



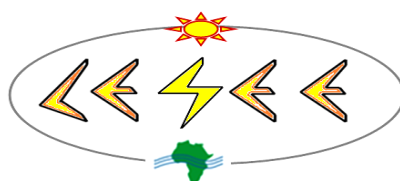
Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

**CONFORT THERMIQUE ET METHODES DE CLIMATISATION
PASSIVE OU A FAIBLE COUT : APPLICATION AU Puits CANADIEN**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET
DE L'ENVIRONNEMENT**

OPTION : Génie Civil

LABORATOIRE ENERGIE SOLAIRE & ECONOMIE D'ENERGIE (LESEE)



Présenté et soutenu publiquement le **16 Juin 2010** par :

Jacques-Rémy MINANE

Travaux dirigés par : Pr. Yézouma COULIBALY

Pr. Didier LECOMTE

Dr. Abibou CISS

UTER GEI, ISM (Enseignants-chercheurs)

JURY D'EVALUATION DU MEMOIRE:

Président : Dr. Ismaïla GUEYE

Membres et correcteurs : Pr. Yézouma COULIBALY

Pr. Didier LECOMTE

Dr. Raffaele VINAI

Promotion [2009/2010]

CITATIONS



« UNE THEORIE SANS PRATIQUE EST VIDE ET UNE PRATIQUE SANS THEORIE EST AVEUGLE »

Dr kwamé NKRUMAH

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Laboratoire Energie Solaire & Economie d'Energie (**LESEE**) du 2iE sous la direction du Pr Yézouma COULIBALY Chef d'**UTER GEI** du **2iE** et du Dr Yao AZOUMAH responsable du Laboratoire. Je tiens à leur exprimer toute ma gratitude pour leur encadrement, et pour avoir su m'encourager et m'orienter sur ce sujet malgré ma formation de Génie Civil.

Ces remerciements s'adressent également:

- Au bon Dieu tout puissant pour ses grâces abondantes et ses bienfaits à moi et à toute ma famille ;
- A Monsieur et Madame KORSAGA, mon tuteur et son épouse, qui m'ont conseillé et soutenu pendant les moments difficiles durant toute ma formation au 2iE ;
- A Monsieur Bertin SUNANG, un grand-frère bien aimé, qui m'a accueilli au Burkina et m'a offert un toit où dormir dès mon arrivée ;
- A Monsieur Oscar COMPAORE, qui m'a permis de réaliser mes enquêtes dans ses locaux et aussi m'a offert la possibilité de faire un stage en Master I ;
- A Monsieur Pierre PODA, Directeur des Etudes du Lycée Technique Privé Saint Martin, qui m'a permis de réaliser mon enquête dans son établissement ;

Merci aussi :

- A à toute la population de Ouagadougou, pour avoir accepté de coopérer et participer à l'enquête ;
- A toute l'administration et le corps enseignant du 2iE, pour leur encadrement pendant mes deux années de formation ;
- A mes directeurs de mémoire, Pr Yezouma COULIBALY, Pr Didier LECOMTE et Dr Abibou CISS, pour leur disponibilité à mon égard pendant toute la période de stage malgré leurs différentes fonctions ;
- Enfin, à tous ceux qui quotidiennement et sincèrement, m'ont soutenu moralement et qui de près ou de loin ont contribué au succès de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

DEDICACE

A mon père

MINANE Jacques

A ma mère

MINANE née NLOMTIT Madeleine

A mes frères

MINANE Paul-Valéry

MINANE Salomon-Julien

BISSAMA Samuel-Epiphanie

Aux familles

IKONG, KORSAGA, MBELEG, NLOMTIT

A un grand-frère bien aimé

SUNANG Bertin

A mes amis

Alphonsine, Cédric, Sandrine

Je dédie ce travail

RESUME

Le fort ensoleillement qui caractérise le Burkina Faso est à l'origine d'un inconfort thermique accru dans les locaux. Cet inconfort occasionne donc un recours abusif aux systèmes de climatisation très énergétivore alors que le pays souffre d'un déficit énergétique. La présente étude dans un premier temps, était de déterminer les zones de confort à Ouagadougou. Ces mesures ont été effectuées du **16 Mars** au **30 Avril 2010** dans les différents secteurs de la ville. Les jugements perceptifs de **471** individus ont été recueillis dans des ambiances et les paramètres physiques de ces ambiances ont été simultanément mesurés. Cette étude montre que les populations sont confortables lorsque les températures oscillent entre **[26-29°C]** et aussi qu'elles semblent accepter plus facilement les ambiances chaudes par rapport aux personnes (Nord-Américaines) dont le jugement a servi de base à l'établissement des normes **ISO 7730** et **ASHRAE 55-81**. Dans un second temps, nous avons fait des mesures sur le puits canadien et les « evaporative-cooling » pendant les mois de mars, avril et mai 2010. Pour le premier, on a obtenu une diminution moyenne de température entre l'entrée et la sortie de **8°C** avec un abaissement de température de **3°C** dans le local et pour le second, on a eu des différences de **17°C** avec un abaissement de la température dans le local de **5-10°C**. Ces méthodes sont donc envisageables pour maintenir les occupants confortables dans un local.

Mots clés :

1. *Confort thermique*
2. *Bio climatisme*
3. *Ambiance thermique*
4. *Jugement perceptif*
5. *Economie d'énergie*

ABSTRACT

The high sunshine which characterizes Burkina Faso is behind an increased thermal discomfort in the premises. This discomfort causes therefore a misused recourse to very energy intensive air conditioning systems while the country faces an energy deficit. This study initially was to determine the comfort zones in Ouagadougou. These measures were carried out from **16 March** to **30 April 2010** in various sectors of the city. The perceptual judgments of the 471 specimens were collected in the atmosphere and the physical parameters of these environments were simultaneously measured. This study shows that people are comfortable when temperatures range from **[26-29 °C]** and they also seem easier to accept hot environments compared to those (North American) whose decision was the basis for the establishment of standards **ISO 7730** and **ASHRAE 55-81**. In the second time, we made measurements on the Canadian well and "evaporative-cooling" during the months of March, April and May 2010. For the first, we obtained an average decrease of temperature between the inlet and outlet of **8°C** with a reduction of **3°C** in the room and the second, we had differences of **17°C** with the lowering of the space temperature from **5** to **10°C**. These methods are therefore possible to keep occupants comfortable in a room.

Keys words:

- 1. Thermal comfort**
- 2. Bio climatism**
- 3. Thermal stress**
- 4. Perceptive judgment**
- 5. Energy Saving**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Taux de métabolisme correspondant à diverses activités	7
Tableau 2: Valeurs en "clo" pour quelques habillements	8
Tableau 3: Echelle de sensation thermique ASHRAE en température, humidité relative et vitesse de l'air	23
Tableau 4: Zone de confort thermique acceptable dans un climat comme celui de Ouagadougou	26
Tableau 5: Récapitulatif des mesures prises suivant toute la longueur du puits canadien pour les mois de mars, avril et mai 2010	33
Tableau 6: Récapitulatif des mesures de températures du sol à différentes profondeurs	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Equipe du LESEE	4
Figure 2: Plan de travail	5
Figure 3: Zone de confort en région tropicale sèche	14
Figure 4: Répartition de la fréquence d'âge	21
Figure 5: Fréquence des jugements ASHRAE sur tout l'échantillon	22
Figure 6: Jugements perceptifs des sujets dans une ambiance quelconque	24
Figure 7: Fréquence de jugements ASHRAE sans le ventilateur.....	25
Figure 8: Fréquence des jugements AHRAE avec $v=1\text{m/s}$	25
Figure 9: Fréquence de jugements ASHRAE avec $v=2\text{m/s}$	26
Figure 10: Schéma d'un puits canadien	29
Figure 11: Prototype du Puits canadien de Kamboinsé.....	30
Figure 12: Variation de température le long du puits canadien au mois de Mars 2010	35
Figure 13: Variation de la température au mois d'Avril 2010	35
Figure 14: Evolution de la température dans le sol durant les mois de Mars et Avril 2010 ...	36
Figure 15: Variation horaire de température entre l'entrée et la sortie du Puits canadien à la date du 15 Avril 2010.....	39
Figure 16: Variation horaire de température entre l'entrée et la sortie du puits canadien à la date du 18 Mai 2010.....	39
Figure 17: Variation de température dans le local avec ou sans puits canadien	40
Figure 18: Schéma d'un « evaporative-cooling »	41

LISTE DES ABBREVIATIONS

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

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

GEI : Génie Energétique et Industriel

IBGE : Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement

IEPF : Institut de l'Energie et de l'environnement de la Francophonie

ISM: Infrastructures Sciences et Matériaux

KNUST: Kwamé Nkrumah University of Science and Technology

LESEE : Laboratoire Energie Solaire & Economie Energie

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PMV: Predicted Mean Voted

PC: Puits Canadien

PDD : Predicted Percentage Dissatisfied

PROMES: Procédés Matériaux et Energie Solaire

T_n : Température de thermo neutralité

UTER : Unité Thématique de Recherche et d'Enseignement

GLOSSAIRE

Jugement par groupe : est l'ensemble des sujets qui ont exprimé leurs jugements pour les mêmes conditions ambiantes.

Vasodilatation : accroissement du calibre d'un vaisseau sanguin

Vasoconstriction : diminution du calibre d'un vaisseau sanguin

Thermo neutralité : température de confort où un individu n'a ni froid ni chaud

SOMMAIRE

CITATIONS	i
REMERCIEMENTS.....	ii
DEDICACE.....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ABBREVIATIONS.....	viii
GLOSSAIRE.....	ix
I-INTRODUCTION GENERALE.....	3
I-1 Contexte de l'étude	3
I-2 Présentation de la structure d'accueil : le LESEE	3
I-3 Objectif général.....	5
I-4 Méthodologie et organisation du travail	5
II- SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DU CONFORT THERMIQUE.....	6
II-1 Généralités sur le confort thermique	6
II-2 Définition et paramètres influençant le confort thermique.....	6
II-2.1 Définition	6
II-2.2 Paramètres influençant le confort thermique	7
II-2.3 Bio climatisme et climatisation passive ou à faible coût	11
II-2.4 Zone de confort thermique en région tropicale chaude et sèche.....	14
II-3 Indices de confort et contrainte thermique – normes internationales	15
II-3.1 Les indices de confort et de contraintes thermiques	15
II-3.2 Choix de la méthode utilisé pour évaluer le niveau de confort et d'inconfort dans un climat comme celui de Ouagadougou.....	16
II-3.3 Normes internationales	16
III- ENQUÊTE SUR LE CONFORT THERMIQUE DANS UNE AMBIANCE QUELCONQUE.....	17
III-1 Préparation et déroulement des enquêtes	17
III-1.1 Lieux des enquêtes.....	17
III-1.2 Choix des périodes de l'enquête	18
III-1.3 Les démarches administratives	18

III-1.4 La collecte des données	18
III-1.5 Description des bâtiments.....	19
III-1.6 Déroulement des séances	19
III-1.7 Difficultés rencontrées pendant l'enquête	20
III-2 Les résultats de l'enquête	20
III-2.1 Saisie et traitement de données.....	20
III-2.2 Le profil de l'échantillon	20
III-2.3 Répartition des paramètres physiques	21
III-2.4 Répartition des jugements.....	21
III-2.5 Zones de confort thermique « acceptable »	26
III-3 Confrontation des résultats observés au Burkina Faso à d'autres études et aux prédictions des normes internationales.....	27
III-3.1 Confrontation à d'autres études	27
III-3.2 Prédiction de la norme AHRAE 55-81	28
III-3.3 Prédiction de la norme AFNOR	28
IV- METHODES DE CLIMATISATION PASSIVE OU A FAIBLE COUT.....	29
IV-1. Puits canadien/provençal.....	29
IV-1.1 Définition et description du prototype de puits canadien de Kamboinsé.....	29
IV-1.2 Principe de fonctionnement.....	30
IV-1.3 Les mesures sur le puits canadien	31
IV-1.4 Résultats	31
IV-1.5 Analyses et discussion des résultats	34
IV-2. Les systèmes de refroidissement par évaporation ou « evaporative-cooling ».....	41
IV-2.1 Définition et principe de fonctionnement des systèmes de refroidissement par évaporation.....	41
IV-2.2 Description du prototype d'essai	42
IV-2.3 Analyse des résultats des essais.....	42
IV-3 Couplage des deux systèmes de climatisation à faible coût.....	43
V- CONCLUSIONS GENERALES	44
VI- RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	45
VII- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46
VIII- ANNEXES	48

I-INTRODUCTION GENERALE

I-1 Contexte de l'étude

« *Ne pas avoir ni trop chaud, ni trop froid, ne pas sentir de courants d'air désagréables* » tel est le bien être recherché par tout être humain .C'est dans cette optique que des techniques de climatisation furent développées pour assurer le confort thermique des usagers à l'intérieur des habitations et dans les locaux de travail partout dans le monde.

Cependant, les changements climatiques actuels associés aux besoins énergétiques croissants, conduisent l'humanité à se questionner sur la gestion à long terme des ressources, ainsi que sur une autre manière de les consommer. Le Burkina Faso caractérisé par un climat chaud et sec, consacre une grande partie de sa consommation énergétique aux seules fins de la climatisation afin de maintenir les occupants des locaux d'habitation et de fonction dans le confort pendant les périodes chaudes. Sachant qu'il faut trois à quatre fois plus d'énergie pour rafraichir des espaces que pour les chauffer, la pression exercée sur les ressources énergétiques apparaît très forte si l'on persiste à utiliser des moyens de climatisation active au lieu des moyens passifs ou à faible coût. C'est ainsi que le développement de certaines techniques de climatisation passive telles que les puits canadiens et les systèmes de refroidissement par évaporation doivent être pris en compte pour réduire la surchauffe des locaux en période chaude. Ces techniques permettent d'assurer que de tels gains ou pertes de chaleur soient bénéfiques aux occupants, en créant des conditions de confort physique et psychologique désirées, tout en limitant le recours aux systèmes mécaniques de climatisation.

L'intérêt au bien-être de l'homme est un sujet soulevé et approché par de multiples disciplines. Cet intérêt se fonde sur les rapports d'échanges qu'entretient l'homme avec son environnement. Par conséquent, une consommation excessive d'énergie épuise les ressources fossiles de la terre et produit des résidus nuisibles pour l'environnement ; ce qui va à l'encontre du développement durable.

I-2 Présentation de la structure d'accueil : le LESEE

Notre stage, pour ce mémoire de fin d'études, s'est déroulé au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (**LESEE**) de l'Unité Thématique de Recherche et d'Enseignement Génie Energétique et Industrielle (**UTER GEI**) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (**2iE**) de Ouagadougou.

Le projet scientifique du laboratoire se résume en quatre principaux axes à savoir :

AXE1 : *L'évaluation « précise et continue » de la ressource solaire et des besoins en énergie en Afrique ;*

AXE2 : *Contribution au développement des capacités d'innovation industrielle en Afrique dans le domaine du solaire (PV-Thermique basse et haute températures) pour une production et une utilisation rationnelle d'énergies électrique/thermique à petite et grande échelles ;*

AXE3 : *L'accès aux services énergétiques des populations africaines (principalement pour les populations rurales) et l'assurance du développement économique et sociale de ces populations ;*

AXE 4 : *Utilisation rationnelle de l'énergie en Afrique (économies d'énergies).*

Dans le but d'atteindre de manière encore plus efficace ses objectifs, le **LESEE** dispose de plusieurs partenaires dont le laboratoire **PROMES-CNRS** (France), l'entreprise **MICROSOW** (Burkina), **KNUST** (Ghana), **DUKE University** (USA) et bien d'autres ...

L'équipe dynamique du **LESEE** à ce jour est composée de plusieurs membres qui sont représentés dans le diagramme ci-dessous.

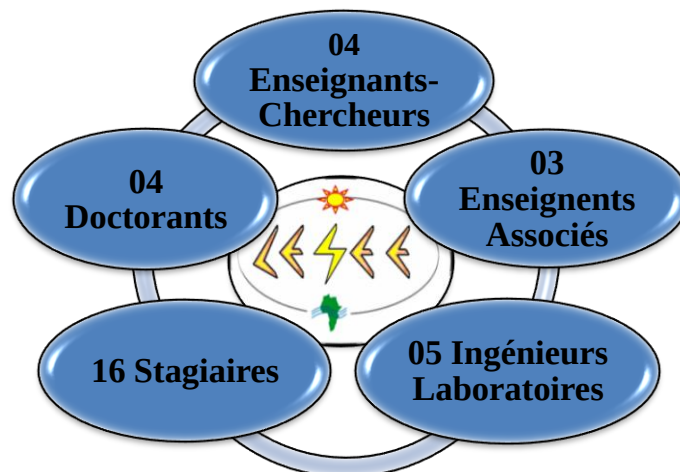


Figure 1 : *Equipe du LESEE*

I-3 Objectif général

L'objectif général visé par notre travail est d' : « *Etablir un niveau de confort thermique dans un local en utilisant les méthodes de climatisation passive ou bien à faible coût* ».

I-4 Méthodologie et organisation du travail

Pour atteindre notre objectif, nous avons adopté la démarche suivante :

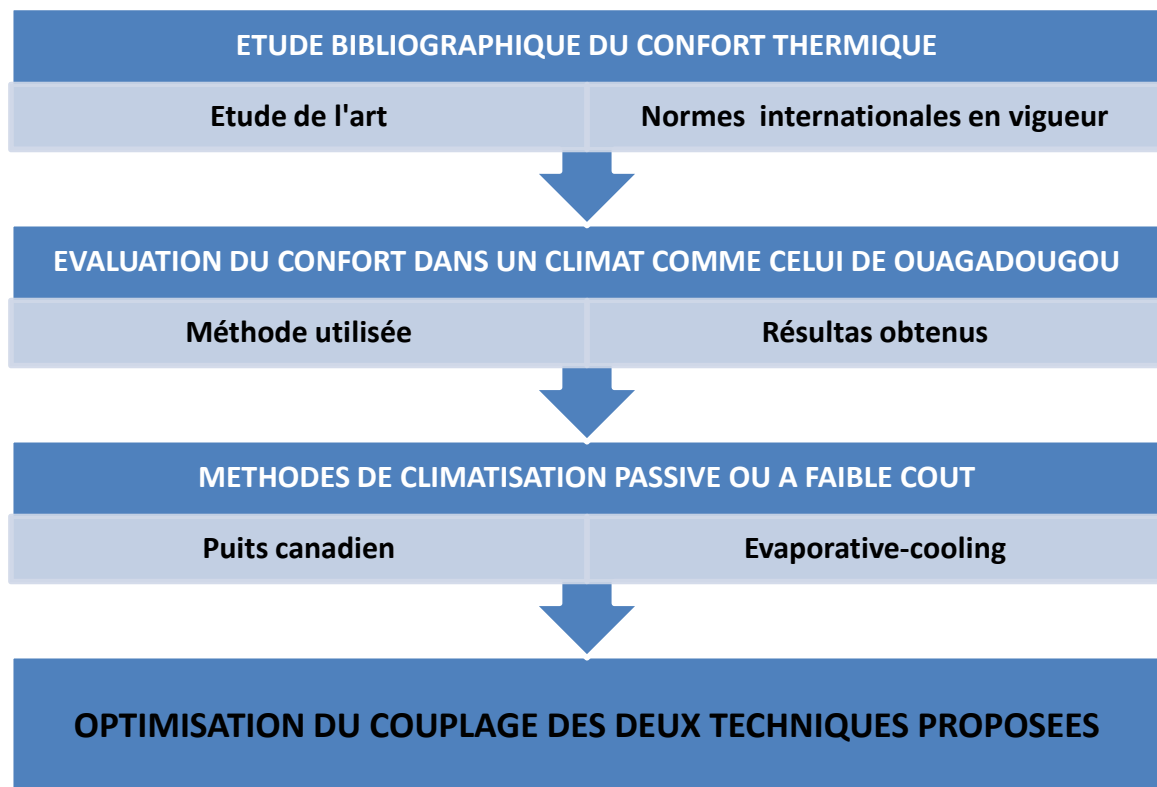


Figure 2: Plan de travail

II- SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DU CONFORT THERMIQUE

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur le confort thermique, les différentes méthodes d'évaluation du confort en climat tropical sec et quelques normes internationales en vigueur.

II-1 Généralités sur le confort thermique

Le concepteur d'un bâtiment cherche à donner aux occupants un confort thermique permanent et définitif. Cependant, ce dernier assurera-t-il un confort à toutes les heures de la journée et pendant les périodes les plus chaudes et/ou froides ?

La notion de confort thermique est donc très subjective car elle est fonction de l'âge, du sexe, de la provenance, de la culture, de la société, des habitudes, de l'habillement, des aspects physiologiques et psychologiques des occupants d'un local (**Corinne Martinet et al, 1999**). En somme si on prenait en compte tous ces paramètres cités ci-dessus, l'on ne parviendrait jamais à atteindre un niveau de confort acceptable par les occupants d'un local à cause de leurs origines diverses. Par exemple, les Américains sont plutôt habitués à chauffer à **22-23°C** alors que les Scandinaves se contentent de **18-19°C** (**Eco consommation 2002**). Néanmoins, il en ressort que seul l'occupant est apte à prétendre que le local est confortable ou bien inconfortable (**IBGE 2007**). Toutefois, il ne peut exister de règles de confort universelles du fait de grandes variations géographiques ou inter et intra-individuelles (**Metz 1961, Parsons 1993, Vogt 1995**).

Le confort thermique est un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est atteint s'il y a un état d'équilibre entre la quantité de chaleur produite par le corps et celle dissipée dans le milieu extérieur (**Kemajou, 1995**). C'est un état d'équilibre difficile à atteindre pour des raisons à la fois subjective (l'activité et la vêtue de l'individu) et objective (données météorologiques de la région) (**Kemajou, 1995 ; Martinet et al, 1999**).

II-2 Définition et paramètres influençant le confort thermique

II-2.1 Définition

Le confort thermique peut être défini comme une sensation complexe produite par un système de facteurs physiques, psychologiques, physiologiques, conduisant l'individu à exprimer le bien être de son état. (**Lawson, 1991**)

Ainsi définie, la sensation du confort thermique reste liée à l'individu acquérant alors un caractère personnel. Dans une même ambiance thermique, plusieurs individus peuvent donner plusieurs expressions différentes de leur sensation du confort.

II-2.2 Paramètres influençant le confort thermique

On distingue essentiellement six paramètres selon **Fanger (1970)** qui a beaucoup travaillé sur le confort thermique regroupés en deux groupes à savoir :

- les paramètres subjectifs (l'activité, la tenue vestimentaire)
- les paramètres objectifs (la température sèche de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la température de rayonnement)

II-2.2.1 Les paramètres subjectifs

Dans son habitat, l'individu présente un état de confort thermique suivant certains paramètres :

Le métabolisme

C'est l'énergie produite par un individu lorsque celui-ci est en mouvement correspondant à une activité bien particulière. Une unité appelée "**met**" a été créée pour le caractériser (**IBGE, 2007**). On trouvera dans le tableau ci-dessous quelques valeurs du métabolisme pour les activités courantes :

Tableau 1: Taux de métabolisme correspondant à diverses activités

Activité	Dégagement de chaleur		
	[met]	[W/m²]"	[W/pers]*
Coucher, inactif, sommeil	0,8	46	83
Assis inactif	1,0	58	104
Activité sédentaire (bureau, lecture, études)	1,2	70	126
Debout, inactif	1,2	70	126

(**Source** : Nicolas Morel et Edgard Gnansounou, 2008)

N.B.: (" Par rapport à la surface du corps et * par rapport à une personne de surface corporelle de 1,8 m² « taille 1.7 m, poids 69 kg »)

D'après les lois fondamentales des échanges thermiques, un équilibre tend à s'établir entre la production continue de chaleur interne et les échanges de chaleur avec l'environnement. A cet équilibre, la température du corps est maintenue constante entre **36,5 et 37°C** par le sang (*Kemajou, 1995*).

Le système thermorégulateur de l'homme est complexe car il maintient l'équilibre thermique des tissus internes dans un intervalle de température relativement étroit (*Kemajou, 1995 ; OMS, 1969*).

Lorsqu'il est placé dans une ambiance chaude, le phénomène de « vasodilatation » des vaisseaux sanguins irriguant la peau se produit, ce qui entraîne une augmentation de la température cutanée pour rétablir l'équilibre (*OMS, 1969*). Par contre lorsqu'il est placé dans une ambiance froide, le phénomène inverse de « vasoconstriction » se produit pour réduire les pertes de chaleur du corps vers l'extérieur (*OMS, 1969*).

L'habillement

L'habillement représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement, tout comme l'isolation d'une maison crée une résistance thermique conservant la chaleur à l'intérieur (*IBGE, 2007*). On peut donc mesurer cette résistance thermique et l'exprimer en m^2K/W . Il est aussi usuel de l'exprimer en « **clo** » (pour clothing). Un (01) « **clo** » correspond à une résistance thermique de $0,155 m^2K/W$ (*Nicolas Morel et Edgard Gnansounou, 2008*).

Quelques valeurs de résistance thermique des vêtements sont données dans le tableau ci-dessous en [**clo**] et en [m^2K/W] :

Tableau 2: Valeurs en "clo" pour quelques habillements

Tenue vestimentaire	[clo]	[m^2K/W]
Nu, debout	0,0	0,0
Shorts, costume de bain	0,1	0,015
Tenue tropicale: slip, chemise courte à col ouvert, shorts, chaussettes légères et sandales	0,3	0,045
Tenue de travail légère: sous-vêtements légers, chemise courte à col ouvert, pantalons de travail, chaussettes et chaussures	0,7	0,11

(Source : Nicolas Morel et Edgard Gnansounou, 2008)

L'état psychologique

Il intervient plus dans la sensation du confort. Une personne déprimée aura sans doute une expression du confort d'une ambiance, différente de celle qu'elle ressentirait si elle n'était pas déprimée. (*Lawson, 1991*)

II-2.2.2 Les paramètres objectifs

Nous pouvons citer comme facteurs liés à l'ambiance thermique la température sèche de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air.

Température ambiante :

C'est la température sèche de l'air indiqué par un thermomètre placé dans une pièce. Cette température de confort varie beaucoup selon les régions. Nous allons considérer ici les valeurs tirées des travaux de **Givoni et Milne (1969)** qui ont fait des recherches dans les régions tropicales chaudes humides et sèches. Ces travaux stipulent que la température de confort en zone tropicale varie entre 20°C et 27°C (*Claessens et al, 1996*).

Humidité relative :

C'est le rapport exprimé en pourcentages entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau pouvant être contenue dans la même température lorsque l'air est saturé. D'après les travaux de : **Jannot et Djiako (1993)**, l'humidité pour un éventuel confort thermique varie entre 30 % et 80 % précisément dans la ville de Ouagadougou (*Jannot et Djiako, 1993*).

Vitesse de l'air :

La vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par convection. Cette vitesse doit être comprise entre 0,1 m.s⁻¹ et 0,2 m.s⁻¹ (*Jannot et Djiako, 1993*) pour préserver le confort dans le local ; car une vitesse supérieure à 0,5 m.s⁻¹ peut provoquer une gêne pour les occupants (*Grégoire Pigeon, 2009*).

II-2.2.3 Interaction entre l'individu et son ambiance

Les échanges de chaleur entre l'homme et son environnement sont de deux types. Il s'agit de :

- Les échanges de chaleur sèche
- Les échanges de chaleur latente

● Échanges de chaleur sèche

La conduction, la convection et le rayonnement sont les trois modes d'échange de chaleur sèche entre l'organisme et son environnement (**Claude A. 1987**).

Les échanges par conduction :

La conduction qui correspond au flux de chaleur échangée par les surfaces de l'organisme en contact avec les solides et les fluides environnants est très généralement négligée (**Kemajou, 1995**).

Les échanges par rayonnement :

Les échanges par rayonnement se décomposent entre les échanges dans la gamme de longueurs d'ondes solaires et la gamme de longueurs d'ondes infrarouges. Ils ont lieu à la surface des vêtements. Ils font la température des sources de rayonnement environnantes (nuages, murs, soleil, sol, ...) et leur position par rapport au corps (**Pigeon, 2009**).

Les échanges par convection :

La convection se fait proportionnellement à la surface corporelle, à un coefficient de convection (**hc**) et la différence entre les températures moyennes entre l'environnement et la peau (**Kemajou, 1995**). Quelque soit l'habillement de l'individu, on considère qu'il est distribué sur l'ensemble du corps (**Parsons et al. 1999**). Ainsi, on considérera que la convection a uniquement lieu entre les vêtements et l'air extérieur. **Le tableau en annexe 1** nous montre les échanges entre l'homme et son environnement.

● Échanges de chaleur latente

Les échanges par évaporation de la sudation ont lieu à la surface de la peau à travers les vêtements. Ils dépendent de la sudation et des propriétés d'échanges de vapeur d'eau vers l'extérieur à travers les vêtements (**Grégoire Pigeon, 2009**).

L'évaporation transporte de la chaleur latente et constitue toujours une perte de chaleur pour l'organisme. Chez l'homme, l'eau s'évapore au niveau de l'appareil respiratoire et de la peau.

L'intensité de cette évaporation est fonction de l'humidité de l'air, de la vitesse de l'air, de la fraction de la surface cutanée mouillée, de la perméabilité à la vapeur d'eau du vêtement et de la température cutanée moyenne (*Martinet et Meyer, 1999*).

II-2.3 Bio climatisme et climatisation passive ou à faible coût

Pour accéder au confort des individus parlé plus haut, la méthode utilisée et la plus conventionnelle est la climatisation active. Nous pouvons citer entre autre les climatiseurs-fenêtres, les climatiseurs à éléments séparés (slip-system), les armoires de climatisation ou enfin les centrales de climatisation.

II-2.3.1 Le passage à la conception active

Dans le passé, les édifices étaient construits en faisant abondamment appel aux moyens passifs de climatisation ; vraisemblablement parce que les ressources énergétiques locales étaient très limitées. Mais avec la révolution industrielle, des moyens actifs apparurent, qui offraient des solutions faciles et immédiates aux désagréments climatiques. Ces moyens, après la deuxième guerre mondiale, gagnèrent rapidement du terrain dans le monde industrialisé ; soit dans les pays à climat froid. Désormais, capable de créer des environnements totalement contrôlables et en complète rupture d'avec le milieu naturel, les concepteurs se détournèrent des moyens passifs (*Nielsen, 1999*).

II-2.3.2 Le retour à la conception passive

La première conférence internationale sur l'environnement de Stockholm en 1972 apparaît comme symbole de cette **prise de conscience** et aussi le choc pétrolier un an plus tard, ont amené l'humanité à se soucier de la forte consommation exigée par ces nouveaux environnements (*Nielsen, 1999*).

Les moyens actifs de climatisation, bien qu'appréciés des promoteurs et des clients, nécessitent des réglages fréquents, un entretien constant et une manipulation attentive. En outre leur coût global (**investissement, exploitation et entretien**) est très élevé ; aussi si la ressource énergétique ne se révèle pas fiable (coupures fréquentes par exemple), l'achat d'un système d'appoint s'avère indispensable. (*Nielsen, 1999*).

C'est dans cette optique que les moyens passifs reposant plutôt sur l'exploitation des éléments inhérents au climat de la région et sur celle des ressources énergétiques naturellement

disponibles, sont pris en compte pour palier aux moyens actifs. Comme moyens passifs, nous pouvons citer : *la compacité du bâtiment, l'orientation, l'inertie des matériaux, les surfaces sélectives, les systèmes de refroidissement par évaporation, les puits canadiens*, etc....

II-2.3.3 Les moyens passifs de climatisation

● La compacité de l'édifice ou rapport surface-volume

La capacité d'un édifice à emmagasiner ou à libérer la chaleur est liée à son volume et (à sa masse) alors que le taux auquel il gagne ou perd cette chaleur l'est à sa surface. La compacité détermine donc la cadence à laquelle l'édifice se réchauffe durant le jour et se refroidit au cours de la nuit.

● L'orientation de l'édifice

L'orientation par rapport au soleil

En climat tropical, il est préférable d'orienter les façades bâtiments du côté Nord-Sud et de limiter les ouvertures du côté Est-Ouest qui seront réservées aux pigeons, afin de minimiser les apports solaires dans la journée ; ou bien favoriser le type de vitrage sélectif qui laisse passer la lumière du jour mais pas le flux de chaleur dans le local.

L'orientation par rapport au vent

L'édifice devrait être orienté en fonction du ou des vents dominants pour favoriser la circulation de l'air dans le local.

En somme, les plus grandes façades d'un édifice devraient être orientées vers le nord et vers le sud. L'orientation ouest devrait être évitée autant que faire se peut puisqu'en après-midi, les pics de rayonnement solaire et de température de l'air coïncident avec pour résultat une charge thermique totale encore plus importante. Les pièces peu ou pas habitées (salles de bain, espaces de rangement...) peuvent constituer des barrières thermiques efficaces si l'on prend soin de les localiser du côté Est et, mieux encore, du côté Ouest de l'édifice. Quant aux murs et les ouvertures, ils devraient faire face au vent dominant de façon à favoriser la formation et le maintien de courants d'air intérieur.

● Isolant et inertie des matériaux

L'isolation thermique permet d'éviter que les parois intérieures du logement ne soit pas trop froides en hiver ou trop chaudes en été. Dans la plupart des cas, l'isolation est obtenue par l'emploi des matériaux spécifiques, qui, outre ont une bonne résistance thermique. Nous pouvons citer entre autres quelques isolants thermiques : la laine de verre, le polystyrène expansé, le verre cellulaire, la laine de bois, le chanvre, etc.... La principale difficulté est le coût élevé de ces isolants qui ne sont pas à la portée des fonctionnaires moyens. **(Nielsen, 1999).**

L'inertie thermique d'une paroi correspond à l'aptitude de cette paroi à absorber ou restituer lentement un flux de chaleur en fonction d'un changement des conditions ambiantes. C'est une donnée de la réglementation thermique qui porte en particulier sur la limitation de l'inconfort thermique en saison chaude et la limitation de la consommation d'énergie des bâtiments. Le tableau en **annexe2** nous montre quelques **propriétés thermo physiques des matériaux de construction.**

La fonction et le moment d'utilisation d'un édifice influencent aussi la conception des murs. Pour l'essentiel, les murs entourant des pièces utilisées uniquement de jour devraient être de construction lourde, tandis que les murs des pièces utilisées uniquement de nuit devraient être de construction légère.

● Surfaces sélectives (murs, peintures et toitures)

C'est par la surface des matériaux que l'entrée de chaleur peut d'abord être contrôlée. La température de surface d'un matériau ou d'un élément exposé au rayonnement solaire sera en général plus élevée que celle de l'air environnant. Il y aura donc absorption de chaleur par sa surface. Certains matériaux, toutefois, ont la propriété de réfléchir la chaleur davantage qu'ils l'absorbent, une propriété thermique désigné comme la réflexivité du matériau ou de l'élément. La réflexivité détermine la part du rayonnement non capté. Cette propriété est généralement liée à la couleur de la surface : les surfaces claires réfléchissent bien le rayonnement tandis que les surfaces sombres, au contraire, le réfléchissent mal et l'absorbent fortement. Les tableaux en **annexe3** nous montrent **quelques valeurs de réflexivité pour divers matériaux de construction, finis et revêtements** et **les valeurs moyennes d'absorptivité et d'émissivité de diverses surfaces.**

● La ventilation des combles

Le gain de chaleur dû au toit sera réduit si l'air se déplace rapidement sur les surfaces exposées et si le vide sous comble est ventilé. Cette ventilation du vide sous comble requiert la création d'ouverture. La taille de ces ouvertures affectera aussi la quantité et la vitesse de l'air se déplaçant à travers le vide sous comble. (Nielsen, 1999).

Les deux derniers systèmes à savoir les « *puits canadiens* » et les « *evaporative-cooling* » feront l'objet d'une étude minutieuse et détaillée dans la suite de ce rapport.

II-2.4 Zone de confort thermique en région tropicale chaude et sèche

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. Plusieurs plages ou zones de ce type sont ainsi proposées mais malheureusement, elles sont trop souvent en rapport avec le confort thermique dans les pays occidentaux. Celle que nous proposons ici est tirée des travaux de Givoni et Milne (1969). Ces auteurs proposent des limites aux paramètres de confort thermique, humidité et température pour les régions tropicales chaudes humides et sèches. La figure ci-contre (*température en abscisse, humidité absolue en ordonnée*) nous montre une zone de confort en région tropicale sèche.

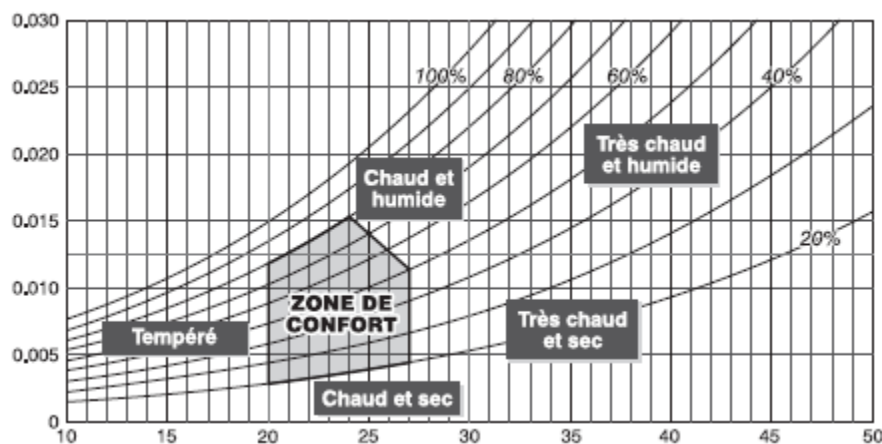


Figure 3: Zone de confort en région tropicale sèche

(Source : Claessens et al. 1996)

II-3 INDICES DE CONFORT ET CONTRAINTE THERMIQUE – NORMES INTERNATIONALES

II-3.1 Les indices de confort et de contraintes thermiques

Plusieurs indices de confort ont été définis pour mesurer l'effet sur l'organisme des apports et pertes de chaleur afin de comparer les différentes ambiances entre elles et évaluer leurs niveaux de confort (**Pigeon, 2009**).

Les différentes approches et indices de confort thermiques relevés dans la littérature peuvent être divisés en trois catégories. Il s'agit de : (**Pigeon, 2009**).

- Les indices empiriques ;
- Les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain à l'équilibre ;
- les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain en régime instationnaire.

Deux méthodes permettent de déterminer les indices de confort thermique à savoir : la méthode statistique et la méthode déterministe (**Kemajou, 1995**).

- **Méthode statistique** : elle consiste à recueillir auprès des sujets exposés à une ambiance thermique donnée, leurs sensations subjectives et à mesurer simultanément les quatre paramètres physiques de l'environnement considéré.
- **Méthode déterministe** : elle repose sur l'équation d'équilibre thermique décrivant les échanges entre l'homme et l'environnement.

Les indices empiriques : (annexe 4)

Cette famille d'indice a le plus souvent été développée pour répondre à un besoin et un environnement très spécifique. L'avantage de ces indices est la facilité de leur manipulation, leur rapidité de calcul et le faible nombre de paramètres dont ils ont besoin. En revanche, ces indices ne sont applicables que dans la gamme de valeurs dans laquelle ils ont été établis et uniquement pour un environnement souvent restrictif.

Les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain à l'équilibre : (annexe 4)

Cette famille d'indice est plus basée sur une approche plus théorique décrivant les échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement extérieur.

Les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain en régime instationnaire (annexe 4)

Les travaux les plus aboutis reprennent le cadre théorique du bilan d'énergie pour plusieurs parties du corps humain et considèrent en plus l'évolution temporelle des variables du modèle (température interne, température de la peau, sudation etc...) en fonction du parcours de l'individu. En effet, la régulation de la température du corps humain n'est pas instantanée et des durées de mise à l'équilibre de l'ordre de l'heure sont fréquentes lors d'une transition entre un espace chauffé et des conditions extérieures froides (*Pigeon, 2009*).

II-3.2 Choix de la méthode utilisé pour évaluer le niveau de confort et d'inconfort dans un climat comme celui de Ouagadougou.

Pour évaluer le niveau de confort ou d'inconfort à Ouagadougou, nous avons opté pour la méthode statistique qui consiste à recueillir auprès des sujets exposés à une ambiance thermique donnée, leurs sensations subjectives et à mesurer simultanément les paramètres physiques du climat à savoir : la température sèche de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air.

A la fin de l'enquête, nous allons présenter sous forme de tableau les différentes perceptions des individus en fonction de la température ambiante et donner une température dite « **température de confort** » dans un climat comme celui de Ouagadougou.

II-3.3 Normes internationales

II-3.3.1 La norme ISO 7730

Elle se base sur l'analyse des conditions de confort thermique et introduit deux des indices analytiques d'astreintes thermiques, le **PMV** et le **PDD**.

Le **PMV** permet de calculer le vote moyen de sensation thermique d'un groupe important de personnes en se référant à une échelle subjective comportant sept points de « **très chaud** » à « **très froid** ». (*Martinet et Meyer, 1999*)

Le **PDD** est fonction du **PMV**. La norme préconise de limiter le **PDD** à **10 %**, ce qui revient à limiter l'intervalle acceptable du **PMV** entre **-0,5** et **+0,5**.

II-3.3.2 La norme AFNOR 1995

Ainsi, selon la norme **ISO 7730** pour un travail de bureau sédentaire (**70 W.m⁻²**), la température sera comprise entre **20** et **24°C** dans les conditions hivernales (période de chauffage) avec un vêtement de « **1 clo** » et entre **23** et **26°C** dans les conditions estivales avec un vêtement de « **0,5 clo** ». L'humidité relative doit être comprise entre **40** et **60 %**. (*Martinet et Meyer, 1999*)

A partir de cette synthèse bibliographique, nous pouvons dire que le confort thermique est une notion très subjective et que l'on ne devrait pas toujours se référer aux normes européennes pour définir les plages de confort en Afrique tropicale sèche. C'est dans cette optique que nous allons effectuer une enquête sur le confort thermique en situation réelle dans une ambiance quelconque à Ouagadougou au Burkina Faso pour déterminer des zones de confort et d'inconfort.

III- ENQUÊTE SUR LE CONFORT THERMIQUE DANS UNE AMBIANCE QUELCONQUE

Ce chapitre traite de l'étude sur le confort thermique en ambiance quelconque et se propose de déterminer les zones de confort dans un climat comme celui de Ouagadougou à partir du recueil des jugements perceptifs des individus vivant au Burkina Faso en situation réelle.

III-1 Préparation et déroulement des enquêtes

Il est question dans ce paragraphe de donner les lieux où les enquêtes se sont passées et de dire comment elles se sont déroulées.

III-1.1 Lieux des enquêtes

Les enquêtes se sont déroulées dans les sites du 2iE Ouagadougou & Kamboinsé, dans le Lycée Privé Technique Saint Martin et dans le Bureau d'étude BETICO Ouaga sis au quartier ZOGONA, dans certaines habitations aux « **1200 logements** » et dans certaines chambres estudiantines situées dans la ville.

III-1.2 Choix des périodes de l'enquête

Ces enquêtes se sont déroulées en trois phases :

- Dans les sites du 2iE Ouagadougou & Kamboinsé, elles se déroulaient à toute heure de la journée (le matin, à midi, le soir et même en pleine nuit).
- Dans les sites du Lycée Saint Martin et du Bureau d'études BETICO, les enquêtes avaient lieu très tôt le matin (8 h à 9 h) pour avoir des températures relativement basses et vers 14 h 30 pour avoir des températures maximales.
- Dans les habitations aux « 1200 logements » et dans les chambres estudiantines, elles se déroulaient durant la journée et l'après midi pour ne pas déranger les occupants pendant leurs siestes.

III-1.3 Les démarches administratives

Dans un premier temps, nous avons proposé à la signature du département **GEI** de la Fondation **2iE** une lettre adressée aux différents responsables des locaux d'habitation et de fonction retenus, précisant l'objet et les motivations de l'étude. (*Annexe 5*)

Dans le second temps, il a été question de rencontrer les responsables du Lycée Technique Saint Martin et du Bureau d'études BETICO pour remettre les lettres et expliquer le but de l'étude. Et par la même occasion, nous arrêtons avec ces responsables des dates d'intervention.

III-1.4 La collecte des données

Elle s'est effectuée selon le calendrier suivant :

- Du **16 Mars** au **21 Mars 2010** : Phase préparatoire de l'enquête et rencontre avec les responsables des locaux de fonction et d'habitation ;
- Du **23 Mars** au **03 Avril 2010** : Première phase sur le site du 2iE Kamboinsé & Ouagadougou ;
- Du **07 Avril** au **11 Avril 2010** : Deuxième phase sur les sites du Lycée Technique Privé Saint Martin et de BETICO Ouaga ;
- Du **13 Avril** au **30 Avril 2010** : Troisième phase dans les habitations « aux 1200 Logements » et dans quelques chambres universitaires de la ville.

III-1.4.1 Le questionnaire

Il est subdivisé en cinq sections (*Annexe6*) :

La première contient des informations générales à savoir : la date, l'heure, le sexe, l'âge et la nationalité. La deuxième comprend l'échelle de sensation thermique ASHRAE en sept points de l'air ambiant. La troisième et quatrième comprennent également l'échelle de sensation thermique ASHRAE en sept points de l'air ambiant mais cependant avec un nouveau paramètre qui est la vitesse. En fait il s'agit de placer un ventilateur devant l'enquêté et de souffler de l'air à une certaine vitesse respectivement de **1 m/s** et **2 m/s** et de donner à nouveau les sensations vis-à-vis de l'air ambiant. La dernière comprend des informations relatives sur les paramètres physiques du climat : la température sèche, l'humidité relative et la vitesse de l'air.

III-1.4.2 Mesures des paramètres physiques du climat

Les paramètres environnementaux du climat mesurés dans la zone d'occupation du local sont la température sèche de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air.

- La température de l'air mesurée à l'aide d'un thermocouple électronique à $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ étalonné à l'aide d'un thermomètre électronique ;
- L'humidité relative de l'air à l'aide d'un hygromètre électronique $\pm 5\%$
- La vitesse de l'air avec un anémomètre à ailettes, à $\pm 0,05 \text{ m/s}$

III-1.5 Description des bâtiments

Les bâtiments rencontrés sont de l'ordre de deux types :

- les constructions modernes avec des murs en parpaings ayant une épaisseur variant de **15 à 20 cm**, les toitures en dalles et/ou en tôles galvanisées + faux-plafonds en contre plaqué ;
- les constructions anciennes avec des murs en briques de terre crue et les toitures en dalles pleines.

III-1.6 Déroulement des séances

Les séances se sont déroulées comme suit :

- Une fois dans le local, nous expliquons le but de l'étude, la manière dont l'enquête allait se dérouler et comment remplir les fiches ;
- Puis, nous distribuons les fiches aux enquêtés en s'assurant qu'ils sont là en place depuis au moins trente **(30) minutes**. Nous procédons à la mesure des paramètres physiques à l'intérieur du local.
- Après avoir rempli les fiches, on les ramasse en jetant un coup d'œil rapide pour voir si elles ont été bien remplies
- Les occupants ont été observés une seule fois dans le Lycée Privé Technique Saint Martin, les logements d'habitation et le bureau d'études BETICO Ouaga cependant plusieurs fois dans le site du 2iE mais dans des ambiances bien différentes.

III-1.7 Difficultés rencontrées pendant l'enquête

Pendant les enquêtes, la principale difficulté rencontrée était de dialoguer avec certains occupants de locaux car ces derniers ne s'exprimaient qu'en langue locale. **(Moore)**

III-2 Les résultats de l'enquête

III-2.1 Saisie et traitement des données

Analyse des réponses aux questionnaires

Les réponses aux questionnaires ont été traitées en tant que données quantitatives. Un jugement par groupe est constitué par l'ensemble des sujets qui ont exprimé leurs jugements pour les mêmes conditions ambiantes.

Traitement des données

L'ensemble de données relatives aux jugements des sujets et aux paramètres physiques a été saisi et traité au logiciel Excel.

III-2.2 Le profil de l'échantillon

Un échantillon de **471** individus a participé à l'enquête, soit **280** hommes et **191** femmes âgés de **18 à 43** ans (moyenne d'âge : **30, 5** ans). (*Figure4*)

Nous avons également recensé **206** sur **471** individus qui ont participé à l'enquête avec un ventilateur soufflant de l'air aux vitesses **1 m/s** et **2 m/s**.

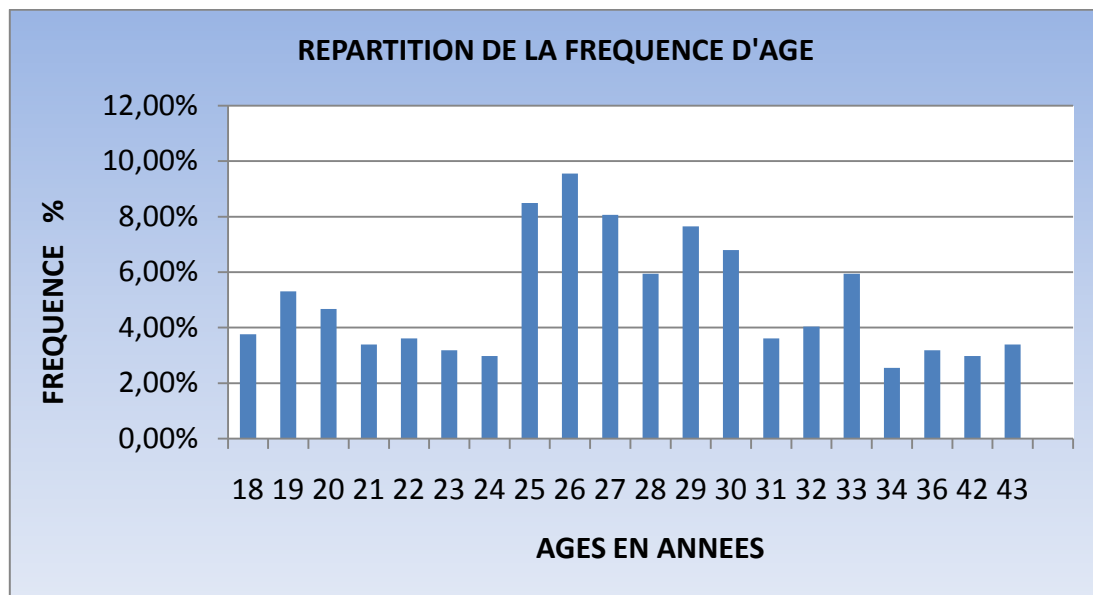


Figure 4: Répartition de la fréquence d'âge

III-2.3 Répartition des paramètres physiques

Comme nous l'avons précisé plus haut, nous nous sommes particulièrement attelés sur les paramètres suivants du climat : la température sèche de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air. La répartition de ces données physiques est présentée comme suit :

- La température intérieure de l'air est comprise entre **21** et **40°C** (moyenne : **30,5 °C**) ;
- L'humidité relative intérieure est comprise entre **20** et **42,5 %** (moyenne : **31,25 %**) ;
- La vitesse de l'air est comprise entre **0** et **0,7 m/s** (moyenne **0,35 m/s**).

III-2.4 Répartition des jugements

III-2.4.1 Jugement selon l'échelle de sensation thermique ASHRAE pour tous les sujets

Nous avons recueilli les jugements des sujets sur les sept points de l'échelle de sensation thermique ASHRAE.

Sur l'échelle ASHRAE, la répartition des jugements est la suivante (*Figure5*) :

Dans l'ensemble on a eu :

- 43 % des jugements se situent au point zéro « neutre »
- 57 % des jugements se situent dans la zone **froide** et **chaude**.

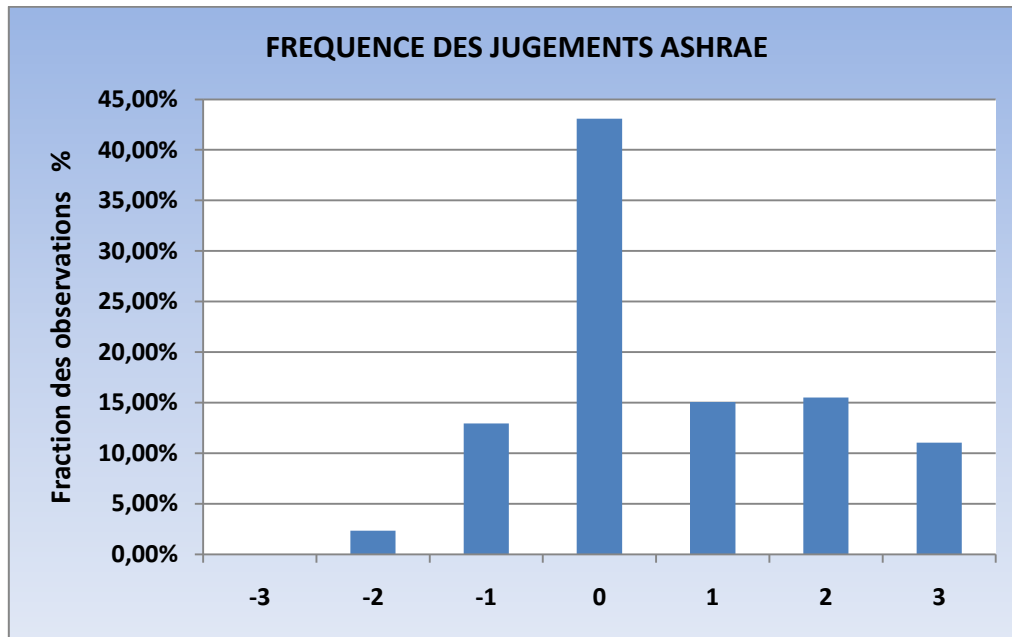


Figure 5: *Fréquence des jugements ASHRAE sur tout l'échantillon*

Les jugements sont recueillis parallèlement aux mesures de paramètres physiques des locaux. Dans le *tableau3*, les échelles de sensation thermique **ASHRAE** sont reportées aux différentes températures sèches de l'air. Ce tableau montre pour chaque paramètre physique du climat, le pourcentage de jugements en chaque point de l'échelle.

N.B.: Les jugements perceptifs des différentes ambiances

(-3) : Très froid

(1) : Légèrement chaud

(-2) : Froid

(0) : Ni froid ni chaud

(2) : Chaud

(-1) : Légèrement froid

(3) : Très chaud

Tableau 3: Echelle de sensation thermique ASHRAE en température, humidité relative et vitesse de l'air

ECHELLE DE SENSATION THERMIQUE ASHRAE EN T°C											
NOMBRES DES JUGEMENTS PERCEPTIFS ASHRAE PAR GROUPE											
V en m/s	Hr en %	T°C	-3	-2	-1	0	1	2	3	NOMBRE	%
0,6	27,5	21		11	8	3				22	4,67
0,3	32	22			10	4				14	2,97
0,3	29	23			11	7				18	3,82
0,4	34	24			17	10				27	5,73
0,5	36,5	25,5			6	17				23	4,88
0,5	33,2	26			3	45				48	10,19
0,3-0,6	34	27			4	40				44	9,34
0,3-0,5	38	28			2	27				29	6,16
0,1	31	29				28	8			36	7,64
0	21,5	30				11	16	5		32	6,79
0	42,5	31				5	3	1		9	1,91
0	20	32				2	11	8	2	23	4,88
0	20	33				4	20	15		39	8,28
0	24	34					7	5	6	18	3,82
0	25	35					1	6	2	9	1,91
0	22	36					5	7		12	2,55
0,1	20,5	37						10	7	17	3,61
0,1	22,5	38						6	20	26	5,52
0,1	20	40						10	15	25	5,31

En effectuant des plages réduites de 2°C d'intervalle de température, on obtient les valeurs présentées sur le **tableau en annexe7**. Ce tableau montre pour chaque plage de température, le nombre total des sujets et le pourcentage des personnes satisfaites et insatisfaites vis-à-vis de l'air ambiant. La **figure6** montre un diagramme plus explicite du taux des personnes satisfaites et des insatisfaites en fonction des températures ambiantes de l'air.

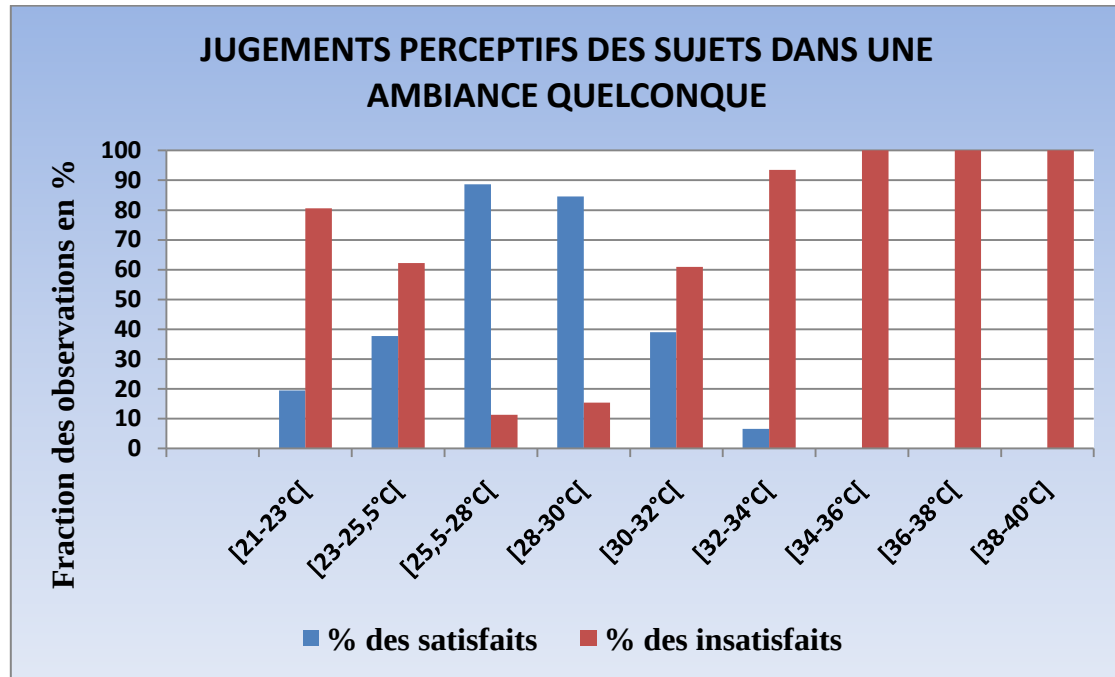


Figure 6: Jugements perceptifs des sujets dans une ambiance quelconque

III-2.4.2 Jugement perceptif selon l'échelle de sensation ASHRAE pour 206 sujets qui ont participé à l'enquête face au ventilateur

Nous avons précisé dans les paragraphes précédents que compte tenu des difficultés rencontrées sur le terrain, nous n'avons que recensé **206** sujets qui ont participé à l'enquête avec un ventilateur soufflant de l'air aux vitesses **1 et 2 m/s**.

Tout d'abord, nous avons fait ressortir les jugements selon l'échelle de sensation thermique ASHRAE pour les 206 individus sans que le ventilateur ne soit en marche. **Les tableaux en annexe7** montrent pour chaque paramètre physique du climat, le pourcentage de jugements en chaque point de l'échelle pour les cas : « **sans ventilateur ; ventilateur $v = 1\text{m/s}$ et ventilateur $v = 2\text{m/s}$** ».

Sur l'échelle ASHRAE, la répartition des jugements est la suivante (**Figures 7, 8 et 9**)

● **1^{er} Cas : Sans ventilateur**

- **13 %** des jugements se situent au point zéro « **neutre** »
- **2,5 %** des jugements se situent dans la zone « **froide** »
- **84,5 %** des jugements se situent dans la zone « **chaude** ».

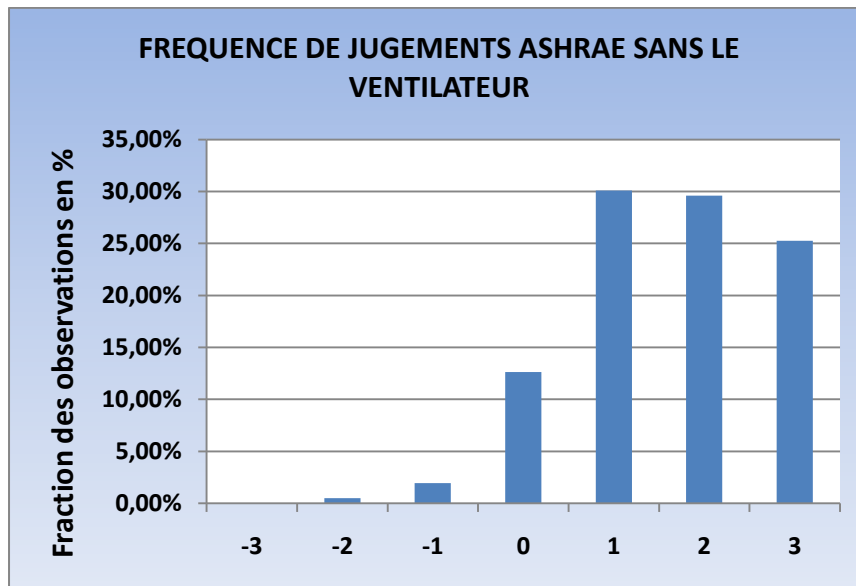


Figure 7: *Fréquence de jugements ASHRAE sans le ventilateur*

● **2^{ème} Cas :** *Ventilateur avec une vitesse $v = 1 \text{ m/s}$*

- 41 % des jugements se situent au point zéro « neutre »
- 8 % des jugements se situent dans la zone « froide »
- 51 % des jugements se situent dans la zone « chaude »

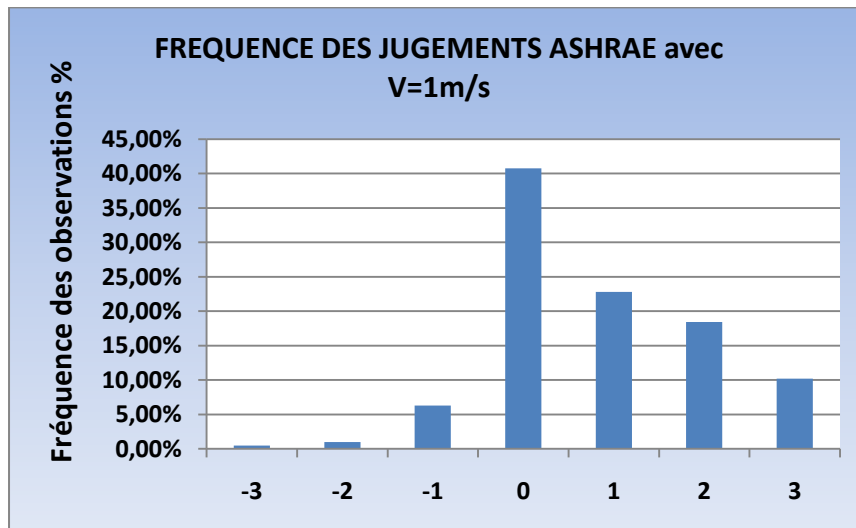


Figure 8: *Fréquence des jugements ASHRAE avec $v=1\text{m/s}$*

● **3^{ème} Cas :** *Ventilateur avec une vitesse $v = 2 \text{ m/s}$*

- 47 % des jugements se situent au point zéro « neutre »

- 16 % des jugements se situent dans la zone « froide »
- 37 % des jugements se situent dans la zone « chaude »

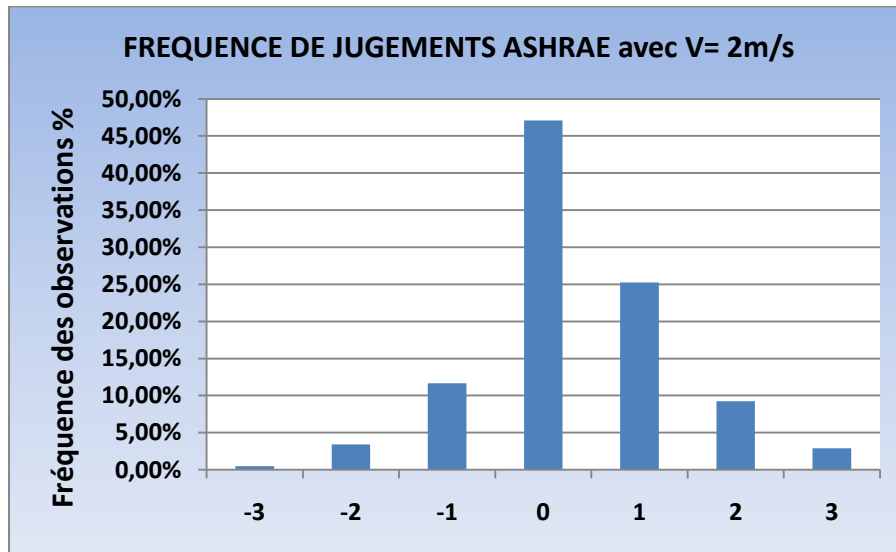


Figure 9: Fréquence de jugements ASHRAE avec v=2m/s

III-2.5 Zones de confort thermique « acceptable »

Nous proposons de définir une zone de confort dite « **acceptable** » pour laquelle le pourcentage des personnes insatisfaites ne dépassera pas les **10%** (**90%** des personnes satisfaites). En respectant cette limite, on trouve dans le **tableau4**, les zones d'acceptabilité thermique pour la ville de Ouagadougou. Nous avons également fait ressortir les zones pour lesquelles le pourcentage des personnes satisfaites est de **80%** et **70%**.

Tableau 4: Zone de confort thermique acceptable dans un climat comme celui de Ouagadougou

Zone	Température	Personnes satisfaites	Personnes Insatisfaites	Nombres
Acceptabilité thermique (satisfaction 90%)	T= [26-29°C]	151	17	168
	Hr = [31-33,2%]			
	V = [0,1-0,5 m/s]			
Acceptabilité thermique (satisfaction 80%)	T= [26-30°C]	151	38	189
	Hr = [21,5-33,2%]			
	V = [0,0-0,5 m/s]			
Acceptabilité thermique (satisfaction 70%)	T= [24-31°C]	178	65	243
	Hr = [34-42,5%]			
	V = [0,1-0,4 m/s]			

Au regard de ces résultats et en prenant en compte l'hypothèse de base d'où la zone est confort thermique est celle où on n'aura que **10%** des personnes insatisfaites, nous pouvons dire que la zone de confort dans un climat comme celui de Ouagadougou est comprise entre **[26 - 29°C]**.

III-3 Confrontation des résultats observés au Burkina Faso à d'autres études et aux prédictions des normes internationales.

III-3.1 Confrontation à d'autres études

Comparativement à l'étude menée par **Lawson (1991)** sur le confort des habitations à Ouagadougou, qui stipule que les températures qui caractérisent une zone de confort sont comprises entre **[28°C-35°C]**. Dans cette étude **Lawson** n'a pas précisé le pourcentage des personnes satisfaites pour voir si cela respecte ou pas la norme **ASRAE 55-81** précisant les conditions de confort. Cette plage est largement supérieure à la nôtre. Lorsqu'on observe notre **figure6** sur les jugements perceptifs des sujets dans une ambiance quelconque, l'on remarque pour des températures comprises entre **[21-25,5°C]**, nous observons **72%** des personnes insatisfaites ce qui signifie que lorsque les températures sont relativement basses donc inférieures à **25°C**, les sujets ont une sensation de froid. Néanmoins pour des températures comprises entre **[26-30°C]**, nous observons **75%** des personnes satisfaites (zone de confort). Par contre pour des températures supérieures à **34°C**, nous observons **100 %** des personnes insatisfaites (*sensation de chaud*).

Parallèlement, **Milne** et **Givoni** ont stipulé que la température de confort dans une région tropicale sèche était comprise entre **20** et **27°C**. En tenant compte de cette plage dans nos résultats, l'on observerait que **49%** des personnes satisfaites et nous serions largement en dessous de la norme **ASHRAE 55-81** qui préconise au moins **80%** des personnes satisfaites dans une ambiance quelconque.

En ce qui concerne le jugement perceptif des sujets face à un ventilateur, nous pouvons simplement dire que la vitesse de l'air est un paramètre très prépondérant dans la recherche du confort. Sur les **206** sujets observés, nous avons eu un passage de **13%** à **41%** lorsqu'ils étaient face à un ventilateur soufflant de l'air à **v=1 m/s** et de **13** à **47%** avec **v= 2 m/s**.

A ce même titre, les études les plus récentes menées en climat tropical, notamment celle de Jr Bush à Bangkok en Thaïlande avec un $T_n = 28,5^\circ\text{C}$ et *Mourtada (1993)* en côte d'ivoire $T_n = 27,9^\circ\text{C}$.

On peut affirmer que ces températures de thermo neutralité se classent en bonne marge de l'intervalle de la zone de confort de cette étude ($[26-29^\circ\text{C}]$).

III-3.2 Prédiction de la norme AHRAE 55-81

La norme **ASHRAE 55-81** recommande pour l'été des températures ambiantes comprises entre $22,6^\circ\text{C}$ et 26°C . A l'intérieur de cette marge, elle prédit que le pourcentage des personnes insatisfaites ne dépassera pas **20%**. En respectant cette limite, il semble que les températures comprises entre $[26-30^\circ\text{C}]$ soient satisfaisantes pour les populations vivant dans un climat comme celui de Ouagadougou.

La prédiction de cette norme n'est pas vérifiée à Ouagadougou.

III-3.3 Prédiction de la norme AFNOR

Cette norme recommande des températures ambiantes comprises entre **23** et 26°C . A l'intérieur de cette marge, elle prédit le pourcentage des personnes insatisfaites ne dépassera pas **20%**. Nous sommes à même de dire également que cette norme n'est pas vérifiée à Ouagadougou.

L'instauration dans les pays à climat tropical des conditions thermiques ambiantes conformes aux normes **ISO 7730** et **ASHRAE 55-81** pourraient entrainer les personnes à éprouver des sensations d'inconfort. Les populations de Ouagadougou semblent supportées les températures supérieures à celles des normes **ISO 7730** et **ASHRAE 55-81**, également celles des travaux de *Milne* et *Givoni* qui préconisaient que dans un climat tropical sec, la température de confort est comprise entre **20** et 27°C .

En somme, il serait nécessaire de trouver des méthodes de climatisation passive ou à faible coût pour maintenir ces occupants dans cette plage de température dite « **température de confort** ».

IV- METHODES DE CLIMATISATION PASSIVE OU A FAIBLE COUT

L'efficacité des systèmes de climatisation à faible coût dépend intimement du climat et du bâtiment. Leur choix suppose qu'une attention particulière ait été portée aux protections solaires afin de limiter les apports du soleil et au choix d'équipements électriques à haute efficacité énergétique afin de limiter les apports internes dans le bâtiment.

Nous n'envisageons les solutions de climatisation à faible coût que dans le cas de bâtiments à inertie élevée et bien protégés avec des apports internes faibles. Il existe plusieurs méthodes de climatisation passive ou à faible coût mais dans le cadre de ce mémoire, nous nous attarderons plus sur les méthodes « *puits canadiens et système de refroidissement par évaporation ou evaporative-cooling* ».

IV-1. Puits canadien/provençal

IV-1.1 Définition et description du prototype de puits canadien de Kamboinsé

IV-1.1.1 Définition

Un puits canadien est un système constitué d'un ensemble de tubes (éventuellement un tube unique), enterrés à l'horizontale sous le bâtiment (ou à côté de celui-ci), et intégrés au système de ventilation. Le but du système est d'amortir les variations de température de l'air extérieur en tirant parti de l'inertie thermique du sous-sol : en récupérant la fraîcheur du sol en été et la chaleur du sol en hiver. Cette solution se propose en secteur résidentiel comme en petit tertiaire.

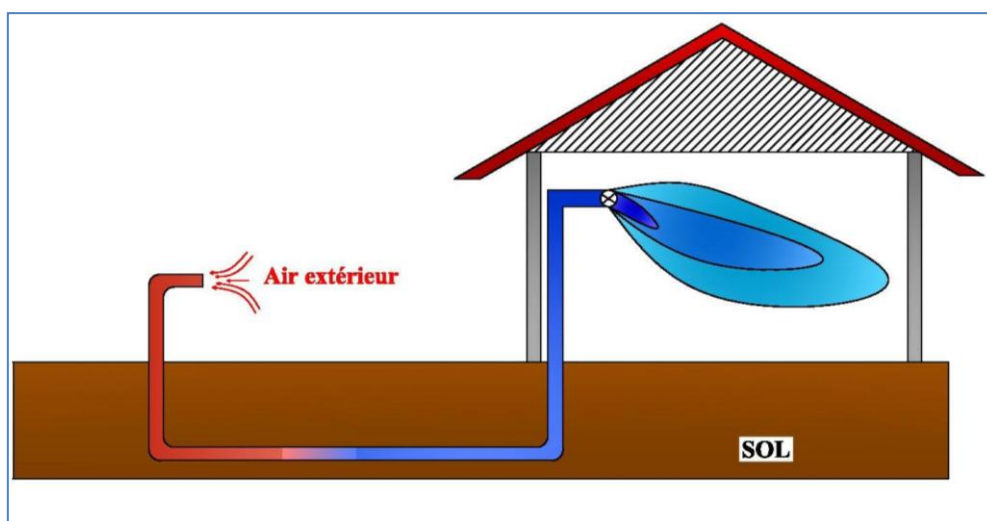


Figure 10: Schéma d'un puits canadien

IV-1.1.2 Description du prototype de puits de Kamboinsé

Le système se compose des conduits enterrés à **1,50 m** de profondeur avec des tubes en **PVC** de diamètre **125 mm**. Le ventilateur qui utilise une puissance de **14W** a un débit d'air de **95 m³/h**. Ce puits canadien a une longueur de **25 mètres** et nous dénombrons des sondes de température aux distances **5, 10, 15 et 20 mètres**. Nous notons également la présence de sonde de température à de différentes profondeurs (**0,5 m ; 1 m et 1,5 m**).

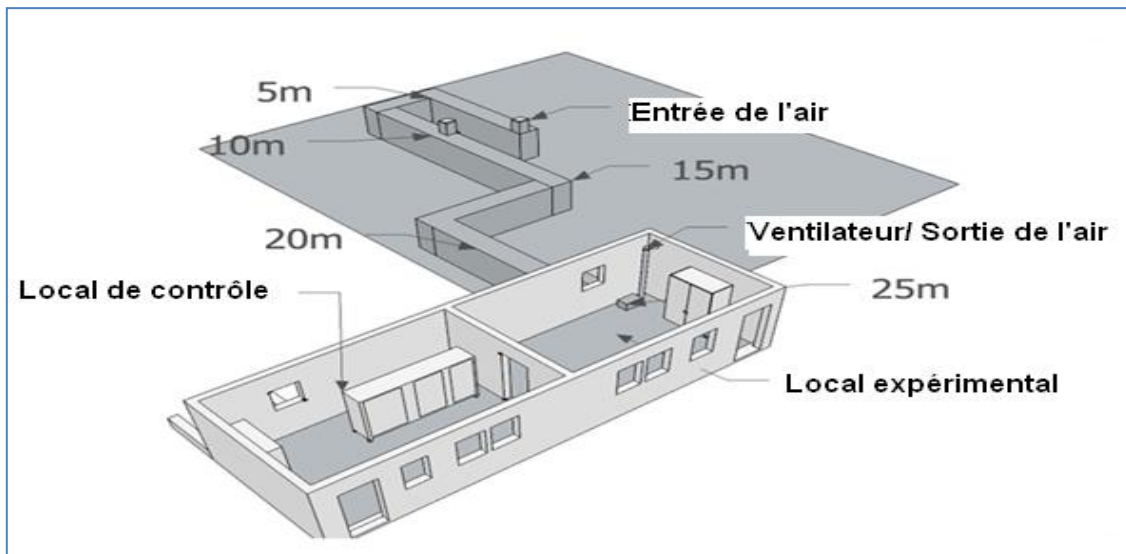


Figure 11: *Prototype du Puits canadien de Kamboinsé*

IV-1.2 Principe de fonctionnement

Le puits canadien est un système géothermique qui utilise l'énergie présente dans le sol à proximité de sa surface pour chauffer ou refroidir l'air neuf de ventilation des bâtiments.

Le principe du puits canadien/provençal est de faire circuler l'air neuf de ventilation dans un conduit enterré à **1,50** ou **2** mètres de profondeur grâce à un ventilateur, avant de l'insuffler dans le bâtiment. Pendant les périodes chaudes, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à la température extérieure.

IV-1.3 Les mesures sur le puits canadien

IV-1.3.1 Collecte des données

Les mesures sur le puits canadien de Kamboinsé ont été prises durant les mois de mars et avril et mai 2010.

- Elle s'effectuait tous les jours de **7 h** à **17 h** car nous souhaitons avoir les valeurs pour les périodes chaudes ;
- Et nous avons effectué quelques fois les mesures sur **24 h** pour voir le comportement du puits canadien dans la nuit.

IV-1.3.1.1 Fiche de mesures

La fiche est subdivisée en deux parties à savoir : (*Annexe 9*)

- La première partie est constituée des mesures horaires de températures à l'entrée, à **5 m**, à **10 m**, **15 m**, **20 m**, et à la sortie du puits canadien ;
- La deuxième partie contient des mesures horaires de température du puits à des profondeurs (**0,5 m** ; **1 m** et **1,50 m**).

IV-1.3.1.2 Mesures de température et description des salles expérimentales (*Annexe 10*)

Les mesures de température ont été effectuées par un thermocouple de type K.

Les salles où les expériences ont été réalisées sont en forme rectangulaire de dimension **3.50 m** de large, **5.35 m** de long et **2.75 m** de hauteur sous plafond. Les murs sont construits en parpaings de 18 cm d'épaisseur et la toiture est en tôle alu-zinc (alliage de l'aluminium et du zinc).

IV-1.4 Résultats

IV-1.4.1 Les mesures prises sur toute la longueur du puits canadien

Ces mesures ont été prises du 1 Mars au 21 Mai 2010. ***Le tableau 5*** montre les mesures de température à l'entrée, à 5 m, 10 m, 15 m, 20 m et à la sortie du puits canadien. Et aussi le Delta T qui est la différence entre la température à l'entrée et celle à la sortie du puits canadien.

T (entrée) : température à l'entrée du PC

T (5 m) : température du PC à 5 m de long

T (10 m): température du PC à 10 m

T (20 m) : température du PC à 20 m

T (sortie) : température à la sortie du PC

ΔT : écart de température entre l'entrée et la sortie du PC

La variation moyenne de température entre l'entrée et la sortie du puits canadien varie de 7°C à 8,2°C pour le mois de Mars, de 6 à 9,4°C pour le mois d'Avril et de 3,3 à 6,5°C pour le mois de Mai. Il est également important de relever que pour les mois de Mars, Avril et Mai, les températures moyennes à la sortie du puits sont respectivement de 29,8°C ; 30,0°C et 30,5°C.

Tableau 5: Récapitulatif des mesures prises suivant toute la longueur du puits canadien pour les mois de mars, avril et mai 2010

MARS						AVRIL					MAI			
Semaines	S1	S2	S3	S4	moyenne	S5	S6	S7	S8	moyenne	S9	S10	S11	moyenne
T (entrée)	38	37,3	37	37,7	37,5	37,7	36,3	39,6	37,4	37,75	34	36,4	35,5	35,3
T (5m)	29,5	30,6	30	30,2	30,075	30,6	31	31,4	31,6	31,15	32,9	33,3	32,6	32,93
T (10m)	29,1	28,1	29,5	28,7	28,85	29,4	29,6	30,4	31,9	30,325	32,3	32,7	31,3	32,1
T (15m)	28,5	28,4	29,4	28,5	28,7	29,6	28,6	29,8	31,6	29,9	31,7	32,2	31	31,6
T (20m)	29,3	29,6	30,5	29,2	29,65	30,5	29,6	30	32	30,525	32,2	31,6	31,6	31,8
T (sortie)	30	30,3	29,5	29,5	29,825	30	28,4	30,2	31,5	30,025	30,7	29,9	30,9	30,5
ΔT	8	7	7,5	8,2	7,675	7,7	7,9	9,4	5,9	7,725	3,3	6,5	4,6	4,8

IV-1.4.2 Les mesures de températures du sol aux profondeurs (0,5 m ; 1 m et 1,50 m)

Du fait que l'air doit se refroidir pendant sa traversée dans le sol, il est réellement important de montrer la variation de la température en fonction de la profondeur du sol. Le **tableau 6** suivant nous montre les températures extérieures de l'air et celles du sol aux **profondeurs 0,5 m ; 1 m et 1,50 m**.

T (EXT.) : température sèche de l'air ambiant

T (0,5 m) : température du sol à 0,5 m de profondeur

T (1,0 m) : température du sol à 1 m de profondeur

T (1,5 m) : température du sol à 1,5 m de profondeur

Tableau 6: Récapitulatif des mesures de températures du sol à différentes profondeurs

Semaines	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
T (EXT.)	38	37,3	37	37,7	37,7	36,3	39,6	37,4	34	36,4	35,5
T (0.5m)	31,8	30,75	31,6	31,6	30,3	30,4	31,1	30,2	Sonde endommagée		
T (1 m)	30,1	29,6	30,7	30,4	29,8	29,5	30,5	29,6	31,1	33,4	32,1
T (1.5m)	28	27,5	29,6	29,7	29,7	29,2	30,1	29,1	30,8	31,6	31,7

IV-1.5 Analyses et discussion des résultats

IV-1.5.1 Evolution de la température sur toute la longueur du PC pour les mois de Mars et Avril 2010.

Les **figures 12** et **13** ci-contre nous montrent l'évolution de la température de l'air sur toute la longueur du tuyau pour les mois de mars et avril.

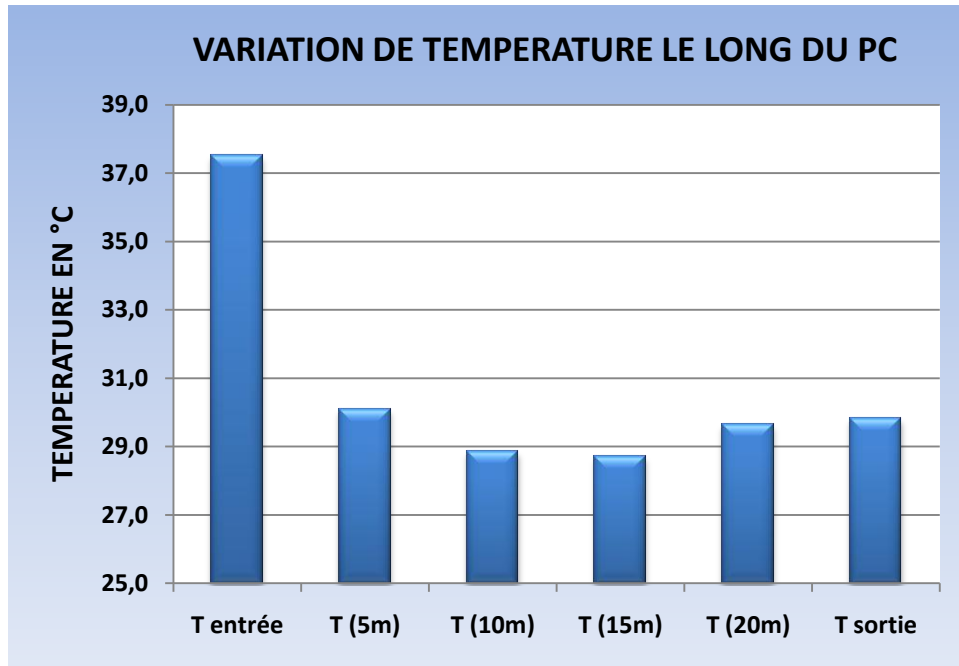


Figure 12: Variation de température le long du puits canadien au mois de Mars 2010

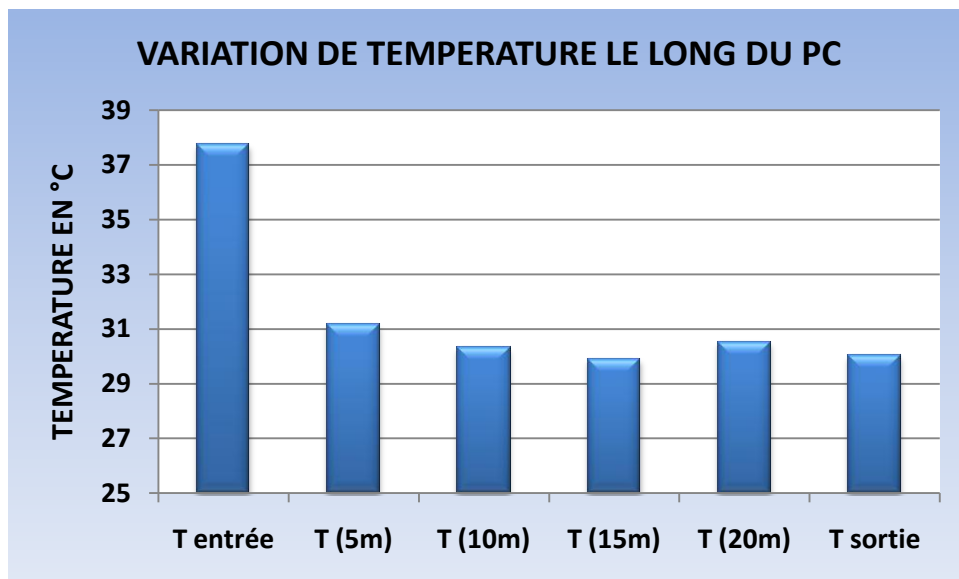


Figure 13: Variation de la température au mois d'Avril 2010

Les mesures prises durant cette période nous révèlent que la différence de température entre l'entrée et la sortie du PC varie de 5 à 10°C comme l'a ainsi bien illustré les travaux de Thomas Woodson qui a construit ce PC un an plutôt. Néanmoins, dans les pays du nord, nous remarquons un écart de 10 à 15°C ceci dû à des températures relativement basses en profondeur (10-16°C à 1,50 m) (Peuportier et al. 2006). Nous notons aussi qu'à partir de 20

m, l'air contenu dans les conduits commence à se réchauffer ; cela s'explique par le fait que le second tronçon ($L \geq 20$ m) du PC est exposé au soleil tandis que le premier ($L \leq 15$ m) est à l'ombre.

IV-1.5.2 Corrélation entre la température ambiante de l'air et celles du sol à différentes profondeurs

La figure 14 montre les variations de température entre l'air ambiant et le sol à des profondeurs (0,5 m ; 1 m et 1,50 m)

T (EXT.) : température sèche de l'air ambiant

T (0,5 m) : température du sol à 0,5 m de profondeur

T (1,0 m) : température du sol à 1 m de profondeur

T (1,5 m) : température du sol à 1,5 m de profondeur

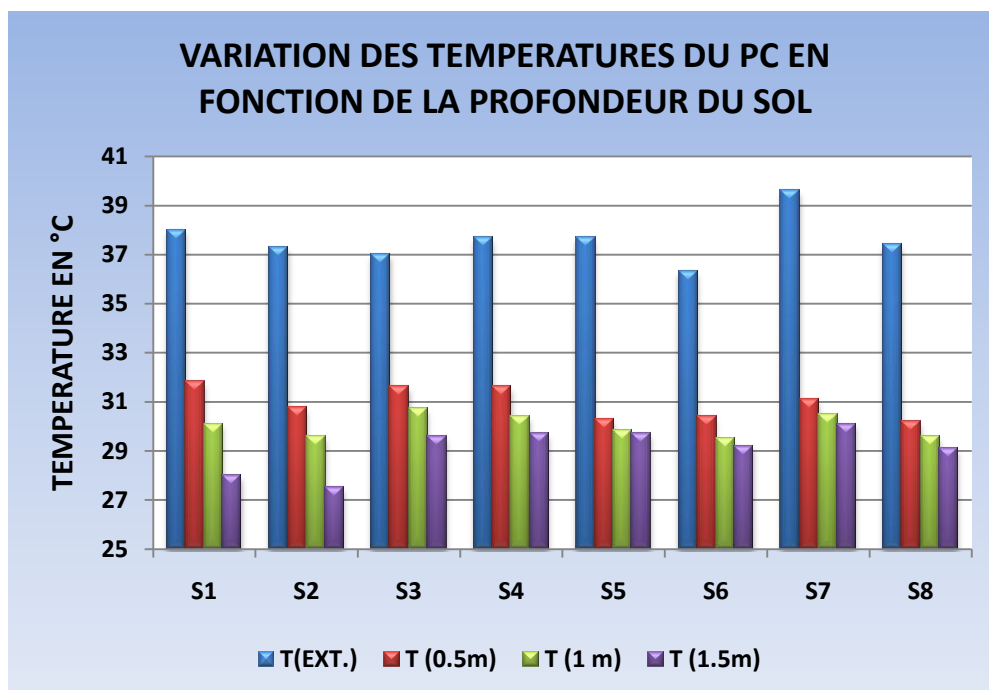


Figure 14: Evolution de la température dans le sol durant les mois de Mars et Avril 2010

Nous tenons à préciser que nous n'avons donné que les valeurs de **8 semaines** car à partir de la neuvième semaine, la sonde située à **0,50 m** de profondeur a été endommagée et nous n'avons pu prendre que les températures aux profondeurs **1 m** et **1,50 m**. A **0,50 m** de

profondeur, la température varie de **30,2°C à 31,8°C**. Pourtant à **1 m**, la température varie de **29,5°C à 30,7°C** et à **1,50 m** de profondeur, la température varie de **27,5°C à 30,1°C**. L'on constate que l'abaissement de la température entre l'air ambiant et à **1,50 m** de profondeur dans le sol varie de **7,4 à 10°C** pour le mois de Mars, de **7,1 à 8,3°C** pour le mois d'Avril et de **3,2 à 4,8°C** pour le mois de Mai. Cependant, nous avons également planté une sonde à un **(01) mètre** de profondeur sur le périmètre irrigué de bananeraie situé à une centaine de mètres du puits pour observer le comportement du sol dans cette zone et dans la majorité des cas, nous avons eu des températures qui oscillaient entre **26 et 28°C** en journée et **29,5 à 31°C** dans la nuit.

A une certaine profondeur, la température du sol n'est plus fonction des paramètres physiques du climat. C'est ainsi qu'on observe dans le cas de nos mesures un écart **5-10°C** de température entre l'air ambiant et celle du sol à **1,50 m** de profondeur. Cet écart est faible dans ce cas car le sol est dans la plupart chaud et sec pourtant le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide (*Peuportier et al. 2006*). C'est dans cette optique que nous avons planté une sonde de température sur le périmètre irrigué situé non loin de notre PC à **1 m** de profondeur. Nous avons obtenu des résultats étonnant car durant toute la journée, la température du sol avoisinait les **26-28°C**. Ce qui nous permet de conclure que l'on peut augmenter le rendement d'un puits canadien (*gagner 2 ou 3°C*) en l'implantant sous un jardin qu'on devra permanemment humidifier.

IV-1.5.3 Evolution de la température d'entrée et de sortie pendant 24 h

Nous tenons à préciser que excepté les mesures effectuées sur une période de **11 semaines**, nous avons également fait des mesures du puits canadien sur une période de **24 h** à la date de **15 Avril 2010** et **18 Mai 2010** pour voir le comportement de ce dernier dans la nuit et déterminer à quelle période de la journée il est opportun de l'utiliser. Pour le mois d'Avril, l'écart maximal de température entre l'entrée et la sortie est de **8,5°C** et pour celui de Mai est de **6,5°C**. Les *figures 15* et *16* ci-contre nous présentent les variations horaires de température entre l'entrée et la sortie du puits canadien pendant une période de **24 h**.

Dans le cas des mesures sur le PC effectuées sur 24 h d'affilé, il est très intéressant de voir ici la double fonctionnalité du PC à savoir : « *Refroidir en journée et chauffer dans la nuit* ». Nous sommes apte à dire que le puits canadien est efficace de **8 h à 21 h** car il abaisse la température de **3 à 5°C**. Et dans la nuit c'est le phénomène inverse qu'on observe. Chauffer

un local dans une région tropicale sèche n'est pas toujours nécessaire mais nous pouvons également conseiller l'utilisation du PC dans la nuit en période d'harmattan (Novembre, Décembre, Janvier) où il fait très frais dans la nuit.

IV-1.5.4 Evolution de la température de la salle d'expérience avec et sans le PC

Nous avons mené une expérience dans les salles d'expérimentation à Kamboinsé pour voir l'influence du puits canadien dans un local. Dans une salle, le puits fonctionnait alors que dans l'autre il n'y en avait point. Cette expérience nous a permis de voir de combien de degrés, le puits canadien peut abaisser la température d'un local. Dans le cas présent nous avons obtenu une différence de 3°C. La **figure 17** nous présente les variations horaires de la température du local lorsque le puits canadien fonctionne et dans le cas contraire.

T (entrée) : température à l'entrée du PC

T (sortie) : température à la sortie du PC

T1 (avec) : température de la salle d'expérience avec le PC

T2 (sans) : température de la salle d'expérience sans le PC

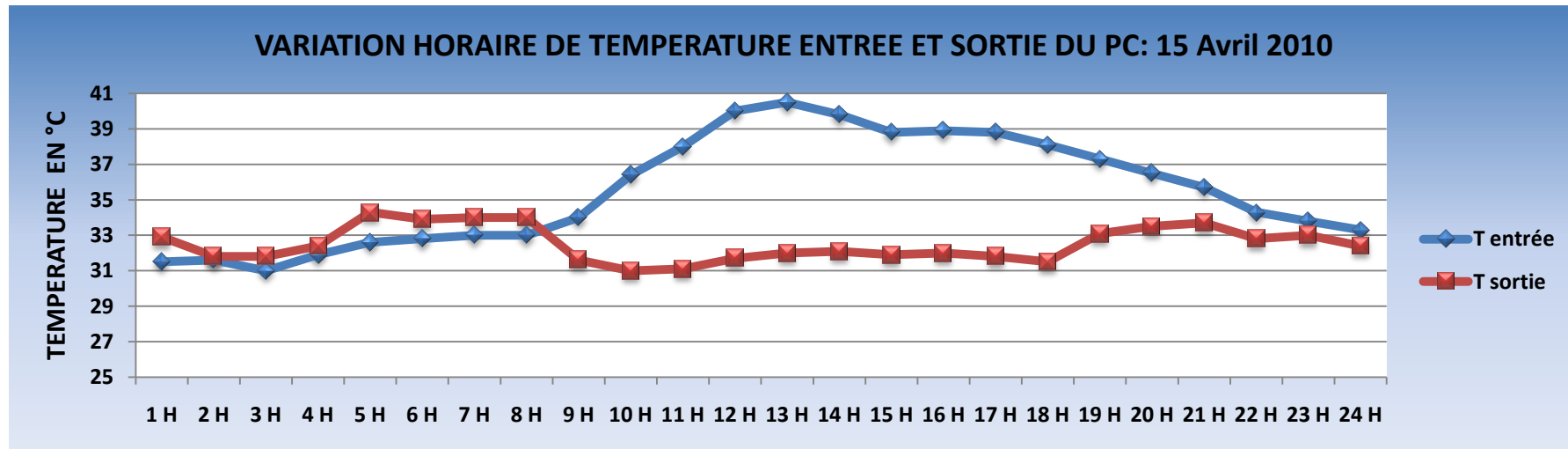


Figure 15: Variation horaire de température entre l'entrée et la sortie du Puits canadien à la date du 15 Avril 2010

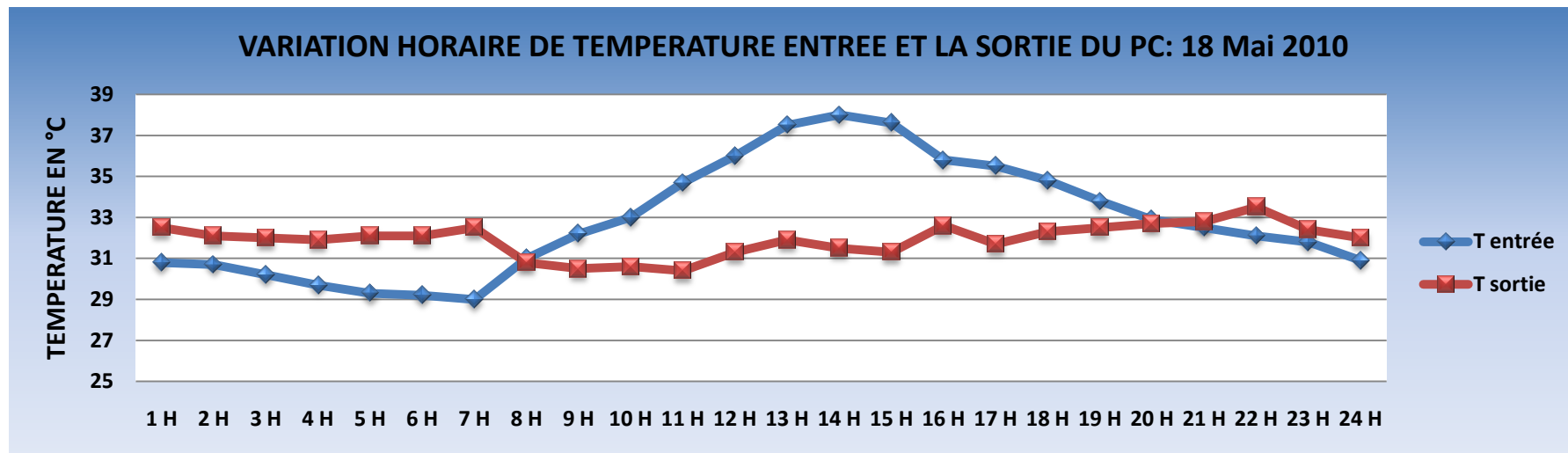


Figure 16: Variation horaire de température entre l'entrée et la sortie du puits canadien à la date du 18 Mai 2010

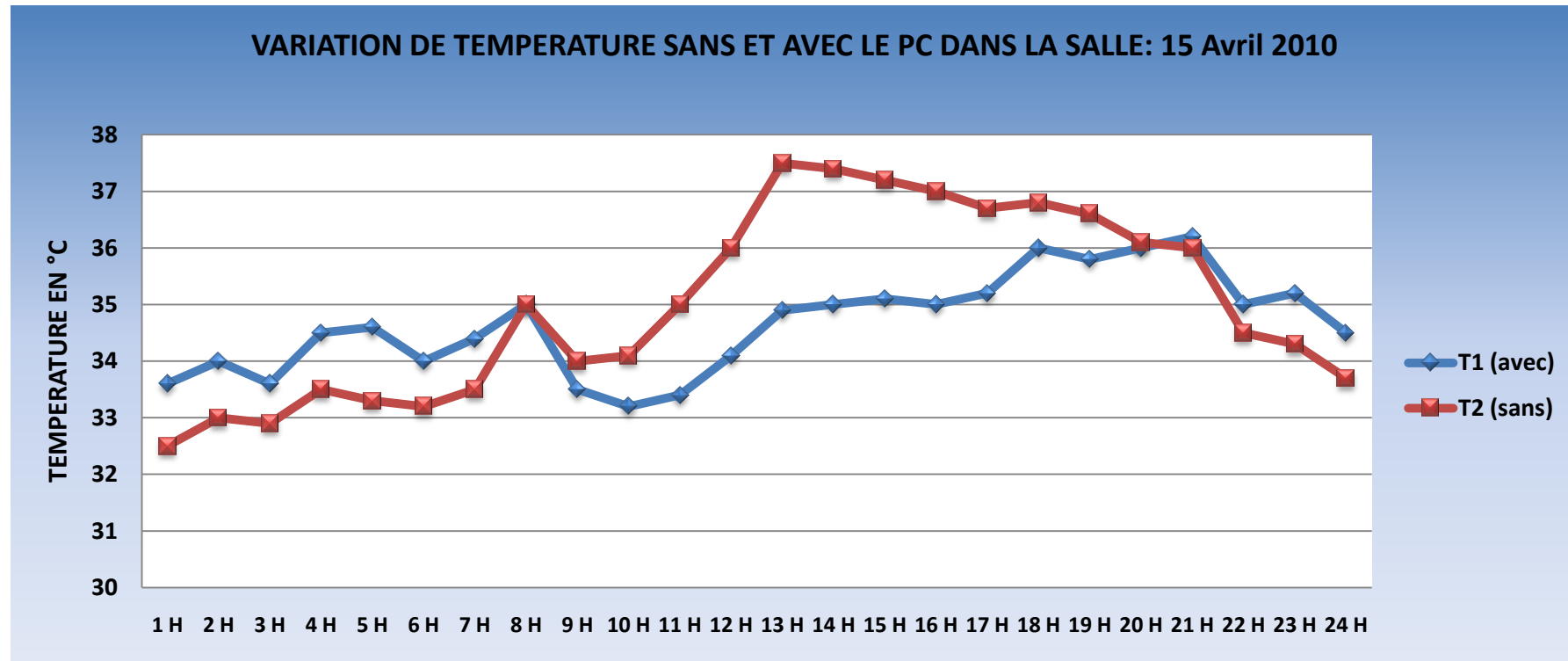


Figure 17: Variation de température dans le local avec ou sans puits canadien

Au terme de cette analyse, nous pouvons dire que le puits canadien est un système qui peut mettre des occupants d'un local dans la zone de confort ; on a observé parfois la température à la sortie du puits qui était de **28,5°C**. Néanmoins, il ne résout pas le problème de l'humidité qui est relativement basse pendant les mois de Février, Mars et Avril. Ce qui nous permet d'introduire un autre système passif de climatisation à savoir les systèmes de **refroidissement par évaporation**.

IV-2. Les systèmes de refroidissement par évaporation ou « evaporative-cooling »

Ce type de système fait évaporer de l'eau pour refroidir l'air. Le système requiert l'utilisation d'un humidificateur qui permet d'humidifier l'air. On distingue plusieurs types de climatisation par évaporation : *l'évaporation directe en ambiance*, *l'évaporation directe gainée* et *l'évaporation indirecte gainée*. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes plus attelés au système d'évaporation directe en ambiance car ce sont ces systèmes qui ont fait l'objet des tests sur le site du 2iE Kamboinsé durant la période du **30 Mars au 07 Avril 2010**.

IV-2.1 Définition et principe de fonctionnement des systèmes de refroidissement par évaporation

IV-2.1.1 Définition

L'évaporative-cooling est un système de refroidissement qui consiste à humidifier et à refroidir l'air avant de l'insuffler dans un local.

IV-2.1.2 Principe

Le but est de pulvériser de fines gouttelettes d'eau dans l'air à humidifier. Ces gouttelettes vont s'évaporer en empruntant de la chaleur à l'air, l'air va se refroidir et son humidité va augmenter. En fait, Il s'agit de faire passer l'air à travers une cellule humidificatrice où il subit un refroidissement d'autant plus important que l'air est sec. L'air rafraîchi est ainsi propulsé dans la pièce par le

ventilateur. Son schéma de principe est donné sur la **figure 18** :

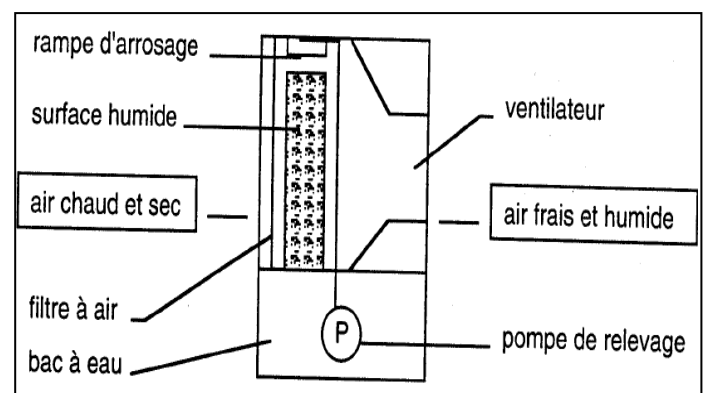


Figure 18: Schéma d'un « evaporative-cooling »

IV-2.2 Description du prototype d'essai

Le prototype soumis à l'essai est un appareil d'une puissance de **185 W** équipé d'une pompe de relevage immergé dans un bac à eau de **40 litres**. Cette pompe a pour rôle d'arroser la cellule humidificatrice qui est constituée de fibres de bois traité en usine. L'appareil est également équipé d'un filtre à air qui permet de retenir les poussières et les autres particules solides. Son ventilateur permet de souffler l'air jusqu'à **5000 m³/h**.

Lieux des essais

Ces essais ont été réalisés aux laboratoires Electrotechnique, Biomasse et au restaurant pendant toute la matinée et dans l'après-midi.

IV-2.3 Analyse des résultats des essais

Le **tableau en annexe 11** nous donne les résultats des mesures de température à l'aspiration et au soufflage ainsi que celles des humidités relatives de l'air.

Les températures moyennes à l'aspiration étaient de **38°C** avec une humidité relative autour de **14%**, tandis qu'au soufflage, nous avons eu des températures de soufflage de **21°C** avec une humidité relative à **55%**. L'air neuf est soufflée dans le local à une vitesse à **7 m/s** à la sortie de l'appareil. L'abaissement de la température dans les différents locaux variait de **5 à 10°C** et ce qui permettait aux étudiants (**95% des satisfaits**) de se sentir confortable. Comme exemple, avant la mise en marche de nos refroidisseurs au restaurant, nous avons une température sèche de l'air **T = 36,5°C**. Quelques temps après avoir mis en marche les appareils, la température de l'air dans le local était de **T = 27,5°C** ; qui est dans la plage de température confortable déterminée plus haut. **[26-29°C]**

Il est aussi très important de noter que ces appareils sont efficaces lorsque l'air est d'autant plus chaud et sec bref lorsqu'on se trouve dans les conditions climatiques très rudes.

Dans l'ensemble nous avons noté des réactions positives de la part des étudiants qui étaient d'une part surpris par la simplicité de la technologie et d'autre part le confort qu'ils retrouvaient dans des conditions très naturelles. Nous avons donc eu des difficultés à désinstaller les appareils à la fin de nos essais, car les uns et les autres s'y opposaient.

IV-3 Couplage des deux systèmes de climatisation à faible coût

Au terme des résultats ci-dessus, nous pouvons dire que les puits canadiens et les systèmes de refroidissement par évaporation ou « *evaporative-cooling* » sont des techniques de climatisation à faible coût qui maintiennent les occupants d'un local dans une zone de température dite « *confortable* ». L'interrogation est de coupler ces deux techniques là pour assurer le confort des usagers à chaque période et ce pendant toute l'année.

Nous avons démontré par les résultats que le puits canadien est un système à double action c'est-à-dire qu'il refroidit le local de **8 h à 21 h** et le réchauffe toute la nuit et tandis que l'« *evaporative-cooling* » lui, refroidit et humidifie le local pendant toute la journée. Il s'avère donc que ces techniques de climatisation sont complémentaires au cours de l'année.

Nous préconisons l'*evaporative-cooling* pour refroidir le local pendant les périodes de Février, Mars, Avril et Mai où les températures sont très élevées et les humidités relativement faibles ; car ce sont des appareils qui ont des rendements très efficaces lorsque le climat est plus chaud et très sec.

Par contre, nous proposons l'utilisation du *puits canadien* pendant les périodes de Juin à Septembre car les pluies ont occasionné la hausse de l'humidité relative et de ce fait, l'*evaporative-cooling* n'est pas conseillé. Et comme nous l'avons aussi démontré dans les paragraphes précédents, lorsque le sol est humide le *puits canadien* a un rendement meilleur. Il faut remarquer que le *puits canadien* peut être utilisé pour chauffer les locaux la nuit pendant les périodes froides d'harmattan (*Novembre, Décembre, Janvier, Février*).

Au terme de ces résultats, nous sommes à même de dire que les systèmes de refroidissement par évaporation ou « *Evaporative-cooling* » sont des méthodes de climatisation à faible coût qui mettent les occupants d'un local dans la zone de confort (**26-29°C°**). Et en plus ils sont vraiment conseillés pendant les périodes où l'humidité est relativement faible.

V- CONCLUSIONS GENERALES

L'étude que nous venons de présenter avait pour objectif : « *Etablir un niveau de confort thermique dans un local en utilisant les méthodes de climatisation passive ou bien à faible coût* ».

Les apports de l'étude sont :

➤ Confort thermique

Une plage de température dite température de confort a été déterminée en fonction des sensations thermiques recueillies en ambiance quelconque par les populations (**471 individus**) vivant dans un climat comme celui de Ouagadougou.

Quelque soit l'ambiance, les populations de Ouagadougou semblent accepter plus facilement les ambiances chaudes par rapport aux personnes des pays du Nord dont les jugements ont servi de base à l'établissement des normes **ISO 7730** et **ASHRAE 55-81** et également des normes tirées des travaux de **Milne** et **Givoni [20-27°C]**. C'est ainsi qu'ils trouvent **[26-29°C]** (jugées chaudes par les normes internationales) acceptables.

➤ Méthodes de climatisation passive ou à faible coût

Comme méthodes de climatisation à faible coût, nous nous sommes attardés sur deux à savoir : le puits canadien et les systèmes de refroidissement par évaporation ou « *evaporative-cooling* ».

Dans le cas du puits canadien, les températures moyennes de sorties du PC dans la journée étaient de **28,5-29°C** et **30°C** pendant les périodes de Mars à Mai 2010 ; ce qui permettrait de maintenir les occupants d'un local dans la zone de confort **[26-29°C]**. Et dans la nuit, il peut aussi être utilisé pour chauffer les locaux la nuit pendant les périodes froides d'harmattan (Novembre, décembre, Janvier).

Néanmoins, les systèmes de refroidissement par évaporation quant à eux humidifient et refroidissent le local. Les essais nous ont permis de voir que la différence de température entre l'aspiration et le soufflage est de **17°C** ; ce qui permettait d'abaisser la température de **5 à 10°C** dans le local.

Au terme de cette étude, nous pouvons dire que les méthodes de climatisation passive ou à faible coût sont des méthodes qui doivent être prises en compte pour maintenir les individus d'un local confortable et permettre de réaliser des économies d'énergie dans le pays afin de desservir toutes les autres régions.

VI- RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

L'enquête sur le confort thermique a été réalisée en saison sèche ; elle devrait être complétée en saison humide pour avoir les sensations des individus lorsque l'humidité relative augmente.

Les enquêtes dans les locaux d'habitation et de fonction se sont déroulées dans la ville de Ouagadougou ; il est souhaitable que cette étude soit complétée par le recueil des sensations thermiques des populations dans la zone du Nord du Burkina Faso où les températures sont les plus élevées.

Les mesures de température sur le PC du 2iE ont été réalisées en saison sèche (Mars, Avril, Mai) ; il serait souhaitable qu'elles se déroulent aussi pendant la saison des pluies ou même pendant toute l'année pour voir le comportement du puits à ces périodes là.

Aussi, Il serait également intéressant de coupler un puits canadien aux panneaux photovoltaïques ; ce qui pourra le mettre à l'abri de nombreuses délestages et des éventuelles coupures du courant électrique dans la journée. Ce type de système est donc envisageable dans les zones isolées qui n'ont pas accès au réseau électrique.

Cette étude pourra être poursuivie dans les directions suivantes :

- L'élaboration d'une norme au Burkina pour des ambiances quelconques ;
- La valorisation des techniques de climatisation passive ou à faible coût en lieu et place de la climatisation active pour réaliser des économies d'énergie dans tout le pays et desservir d'autres localités ;
- La contribution à la mise au point de normes énergétiques (code de qualité énergétique du bâtiment) et d'une réglementation thermique pour la construction ;
- La mise en œuvre des bâtiments bioclimatiques adaptés au climat de la région tropicale sèche ;
- La poursuite éventuelle de cette étude, avec le concours sollicité des organismes partenaires du 2iE, pourra conduire à une amélioration significative du niveau de confort thermique à l'intérieur des bâtiments et contribuer à l'utilisation rationnelle des ressources énergétiques du pays.

VII- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Cahier des Prescriptions Environnementales** -Bâtiments d'habitation. Juillet 2006, 42 p.
- [2] **Claude (A.R.)**.-1987. Énergétiques du bâtiment I et II. Presses Polytechniques Romandes. Lausanne, SUISSE. 134 et 236 p.
- [3] **Claessens et al.** Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale. Tome 1 : Conception des nouveaux bâtiments. 186 p.
- [4] **Corinne Martinet et Jean-Pierre Meyer**, Travail à la chaleur et confort thermique. Note Scientifique et Technique, décembre 1999.- 61 p.
- [5] **Dreyfus J.** 1960. Le confort dans l'habitat en pays tropical. Paris : Eyrolles. 350 p.
- [6] **Eco consommation.** Le confort thermique. Août 2008 Fiche N° 154, 2 p.
- [7] **Fanger.** Thermal comfort. McGrall-Hill Book Compagny, New-york, 224 p.
- [8] **Fleury Emmanuel et Orlando Catarina.** Comparaison Internationale Bâtiment et Energie.- Climatisation basse consommation. Décembre 2007, 44 p.
- [9] **IBGE.** Guide Pratique Pour La Construction Et La Rénovation Durables De Petits Bâtiments – Février 2007.-Recommandation Pratique Css13 – 8 p.
- [10] **H. M'Sellem* et D. Alkama.** Le confort thermique entre perception et évaluation par les techniques d'analyse bioclimatique - Cas des lieux de travail dans les milieux arides à climat chaud et sec-*Revue des Énergies Renouvelables*. 2009 Vol. 12 N°3 (2009) 471 – 488 p.
- [11] **Kemajou Alexis.** Confort thermique en situation réelle et mesures d'économie d'énergie dans les bâtiments tertiaires au Cameroun. Thèse doctorale, Sciences de l'Ingénieur Spécialité : Énergétique, École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, Cameroun, 1995, 256 p.
- [12] **Jannot Yves et Djiako-** Économie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale, 8 p.
- [13] **Mourtada A.** -1993. Code ivoirien de qualité énergétique des bâtiments. Liaison Energie-Francophonie/IEPF. N°19/1993. 24-28 p.

- [14] **Nicolas Morel et Edgard Gnansounou.**-Énergétique du bâtiment. Septembre 2008-Faculté d'Environnement Naturel, Architectural et Construit. École Polytechnique Fédérale De Lausanne. 223 p.
- [15] **Nielsen K. Holger.** Concevoir avec la nature.- Guide de planification et de conception active sous climat chaud et sec ou chaud et humide. Mai 1999, 103 p.
- [16] **Organisation Mondiale de la Santé.** Série de Rapports Techniques N° 412. Problèmes de santé associés au travail dans les conditions de contrainte thermique, Rapport d'un groupe de Scientifique de l'OMS, Genève 1969, 34 p.
- [17] **Peuportier et al.** Dimensionnement du puits climatique. Rapport final.- 2006, 59 p.
- [18] **Pigeon Grégoire.** 23 juillet 2009. Méthodologie de Calcul d'un indice thermique du corps humain, Subvention ANR N° ANR-08-VULN-013-0x/VURCA, 15 p.

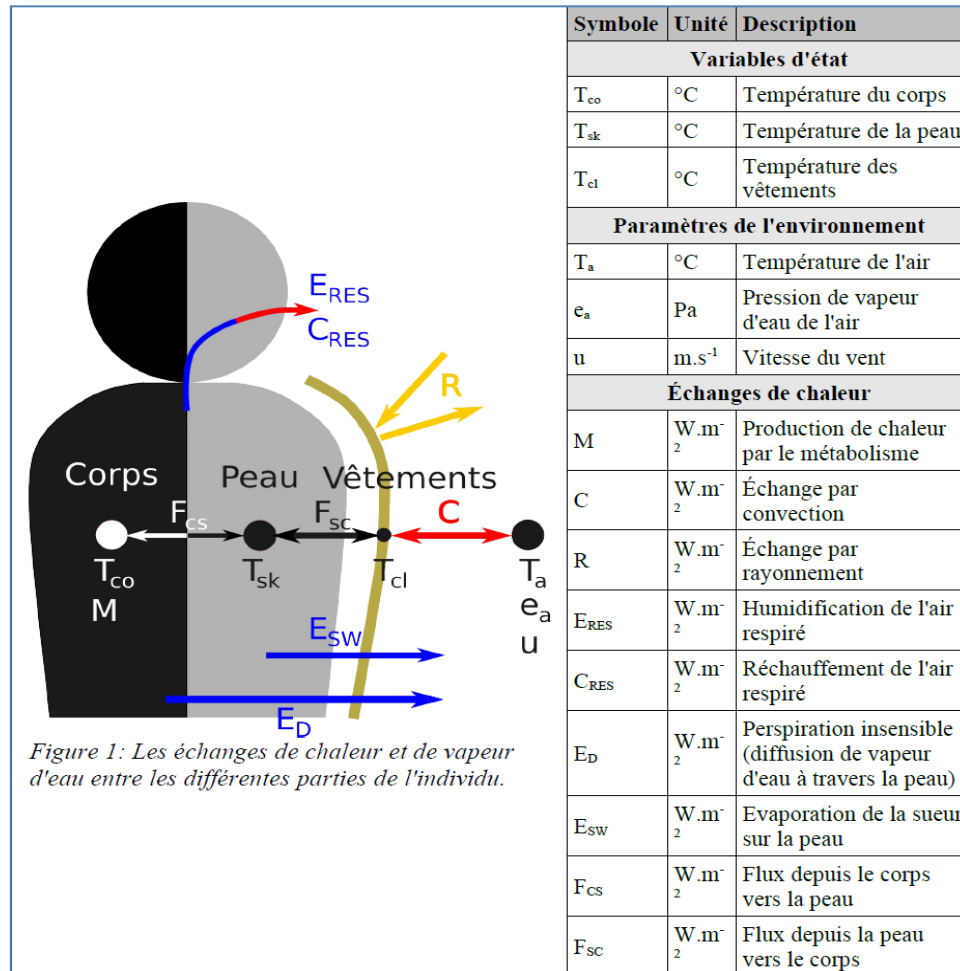
SITES INTERNETS

 www-energie2.arch.ucl.ac.be

VIII- ANNEXES

Annexe 1: Les différentes variables et paramètres utilisés dans le bilan de l'individu	49
Annexe 2: Propriétés thermo physiques des matériaux de construction	50
Annexe 3: Quelques valeurs de réflectivité pour divers matériaux de construction et valeurs d'absorptivité, émissivité	51
Annexe 4: Tableaux sur les différents indices de confort thermique	52
Annexe 5: Note d'enquête sur le confort thermique	54
Annexe 6: Fiche d'enquête sur le confort thermique dans une ambiance quelconque	55
Annexe 7: Sensation des individus en fonction des températures	56
Annexe 8: Echelle de sensation thermique ASHRAE des 206 individus.....	57
Annexe 9: Fiche de mesure sur le puits canadien du 2iE Kamboinsé	59
Annexe 10: Mesures des paramètres physiques du climat et ceux de la salle expérimentale .	60
Annexe 11: Récapitulatif des mesures de températures et d'humidité relative sue les "evaporative-cooling"	61

Annexe 1: Les différentes variables et paramètres utilisés dans le bilan de l'individu



(Source : Grégoire Pigeon, 2009)

Annexe 2: Propriétés thermo physiques des matériaux de construction (Claessens et al, 1996)

Matériaux	Conductivités thermiques [W/m.k]	Masses volumiques [kg/m ³]	Chaleur massique [kJ/kg.k]
Cendre sèche	0,29	900	0,75
Charbon de bois	0,041 - 0,065	185 - 215	
Coton	0,06	80	1,42
Cuir	0,174	1000	
Ecorce d'arbre	0,066	342	
Laine de bois (panneau)	0,09	400	
Laine de mouton	0,038 - 0,049	135 - 136	1,26
Laine de roche	0,052 - 0,074	120 - 220	0,8 - 0,84
Paille comprimée	0,12	140	
Papier	0,14		
Plume	0,037	80	
Roseau	0,05	75	
Sciure de bois	0,06 - 0,07	213	2,51
Soie naturelle	0,052	100	
Amiante de ciment	0,4	1800	0,96
Béton de pouzzolane naturel	0,25 - 0,6	1200 - 1700	
Géobéton	0,7 - 0,8	1800 - 2310	
Béton armé	1,5 - 2,04	2300 - 2400	1,09
Bitume	0,16	2050	
Contre plaqué	0,14	600	2,72
Enduit à la chaux ou au plâtre lissé	0,87	1600	0,94
Enduit au ciment	0,87	2200	1,05
Copeaux de bois	0,081	140	2,51
Béton	0,9 - 1,7	2200 - 2400	0,850 - 0,950
Pierre calcaire	1,05 - 2,2	1650 - 2580	0,920
Terre cuite	1,15	1800 - 2000	0,900
Mur brique pleine	0,85	1850	
Mur brique creuse	0,4	1200	0,880
Parpaing plein	1,1	2100	
Parpaing creux	0,67	1250	0,880
Enduit mortier	1,15	1800 - 2100	0,880
Enduit plâtre	0,45	1450	0,880
Bois naturel	0,12 - 0,044	300 - 750	0,900
Polystyrène expansé	0,038 - 0,044	9 - 35	1,200 - 1,880
Laine de verre	0,04	100 - 300	1,210
Carrelage	1,15	1800	0,700
Gravillons	1,5	1200	0,980
Pierre lourde	3,5	2800	0,920
Feuille de bitume	0,23	1000	0,800
Terre pressée	1,15	1800	0,900
Tôle	70	7800	0,800

Annexe 3: Quelques valeurs de réflexivité pour divers matériaux de construction et valeurs d'absorptivité, émissivité (Nielsen 1999)

Annexe 3.1 : Valeurs moyennes de réflexivité pour divers matériaux de construction, finis.

Matériau ou fini		Lumière réfléchie (%)	
Murs			
Brique de béton pâle			40
Brique de béton foncée			20
Brique vernissée blanche			75
Béton lisse			30
Béton brut			20
Enduit ou mortier			45
Tuile vernissée blanche			80
Peintures			
Blanc lustré ou badigeon à la chaux			85
Blanc cassé			65
Couleurs (et intensités) :	Pâle	Moyen	Foncé
Jaune	70	50	30
Brun	55	25	10
Bleu	60	20	10
Noir		5	
Revêtements extérieurs			
Sol sablonneux			15-40
Sable léger et sec			30-40
Sol cultivé humide et sombre			5-10
Herbe			20-30
Herbe sèche, paille			40
Végétation de couleur sombre			15
Végétation de couleur moyenne			20
Végétation de couleur pâle			25
Béton lisse			30
Béton texturé			20
Asphalte			5-20

Annexe 3.1 : Valeurs moyennes d'absorptivité et d'émissivité de diverses surfaces.

Surface	Condition	Absorptivité du rayonnement solaire	Émissivité de radiations de basse température, soit de 10°- 40°C env.
Feuille d'aluminium	neuve et brillante	5-10	5-10
	couverte d'un film de poussière	10-20	10-20
Plaque de toiture en aluminium	neuve	10-25	10-25
	oxydée	30-50	20-50
Peinture d'aluminium		40-50	40-55
Badigeon à la chaux		20-30	85-90
laque de toiture en tôle galvanisée	neuve	20-30	20-30
	patinée	30-50	20-40
	rouillée	60-85	70-90
Fibro-ciment	neuve	35-50	85-95
	noircie par des algues	60-85	85-95
Brique, tuile ou enduit de couleur crème		35	85-95
Pierre ou enduit jaune ou chamois		50-70	85-95
Brique, pierre ou tuile rouge		65-80	85-95
Tuile ou dalle de béton		45-65	85-95
Asphalte		80-95	85-95

Annexe 4: Tableaux sur les différents indices de confort thermique (Pigeon, 2009)

Annexe 4.1 : Une sélection d'indices empiriques de confort thermique

Indices	Références bibliographiques	Description
Wind Chill Temperature (WCT)	Siple et Passel (1945) ; Williamson (2003)	Influence du vent en conditions froides
Heat Stress Index (HSI)	Belding et Hatch (1955) ; Givoni (1969)	Influence du rayonnement et du vent en conditions chaudes
Wet Bulb Globe Temperature (WGBT)	Yaglou et Minard (1957)	Influence de l'humidité et éventuellement du rayonnement principalement pour un environnement de travail
Equatorial Comfort Index (EC)	Webb (1960) ; Santamouris et Asimakopoulos (1996)	Influence du vent et de l'humidité en conditions chaudes et humides
Humidex	Masterton et Richardson (1979)	Influence de la température de l'air et de l'humidité en conditions chaudes et humides

Annexe 4.2 : Sélection de modèle instationnaire du bilan d'énergie du corps humain

Modèle	Références bibliographiques	Description
Instationary Munich Energy-Balance Model (IMEM)	Höppe (2002)	● Modèle de régulation thermique du corps humain à 2 noeuds. ● Calcul des variables d'état (Température interne et peau) en fonction d'un trajet dans des conditions environnementales changeantes.
Fiala	Fiala et al. (1999), Fiala et al. (2001)	● Modèle de régulation thermique multi-noeuds du corps humain (tête, visage, cou, abdomen, mains, pieds etc...). ● Calcul des variables d'état en fonction d'un trajet dans des conditions environnementales changeantes.
Individual Thermal Comfort Model (ITCM)	Bruse (2005a, 2005b)	● Modèle de régulation thermique du corps humain à 2 noeuds basé sur Gagge et al. (1971), Parsons et al. (1999) et Havenith (2001). ● Simulation d'un échantillon représentatif de personnes se déplaçant dans l'environnement pour lesquels le bilan thermique est calculé (simulation multi-agents avec BOTworld, www.botworld.info).

Annexe 4.3 : Sélection de modèles du bilan énergétique du corps humain et des indices de confort associés

Modèle	Indices dérivés	Références bibliographiques	Description
Gagge	New Standard Effective Temperature (SET*)	Gagge et al. (1967), Gagge et al. (1986)	● Modèle de régulation thermique du corps humain à 2 noeuds. ● Température de l'air d'un environnement de référence pour lequel un individu aurait la même température et humidité de peau.
Givoni	Index of Thermal Stress (ITS)	Givoni (1969)	● Modèle à un seul noeud ● Prise en compte des vêtements pour tous les processus.
Fanger	Predictive Mean Vote (PMV)	Fanger (1970)	● Modèle à un seul noeud ● Initialement pour l'intérieur, donc ne prend pas en compte le rayonnement solaire ou le vent. ● Prise en compte des vêtements pour tous les processus. ● Calibration des coefficients avec des essais en chambres climatisées.
Klima Michel Model (KMM)	Perceived Temperature (PT) et New Perceived Temperature (PT*), PMV	Jendritzky et Nübler (1981)	● Adaptation du modèle de Fanger pour un environnement extérieur ● Application à partir de données météorologique de base (par exemple, nébulosité et turbidité pour le rayonnement)
Munich Energy-Balance Model for Individuals (MEMI)	Physiological Equivalent Temperature (PET), PMV	Höppe (1993) , Höppe (1999)	● Modèle de régulation thermique du corps humain à 2 noeuds. ● Calcul séparé pour les températures des parties habillées ou non du corps ● Calcul de la sudation ● Température de l'air d'un environnement de référence pour lequel un individu aurait la même température de peau et interne.

Annexe 5: Note d'enquête sur le confort thermique



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

Ouagadougou, le 17 mars 2010

NOTE D'ENQUETE

Je soussigné Professeur Yézouma COULIBALY, chef de l'UTER GEI, atteste que Monsieur Jacques Remy MINANE effectue son mémoire de fin d'étude au ZiE sur le thème « **Confort Thermique** ».

C'est la raison pour laquelle il fait une enquête auprès des usagers de locaux d'habitation ou de fonction.

Je vous saurais gré de bien vouloir lui permettre d'effectuer cette enquête dans vos locaux en répondant aux questions qu'il vous posera.

Espérant que vous nous viendrez en aide pour nous permettre de mener à bien cette enquête, je vous prie d'agréer Madame/Monsieur, l'expression de nos meilleurs sentiments.

Le chef de l'UTER GEI



Prof. Yézouma COULIBALY

Fondation ZiE - 01 BP 594 - Ouagadougou 01 - BURKINA FASO - IFU 00007748B
Tél. : (226) 50 49 28 00 - Fax: (226) 50 49 28 01 - Web: www.zie-edu.org E-mail: zie@zie-edu.org

Annexe 6: Fiche d'enquête sur le confort thermique dans une ambiance quelconque

Informations de base :

Date	Heure	Sexe	Age	Nationalité

Mettez une croix dans la case correspondante de votre choix (A remplir par les sujets)

Q 1. En ce moment, comment ressentez vous l'air ambiant de ce lieu ?

Très froid	Froid	Légèrement froid	Ni froid ni chaud	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Q2. En ce moment, comment ressentez vous l'air ambiant de ce lieu avec ce ventilateur $v = 1\text{m/s}$

Très froid	Froid	Légèrement froid	Ni froid ni chaud	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Q3. En ce moment, comment ressentez vous l'air ambiant de ce lieu avec ce ventilateur $v = 2\text{m/s}$

Très froid	Froid	Légèrement froid	Ni froid ni chaud	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

INFORMATIONS RELATIVES SUR LES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DU LIEU (A remplir par l'enquêteur)

Mesures des paramètres objectifs (température, humidité, vitesse)

Température (°C)	Humidité de l'air (%)	Vitesse de l'air (m/s)

Annexe 7: Sensation des individus en fonction des températures

T °C	Inconfort		Confort	Nombres	% des satisfaits	% des insatisfaits
	Froid	Chaud				
[21-23°C [	29	0	7	36	19,44	80,56
[23-25,5°C [	28	0	17	45	37,78	62,22
[25,5-28°C [	13	0	102	115	88,70	11,30
[28-30°C [	2	8	55	65	84,62	15,38
[30-32°C [	0	25	16	41	39,02	60,98
[32-34°C [	0	57	4	61	6,56	93,44
[34-36°C [	0	28	0	28	0,00	100,00
[36-38°C [	0	29	0	29	0,00	100,00
[38-40°C]	0	51	0	51	0,00	100,00

Annexe 8: Echelle de sensation thermique ASHRAE des 206 individus

ECHELLE DE SENSATION THERMIQUE ASHRAE EN T°C											
NOMBRES DES JUGEMENTS PERCEPTIFS ASHRAE PAR GROUPE											
V en m/s	Hr en %	T°C	-3	-2	-1	0	1	2	3	NOMBRES	%
0,5	36,5	25,5			3	2				5	2,43
0,5	33,2	26				2				2	0,97
0,3-0,6	34	28		1	1	2				4	1,94
0,3-0,5	38	29				2	4			6	2,91
0,1	31	30				8	15	5		28	13,59
0	21,5	31				3	4	2		9	4,37
0	42,5	32				2	11	8	1	22	10,68
0	20	33				4	21	15		40	19,42
0	20	34				1	2	5	5	13	6,31
0	24	35					1	6	3	10	4,85
0	25	36						1		1	0,49
0	22	37					4	3	10	17	8,25
0,1	20,5	38						6	18	24	11,65
0,1	22,5	40						10	15	25	12,14

Annexe 8.1: Echelle de sensation thermique ASHRAE sans ventilateur

ECHELLE DE SENSATION THERMIQUE ASHRAE EN T°C											
NOMBRES DES JUGEMENTS PERCEPTIFS ASHRAE PAR GROUPE											
V en m/s	Hr en %	T°C	-3	-2	-1	0	1	2	3	NOMBRES	%
0,5	36,5	25,5		2	2	1				5	2,43
0,5	33,2	26				2				2	0,97
0,3-0,6	34	28	1		2	1				4	1,94
0,3-0,5	38	29			1	5				6	2,91
0,1	31	30				24	3	1		28	13,59
0	21,5	31				8	1			9	4,37
0	42,5	32			1	14	7			22	10,68
0	20	33			6	14	14	6		40	19,42
0	20	34			1	8	3	1		13	6,31
0	24	35				1	4	3	2	10	4,85
0	25	36						1		1	0,49
0	22	37				6	7	4		17	8,25
0,1	20,5	38					6	12	6	24	11,65
0,1	22,5	40					2	10	13	25	12,14

Annexe 8.2 : Echelle de sensation thermique ASHRAE avec ventilateur v=1 m/s

ECHELLE DE SENSATION THERMIQUE ASHRAE EN T°C											
NOMBRES DES JUGEMENTS PERCEPTIFS ASHRAE PAR GROUPE											
V en m/s	Hr en %	T°C	-3	-2	-1	0	1	2	3	NOMBRES	%
0,5	36,5	25,5		4	1	0				5	2,43
0,5	33,2	26				2				2	0,97
0,3-0,6	34	28	1	1	2	0				4	1,94
0,3-0,5	38	29		1	4	1	0			6	2,91
0,1	31	30			3	24	1		0	28	13,59
0	21,5	31			2	7	0	0		9	4,37
0	42,5	32		1	4	16	1	0	0	22	10,68
0	20	33			5	26	9	0		40	19,42
0	20	34			3	9	1	0	0	13	6,31
0	24	35				3	5	2		10	4,85
0	25	36					1			1	0,49
0	22	37				5	12			17	8,25
0,1	20,5	38				4	12	8		24	11,65
0,1	22,5	40					10	9	6	25	12,14

Annexe 8.3 : Echelle de sensation thermique ASHRAE avec ventilateur v=2 m/s

Annexe 9: Fiche de mesure sur le puits canadien du 2iE Kamboinsé

DATE	
------	--

MESURES DE TEMPERATURES DU Puits CANADIEN SUR TOUTE LA LONGUEUR

	7 H	8 H	9 H	10 H	11 H	12 H	13 H	14 H	15 H	16 H	17 H	MOY.
T ent.												
T (5m)												
T (10m)												
T (15m)												
T (20m)												
T sort.												

DATE	
------	--

MESURES DE TEMPERATURES DU Puits CANADIEN EN PROFONDEUR

	7 H	8 H	9 H	10 H	11 H	12 H	13 H	14 H	15 H	16 H	17 H	MOY.
T (0,5m)												
T (1 m)												
T (1,5m)												

Annexe 10: Mesures des paramètres physiques du climat et ceux de la salle expérimentale

Informations sur le local :

Longueur : Épaisseur des murs :
Largeur : Type de murs :
Hauteur : Type de toiture :

DATE	
------	--

DONNEES CLIMATIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT DU LOCAL

	7 H	8 H	9 H	10 H	11 H	12 H	13 H	14 H	15 H	16 H	17 H	MOY.
T (°C)												
H (%)												
V (m/s)												

DATE	
------	--

DONNEES CLIMATIQUES DANS LE LOCAL A CLIMATISER

	7 H	8 H	9 H	10 H	11 H	12 H	13 H	14 H	15 H	16 H	17 H	MOY.
T (°C)												
H (%)												
V (m/s)												

Annexe 11: Récapitulatif des mesures de températures et d'humidité relative sue les "evaporative-cooling"

DATES	LIEUX	MESURES		
30/03/2010 à 11 H 00	Laboratoire Biomasse	T aspiration = 37°C	$\Delta T=13,5^{\circ}\text{C}$	Hr à l'entrée= 18%
		T soufflage = 23,5 °C		Hr à la sortie= 45%
30/03/2010 à 14 H 30	Laboratoire Biomasse	T aspiration = 39°C	$\Delta T=17^{\circ}\text{C}$	Hr à l'entrée=20%
		T soufflage = 22 °C		Hr à la sortie= 50%
29/03/2010 à 15 H 30	Laboratoire Electrotechnique	T aspiration = 35°C	$\Delta T=13^{\circ}\text{C}$	Hr à l'entrée= 23,5%
		T soufflage = 22 °C		Hr à la sortie= 55%
30/03/2010 à 10 H 00	Laboratoire Electrotechnique	T aspiration = 33°C	$\Delta T=13^{\circ}\text{C}$	Hr à l'entrée= 19,5%
		T soufflage = 20 °C		Hr à la sortie= 64%
30/03/2010 à 12 H 00	RESTAURANT	T aspiration = 34°C	$\Delta T=12^{\circ}\text{C}$	Hr à l'entrée= 14%
		T soufflage = 22 °C		Hr à la sortie= 45%
30/03/2010 à 16 H 00	RESTAURANT	T aspiration = 38°C	$\Delta T=16^{\circ}\text{C}$	Hr à l'entrée= 24%
		T soufflage = 22 °C		Hr à la sortie= 40%
01/04/2010 à 09 H 00	RESTAURANT	T aspiration = 33,5°C	$\Delta T=13^{\circ}\text{C}$	Hr à l'entrée= 21%
		T soufflage = 20,5 °C		Hr à la sortie= 60%
06/04/2010 à 10 H 00	RESTAURANT	T aspiration = 35°C	$\Delta T=14^{\circ}\text{C}$	Hr à l'entrée= 23,5%
		T soufflage = 21 °C		Hr à la sortie= 52,5%