



ADAPTATION DES BÂTIMENTS FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : CAS DES CHAMBRES D'ETUDIANTS DU 2iE À KAMBOINSÈ

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : GENIE CIVIL

Présenté et soutenu publiquement le 16 juin 2010 par :

Fabrice Norbert OHANDJA ELOUNDOU

Ingénieur des Travaux de Génie Civil

Travaux dirigés par :

- **Professeur Yezouma COULIBALY, Enseignant-chercheur, Chef UTER GEI**
- **Professeur Didier LECOMTE, Enseignant-chercheur, UTER GEI**
- **Docteur Abibou CISS, Enseignant-chercheur, UTER ISM**

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr. Ismaïla GUEYE

Membres et correcteurs : Pr. Yezouma COULIBALY
Pr. Didier LECOMTE
Dr. Rafaëlle VINAI

Promotion [2009/2010]

CITATION

« Celui qui reconnaît consciemment ses limites est le plus proche de la perfection. »

Johann Wolfgang Von GOETHE

DEDICACE

- À mon père Mr ELOUNDOU OHANDJA Albert Joseph
- À ma mère Mme ELOUNDOU née NYAMA MBENGUE Marie-Agnès
- À mon oncle M. MVONDO Jean Martin
- À mes frères et sœurs Edwige, Arsène, Estelle, Guy et Bernard
- À mes amis ELLI Alessandro, Parfait, Christian Germain, Léonard, Wilson, Francis, François, Thierry, Jean Bosco, Jacques Rémy, Julien, Jean Claude, Arnaude, Nadège Y, Carole Olivia, Estelle, Nicole, Béatrice, Marie Sylvie, Danielle, Nadège A, Suzanne et Christine
- À l'Abbé Antoine Roger EVOUNA
- Au Père Andrew BERINYUY MBINKAR
- À la famille NKOUM II
- À la famille EKWALLA Daniel

Et à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu pendant ma formation, par leurs prières et leur assistance.

REMERCIEMENTS

Au terme de mes deux années de formation, qu'il me soit permis d'accomplir le noble devoir d'exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, en rendant mon séjour à la fondation 2iE agréable.

Je remercie sincèrement :

- **M. GINIES Paul**, Directeur Général de la fondation 2iE et tout le personnel administratif pour l'intérêt porté à notre formation ;
- Le **Dr GUEYE Ismaïla**, Enseignant-Chercheur à l'UTER ISM ;
- Mes encadreurs, pour les enseignements reçus, les conseils prodigués, les connaissances inculquées, leur dévouement et leur disponibilité, particulièrement :
 - Le **Pr COULIBALY Yezouma**, Chef de l'Unité d'Enseignement et de Recherche Génie Energétique et Industriel (UTER GEI) ;
 - Le **Pr LECOMTE Didier**, Enseignant-Chercheur à l'UTER GEI ;
 - Le **Dr CISS Abibou**, Conseiller aux Relations Internationales ;
 - **M. GOROSTIZA Luis**, Architecte en service à la DIME ;
- Le **Dr SALEY Moussa Hadiza**, Enseignant-Chercheur au 2iE, pour son assistance et l'attention portée à mes travaux ;
- Le personnel de la DIME, pour l'assistance technique et les données fournis durant ce mémoire ;
- **Mme NDIAYE Aminata**, pour son soutien ;
- **M. BERTRAM Grant**, pour son soutien ;
- **M. SANGUISSO Daouda**, pour son soutien ;
- **Mme. Liliane PIERRE-LOUIS**, Urbaniste et Enseignante-chercheur à l'Institut d'Urbanisme de Paris- IUP Université Paris XII, pour les conseils prodigués ;
- **M. BONKOUNGOU Joachim**, pour avoir encouragé mon intérêt à la thématique de mon Mémoire de Fin d'Etudes.
- Les étudiants de **Licence 1** qui m'ont permis de faire les expérimentations dans leurs chambres : **AOUBA Samiratou**, **BARRO Issouf**, **BENON Philippe**, **COMBERE Isabelle**, **KABRE Arnaud**, **KABORE Ousman**, **NJOMO Pierrick**, **OUEDRAOGO Arnaud**, **OUEDRAOGO Danielle**, **OUEDRAOGO Hulda**, **POUGUELEU Franky**, et **YOUGBARE Arnaud**.

RESUME

Le présent mémoire de fin d'études traite l'adaptation des bâtiments aux changements climatiques : cas des chambres d'étudiants du 2iE au site de Kamboinsé. Dans ce mémoire, nous avons focalisé notre étude sur l'effet des changements climatiques dans l'habitat, par les mesures des paramètres de confort thermique dans les chambres pilotes. L'analyse des données collectées sur le terrain, et la simulation de ces données par un programme de calcul, nous ont permis d'avoir des résultats très intéressants. Ainsi, il en ressort que le confort thermique dans un local peut être atteint, si on augmente l'inertie des murs et au contrôle la ventilation, si on adopte les moyens passifs de refroidissement, si on respecte les principes de l'architecture bioclimatique lors de la conception d'un bâtiment, et si les matériaux locaux de construction utilisés sont de bonne qualité. Pour faire face aux changements climatiques, tous ces paramètres devront être intégrés dans la conception des bâtiments, en ayant en perspective l'idée d'avoir des habitats écologiques.

Mots clés : changements climatiques ; confort thermique ; inertie des murs ; architecture bioclimatique ; habitats écologiques.

ABSTRACT

This dissertation deals with the adaptation of building to climate change: case of 2iE's student housings at 2iE's site in Kamboinsé campus. In this dissertation, we have focused our study on the climate change effect in the accommodations, through measuring the parameters of thermal comfort in the pilot rooms. The analysis of data collected on the fields of study, and the simulation of these data through a calculation program, allow us to have very interesting results. So, it shows that the thermal comfort in a room can be achieved, if we increase the inertia of the walls and we control the ventilation, if we adopt passive means of cooling, if we comply with the principles of bioclimatic architecture in building design, and if the local building materials used are of good quality. To face to climate change, all these parameters should be integrated while designing a building, keeping in view the idea of ecological homes.

Keys words: climate change; thermal comfort; inertia of walls; bioclimatic architecture; ecological homes.

NOMENCLATURE

a : diffusivité thermique en m^2/s ($a = \lambda / \rho C$)

C : chaleur spécifique du matériau $J/kg.K$

Ca : chaleur spécifique de l'air $J/kg.K$

e : épaisseur de la paroi en m

h ; h_e ; h_a : coefficient de transfert de chaleur par convection en $W/m^2.K$

Hr ext : humidité relative à l'extérieur du local en %

Hr int : humidité relative à l'intérieur du local en %

m_r : débit de renouvellement d'air et fuites en m^3/h

q_e : flux de chaleur à l'extérieur du local en W

q_i : flux de chaleur à l'intérieur du local en W

S_i : surface intérieure du local en m^2

t : temps en s

T : température en $^{\circ}C$

T_a : température de l'air ambiante en $^{\circ}C$

T_e : température extérieure ambiante en $^{\circ}C$

T_i : température intérieure ambiante en $^{\circ}C$

T_{ext} : température extérieure ambiante en $^{\circ}C$

T_{int} : température intérieure ambiante en $^{\circ}C$

T_{ir} : température intérieure ambiante calculée par simulation en $^{\circ}C$

T_{max} : température extérieure maximale en $^{\circ}C$

T_{min} : température extérieure minimale en $^{\circ}C$

z : espace en m

Symboles grecs

Δt : déphasage en heures (h)

ΔT : écrêtement (Amortissement) en $^{\circ}C$

ΔT_{max} : amplitude constante de la température extérieure en $^{\circ}C$

λ : conductivité thermique du mur en $W/m^{\circ}C$

ω : période en seconde (s)

ρ : masse volumique apparente kg/m^3

ϕ_e : flux de chaleur à l'extérieur du local en W

ϕ_i : flux de chaleur à l'intérieur du local en W

θ : température en $^{\circ}C$

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'ingénierie de l'Eau et l'Environnement

ACCA-VICAB : Adaptation au Changement Climatique en Afrique - Villes et Campagnes
du Burkina Faso

BBC : Bâtiment Basse Consommation d'énergie

BLT : Bloc de Latérite Taillé

BTC : Bloc de Terre Comprimé

BTCS : Bloc de Terre Comprimé Stabilisé au ciment

BTP : Bâtiments et Travaux Publics

DIME : Direction de l'Innovation, du Management et de l'Entreprise

HPE : Haute Performance Énergétique

HQE : Haute Qualité Environnementale

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

TMV : Tuile de Mortier Vibré

VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Températures et humidités relatives mesurées le 22/03/10 – Chambre K 799</i>	10
<i>Tableau 2: Températures et humidités relatives mesurées le 22/03/10 – Chambre K 674</i>	10
<i>Tableau 3:Températures et humidités relatives mesurées le 12/04/10 – Chambre K 799</i>	11
<i>Tableau 4: Températures et humidités relatives mesurées le 12/04/10 – Chambre K 674</i>	11
<i>Tableau 5 : Vérification des paramètres bioclimatiques des chambres pilotes.....</i>	12
<i>Tableau 6: Valeurs du déphasage issu des mesures faites sur le terrain</i>	17
<i>Tableau 7: Valeurs de l'écrêtement issu des mesures faites sur le terrain</i>	18
<i>Tableau 8: Valeurs numériques et unités des données de calcul</i>	21
<i>Tableau 9: Valeurs des températures intérieures obtenues par la démarche analytique pour $e = 14$ cm et $m_r = 0,013$ m³/s</i>	21
<i>Tableau 10: Valeurs de l'écrêtement obtenu par la démarche analytique pour $e = 14$ cm et $m_r = 0,013$ m³/s</i>	22
<i>Tableau 11: Valeurs des températures intérieures, du déphasage et de l'écrêtement obtenus par la démarche analytique.....</i>	24
<i>Tableau 12 : Variation de la valeur limite « e_{max} ».....</i>	29
<i>Tableau 13: Réponse thermique des éléments structuraux d'une maison traditionnelle en zone tropicale [9].</i>	32
<i>Tableau 14: Écobilan sommaire des matériaux constitutifs de l'enveloppe du bâtiment.</i>	34

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Maisons traditionnelles à Sindou au Burkina Faso</i>	5
<i>Figure 2: Maisons modernes à Ouagadougou au Burkina Faso</i>	5
<i>Figure 3: Pièce d'étude assimilée à une chambre pilote de dimension 3m×5m (15m²)</i>	14
<i>Figure 4: Évolution des températures mesurées le 22/03/10 – Chambre K 799</i>	18
<i>Figure 5: Évolution des températures mesurées le 22/03/10 – Chambre K 674</i>	19
<i>Figure 6: Évolution des températures mesurées le 12/04/10 – Chambre K 799</i>	19
<i>Figure 7: Évolution des températures mesurées le 12/04/10 – Chambre K 674</i>	20
<i>Figure 8: Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois de mars, pour épaisseur du mur à 14 cm et $m_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	22
<i>Figure 9: Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois d'avril, pour épaisseur du mur à 14 cm et $m_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	23
<i>Figure 10: Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois d'avril, pour épaisseur du mur à 30 cm et $m_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	25
<i>Figure 11: Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois d'avril, pour épaisseur du mur à 35 cm et $m_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	25
<i>Figure 12: Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois d'avril, pour épaisseur du mur à 40 cm et $m_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	26
<i>Figure 13: Zone de confort et types de climat [7]</i>	30
<i>Figure 14: Carte du nombre de mois de l'année où l'inertie thermique est requise en Afrique de l'Ouest [13]</i>	35
<i>Figure 15: Carte du nombre de mois de l'année où la ventilation permanente est requise en Afrique de l'Ouest [13]</i>	35

SOMMAIRE

CITATION	ii
DEDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
RESUME.....	v
ABSTRACT	v
NOMENCLATURE.....	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
I.INTRODUCTION GENERALE	1
I.1 Contexte du projet.....	1
I.2 Problématique du projet.....	1
I.3 Objectifs de l'étude	2
I.4 Démarche et organisation du travail	2
II. HYPOTHESE DE TRAVAIL	4
II.1 Etat des lieux du secteur du bâtiment en Afrique.....	4
II.2 Hypothèse de base du mémoire	6
III. METHODOLOGIE DE L'ETUDE.....	9
III.1 Collecte des données	9
III.2 Vérification des critères de l'architecture bioclimatique	12
III.3 Le traitement des données	12
IV. RESULTATS	17
IV.1 Résultats des mesures faites sur le terrain.....	17
IV.2 Résultats de la démarche analytique	20
IV.3 Influence de l'épaisseur du mur et de la variation du débit de renouvellement d'air ..	23
V. DISCUSSIONS ET ANALYSES	27
V.1 Analyse des résultats obtenus par mesure et par calcul.....	27
V.2 Résumé général des analyses et discussions	28
V.3 Prototype de bâtiment bioclimatique.....	31
VI. RECOMMANDATIONS – PERSPECTIVES	36
VI.1 Recommandations	36
VI.2 Perspectives.....	37
VII. CONCLUSION.....	39
BIBLIOGRAPHIE	40
ANNEXES	42

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

I.1 CONTEXTE DU PROJET

Le thème de notre mémoire de fin d'étude découle d'un autre projet élaboré par **M. BONKOUNGOU Joachim** (*Ingénieur de recherches Géographe – Climatologue*) qui est intitulé : «**Adaptation au Changement Climatique en Afrique - Villes et Campagnes du Burkina Faso (ACCA-VICAB)**».

Ce projet s'intéresse à l'adaptation de l'Afrique aux changements climatiques. Plus particulièrement, il s'agit de concevoir l'habitat le plus durable possible, avec une double contrainte : peser le moins possible sur les prélèvements de ressources naturelles et garantir un niveau de confort raisonnable. Le cadre de ces habitations (villes ou campagne) sera pris en compte, en se limitant au contexte du Burkina Faso, pour des raisons de commodité.

Le contenu de l'étude :

Dans le cadre de notre mémoire, nous allons nous intéresser à l'effet des changements climatiques au sein de notre habitat. Tous les experts [1] s'accordent dans l'idée que les changements climatiques engendreront une augmentation de la température moyenne du globe. Nous allons nous intéresser aux conséquences de cette augmentation de température dans l'habitat, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du local d'habitation.

I.2 PROBLÉMATIQUE DU PROJET

De mars à Juin, les températures moyennes au Burkina Faso avoisinent les 40°C à l'ombre. Ceci est déjà une source d'inconfort. Les études climatiques montrent une augmentation des températures moyennes [1] en Afrique subsaharienne. Ainsi, il nous incombe d'adopter des techniques adéquates dans les constructions, notamment dans l'habitat, pour faire face à cette variation du climat.

En outre, les habitations dans nos villes sont conçues de façon inadaptée, sans prendre en compte certains paramètres tels que le climat et les normes architecturales. Les habitations sont plus ou moins confortables, énergivores, et surtout mal adaptées au climat local.

Au vu de cette situation, beaucoup de questions peuvent se poser. L'habitation où nous vivons est-elle adaptée aux changements climatiques ? Respecte-t-elle les normes architecturales ? A-t-on pris en compte l'aspect climatique lors de sa conception ? Les matériaux de construction

utilisés pour sa réalisation sont-ils conformes ? Faut-il adopter une technique de construction bien particulière pour faire face à l'augmentation des températures ? Voilà autant de questions qui nécessitent des éléments de réponses.

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons focaliser notre étude sur les chambres d'étudiants du 2iE à Kamboinsé. L'étude aura pour but de vérifier l'adaptabilité des constructions actuelles et de donner des éléments pour la conception de bâtiments adaptés dans le contexte de l'augmentation des températures, tout en apportant des solutions aux questions posées plus haut.

Source [1] : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC.

I.3 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Cette étude vise les objectifs suivants :

✚ Objectif général

- ✓ Proposer un bâtiment bioclimatique ayant un système constructif particulier et respectant les principes de l'architecture climatique, en vue d'améliorer l'habitat actuel.

✚ Objectifs spécifiques

- Améliorer le confort thermique dans les chambres d'étudiants du site de Kamboinsé tout en réduisant la consommation d'énergie fossile dans les habitations, à travers une utilisation rationnelle ;
- Favoriser l'utilisation des matériaux locaux de construction ;

✚ Résultats attendus

- Les paramètres architecturaux pour la conception de l'enveloppe des bâtiments d'habitation bioclimatiques en Afrique tropicale sont identifiés.

I.4 DEMARCHE ET ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour mener à bien ce mémoire, nous avons d'abord fait une étude préliminaire, ensuite une étude sur le terrain, et enfin une étude d'ingénierie.

- ✓ **Etude préliminaire** : Elle a consisté à rassembler le plus grand nombre d'informations et d'études relatives à l'adaptation des bâtiments aux changements

climatiques. Ainsi, nous avons procédé à une recherche bibliographique par le biais de la bibliothèque du 2iE, des archives de la DIME et des sites internet.

- ✓ **Etude sur le terrain** : elle a consisté essentiellement à mesurer les températures et humidités relatives, à l'extérieur et à l'intérieur des chambres pilotes. Ceci, dans l'optique d'étudier le comportement thermique des chambres d'étudiant. En outre, nous avons aussi analysé les constructions en place, pour vérifier si les normes de l'architecture bioclimatique ont été respectées.
- ✓ **Etude d'ingénierie** : pour pouvoir proposer un bâtiment respectant les objectifs de ce mémoire, cette étude nous a permis d'analyser les résultats des mesures effectuées dans les chambres pilotes, de donner des éléments pour la conception d'un nouveau bâtiment, et de faire des comparaisons entre les deux bâtiments.

Le présent document s'articule autour des points suivants :

- ✓ La première partie nous présente de façon générale les hypothèses de base qui nous ont permis de faire ce mémoire. En outre, elle donne une idée sur les orientations à suivre pour l'atteinte des objectifs du mémoire ;
- ✓ La seconde partie présente la méthodologie d'étude pour l'obtention des résultats escomptés. Ainsi, nous verrons les différentes approches utilisées à cet effet pour illustrer les données collectées sur le terrain ;
- ✓ La troisième partie présente les résultats issus de la collecte des données et l'application des différentes démarches utilisées. Elle met aussi en évidence la solution appliquée ainsi que son influence sur les résultats obtenus précédemment.
- ✓ La quatrième partie présente l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. Ce qui nous amène à fournir par la suite, des conclusions pertinentes sur ce travail et, des perspectives et recommandations pour l'adaptation des bâtiments aux changements climatiques.

II. HYPOTHESE DE TRAVAIL

Dans cette rubrique, nous allons faire un état des lieux du secteur du bâtiment en Afrique en relation avec les changements climatiques, et présenter les hypothèses de base de notre mémoire de fin d'études.

II.1 ETAT DES LIEUX DU SECTEUR DU BATIMENT EN AFRIQUE

De façon historique, le secteur du bâtiment en Afrique, dans sa relation avec l'énergie, est caractérisé par les constructions qui tirent essentiellement leurs matériaux des ressources locales du monde rural : le bois, l'argile, la terre et diverses fibres végétales ou animales.

Les habitats traditionnels sont relativement adaptés au climat et aux particularités locales. Les architectures africaines utilisaient des méthodes simples pour éviter les surchauffes : des formes qui réduisent l'entrée directe du soleil ; une forte inertie thermique des murs ; la végétalisation des abords ; des toitures construites avec des matériaux conduisant peu la chaleur (notamment des fibres végétales en toiture dans l'Afrique subsaharienne) ; et une forte ventilation naturelle, notamment dans les zones à forte humidité.

Mais ces constructions traditionnelles ont peu à peu été remplacées, au fur et à mesure que se développaient les villes, par des modes de construction bénéficiant de procédés industriels susceptibles de répondre à une demande importante, et rapide de logements à bas coûts, présentant des garanties de longévité.

En outre, ces bâtiments pensés comme « modernes » ont été réalisés selon des techniques conçues pour des pays tempérés et bénéficiant de productions industrielles de masse pour les matériaux. Il s'est malheureusement avéré inadapté aux climats du continent africain : absence de stores protecteurs ; vitrages exposés à l'est et l'ouest ; terrasses mal orientées et non isolées ; faible inertie thermique ; constructions en béton...

Ces modes de construction mal adaptés ont entraîné une dégradation des conditions de vie des populations durant les périodes de chaleur, encore aggravées par les changements climatiques. Par conséquent, nous avons eu une tendance au développement de la climatisation, source d'émissions de gaz fluorés au pouvoir de réchauffement global très important, pour parer à la mauvaise qualité de conception. Le changement climatique oblige donc à une profonde remise en cause de cette vision initiale de la construction.

La question de l'adaptation des bâtiments représente donc un enjeu vital pour l'Afrique, qui subit de plein fouet le changement climatique, mais également la hausse des prix et la

rareté des énergies fossiles, alors même que les attentes de logement, de confort et d'amélioration du niveau de vie se font de plus en plus fortes.

C'est sur cette base là, que nous allons établir ces points de repères qui nous aiderons dans la suite de notre mémoire. [2]

Source [2] : GRET – Groupe de Recherche et d'Échanges Technologiques, Étude préliminaire d'adaptation aux changements climatiques en Afrique : Bâtiment, Contribution au projet Négociation Climat pour Toute l'Afrique Réussie (NECTAR).

Nous pouvons voir ci-dessous les différents types d'architecture présentés précédemment.

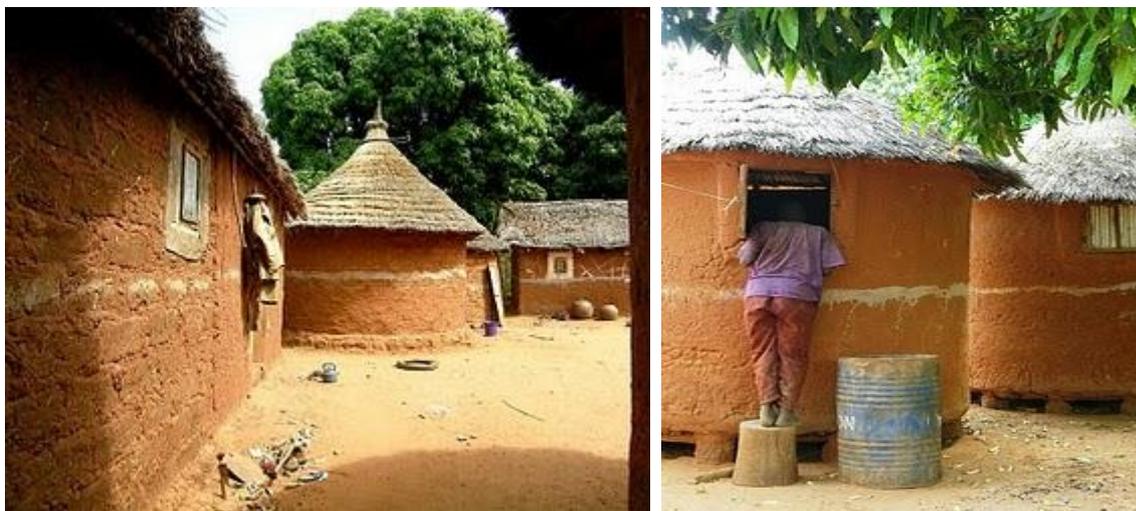


Figure 1: Maisons traditionnelles à Sindou au Burkina Faso

(Source: <http://habitatcontemporain.blogspot.com/2009/12/architecture-de-terre-sindou-burkina.html>)



Figure 2: Maisons modernes à Ouagadougou au Burkina Faso

(Source : <http://www.lefaso.net/spip.php?article33300>)

II.2 HYPOTHESE DE BASE DU MEMOIRE

II.2.1 Délimitation de la zone d'étude

Le site du 2iE à Kamboinsé est divisé en quatre grandes parties. Chaque partie a un type de logement bien particulier. Ainsi, nous avons :

- **Les pavillons A, B, et C** : Ils sont situés dans le site historique de Kamboinsé. L'ensemble des chambres d'étudiants est constitué d'une ossature en béton armé, des matériaux de remplissage en briques de terre, et ayant un environnement bien végétalisé, avec à proximité un barrage. Ces deux derniers éléments sont des facteurs non négligeables pour l'atteinte du confort thermique dans les chambres d'étudiants en terme de ventilation ;
- **La zone 1 du site d'extension de Kamboinsé** : Cette zone est voisine de l'INERA. Ici, c'est presque la même configuration d'environnement que le site historique de Kamboinsé. Mais nous pouvons noter l'absence d'un barrage, et le type de chambres d'étudiants est différent, avec des murs en parpaings ;
- **La zone 2 du site d'extension de Kamboinsé** : C'est une zone moins végétalisée que les autres, typiquement construite en matériaux locaux (BTC) et dont l'inertie des murs est grande (environ 30 cm d'épaisseur). De plus ce sont les constructions les plus récentes (moins d'un an d'âge);
- **La zone 3 du site d'extension de Kamboinsé** : C'est la zone la plus éloignée du site où sont donnés les cours. Elle se distingue des autres par les types de construction adoptés. En effet, nous avons les bâtiments construits en terre cuite, ayant une architecture traditionnelle sous forme de voûte ; et des bâtiments construit en matériaux locaux (BTC) et dont l'inertie des murs est petite (14 cm d'épaisseur).

C'est donc sur ces derniers bâtiments (*construction en BTC, dont l'épaisseur des murs est de 14 cm*) que nous allons effectuer nos mesures.

Étant donné le grand nombre de chambres sur ce site (environ 117 chambres), nous avons choisi de mener les expérimentations dans **six chambres pilotes**.

Nous avons opté pour trois **chambres orientées Nord-Sud** et trois **chambres orientées Est-Ouest**. La prise en compte de l'orientation a été nécessaire, dans l'optique de faire varier nos résultats d'une part, et d'autre part de justifier un des principes architecturaux sur l'orientation des bâtiments. De plus, les vents dominants sont orientés Nord-Est.

Ainsi les chambres retenues sont :

- **Orientation Nord-Sud** : K 799, K 798, et K 797
- **Orientation Est-Ouest**: K 675, K 674, et K 673

*Le plan de situation et de distribution de ces chambres se trouvent en le fichier PDF du
mémoire.*

II.2.2 Descriptif sommaire des chambres pilotes

De façon générale, les chambres pilotes de notre étude ont les caractéristiques suivantes [3] :

- ✓ Ce sont des blocs dortoirs identiques comprenant trois (03) chambres de surface unitaire 15m² soit 3mx5m ;
- ✓ L'ensemble des murs est réalisé en blocs de terre comprimée stabilisés à 8% de ciment (BTCS) ;
- ✓ Les blocs sont de forme parallélépipédique et de dimensions régulières; appareillage suivant les plans et détails architecturaux ; épaisseur finie de 14 cm (mur simple) suivant les plans ;
- ✓ La toiture de chaque bloc de logement est en deux pentes. La couverture des bâtiments est réalisée en ONDULINE de couleur verte.

Source [3] : DIME, Construction de locaux à usage de logements pour étudiants sur le site du 2iE à Kamboinsé – Burkina Faso : Dossier de consultation restreinte - Devis descriptif, Mai 2007.

II.2.3 Critères de l'architecture bioclimatique

Un habitat bioclimatique est un bâtiment dans lequel le chauffage et la climatisation sont assurés en tirant le meilleur parti du rayonnement solaire, de l'inertie thermique des matériaux, du sol et de la circulation naturelle de l'air.

L'architecture bioclimatique quant à elle, est une discipline de l'architecture qui recherche un équilibre entre la conception et la construction de l'habitat, son milieu (climat, environnement,...) et les modes et rythmes de vie des habitants.

L'architecture bioclimatique repose sur les principes de base suivants [2] [4] :

- L'orientation et les ouvertures ;
- La répartition des pièces et la compacité ;
- Le choix des matériaux : les matériaux composants le bâtiment vont directement impacter sur le confort des occupants (en captant la chaleur ou en préservant la fraîcheur et en évitant les sensations de « parois froides ou chaudes »), et les économies d'énergies grâce à leur capacité d'isolation, d'inertie etc.

- Le bilan écologique global du bâtiment : puisque la conception bioclimatique vise à minimiser l'impact du bâtiment sur son environnement, il est important d'utiliser des matériaux à faible impact sur leur environnement tant au niveau de leur fabrication, pendant la durée de vie des ouvrages, qu'au moment de leur destruction à la fin de vie de l'ouvrage.

Source [4] : <http://www.hespul.org/L-architecture-bioclimatique.html>

De plus, l'architecture bioclimatique suggère qu'il faut [2] [5] :

- ✓ Utiliser des matériaux massifs pour une inertie thermique adaptée ;
- ✓ Prévoir des vitrages isolants (par exemple double vitrage), qu'il faut protéger par des volets, des stores et des casquettes, tout en privilégiant l'éclairage naturel des espaces ;
- ✓ Eviter les surchauffes estivales en protégeant le bâtiment par une végétation appropriée ;
- ✓ Utiliser des dispositifs architecturaux de protection tels que toiture opaque, casquette, etc.
- ✓ Isoler de l'enveloppe pour augmenter ses performances thermiques ;
- ✓ Utiliser de préférence les matériaux locaux de construction ;
- ✓ Utiliser la végétation comme rideau naturel.

Source [5] : **Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar, *Revue des Énergies Renouvelables.***

C'est donc sur ces principes là que nous allons focaliser notre étude par la suite, en élaborant une méthodologie d'étude pour mieux comprendre notre thématique.

III. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Pour mener à bien notre étude, l'approche méthodologique s'est faite en trois (03) phases à savoir : la collecte de données, la vérification des critères de l'architecture bioclimatique et le traitement des données.

III.1 COLLECTE DES DONNEES

Cette première phase a pour objectif de mesurer les paramètres de confort thermique. Ainsi, nous avons mesuré la température et l'humidité relative à l'extérieur et à l'intérieur des chambres pilotes. Les résultats obtenus vont nous permettre par la suite, d'étudier l'évolution des températures et l'humidité relative des chambres pilotes.

III.1.1 Matériels de mesure

Les matériels de mesure que nous avons utilisée sont :

- ✓ Un thermomètre digital
- ✓ Un hygromètre - thermomètre digital du modèle: TES-1360

(Les photos des matériels de mesure sont présentées en Annexe 1)

III.1.2 Déroulement et périodicité

Les mesures bi horaires de la température et de l'humidité relative ont été retenues pour les mois de mars et avril. De ce fait, nous avons pu voir l'évolution des paramètres mesurés pendant ces deux mois, qui sont évidemment les mois les plus chauds au Burkina Faso.

Les mesures ont été faites le *lundi 22 Mars, de 08H à 08H et le Lundi 12 Avril, de 07H à 07H*, avec un pas de temps de **2H**. Pour rappel, les paramètres mesurés étaient la température et de l'humidité relative ambiantes dans les chambres pilotes.

III.1.3 Récapitulatif des mesures effectuées

Sur le tableau ci-contre, nous avons récapitulé les mesures faites dans les chambres suivantes :

- ✓ *K 799 : Orientation Nord-Sud*
- ✓ *K 674 : Orientation Est-Ouest*

Lundi 22 Mars, de 08H à 08H

Tableau 1 : Températures et humidités relatives mesurées le 22/03/10 – Chambre K 799

Heures	T_{ext} (°C)	T_{int} (°C)	Hr ext (%)	Hr int (%)
08H	29,1	29,9	12,6	14,1
10H	32,2	31,6	12,2	12,2
12H	35	33,3	10,2	13,9
14H	37	35,6	9	10,4
16H	35,7	35,6	8,2	9,2
18H	33,3	33,7	8,8	9,9
20H	31	31,9	10	11,8
22H	30	31,3	10,4	13,3
24H	28	31,4	11,6	13,4
02H	26,6	29,7	12	14,1
04H	26	29,9	12,3	13
06H	24,6	29,1	11,5	12,6
08H	28	28,1	10,5	11

Tableau 2: Températures et humidités relatives mesurées le 22/03/10 – Chambre K 674

Heures	T_{ext} (°C)	T_{int} (°C)	Hr ext (%)	Hr int (%)
08H	29,1	28,8	12,6	12,2
10H	32,2	31,5	12,2	13,8
12H	35	33,6	10,2	10,5
14H	37	35,8	9	10,3
16H	35,7	34,8	8,2	9,1
18H	33,3	35	8,8	8,4
20H	31	33	10	12
22H	30	32	10,4	11,7
24H	28	30,8	11,6	12
02H	26,6	29,9	12	11,9
04H	26	28	12,3	14,2
06H	24,6	28	11,5	14,5
08H	28	28,5	10,5	11,5

Lundi 12 Avril, de 07H à 07H

Tableau 3: Températures et humidités relatives mesurées le 12/04/10 – Chambre K 799

Heures	T_{ext} (°C)	T_{int} (°C)	Hr ext (%)	Hr int (%)
07H	33,3	34,2	37,1	37,4
09H	38	35,6	35,5	38,5
11H	41,4	40,3	30	26,1
13H	42,6	40,8	18,5	21,3
15H	43	42	17,2	18,8
17H	41	40,4	18,9	21,2
19H	38	39	23,6	26,3
21H	37	38,2	28	27,4
23H	36,6	37	29,1	28,5
01H	33,4	35	42,3	42,2
03H	33	34,4	44,8	40
05H	32	33	44	45
07H	33	33,8	45	46,1

Tableau 4: Températures et humidités relatives mesurées le 12/04/10 – Chambre K 674

Heures	T_{ext} (°C)	T_{int} (°C)	Hr ext (%)	Hr int (%)
07H	33,3	35	37,1	35,6
09H	38	36,2	35,5	31,8
11H	41,4	38,6	30	27,5
13H	42,6	40,8	18,5	19,3
15H	43	42,5	17,2	20,6
17H	41	40,5	18,9	20,4
19H	38	38,7	23,6	24,3
21H	37	38,6	28	25,7
23H	36,6	37,5	29,1	30
01H	33,4	37,3	42,3	36
03H	33	35	44,8	41,7
05H	32	34,5	44	43,5
07H	33	34,2	45	43

N.B : Le récapitulatif des autres mesures dans les chambres pilotes est représenté dans le fichier Excel du mémoire.

III.2 VERIFICATION DES CRITERES DE L'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

Après avoir élaboré les critères de l'architecture bioclimatique dans le chapitre précédent, procédons alors à la vérification de ces critères. Nous avons récapitulé les résultats dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Vérification des paramètres bioclimatiques des chambres pilotes

Chambres	Paramètres de vérification	Observations	Critères respectés
K 799	Orientation	Nord-Sud	Oui
	Ouvertures	Nord et sud	Oui
	Vitrages	Simple	Non
	Protection des fenêtres	Pas de protection	Non
	Inertie	Petite (14cm)	Non
	Ventilation du comble	Pas de ventilation	Non
	Végétation	Pas de végétation	Non
K 674	Orientation	Est-Ouest	Non
	Ouvertures	Est et Sud	Non
	Vitrages	Simple	Non
	Protection des fenêtres	Pas de protection	Non
	Inertie	Petite (14cm)	Non
	Ventilation du comble	Pas de ventilation	Non
	Végétation	Pas de végétation	Non

En définitive, nous constatons qu'aucune chambre ne respecte ces critères.

III.3 LE TRAITEMENT DES DONNEES

Le traitement des données nous a permis d'étudier les paramètres de confort thermique mesurés dans les chambres pilotes.

Pour ce faire, nous avons étudié deux (2) paramètres, à savoir :

- **Déphasage Δt (en heures)**
- **Ecrêtement (Amortissement) ΔT : en degrés Celsius**

Ainsi, en l'absence d'un logiciel ou d'outils de simulation thermique des bâtiments, nous avons adopté la démarche analytique pour confronter les résultats mesurés sur le terrain aux résultats calculés analytiquement.

III.3.1 Objectifs de la démarche analytique

A travers l'inertie thermique d'une paroi et la prise en compte du débit de renouvellement d'air, cette méthode a pour objectif d'étudier les éléments suivant:

- **Déphasage Δt (en heures) lié à la conduction de chaleur à travers les murs ;**
- **Ecrêtement (Amortissement) ΔT : en degrés Celsius liés aux fuites et aux renouvellements d'air des chambres.**

Cette approche vise à voir comment réduire la température ambiante en période chaude, dans les conditions de température maximale. Ainsi, nous allons étudier les transferts de chaleur à travers une paroi, en nous focalisant sur son inertie et sur l'influence du renouvellement d'air.

III.3.2 Hypothèses de base

Dans cette partie, nous avons considéré que :

- Les transferts de chaleur sont par convection (dans la pièce), par conduction (dans le mur) en régime variable;
- On prend en compte l'apport de chaleur (ou extraction de chaleur) par renouvellement d'air (ou fuites) ;
- Le flux radiatif et les effets des ouvertures sont négligés (le modèle de calcul ne prend pas en compte ces effets, mais ceux-ci sont compensés par l'augmentation débit de renouvellement d'air dans la pièce)
- La solution de l'équation de chaleur est une fonction périodique ;
- La température extérieure des parois est une température sinusoïdale imposée en surface, pour un régime périodique établi ;
- La température extérieure ambiante et la température extérieure de la paroi sont en phase, c'est-à-dire qu'elles ont un même maximum. Il en est de même pour la température intérieure.

Généralités

L'équation de la chaleur s'écrit : $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$

La solution de cette équation s'écrit : $T(z, t) = \theta(z)e^{j\omega t}$ dans l'espace de FOURIER.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = j\omega\theta(z) e^{j\omega t} \text{ et } \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = e^{j\omega t} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$$

L'équation de chaleur devient : $\frac{j\omega}{a} \theta(z) = \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$

Donc la solution est : $\theta(z) = [A \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times z\right) + B \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times z\right)]$

Le flux de chaleur de cette équation s'écrit : $q(z, t) = \varphi(z) e^{j\omega t}$

Les conditions aux limites sont :

$$q_e = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\lambda e^{j\omega t} B \sqrt{\frac{j\omega}{a}}$$

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=e} = -\lambda e^{j\omega t} [A \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) + B \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times z\right)]$$

$$t_e = A e^{j\omega t}$$

$$t_i = e^{j\omega t} [A \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) + B \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right)]$$

En éliminant A, B et $e^{j\omega t}$ on obtient l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) & \frac{1}{\lambda \sqrt{\frac{j\omega}{a}}} \times \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) \\ \lambda \sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) & \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

Relation supplémentaire

$T_e = \Delta\theta_{max} e^{j\omega t}$ avec $\theta_e = \Delta\theta_{max} = \Delta T_{max} = (T_{max} - T_{min}) / 2$ (amplitude constante)

Bilan de la pièce

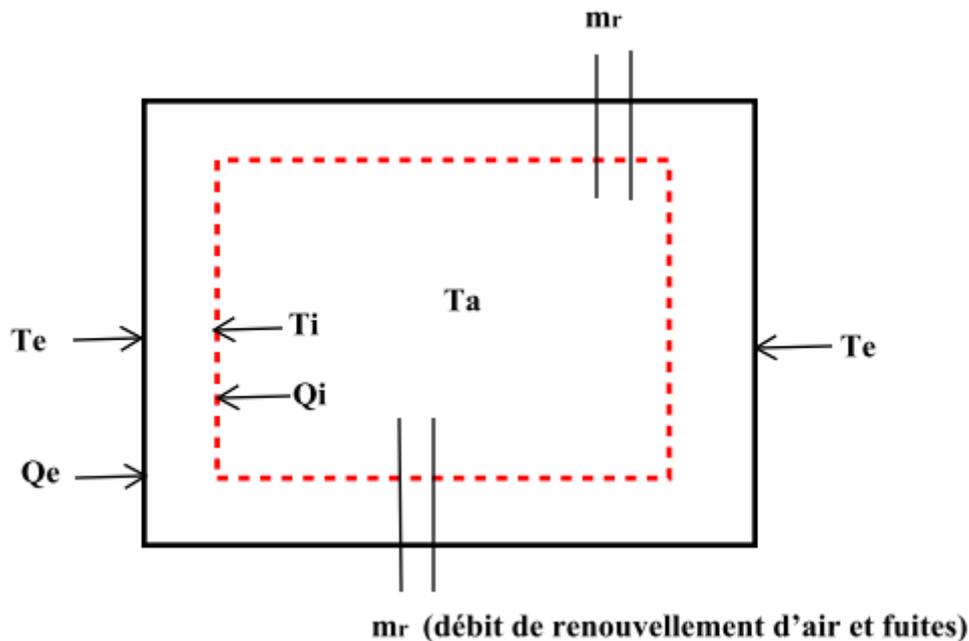


Figure 3: Pièce d'étude assimilée à une chambre pilote de dimension 3m x 5m (15m²)

En supposant qu'il n'y a pas de terme d'accumulation (valable pour une pièce vide sans équipement ou mobilier), on écrit le bilan du volume d'air :

$$q_i S_i + \dot{m}_r h_e = \dot{m}_r h_a \quad (2)$$

Avec en première approximation :

$$q_i = \varphi_i e^{j\omega t} ; h_e = C_a T_e ; h_a = C_a T_a ; T_i = \theta_i e^{j\omega t} ; T_e = \theta_e e^{j\omega t}$$

$$\begin{aligned} (2) &\Leftrightarrow \varphi_i e^{j\omega t} S_i + \dot{m}_r C_a (T_e - T_a) = 0 \\ &\Leftrightarrow \varphi_i e^{j\omega t} S_i + \dot{m}_r C_a (\theta_e - \theta_a) e^{j\omega t} = 0 \\ &\Leftrightarrow \varphi_i S_i + \dot{m}_r C_a (\theta_e - \theta_a) = 0 \end{aligned}$$

Expression de la densité de flux convectif

$$q_i = h (T_i - T_a) \Rightarrow \varphi_i = h (\theta_i - \theta_a) \text{ en simplifiant par } e^{j\omega t}$$

$$\text{D'où } \theta_a = \theta_i - (\varphi_i / h) \quad (3)$$

Insérons la relation (3) dans (2) :

$$\begin{aligned} \varphi_i S_i + \dot{m}_r C_a [\theta_e - \theta_i - (\varphi_i / h)] &= 0 \\ \varphi_i (S_i + \dot{m}_r C_a / h) + \dot{m}_r C_a (\theta_e - \theta_i) &= 0 \\ \varphi_i &= \frac{\dot{m}_r C_a (\theta_i - \theta_e)}{S_i + \dot{m}_r C_a / h} \quad (4) \end{aligned}$$

Résolution du système d'équation

En rappel, la matrice de calcul à résoudre est:

$$\begin{pmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) & \frac{1}{\lambda \sqrt{\frac{j\omega}{a}}} \times \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) \\ \lambda \sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) & \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}} \times e\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

En faisant un changement de variable, (1) devient :

$$\begin{pmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_i \\ \varphi_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

En écrivant (1) sous forme d'équation à 2 inconnues, nous avons :

$$\begin{cases} \theta_e = A \theta_i + B \varphi_i \\ \varphi_e = C \theta_i + A \varphi_i \end{cases} \text{ Or, } \varphi_i = \frac{\dot{m}_r C_a (\theta_i - \theta_e)}{S_i + \dot{m}_r C_a / h}, \text{ posons } K = \frac{\dot{m}_r C_a}{S_i + \dot{m}_r C_a / h}$$

L'équation (1) devient:

$$\begin{cases} \theta_e = A \theta_i + BK (\theta_i - \theta_e) \\ \varphi_e = C \theta_i + AK (\theta_i - \theta_e) \end{cases} \text{ Avec comme inconnue } \theta_i \text{ et } \varphi_e, \text{ puisque le reste des variables}$$

$(\theta_e \text{ et } \varphi_i)$ sont connues.

En résolvant par substitution, nous avons :

$\theta i = \frac{1+BK}{A+BK} \theta e$, nous nous focaliserons sur cette expression, puisque l'objectif ici, c'est de déterminer la température ambiante intérieure, qui est fonction de θi .

Par conséquent, nous avons :

$$T_i = \theta i \times e^{j\omega t} = F \theta e \times e^{j\omega t} \quad (5) \text{ Avec } F = \frac{1+BK}{A+BK}$$

Étant donné la présence des cosinus et sinus hyperboliques, F sera de la forme $a + jb$ (*forme complexe*). De plus, $\Delta T_{max} = \theta e$

Ainsi, la relation (5) devient :

$$T_i = \Delta T_{max} \sqrt{a^2 + b^2} \times \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} j \right) \times e^{j\omega t}$$

$$T_i = \Delta T_{max} |F| \times e^{j(\omega t + \varphi)}$$

$$\text{Avec, } \cos \varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}; \sin \varphi = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}; e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi \text{ et } |F| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Pour retourner à l'espace réel, nous allons prendre la partie réelle de T_i . Nous avons donc :

$$T_{ir} = \Delta T_{max} |F| \times \cos(\omega t + \varphi)$$

Dans le chapitre suivant, nous allons chercher à optimiser l'épaisseur du mur, pour un débit de renouvellement donné, en élaborant des critères choisis.

IV. RESULTATS

Dans cette partie, nous allons vous présenter les résultats des calculs effectués dans les chambres pilotes. Ainsi, nous allons vous faire ressortir les paramètres de confort thermique, issus des mesures faites sur le terrain, de la démarche analytique et de l'optimisation de l'épaisseur de notre paroi.

IV.1 RESULTATS DES MESURES FAITES SUR LE TERRAIN

IV.1.1 Le déphasage Δt (en heures)

Étant donné que nous avons opté pour un pas de temps de 2H, pour avoir une valeur réelle du déphasage, ce paramètre a été défini comme :

- Δt = Heure à laquelle la température extérieure est maximale – Heure à laquelle la température intérieure est maximale

Lors de nos mesures, nous avons remarqué que la majeure partie des chambres avait une température intérieure maximale pendant 2H de suite (on peut le constater sur le tableau récapitulatif des mesures effectuées).

Nous avons donc récapitulé ces résultats de calcul dans le tableau ci-contre :

Tableau 6: Valeurs du déphasage issu des mesures faites sur le terrain

Mois	Chambre	Heures	T_{ext} (°C)	Heures	T_{int} (°C)	Δt (heures)
Mars	K 799	14H	37	16H	35.6	2
	K 674	14H	37	14H	35.8	0
Avril	K 799	15H	43	15H	42	0
	K 674	15H	43	13H	42.5	0

En définitive, nous prenons le déphasage $\Delta t = 2$ heures.

IV.1.2 L'écèlement (Amortissement) ΔT : en degrés Celsius

Dans cette partie, nous avons défini l'écèlement comme étant :

- ΔT = La température maximale à l'extérieur du local – La température maximale à l'intérieur du local

Les résultats de nos calculs sont consignés dans le tableau ci-contre :

Tableau 7: Valeurs de l'écrêtement issu des mesures faites sur le terrain

Mois	Chambre	T _{ext} (°C)	T _{int} (°C)	ΔT (°C)
Mars	K 799	37	35.6	1.4
	K 674	37	35.8	1.2
Avril	K 799	43	42	1
	K 674	43	42.5	0.5

On peut donc dire que l'écrêtement varie avec le mois où les mesures ont été faites. En plus, les températures intérieures sont maximales dans la chambre dont l'orientation est Est-Ouest. Nous pouvons voir l'évolution des températures des chambres pilotes dans la figure ci contre :

Lundi 22 Mars, de 08H à 08H

✓ *K 799 : Orientation Nord-Sud*

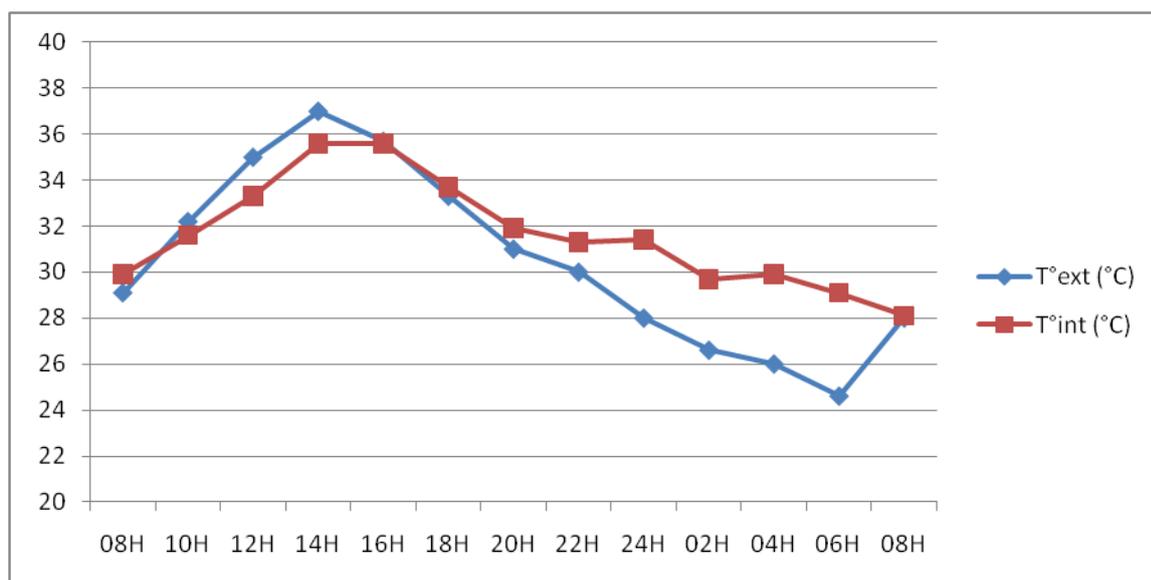


Figure 4: Évolution des températures mesurées le 22/03/10 – Chambre K 799

✓ *K 674 : Orientation Est-Ouest*

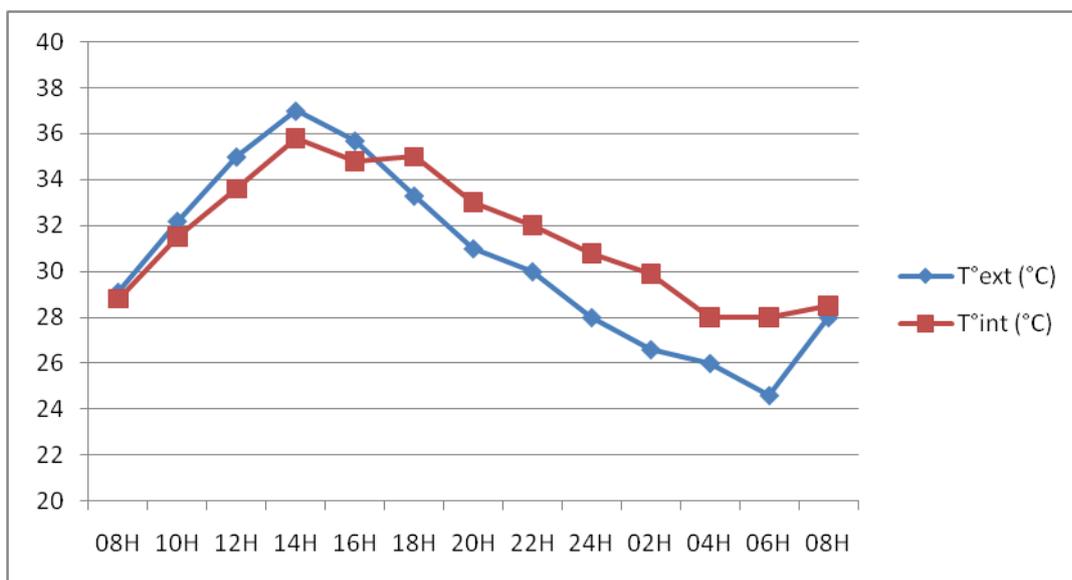


Figure 5: Évolution des températures mesurées le 22/03/10 – Chambre K 674

Lundi 12 Avril, de 07H à 07H

✓ *K 799 : Orientation Nord-Sud*

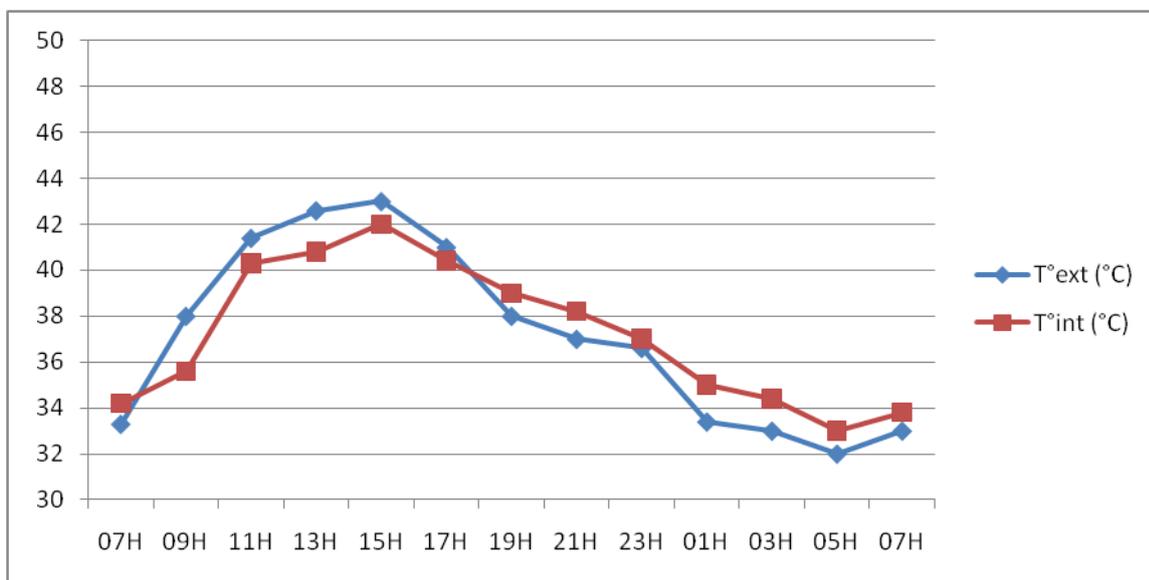


Figure 6: Évolution des températures mesurées le 12/04/10 – Chambre K 799

✓ *K 674 : Orientation Est-Ouest*

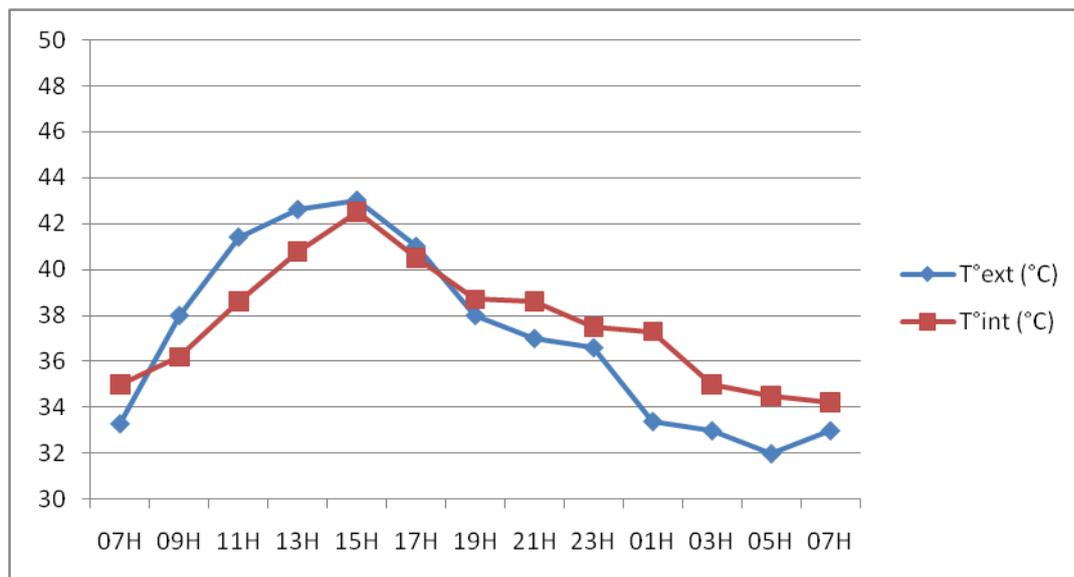


Figure 7: Évolution des températures mesurées le 12/04/10 – Chambre K 674

Commentaire général sur les figures 4, 5, 6 et 7

Nous pouvons noter que la température intérieure est supérieure à la température extérieure pendant 10H dans toutes les chambres (18H à 08H et 17H à 07H).

Au mois de mars, l'écrêtement est petit (varie de 0 à 1.4°C) le jour et est grand (varie de 2 à 5°C) la nuit. Au mois d'avril, l'écrêtement est petit (varie de 1 à 2°C) le jour et est moyen (varie de 1 à 3°C) la nuit.

De façon globale, nous pouvons dire que les chambres pilotes sont des bâtiments peu accumulateurs de chaleur, à cause de leur faible inertie. De plus, pendant le mois d'avril il n'y a pas trop de grande différence entre la température extérieure et intérieure du local. Ce facteur crée une sensation d'inconfort permanent dans les habitats de faible inertie dans nos villes.

IV.2 RESULTATS DE LA DEMARCHE ANALYTIQUE

Ici, nous allons vous présenter en premier lieu les valeurs numériques des données utilisées, pour faire nos calculs, et ensuite récapituler les résultats de ces calculs dans un tableau.

IV.2.1 Les valeurs numériques des données de calcul

Tableau 8: Valeurs numériques et unités des données de calcul

Données	Valeurs numériques	Unités
T = 24 h	86400	s
$\omega = 2\pi / T$ avec T = 24 h	7,27E-05	s ⁻¹
λ [6]	0,81	W/m°C
ρ [6]	1700	kg/m ³
C [6]	850	J/kg.K
a	5,61E-07	m ² /s
e	0,14	m
S_i	15	m ²
\dot{m}_r	0,013	m³/s
Ca	1000	J/kg.K
h	5	W/m ² .K

Source [6] : Bloc de terre comprimée : équipements de production, CDI-CRA Terre, P.13 et P.15.

IV.2.2 Les valeurs numériques des variables de calcul

Après avoir introduit ces valeurs dans notre programme de calcul élaboré dans Microsoft Excel, pour une épaisseur de mur **e = 14 cm** et un débit de renouvellement d'air **$\dot{m}_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$** .

Pour ce modèle de calcul, nous avons considéré que la ventilation est naturelle. Ainsi, le débit de renouvellement d'air est égal à un volume de la pièce par heure (1 vol/h), soit :

$$\dot{m}_r = \text{volume de la pièce/heure} = 3 \times 5 \times 3 \text{ m}^3 / 3\,600 \text{ s} = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$$

Étant donné que $\Delta T_{\max} = (T_{\max} - T_{\min}) / 2$, nous avons consigné dans le tableau ci-dessous ses différentes valeurs, selon le mois et la chambre pilote.

Tableau 9: Valeurs des températures intérieures obtenues par la démarche analytique pour e = 14 cm et $\dot{m}_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$

Mois	Chambre	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	ΔT_{\max} (°C)	T_{ir} (°C)
Mars	K 799 et K 674	37	25	6	35,32
Avril	K 799 et K 674	43	32	5,5	41,46

IV.2.3 Le déphasage Δt (en heures)

Ici, le déphasage est :

$$\Delta t = 4H$$

IV.2.4 L'écèlement (Amortissement) ΔT : en degrés Celsius

Dans cette partie, nous avons défini l'écèlement comme étant :

- ΔT = La température maximale à l'extérieur du local – La température maximale à l'intérieur du local calculé (T_{ir})

Les résultats de nos calculs sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 10: Valeurs de l'écèlement obtenu par la démarche analytique pour $e = 14$ cm et $\dot{m}_r = 0,013$ m³/s

Mois	Chambres	T_{ext} (°C)	T_{ir} (°C)	ΔT (°C)
Mars	K 799 et K 674	37	35,32	1,68
Avril	K 799 et K 674	43	41,46	1,54

Nous pouvons voir l'évolution des températures des chambres pilotes dans les figures suivantes :

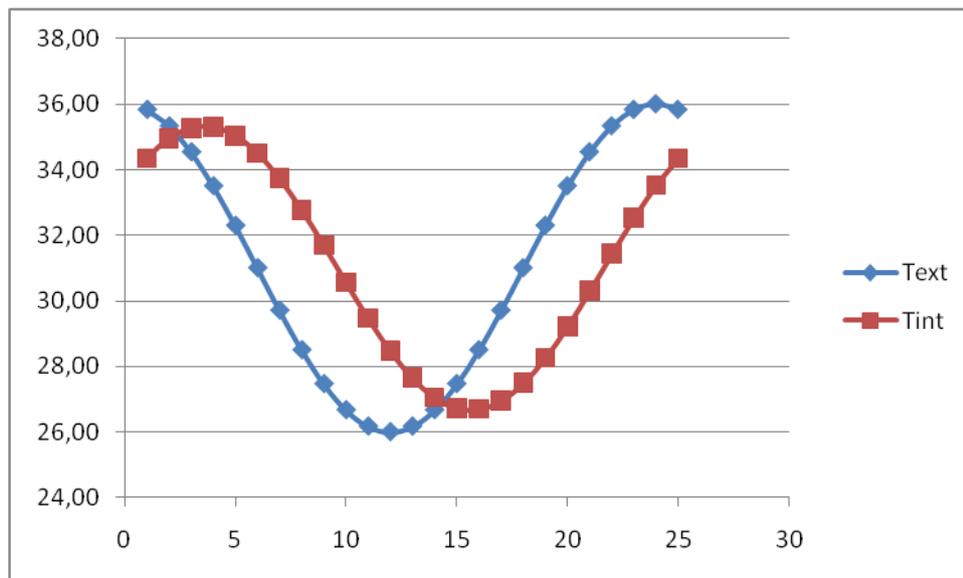


Figure 8: Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois de mars, pour épaisseur du mur à 14 cm et $\dot{m}_r = 0,013$ m³/s

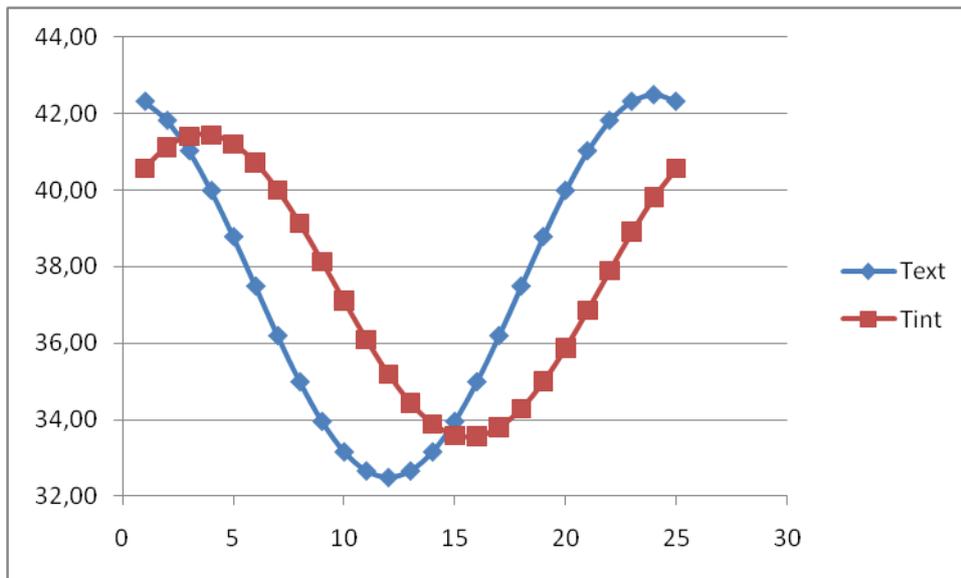


Figure 9 : Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois d'avril, pour épaisseur du mur à 14 cm et $\dot{m}_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$

Commentaire général sur les résultats obtenus

Les résultats obtenus dans la démarche analytique sont presque semblables aux résultats mesurés pour l'écrêtement, et différents pour le déphasage. Ceci se justifie par le fait que nous avons négligé beaucoup de paramètres. Cet aspect montre un peu les limites de notre modèle de calcul, car il n'est pas mauvais et pas hyper sensible en débit d'air.

IV.3 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU MUR ET DE LA VARIATION DU DÉBIT DE RENOUELEMENT D'AIR

Dans cette partie, nous allons faire varier l'épaisseur de notre mur et le débit de renouvellement d'air.

De façon empirique, nous allons étudier le comportement de la paroi de faible inertie d'une part et de forte inertie d'autre part, sous l'influence d'un petit et d'un grand renouvellement d'air, en gardant en vue les conditions initiales de calcul.

Ainsi, les valeurs numériques des données de calcul ne vont pas varier, sauf « e », « \dot{m}_r » et les valeurs numériques des variables de calcul.

IV.3.1 Les valeurs numériques des variables de calcul

ADAPTATION DES BÂTIMENTS FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : CAS DES CHAMBRES D'ÉTUDIANTS DU 2^{IE} À KAMBOINSÈ

Après avoir introduit ces valeurs dans notre programme de calcul élaboré dans Microsoft Excel, et pour des épaisseurs de mur et des débits de renouvellement d'air variables, nous avons obtenu les résultats ci-contre :

Tableau 11: Valeurs des températures intérieures, du déphasage et de l'écrêtement obtenus par la démarche analytique

Débit	Épaisseur (m)	Text (°C)	T _{ir} (°C)	Δt (en heures)	ΔT (°C)
$\dot{m}_r / 10$	0,10	43	42,37	2H	0,63
\dot{m}_r			42,42	2H	0,58
$\dot{m}_r \times 10$			42,57	2H	0,43
$\dot{m}_r / 10$	0,14	43	41,32	4H	1,68
\dot{m}_r			41,46	4H	1,54
$\dot{m}_r \times 10$			41,86	3H	1,14
$\dot{m}_r / 10$	0,30	43	38,47	9H	4,53
\dot{m}_r			38,49	7H	4,51
$\dot{m}_r \times 10$			39,13	4H	3,87
$\dot{m}_r / 10$	0,35	43	38,13	10H	4,87
\dot{m}_r			38,07	8H	4,93
$\dot{m}_r \times 10$			38,82	4H	4,18
$\dot{m}_r / 10$	0,40	43	37,90	12H	5,10
\dot{m}_r			37,78	7H30	5,22
$\dot{m}_r \times 10$			38,73	3H	4,27
$\dot{m}_r / 10$	0,50	43	37,65	8H30	5,35
\dot{m}_r			37,72	2H30	5,28
$\dot{m}_r \times 10$			38,82	2H	4,18
$\dot{m}_r / 10$	1,00	43	37,55	3H30	5,45
\dot{m}_r			37,91	2H30	5,09
$\dot{m}_r \times 10$			38,98	2H	4,02

Au vu des résultats obtenus par simulation, nous avons remarqué une variation significative du déphasage et de l'écrêtement pour une épaisseur comprise entre **30 cm et 40 cm**, quelque soit le débit de renouvellement d'air.

Nous pouvons voir l'évolution des températures des chambres pilotes dans les figures suivantes, en faisant varier l'épaisseur du mur et en conservant le débit de renouvellement d'air initial :

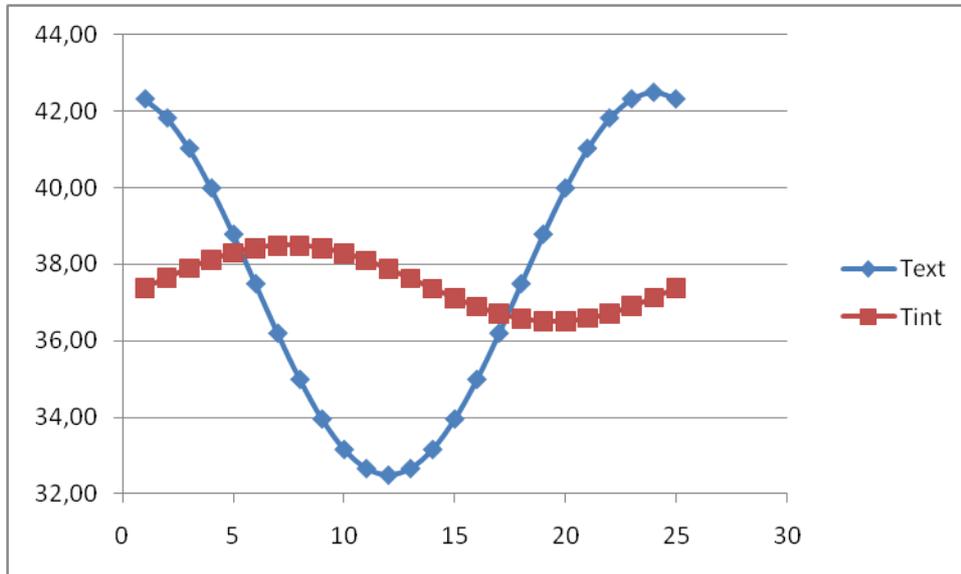


Figure 10 : Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois d'avril, pour épaisseur du mur à 30 cm et $\dot{m}_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$

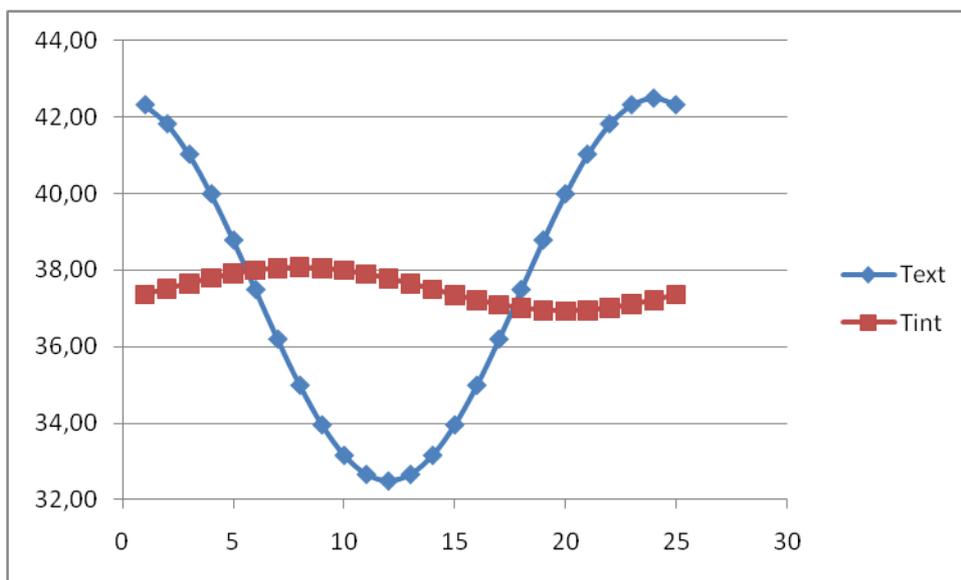


Figure 11 : Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois d'avril, pour épaisseur du mur à 35 cm et $\dot{m}_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$

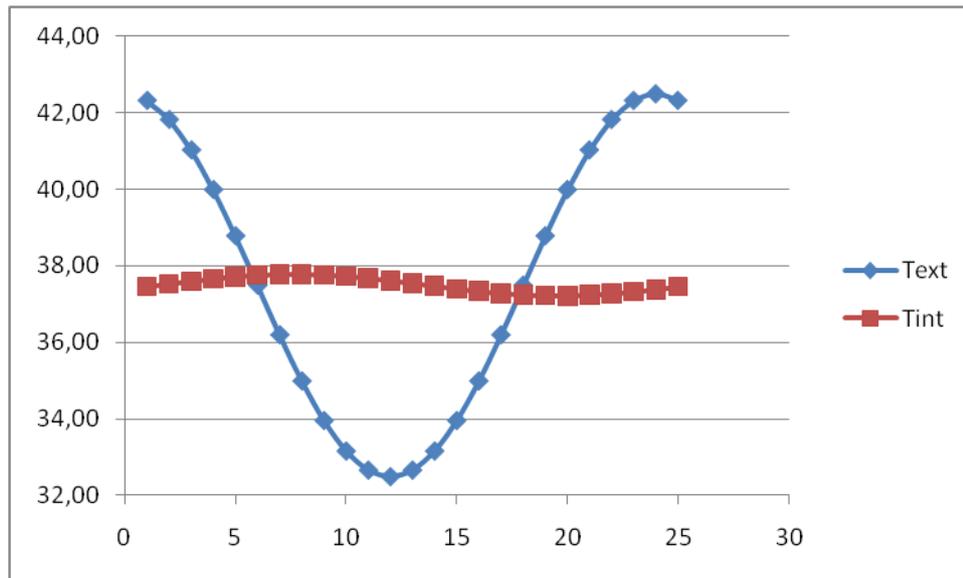


Figure 12 : Simulation de l'évolution des températures extérieures et intérieures d'une chambre pilote pendant le mois d'avril, pour épaisseur du mur à 40 cm et $\dot{m}_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$

Note sur la variation du débit de renouvellement d'air

$\dot{m}_r / 10$ → pièce faiblement ventilée

\dot{m}_r → pièce ventilée naturellement

$\dot{m}_r \times 10$ → pièce fortement ventilée

Commentaire général sur les résultats obtenus

Les résultats obtenus par simulation dans la démarche analytique, nous montrent que l'épaisseur des murs et le renouvellement de l'air sont des paramètres non négligeables, dans l'atteinte du confort thermique dans un bâtiment.

Dans le chapitre suivant, nous allons procéder à l'analyse critique et l'interprétation des résultats obtenus dans cette section.

V. DISCUSSIONS ET ANALYSES

Dans ce chapitre, nous allons analyser les résultats obtenus par mesure et par calcul des chambres pilotes, puis faire un résumé général des analyses, et enfin présenter un prototype de bâtiment bioclimatique.

V.1 ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS PAR MESURE ET PAR CALCUL

V.1.1 Paroi d'épaisseur 14 cm

Les résultats et les courbes obtenus par mesure et par calcul nous montrent que :

- **Pour le déphasage**, l'onde de chaleur qui traverse la paroi de l'enveloppe prend au moins 2H, et 4H au plus. Ainsi, la température ambiante à l'intérieur de la chambre pilote prendra ce temps pour atteindre son maximum. Il dépend aussi du renouvellement de l'air ;
- **Pour l'écrêtement**, il varie selon le mois. En effet, pendant le mois de mars il est grand (2.5°C en moyenne) et pendant le mois d'avril est petit (1.5°C en moyenne) ;
- L'amplitude de la température ambiante à l'intérieur du local varie de 7.5°C à 9°C. De plus, elle augmente en fonction du mois. Le climat chaud et sec au moment des mesures justifie ce résultat ;
- L'amplitude de la température ambiante à l'extérieur du local varie de 9°C à 10°C. Ainsi, les apports de chaleur par rayonnement sont amortis et déphasés dans le temps. Ce phénomène de déphasage est dû à l'inertie thermique du mur ;
- Les valeurs des paramètres étudiées (le déphasage et l'écrêtement) obtenues par mesure et par calcul se rapprochent. Il y'a donc concordance entre les températures ambiante mesurées et calculées à l'intérieur des chambres pilotes. L'écart maximal entre les deux températures est de 0.48°C pour le mois de mars et 1.04°C pour le mois d'avril, ce qui valide les résultats calculés.

N.B : L'amplitude est définie ici comme étant la différence entre la température maximale et minimale.

V.1.2 Simulation de l'épaisseur du mur et du débit de renouvellement d'air

Les résultats et les courbes obtenus par calcul nous montrent que le déphasage et l'écrêtement varient selon l'épaisseur du mur et le débit de renouvellement d'air.

V.2 RESUME GENERAL DES ANALYSES ET DISCUSSIONS

V.2.1 Résumé général des analyses

Au vu de ce qui précède, nous pouvons apporter les interprétations suivantes :

- Le déphasage et l'écrêtement sont fonction de l'épaisseur du mur et du débit de renouvellement d'air ;
- Plus l'épaisseur du mur et le débit de renouvellement d'air sont très petits, plus le déphasage et l'écrêtement diminuent ;
- Si l'épaisseur du mur augmente et le débit de renouvellement d'air est très petit, alors le déphasage et l'écrêtement augmentent simultanément de façon rapide. Ainsi, le déphasage atteint son maximum pour $e = 40 \text{ cm (12H)}$ et l'écrêtement continue d'augmenter jusqu'à atteindre son maximum pour $e = 100 \text{ cm (5.45}^\circ\text{C)}$;
- Si l'épaisseur du mur augmente et le débit de renouvellement d'air est très grand, alors le déphasage et l'écrêtement augmentent simultanément de façon lente. Ainsi, le déphasage atteint son maximum pour $e = 30 \text{ cm (4H)}$ et l'écrêtement continue d'augmenter jusqu'à atteindre son maximum pour $e = 40 \text{ cm (4.27}^\circ\text{C)}$;
- Si l'épaisseur du mur augmente et le débit de renouvellement d'air est initial (ventilation naturelle), alors le déphasage et l'écrêtement augmentent simultanément de façon moyenne. Ainsi, le déphasage atteint son maximum pour $e = 35 \text{ cm (8H)}$ et l'écrêtement continue d'augmenter jusqu'à atteindre son maximum pour $e = 50 \text{ cm (5.28}^\circ\text{C)}$;
- Plus l'inertie de la paroi est grande, plus la courbe de variation de la température interne du local s'amortit, pour se stabiliser à une valeur limite « $e_{\max} = 40 \text{ cm}$ » ;
- La période où la température interne du local est supérieure à la température extérieure varie de 17H à 08H. Ainsi, la paroi prend environ 10 à 11H pour se refroidir. Ce phénomène se caractérise par le rejet de la chaleur accumulée dans la journée.

On peut donc conclure que :

- Les bâtiments ayant une grande inertie augmentent le déphasage et l'écrêtement. Ainsi, les occupants ne pourront pas ressentir de façon directe l'augmentation de température à l'intérieur du local ;
- Au delà de la valeur limite de l'inertie d'un bâtiment, le phénomène de variation de la température à l'intérieur du local se stabilise ;

- Pendant la période où la température interne du local est supérieure à la température extérieure, il faut automatiquement ventiler le local, pour baisser sa température ambiante. Ainsi, on pourra donc évacuer la chaleur dissipée à l'intérieur du local ;
- Il faut adopter des moyens passifs de refroidissement, pour atteindre un minimum de confort à l'intérieur du local ;
- Pendant la période où la température externe du local est supérieure à la température extérieure, il faudrait que le local soit hermétiquement fermé, pour éviter les apports de chaleur extérieure par renouvellement de l'air. Donc il ne faut pas ventiler le local.

Pour déterminer la valeur de l'épaisseur limite « e_{lim} », nous avons fait varier « e » et considéré le débit de renouvellement d'air initial $\dot{m}_r = 0,013 \text{ m}^3/\text{s}$ pour avoir le déphasage et la température intérieure calculé par simulation.

En se référant au Tableau 13, nous avons récapitulé les résultats dans le tableau ci-dessous :

Tableau 12 : Variation de la valeur limite « e_{max} »

Débit	Épaisseur (m)	Text (°C)	T _{ir} (°C)	Δt (en heures)	ΔT (°C)
\dot{m}_r	0.30	43	38,49	7H	4,51
\dot{m}_r	0.35	43	38,07	8H	4,93
\dot{m}_r	0.40	43	37,78	7H30	5,22

Le temps de déphasage grand pour $e = 35 \text{ cm}$. Au delà de cette valeur, le déphasage décroît jusqu'à se stabiliser à une valeur bien fixe (2H30).

La température intérieure calculée par simulation est minimale pour $e = 45 \text{ cm}$ (37,66°C). Au delà de cette valeur, elle augmente jusqu'à se stabiliser à un intervalle de valeur bien fixe (37°C à 38°C).

Ainsi, nous optons pour l'épaisseur limite $e_{lim} = 35 \text{ cm}$, son déphasage est grand et sa température intérieure calculée est proche de sa valeur constante, une ventilation naturelle.

V.2.2 Discussions

V.2.2.1 Le confort thermique dans les chambres

Rappel

Le confort thermique est défini comme la situation où l'individu ne ressent ni chaleur ni froid. C'est un état d'équilibre difficile à atteindre pour des raisons à la fois subjectives et objectives.

- **Raisons subjectives** : le confort thermique dépend des individus (âge, sexe, situation géographique..). Il dépend aussi de l'activité de l'individu (état de repos, sport, travail...)
- **Raisons objectives** : le confort thermique dépend des paramètres météorologiques du moment et du lieu que sont la température, l'humidité de l'air, le vent le rayonnement des corps...

On s'accorde pour définir une plage où la valeur moyenne des paramètres température, humidité et vitesse de l'air sont telles que la moyenne des personnes éprouve une sensation de bien être. Celle que nous proposons ici est tirée des travaux de **GIVONI** et **MILNE**. Ces auteurs proposent des limites aux paramètres de confort thermique, humidité et température pour les régions tropicales chaudes humides et sèches. Les températures et humidités de confort ainsi proposées sont :

$$20^{\circ}\text{C} < \text{Température} < 27^{\circ}\text{C} \text{ et } 20\% < \text{Humidité} < 80\%$$

Le croquis ci-contre donne avec plus de précision ces limites.

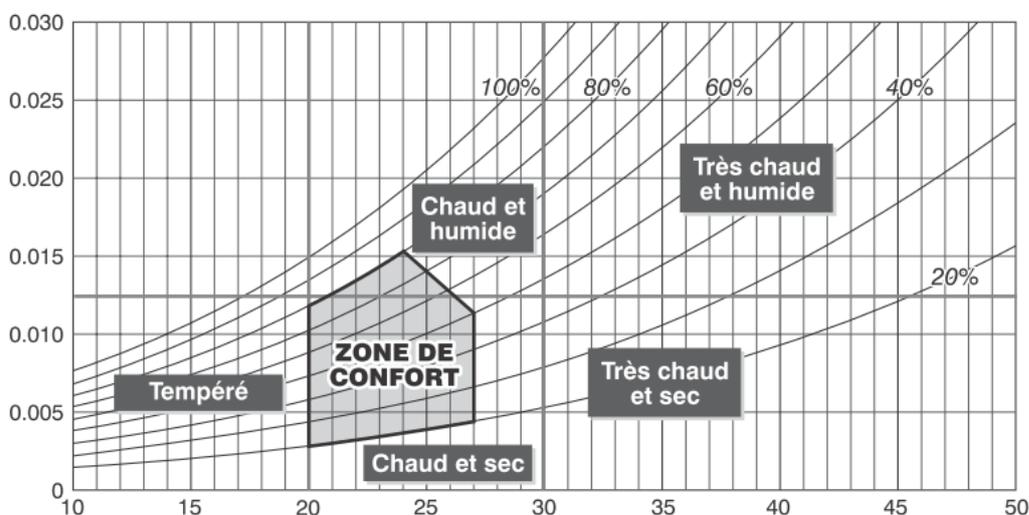


Figure 13 : Zone de confort et types de climat [7]

Source [7] : Efficacité Énergétique, tome 1 : Conception des nouveaux bâtiments, page 157-158.

V.2.2.2 Commentaires sur les mesures faites dans les chambres

Ainsi, après avoir mesuré la température et l'humidité relative interne dans les six chambres pilotes, nous avons constaté qu'aucune des chambres mesurées n'est confortable du point de vue thermique (c'est-à-dire qu'ils ne satisfont pas l'intervalle de température et d'humidité présentées précédemment). Tout en précisant que les mesures ont été faites dans la période où les températures extérieures sont maximales.

Au vu donc des résultats présentés dans les chapitres précédents, nous pouvons donc conclure qu'aucune des chambres n'est adaptée aux changements climatiques, partant du point de vue architectural au volet thermique.

En définitive, l'atteinte d'un niveau de confort dans un local passera par l'adoption des techniques de construction bien particulières, lors de la conception du bâtiment, et des techniques de refroidissement passif pendant les périodes chaudes.

Dans ce qui suit, nous allons revenir de long en large sur ces techniques.

V.3 PROTOTYPE DE BATIMENT BIOCLIMATIQUE

Dans cette partie, nous allons donner la démarche à adopter pour concevoir un prototype de bâtiment bioclimatique. Elle s'articulera sur quatre points majeurs à savoir :

- La conception architecturale ;
- La conception de l'enveloppe du bâtiment ;
- La ventilation et les moyens ou techniques de refroidissement passif du bâtiment ;
- L'écobilan (bilan écologique global) sommaire du bâtiment.

La conception architecturale

Le bâtiment à concevoir devra avoir les caractéristiques suivantes :

- **Orientation des façades** [4] : Nord-Sud, c'est-à-dire que la façade principale sera située au côté Nord et constituée d'une véranda qui servira d'espace tampon ;
- **Ouvertures** [2] [4] : Ici, nous aurons une grande ouverture au Sud et une petite ouverture au Nord. Elles seront toutes vitrées (double vitrage). Les surfaces vitrées seront protégé par des lames, des casquettes ou des brise soleil ;
- **Toiture** : Pour bénéficier d'une grande protection contre le rayonnement solaire (source d'échauffement de l'habitat), la toiture devra avoir un grand débord, soit au minimum 1 m ;
- **Forme du bâtiment** [4] : Il sera nécessaire d'avoir un bâtiment compact (c'est à dire proche d'un cube ou d'une boule), plus ses performances thermiques seront améliorées, plus il sera économe en énergie.

La conception de l'enveloppe du bâtiment

Dans cette rubrique, nous allons focaliser nos prescriptions sur les matériaux de construction à utiliser pour la conception de l'enveloppe du bâtiment. Ces matériaux auront les caractéristiques suivantes :

- **Épaisseur des murs** : 30 à 40 cm ou alors adopter un **système constructif dont les murs sont en doubles parois de 10 cm avec lame d'air de 5 cm** [5] ;
- **Types de matériaux pour les murs** : BTC, BLT ou la terre crue ;
- **Ossatures (Poutres et Poteaux)** : le coffrage utilisé ici sera un coffrage perdu fait en matériaux locaux ;
- **Menuiserie extérieure** [8]: le cadre des fenêtres sera en bois et le châssis en aluminium ;
- **Qualités thermiques des matériaux pour l'enveloppe** : bonne absorption des rayons lumineux ; stockage de chaleur ; bonne rapidité d'absorption et de restitution de la chaleur.

Source [8] : Technologie des Systèmes Constructifs : Guide des menuiseries extérieures pour architectes, économistes et ingénieurs, page 32.

Les recherches bibliographiques menées à cet effet nous ont donné un aperçu de ce qu'il faut considérer pour les matériaux de construction en termes de réponse thermique de ces matériaux. Ainsi, le tableau ci-dessous nous illustre sur cet aspect.

Tableau 13: Réponse thermique des éléments structuraux d'une maison traditionnelle en zone tropicale [9].

Tableau 3 Réponse thermique des éléments structuraux d'une maison traditionnelle en zone tropicale, extrait de référence 7
 Table 3 Thermal response of structural components of a traditional house in a tropical climate

Matériau	Réponse Thermique		Poids		Durée de vie	
	Climat chaud et humide	Climat très chaud et sec	lourd	léger	suffisante	insuffisante
Toits						
Matériaux végétaux	bonne	bonne		x		x
Argile	mauvaise	bonne	x			x
Argile stabilisé	mauvaise	bonne	x		x	
Brique plate	bonne	bonne	x		x	
Tuile	bonne	bonne	x		x	
Bois	bonne	mauvais		x		x
Béton	mauvaise	mauvaise	x		x	
Tôle ondulée	mauvaise	mauvaise		x	x	
Tôle en fibrociment	bonne	mauvaise		x	x	
Murs						
Pierre	mauvaise	bonne	x			
Adobe	médiocre	bonne	x			x
Torchis, pisé	médiocre	bonne	x	x		x
Argile stabilisée	bonne	bonne	x		x	
Bois	bonne	médiocre		x		x
Béton	bonne	mauvaise	x		x	
Élément préfabriqué et léger	bonne	mauvaise		x	x	
Élément préfabriqué et lourd	mauvaise	bonne	x		x	

Source [9] : Économie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale, page 4.

La ventilation et les moyens ou techniques de refroidissement passif du bâtiment

Les mesures et les résultats obtenus dans les chambres pilotes ont montré que pendant 11 heures au plus, la température intérieure ambiante des chambres est supérieure à la température extérieure, donc il y'a automatiquement sensation d'inconfort. Ce phénomène est dû au refroidissement des parois.

Ainsi, pour palier à cette situation, il faut ventiler le local. Ceci passe par plusieurs mesures à adopter, de la conception du bâtiment à l'application des techniques ou moyens ou techniques de refroidissement passif. Nous pouvons citer entre autres :

- **La ventilation naturelle et mécanique contrôlée (VMC)** : elle se fera uniquement dans la soirée et la nuit, pour bénéficier de la fraîcheur de la nuit. Ainsi, on ne ventilera pas dans la journée pour éviter un refroidissement brusque des parois ;
- **Aération et isolation du comble** : elle permet de réduire les apports de chaleur. Comme moyens d'aération, nous avons l'utilisation des claustras protégés, pour faciliter la circulation de l'air ;
- **La végétalisation des abords du bâtiment** : elle permet de diminuer la température de l'air. Ainsi, il faudra planter des arbres (qui ne vont pas attirer les animaux) tout autour des bâtiments, du côté Ouest, Est, Nord et Sud.

L'écobilan (bilan écologique global) sommaire du bâtiment

Faire une construction écologique revient à trouver l'équilibre entre le coût des matériaux de construction, la recherche de l'économie d'énergie de l'habitat, la limitation des émissions de polluants, etc. On utilise pour cela les écobilans.

L'écobilan est une étude qui fait le bilan de l'ensemble des consommations d'énergie et des émissions de polluants d'un produit, du berceau à la tombe, c'est à dire de sa production à sa destruction, en comptant aussi son utilisation. Ainsi l'écobilan d'une plaque isolante de polyuréthane montrera notamment qu'elle provoque des émissions de composés organiques volatils. C'est un bilan exhaustif, donc cher et rarement disponible pour le consommateur [10].

Source [10] : <http://www.hespul.org/Ecobilan.html>

Dans notre contexte, nous allons juste donner un bref aperçu de l'écobilan du prototype de bâtiment à adopter. Ainsi, nous avons récapitulé les résultats de nos propositions dans le tableau ci-contre.

Tableau 14: Écobilan sommaire des matériaux constitutifs de l'enveloppe du bâtiment.

Enveloppe	Matériaux	Ecobilan	Observations
Murs	BLT	Bon	Disponible au Burkina Faso
	BTC	Négatif	Disponible au Burkina Faso
	Terre crue	Bon	Disponible au Burkina Faso
Toitures	Tôle ondulée	Très négatif	Disponible au Burkina Faso
	TMV	Négatif	Disponible au Burkina Faso
Menuiserie extérieure	Cadre en bois et châssis en aluminium	Moyen	Disponible au Burkina Faso
Ossatures	Coffrage perdu en matériaux locaux	Moyen	Disponible au Burkina Faso
	Béton armé	Négatif	Disponible au Burkina Faso

En ce qui concerne l'usage des BLT et des BTC, la différence se fait au niveau de la fabrication de chacun. Pour le BTC, le bilan énergétique et écologique est similaire à celui du parpaing en ciment, produit par le secteur informel. Le BLT peut être considéré comme un matériau parfaitement écologique. Le peu d'outils utilisés proviennent des forgerons locaux, à la limite même produits avec de la ferraille récupérée [11].

Pour le reste des éléments de l'enveloppe, c'est un avis personnel au vue des recherches bibliographiques effectuées à cet effet.

En définitive, notre prototype de bâtiment bioclimatique devra remplir toutes ces conditions pour l'approche d'une sensation de confort thermique en période chaude, car une aucun habitat n'est parfait.

Source [11] : La construction en « matériaux locaux » État d'un secteur à potentiel multiple, page 42.

Note sur l'inertie et la ventilation des bâtiments en Afrique de l'Ouest [12]

Les conditions climatiques de l'Afrique subsaharienne sont très différentes du NORD au SUD : on part de conditions chaudes et sèches thermiquement contrastées pour aller vers des conditions chaudes et humides à faible variation annuelle. La conséquence sur le type de solutions constructives à adopter est très importante. La carte de la figure 1 traduit ces variations climatiques en zones de recommandations constructives mêlant les questions d'inertie thermique et de ventilation. Celle de la figure 2 donne les zones où la ventilation permanente est le plus souvent requise et où par conséquent les matériaux utilisés n'ont pas à apporter de l'inertie thermique par absorption.

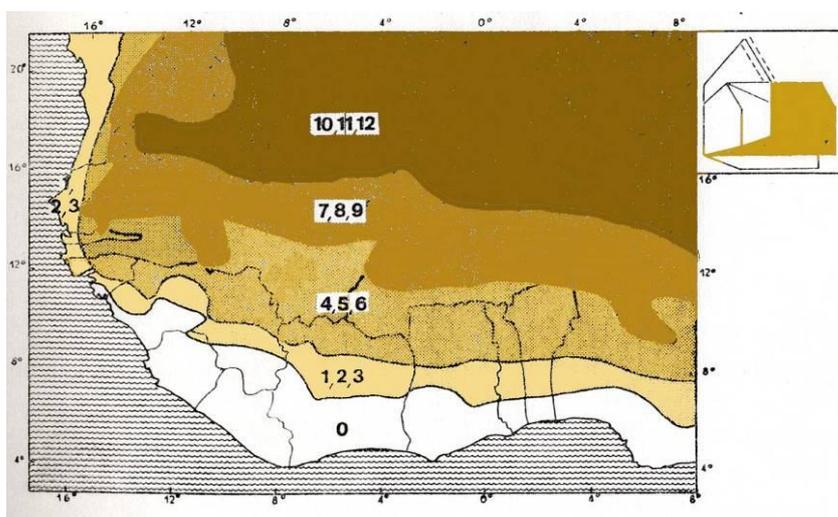


Figure 14 : Carte du nombre de mois de l'année où l'inertie thermique est requise en Afrique de l'Ouest [13]

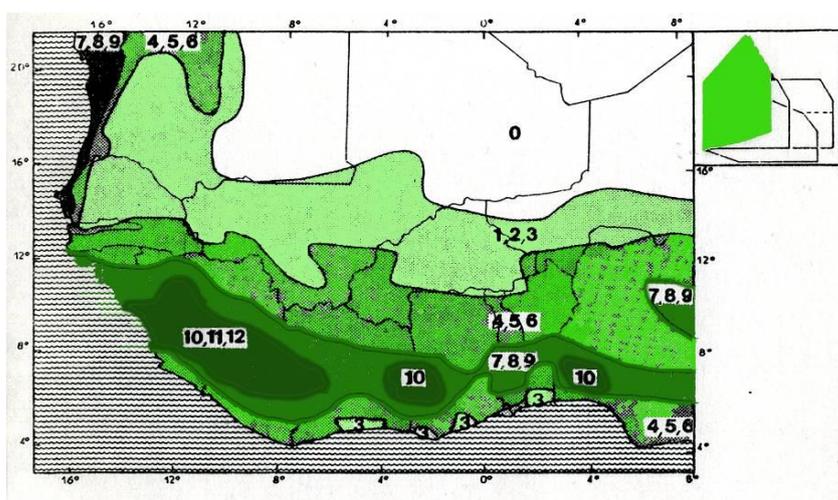


Figure 15 : Carte du nombre de mois de l'année où la ventilation permanente est requise en Afrique de l'Ouest [13]

Source [12] : J.L Izard, « Architecture adaptée au climat en Afrique de l'Ouest, d'hier à aujourd'hui : l'habitat vernaculaire, l'architecture coloniale et celle d'aujourd'hui »

Source [13] : Rapport pour l'AFME, Conception bioclimatique en pays tropical.

VI. RECOMMANDATIONS – PERSPECTIVES

VI.1 RECOMMANDATIONS

A l'issue de ce mémoire, permettez-nous de faire quelques recommandations quant à la thématique abordée dans cette étude. Ainsi, nous ferons d'abord des recommandations pour la résolution du problème actuel des chambres, ensuite pour les nouvelles constructions, et enfin pour les matériaux de construction.

Résolution du problème actuel des chambres : Rénovation des chambres d'étudiants

Ayant donc constaté que les chambres actuelles des étudiants ne sont pas adaptées aux changements climatiques, pour essayer de palier à ce problème nous recommandons ce qui suit :

- Le badigeonnage des murs par une couche de peinture blanche pour atténuer l'effet de surchauffe sur les murs extérieurs exposés au soleil (les murs de la façade Est et Ouest) ;
- La ventilation des combles, par l'aménagement si possible des bouches d'aération, pour atténuer la chaleur accumulée par le plafond ;
- L'isolation des murs extérieurs pour réduire l'effet de surchauffe sur les murs extérieurs exposés au soleil (les murs de la façade Est et Ouest) [2] ;
- L'isolation de la toiture [2].

L'utilisation des matériaux isolants est fonction de sa disponibilité, de son pouvoir isolant et de son écobilan. Nous pouvons citer entre autres :

- Les bottes de paille ; la laine de mouton, de chanvre, de verre minérale, de bois ; les plumes de canard ; le polystyrène expansé ou extrudé ; le verre expansé ; le verre cellulaire etc. La liste des isolants est très exhaustive. *Vous trouverez en Annexe 2 une synthèse des matériaux à utiliser pour l'isolation thermique des murs extérieurs ;*

Il est préférable d'employer des matériaux isolants locaux, qu'ils soient végétaux (laine de chanvre, laine de bois...) ou animaux (laine de mouton) pour limiter l'importation de produits industrialisés [2].

- L'utilisation des briques alvéolées de terre cuite ou monomur (brique rouge), dans l'optique d'éliminer les ponts thermiques ;

La mise en œuvre de cette technique nécessite beaucoup de connaissance dans le domaine et une main d'œuvre qualifiée, ce qui est aussi non négligeable.

Les nouvelles constructions

Pour les nouvelles constructions, nous recommandons ce qui suit :

- Limiter le recours à la tôle ondulée (surtout dans les constructions informelles), source de surchauffes dans le bâtiment [2] ;
- L'utilisation des nouvelles techniques de construction bioclimatique adaptées au climat africain. Nous pouvons citer entre autres : Les maisons à énergie positive [2], BBC (Bâtiment Basse Consommation) ; Les maisons HQE (Haute Qualité Environnementale), HPE (Haute Performance Energétique) ;
- La mise en place d'une ceinture verte dans les zones habitables ou des éco-quartiers.

Les matériaux de construction

A ce niveau, nous pouvons recommander ceci :

- La vérification de la qualité des matériaux locaux de construction dès sa conception. Ceci passe par un contrôle et un respect strict des normes de fabrication. On peut avoir un bon système constructif et des mauvais matériaux qui génèrent une source d'inconfort. Le souci ici c'est de faire une bonne jonction entre les deux ;
- La réalisation des études approfondies sur les BLT par rapport à ses caractéristiques thermiques et mécaniques, car visiblement le BLT est nettement meilleur que le BTC, lorsqu'on compare leur consistance et leurs éléments constitutifs [11] ;
- L'élaboration des projets de recherche sur les matériaux de substitution (écologiques) pour limiter l'usage des tôles ondulées.

VI.2 PERSPECTIVES

Nous focaliserons nos perspectives dans le volet recherche et technique, et la volonté politique.

Recherche et technique

Pour l'atteinte, à long terme des objectifs fixés dans ce mémoire nous suggérons ce qui suit :

- Faire une étude de cas des différents types de constructions rencontrées en Afrique (constructions industrialisées, par des entreprises artisanales et informelles) pour améliorer leur efficacité énergétique et réduire leur émission de gaz à effet de serre ;
- L'étude de faisabilité de l'adaptation du label Européen (réglementation thermique), Américain (nouvelles technologies de construction), Asiatique (construction en terre), et Maghrébin (construction adaptée au climat sahélien et désertique) ici en Afrique subsaharienne, selon les climats de chaque pays. Ceci passe obligatoirement par la mise sur pied de projets de recherche ayant, au finish des prototypes de bâtiments bioclimatiques avec indicateurs de performances thermiques ;
- L'élaboration des normes de constructions bioclimatiques selon les régions, en prenant en compte la disponibilité des matériaux locaux de construction en place. Ces normes devront être réalisées par un collectif d'architectes, d'environnementalistes et d'ingénieurs de génie civil et d'énergie.

La volonté politique

La réalisation de toutes ces recommandations et suggestions passent automatiquement par l'implication de nos autorités administratives et politiques. Ainsi, nous leurs proposons de :

- Vulgariser et promouvoir l'utilisation des matériaux locaux de construction ;
- Former les techniciens et des acteurs dans la fabrication des matériaux locaux de construction ;
- Favoriser l'utilisation des énergies renouvelables ;
- Financer les projets de construction bioclimatique et les recherches dans ce domaine ;
- Mettre en place une politique de construction durable ;
- Mettre en place une réglementation thermique pour tous les bâtiments ;
- Mettre en place un cadre législatif pour le respect de la réglementation en vigueur dans la fabrication des matériaux locaux de construction, et la construction des bâtiments bioclimatiques.
- Sensibiliser la population et les constructeurs aux économies d'énergie [2].

VII. CONCLUSION

Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif de l'étude était de vérifier si les chambres d'étudiants du 2^{ie}E, installées au site de Kamboinsè sont adaptées aux changements climatiques ; et de concevoir un bâtiment adapté dans le contexte de l'augmentation des températures. Pour apporter des éléments de réponse à cette problématique, nous avons abordé plusieurs aspects tel que : l'architecture, le confort thermique dans l'habitat, l'utilisation des matériaux locaux de construction et l'écobilan sommaire du bâtiment.

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus dans cette étude, nous ont révélé beaucoup de points saillants. Les chambres pilotes sont inconfortables du point de vue thermique, les normes architecturales ne sont pas respectées et les matériaux de construction utilisés peuvent aussi être de mauvaise qualité. Par ailleurs, l'augmentation de l'épaisseur des murs, nous a permis d'atténuer la température ambiante du local.

En définitive, nous pouvons dire que le confort thermique peut être atteint par une combinaison de paramètres qu'il faut intégrer dans la conception des nouveaux bâtiments. L'amélioration de la performance thermique peut se faire par le respect des normes de l'architecture bioclimatique ; l'augmentation de l'inertie des parois ; l'utilisation de matériaux ayant une bonne isolation thermique comme la brique rouge ; l'usage d'isolants écologiques ; l'augmentation du débit de ventilation pour mieux refroidir le local en période très chaude ; l'utilisation des techniques ou moyens de refroidissement passifs du bâtiment ; et l'utilisation des matériaux locaux de construction de bonne qualité, ayant un faible impact environnemental, dans le but d'avoir à la longue des habitats écologiques.

Ainsi, il ressort au terme de ce mémoire que les chambres pilotes étudiées à cet effet, ne sont pas adaptées dans le contexte d'augmentation des températures. Pour y remédier, toutes les parties prenantes du secteur du BTP devront s'y impliquer, pour adapter nos bâtiments à ce phénomène. L'utilisation des nouvelles technologies, la mise sur pied des projets de recherches dans le domaine de l'architecture bioclimatique, et l'étude approfondie des matériaux locaux de construction, seront des éléments non négligeables pour l'atteinte des objectifs fixés dans ce mémoire.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et Articles

[1] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Bilan 2007 des changements climatiques, Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, 2007.

[2] Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques (GRET), Étude préliminaire d'adaptation aux changements climatiques en Afrique : Bâtiment Contribution au projet Négociation Climat pour Toute l'Afrique Réussie (NECTAR), Juillet 2009.

[3] DIME, Construction de locaux à usage de logements pour étudiants sur le site du 2IE à Kamboinsè – Burkina Faso : Dossier de consultation restreinte - Devis descriptif, Mai 2007.

[5] Mokhtari, K. Brahim et R. Benziada, Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 307 – 315*, 2008.

[6] H. Houben, V. Rigassi, et P. Garnier, Bloc de terre comprimée : équipements de production, CDI-CRA Terre, P.13 et P.15, 1994.

[7] : Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF), Efficacité Énergétique de la climatisation en région tropicale, tome 1 : Conception des nouveaux bâtiments, page 157-158.

[8] O. Ponsaint, TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES CONSTRUCTIFS : Guide des menuiseries extérieures pour architectes, économistes et ingénieurs, 2009.

[9] Y. Jannot et T. Djiako, Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale, *1993-IJR-2-Confort Thermique Zone Tropicale*, 1993.

[11] U. Wyss, La construction en « matériaux locaux » Etat d'un secteur à potentiel multiple, 2005.

[12] J.L Izard, Architecture adaptée au climat en Afrique de l'Ouest, d'hier à aujourd'hui : l'habitat vernaculaire, l'architecture coloniale et celle d'aujourd'hui, Laboratoire ABC, ENSA-Marseille, Colloque sur l'Architecture Climatique en Afrique Subsaharienne au CCF de Ouagadougou 10 au 11 Mai 2010.

[13] T. Cabirol et G. Saurel, Conception bioclimatique en pays tropical, Rapport pour l'AFME ; CERER ; 1985.

Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine, l'ADEME et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, Guide de l'écoconstruction, février 2006.

D. Bernstein, J.P Champetier, L. Hamayon, L.Mudri, J.P Traisnel, et T. Vidal, Traité de construction durable : Principe – Détails de construction, 2007.

D. Medjelakh et S. Abdou, Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 329 – 341*, 2008.

E. Neufert, Les éléments des projets de construction, 8^{ème} édition, 2000.

Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF), Architecture Bioclimatique, 2008.

M. Couteaux, L'énergie sous l'angle de l'éco-construction : le choix écologique des matériaux de construction pour l'enveloppe, Formation Responsable énergie 2009.

N. Ferjani, E. Pothin, et E. Ottenwelter, Etude des comportements thermiques des bâtiments de la technopole,

N. Morel et E. Gnansounou, Énergétique du bâtiment, Faculté d'Environnement Naturel, Architectural et Construit, EPFL, Septembre 2008.

P. Meukam, Valorisation des briques de terres stabilisées en vue de l'isolation des bâtiments, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise et Université de Yaoundé, 2004.

B. Menguy, Eco-lieux et éco-construction

Sites internet

<http://ipcc-wg1.ucar.edu/index.html>

<http://www.ipcc-wg2.org/>

<http://www.ipcc-wg3.org/>

<http://habitatcontemporain.blogspot.com/2009/12/architecture-de-terre-sindou-burkina.html>

<http://www.lefaso.net/spip.php?article33300>

[4] <http://www.hespul.org/L-architecture-bioclimatique.html>

[10] <http://www.hespul.org/Ecobilan.html>

ANNEXES

Sommaire des annexes :

Annexe 1 : Photographie du matériel de mesure

**Annexe 2 : Synthèse des matériaux à utiliser pour l'isolation thermique des murs
extérieurs**

Annexe 1 : Photographie du matériel de mesure



En noir : thermomètre digital

En vert : hygromètre - thermomètre digital du modèle: TES-1360

Annexe 2 : Synthèse des matériaux à utiliser pour l'isolation thermique des murs extérieurs

Légende des caractéristique : -- très négative - négative • moyenne ou neutre + positive ++ très positive

	Matériaux	Eco bilan (construction)	Eco bilan (démolition)	Valeur isolante	Confort d'été	Prix
Laine minérale	Laine de verre	-	-	+	•	+
	Laine de roche	-	-	+	•	+
	Vermiculite	-	•	-	•	-
	Perlite	-	•	•	•	-
Synthétique	Polystyrène	-	--	+	•	•
	Polyuréthane (1)	--	--	++	•	-
	Isolant mince	--	--	--	--	--
Isolants sains	Laine de cellulose	•	•	+	+	-
	Laine de bois	-	+	+	++	-
	Liège expansé	-	+	+	++	-
	Laine de mouton	•	+	+	+	-
	Laine de chanvre	•	+	•	•	-
	Plume de canard	•	+	+	•	-
Isolation répartie	Brique terre cuite	-	+	+	++	-
	Béton cellulaire	•	•	+	++	-
	Botte de Paille (2)	+	+	+	++	+

Utilisation du tableau

Cette synthèse des performances des matériaux n'a pas pour objectif d'évaluer précisément chacun des matériaux, mais de dégager une tendance de leurs avantages et inconvénients selon différents critères.

- **Valeurs isolantes :** c'est la résistance thermique (voir ci-dessus)

- **Confort d'été :** au delà de l'aptitude à isoler, il est important de choisir un isolant en prenant en compte un certain nombre de paramètre. La colonne confort d'été est une compilation de plusieurs paramètres : la capacité thermique, l'effusivité, l'inertie, le pouvoir de déphasage, la perméabilité. En conclusion, certains matériaux ont donc une meilleure capacité à absorber, stocker et restituer de la chaleur et possède donc de bonne performance en ce qui concerne le confort d'été.

- **La colonne prix** établie une tendance en fonction du rapport entre la qualité (valeur isolante, confort d'été ...) et le prix.

- **L'isolation par l'extérieur** ou l'isolation répartie permettent d'apporter de l'inertie au bâtiment et donc de favoriser le confort d'été. Par ailleurs elles permettent de supprimer la majorité des ponts thermiques responsables de près de 15% des déperditions de chaleur, dans une maison récente

(1) le polyuréthane, bien que très cher ne possède qu'une appréciation négative et non pas très négative sur le prix car il offre des propriétés isolantes intéressantes avec peu d'épaisseur, ce qui peut présenter un intérêt dans certains cas, comme l'isolation du plancher par exemple.

(2) la botte de paille possède les meilleures appréciations globales, mais son approvisionnement est limité à des filières locales encore peu généralisées.