne solution d'amélioration du climat intérieur des bâtiments par action sur le flux solaire direct pénétrant les locaux ; les solutions architecturales vis-à-vis des effets du rayonnement diffus sont plus difficiles à mettre en œuvre.

Les figures 4.10 montrent l'évolution des flux solaires directs entrants et de la température résultante dans le local 1 (Salon) pour plusieurs largeurs de masques ; l'influence des débords de toiture sur le confort dans l'habitat économique au Sud-Bénin consiste ici à la réduction de la température résultante dans le local de 2.7°C pendant la période chaude du jour (11h-16h).

Le tableau 4.9 indique les valeurs des flux entrants et le niveau de la température résultante dans le local : pour un bâtiment dont les façades principales sont orientées au Sud et au Nord, un auvent de largeur $D = 1.8\text{m}$, placé à 0.30m au-dessus des fenêtres, a permis de réduire la température résultante dans le local de 2.7°C pendant la période chaude de la journée (11h-16h).

Tableau 4.9 : Flux solaires entrants et température résultante dans le local

	D=0m	D=1.50m	D=1.80m
\varnothing_{max} (W)	1637	901	721.8
\varnothing_{moy} (W)	840.7	458.4	367.8
T_{max} (°C)	37.1	35.1	33
T_{res} Jour (°C)	35	33..8	32.3
T_{res} Nuit (°C)	29.9	28.3	28
T_{min} (°C)	28.0	26.5	26.2

Série 6 : Cumul des facteurs d'amélioration des conditions d'ambiance

Dans le cadre de la synthèse des facteurs de confort dans l'habitat, nous avons entrepris d'analyser l'effet cumulé de plusieurs paramètres sur les conditions d'ambiance. A cet effet, nous avons adopté le projet de construction ayant servi de base à l'étude paramétrique, auquel nous avons apporté quelques réaménagements ; ce sont : une toiture en bac aluminium de teinte moyenne sur comble ventilé, une véranda de 2.00m de large sur la façade Sud, un couloir de 1.5m sur la façade Ouest et des fenêtres de taille moyenne (1.25m×2.10m), ouvertes à 50% (voir Plan 1-b).

Les figures 4.11 montrent l'évolution de la température de surface du mur séparant le local et le couloir (mur extérieur Ouest dans le cas précédent), de la température résultante et de la mouillure cutanée dans le local, comparées aux résultats du projet de base.

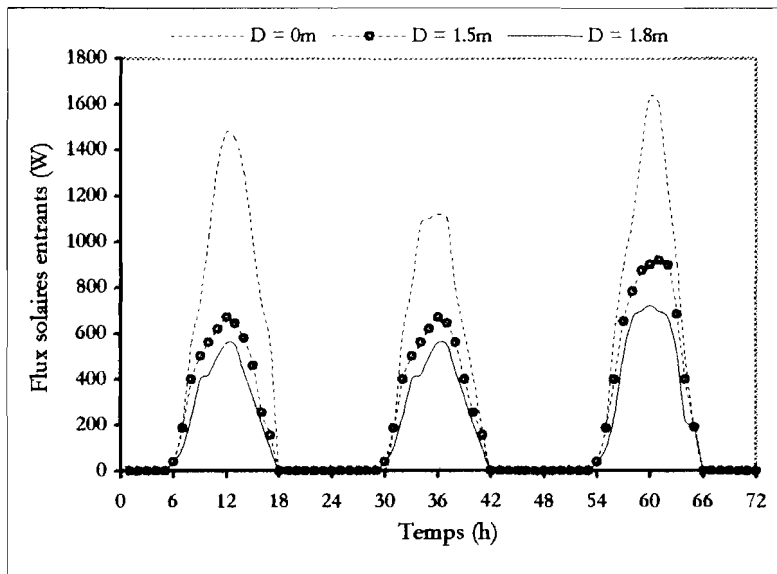


Figure 4.10-a : Flux solaires entrants suivant la largeur des masques

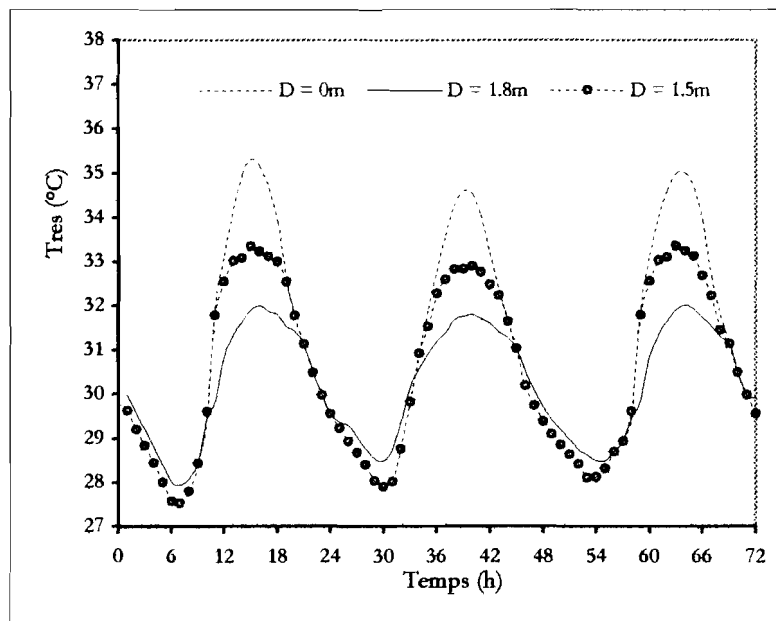


Figure 4.10-b : Influence des masques sur la température dans le local

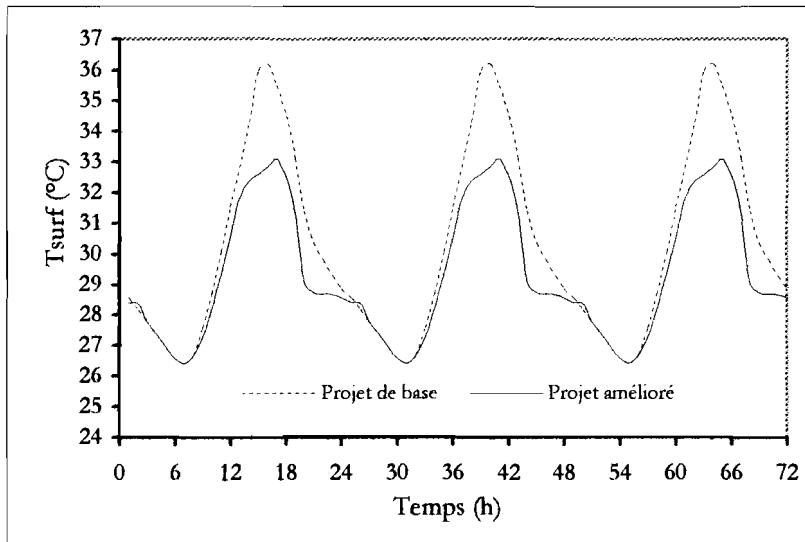


Figure 4.11-a : Température de surface du mur Ouest (Chambre)

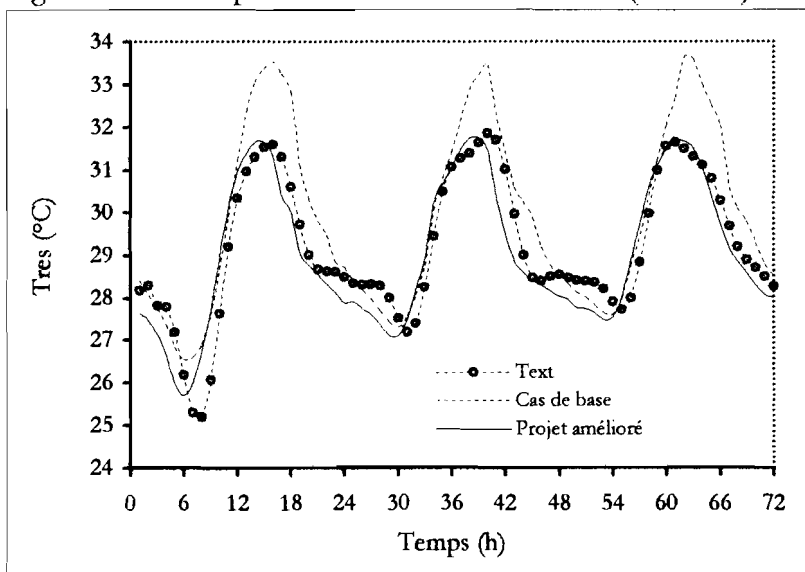


Figure 4.11-b : Effet du cumul des facteurs sur la température dans le local

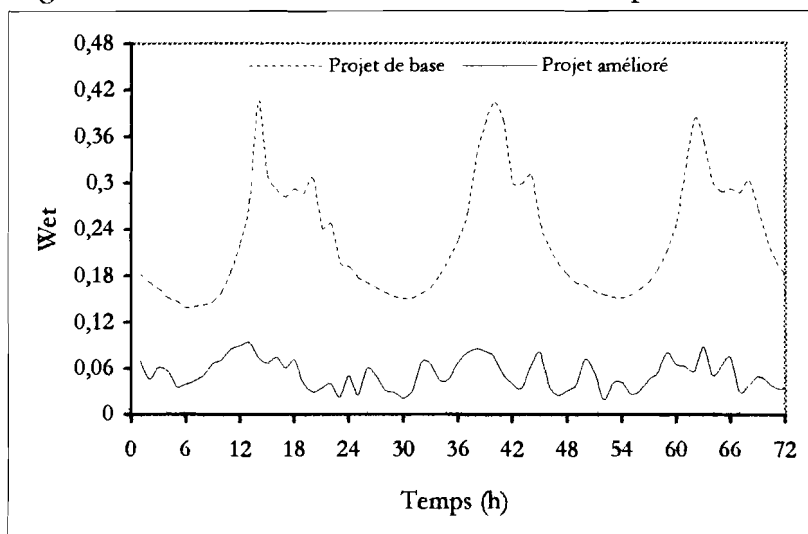


Figure 4.11-c : Effet du cumul des facteurs sur la mouillure cutanée

Le tableau 4.10 récapitule les données moyennes des paramètres d'ambiance (température résultante, vitesse d'air) et le niveau de confort dans le local pour les facteurs cumulés. Ce sont : une toiture en matériau de teinte moyenne, peu émissive en sous-face, sur comble ventilé, les façades Sud et Ouest protégées des flux solaires et fenêtres de taille moyenne ouvertes à 50%.

Tableau 4.10 : Comparaison des données d'ambiance et de confort dans les locaux

	Projet de base	Projet amélioré
T_{max} (°C)	35.3	31.9
T_{rs} Jour (°C)	33.6	31.2
T_{rs} Nuit (°C)	29.6	27.4
T_{min} (°C)	27.9	25.8
V_{air} Jour (m/s)	-	0.84
V_{air} Nuit (m/s)	-	0.55
M_{cut} Jour	0.3	0.064
M_{cut} Nuit	0.175	0.041

Tableau 4.11 : Récapitulation de l'amélioration des conditions d'ambiance

Élément d'enveloppe	Facteurs cumulés	T_{rs} Jour (°C)	T_{rs} Nuit (°C)
(0- Température extérieure)		31.2	28
1- Local de référence	Murs en parpaing creux (e=12cm) crépis sur chaque face, de teinte moyenne ($\alpha=0.5$)	33.6	29.6
2- Ouvertures	Ventilation par fenêtres moyennes sur les façades Sud et Nord ouvertes à 50% le jour et 100% la nuit	32.7	28.1
3- Toiture	Toiture légère Toit en bac aluminium, de teinte moyenne ($\alpha=0.5$) sur comble ventilé	32.00	27.9
4- Protection solaire	Masques de protection Véranda sur façade Sud (Largeur = 2m) Couloir à l'ouest (Largeur=1.5m)	31.2	27.4
$\Delta T_{rs} =$		2.4	2.2

Le cumul des facteurs a permis de réduire la température du local de 2.4°C le jour et de 2.2°C la nuit par rapport aux conditions d'ambiance du local de référence (voir Tableaux 4.10 et 4.11). On obtient ainsi dans le local :

- des conditions diurnes équivalentes à celles enregistrées à l'extérieur,
- à l'ombre ; des conditions d'ambiance plus adoucies que celles à l'extérieur pendant la nuit.

La véranda permet donc de protéger les ouvertures et d'empêcher la pénétration des flux solaires directs, source d'inconfort dans les locaux. Dans le même ordre d'idée, des parois de teinte claire (murs extérieurs, toit) permettraient d'adoucir davantage les conditions d'ambiance et d'améliorer le confort des usagers.

La simulation du comportement du bâtiment protégé contre l'ensoleillement direct, avec de larges fenêtres (1.25m×2.10m) ouvertes à 100% le jour et la nuit donne de meilleurs résultats en favorisant une réduction complémentaire de la température résultante moyenne dans le local de 0.6°C pendant les heures chaudes de la journée.

En guise de conclusion partielle, nous retiendrons :

- la surchauffe d'un local engendre chez les occupants une sensation d'inconfort thermique ;
- la température résultante dans les locaux dépend essentiellement de la température de l'air, de la température de surface des parois, des apports solaires et des apports internes de chaleur dus à l'occupation du bâtiment (occupants, équipements) ;
- par conséquent, les principales méthodes pour maintenir les conditions d'ambiance dans la zone de confort consistent à : minimiser les apports de chaleur dus à l'occupation des locaux, diminuer la température de surface intérieure des parois (nature et agencement des matériaux constituant les murs), évacuer l'air chaud du local et refroidir les parois en favorisant une ventilation efficace (larges ouvertures, perméabilité des cloisons, protection des ouvertures vis à vis de l'ensoleillement direct).

**CHAPITRE 5 : APPLICATION A L'AMELIORATION DU CONFORT
DANS L'HABITAT ECONOMIQUE**

Dans le chapitre 4, nous avons analysé l'influence des principaux paramètres de construction pris isolément sur le comportement thermique des habitations. Dans la pratique, la conception globale d'une construction doit intégrer tous ces paramètres pour obtenir les meilleures conditions d'ambiance.

Dans le cadre de l'étude de cas, les résultats du chapitre précédent ont été appliqués à divers types de maisons d'habitation rencontrés dans la région sud du Bénin. Nous donnons dans ce chapitre les principaux résultats obtenus pour les types de constructions les plus courants ; il s'agit de l'habitat populaire et de l'habitat économique (à 2, 3 ou 4 pièces).

5.1. Etude de cas n° 1 : Habitat populaire, type ADE-3P

Le Plan 2-a représente le type d'habitat le plus courant, très répandu dans la région de notre étude, en zone rurale et en zone urbaine.

Il consiste en une salle servant de séjour qui communique avec deux chambres à coucher ; la cuisine et la douche sont situées à l'arrière-cour.

Les murs sont généralement en parpaings creux de 12 ou 15 cm d'épaisseur ou en matériaux locaux (géobéton, terre cuite, etc.) ; la toiture en feuilles de tôle d'alliage alu-zinc sur comble ventilé.

L'étude du comportement thermique de la Construction ADE-3P a été menée en trois étapes, pendant une période chaude très caractéristique en région tropicale humide (première semaine du mois d'avril). Les paramètres pris en compte pour les simulations sont relatifs à la ventilation (dimensions et disposition des ouvertures), à la protection contre l'ensoleillement et à la nature des matériaux de construction des murs.

Première étape (cas de base) :

Dimensions de la construction : $6.45\text{m} \times 7.95\text{m} \times 3.5\text{m}$

Façades principales (grandes façades) orientées au sud et au nord

Murs en parpaings creux de 12 cm d'épaisseur, crépis sur chaque face

Toiture à double versant (Pente = 16°) sur comble peu ventilé ; ouvertures du comble ($s = 0.10\text{m}^2$ par mètre linéaire) sur les façades principales, couverture en feuilles de tôle d'alliage alu-zinc sur comble ventilé de teinte moyenne ($\alpha = 0.5$)

Faux plafond en contreplaqué de 0.50cm d'épaisseur

Dimensions des ouvertures :

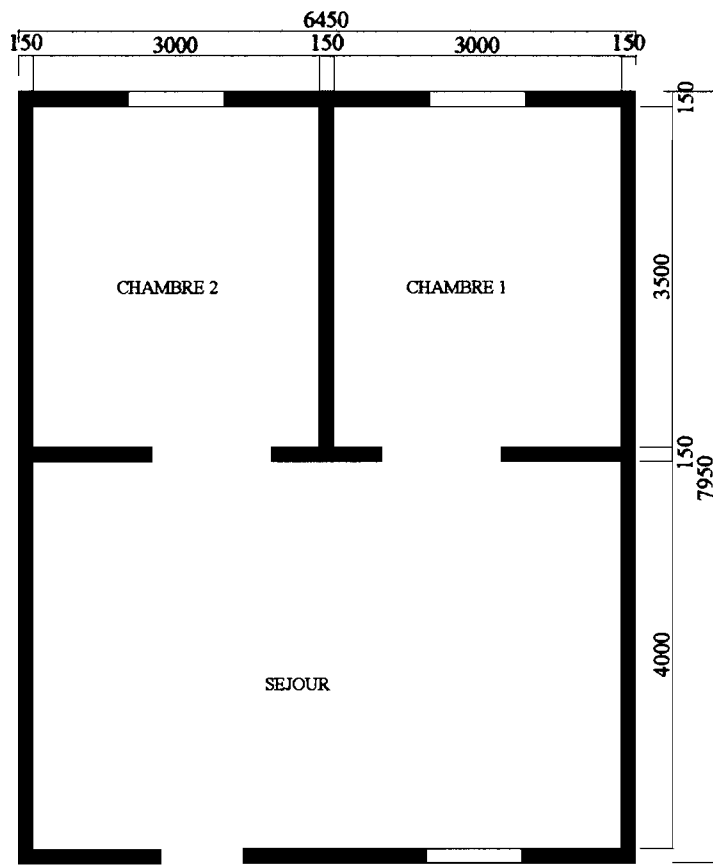
- Salon : Porte de $2.05\text{m} \times 1\text{m}$, fenêtres de $0.90\text{m} \times 1.20\text{m}$
- Chambres : Portes de $2.0\text{m} \times 0.95\text{m}$, fenêtres de $0.90\text{m} \times 1.20\text{m}$

Au Salon, la porte et les fenêtres ouvertes à 100% de 7H à 21H ; dans les chambres, les portes sont fermées en permanence ; les fenêtres sont légèrement ouvertes.

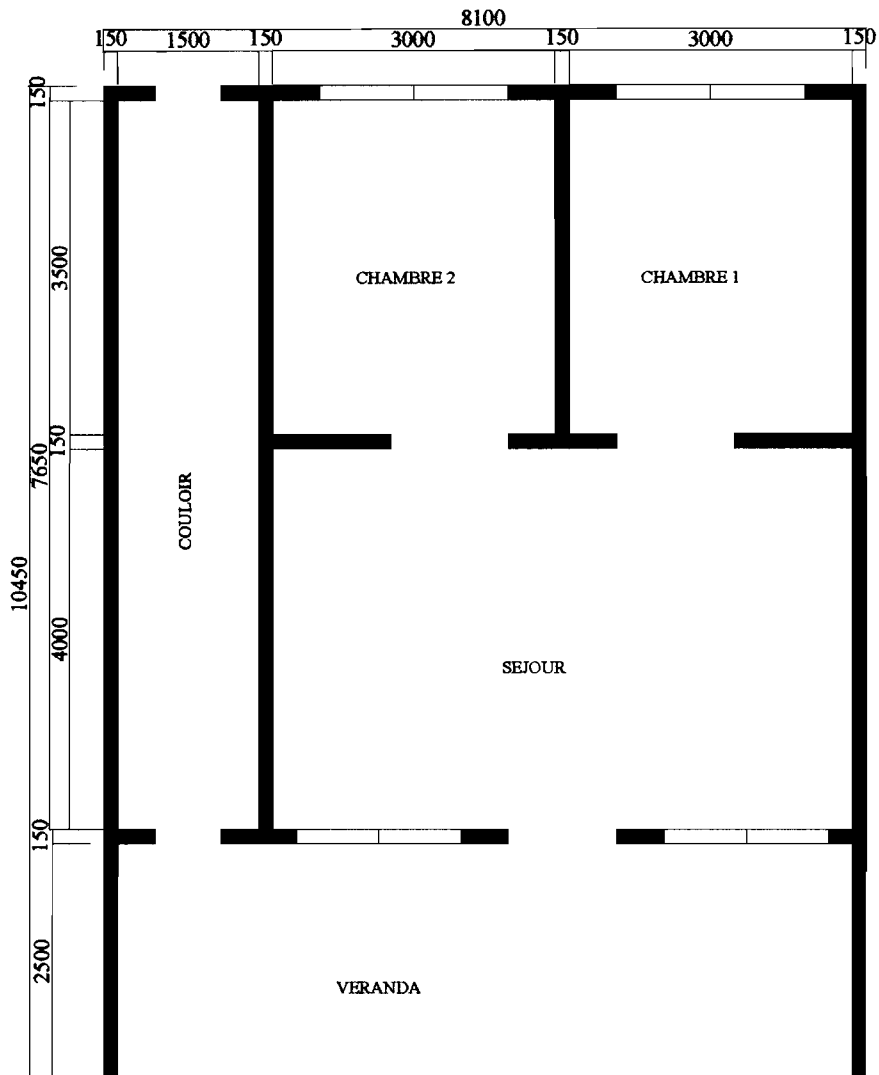
Deuxième étape (cas 2) :

Cas de base avec une protection sur les façades Sud et Ouest : véranda de 2.0m de large sur la façade Sud, couloir de 1.5m de large sur la façade Ouest (voir Plan 2-b)

Au Salon, porte et fenêtres ouvertes à 100% de 7H à 21H ; dans les chambres, les portes sont fermées en permanence et les fenêtres ouvertes à 100%.



Plan n°2-a : Projet de construction ADE-3P



Plan n°2-b : Projet de construction ADE-3P amélioré

Troisième étape (cas 3) :

Fenêtres élargies ouvertes à 100% pendant toute la journée

- Salon : 1.25m × 1.80m
- Chambres : 1.25m × 2.00m

Des impostes sont aménagées au-dessus des portes des chambres ; ils sont ouverts à 50% pendant toute la journée.

Remarque : Intégré à une maison en bande, ce module d'habitation a l'avantage d'être protégé par les autres appartements à l'Est et à l'Ouest.

L'exploitation des nos résultats de simulation a permis de tracer les courbes représentatives des données d'ambiance dans les locaux (température résultante et vitesse d'air) ainsi que du niveau de confort qui en résulte.

Les figures 5.1 et 5.2 représentent l'évolution de la température résultante, la vitesse d'air et la mouillure cutanée dans les locaux, respectivement au salon et dans la chambre 2 (située à l'ouest).

Les figures 5.3-a et 5.3-b comparent l'évolution de la température résultante et de la mouillure cutanée dans la chambre 2 (local 2) suivant le matériau de construction des murs (murs en parpaing creux de 12 cm d'épaisseur crépis sur chaque face, murs en géobéton de 20 cm d'épaisseur).

Les tableaux 5.1 et 5.2 récapitulent les performances thermiques des locaux, l'évolution des conditions d'ambiance et le niveau de confort qui en résulte dans les locaux 2 et 4.

La protection des ouvertures et des murs de façade par la véranda (au sud) et le couloir (à l'ouest) ont permis de réduire les flux solaires dans le local et favorisé la diminution sensible de la température résultante de l'ordre de 0.5°C à 1°C aux heures de pointe de chaleur (voir Tableaux 5.1-a et 5.2-a, page 80).

Les impostes pratiqués au-dessus des portes des chambres et l'agrandissement des ouvertures sur les façades Sud et Nord ont favorisé un courant d'air traversant d'une vitesse pouvant aller jusqu'à 0.70m/s le jour et 0.50m/s la nuit.

Les conditions d'ambiance ainsi adoucies se répercutent sur le confort des usagers des locaux ; en comparant les nouveaux résultats avec ceux relatifs au projet de construction de base, on enregistre une baisse sensible de la mouillure cutanée (voir Tableau 5) :

- au Salon : baisse de 20.8% pendant la journée et de 19.6% la nuit
- dans la chambre : baisse de 21.7% pendant la journée et de 14.6% la nuit.

Le niveau de confort se trouve ainsi amélioré dans les locaux pendant la journée : la mouillure cutanée moyenne est de l'ordre de 6.2% au Salon et de 5% dans la chambre (confort agréable). Le confort est légèrement plus agréable (de jour et de nuit) avec des murs en géobéton de 20cm d'épaisseur (Wet = 6.0%).

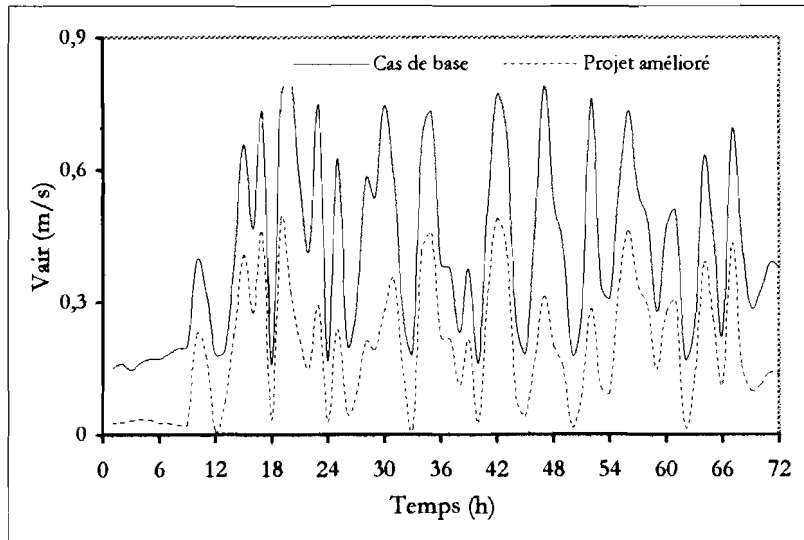


Figure 5.1-a : Vitesse d'air au Salon

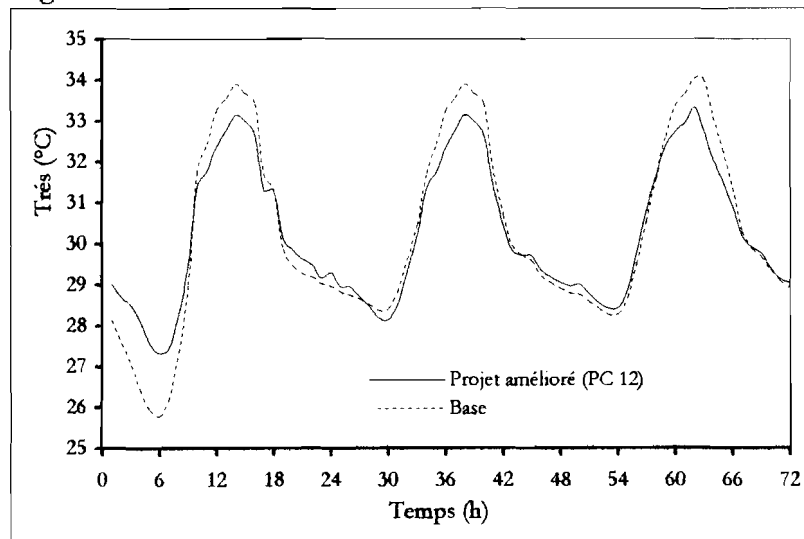


Figure 5.1-b: Evolution de la température résultante au Salon

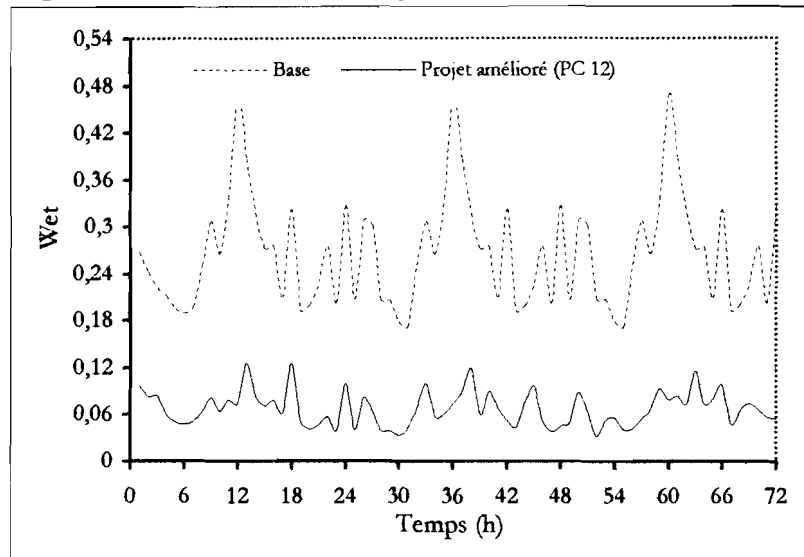


Figure 5.1-c: Amélioration du niveau de confort au Salon

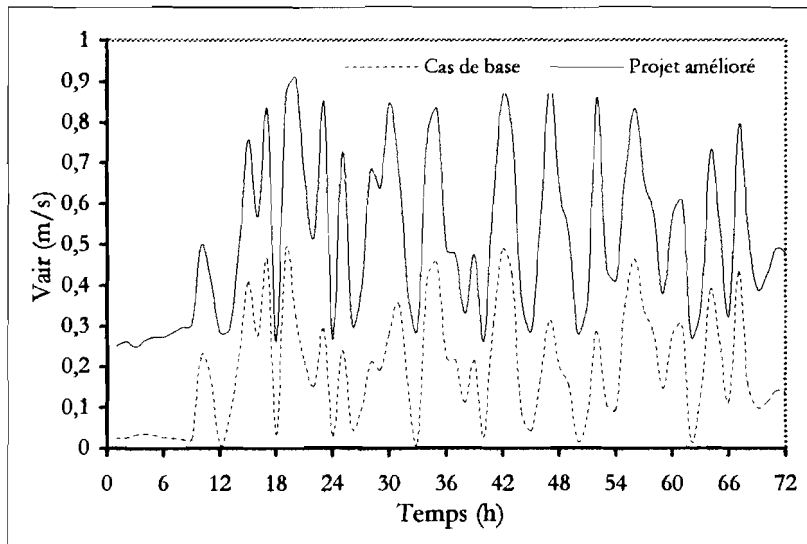


Figure 5.2-a: Vitesse d'air dans le local 2 (chambre 2)

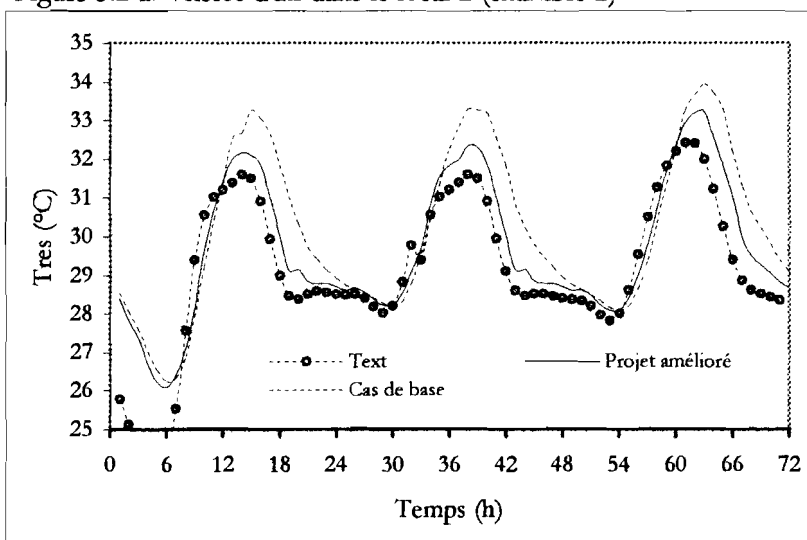


Figure 5.2-b: Température résultante dans le local 2 (chambre 2)

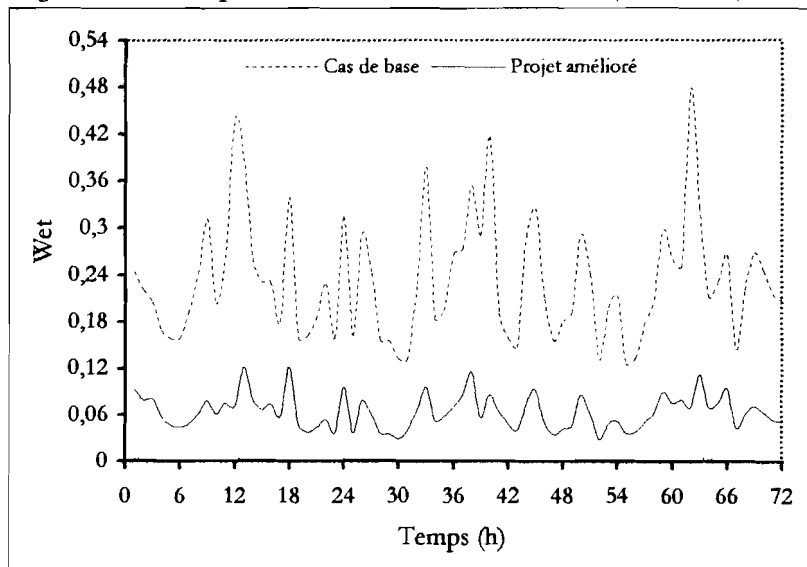


Figure 5.2-c: Amélioration du niveau de confort

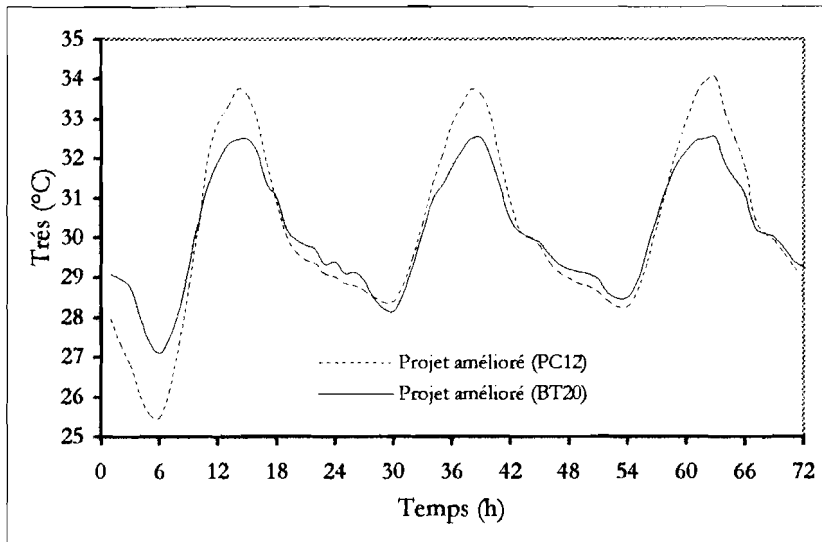


Figure 5.3-a: Température résultante dans le local 4 (Salon)

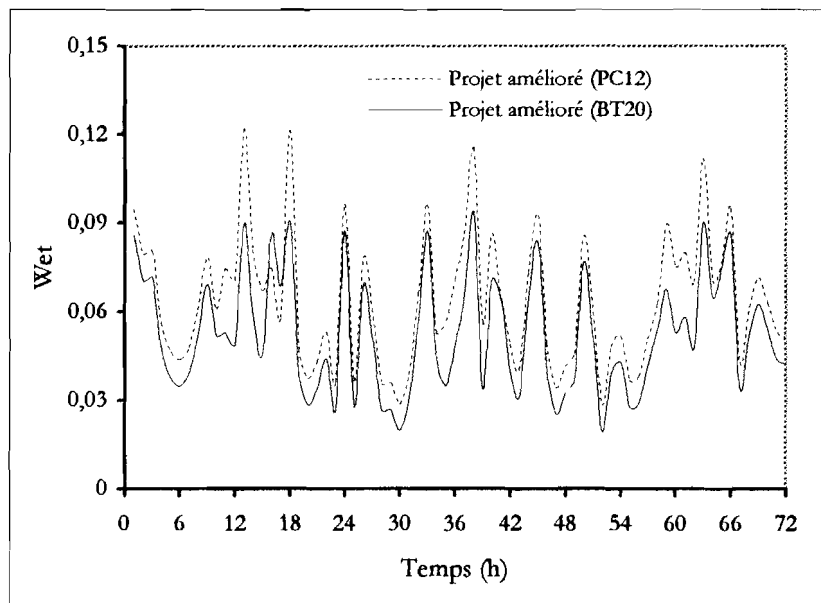


Figure 5.3-b: Niveau de confort au Salon

Tableau 5.1-a : Récapitulation des performances du local 4 (Salon)

	Cas de base	Projet amélioré (PC12)	Projet amélioré (BT 20)
T _{max} (°C)	34	33.2	33.2
T _{int} Jour (°C)	32.5	31.9	31.6
T _{int} Nuit (°C)	29.5	28.3	28.7
T _{min} (°C)	25.5	26	27.1
V _{air} Jour (m/s)	0.38	0.55	0.55
V _{air} Nuit (m/s)	0.34	0.45	0.45
Wet Jour (%)	27	6.2	6.0
Wet Nuit (%)	24	4.4	5.8

Tableau 5.1-b : Synthèse des conditions d'ambiance et du niveau de confort au Salon

Élément d'enveloppe	Facteurs cumulés	T _{int} Jour (°C)	Wet (%)
(0- Température extérieure)		31.2	
Local de référence	Murs d'inertie légère (parpaing creux 12cm) de teinte moyenne ($\alpha=0.5$). Toiture légère. Orientation des façades principales : S/N	32.5	27
Ouvertures et protections solaires	Véranda sur façade Sud (Largeur = 2.5m) Couloir à l'ouest (Largeur=1.5m) Fenêtres moyennes sur les façades Sud et Nord ouvertes à 50% le jour et 100% la nuit	31.9	6.2
Inertie des murs	Murs d'inertie moyenne (béton de terre 20 cm)	31.4	6.0

Tableau 5.2-a : Récapitulation des performances du local 2 (Chambre 2)

	Cas de base	Projet amélioré (PC12)	Projet amélioré (BT 20)
T _{max} (°C)	34	33.6	32.5
T _{int} Jour (°C)	32.7	32.2	32
T _{int} Nuit (°C)	28.3	28.2	28.4
T _{min} (°C)	25.5	26	27.1
V _{air} Jour (m/s)	0.25	0.54	0.54
V _{air} Nuit (m/s)	0.22	0.5	0.5
Wet Jour (%)	28	6.3	6.2
Wet Nuit (%)	20	5.4	4.6

Tableau 5.2-b : Synthèse des conditions d'ambiance et du niveau de confort dans la chambre 2

Elément d'enveloppe	Facteurs cumulés	T _{in} Nuit (°C)	Wet (%)
(0-Température extérieure)		28	
Local de référence			
	Murs d'inertie légère (parpaing creux 12cm) de teinte moyenne ($\alpha=0.5$). Toiture légère. Orientation des façades principales : S/N	28.3	20
Ouvertures et protections solaires	Véranda sur façade Sud (Largeur = 2m) Couloir à l'ouest (Largeur=1.5m). Fenêtres de dimensions moyennes sur les façades Sud et Nord, ouvertes à 50% le jour et 100% la nuit	28.2	5.4
Inertie des murs	Murs d'inertie moyenne (béton de terre de 20cm d'épaisseur)	28.4	4.6

5.2. Etude de cas n°2 : Habitat économique à 4 pièces, type OLA-4P

Le Plan 3-a représente un type d'habitat économique très répandu dans les villes au sud du Bénin. Il comporte une salle servant de séjour qui communique avec un couloir donnant sur les chambres, la salle d'eau et la cuisine. Le couloir sert d'aire de circulation entre deux rangées de locaux sur les façades principales de la construction.

L'étude du comportement thermique de la Construction OLA-4P a été menée en quatre étapes essentielles, pendant la dernière semaine du mois de mars, période très caractéristique de forte chaleur en région tropicale humide. Dans la construction de base, les murs sont en parpaings creux de 12cm d'épaisseur, la toiture en dalle ; les façades principales de la construction sont exposées à l'Est et à l'Ouest.

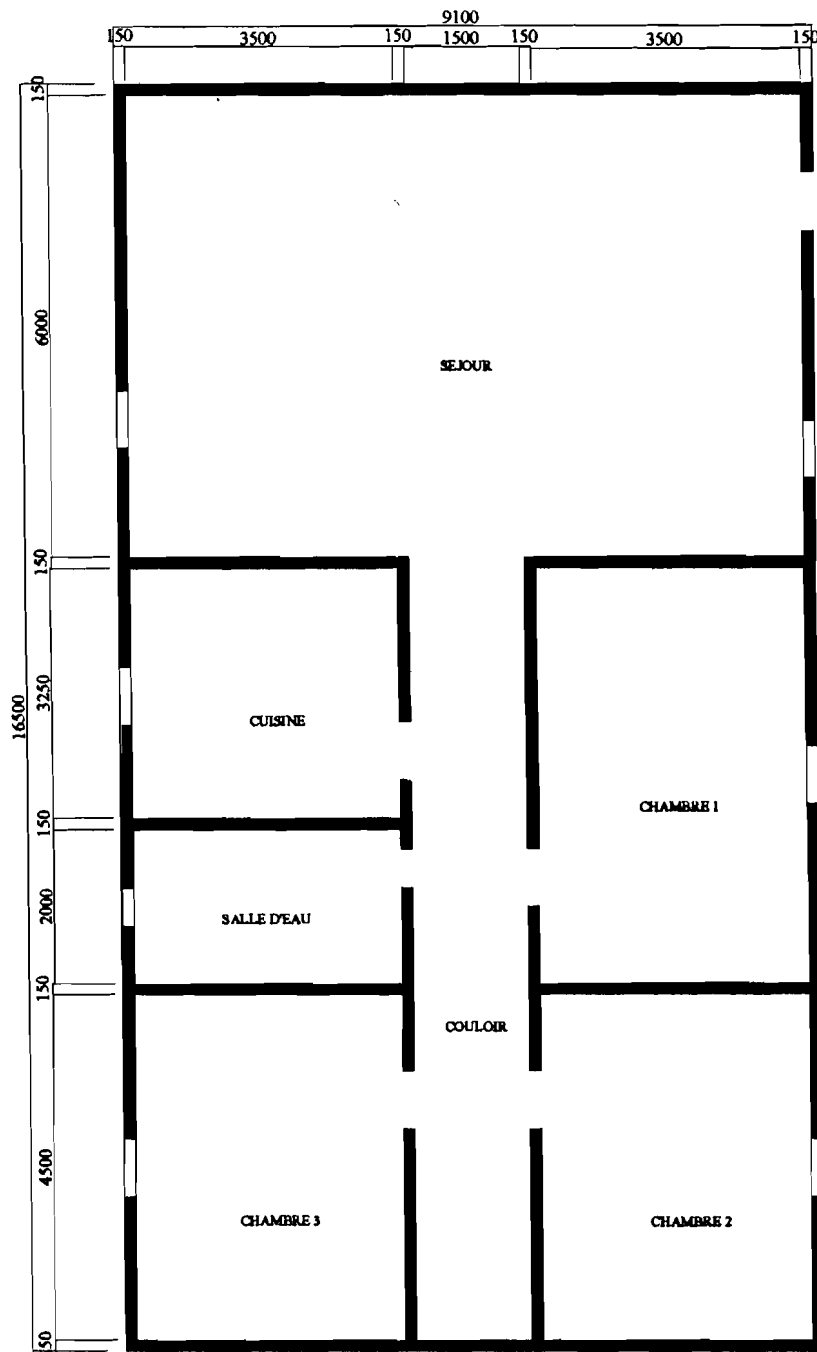
Les paramètres testés sont relatifs à l'orientation des façades principales de la construction, la nature de la toiture, la ventilation (dimensions et disposition des ouvertures), la protection solaire et la nature des matériaux de construction des murs extérieurs.

Cas de base :

Dimensions : 8.80m × 16.5m × 3.0m. Façades principales orientées E/O.

Murs en parpaings creux de 12 cm d'épaisseur, crépis sur chaque face. Toiture terrasse. Dimensions et statut d'ouverture des portes et fenêtres :

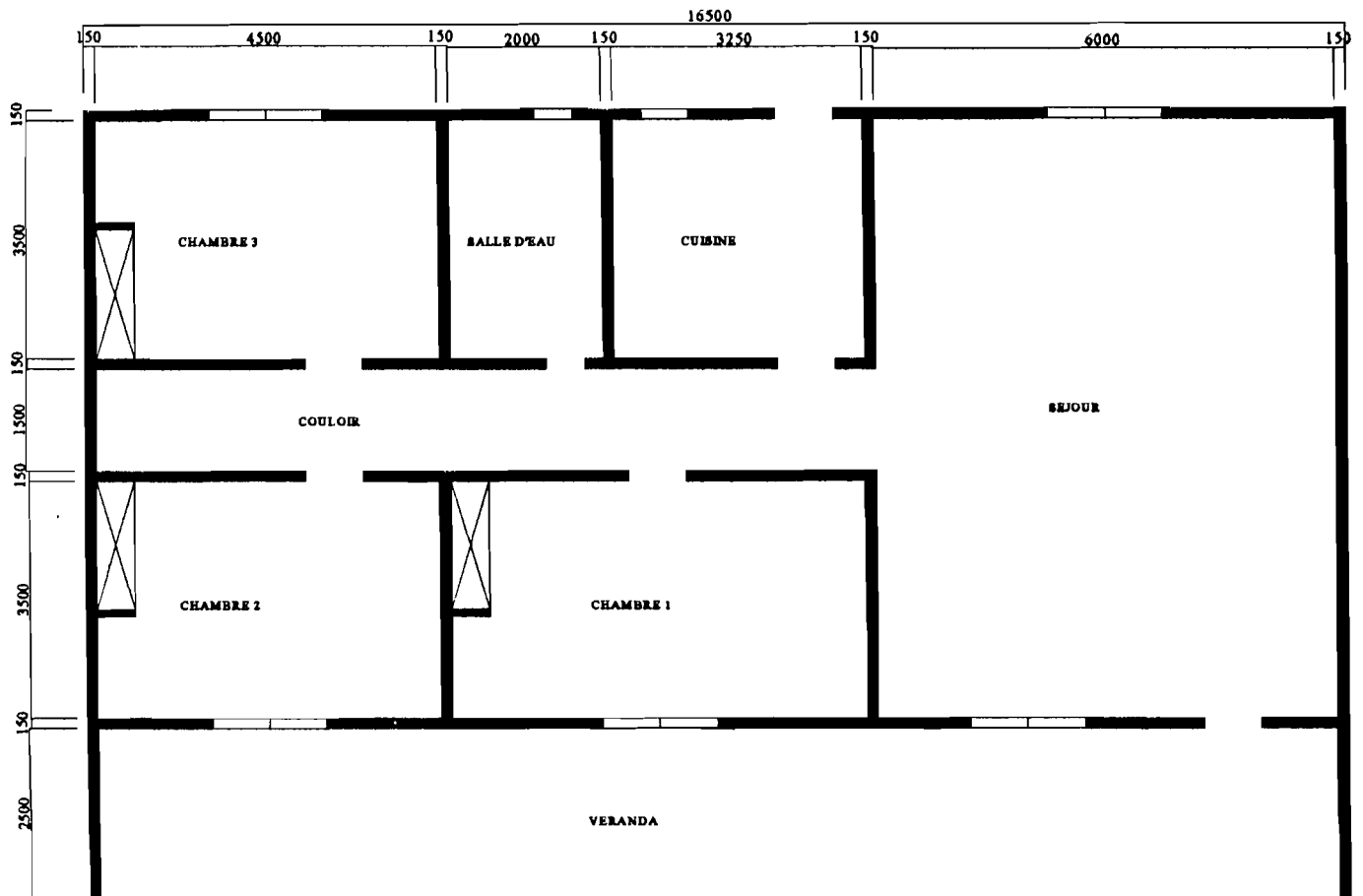
- Au Salon : Porte de 2.05m × 1m ouverte à 100% de 7H à 21H, une fenêtre de 1.25m × 1.20m sur la façade Est (ouverte à 100% de 7H à 21H), une deuxième fenêtre de 1.25m × 2.30m sur la façade Ouest (légèrement entrouverte pendant la journée).



Plan 3-a : Projet de construction OLA-4P

- Dans les chambres, porte de 2.05m × 1.20m fermée en permanence ; fenêtres de 1.25m × 1.80m ouverte à 50% de 7H à 21H.

Cas 2 : Rotation du bâtiment de 90° : façades principales orientées S/N
 Toiture à double versant (Pente = 16°) sur comble ventilé ; ouvertures du comble (s=0.20m² par mètre linéaire) sur les façades principales, couverture en bacs aluminium de teinte moyenne ($\alpha = 0.5$). Faux plafond en contreplaqué de 0.50cm.



Plan 3-b : Projet de construction OLA-4P amélioré

Les chambres 1 et 2 sont exposées au vent et la chambre 3 sous le vent, le séjour est traversé par un courant d'air transversal.

Cas 3 : Protection de la façade Sud par une véranda de 2.0m de large (Voir Plan 3-b). De larges fenêtres (1.25m × 2.10m) sur la façade Sud, ouvertes pendant toute la journée. Même statut d'ouverture que dans le cas de base pour les portes et les autres fenêtres. Des impostes aménagés au-dessus des portes de chambres, ouverts à 50% améliorent la ventilation des locaux ; la sous-face du faux-plafond est ventilé par des orifices pratiqués sur les façades.

Cas 4 : Projet amélioré (cas 3) avec des murs en béton de terre de 20cm d'épaisseur.

Les figures 5.4 et 5.5 représentent l'évolution de la température résultante, la vitesse d'air et la mouillure cutanée dans les locaux, respectivement au salon et dans la chambre 3 ; les tableaux 5.3 et 5.4 récapitulent les performances thermiques des locaux, l'évolution des conditions d'ambiance et le niveau de confort qui en résulte dans les locaux 3 (Salon) et 7 (chambre 3).

Les figures 5.6-a et 5.6-b comparent respectivement l'évolution de la température résultante et de la mouillure cutanée dans la chambre 3 (local 3) suivant la nature du matériau de construction des murs.

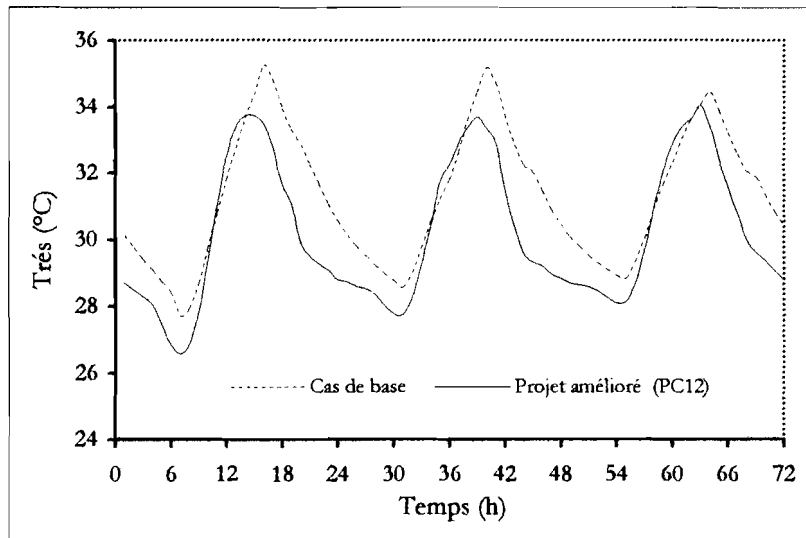


Figure 5.4-a: Température résultante au Salon

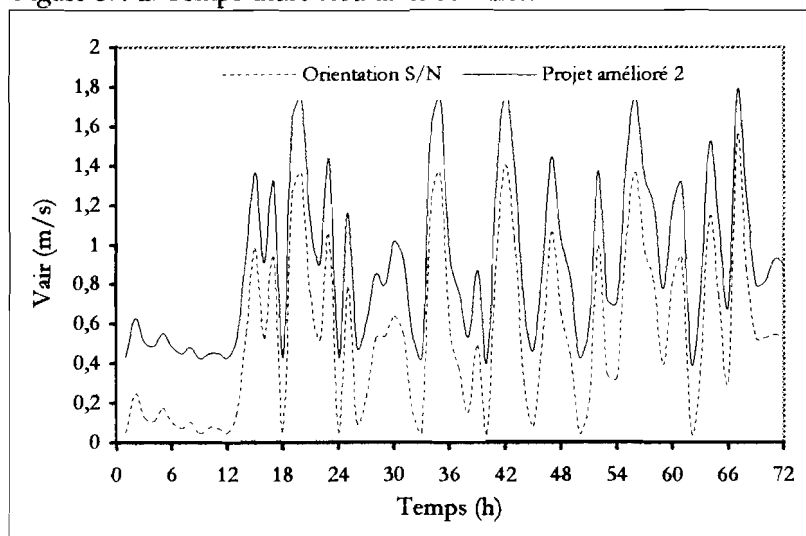


Figure 5.4-b: Vitesse d'air dans le local

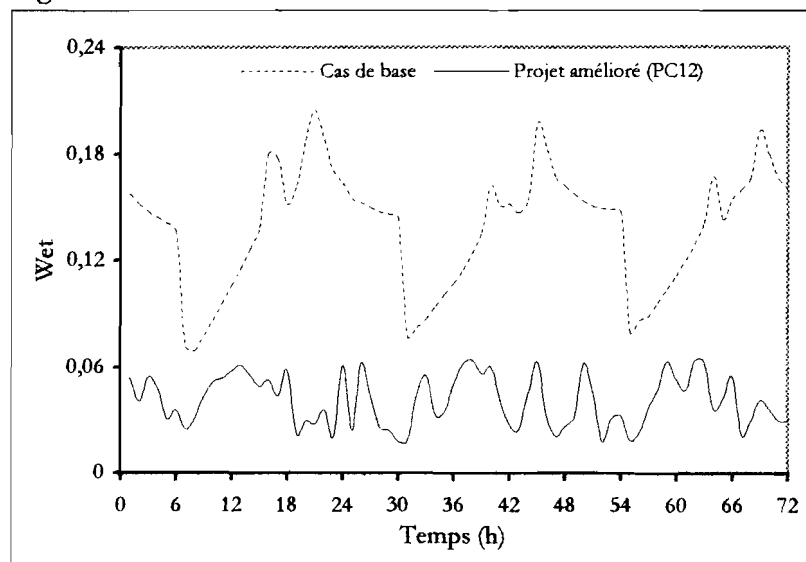


Figure 5.4-c: Niveau de confort au Salon

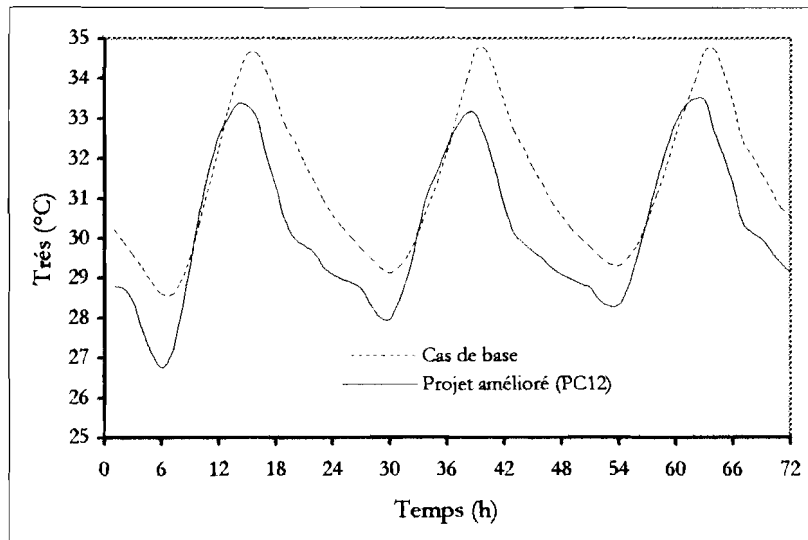


Figure 5.5-a: Température résultante dans la chambre 3

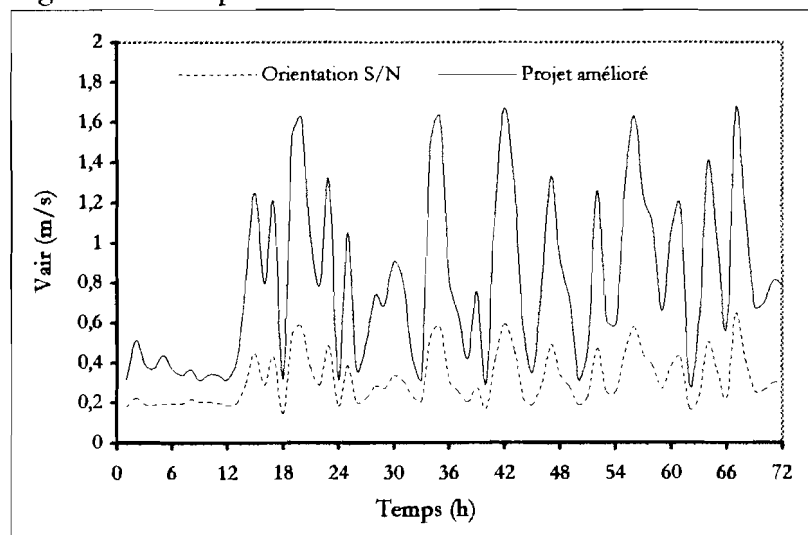


Figure 5.5-b: Vitesse d'air dans la chambre

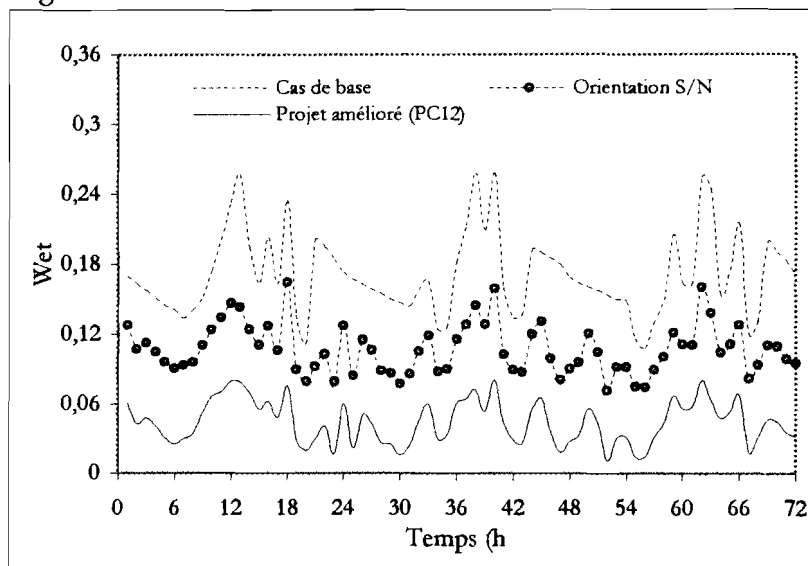


Figure 5.5-c: Niveau de confort dans la chambre

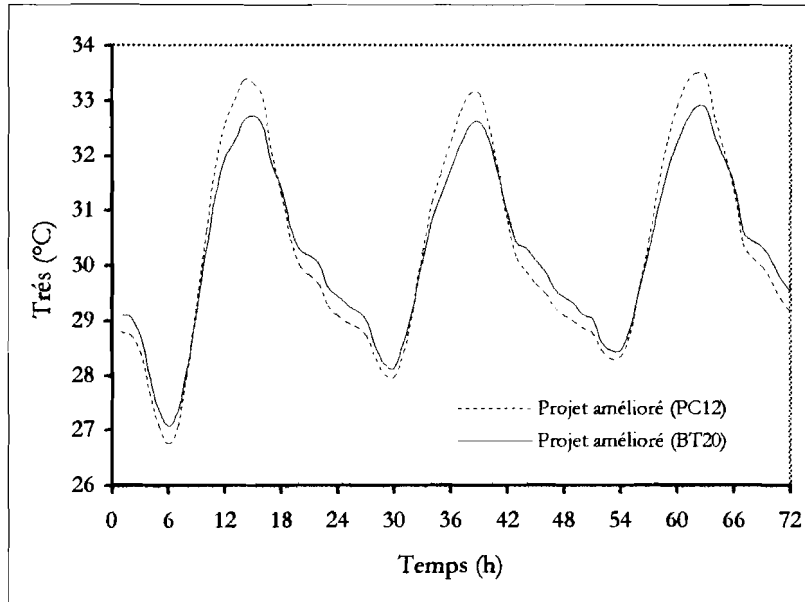


Figure 5.6-a: Température résultante dans la chambre 3

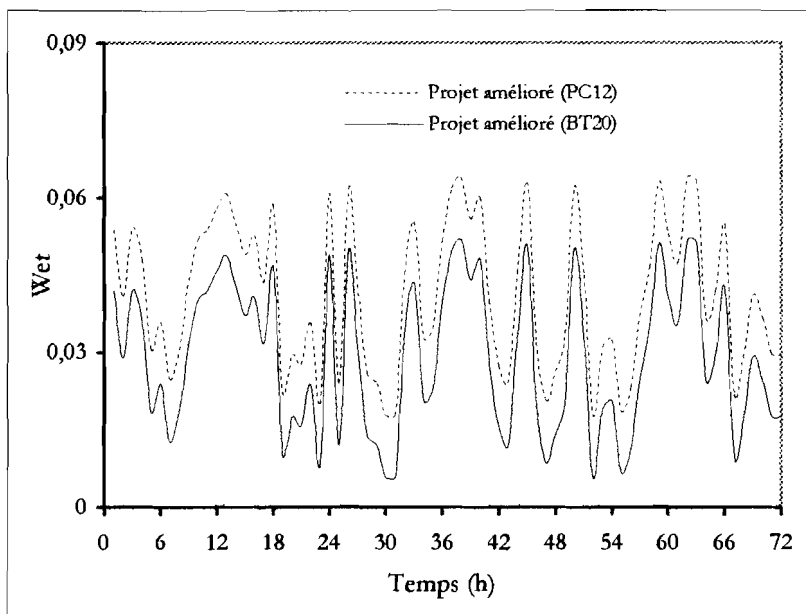


Figure 5.6-b: Amélioration du niveau de confort

Tableau 5.3-a : Récapitulation des performances du local 7 (Salon)

	Cas de base	Cas 2	Cas 3	Cas 4
T_{max} (°C)	35	34.5	34.5	33.3
T_{in} Jour (°C)	33.8	33.3	32.7	32.6
T_{in} Nuit (°C)	29	28.8	28.6	28.5
T_{min} (°C)	27.2	27	27	27
V_{air} Jour (m/s)	0.59	0.66	0.66	0.73
V_{air} Nuit (m/s)	0.11	0.4	0.4	0.4
Wet Jour (%)	12	11	9	6.1
Wet Nuit (%)	10	8.5	6.2	5.4

Tableau 5.3-b : Synthèse de l'amélioration des conditions d'ambiance au Salon

Élément d'enveloppe	Facteurs cumulés	T_{in} Jour (°C)	Wet (%)
(0- Température extérieure)		31.2	
1- Local de référence	Murs en parpaing creux (e=12cm) crépis sur chaque face, de teinte moyenne ($\alpha=0.5$) Toiture-terrasse. Orientation E/O	32.4	13
2- Toiture	Orientation des façades principales : S/N Toiture légère (bac aluminium), de teinte moyenne ($\alpha=0.5$) sur comble ventilé.	32	10.5
3- Ouvertures et protection solaire	Véranda sur façade Sud (Largeur = 2m) Larges fenêtres sur les façades principales, ouvertes à 50% le jour et 100% la nuit. Impostes ventilés au-dessus des portes des chambres	31.8	5.3
4- Inertie des parois	Murs d'inertie moyenne (béton de terre 20 cm)	31.1	4

Les résultats obtenus sont très significatifs :

- Dans le cas de base, les grandes surfaces de paroi ensoleillées sont à l'origine des fortes températures dans les locaux exposés à l'Ouest (salon, chambre 3) ;
- L'effet de la nouvelle orientation de la construction s'est fait sentir dans les locaux par l'augmentation de la vitesse d'air, surtout au Salon et dans les chambres de la façade Sud (en première instance), et la baisse sensible de la température résultante moyenne ;

- La protection de la façade Sud par une large véranda et la ventilation de la face du faux-plafond ont favorisé la diminution sensible de la température résultante de l'ordre de 1 à 3°C aux heures chaudes ;
- Les larges fenêtres sur les façades Sud et Nord, les impostes aménagés au-dessus des portes des chambres et la ventilation complémentaire de la face du faux plafond favorisent un courant d'air traversant d'une vitesse moyenne de l'ordre de 0.80m/s dans les chambres, de jour et de nuit. Ce courant d'air peut être modulé dans les chambres par le réglage des persiennes des fenêtres et des impostes.

Tableau 5.4-a : Récapitulation des performances du local 3 (Chambre 3)

	Cas de base	Cas 2	Cas 3	Cas 4
T _{max} (°C)	33.7	33	34	33
T _{res} Jour (°C)	33.2	32.5	33.1	31.9
T _{res} Nuit (°C)	28.9	28.7	28.6	28.4
T _{min} (°C)	27	27	27	27
V _{air} Jour (m/s)	0.24	0.34	0.50	0.50
V _{air} Nuit (m/s)	0.2	0.24	0.4	0.4
Wet Jour (%)	16	14	12	6.2
Wet Nuit (%)	9	9	6.4	5

Tableau 5.4-b : Synthèse de l'amélioration des conditions d'ambiance dans la chambre 3

Elément d'enveloppe	Facteurs cumulés	T _{res} Nuit (°C)	Wet (%)
(0- Température extérieure)		28	
1- Local de référence	Murs en parpaing creux (e=12cm) crépis sur chaque face, de teinte moyenne (α=0.5) Toiture lourde. Orientation E/O	30.5	16.4
2- Toiture	Orientation des façades principales : S/N Toiture légère (bac aluminium), de teinte moyenne (α=0.5) sur comble ventilé.	29.1	9.8
3- Ouvertures et protection solaire	Véranda sur façade Sud (Largeur = 2m) Larges fenêtres sur les façades Sud et Nord ouvertes à 50% le jour et 100% la nuit. Impostes ventilés sur les portes des chambres	28.7	3.4
4- Inertie des parois	Murs d'inertie moyenne (béton de terre 20 cm)	28.9	2.6

Tous ces facteurs favorisent des conditions d'ambiance bien adoucies et un confort agréable dans les locaux. Le niveau de confort se trouve ainsi amélioré dans les locaux pendant la journée avec une mouillure cutanée moyenne de l'ordre de 5% au Salon et de 6% dans la chambre (confort agréable). Les murs en géobéton favorisent une amélioration complémentaire sensible (température résultante, mouillure cutanée) dans les locaux, tant de jour que de nuit.

5.3. Etude de cas n°3 : Habitat économique à 4 pièces, type BOLA-4P

Le Plan n°4-a représente un type d'habitat économique courant, qui diffère légèrement de la construction OLA-4P par la configuration du Salon/Salle à manger. Le comportement thermique de cette maison a été étudié pendant la première semaine du mois d'Avril (2 au 4 avril). Les paramètres testés sont : la nature de la toiture, la ventilation du comble et la ventilation des locaux.

Cas de base :

Dimensions : 13.5m × 8.80m × 3.0m. Façades principales orientées au Sud et au Nord. Murs en parpaings creux de 12 cm d'épaisseur, crépis sur chaque face. Toiture en dalle sous forme de terrasse.

Dimensions et statut des ouvertures :

- Salon : Porte de 2.05m × 1m ouverte à 100% de 7h à 21h, une fenêtre de 1.25m × 1.60m sur la façade Sud et une autre de 1.25m × 1.00m sur la façade Nord, ouvertes à 100% de 7h à 21h ;
- Chambres : Portes de 2.0m × 0.95m fermées en permanence, Fenêtres de 1.25m × 1 m ouvertes à 100% de 7h à 21h.

Cas 2 : Toiture à double versant (Pente = 16°) sur comble ventilé ; ouverture du comble ($s=0.20\text{m}^2$ par mètre linéaire) sur les façades principales, couverture en bacs aluminium de teinte moyenne ($\alpha = 0.5$). Faux plafond en contreplaqué d'épaisseur 0.50cm.

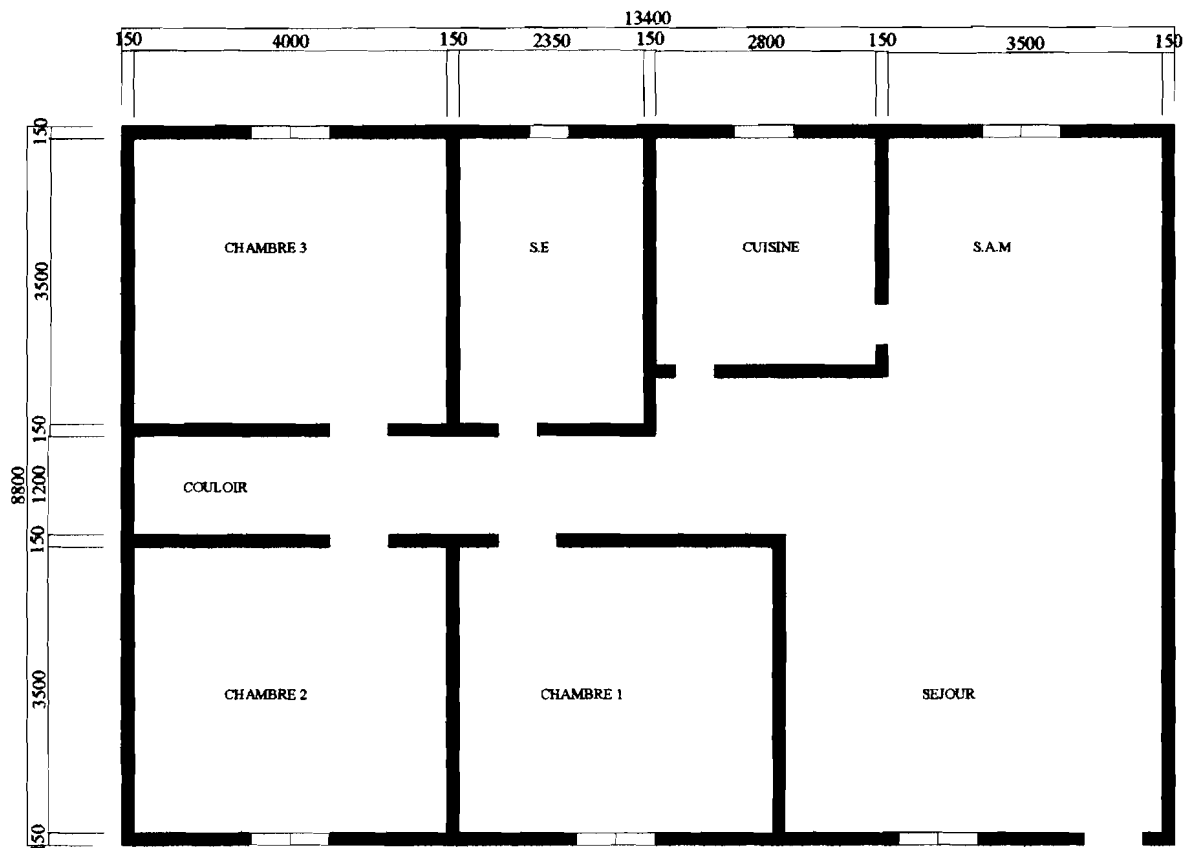
Cas 3 : Le Salon-Salle à manger et la cuisine ont été réaménagés : la salle à manger est fermée sur la façade nord par la cuisine et communique avec une petite terrasse par une porte persiennée sur toute sa hauteur et une fenêtre moyenne (Plan 4-b)

Dimensions et statut des ouvertures :

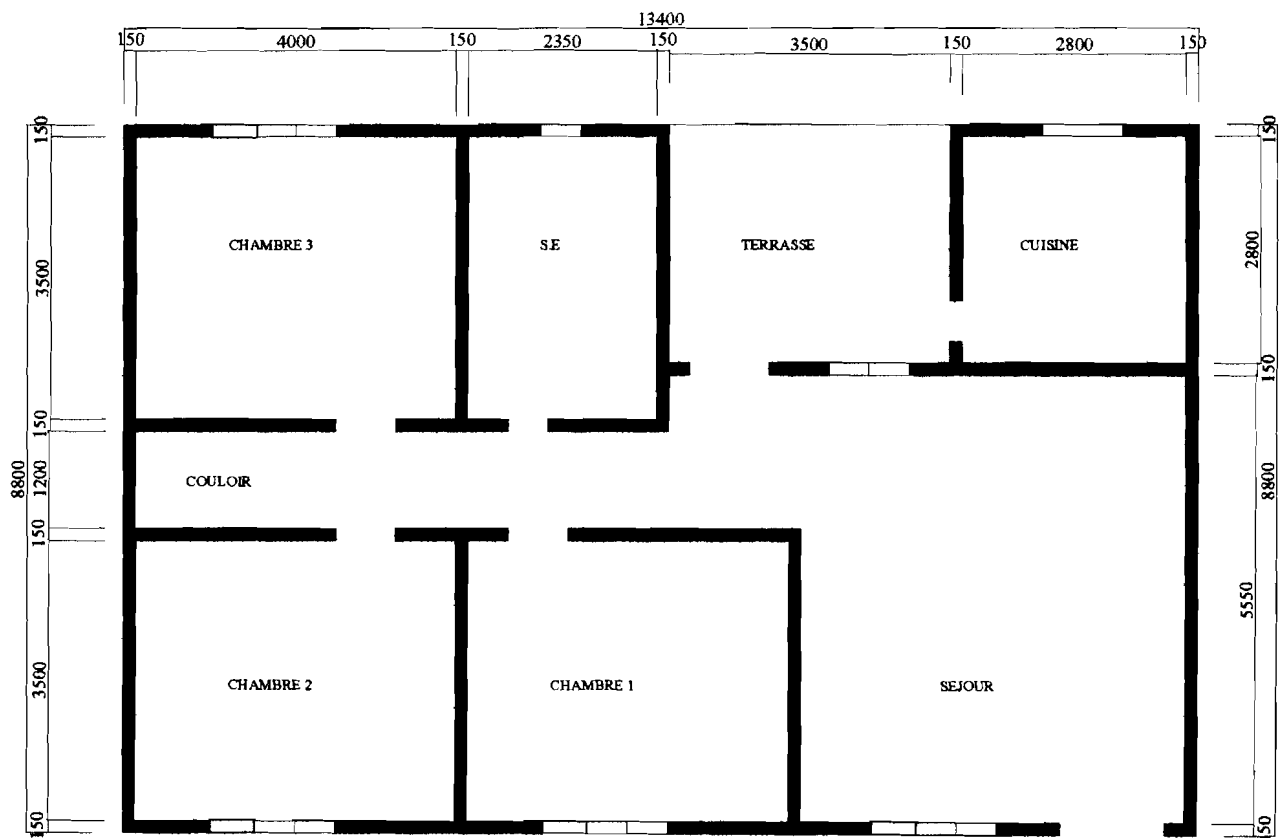
- Salon : Porte de 2.05m × 1.8m ouverte à 100% de 7h à 21h, une fenêtre de 1.25m × 2.00m sur la façade Sud et une autre de 1.25m × 1.60m donnant sur la petite terrasse, ouvertes en permanence ;
- Chambres : Portes de 2.0m × 0.95m fermées en permanence, impostes ventilés au-dessus des portes ouverts en permanence ; fenêtres de 1.25m × 1.20m ouvertes en permanence.

Cas 4 : Les fenêtres de la façade Sud sont ouvertes à l'italienne pendant toute la journée.

Les figures 5.7 et 5.8 présentent l'évolution de la température, la vitesse d'air et la mouillure cutanée dans les locaux, respectivement au salon et dans la chambre 3.



Plan 4-a : Projet de construction BOLA-4P



Plan n°4-b : Projet de Construction BOLA amélioré

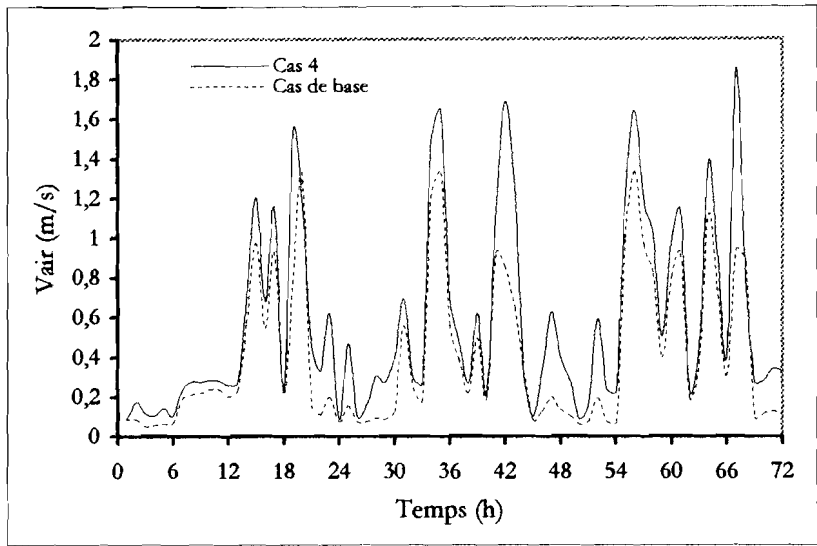


Figure 5.7-a: Vitesse d'air dans le local

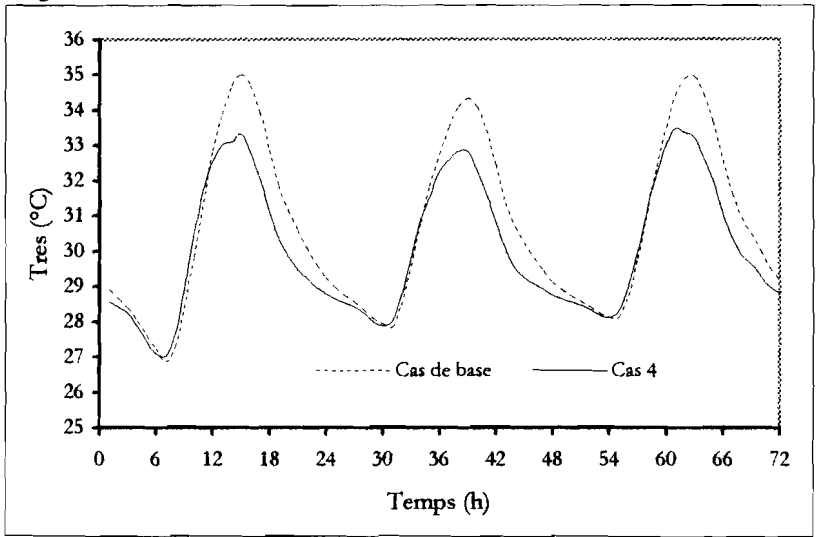


Figure 5.7-b: Température résultante

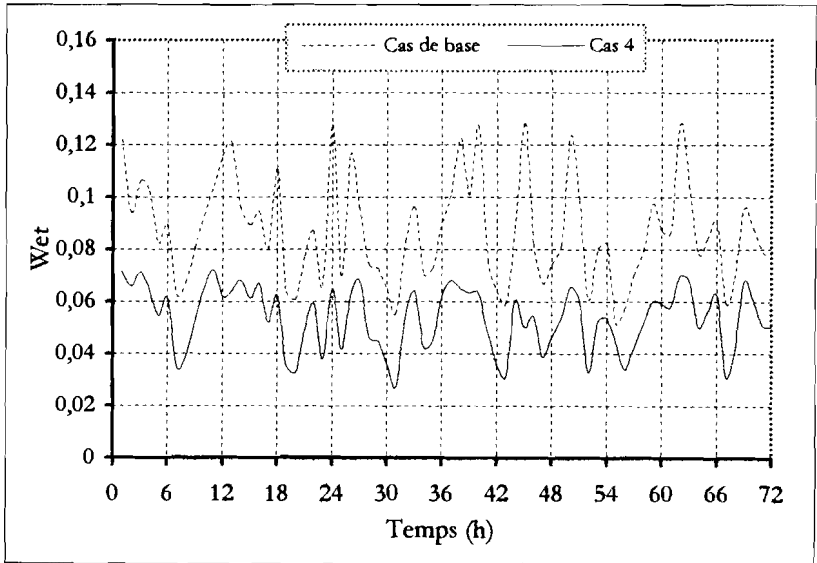


Figure 5.7-c: Niveau de confort au Salon

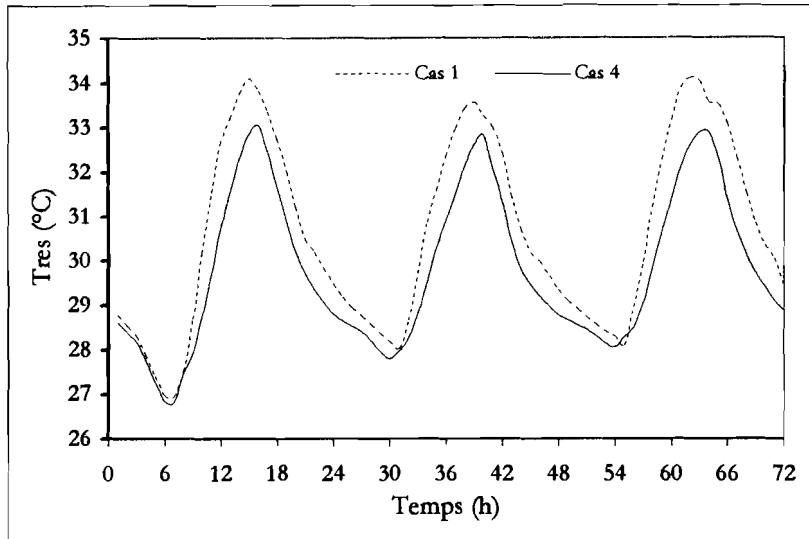


Figure 5.8-a: Température résultante dans la chambre

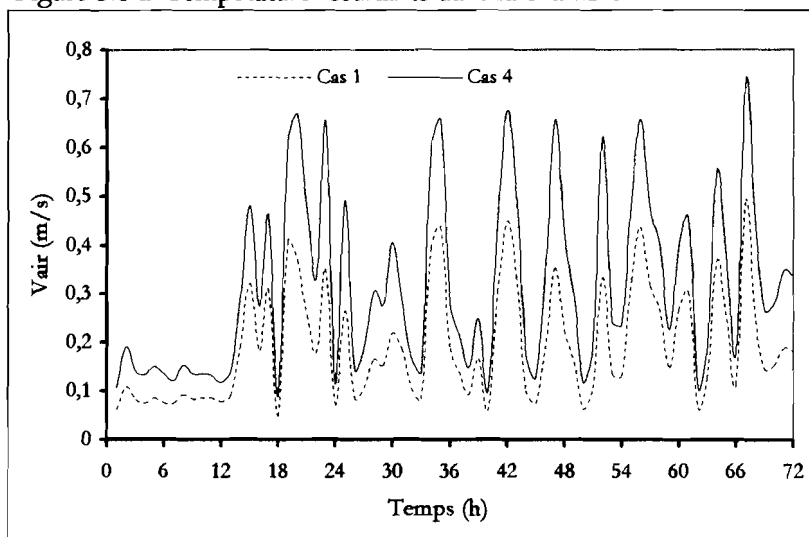


Figure 5.8-b: Vitesse d'air dans le local

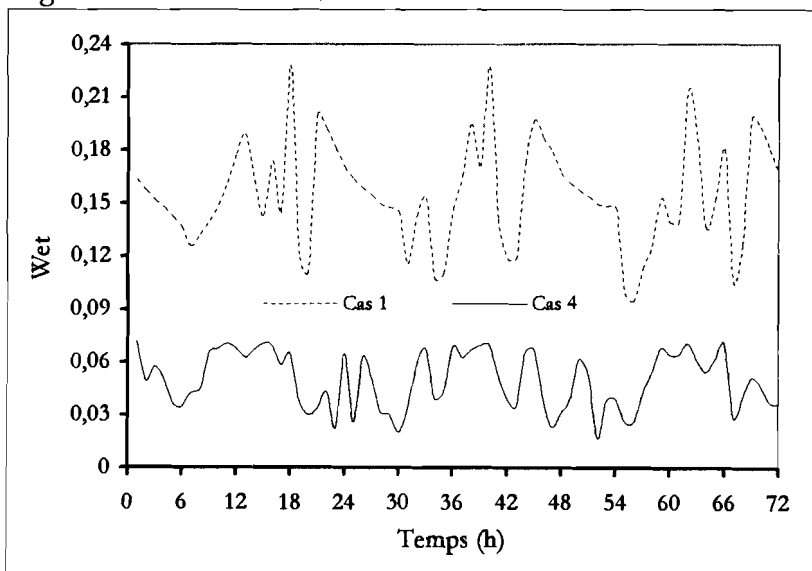


Figure 5.8-c: Niveau de confort dans la chambre 3

Les tableaux 5.5-a et 5.5-b récapitulent les performances thermiques des locaux, l'évolution des conditions d'ambiance et le niveau de confort qui en résulte au Salon et dans la chambre 3.

Tableau 5.5-a : Récapitulation des performances du local 7 (Salon)

	Cas de base	Cas 2	Cas 3	Cas 4
T_{max} (°C)	35	34.5	34.5	33.3
T_{res} Jour (°C)	33.8	33.3	33.6	32.6
T_{res} Nuit (°C)	29	28.8	28.6	28.5
T_{min} (°C)	27.2	27	27	27
V_{air} Jour (m/s)	0.59	0.66	0.73	0.73
V_{air} Nuit (m/s)	0.11	0.4	0.4	0.4
Wet Jour (%)	10	11	9	6.1
Wet Nuit (%)	12	8.5	6.5	5.4

Tableau 5.5-b : Récapitulation des performances du local 3 (Chambre 3)

	Cas de base	Cas 2	Cas 3	Cas 4
T_{max} (°C)	33.7	34	33	33
T_{res} Jour (°C)	33.2	33.1	32.5	31.9
T_{res} Nuit (°C)	28.9	28.6	28.7	28.4
T_{min} (°C)	27	27	27	27
V_{air} Jour (m/s)	0.24	0.34	0.50	0.50
V_{air} Nuit (m/s)	0.2	0.2	0.4	0.4
Wet Jour (%)	16	14	9	6.2
Wet Nuit (%)	9	9	7	5

La combinaison des dispositifs mis en œuvre pour améliorer la ventilation des locaux et réduire les charges thermiques à travers la toiture a permis de diminuer de façon remarquable la température résultante dans les locaux et d'améliorer ainsi le confort humain : au salon, les ouvertures sur la petite terrasse créent un courant d'air (effet venturi) dont les effets sont remarquables tant sur la température résultante que sur le niveau de confort dans le local (Figures 5.7 et Tableau 5.5-a) ; dans les chambres, l'agrandissement des fenêtres et l'aménagement des impostes au-dessus des portes favorisent une meilleure ventilation des locaux, et par conséquent, de meilleures conditions d'ambiance et un niveau de confort agréable (Figures 5.8 et Tableau 5.5-b).

5.4. Etude de cas n°4 : Habitat économique à 4 pièces, type SHEGUN-4P

Le Plan 5 représente un type d'habitat économique courant au Bénin, en milieu urbain ou rural. Il comporte une grande salle servant de séjour et de salle à manger, ouverte sur les deux grandes façades de la construction, qui communique avec les chambres situées de part et d'autre.

Cas 1 :

Dimensions : 14.0m × 14.95m × 3.0m. Façades principales au Sud et au Nord, Murs en parpaings creux de 12 cm d'épaisseur, crépis sur chaque face.

Dimensions et statut des ouvertures :

- Salon : Portes de 2.05m × 1.8m ouvertes à 100% de 7h à 21h, fenêtres de taille moyenne (1.25m × 1.80m) ouvertes en permanence ;
- Chambres : Portes de 2.05m × 1.1m, fermées en permanence ; Fenêtres de 1.25m × 2.0m toujours ouvertes.

Les fenêtres en bois, persiennées, sont ouvertes à l'italienne.

Cas 2 :

Les murs sont en béton de terre de 20cm d'épaisseur.

Ce logement possède une particularité intéressante pouvant être exploitée en climatisation naturelle : le local central (Séjour-Salle à manger) constitue un artère de circulation d'air (ventilation transversale) capable de desservir les chambres par le jeu des pressions et dépressions.

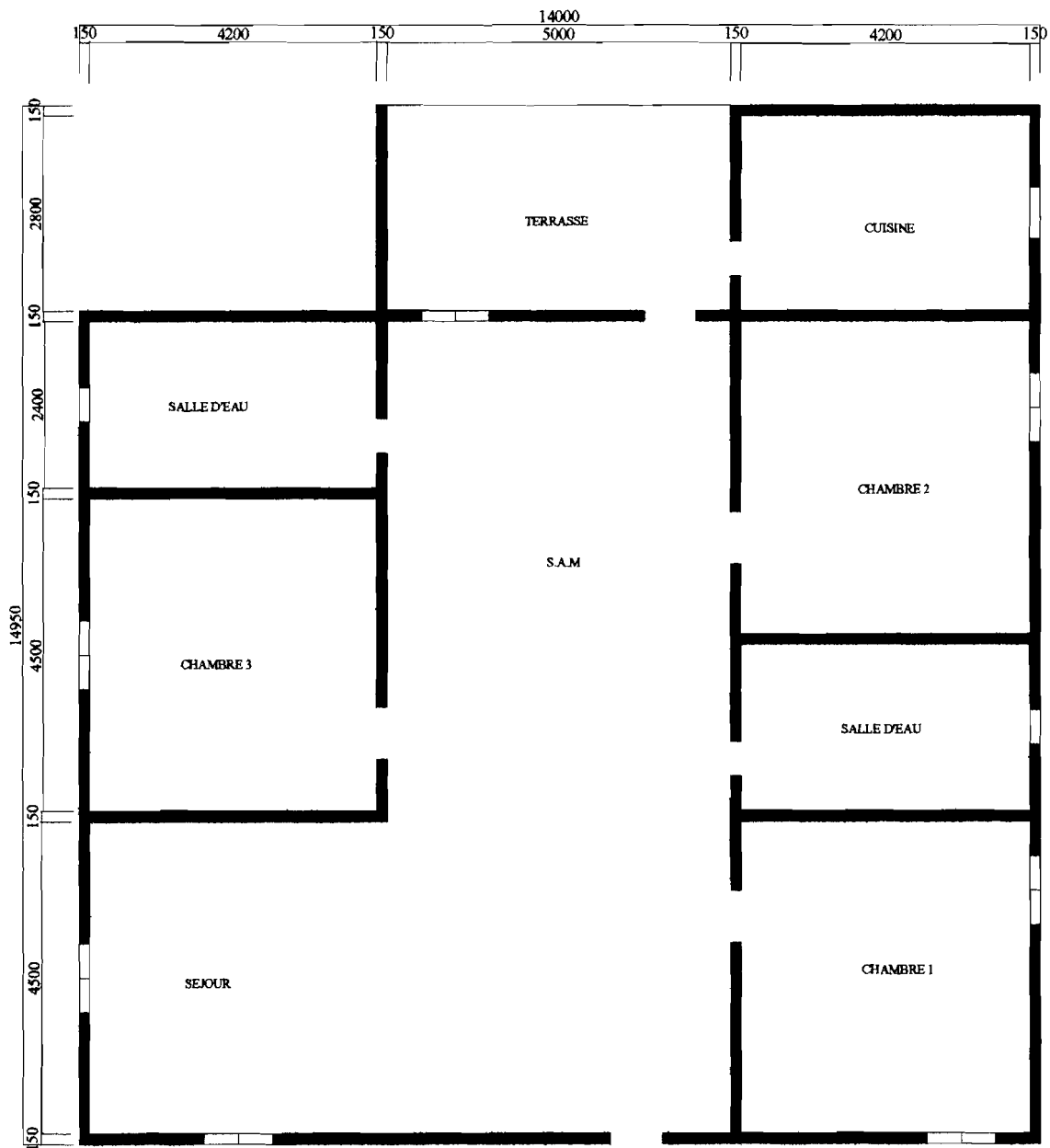
Dans la configuration courante, la ventilation des chambres rencontre quelques obstacles : le séjour et la salle à manger sont généralement séparés par des murets qui constituent de véritables obstacles pour l'écoulement d'air dans les locaux surtout lorsque la position des portes et fenêtres des chambres n'est pas appropriée ; ce qui est généralement le cas. Ces dispositions présentent l'inconvénient majeur d'empêcher la ventilation efficace des chambres.

On peut y remédier en supprimant les murets, en choisissant pour les chambres des portes persiennées sur toute leur hauteur et en adoptant une disposition des ouvertures en opposition diagonale afin de favoriser un meilleur balayage de la position probable de couchage par le courant d'air.

Le tableau 5.6 récapitule les performances thermiques des locaux, l'évolution des conditions d'ambiance et le niveau de confort qui en résulte.

Les figures 5.9-a et 5.9-c représentent respectivement l'évolution de la température et de la mouillure cutanée au Salon suivant la nature des matériaux de construction des murs ; la figure 5.9-b compare l'évolution de la vitesse d'air au Salon et dans la Chambre 3.

Les figures 5.10-a et 5.10-b représentent respectivement l'évolution de la température résultante et de la mouillure cutanée au Salon suivant la nature des matériaux de construction des murs.



Plan n°5 : Projet de construction SHEGUN-4P

Tableau 5.6 : Récapitulation des performances des locaux (Salon et Chambre 3)

	Salon		Chambre 3	
	PC 12	BT 20	PC 12	BT 20
T_{max} (°C)	31.6	31.4	31.5	31
T_{res} Jour (°C)	31.1	30.9	31	30.7
T_{res} Nuit (°C)	28.5	28.9	28.7	29
T_{min} (°C)	27.1	27.9	27.3	27.8
V_{air} Jour (m/s)	1.1	1.1	0.67	0.67
V_{air} Nuit (m/s)	0.88	0.88	0.48	0.48
Wet Jour (%)	5.3	4.1	5	4
Wet Nuit (%)	3.6	2.6	3.2	2.2

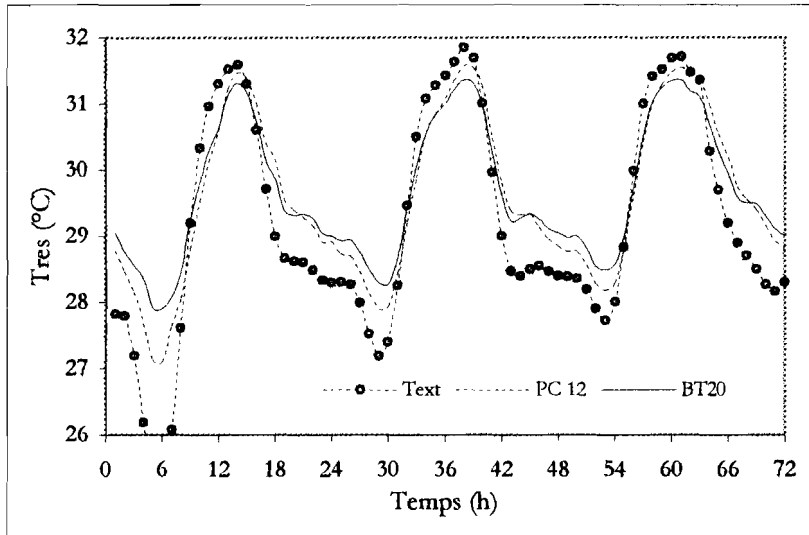


Figure 5.9-a: Température résultante dans le local

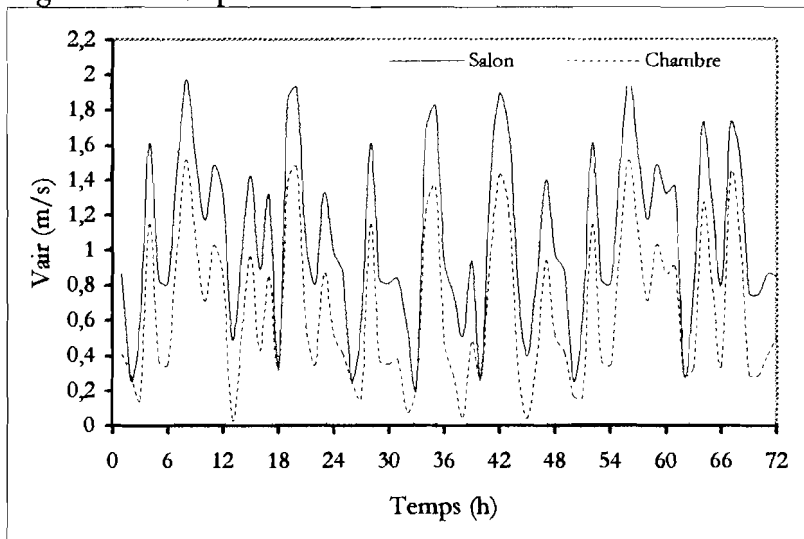


Figure 5.9-b: Vitesse d'air dans les locaux

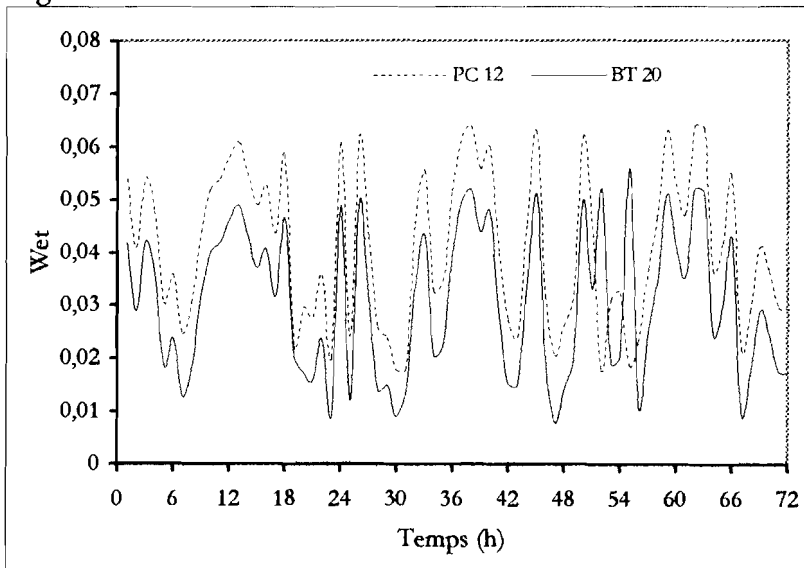


Figure 5.9-c: Niveau de confort au Salon suivant la nature des murs

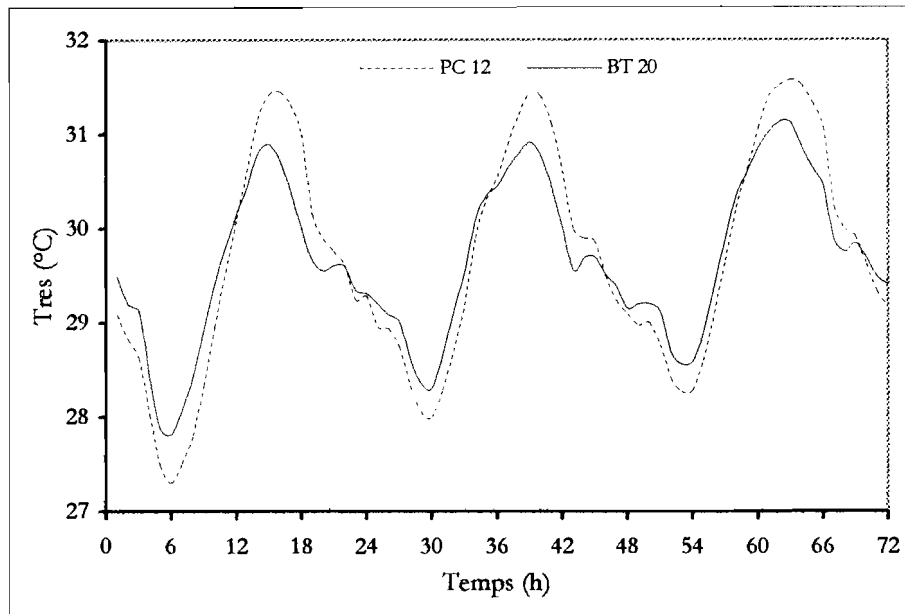


Figure 5.10-a: Température résultante suivant la nature des murs

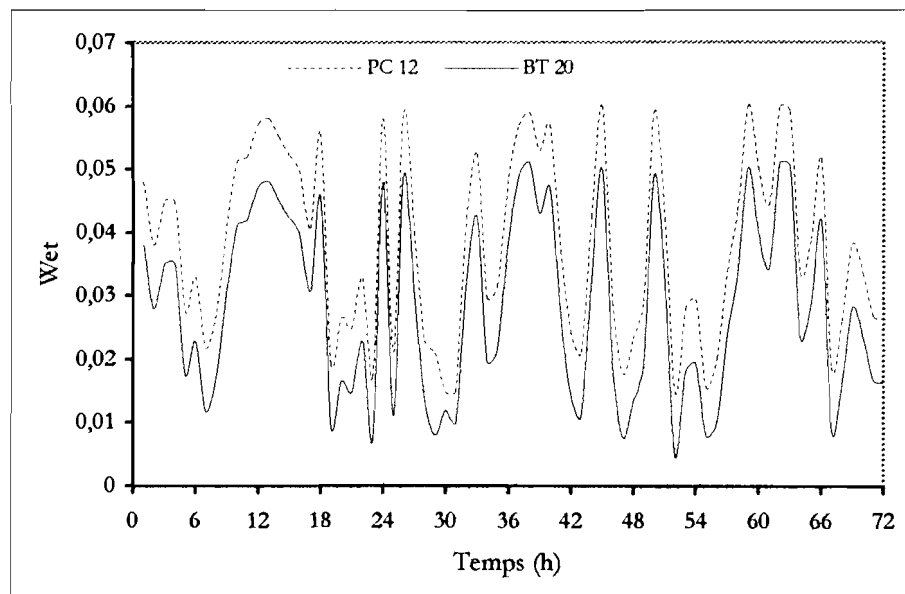


Figure 5.10-b: Niveau de confort suivant la nature des murs

Dans les conditions du site de notre étude, ce type de logement donne des résultats bien satisfaisants :

- les courbes représentatives de l'évolution de la température résultante dans les locaux montrent que celle-ci est inférieure à la température extérieure aux heures chaudes de la journée ;
- les vitesses d'air atteintes dans les locaux sont de l'ordre de 1.1m au Salon et de 0.70m/s dans la chambre le jour ;
- le confort ressenti dans les locaux est invariablement agréable le jour et la nuit.

Ce modèle d'habitation allie les avantages d'une bonne protection des ouvertures à ceux d'une ventilation efficace des locaux pendant les heures chaudes de la journée, conditions essentielles de confort dans l'habitat en région tropicale humide. Compte tenu des résultats obtenus, il est recommandable pour le site de Cotonou et ses environs et pour toute la région sud du Bénin, pour autant que le régime des vents est favorable (site bien venté).

**CHAPITRE 6 : RECOMMANDATIONS POUR DES
CONSTRUCTIONS ADAPTEES AU CLIMAT**

6.1- Solutions de confort dans l'habitat

Dans la région sud du Bénin, les meilleures conditions de confort en climatisation naturelle correspondent à une température intérieure voisine de celle régnant à l'extérieur à l'ombre d'un arbre, à la pénétration des rayons solaires limitée au strict éclairage naturel nécessaire et à une vitesse d'air moyenne au moins égale à 0.5m/s ; la vitesse d'air nécessaire pour le confort des occupants est d'autant plus grande que l'écart de température entre les ambiances intérieures des locaux et l'extérieur est élevé.

Pour réunir ces conditions, il convient de concevoir les constructions de manière à leur assurer une protection efficace vis à vis de l'ensoleillement direct et favoriser la ventilation transversale permanente des locaux.

6.1.1. Protection des constructions

Le rayonnement solaire intense en région tropicale explique l'importance des flux thermiques reçus par les parois des constructions en période chaude, notamment au niveau de la toiture et sur les murs exposés au Sud, à l'Est et à l'Ouest.

On dispose de trois principales méthodes pour empêcher le transfert de la chaleur due au rayonnement solaire à travers l'enveloppe des constructions ; elles consistent à :

- bloquer les flux solaires avant qu'ils atteignent les parois (écrans, masques) ;
- empêcher les parois d'absorber le rayonnement solaire s'il les atteint (revêtements réfléchissants : peintures claires) ;
- freiner voire empêcher le transfert de chaleur à travers la paroi si le rayonnement est absorbé par la surface extérieure de celle-ci (inertie des parois, isolation).

Les dispositifs de protection les plus courants sont les auvents horizontaux placés au-dessus des ouvertures. Ils ont l'avantage d'empêcher les rayons solaires de pénétrer les locaux par les ouvertures, de créer des zones d'ombre sur les parois sans compromettre la ventilation et sans gêner la visibilité. Les vérandas traditionnelles (auvents de grande portée) sont un excellent exemple dont l'efficacité est prouvée sur toutes les façades des constructions.

Les écrans verticaux parallèles aux murs, disposés à environ 30cm des parois (dispositifs de bardage thermique), avec des espaces bien ventilés entre les parois et les écrans, ou de grands arbres plantés devant les murs exposés au soleil assurent une excellente protection des constructions vis à vis du rayonnement solaire.

Une organisation judicieuse des locaux permet aussi d'éviter l'exposition directe des murs des pièces habitées aux rayons solaires : les pièces à occupation secondaire (garage, magasin, toilettes, espaces de rangement, cage d'escalier, etc.) où les besoins de confort sont moins prioritaires doivent être situées à l'ouest pour servir de zones tampons.

6.1.2. Ventilation des locaux

En laissant communiquer les locaux avec l'extérieur, on profite du courant d'air ainsi créé pour réaliser les conditions optimales de confort.

La bonne ventilation de l'habitat dépend de plusieurs facteurs :

- le potentiel de vent sur le site,
- l'environnement immédiat de la construction (végétation, environnement bâti),
- la position de la construction sur le terrain,
- l'organisation du plan dans le cadre de constructions groupées,
- l'architecture et l'orientation de la construction,
- l'aménagement intérieur (disposition des ouvertures, des cloisons et des locaux).

C'est le potentiel de vent effectif sur le site que l'on doit exploiter pour la conception des constructions en vue d'assurer aux occupants un niveau de confort acceptable par la ventilation naturelle des locaux.

Dans la région sud du Bénin, le régime des vents ($3\text{m/s} < V_{\text{moy}} < 5\text{m/s}$ à Cotonou et ses environs) est suffisant pour une ventilation efficace des locaux pendant les périodes chaudes de l'année ; il convient donc d'envisager, à la phase de conception des constructions, les solutions architecturales pouvant favoriser un courant d'air transversal de l'ordre de 0.5 à 1m/s dans les locaux :

- orienter les constructions en fonction de la ventilation : la disposition la plus efficace est celle qui place les grandes façades face aux vents dominants ; ici elles doivent être orientées au Sud et au Nord ou au Sud-Ouest et au Nord-Est ;
- une fois l'orientation choisie, la ventilation est d'autant plus efficace que l'air peut traverser librement les locaux ;
- les schémas d'irrigation associés à l'implantation des ouvertures doivent balayer directement la zone de confort visée ; les ouvertures réglables (fenêtres à persiennes en bois ou en vitrage de type Naco) permettent de moduler la ventilation en fonction des besoins, suivant la géométrie de la construction et l'implantation des portes et cloisons, et favorisent la ventilation efficace à tous les points d'une pièce en dirigeant correctement les filets d'air vers les zones où cela est nécessaire.

De façon générale, si l'on se place du seul point de vue de la ventilation naturelle, il y a intérêt à prévoir le maximum d'ouvertures sous réserve d'une protection efficace des façades contre l'ensoleillement direct.

6.1.3. Inertie des parois

En climatisation naturelle où la température de l'air du local est très liée à celle de l'air extérieur, l'inertie thermique d'un local modifie d'autant plus les conditions de confort que la ventilation est faible. Dans les conditions limites de confort, l'inertie peut jouer un rôle favorable ou défavorable suivant le mode d'occupation des locaux (occupation diurne, occupation nocturne).

Dans une habitation mal protégée contre l'ensoleillement, une forte inertie des parois (toiture-terrasse, murs de forte inertie) est défavorable pour le confort de nuit ; le jour, on y enregistre une température inférieure par rapport aux conditions extérieures mais la nuit elle est supérieure à celles-ci d'environ 1 à 2°C. Une forte inertie n'est donc avantageuse que pour des locaux à occupation diurne.

Par contre, une habitation à parois légères (faible inertie), bien protégée du soleil et disposant d'une ventilation efficace, est confortable à tout moment.

Dans la région sud du Bénin, aux heures chaudes de la journée, on peut donc compter sur une ventilation efficace des locaux pour atténuer voire annuler les effets de la chaleur transmise par les parois légères et créer les conditions d'un confort agréable. Par conséquent les constructions légères, préférables pour le confort de nuit, ne présentent que peu d'inconvénients pendant la journée.

6.2. Synthèses constructives :

Paramètres et composantes de la construction	Recommandations	Solutions techniques
1- Dispositions générales		
Environnement bâti	<p>Améliorer l'environnement immédiat des constructions :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fournir le maximum d'ombrage de manière à réduire les gains de chaleur - Favoriser les déplacements d'air autour des constructions 	<ul style="list-style-type: none"> - Pour marquer les limites de la propriété, choisir des clôtures ou des écrans perforés qui bloquent la vue mais pas le passage de l'air - Végétation haute dans un rayon de 4 à 6 mètres autour des maisons - Disposer les maisons en quinconce pour diminuer l'effet de masque et réduire les zones de dépression
Environnement extérieur proche	<p>Prévoir un environnement paysager afin de réduire les gains thermiques par les murs et les ouvertures et accroître la circulation d'air</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Végétation haute dans un rayon de 4 à 6 mètres autour des maisons - Disposer les maisons en quinconce pour diminuer l'effet de masque et réduire les zones de dépression - Lorsque les constructions sont disposées suivant une grille rectiligne, prévoir une distance suffisante entre des constructions voisines pour éviter l'effet de masque des constructions en amont du vent sur celles situées en aval (espace six fois supérieur à la hauteur d'une construction)
Orientation des constructions	<p>Orienter les constructions de manière à minimiser les apports solaires à travers les murs extérieurs tout en favorisant la ventilation des locaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pour minimiser les apports solaires par les ouvertures et à travers les murs, orienter les grandes façades des constructions au Sud et au Nord - Pour faciliter la ventilation des locaux, orienter les grandes façades au Sud et au Nord ou au Sud-Ouest et au Nord-Est
Conception globale des planchers	<p>Rechercher une fraîcheur immédiate à travers le plancher, surtout pendant la nuit</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Plancher suspendu au-dessus d'un vaste puits ventilé (constructions surélevées sur des plots ou sur pilotis)

Synthèses constructives (suite)

Paramètres et composantes de la construction	Recommandations	Solutions techniques
2- Enveloppe des constructions		
Murs	<ul style="list-style-type: none"> - Eviter l'accumulation de chaleur dans les parois - Choisir les matériaux de construction appropriés aux conditions climatiques du site de façon à optimiser les gains et les pertes de chaleur 	<p>Murs de faible inertie (légers) ou d'inertie moyenne, de teinte claire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - en parpaings creux (e = 12 à 15cm) crépis sur chaque face - en géobéton (e = 20 à 25cm)
Toiture	<ul style="list-style-type: none"> - Réduire la température de la face interne de la toiture - Eviter que les occupants des locaux soient exposés à la chaleur transmise à travers la toiture 	<ul style="list-style-type: none"> - Toitures légères (bac aluminium ou en tôle d'alliage alu-zinc), réfléchissantes (revêtement de teinte claire), sur comble bien ventilé - Orifices de ventilation largement dimensionnés (0.20 m² par mètre linéaire) sur les façades principales orientées au Sud et au Nord - Toiture à double pente avec un décrochement des deux versants de toiture - Orienter la pente du toit face aux vents dominants - Dans le cas des toitures-terrasses, on peut aménager une deuxième toiture composée de tôle galvanisée ou d'une dalle extérieure légère - Interposer un faux plafond en bois ou en bambou (matériau isolant) entre la toiture et les locaux - Pratiquer des orifices de ventilation haute au ras du faux plafond pour refroidir sa face - Hauteur utile des locaux de l'ordre de 2.80m à 3.00m

Synthèses constructives (suite)

Paramètres et composantes de la construction	Recommandations	Solutions techniques
3- Ventilation des locaux d'habitation		
Ouvertures	Favoriser la ventilation efficace des locaux	<ul style="list-style-type: none"> - Prévoir des ouvertures de grande taille (d'aire équivalente égale à environ 60 à 80% de la surface des parois) bien centrées sur les façades principales à hauteur d'homme - La vitesse de l'air est plus élevée lorsque les ouvertures sous le vent (sortie) ont une surface totale égale à une fois et demie celles au vent (entrée) - Fenêtres en bois, persiennées (de perméabilité au moins égale à 0.20), fenêtres à lamelles orientables (persiennes en bois ou en vitrage de type Naco) ou fenêtres en bois persiennées ouvertes à l'italienne - Pour les fenêtres à vitrage, choisir des verres spéciaux (verres thermoabsorbants ou thermoréfléchissants) pour réduire la pénétration des rayons solaires dans les pièces - Dans le cas des constructions à deux rangées de locaux, aménager des impostes de ventilation au-dessus des portes des chambres ; l'implantation d'écofes d'air est une bonne technique de ventilation interne, particulièrement pour les pièces sous le vent. - Protéger les ouvertures sur les murs extérieurs afin d'éviter la pénétration des rayons solaires dans les pièces
Cloisons intérieures	Créer un courant d'air transversal dans les pièces	<ul style="list-style-type: none"> - Pratiquer de larges ouvertures sur les cloisons parallèles aux grandes façades (orientées au Sud et au Nord) de façon à ne pas entraver la circulation de l'air - Les portes doivent être ajourées en partie haute (et basse)

Synthèses constructives (suite)

Paramètres et composantes de la construction	Recommandations	Solutions techniques
4- Protection des constructions		
Masques architecturaux	Créer des zones d'ombre sur les murs extérieurs et les ouvertures	<ul style="list-style-type: none"> - Protections horizontales : auvent, véranda, débord de toiture, toit parasol, brise-soleil - Protections verticales : flanc, loggia, vis à vis - Autres : patio, encorbellement
5-Recommandations diverses		
Répartition des pièces		<ul style="list-style-type: none"> - Placer les pièces à occupation diurne (séjour) de façon à donner sur les façades Sud et Nord, les chambres de préférence sur la façade Sud et du côté Est - Les pièces secondaires (magasins, cages d'escalier etc.) doivent être situées du côté Ouest, la cuisine et les toilettes du côté Ouest mais sur la façade Nord.
Sources de chaleur intérieures	Contrôler les sources de chaleur intérieures de façon à prévenir un échauffement intérieur excessif	<ul style="list-style-type: none"> - Minimiser les gains thermiques dus à l'éclairage, à l'occupation humaine et aux appareils électroménagers - Zoner et contrôler l'éclairage artificiel de sorte que les lampes ne soient allumées que pendant les moments et dans les espaces où cela s'avère vraiment nécessaire - Considérer les puissances des appareils électroménagers lors de leur acquisition - Utiliser des lampes à haute performance énergétique, viser le niveau d'éclairage strictement indispensable - Considérer le regroupement des sources de chaleur importantes pour mieux gérer la consommation énergétique <p>Ventiler suffisamment les espaces fortement occupés</p>

CONCLUSION GENERALE

La mauvaise conception de l'habitat a des conséquences néfastes sur le confort et l'équilibre des usagers ; elle nécessite généralement des aménagements coûteux pour restituer un minimum de confort dans les logements.

De nos jours, la copie du standard européen de conception architecturale des logements où le béton, le verre et la tôle occupent une place prépondérante dans la construction, ainsi que l'effet de mode, justifient l'abandon des techniques traditionnelles de construction jugées trop désuètes et inadaptées à la vie moderne. Ils ont pour conséquence la croissance rapide du parc d'équipements de conditionnement d'air.

Il est donc impérieux de limiter le développement de la climatisation artificielle afin de réduire les dépenses énergétiques dans le secteur de l'habitat. La vulgarisation des principes de bioclimatisme et des outils d'aide à la conception bioclimatique de l'habitat constitue une méthode capable de favoriser la vulgarisation rapide des constructions adaptées au climat, économes en énergie et respectueuses des préoccupations environnementales.

La nécessité de développer des solutions techniques simples basées sur l'application des concepts climatiques et le recours à des procédés de climatisation passive peu coûteuses, permettant la réalisation de constructions adaptées, doit amener les professionnels du bâtiment à se poser quelques questions essentielles telles que :

Comment disposer la construction pour tenir compte des données d'ensoleillement et de vent sur le site ?

Quels dispositifs choisir pour limiter les apports solaires dans les locaux ?

Comment disposer les fenêtres sur les façades pour réaliser la ventilation efficace des locaux ?

Quelles sont les mesures architecturales les plus appropriées pour le contrôle efficace et l'amélioration des conditions d'ambiance ?

Pour une conception bioclimatique optimale de l'habitat, il est nécessaire de faire une étude préalable du site pour que l'habitat bénéficie des atouts climatiques et qu'il soit conçu de manière à minimiser les apports de chaleur, principale source d'inconfort en région chaude.

Dans le cadre du présent travail, nous nous appuyerons sur les résultats des travaux précités pour dégager les lignes directrices d'une architecture bioclimatique capable de servir de guide à la conception et la construction d'un habitat adapté au climat du site.

De manière spécifique, dans le sens de la prospection des solutions de confort dans l'habitat économique dans la région Sud du Bénin, nous nous sommes intéressés à l'optimisation des éléments de bâtiments dans la région Sud du Bénin (région tropicale humide) en vue d'améliorer des conditions d'ambiance et de réduire l'inconfort dans les locaux. Les résultats obtenus, avec des hypothèses et des méthodes de calcul simples, concordent bien avec ceux des travaux antérieurs dans notre sous-région.

L'étude paramétrique du comportement thermique des constructions dans la région sud du Bénin a permis de recenser les solutions d'amélioration des

conditions d'ambiance dans l'habitat et du confort des usagers pendant les périodes chaudes de l'année. L'application des résultats obtenus à quelques plans de constructions existantes ou de projets de constructions nous a permis de dégager des solutions simples et peu coûteuses pour améliorer les conditions d'ambiance et le niveau de confort.

En région tropicale humide, la fonction de l'habitat est de tenir ses occupants à l'ombre tout en leur permettant de bénéficier au maximum des mouvements d'air : il doit être construit en matériaux de faible inertie (faible masse, sans capacité d'accumulation) avec de grandes ouvertures et une organisation intérieure favorable à la ventilation transversale permanente des locaux. Ici, la ventilation permanente des locaux et la protection de l'habitat contre l'ensoleillement direct sont les principales méthodes pour garantir les meilleures conditions d'ambiance et assurer le confort humain.

Le régime des vents sur le site de notre étude ($3.0\text{m/s} < V_{\text{moy}} < 5.0\text{m/s}$) est suffisant pour une ventilation efficace des locaux. Il convient donc d'envisager, à la phase de conception de l'habitat, les solutions architecturales pouvant favoriser les zones d'ombre sur les murs extérieurs et les ouvertures (larges débords de toiture ou vérandas), et celles pouvant favoriser un courant d'air transversal de l'ordre de 0.5 à 1m/s dans les locaux (larges ouvertures sur les grandes façades orientées au Sud et au Nord, dispositifs de ventilation des locaux sous le vent à travers le faux plafond ou la toiture des constructions).

Pendant la saison des pluies, les conditions de confort dans les logements sont fortement influencées par le degré hygrométrique de l'air : au cours de la journée, l'humidité relative dépasse 70% et il est difficile d'évacuer la sueur produite par le corps, d'où l'inconfort ressenti par les usagers. Aux faibles vitesses d'air dans les locaux ($V_{\text{air}} \approx 0.2 \text{ m/s}$), la situation est légèrement désagréable ou désagréable : en augmentant la vitesse d'air ($V_{\text{air}} \approx 0.5 \text{ m/s}$), l'inconfort est réduit de façon notable.

On peut conclure que la recherche de confort dans l'habitat dans la région sud du Bénin, tant en saison pluvieuse qu'en saison sèche, passe par une ventilation efficace des locaux : dans la journée, l'introduction de l'air contribue à atténuer la sensation d'inconfort liée à la transpiration. Pendant la nuit, la ventilation est encore nécessaire (à vitesse réduite au-delà de 22h) car, malgré la réduction des charges thermiques, l'humidité élevée de l'air peut toujours induire une situation d'inconfort dans les locaux occupés.

Au total, dans la région sud du Bénin, une construction orientée de telle sorte que son axe de perméabilité maximale est parallèle à la direction des vents dominants, dont les murs extérieurs sont bien protégés contre l'ensoleillement direct, la toiture en matériau léger très réfléchissant sur un comble bien ventilé, le plafond en bois ou en panneaux légers de fibres de bois, et dont les cloisons intérieures parallèles aux façades principales portent de larges ouvertures de manière à faciliter en permanence la ventilation transversale, constitue un modèle qui répond bien aux besoins de confort des usagers en toute saison.

Dans les régions du centre et du nord du Bénin, les données climatiques recueillies présentent des différences notables, comparées à celles de la région sud (températures plus élevées, humidité de l'air et vitesse d'air plus faibles) ; ces différences doivent être prises en compte pour la conception de constructions adaptées aux données climatiques, particulièrement en ce qui concerne l'inertie des parois et la ventilation des locaux, et au regard des fortes températures enregistrées dans la journée, des matériaux locaux disponibles. Ici, les écarts diurnes de température (12 à 17°C) sont des atouts majeurs pour le rafraîchissement nocturne des structures et des ambiances et le stockage de froid dans les parois.

Par conséquent, il est recommandable d'étendre le présent travail aux régions du Centre et du Nord-Bénin en vue de généraliser l'étude des méthodes de conception des constructions adaptées aux climats locaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. DEVAL J. C. (1985)- Etude théorique et expérimentale du confort thermique en climat tempéré et en climat chaud. Thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole Centrale de Paris. 234 pages
2. BERGER X., DEVAL J. C. (1985)- About thermal comfort in humid tropical climates. CLIMA-2000 Indoor climate, VVS Congress Copenhagen.
3. GALEOU M. I. (1991)- La sensation thermique de l'homme dans son habitat : des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations. Thèse de Doctorat de l'Université Paul SABATIER, Toulouse. 237 pages.
4. FANGER P. O. (1970)- Thermal comfort : analysis and applications in Environmental Engineering. Mc Graw Hill Book Company, New York ; 224 pages.
5. FANGER P. O., OSTBERG O., Mc NICHOLL A. G. (1974)- Thermal conditions during day and night. Euro. J. Appl. Physiol.
6. International Standards ISO 7730 – Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Suisse 1983 ; 31 pages.
7. ASHRAE (1984)- Ashrae Standards 55-81 : Thermal environmental conditions for human occupancy.
8. ASHRAE (1985)- Ashrae Handbook Fundamentals, New-York.
9. GAGGE A. P. (1937)- A new physiological variable associated with sensible and insensible perspiration . Am. Journ. Physiol., USA.
10. GAGGE A. P. (1981)- Rational temperature indices of thermal comfort. Actes du Colloque "Bioengineering, thermal physiology and comfort", USA.
11. GAGGE A. P. (1985)- Thermal sensation and comfort in dry humid environments. CLIMA-2000 Indoor Climate, VVS Congress Copenhagen.
12. GAGGE A. P., FOBELETS A., BERGLUND L.G. (1986)- A standard predictive index of human response to the thermal environments. Ashrae transactions, vol. 92, part 1B.
13. BERGLUND L. (1978)- Mathematical model for predicting the thermal comfort response of building occupants. Ashrae Transactions vol. 84, part 1.
14. CUNNINGHAM D. J., BERGLUND L., FOBELETS A. A. (1985)- Skin wettedness under clothing and its relationship to thermal comfort in men and women. CLIMA-2000 Indoor climate, VVS Congress Copenhagen.
15. HOPPE P., OOHORI T., BERGLUND L. et al. (1985)- Vapour resistance of clothing and its effects on human response during and after exercise. CLIMAT-2000 Indoor climate, VVS Congress Copenhagen.
16. BERGLUND L., CUNNINGHAM D. J. (1986)- Parameters of human discomfort in warm environments. Ashrae Transactions vol.92, part 2B.
17. LAVIGNE P., FERNANDEZ P., BRFJON P. (1992)-Architecture climatique : une contribution au développement durable.
Tome 1 : Bases et approches physiques ; Edisud, Aix-en-Provence
Tome 2 : Concept et dispositifs ; Edisud, Aix-en-Provence.
18. ESCOUROU P. (1989)- Les critères d'étude de biométéorologie humaine. Climat et Santé. Cahier de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°1, pp. 21 à 31.

19. BESANCENOT J. P. (1986)- Recherches de bioclimatologie humaine en zone intertropicale. In : Pagney P., Nieuvoit S., *Etudes de climatologie tropicale. Paris, Masson, coll. Recherches en Géographie, pp. 11 à 28.*
20. BESANCENOT J. P. (1989)- Réflexions sur le risque de coup de chaleur : l'exemple des militaires français à Djibouti. Climat et Santé. Cahier de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°1, pp. 85 à 111.
21. BOKO M. (1989a)- Première approche des bioclimats humains du Bénin. Climat et Santé. Cahier de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°1, pp. 47 à 57.
22. BOKO M. (1989b)- Problèmes de quantification des ambiances bioclimatiques en zone intertropicale : application au rendement de la main d'œuvre rurale (1ère partie). Climat et Santé. Cahier de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°2, pp. 123 à 136.
23. BOKO M. (1990)- Problèmes de quantification des ambiances bioclimatiques en zone intertropicale : application au rendement de la main d'œuvre rurale (2ème partie). Climat et Santé. Cahier de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°3, pp. 23 à 33.
24. LAHIRI M. (1991)- Les indices bioclimatiques : d'un mal nécessaire à un moindre mal. Réflexion sur l'exemple indien. Climat et Santé. Cahier de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°6, pp. 25 à 38.
25. BOKO M. (1991)- Problèmes de quantification des ambiances bioclimatiques en zone intertropicale : application au rendement de la main d'œuvre rurale (3ème partie). Climat et Santé. Cahier de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°6, pp. 51 à 61.
26. BOKO M. (1992)- La sensation de temps lourd dans le Golfe de Guinée (Afrique Occidentale). Climat et Santé. Cahier de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°8, pp. 101 à 113.
27. IWAKUMA T., KAWAMURA et al. (1994)- Matériaux pour un atlas planétaire des bioclimats humains : le confort thermohygro-métrique. Climat et Santé : Cahiers de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°11, pp. 7 à 39.
28. HOUSSOU C. S. (1994)- Réflexions sur les sensations des populations et sur le choix des indices bioclimatiques en milieu tropical humide. Climat et Santé : Cahiers de Bioclimatologie et Biométéorologie Humaine ; n°11, pp. 41 à 53.
29. Mc INTYRE D. A. A. (1978)- Three approaches to the thermal comfort. Ashrae Transactions vol. 84, part 1.
30. Mc INTYRE D. A. A. (1978)- Preferred air speed for comfort in warm conditions. Ashrae Transactions vol. 84, part 2.
31. CANDAS V., LIBERT J. P., VOGT J. J. (1979)- Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating. J. Appl. Physiol.
32. Mc INTYRE D. A. A. (1980)- Indoor climate. London, 1980.
33. MEYER J. P. (1981)- Prévision de la température cutanée moyenne. Thèse de Médecine, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
34. DE DEAR R. J., LEOW KG, FOO S. G. (1990)- Thermal comfort in the humid tropics : field experiments in air conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore. International Journal of Biometeorology, vol. XXXIV, n°4, pp.259-265.
35. DE DEAR R., LEOW K. G., AMEEN A. (1991)- Thermal comfort in the humid tropics, Part 1 : climate chamber experiments on temperature preference in Singapore. Ashrae transactions vol. 97, part 1.

36. DE DEAR R., LEOW K. G., AMEEN A. (1991)- Thermal comfort in the humid tropics, Part 2 : climate chamber experiments on acceptability preference in Singapore. *Ashrae transactions* vol. 97, part 1.
37. BUSH J. F. (1992)- A tale of two populations : thermal comfort in air conditioned and naturally ventilated offices of Thailand. *Energy and Buildings* n°18.
38. BCEOM (1952)- Essai sur l'habitation tropicale, publié sous la direction de Maurice BLANC ; Bureau Central pour les Equipements d'Outre-mer, Paris.
39. GIVONI B. (1963)- Evaluation of the effect of climate on man : development of a new thermal index. Ph. Thesis, School of Medicine, University of Jerusalem, Israel.
40. GIVONI B. (1965)- Laboratory study of the effect of window size and location on indoor air motion. *Architectural Science Review*, vol.8.
41. GIVONI B. (1976)- Man, climate and architecture. Applied Science Publisher, London (2nd edition).
42. FAUCONNIER R., GUILLEMARD P., GRELAT A. (1987)- Algorithmes des simulateurs du comportement thermique des bâtiments : BILBO et BILGA. *Annales ITBTP* n° 457 et 458, septembre et octobre 1987. Série Théories et Méthodes de calcul.
43. GRELAT A. (1997)- Logiciel Bilga : simulation hygrothermique et aéraulique des bâtiments. Description et utilisation. CEBTP, avril 1997.
44. SANGKERTADI (1994)- Contribution à l'étude du comportement thermoaéraulique des bâtiments en climat tropical humide. Prise en compte de la ventilation naturelle dans l'évaluation du confort. Thèse de Doctorat INSA Lyon.
45. GOUIN G. (1984)- Contribution aérodynamique à l'étude de la ventilation naturelle de l'habitat en climat tropical humide. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Nantes. 327 pages.
46. LE PAIGE M., GRATIA E., DE HERDE A. (1986)- Guide d'aide à la conception bioclimatique. R D Energie, Service de Programmation de la Politique Scientifique Bruxelles (Belgique).
47. DE HERDE A. (1992)- Manuel du Responsable ENERGIE. L'utilisation rationnelle de l'énergie dans le tertiaire. Ministère de la Région Wallonne, Belgique. 534 pages.
48. DE HERDE A. (1996)- Building and urban renewal. Proceedings of the PLEA 96 Conference ; Louvain-la-Neuve, July 16-18 1996.
49. IZARD J. L. (1993)- Architectures d'été. Construire pour le confort d'été. EDISUD, Aix-en-Provence.
50. DREYFUS J. (1960)- Le confort dans l'habitat en pays tropical : la protection des constructions contre la chaleur, problèmes de ventilation. Editions EYROLLES, Paris ; 363 pages.
51. van STRATEN J. F. (1961)- Thermal performances of buildings ; Elsevier Architectural Science Series. Elsevier Publishing Company.
52. GRIFFITHS J., BOYCE P. R. (1971)- Performances and thermal comfort. *Ergonomics*, vol. 14 page 457-468.
53. MAHONEY (1973)- Climat et habitat : conception des habitations à bon marché et de leurs équipements collectifs. Volume 1 ; Organisation des Nations Unies.

54. LEE D. H. K. (1973)- La construction en climat chaud : principes d'architecture pour atténuer les effets de la chaleur sur l'homme. Centre Régional d'Éditions Techniques, Paris. Techniques Américaines.
55. ROUSSEAU S. (1978)- Simulation numérique du comportement thermique des locaux d'habitation : évaluation de l'influence de la radiation solaire, des conditions climatiques et des paramètres caractéristiques du bâtiment. Thèse de Doctorat, INSA Lyon.
56. MILNE M., GIVONI B. (1979)- Architectural design. in WATSON D., CROSBIE M. and CALLENDER J.H. (eds) Time-saver standards for architectural design data. McGraw-Hill, New York (7th edition).
57. LIPPSMEIER G. (1980)- Tropenbau, building in the tropics. Verlag George Callway, München.
58. SZOKOLAY S. V. (1980)- Environmental Science Handbook for Architects and Builders. The Construction Press Ltd., Lancaster UK.
59. MOLLE N. (1984)- Etude théorique et expérimentale du comportement thermique de l'habitat en milieu tropical humide. Thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole Centrale de l'Université des Antilles-Guyane.
60. GUYOT A., ADOH-BEDI K. F. (1984)- La ventilation naturelle, facteur de conception dans l'architecture des climats chauds et humides ; Groupe ABC, SGAR/CIAT. Diffusion SGAR.
61. CABIROL, SAUREL (1984)- Conception bioclimatique en pays tropical. Centre d'Etude et de Recherche sur les Energies Renouvelables, Dakar.
62. CELESTINE C. (1985)- Ventilation naturelle et confort thermique dans l'habitat en climat tropical humide. Approche expérimentale en vraie grandeur de la ventilation naturelle sur un site de la Guadeloupe. Etude comparative en soufflerie. Thèse de Docteur-Ingénieur, INSA Lyon. 222 pages.
63. REXCOOP (1985)- Aide à la conception thermique de l'habitat courant en Afrique tropicale. Cebtp-UTI-Lbtp.
64. CAMPANA D., GREAUME, TREISNEL (1985)- Conception climatique des bâtiments dans les départements d'Outre-mer. AFME, Paris.
65. WATSON D., CAMOUS R. (1986)- Habitat bioclimatique : de la conception à la réalisation. Editions l'Étincelle, Montréal. 189 pages
66. MAS SANTOSA (1986)- Climatic factors and their influence on the design of buildings in hot humid countries with special regard to Indonesia. PhD. Thesis, University of Queensland. 850 pages.
67. HUET O., CELAIRE R. (1986)- Bioclimatisme en zone tropicale : construire avec le climat. Ministère de la Coopération Française/Groupe de Recherches et d'Échanges Technologiques, Paris. 172 pages
68. CIACO (1986)- Proceedings of the International Climatic Architecture Congress. Louvain-la-Neuve, July 1986. Collection Architecture et Urbanisme, Conseil International des Sciences de la Construction.
69. OJO O. (1986)- Physioclimatic responses to thermal conditions in tropics : the Lagos experience. In : *Climatologie Tropicale et Etablissements Humains*. Dijon : Centre de Recherches de Climatologie et UA 909, pp.189-213.
70. REXCOOP (1986)- Méthodes de conception climatique des bâtiments au Sénégal : recueil des communications. Dakar, 16-18 juin 1986. 228 pages.

71. N'GUESSAN M. (1986)- Conception de l'habitat en pays tropical. Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)-Ecole Nationale des Ponts et Chaussées-Ecole Centrale, Paris. 120 pages.
72. GRELAT A., NGUESSAN M. (1987)- Etude préalable à une opération expérimentale de conception climatique des logements en Côte d'Ivoire. Recherche Expérimentale en Coopération, Paris ; mars 1987.
73. ERGM, SIGMA Consultants (1988)- Habitats climatiques. Recherche Expérimentale en Coopération, Paris.
74. LBTP (1988)- Bulletin du Laboratoire des Bâtiments et Travaux Publics, Abidjan. Numéro Spécial « Thermique et Energétique ». n°9, 2^{ème} trimestre 1988.
75. N'GUESSAN M. (1990)- Analyse des performances thermiques des constructions en climat tropical. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris. 382 pages.
76. SZOKOLAY S. V. (1987)- Thermal design of buildings. RAI Education Division, Canberra.
77. ABDESSELAM M. (1989)- Guide d'aide à la conception climatique des bâtiments aux Antilles. Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, Paris.
78. CIB (1989)- La qualité pour les usagers des bâtiments à travers le monde. Actes du Congrès du Conseil International du Bâtiment pour la Recherche, l'Etude et la Documentation, Paris juin 1989.
79. MEERSMAN B., DE HERDE A. (1992)- Bioclimatic architecture. Recommendations for a proper approach of the cooling problem in the building field. Architecture et Climat, Université Catholique de Louvain (Belgique).
80. GIVONI B. (1992)- Comfort, climate analysis and building design guidelines. Energy and Buildings, n°18 pages 11-23.
81. GIVONI B. (1992)- Performance and applicability of passive cooling. Energy and Buildings, n°18 pages 28-36.
82. WATSON D. (1993)- Climatic building design. McGraw-Hill, New York.
83. DE WALL H. B. (1993)- New recommendations for building in tropical climates. Building and Environment, vol. 28, n°3 ; page 271-285.
84. SUBRAMANYAM S., NARASIMHARAO A. V. et al. (1994)- Thermal comfort in buildings criteria for tropics. Actes de la Conférence Européennes "Performances Energétiques et Qualité des Ambiances dans le Bâtiment", Lyon novembre 1994.
85. SZOKOLAY S. V. (1994)- Solar architecture in the tropics. Proceedings of Solar '94, Secrets of the Sun Conference ANZ Solar Energy Society ; December 1994. Page 10-17.
86. LIMA M. A. (1995)- The development of bioclimatic design. Doctoral dissertation, University of Queensland.
87. SZOKOLAY S. V. (1996)- Thermal design of houses in warm-humid climates. Proceedings of Building and Urban Renewal PLEA 96 ; Louvain-la-Neuve, 16-18 July 1996.
88. AMORIM C. N. V.(1996)- Appropriate climatic design for low-cost housing :constructive systems and typologies for an urban settlement. Proceedings of the PLEA 96 Conference ; Louvain-la-Neuve, July 16-18 1996.
89. CAMELO S., GONÇALVES H. (1996)- Building envelope and thermal comfort conditions. Proceedings of the PLEA 96 Conference ; Louvain-la-Neuve, July 16-18 1996.

90. KRISTENSEN P. E. (1996)- Climatic design of new housing area. Proceedings of the PLEA 96 Conference ; Louvain-la-Neuve, July 16-18 1996.
91. SZOKOLAY S. V. (1997)- Solar control. *in* WATSON D., CROSBIE M. and CALLENDER J.H.(eds) Time-saver standards for architectural design data. McGraw-Hill, New York (7th edition).
92. WATSON D., CROSBIE M., CALLENDER J.H., eds (1997)- Time-saver standards for architectural design data. McGraw-Hill, New York (7th edition).
93. ABDESSELAM M. (1999)- Une nouvelle approche de la conception climatique des bâtiments. Liaison Energie-Francophonie n°42, Institut de l'Energie et de l'Environnement Pour la Francophonie, Québec (1^{er} trimestre 1999).
94. ABDESSELAM M. (2000)- La satisfaction des besoins de confort thermique : quelles alternatives à la climatisation. Liaison Energie-Francophonie n°s 48 et 49, Institut de l'Energie et de l'Environnement Pour la Francophonie, Québec (3^{ème} et 4^{ème} trimestres 2000).
95. N'GUESSAN M., ANDOH J. (1991)- Climat et urbanisation : approche bioclimatique de la conception des bâtiments. Communication aux Journées sur la Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments, Abidjan 26-28 Juin 1991.
96. COULIBALY A. (1991)- Approche du confort thermique dans l'habitat social en milieu tropical. Simulation numérique d'une cellule d'habitation, validation du modèle sur cellule-test. Thèse de Doctorat de l'Université Paris-Val de Marne (Paris 12).
97. KONGO K. (1994)- Contribution au confort et à l'économie d'énergie dans l'habitat par conditionnement d'air en région tropicale : cas de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris.
98. JANNOT Y., DJIAKO T. (1994)- Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale. International Journal of Refrigeration, vol. 17, Issue 3; page 166-173.
99. KEMAJOU A. (1995) Confort thermique en situation réelle et mesures d'économie d'énergie dans les bâtiments tertiaires au Cameroun. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé (Cameroun).
100. ADJIBOLA K. (2001)- Design for comfort in Nigeria : a bioclimatic approach. Renewable Energy, Vol. 23, Issue 1 ; p. 57-76.
101. CHAFFA G., N'GUESSAN M., GBADAMASSI M., LUCAS J. (2002)- Etude paramétrique du comportement thermique de l'habitat dans la région sud du Bénin. Journal des Sciences Pour l'Ingénieur N° 2/2002 (janvier 2002), pages 1 à 9.
102. Development Advisory Group Aps (1999)- Concevoir avec la nature : Guide de planification et de conception active sous climat chaud sec ou chaud humide. DANIDA, Hørve (Danemark).
103. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et Electricité de France (1982)- La conception thermique des bâtiments en Guyane: soleil et vent. Edition du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris.
104. GANDEMER J., GUYOT A.- Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. CSTB Nantes.
105. GANDEMER J. BARNAUD (1987)- Exemples de solutions architecturales développant la ventilation naturelle aux Antilles. CSTB, Paris.

106. CHAND I., SHARMA V. K., KRISHAK N. I.V. (1989)- Ventilation survey of typical air buildings : a few case studies in hot dry and hot humid zones of India. Building and Environment, vol. 24.
107. SANTAMOURIS M.(1990)- Natural cooling techniques. Proceedings of Workshop on Passive cooling, Joint Research Center Ispra (Italy) ; page 143-153.
108. ERNEST D. R., BAUMAN F. S., ARENS E. A.(1991)- The prediction of indoor air motion for occupants in naturally ventilated building. ASHRAE Trans. 97 part 1, page 539-552.
109. GANDEMER J. (1992)- Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide, Tome 1. CSTB Nantes. 133 pages.
110. ALVAREZ S. (1993)- Natural cooling techniques. Proceedings of the Symposium on Solar Energy and Buildings. Commission of the European Communities, Directorate General for Energy , Athens (Greece). page10.1-10.15.
111. PAJEVIC M., PUCAR M. (1993)- Wind as a parameter of bioclimatic planning. Proceedings of the CLIMA 2000 Conference, London.
112. PENWARDEN, WISE A.F.E.(1995)- Wind environment around buildings. Building Research Establishment, London.
113. KINDAGEN J. J., KRAUSS G., RUSAOUËN G. (1996)- Influence of architectural parameters on air flow distribution inside a naturally ventilated single-unit house. Proceedings of Building and Urban Renewal PLEA 96 ; Louvain-la-Neuve, 16-18 July 1996.
114. BREJON P. (1988)- Les logiciels d'énergétique des bâtiments : développement, évaluation technique, illustrations. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris.
115. HERNOT D., Porcher G. (1984)- Thermique appliquée aux bâtiments. Les Editions Parisiennes Chaud, Froid et Plomberie ; 168pages.

ANNEXES

ANNEXE 1:

METHODE D'EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE

Dans les climats tropicaux et surtout humides, les indices de confort établis par FANGER ne sont pas adaptés pour caractériser les états de confort ou d'inconfort ressentis par les occupants dans les locaux. Les équations établies pour les climats modérés ne sont valables qu'au voisinage immédiat de la zone de confort idéal. Elles supposent en particulier l'utilisation immédiate et totale de la sudation pour rafraîchir la peau.

L'organisme régule les pertes occasionnées en jouant sur la surface de peau mouillée et le débit sudoral. Les critères de confort en climat tropical sont plutôt fondés sur les conséquences physiologiques liées à l'efficacité de la sudation : le débit sudoral et la mouillure cutanée.

1- Calcul des éléments de confort

Les principaux paramètres permettant de caractériser les éléments de confort thermique sont les paramètres d'ambiance et les paramètres physiologiques.

Paramètres d'ambiance :

Le confort thermique d'une ambiance intérieure est caractérisé par quatre principaux paramètres :

- la température de l'air θ_a (°C)
- la température moyenne radiante θ_r (°C)
- la vitesse d'air autour de l'individu v (m/s)
- l'humidité, qui s'exprime selon les cas par :
 - la pression partielle de vapeur d'eau P_{va} (pa) ;
 - l'humidité spécifique R_{sa} (g/kg) ;
 - l'humidité relative ψ (%).

Les trois dernières grandeurs sont liées par les relations suivantes :

$P_{va} = \psi \cdot P_{sa}$ avec:

$P_{sa} = 610,7 \cdot e^u$ pression de vapeur saturante à la température θ_a

$$u = \frac{\theta_a}{13,706 + 0,0588 \cdot \theta_a}$$

La valeur moyenne de la vitesse v de l'air est le paramètre le plus difficile à déterminer. Elle fait l'objet d'une simple estimation à partir du calcul des débits d'air traversant le logement.

Les paramètres physiologiques :

- Le poids et la taille de l'individu : Ils interviennent dans la surface de rayonnement ou surface de Dubois à travers la relation suivante :

$$A_{du} = 0,203 \cdot (\text{poids})^{0,425} \cdot (\text{taille})^{0,725} \text{ en } (m^2)$$

La valeur moyenne de la surface de Dubois pour un adulte vaut : $A_{du} = 1,77 \text{ m}^2$

- Le métabolisme : La production de chaleur interne, ou métabolisme thermique M (en \dot{W}), est fonction de l'activité du sujet de son poids et de sa taille ; elle s'exprime par la relation :

$$M = 58,15 \cdot \text{Act} \cdot A_{du} \text{ (en } \dot{W}\text{)}$$

Les valeurs de l'activité sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau A.1.1 : Valeurs du métabolisme pour différentes activités intérieures.

ACTIVITE	M/Adu (W/m ²)	Act (met)
Sommeil	40	0,7
Couché	45	0,8
Assis au repos	60	1,0
Debout au repos	70	1,2
Travail mental	65	1,1
Cuisine	80/120	1,4 / 2,0
Ménage	120/160	2,0 / 2,7
Travail de bureau	60/70	1,0 / 1,2

- L'habillement :

Il est considéré comme une isolation du corps vis à vis de l'ambiance. La résistance thermique des vêtements est usuellement repérée dans une échelle en «clo» :

1 clo = 0,155 m²C/W

Tableau A.1.2 : Isolation correspondant à quelques tenues vestimentaires

HABILLEMENT	ISOLATION (clo)
Nu	0,0
Sous - vêtement	0,1
Tenue tropicale type (short, T-shirt)	0,3/0,4
Tenue d'été légère (pantalon, T-shirt)	0,5
Tenue de travail légère (pantalon, maillot coton, etc.)	0,6
Tenue d'été légère (pantalon, T-shirt)	0,5
Tenue de travail légère (pantalon, maillot coton, etc.)	0,6
Costume d'été	0,8
Costume de travail	1,0

2- Bilan thermique de l'organisme :

Dans le cadre de l'évaluation du confort thermique des sujets dans une ambiance, le bilan thermique de l'organisme consiste à un double bilan : le bilan de la face externe du vêtement et celui de la peau.

Bilan de la face extérieure du vêtement

$$K = R + C$$

avec K : chaleur transférée de la peau à la surface externe du vêtement ;

C : pertes convectives à la surface externe du vêtement ;

R : pertes radiatives à la surface externe du vêtement.

Bilan de la peau (à l'équilibre thermique)

$$K = M - E_{dif} - E_{rs} - E_{sw} - \frac{ds}{dt}$$

avec :

M : production de chaleur par métabolisme (W) ;

E_{dif} : pertes latentes par diffusion de vapeur à travers la peau (W) ;

E_{rs} : pertes respiratoires (sensible (E_{rs}) + latente (E_{rl})) (W) ;

E_{sw} : pertes par évaporation de la sueur (W).

ds/dt : énergie stockée par l'organisme pendant dt (W).

D'après les deux relations précédentes, la charge thermique de l'organisme peut s'exprimer par :

$$\frac{ds}{dt} = B = M - R - C - E_{dif} - E_{rs} - E_{sw}$$

Afin de maintenir une température intérieure constante, le sujet dispose de divers mécanismes de régulation, volontaires ou réflexes.

Si $B < 0$ (impression de froid), l'individu doit :

- accroître son activité M ;
- augmenter l'isolation de son vêtement donc diminuer K et (R + C) ;
- diminuer la température de sa peau par vasoconstriction, donc réduire K.

Si $B > 0$ (impression de chaud), il doit :

- réduire son activité M ;
- accroître la température de sa peau par vasodilatation, donc augmenter K ;
- augmenter les échanges latents (transpiration) E_{sw} .

Si l'activité et l'habillement sont imposés dans certaines limites par d'autres facteurs que la seule recherche du confort, le déséquilibre du bilan thermique constitue un moyen d'évaluation de l'inconfort.

La référence 32 donne une caractérisation détaillée des divers éléments qui doivent être pris en compte.

Calcul de la température du vêtement

Les équations relatives au vêtement permettent de calculer θ_{cl} . On considère avec réserve, que R_{cl} est la résistance thermique effective du vêtement, $R_{cl} = 0,155 \cdot I_{cl}$ (I_{cl} en clo).

En posant $h_{cl} = 1/R_{cl}$, l'équilibre thermique du vêtement s'écrit :

$$h_{cl} (\theta_{sk} - \theta_{cl}) = h_r (\theta_{cl} - \theta_r) + h_c (\theta_{cl} - \theta_a)$$

θ_{sk} est la température de peau ; d'où :

$$\theta_{cl} = \frac{h_{cl} \theta_{sk} + h_r \theta_r + h_c \theta_a}{h_r + h_c}$$

Calcul de la température de la peau

D'après les formules de Meyer, en climat chaud, la température de la peau peut être estimée par :

$$\theta_{sk} = 35,7 - 0,037 \cdot \frac{M}{A \cdot du} \cdot (1 - \eta)$$

au voisinage de l'équilibre, avec η : rendement mécanique (voir Tableau A.1.3).

Tableau A.1.3 : Métabolisme (M) $\eta_{méca}$ et rendement mécanique pour quelques activités

Activité	Q_p/Adu (en Kcal/h.m ²)	Rendement mécanique	Vitesse relative de l'air (m/s)
Au repos :			
- Couché	35	0	0
- Debout	60	0	0
Au travail :			
Travail de laboratoire	60 – 120	0	0 – 0.2
Travail domestique	80 – 100	0.2	0.5
Cuisine	100 - 180	0.2	0.5

• Au repos :

$$\theta_{sk} = 34,7 - 0,249 (30 - \theta_{op})$$

• En activité (Act > 1) :

Si $\theta_{op} < 28^\circ\text{C}$ $\theta_{sk} = 27,5 + 0,166 \cdot \theta_{op} + 8 \cdot 10^{-4} \cdot Pva$

Si $28^\circ\text{C} < \theta_{op} < 36^\circ\text{C}$

$$\theta_{sk} = 25,2 + 0,249 \cdot \theta_{op} + (18,25 - 0,3525 \cdot \theta_{op}) \cdot 10^{-4} \cdot Pva$$

Si $\theta_{op} > 36^\circ\text{C}$ $\theta_{sk} = 31,4 + 0,076 \cdot \theta_{op} + 5,1 \cdot 10^{-4} \cdot Pva$

θ_{op} est la température opérative définie par :

$$\theta_{op} = \frac{hc \cdot \theta_a + hr \cdot \theta_r}{hr + hc}$$

Échange de l'organisme avec l'ambiance

• Pertes par diffusion à travers la peau :

Les pertes par sudation sont liées au gradient de pression de vapeur entre l'air et la surface de la peau (pression de vapeur à la surface de la peau).

$$E_{dif} = L_s Mp \cdot Adu \cdot (Psk - Pva)$$

avec L_s (=667 Wh/kg) : chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température de la peau;

Mp : perméance de la peau $Mp = 4,58 \cdot 10^{-6}$ kg/h/m² /Pa ;

Psk : pression de la vapeur saturante à la température de la peau ;

Pva : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air

$$E_{dif} = 0,305 \cdot 10^{-2} \cdot Adu \cdot (Psk - Pva)$$

$$Psk = 610,66 \cdot e^u$$

$$u = \frac{\theta_{sk}}{13,706 + 0,0588 \cdot \theta_{sk}} \quad (\text{en Pa})$$

$$Pva = \psi \cdot Psk \quad (\text{en Pa})$$

• Pertes sensibles dues à la respiration

$$E_{rs} = Qr - Cp_a (\theta_{exp} - \theta_a)$$

Qr : débit respiratoire valant 0,0052 Kg/h

Cp_a : chaleur massique de l'air expiré (= 0,28 Wh/Kg.°C)

θ_{exp} : température de l'air exprimé $\theta_{exp} = 32,6 + 0,066 \cdot \theta_a + 0,032 \cdot Rsa$

Rsa : humidité spécifique de l'air extérieur (g/kg air sec).

$$E_{rs} = 0,00146 \cdot M \cdot (\theta_{exp} - \theta_a), \quad M \text{ étant le métabolisme total (W).}$$

- Pertes latentes dues à la respiration

$$E_r = Qr.Lv.(R_{s_{exp}} - R_{sa})$$

Lv : chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température θ_{exp} ($L_v = Wh/kg$) ;

Rsexp : humidité spécifique de l'air expiré en (kg/kg)

Rsa : humidité spécifique de l'air extérieur (kg /kg)

D'après Mc Cutchan et Taylor, on peut écrire l'approximation suivante :

$$R_{sexp} - R_{sa} = 0,029 - 0,80.R_{sa} \text{ (kg / kg)}$$

$$R_{sa} \approx \frac{0,00083}{133,2.P_{va}} = 6,23.10^{-6} \text{ en (Pa)}$$

$$D'où : E_r = 0,0052.M.667.(0,029 - 4,99.10^{-6}.P_{va}) = 1,73.10^{-5} (5820 - P_{va})$$

- Pertes totales dues à la respiration

$$E_r = E_{rs} + E_{rl}$$

3- Évaluation du confort en ambiance chaude :

On considère qu'à tout instant l'équilibre du bilan thermique de l'organisme est assuré par l'évaporation de la sueur. En régime permanent, on a :

$$\frac{ds}{dt} = 0$$

$$0 = M - R - C - E_{dif} - E_{re}$$

Pouvoir évaporatif maximal de l'air E_{max}

Le pouvoir évaporatif maximal de l'air est fonction de la surface de Dubois, des pressions de vapeurs saturantes de la peau et de l'air et du coefficient d'échange évaporatif, intégrant à la fois la convection et les pertes radiatifs. Il est estimé par :

$$E_{max} = H_{ev}.A_{du}.(P_{sk} - P_{va}) \text{ en (W)}$$

Le coefficient d'échanges évaporatifs H_{ev} est déterminé par la norme NFX35 204 suivant la

$$\text{relation : } H_{ev} = 16,7.10^{-3}.hc.Fcl \text{ avec } Fcl = \frac{1}{1 + 0,92.hc.Rcl}$$

Les pertes par évaporation de la sueur E_{sw}

Elles sont fonction de la surface de Dubois, de la chaleur produite par le corps humain, intégrant le métabolisme et le rendement mécanique du travail du corps, selon la relation :

A l'équilibre

$$E_{sw} = 0,42.A_{du} \left(\frac{Q_p}{A_{du}} - 50 \right)$$

avec :

Q_p (W) : chaleur produite par le corps humain obtenue ;

$Q_p = M(1 - \eta)$, où

M : le métabolisme (W)

η : rendement mécanique de valeurs tabulées (voir tableau A.1.3)

$$\frac{Q_p}{A_{du}} = \frac{M(1 - \eta)}{A_{du}}$$

Les limites du confort thermique sont données par les valeurs limites de θ_{sk} (température de surface de la peau) et E_{sw} selon les formules suivantes :

$$\begin{cases} 35,7 - 0,049 \cdot \frac{Qp}{Adu} \leq \theta_{sk} \leq 35,7 - 0,047 \cdot \frac{Qp}{Adu} \text{ (}^\circ\text{C)} \\ 0,17 \cdot \left(\frac{Qp}{Adu} - 100 \right) \leq E_{sw} \leq 0,57 \cdot \left(\frac{Qp}{Adu} - 20 \right) \text{ (Kcal/h.m}^2\text{)} \end{cases}$$

La mouillure cutanée

La mouillure cutanée W_{et} est définie comme étant le rapport entre la surface de la peau mouillée et la surface totale du corps. On a :

$$W_{et} = \frac{E_{sw}}{E_{max}}$$

Différents cas peuvent se présenter alors :

Si $W < 1$, le bilan thermique peut théoriquement s'équilibrer. L'énergie absorbée par l'évaporation de la sueur est donc : $E_{sw} = E_{req}$

Si $W > 1$, l'équilibre est impossible. L'énergie absorbée par évaporation de la sueur ne peut être que : $E_{sw} = E_{max}$

La charge thermique résiduelle CH est absorbée par stockage dans l'organisme ; il y a donc élévation de la température corporelle.

$$CH = E_{req} \cdot E_{max} \text{ (W)}$$

On suppose généralement que cette situation n'est pas rencontrée dans le contexte de l'habitat.

Débit sudoral

Le débit sudoral intègre la mouillure de peau et le rendement évaporatoire de la sudation. A l'équilibre thermique ($W < 1$), on peut déterminer le débit sudoral effectif :

$$D_s = \frac{E_{sw}}{\tau} \cdot \frac{1}{0,68} \text{ (en g/h), } \tau = 1 - 0,42 \cdot e^{-6(1-W_{et})}$$

τ est le rendement évaporatoire de la sudation.

ANNEXE 2 : PRÉSENTATION SOMMAIRE DE LA RÉPUBLIQUE DU BENIN

(Sources : Bénin-Géo et Programme Vigigom sur site Internet du Bénin)

La République du Bénin est localisé en Afrique de l'Ouest, dans la zone intertropicale, entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude Nord et les méridiens 1° et 3°40' de longitude Est. Elle couvre une superficie totale de 114 763 km² (Voir Carte page suivante).

Elle est ouverte, au Sud, sur l'Océan Atlantique avec 125 km de rivage, et se trouve limitée à l'Est par la République Fédérale du Nigeria, à l'Ouest par la République du Togo, au nord par le Niger et le Burkina Faso.

1- Caractéristiques physiques

1.1.- Relief

Le relief est marqué par la plaine côtière sablonneuse du Quaternaire, les plateaux sédimentaires du continent terminal, la pénéplaine cristalline du Précambrien et la plaine du bassin versant du Niger

L'histoire des formations géologiques et les variétés paysagistes du Bénin permettent une division de l'espace national en quatre grands ensembles qui, globalement, se succèdent du Sud au Nord :

- la plaine côtière sablonneuse du Quaternaire ;
- les plateaux sédimentaires du Continental Terminal ;
- la pénéplaine cristalline du Précambrien avec ses reliefs résiduels de «Dômes Rocheux»;
- la plaine du bassin versant du Niger bordée par le massif de l'Atacora.

Dans l'ensemble, les altitudes varient du niveau de la mer (altitude 0m) à environ 800 mètres (crêtes de l'Atacora). Les terrains vallonnés sont en pente douce, à l'exception des régions à «pains de sucre» et de l'Atacora.

1.2.- Climat

Le Front intertropical (FIT) est constitué par la rencontre de courants aériens en provenance de l'anticyclone de Sainte-Hélène et les alizés originaires du Sahara. Les caractéristiques physiques franches et contrastées des deux types de courants aériens déterminent les conditions climatiques du Bénin tout au long de l'année.

Depuis le début du siècle, l'évolution du climat a été marquée par la succession de périodes excédentaires et déficitaires en précipitations, d'inégales durées et apériodiques. Cette situation rend difficile toute prévision climatologique.

La zone comprise entre les 6ème et 9ème degrés de latitude Nord, connaît quatre saisons par an :

- deux saisons sèches: une petite qui va de Juillet-Août à Octobre, une grande qui s'étend de Novembre-Décembre à Mars ;
- deux saisons humides ou pluvieuses : la grande, d'Avril-Mai à Juillet et la petite en Octobre-Novembre.

La zone comprise entre les 9ème et 12ème degrés connaît seulement deux saisons :

- la saison pluvieuse correspondant à l'unique passage du Front de Mousson de Juin - Juillet à Septembre - Octobre;
- la saison sèche le reste de l'année.

Dans l'ensemble, la pluviométrie varie entre 900 mm et 1450 mm d'eau par an, tandis que les températures fluctuent entre 22° C et 37° C sous-abris. Ces variations constituent la première des contraintes de la productivité des terres du Bénin.

1.3.- Végétation

La végétation est échelonnée et se dégrade lorsque l'on passe du Sud au Nord. Elle est répartie en deux grandes catégories de paysages végétaux :

- la végétation dégradée du Sud composée des îlots forestiers, des savanes arborées et arbustives, quelques prairies aquatiques ainsi que des mangroves
- la végétation des régions soudanaises formée de la savane arborée coupée par des forêts classées. La végétation n'est dense que le long des cours d'eau où se développent les

1.4.- Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du Bénin s'appuie sur le système morphogénétique en place à partir de la ligne de partage des eaux. Aussi distingue-t-on le système Nord ayant comme défluent le fleuve Niger et le système Sud dont les eaux convergent vers le Golfe du Bénin dans l'Océan Atlantique. De ces deux ensembles, se dégagent deux systèmes imbriqués de bassins versants auxquels s'ajoute le bassin de la Pendjari (380 km).

Au Nord, le bassin du Niger capte les eaux des affluents suivants: d'Ouest en Est, le Mékrou (410 km), l'Alibori (338 km), la Sota (250 km). Le fleuve Niger, matérialise la frontière entre la République du Bénin et la République du Niger sur 120 km.

Au Sud, on peut recenser : l'Ouémé (510 km), l'Okpara (200 km), le Zou (150 km), le Mono (100 km), le Couffo (125 km).

Ce réseau hydrographique est complété par le système lacustre et lagunaire dont les trois principaux plans d'eau couvrent 35 km² pour la lagune de Porto-Novo, 138 km² pour le lac Nokoué et 78 km² pour le lac Ahémé.

2.- Données démographiques

La population du Bénin est estimée à 5 780 000 habitants (1997) dont 51% de sexe féminin (les femmes en âge de procréer 15-49 ans constituent 44% de la population féminine totale), 4% d'enfants de moins d'un an et 18% d'enfants de moins de cinq ans. Avec 48% d'enfants de moins de 15 ans la population du Bénin est très jeune. Estimée en 1997 à 5 780 000 habitants, la population du Bénin se répartit à raison de 37% dans les villes contre 63% en zones rurales, avec une espérance de vie de 54 ans.

Quelques données caractéristiques :

Densité de la population : 42,8 hab./km² en 1992

Taux d'accroissement démographique : 3.2%

Taux de natalité : 47,4 pour 1000

Taux de mortalité infantile des moins de 5 ans (pour 1000 naissances vivantes): 167

Taux global de fécondité générale : 202 pour 1000

Espérance de vie : 54 ans

Indice synthétique de fécondité (ISF) des femmes : 6,1

Ménage disposant d'électricité: 15%

Ménage ayant accès à l'eau potable: 56%

Rapport habitants/médecin: 16.500 (1994)

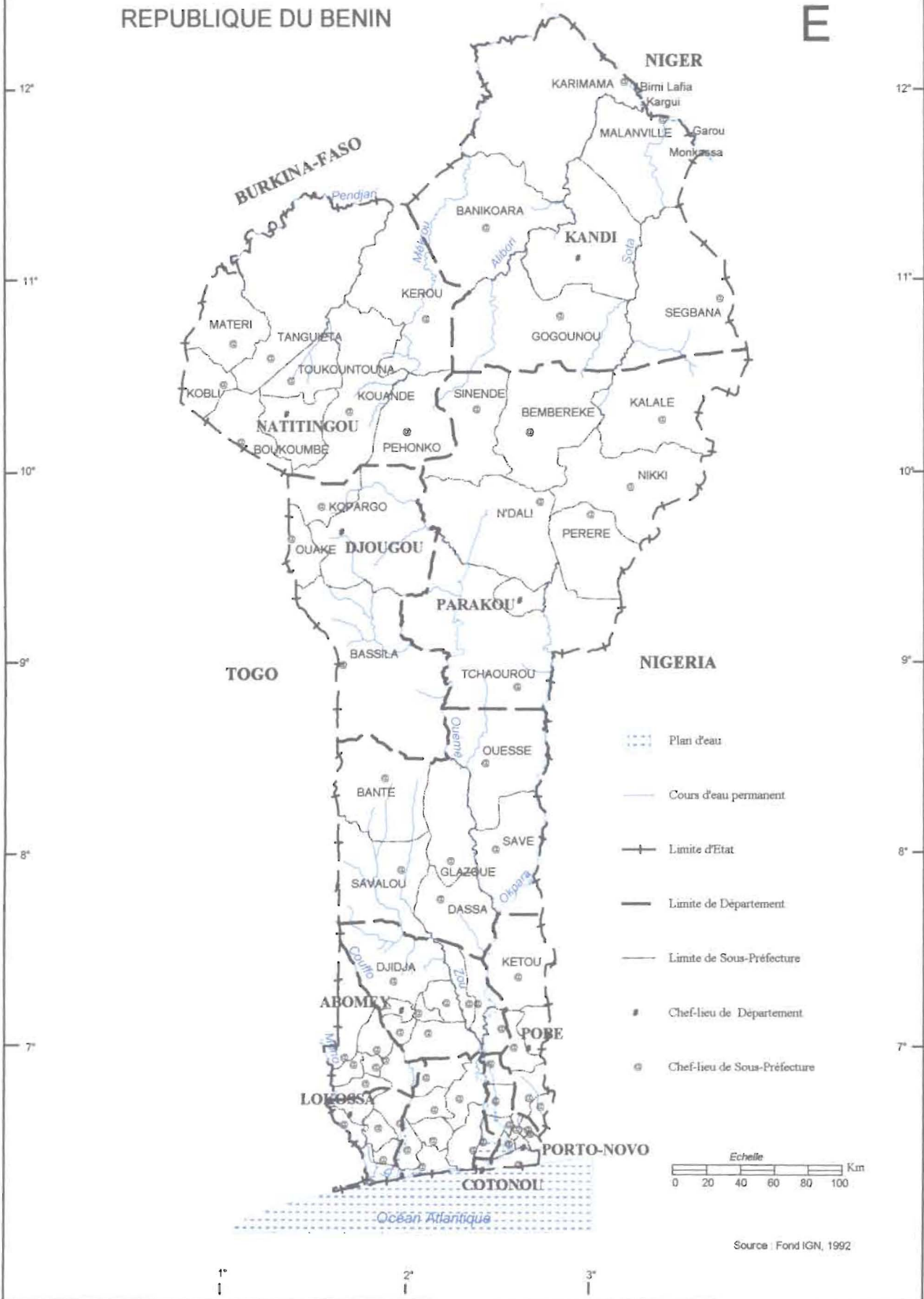
Situation nutritionnelle : 2532 calories par jour/hab (1992).

Comparé aux autres pays de l'Afrique subsaharienne, le Bénin un taux de fécondité élevé. La population est inégalement répartie sur le territoire ; par exemple la densité pour le département de l'Atlantique est de 316,2 hab./km² tandis que dans l'Atacora il elle est de 20,2 hab/km².

REPUBLIQUE DU BENIN

8

E



3.- Situation socioéconomique du Bénin

La situation économique des pays au sud du Sahara est en constante amélioration depuis 1990. L'économie du Bénin n'est pas restée en marge de cette évolution positive grâce à la mise en œuvre depuis 1989 de programmes de réformes appuyés par la communauté internationale.

Selon la Banque Africaine de Développement (BAD), la reprise amorcée de l'économie africaine en 1994 s'est poursuivie en 1996. Ainsi la croissance du PIB réel de l'Afrique en 1996 est estimée à 4,8% contre 2,8% en 1995 et une moyenne de 1,6% sur la période 1990-1994.

Le Produit Intérieur Brut (PIB)

Selon les informations disponibles, le PIB relatif à l'année 1996 fait apparaître un taux de croissance de 5,1 % pour un déflateur implicite de 6,7 %. Ainsi, sur cette base, il s'est établi à 1129,5 milliards à prix courants à fin Décembre 1996 contre 1002,9 milliards un an plus tôt. Les contributions des principaux secteurs à la formation du PIB demeurent stables d'une année à l'autre, avec cependant, une légère hausse du secteur primaire au détriment des secteurs secondaire et tertiaire. En effet, le poids relatif au secteur primaire s'est renforcé en passant de 34 % à 37,8 % tandis que celui des secteurs secondaire et tertiaire a été respectivement ramené de 14,6 % à 13,8 % et de 51,4 % à 48,4 %.

L'examen du tableau des emplois du PIB fait ressortir :

- l'insuffisance manifeste de la production nationale (PIB) absorbée à près de 90 % par la consommation ; il en résulte une épargne très faible qui ne permet pas de faire face aux besoins d'investissement susceptibles de relancer la croissance économique
- les besoins de financement de l'économie sont donc couverts sur ressources extérieures notamment dans le cadre du programme d'investissement public.

ANNEXE 3 : DONNEES CLIMATOLOGIQUES DES VILLES DU BENIN

1- Ville de Cotonou (Période: 1961-2000)

Humidite relative (%)

Mois	H _{max}	H _{moy}	H _{min}
1	95.1	80.4	59.3
2	91.2	82	69.4
3	90.2	81.4	70.5
4	91.5	81.2	70.1
5	94.2	83.6	73
6	94.4	84.4	74.4
7	94.6	87.8	79.7
8	93	87.2	78.4
9	95.1	87.9	77
10	95	85.1	73.1
11	93.2	82.7	71.1
12	95.7	84.5	71

Vitesse du vent (m/s)

Mois	V _{max}	V _{moy}	V _{min}
1	4.2	2.8	0.9
2	6.1	4.5	2.8
3	6.2	4.8	2.7
4	6	4.1	1.9
5	5.4	3.4	1.4
6	6.1	4.2	2
7	6.3	4.8	2.8
8	6.2	5.2	3.9
9	5.6	4.2	2.4
10	5	3.6	1
11	4.8	3.3	1
12	4.4	3	0.9

Température (°C)

Mois	T _{max}	T _{moy}	T _{min}
1	29.9	26.1	22.6
2	30.4	27.6	25.1
3	31.4	28.7	26.2
4	31	28.2	25.1
5	30.3	27.4	24.3
6	28.8	26.4	23.9
7	27.5	25.3	23.5
8	26.4	24.4	23.1
9	27	24.5	23
10	29.2	26.2	23.4
11	30.5	27.3	24.2
12	29.9	26.6	23.3

Humidité spécifique (g/kg air sec)

Mois	H _{max}	H _{moy}	H _{min}
1	18.8	17	14.6
2	20.4	19.1	17.5
3	21.1	20.2	18.7
4	20.8	19.6	18.1
5	20.5	19.2	18
6	19.2	18.3	17.2
7	18.6	17.8	17
8	17.3	16.7	16.2
9	17.5	17	16.4
10	19.2	18.2	17
11	20.2	19	17.3
12	19.5	18.5	17.2

2- Ville de Bohicon (Période: 1961-2000)

Humidité relative (%)

Mois	H _{max}	H _{moy}	H _{min}
1	55.2	35.7	18
2	83.5	58.8	34.5
3	91.5	68.4	45
4	94.6	77.3	58.4
5	96.9	81.4	61.7
6	98.2	84.4	66.2
7	98.1	87.4	71
8	98.2	88.3	72.8
9	98.3	87.5	69.5
10	98.7	87.4	65
11	97.4	78.4	52.2
12	97.4	76.3	48.3

Vitesse du vent (m/s)

Mois	V _{max}	V _{moy}	V _{min}
1	3.6	1.9	0.6
2	3.3	1.8	0.5
3	3.4	1.9	0.7
4	3.2	1.7	0.5
5	3.1	1.5	0.3
6	3.3	2	0.5
7	3.9	2.5	1.1
8	4	2.6	1.5
9	3.7	2.5	1.4
10	3	1.9	0.5
11	3.2	2.3	1.6
12	2.9	1.9	0.9

Température (°C)

Mois	T _{max}	T _{moy}	T _{min}
1	34.5	28.6	22.6
2	36	29.9	23.8
3	35.3	29.8	24.2
4	34	28.9	23.8
5	32.5	27.9	23.3
6	30.8	26.7	22.5
7	29.4	25.6	21.8
8	29.3	25.4	21.5
9	30.4	26.2	21.9
10	31.8	27	22.3
11	33.8	28.4	22.9
12	33.8	28.1	22.4

Humidité spécifique (g/kg air sec)

Mois	H _{max}	H _{moy}	H _{min}
1	9.6	7.2	5
2	15.2	13	10.5
3	17.8	15	13
4	17.5	16.3	15
5	16.6	15.6	14
6	17	16.2	15.3
7	16.2	15.4	14.6
8	16	15.5	14.9
9	16.7	15.8	15
10	16.9	16	15
11	16.5	15.2	13.7
12	16.4	14.9	12.7

3- Ville de Savè (Période: 1961-2000)

Mois	Température (°C)			E _{cm}	Humidité spécifique (g/kg air sec)			V _{moy} vent (m/s)
	T _{max}	T _{min}	T _{moy}		H _{max}	H _{moy}	H _{min}	
1	35,9	19,5	27,7	16,4	9.6	7.2	5	1,4
2	36,2	21,3	28,8	15	15.2	13	10.5	1,5
3	35,7	22,9	29,3	12,8	17.8	15	13	1,6
4	34,4	22,2	28,3	12,2	17.5	16.3	15	1,7
5	33	21,9	27,5	11,1	16.6	15.6	14	1,6
6	30,8	21,3	26,1	9,5	17	16.2	15.3	1,2
7	29,1	20,3	24,7	8,8	16.2	15.4	14.6	1,5
8	27,9	20,4	24,2	7,5	16	15.5	14.9	1,7
9	29,5	20,4	25	9,1	16.7	15.8	15	1,3
10	31,7	19,7	25,7	12	16.9	16	15	1
11	34,5	20,4	27,5	12,9	16.5	15.2	13.7	0,9
12	34,5	19	26,3	15,5	16.4	14.9	12.7	0,8

ANNEXE 4 : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

1- Murs :

a- Parois légères

Matériau	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m°C)	Chaleur volumique (J/m ³ °C)	Diffusivité (m ² /h)
Parpaing creux	10	1.5	2200000	0.0025
Parpaing creux	12	1.5	2200000	0.0025
Paroi double	6	0.6	1200000	0.0005

b- Parois lourdes :

Matériau	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m°C)	Chaleur volumique (J/m ³ °C)	Diffusivité (m ² /h)
Parpaing creux	15	1.5	2200000	0.0025
Béton de terre	15	0.8	1800000	0.0016
Béton de terre	20	0.8	1800000	0.0016
Béton de terre	25	0.8	1800000	0.0016
Béton de terre	30	0.8	1800000	0.0016

2- Matériaux de couverture :

Matériau	Emissivité sous-face	Absorption surface
Bac Aluminium	0.15	0.30/ 0.50/ 0.70
Tôle d'acier	0.90	0.30/ 0.50/ 0.65
Fibrociment	0.94	0.50/ 0.80
Toiture légère	Faux plafond en contreplaqué (bois) de 0.5cm d'épaisseur	

Contribution à la conception bioclimatique de l'habitat dans la région sud du Bénin

Résumé :

Parmi les préoccupations majeures en matière de conception de l'habitat, celles relatives aux conditions des ambiances intérieures occupent une place prépondérante en raison des contraintes climatiques pendant les périodes chaudes ; il est donc impérieux de concevoir l'habitat de façon à maintenir les ambiances dans des conditions de confort sans recourir nécessairement au système de conditionnement d'air. L'analyse de l'influence des principaux paramètres sur les conditions d'ambiance a permis d'identifier les composantes d'une architecture propre qui permet de prendre en compte les atouts du site et d'établir progressivement des solutions d'amélioration du confort ressenti dans l'habitat dans la région sud du Bénin. En appliquant ces solutions à divers types de logements courants dans la région sud du Bénin, il ressort que les principales méthodes d'amélioration des conditions d'ambiance sont les mesures architecturales empêchant l'accumulation de chaleur dans les parois des constructions et celles favorisant la ventilation des locaux et l'atténuation des apports solaires. Nos recommandations pour la conception d'un habitat adapté au climat du site vont donc dans le sens de la ventilation efficace des locaux et la protection des constructions contre les apports solaires.

Mots clés

Confort thermique, zone de confort, mouillure cutanée, conception bioclimatique, architecture climatique, comportement thermique, inertie des parois, protection solaire, ventilation naturelle.

Contribution to the bioclimatic design of houses in South-Benin region

Summary :

Due to the climatic factors during the warm seasons in tropical region, the ambient conditions in rooms are very important for efficient design of houses : they must be built so that they can maintain the ambient conditions in the comfort zone without air-condition systems. In order to identify the most important architectural elements to be taken into account for the design of houses suitable for human comfort in South Benin, the influence of many parameters on the temperature in the room is analysed. The solutions issued from the parametric study are applied to a few typologies of buildings in this regions ; then we concluded that the best methods to perform comfortable ambient conditions in houses are those liable to create an efficient ventilation across the rooms, and to avoid solar penetration in the rooms and heat storage in the walls.

Key words

Thermal comfort, comfort zone, wettedness, bioclimatic design, climatic architecture, thermal behaviour, construction mass, solar protection, natural ventilation.