

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
TABLE DES MATIERES.....	II
NOMENCLATURE.....	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES ACRONYMES	IX
INTRODUCTION.....	1
I. PROBLEMATIQUE, HYPOTHESES ET OBJECTIFS.....	2
A. Problématique	2
B. Hypothèses	4
C. Objectifs.....	5
II. MATERIELS ET METHODES	6
A. Dispositif du milieu d'études.....	6
1. Données géographiques	6
a) Localisation du site	6
b) Détails du site.....	6
(1) Altitude au dessus du niveau de la mer	6
(2) Orientation du site.....	6
2. Classification du climat	6
B. Données métrologiques de base	7
1. Paramètres météorologiques influents sur le confort thermique.....	7

a) Température de l'air.....	7
b) Humidité relative de l'air.....	7
c) Ensoleillement	8
d) Précipitation	8
e) Le vent.....	8
2. Climat type.....	8
a) Température sèche et température du point de rosé	9
b) Rayonnements solaires direct et diffus.....	10
c) Vitesse du vent	10
d) Direction du vent, altitude solaire et azimuth solaire	11
C. Outils.....	11
1. Design builder	11
2. Energy plus.....	12
D. Méthodes	12
1. Modélisation qualitative :	12
a) Diagrammes bioclimatiques	12
b) Méthode de S. SZOKOLAY	12
(1) Zone de confort	14
(2) Zone de contrôle potentiel pour les périodes froides	15
(3) Zones de contrôle potentiel pour les périodes chaudes :	15
2. Modélisation du bâtiment	17
a) Plan du bâtiment	17
b) Activités.....	17
(1) Type de zone.....	17
(2) Occupation.....	18
(3) Métabolisme.....	18
(4) Contrôle d'ambiance	19
c) Construction	19
(1) Murs.....	19
(2) Toits / planchers/ dalles/plafonds.....	20
(3) Portes.....	21
d) Ouverture.....	21
(1) Cadre fenêtres	22
(2) Vitrage	22
3. Prospection des solutions : Analyse des phénomènes ayant impact sur le confort thermique	23
a) Les phénomènes psychologiques	23

(1) La sensation thermique	23
(2) Le confort thermique.....	23
b) Les phénomènes physiologiques	23
(1) Thermo-détecteurs.....	24
(2) Thermorégulateurs.....	24
c) Les phénomènes physiques.....	24
(1) L'effet de la tenue vestimentaire	25
(2) Les phénomènes ayant impact sur le bilan thermique.....	25
(3) L'inertie thermique	30
4. Synthèse de la démarche méthodologique	32
5. Cadre opératoire.....	33
 III. RESULTATS ET DISCUSSIONS	34
 A. Diagramme bioclimatique de la région d'Antananarivo	34
 B. Comportement thermique du bâtiment de base	36
 C. Solutions passives	38
1. Isolation thermique des enveloppes	38
2. La couleur	38
3. Vitrages	38
4. Récapitulatif des solutions proposées	39
 D. Influence des solutions passives	39
1. Solutions passives adoptées : Isolations.....	40
a) Murs	40
b) Toits / planchers/ dalles/plafonds.....	41
2. Influence de l'isolation.....	42
3. Différence entre les nombres heures de confort.....	44
 E. Apport thermique et étude économique.....	44
1. Apport thermique de chaque composant	44
2. Coût des investissements	45
3. Le temps de retour de l'investissement	45
 F. Perspectives	46
1. Application d'une démarche systémique	46
2. Validation expérimentale du modèle numérique.....	46

CONCLUSION.....	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49
REFERENCE WEBOGRAPHIQUE :	50
ANNEXES	51
Annexe 1 : Données météorologiques (2009)	51
Annexe 2 : Ambiance dans les 2 zones étudiées (bâtiment de base)	55
Annexe 3 : Ambiance dans les 2 zones étudiées (bâtiment modifié)	58
Annexe 4: Apports thermiques.....	61
RESUME	62
ABSTRACT	62

NOMENCLATURE

a :	Impôts sur les bénéfices	[Ar]
A :	Annuité	[Ar]
A_{hn} :	Humidité absolue du point de neutralité	[g/kg]
B :	Revenu annuel	[Ar]
B_M :	Métabolisme de base	[W/m ²]
C :	Flux de chaleur convectif	[W]
C_{peau} :	Flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau	[W/m ²]
C_{res} :	Flux de chaleur échangée par convection respiratoire	[W/m ²]
c :	Chaleur massique	[kJ/kg°C]
dT_m :	Variation maximale de la température	[°C]
e :	Humidité relative	[%]
E_{res} :	Flux de chaleur échangée par évaporation respiratoire	[W/m ²]
E_{sk} :	Flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau	[W/m ²]
f_{eff} :	Coefficient effectif de surface rayonnante	
H_v :	Moyenne journalière totale d'irradiations solaires	[Wh/m ²]
h_c :	Coefficient d'échange convectif	[W°C/m ²]
h_r :	Coefficient d'échange linéaire	[W°C/m ²]
h :	Coefficient d'échange de chaleur	[W/m ² K]
I :	Investissement	[Ar]
K :	Flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau	[W/m ²]
M :	Taux de métabolisme	[W/m ²]

M_p :	Composantes posturales du métabolisme	$[W/m^2]$
M_W :	Composantes d'activité du métabolisme	$[W/m^2]$
M_M :	Composante de déplacement du métabolisme	$[W/m^2]$
P_a :	Pression de vapeur dans l'air	$[kPa]$
P_{exp} :	Pression de vapeur dans l'air expiré	$[kPa]$
p_{sat} :	Pression de saturation	$[hPa]$
Q_{res} :	Flux de chaleur échangée par voie respiratoire	$[W/m^2]$
Q_{sk} :	Flux de chaleur échangée à la surface cutanée	$[W/m^2]$
R :	Flux de chaleur radiatif	$[W]$
R_{peau} :	Flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau	$[W/m^2]$
S :	Taux de chaleur stockée par l'organisme	$[W/m^2]$
S_{sk} :	Taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps	$[W/m^2]$
S_{cr} :	Taux de chaleur stockée dans la peau	$[W/m^2]$
T_n :	Température du point neutre	$[°C]$
T_m :	Température moyenne mensuelle	$[°C]$
T_{cl} :	Température de la surface externe du vêtement	$[°C]$
T_a :	Température d'air	$[°C]$
W :	Travail externe	$[W/m^2]$
x_{sat} :	Humidité absolue de l'air saturé.	$[g/kg]$

LETTRES GRECQUES

ε :	Emissivité moyenne du corps	
σ :	Constante de Stefan Boltzmann	$5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 K^4]$
λ :	Conductivité	$[W/m^\circ C]$
ρ :	Masse volumique	$[kg/m^3]$

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Température sèche et température du point de rosé (source: Energy Plus Weather Data)...	9
Figure 2. Rayonnements solaires direct et diffus (Source: Energy Plus Weather Data)	10
Figure 3. Vitesse du vent (Source: Energy Plus Weather Data).....	10
Figure 4. Direction du vent, altitude solaire et azimuth solaire (Source : Energy Plus Weather Data) ..	11
Figure 5. Diagramme psychrométrique (Adapté par l'auteur).....	13
Figure 6. Plan du bâtiment	17
Figure 7. Synthèse de la démarche méthodologique.....	32
Figure 8. Diagramme bioclimatique de la ville d'Antananarivo (de Szockolay réadapté par l'auteur) .	34
Figure 9. Comportement thermique du bâtiment de base (zone: Labo info).....	36
Figure 10. Comportement thermique du bâtiment de base (zone: Salle d'énergétique).....	37
Figure 11. Comportement thermique du bâtiment modifié (zone: Labo info).....	42
Figure 12. Comportement thermique du bâtiment modifié (zone: Salle d'énergétique).....	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Occupation du bâtiment par zones	18
Tableau 2. Coefficient métabolique par zones.....	19
Tableau 3. Propriétés générales et de surface des murs (bâtiment de base).....	20
Tableau 4. Propriétés générales et de surface du toit plancher et plafond (Bâtiment de base)	21
Tableau 5. Propriétés générales et de surface des portes	21

Tableau 6. Propriétés générales et de surface des cadres des fenêtres.....	22
Tableau 7. Cadre opératoire.....	33
Tableau 8. Récapitulatifs des solutions proposées	39
Tableau 9. Propriétés générales et de surface des murs isolés	40
Tableau 10. Propriétés générales et de surface du toit, plancher, dalle, plafond (isolé)	41
Tableau 11. Comparaison des nombres et pourcentages d'heures de confort	44
Tableau 12. Apports thermiques de chaque composant	44
Tableau 13. Coût d'investissement de l'isolation.....	45

LISTE DES ACRONYMES

AFME : Agence Française pour la Maîtrise d'Energie

ASECNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation en Afrique et Madagascar

ASHRAE : American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers

ISO : International Standards Organization

TRI : Temps de Retour d'Investissement

Introduction

La préoccupation mondiale concernant l'économie d'énergie d'une part, et les soucis des industriels relatifs à la productivité des personnels qui sont liée à la sensation de confort d'autre part, incitent les chercheurs à trouver des solutions naturelles pour améliorer le comportement thermique d'un habitat.

A Madagascar, le coût excessif des nouvelles installations reste une barrière à la création des microclimats artificiels nécessaires au maintien d'une ambiance confortable à l'intérieur du bâtiment. En effet, la consommation énergétique la plus importante dans le secteur du bâtiment est imputable au chauffage et au chauffe-eau.(RAKOTOMALALA, et al., 2007)

Ainsi, la prise en compte des solutions naturelles afin d'établir une ambiance confortable dans des locaux constituent des enjeux économiques, environnementaux et sociaux importants. A cet effet, cette étude, intitulée « **EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE GENERE PAR DES SOLUTIONS PASSIVES : CAS D'UN BÂTIMENT UNIVERSITAIRE** », contribuera à la valorisation des solutions naturelles adéquates au maintien du confort thermique dans un bâtiment.

Lorsqu'il s'agit d'évaluer le confort thermique d'un bâtiment, il est indispensable de faire des essais. Généralement, Il existe deux façon de réaliser les essais : sur site ou en laboratoire. Mais comme les essais sur site, les essais en laboratoire posent de problèmes pratiques : reproductibilité, durée et coûts des essais,...

La simulation numérique largement utilisée dans d'autres domaines des sciences physiques en générale et de transfert thermique, aéraulique et hydrique en particulier offre une alternative intéressante aux essais, ou tout au moins un moyen complémentaire d'investigation, intéressant par sa souplesse et sa rapidité.

La simulation numérique nécessite l'utilisation d'un code de calcul. **DesignBuilder** est un environnement de conception de bâtiment ; il utilise le moteur de simulation dynamique **EnergyPlus** pour simuler la température, l'ambiance, la lumière, la ventilation et différentes machines thermiques CVC (climatisation, ventilation, chauffage) dans le bâtiment.

I. Problématique, hypothèses et objectifs

A. Problématique

Le confort thermique a un aspect psychologique, physiologique et physique. Il est en effet le trait d'union entre le monde physique et l'individu, parce que ses lois traduisent les sensations du biologique (le corps) par rapport au non biologique (l'ambiance thermique). (DEPEKECKER, 1985)

En se basant sur l'analyse physique et physiologique du système homme-environnement, on peut apprécier analytiquement le confort thermique via le bilan thermique d'un individu. Il s'évalue par la somme algébrique des différents flux de chaleur métabolique produits et échangés avec son environnement. Il s'écrit de la façon suivante (ASHRAE, 1997) :

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S \quad (1)$$

Où

$$Q_{sk} = C + R + K + E_{sk} \quad (2)$$

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} \quad (3)$$

$$S = S_{sk} + S_{cr} \quad (4)$$

Avec

M : Taux de métabolisme [W/m^2]

W : Travail externe [W/m^2]

Q_{sk} : Flux de chaleur échangée à la surface cutanée [W/m^2]

C_{peau} : Flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau [W/m^2]

R_{peau} : Flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau [W/m^2]

K : Flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau [W/m^2]

E_{sk} : Flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau [W/m^2]

Q_{res} : Flux de chaleur échangée par voie respiratoire [W/m^2]

C_{res} : Flux de chaleur échangée par convection respiratoire [W/m^2]

E_{res} : Flux de chaleur échangée par évaporation respiratoire [W/m^2]

S : Taux de chaleur stockée par l'organisme [W/m^2]

S_{sk} : Taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps [W/m^2]

S_{cr} : Taux de chaleur stockée dans la peau [W/m^2]

A partir de ces relations, on constate que Q_{sk} , Q_{res} et S dépendent des facteurs de l'environnement extérieur. GIVONI a retenu six principaux paramètres de confort (GIVONI, 1978) : la température de l'air, la température radiante moyenne, la vitesse de l'air, l'humidité, le métabolisme et la tenue vestimentaire.

Pour déterminer les grandeurs physiologiques de l'individu (température cutanée, température interne et mouillure cutanée), des modèles physiologiques du système de thermorégulation ont été développés. Des modèles physiques sont aussi utilisés pour calculer les échanges de chaleur entre l'occupant et son environnement (conduction, convection, rayonnement et évaporation). Cependant, le traitement mathématique de ces différents modèles nécessite l'utilisation d'hypothèses simplificatrices : ambiance stationnaire et homogène,... Aussi ne permettent-ils simplement que de dégager les grandes lignes du comportement thermique du bâtiment.

Plusieurs recherches ont été développées pour avoir des outils d'évaluation du confort thermique. Ces outils ont défini les limites du confort thermique sous forme d'indices (indices environnementaux simples : la température opérative, la température équivalente et la température effective) ou diagrammes bioclimatiques. La construction de ces diagrammes consistent à énumérer différentes zones (Zone de confort, zone de contrôle potentiel pour les périodes froides et zone de contrôle potentiel pour les périodes chaudes) sur le diagramme psychrométrique (température de l'air ambiant, humidité relative de l'air).

La recherche du confort dans un bâtiment fait l'objet de plusieurs études pendant les cinq dernières décennies. Afin de créer et de maintenir des conditions d'ambiance intérieure confortable, les industriels ont mis au point des appareils électromécaniques et électroniques telles que les machines thermiques, climatiseurs... . Ce modèle d'architecture qui confie à la seule technique le soin de créer dans les bâtiments un microclimat artificiel par les installations de chauffage et climatisation ne tient pas compte des particularités du climat, du site, des bâtiments,... et entraîne ainsi des fortes consommations d'énergie, d'origine fossile essentiellement, épuisable et polluante (LAVIGNE, et al., 1994).

Vue la préoccupation mondiale vis-à-vis des problèmes liées à l'économie d'énergie et à l'environnement, des nouveaux concepts ont apparu. Ces nouvelles idées consistent à favoriser des

solutions dites passives ou bioclimatiques afin de générer et à maîtriser des conditions de confort estival et hivernal.

La recherche de solutions passives a été l'objet des différents travaux expérimentaux et analytiques en se focalisant à l'inertie thermique en hiver. SILDER a affirmé, dans son rapport « L'inertie thermique en climat méditerranéen : Confort et consommations d'énergie » en 2003, que les solutions passives issues de l'inertie thermique contribuent à la diminution de la consommation de l'énergie et au maintien du confort thermique dans le bâtiment (SILDER, 2003).

A Madagascar, plusieurs travaux de recherches relatifs au confort thermique dans une habitation ont été développés. Ces travaux ont pour but de présenter des solutions naturelles pour des projets de construction ou d'amélioration d'un bâtiment. ANDRIANIAINA a effectué des recherches de solutions passives en étudiant le comportement thermique d'une habitation type Tsipoy du trano gasy vaovao dans la région d'Antananarivo (ANDRIANIAINA, 2007). Elle a procédé suivant une démarche systémique. Concernant la prospection des solutions, elle a fait une approche par composants.

Quant à la présente étude, elle essaie de mettre en évidence l'apport des solutions passives à l'obtention du confort thermique hivernal dans une salle de classe et un laboratoire informatique d'un bâtiment universitaire. L'évaluation du confort est effectuée en projetant les couples (température de l'air ambiant, humidité) sur le diagramme bioclimatique de la région d'Antananarivo. Le choix de ce bâtiment est dû à la sensation d'inconfort constatée dans les deux zones pendant la saison froide.

Suite à ces diverses études sur le confort thermique et les solutions passives et suite aux soucis de confort enregistrés dans les bâtiments universitaires, la présente étude tente de répondre à la question suivante : **Comment les solutions passives contribuent-elle à l'obtention du confort thermique dans un bâtiment ?**

B. Hypothèses

Dans un premier temps, le confort se caractérise par la sensation que ressent une personne par rapport à la température et à l'humidité ambiante du local où elle se trouve (GAUZIN-MULLER, 2002). En effet, Les ambiances thermiques des locaux ont sur l'homme des effets physiologiques et des impacts différents plus ou moins gênants selon les températures ; et l'humidité faible ou élevée rend l'atmosphère inconfortable. Ainsi, **la première hypothèse stipule que le confort résulte essentiellement de la température et de l'humidité de l'air ambiant.**

Dans un deuxième temps, étant donné que les solutions passives visent principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière naturelle c'est à dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables, les effets pervers sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et de fonctionnement (LAVIGNE, et al., 1998). Effectivement : ces solutions bioclimatiques sont basées sur le choix des matériaux, de positionnement des ouvertures,... . La deuxième hypothèse avance que **les solutions passives sont des sources d'économie d'énergie en améliorant le confort dans un bâtiment.**

C. Objectifs

Grâce aux outils numériques de simulation des phénomènes qui se passent dans un bâtiment, cette étude vise à valoriser économiquement et énergétiquement les solutions passives nécessaires au maintien du confort thermique. Les objectifs porteront sur l'évaluation du confort thermique dans deux locaux à partir d'un diagramme bioclimatique du site étudié.

II. Matériels et méthodes

A. Dispositif du milieu d'études

1. Données géographiques

a) Localisation du site

La latitude et la longitude définissent la localisation du site. Par convention, la latitude nord et la longitude Est sont représentées par des chiffres positifs, la latitude sud et la longitude ouest par des chiffres négatifs.

Le système de projection utilisé est le WGS84. Les minutes (mn) doivent être converties en fraction décimale de 60.

Ainsi, le site étudié a pour coordonnées (google earth, 2012):

Latitude (°) = -18,80

Longitude (°) = 47,48

b) Détails du site

(1) Altitude au dessus du niveau de la mer

Elle est passée directement à EnergyPlus pour ses calculs de pression relative. L'altitude est aussi utilisée dans DesignBuilder pour calculer les débits volumiques des charges en refroidissement.

L'altitude au dessus du niveau de la mer du site est 1336 [m] (google earth, 2012).

(2) Orientation du site

Au niveau thermique, l'orientation du site se traduit par l'ensoleillement disponible, la pression du vent et l'humidité de l'air ; tout cela gère simultanément le rôle que joue la façade.(LAVIGNE, et al., 1998)

Le site est orienté de 311,1 ° (google earth, 2012) par rapport au nord.

2. Classification du climat

Un climat peut être identifié selon 2 classifications :

- classification Köppen
- ASHRAE (Standards 90.1-2004 and 90.2-2004) Climate Zone

Selon la classification Köppen, le climat dans la région d'Antananarivo est un climat méditerranéen : chaud et humide en été, doux en hiver.

D'après la classification ASHRAE, le climat dans la région d'Antananarivo est classé comme un climat subtropical humide (été chaude).

Une année est divisée en deux saisons bien distinctes :

- Eté : Octobre -Avril
- Hiver : Mai – Septembre

Remarque :

La classification Köppen montrée ici est dérivée de l'algorithme de source weather data ; non indicative pour une durée plus longue.

La classification ASHRAE montrée ici est dérivée de l'algorithme de source weather data ; indicative pour une durée plus longue.

B. Données métrologiques de base

1. Paramètres météorologiques influents sur le confort thermique

a) Température de l'air

La température de l'air est définie par une grandeur physique indiquant le taux d'échauffement et de refroidissement de la surface de la terre (Centre de recherche en architecture et en urbanisme (CRAU) en collaboration avec l'université des nations unies (UNU), 1988). Elle dépend des apports solaires en grande partie, de la pression atmosphérique, de la teneur en eau, et des échanges avec les corps environnants.

La température de l'air est l'un des facteurs les plus influents sur le confort humain. En effet, la température de l'air contrôle directement les échanges par convection qui est l'un des termes principaux du bilan thermique.

b) Humidité relative de l'air

Elle peut se manifester par la pression de vapeur d'eau. L'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments influence le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort, et la sensation de chaleur et de sécheresse des muqueuses des voies respiratoires.

L'humidité a relativement peu d'impact sur la sensation de confort d'un individu dans un bâtiment. Ainsi, un individu peut difficilement ressentir s'il fait 40 % ou 60 % d'humidité relative dans son bureau.

L'inconfort n'apparaît que dans des situations extrêmes :

- soit une humidité relative inférieure à 30 %,
- soit une humidité relative supérieure à 70 %

c) Ensoleillement

L'ensoleillement est l'un des paramètres influant sur le confort thermique. En effet, les radiations solaires sont la source la plus importante de l'échauffement de l'air et des surfaces.

L'ensoleillement est défini quantitativement par les énergies solaires (rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus) et par les coordonnées solaires (altitude solaire et azimut solaire).

d) Précipitation

Le climat d'une région géographique bien définie est caractérisé par la fréquence et la nature des précipitations. Ces précipitations dépendent du mouvement des vents et des masses d'air humide. Leurs classifications sont selon leur intensité et leur durée.

Les précipitations contribuent significativement à l'humidité qui va généralement de pair avec une diminution de sollicitations thermiques.

e) Le vent

Ayant un impact substantiel sur le microclimat et sur la demande énergétique des bâtiments, le vent est un paramètre important à prendre en considération dans la recherche du confort thermique, dans le bâtiment et son environnement. Il est défini comme un mouvement atmosphérique directionnel.

Il est caractérisé par deux paramètres : la direction et la vitesse moyenne qui sont des facteurs importants dans les échanges par convection et par évaporation.

2. Climat type

Pour établir des simulations thermiques du bâtiment, on a en disposition les données météorologiques de l'année 2009. Ces données sont issues de la station météorologique WMO Station 670830 de l'ASECNA Ivato.

Les coordonnées géographiques de la station WMO Station 670830 sont :

- Altitude (au dessus de la mer) : 1276[m]
- Latitude : S 18° 47'
- Longitude : E 47° 28'

D'après les données issues de cette station météorologique, les périodes typiques et extrêmes dans le site sont :

- La semaine typique de la période chaude (proche de la température moyenne estivale) est 12 Fév. – 18 Fév. dont la température moyenne est de 20,81[°C]
- La semaine typique de la période froide (proche de la température moyenne hivernale) est 8Jul – 14Jul dont température moyenne 15,20[°C].
- La période extrêmement chaude a eu lieu le 19 Mars jusqu'au 25 Mars. La température maximale est de 29,50[°C].
- La période extrêmement froide a eu lieu le 29 Jul. jusqu'au 4 Août . La température minimale est de 5,80[°C].

Comme le problème d'inconfort est constaté essentiellement pendant la période froide I.A), les données météorologiques horaires utilisées lors des simulations sont les données de la semaine extrême de la saison froide.

a) Température sèche et température du point de rosé

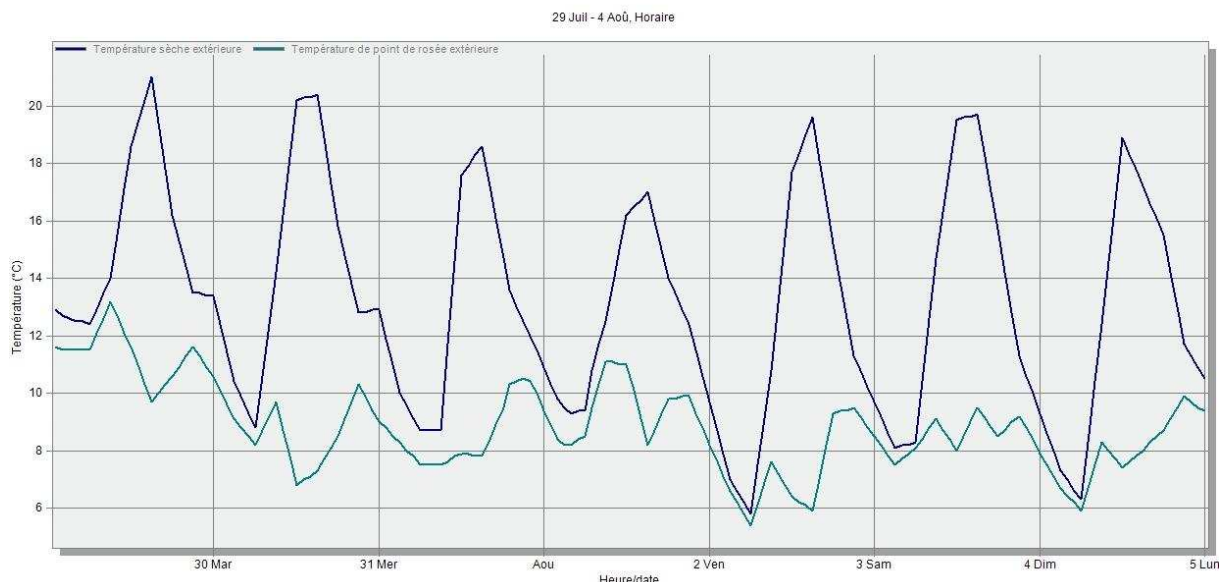


Figure 1. Température sèche et température du point de rosé (source: Energy Plus Weather Data)

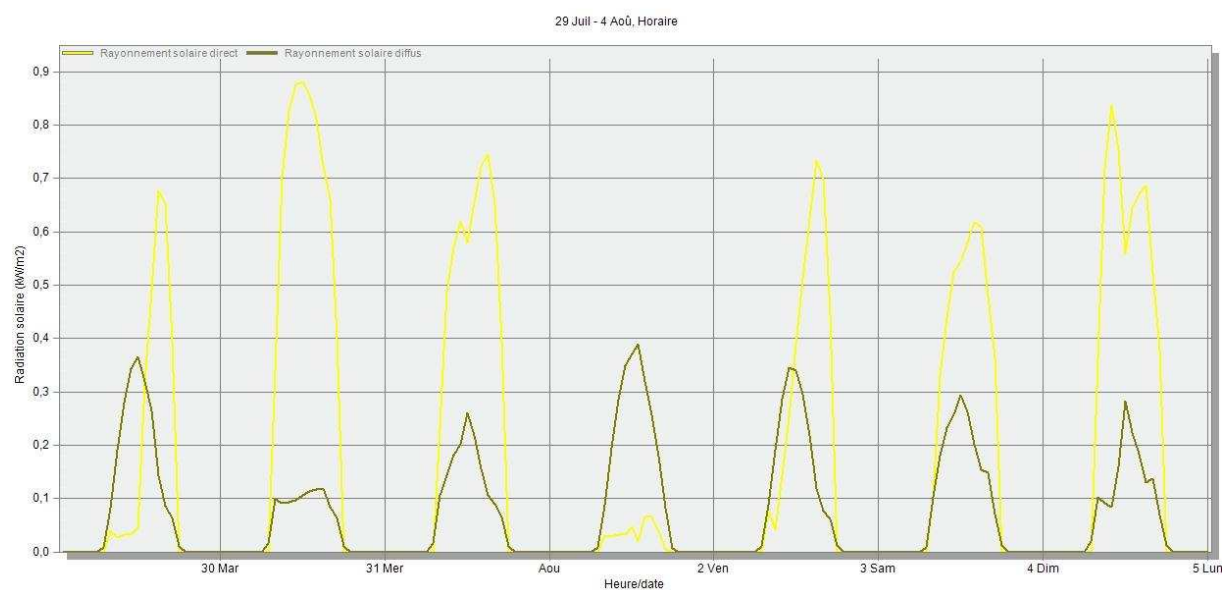
b) Rayonnements solaires direct et diffus

Figure 2. Rayonnements solaires direct et diffus (Source: Energy Plus Weather Data)

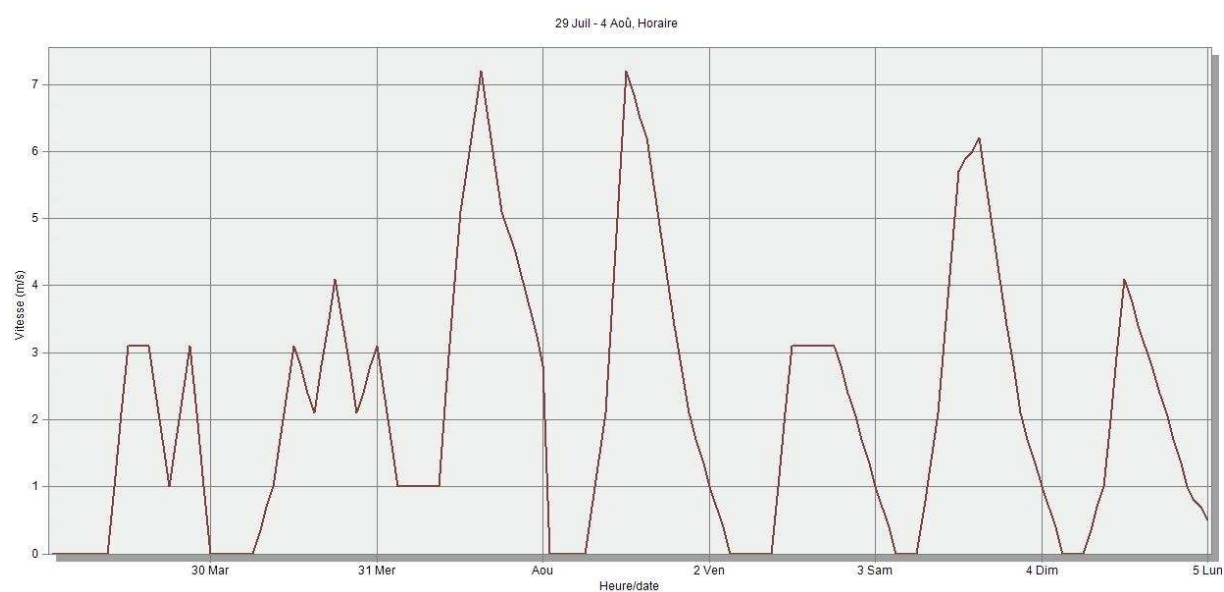
c) Vitesse du vent

Figure 3. Vitesse du vent (Source: Energy Plus Weather Data)

d) Direction du vent, altitude solaire et azimuth solaire

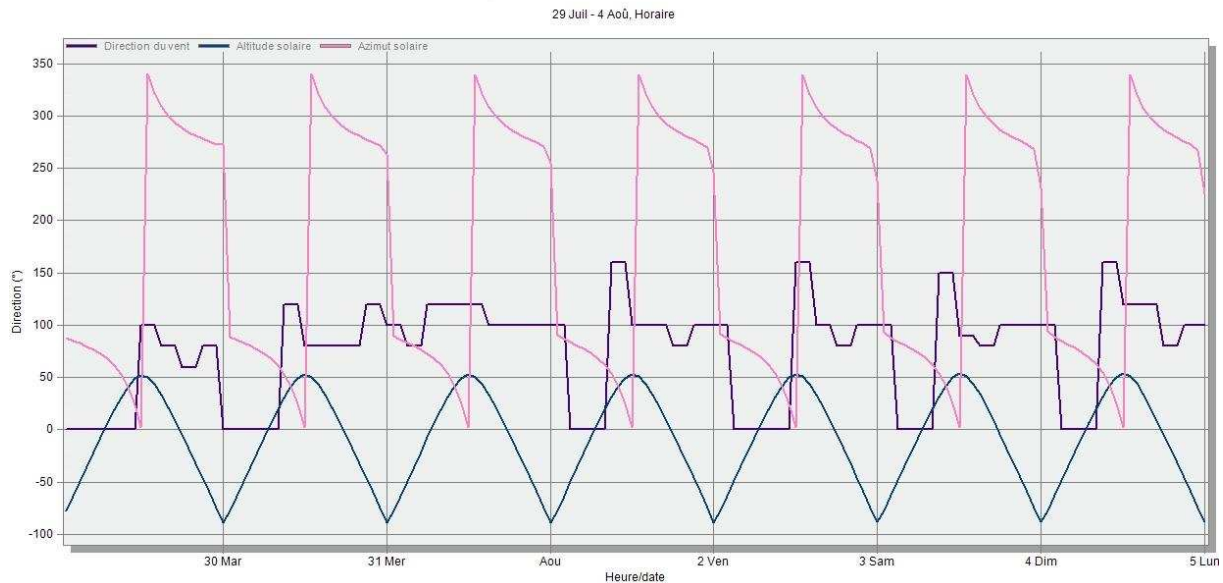


Figure 4. Direction du vent, altitude solaire et azimuth solaire (Source : Energy Plus Weather Data)

C. Outils

1. Design builder

Design Builder est un logiciel convivial de modélisation thermique avec lequel on peut travailler (et découvrir aisément) la modélisation des bâtiments. Il comporte toute une série de paramètres de performance environnementale comme : consommation annuelle d'énergie, températures maximales d'été et dimensionnement des composants CVC (chauffage, ventilation, climatisation).

Ces utilisations courantes sont:

- Calcul de la consommation énergétique d'un bâtiment.
- Choix des options de façades en fonction de leur échauffement et de leur aspect visuel.
- Simulation thermique des bâtiments ventilés naturellement.
- En lumière du jour, DesignBuilder modélise les systèmes de contrôle d'éclairage et calcule les économies électriques.
- Visualisation des plans d'implantation du site et des ombres portées par le soleil dans la journée.
- Calcul du dimensionnement des équipements de chauffage, de conditionnement d'air et de refroidissement.
- Support de communication lors des réunions de conception du bâtiment.

2. Energy plus

DesignBuilder utilise le moteur de simulation dynamique EnergyPlus pour simuler la performance thermique du bâtiment.

D. Méthodes

1. Modélisation qualitative :

a) Diagrammes bioclimatiques

En 1973, OLGAY a établi une zone de confort en étudiant la relation entre la vitesse de l'air, l'humidité et le refroidissement par évaporation. Ce diagramme bioclimatique est recommandé pour assurer le confort extérieur dans un climat chaud et humide.

GIVONI en 1978 a proposé un diagramme psychrométrique où il a exprimé les techniques et les dispositifs architecturaux à utiliser pour établir le confort intérieur (GIVONI, 1978).

En 1980, SZOKOLAY et al ont proposé une autre méthode pour établir la zone de confort et des zones de contrôle potentielle dans un diagramme psychrométrique. En effet, ils ont soulevé des problèmes liés à l'incohérence entre les résultats du confort thermique calculés et le confort réel perçu par les sujets (SZOKOLAY, et al., 1980).

b) Méthode de S. SZOKOLAY

En s'appuyant sur la première hypothèse, « le confort résulte essentiellement de la température et de l'humidité de l'air ambiant », la méthode de SZOKOLAY permet d'énumérer différentes zones sur le diagramme psychrométrique.

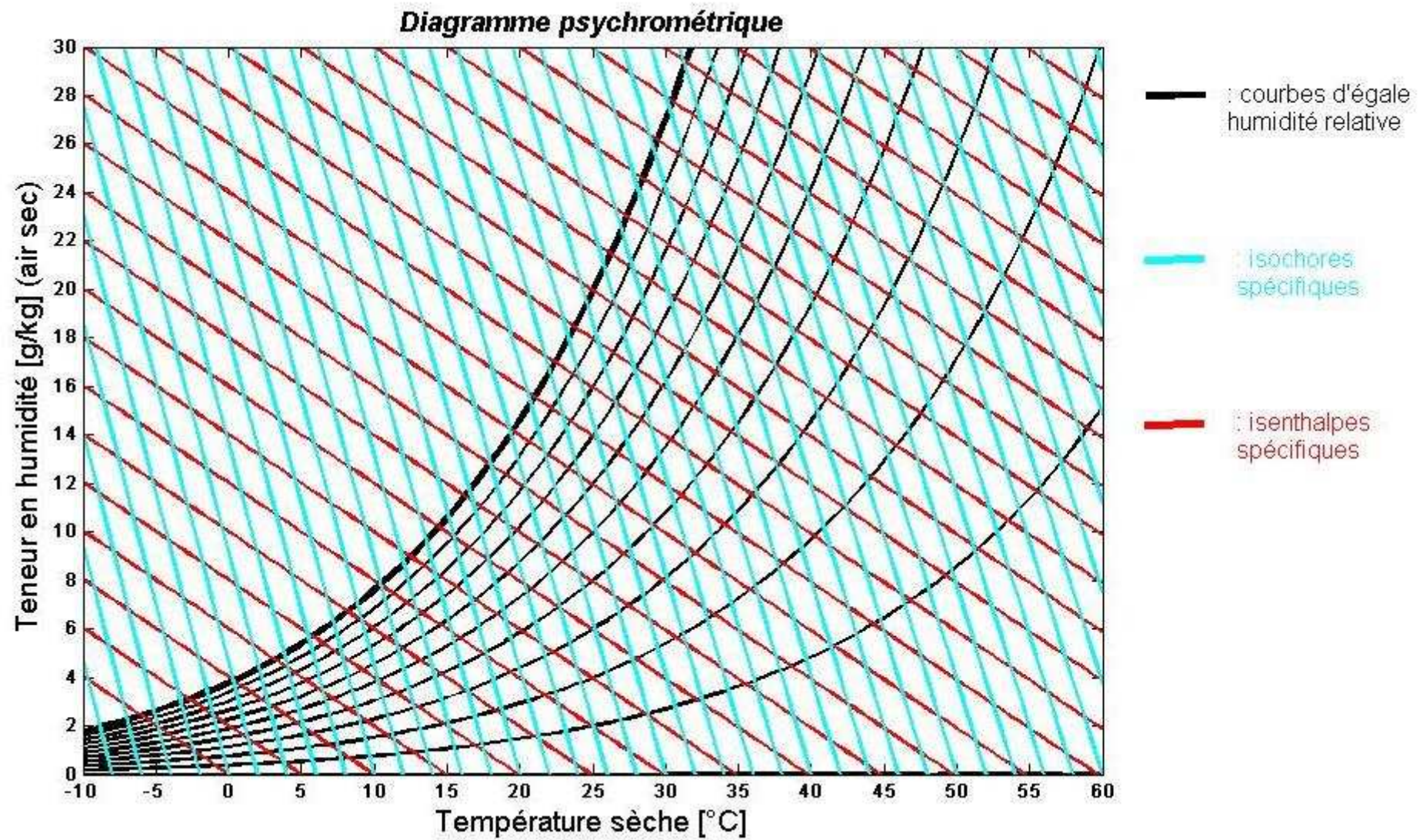


Figure 5. Diagramme psychrométrique (Adapté par l'auteur)

(1) Zone de confort

Définie par son point neutre T_n , obtenu par l'intersection de la température neutre et l'humidité relative portée à $e = 50\%$ d'humidité relative. Cette zone est délimitée par quatre points de températures humides où :

$$T_n = 17,6 + (0,31 * T_m) \quad (5)$$

Où

$$T_m = \sum t_m / 12 \quad (6)$$

Les points 1, 2, 3 et 4 qui délimitent la zone de confort sont données par les relations :

$$\begin{aligned} T_1 &= T_n + (Ahn - 12) * 0.025 * (T_n - 14) - 2 \\ T_2 &= T_1 + 4 \\ T_3 &= T_1 + 0.2 * (T_1 - 14) \\ T_4 &= T_2 + 0.2 * (T_2 - 14) \end{aligned} \quad (7)$$

Ahn : Humidité absolue du point de neutralité.

$$Ahn \left[\frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'air sec}} \right] = e * x_{sat} \quad (8)$$

Où

x_{sat} : Humidité absolue de l'air saturé.

$$x_{sat} \left[\frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'air sec}} \right] = 0.62 * p_{sat} / (p_m - p_{sat}) \quad (9)$$

Avec

$p_{sat}(T_n)$: Pression de saturation de l'air à la température T_n .

$$p_{sat}(T_n) [hPa] = 1013,25 * 10^{\left(17,443 - \left(\frac{2795}{273 + T_n}\right) - 3.868 * \log_{10}(273 + T_n)\right)} \quad (10)$$

$$p_{sat}(T_n) = 29,39 [hPa]$$

Et

$$p_m = 1013,25 [hPa]$$

Les points 1 et 2 sont portés à ligne d'humidité absolue 12 $[g / Kg]$; et les points 3, 4 à la ligne d'humidité absolue 4 $[g / Kg]$.

(2) Zone de contrôle potentiel pour les périodes froides

C'est la zone de chauffage passif. Elle est délimitée par un seul point 5 portée à la courbe de saturation $HB = 100 \%$ où :

$$T_5 = T_n + 0,36 - 0,0025 * H_v \quad (11)$$

(H_v Représente la moyenne journalière totale d'irradiations solaires en Wh/m^2 d'une surface verticale sud pour le mois le plus froid i.e. Juillet).

(3) Zones de contrôle potentiel pour les périodes chaudes :(a) Zone d'effet de masse

La détermination de la variation maximale de la température pour le mois le plus chaud (Mars) dT_m permet d'obtenir le premier point de cette zone.

$$dT_m = T_{max} - T_{min} \quad (12)$$

Les points qui délimitent cette zone sont :

$$\begin{aligned} T_6 &= T_2 + 0,5 (dT_m) \\ T_7 &= T_6 + 0,05 (T_6 - 14) \\ T_8 &= T_6 + 0,2 * (T_6 - 14) \end{aligned} \quad (13)$$

Le point 6 est porté par la droite d'humidité absolue $14[g/Kg]$.

Le point 7 est porté par la droite d'humidité absolue $12[g/Kg]$

Le point 8 est porté par la droite d'humidité absolue $4[g/Kg]$

La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'humidité relative du premier point de la zone de confort.

(b) Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne

La zone d'effet de masse avec ventilation nocturne est délimitée par 3 points :

$$\begin{aligned} T_9 &= T_2 + 0,8 * (dT_m) \\ T_{10} &= T_9 - 0,05 * (T_9 - 14) \\ T_{11} &= T_9 - 0,05 * (T_9 - 14) \end{aligned} \quad (14)$$

Le point 9 appartient à la ligne $14[g/Kg]$ d'humidité absolue ;

Le point 10 appartient à la ligne $12[g/Kg]$ d'humidité absolue ;

Le point 11 appartient à la ligne 4[g/ Kg] d'humidité absolue.

(c) Zone de ventilation naturelle-mouvement d'air sur la surface de peau

La zone de ventilation naturelle-mouvement d'air sur la surface de la peau est délimitée par 4 points.

- Pour une vitesse de vent avoisinant 1[m/s], on a les 2 premiers points 12 et 13:

$$\begin{aligned} T_{12} &= T_2 + 5 \\ T_{13} &= T_{12} + 0,1 * (T_{12} - 14) \end{aligned} \quad (15)$$

- Pour une vitesse de vent proche 1,5[m/s], on a les points:

$$\begin{aligned} T_{12} &= T_2 + 6,5 \\ T_{13} &= T_{12} + 0,1 (T_{12} - 14) \end{aligned} \quad (16)$$

Les autres points sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} T_{14} &= T_1 \\ T_{15} &= T_{12} - 0,18 (T_{12} - 14) \end{aligned} \quad (17)$$

Le point 12 est porté par la ligne d'humidité absolue 12[g/ Kg]. Quant au point 13, il appartient à la droite 4[g/ Kg] d'humidité absolue.

Les points 14 et 15 sont portés par la courbe 90 % d'humidité relative.

(d) Zone de refroidissement évaporatif direct

Cette zone est délimitée par un seul point :

$$T_{16} = T_n + 12 \quad (18)$$

Les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracées à partir des lignes de températures humides du deuxième et troisième point de la zone de confort.

(e) Zone de refroidissement évaporatif indirect

La zone de refroidissement évaporatif indirect est limitée par un seul point. Ce point est porté par la ligne 14[g/ Kg] d'humidité absolue.

$$T_{17} = T_n + 15 \quad (19)$$

2. Modélisation du bâtiment

a) Plan du bâtiment

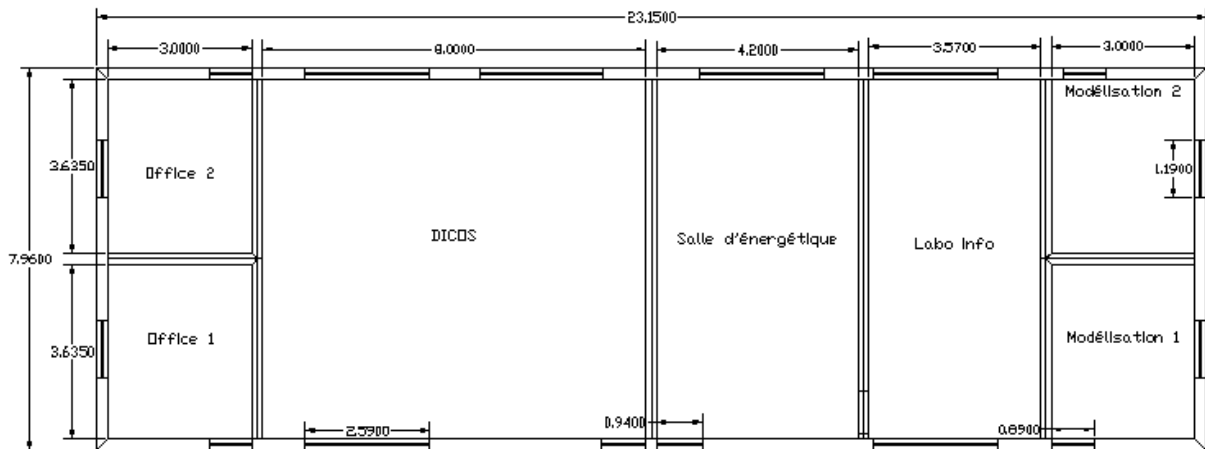


Figure 6. Plan du bâtiment

Le bâtiment étudié est un bâtiment utilisé comme salle de classe à l'université. Sa superficie est de $23[m] \times 8[m]$ soit $184[m^2]$.

Ce bâtiment comprend 7 salles (zones):

- 4 bureaux (BUREAU 1, BUREAU 2, MODELISATION 1, MODELISATION 2) de $10,875[m^2]$ chacun. Chaque bureau comporte une porte ($0,9[m] \times 2[m]$) et une fenêtre ($1,2[m] \times 1,2[m]$).
- 1 salle de classe (SALLE D'ENERGETIQUE) de $33,432[m^2]$. Cette salle comporte une porte principale ($0,95[m] \times 2[m]$), une porte de communication avec un laboratoire informatique ($0,9[m] \times 2[m]$), et une fenêtre de ($2,6[m] \times 1,2[m]$)
- 1 laboratoire informatique (LABO INFO) de $26,775[m^2]$. Ce laboratoire comporte deux fenêtres de ($2,6[m] \times 1,2[m]$).
- 1 salle d'étude (DICOS) de $60[m^2]$. Elle a une porte principale ($0,95[m] \times 2[m]$) et trois fenêtres ($2,6[m] \times 1,2[m]$).

Remarque :

Il existe un trou entre la salle d'énergétique et le labo info.

b) Activités

(1) Type de zone

Les zones (salles de classe, laboratoire ou bureaux) sont considérées comme standards: elles sont occupées, chauffées ou rafraîchies.

(2) Occupation

Les données d'occupation définissent le nombre de personnes présentes et les heures d'occupation.

Ainsi, le bâtiment est occupé 5 jours par semaine de 8h du matin jusqu'à 18h du soir.

La plupart de temps (journée type), le nombre de personnes présentes dans le bâtiment est réparti comme suit :

Tableau 1. Occupation du bâtiment par zones

Zones	Superficie [m ²]	Nombre de personnes [pers]	Densité de personne [pers/m ²]
Bureau 1	10,875	2	0,18
Bureau 2	10,875	2	0,18
DICOS	60	20	0,33
Salle d'énergétique	33,432	16	0,48
Labo info	26,775	16	0,60
Modélisation 1	10,875	2	0,18
Modélisation 2	10,875	2	0,18

(3) Métabolisme

Le niveau métabolique détermine la quantité de chaleur émise par personne dans la zone aux conditions de conception.

Comme le bâtiment est utilisé comme une salle de classe (activité : écrire)- alors le niveau métabolisme est de 108 (ASHRAE, 1997).

Le facteur métabolique prend en compte des personnes de tailles variées. Pour les hommes adultes, ce facteur est égal à 1 ; pour les femmes adultes il est égal à 0,85 ; et 0,75 pour les enfants.

Pour déterminer le facteur métabolique pour tout l'ensemble des occupants, on effectue la moyenne des facteurs. Ainsi, on a le tableau suivant :

Tableau 2. Coefficient métabolique par zones

Zones	Nombre d'hommes adultes	Nombre de femmes adultes	Facteur métabolique
Bureau 1	1	1	1,85
Bureau 2	1	1	1,85
DICOS	10	10	18,5
Salle d'énergétique	8	8	14,8
Labo info	8	8	14,8
Modélisation 1	1	1	1,85
Modélisation 2	1	1	1,85

(4) Contrôle d'ambiance

Le bâtiment n'est ni chauffé ni climatisé. Il ne possède de système de ventilation mécanique, et la ventilation naturelle est non contrôlée.

c) Construction

Les éléments qui définissent la construction sont constitués par des couches de matériaux. Ces matériaux sont caractérisés par leurs propriétés générales (conductivité thermique, chaleur spécifique et volume massique), et leurs propriétés de surface (absorbance thermique « émissivité », absorbance solaire, absorption du rayonnement visible et la rugosité).

(1) Murs

Les murs externes sont constitués de 2 couches : une couche de briques (interne) et une d'enduit.

Les murs internes sont composés de 3 couches : deux couches d'enduits (interne et externe) et une couche de briques.

La cloison qui sépare la salle d'énergétique et le labo info est en Aluminium (source : ISO 10456).

Tableau 3. Propriétés générales et de surface des murs (bâtiment de base)

			GÉNÉRALES			PROPRIÉTÉ DE SURFACE			
Murs	Couches	Épaisseur [m]	Conductivité [W/Km ²]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m ³]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Murs externes	Brique de Madagascar	0,22	0,69	950	1500	0,9	0,7	0,7	<i>Rugueux</i>
	Enduit	0,01	1	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
Murs internes	Enduit	0,005	1	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
	Brique de Madagascar	0,22	0,69	950	1500	0,9	0,7	0,7	<i>Rugueux</i>
	Enduit	0,005	1	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
Cloison (1)	Aluminium	0,001	160	880	2800	0,3	0,3	0,3	<i>Lisse</i>

(2) Toits / planchers/ dalles/plafonds

Le toit est fait à partir d'une tôle ondulée de couleur bleu clair.

Les planchers bas sur terrain sont constitués de 2 couches : une couche de revêtement en carreaux (externe) et une dalle en béton (interne).

Le plafond est fait en bois (pin).

Tableau 4. Propriétés générales et de surface du toit plancher et plafond (Bâtiment de base)

			GENERAL			PROPRIETE DE SURFACE			
composants	Couches	Epaisseur [m]	Conductivité [W/Km ²]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m ³]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Toit	Tôle ondulée	0,001	50	450	7500	0,3	0,3	0,3	<i>Lisse</i>
Plancher bas sur terrain	Carreaux	0,01	1,3	840	2300	0,9	0,4	0,4	<i>Moyen</i>
	Dalle (béton)	0,2	1,3	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
Plafond	Bois	0,01	0,14	1200	650	0,9	0,78	0,78	<i>Rugueux</i>

(3) Portes

Les portes extérieures sont construites en métal. La porte intérieure (communication entre la salle d'énergétique et le labo info) est faite en aluminium.

Tableau 5. Propriétés générales et de surface des portes

			GENERAL			PROPRIETE DE SURFACE			
Portes	Couches	Epaisseur [m]	Conductivité [W/Km ²]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m ³]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Portes extérieures	Acier (ISO10456)	0,001	50	450	780	0,9	0,4	0,4	<i>Lisse</i>
Portes intérieures	Aluminium (ISO 10456)	0,001	160	880	2800	0,3	0,3	0,3	<i>Lisse</i>

d) Ouverture

On entend par ouverture les aérations et les fenêtres. Ces ouvertures comportent communément des cadres ou/et des vitrages.

Les cadres sont constituées par des couches de matériaux. Ces matériaux sont caractérisés par leurs propriétés générales et leurs propriétés de surface. Tandis que les vitrages sont définis par le nombre

de vitres qui constituent les ouvertures (simple, double, triple...) ; et par les différentes propriétés des vitres.

(1) Cadre fenêtres

A l'exception de la fenêtre de la face avant de la zone « labo info » qui est en Aluminium, Les cadres des fenêtres ainsi que les diviseurs sont en bois.

Tableau 6. Propriétés générales et de surface des cadres des fenêtres

Murs	Couches	Epaisseur [m]	GENERAL			PROPRIETE DE SURFACE			
			Conductivité [W/Km ²]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m ³]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Labo info façade avant	Aluminium	0,5	160	880	2800	0,3	0,3	0,3	Lisse
Restes	Bois	0,1	0,19	2390	700	0,9	0,9	0,9	Rugueux

(2) Vitrage

Propriétés thermiques

Epaisseur : 3[mm]

Conductivité : 0,9 [W/m K]

Propriétés solaires

Transmission solaire : 0,837

Facteur de réflexion solaire extérieure : 0,075

Facteur de réflexion solaire intérieur : 0,075

Propriétés au rayonnement visible

Transmission du rayonnement visible : 0,898

Facteur de réflexion solaire du rayonnement visible extérieur : 0,081

Facteur de réflexion solaire du rayonnement visible intérieur : 0,081

Propriétés aux infrarouges

Transmission des infrarouges : 0,001

Facteur de réflexion solaire du rayonnement visible extérieur (émissivité hémisphérique) : 0,84

Facteur de réflexion solaire du rayonnement infrarouge intérieur (émissivité hémisphérique) : 0,84

3. Prospection des solutions : Analyse des phénomènes ayant impact sur le confort thermique

Le confort thermique dépend de plusieurs phénomènes. On peut citer entre autre les phénomènes psychologiques, physiologiques et physiques.

a) Les phénomènes psychologiques

(1) La sensation thermique

La sensation thermique correspond à l'aspect qualitatif (chaud ou froid, localisation) et quantitatif (intensité) de la perception de l'état thermique personnel. Elle est liée aux messages sensoriels des différents thermorécepteurs informant l'hypothalamus qui les intègre en une information globale capable de donner information de l'état thermique de l'individu(NARCON, 2001). Néanmoins, il est possible de différencier l'état interne de l'état externe. De telle différence existe parce que la perception globale naît de l'aspect sensoriel intégré, alors que la perception sur l'ambiance se fait par des moyens moins globaux que sont, dans ce cas, les zones découvertes (mains, tête, pieds, etc.)(CANDAS, 1998).

(2) Le confort thermique

Le confort thermique se définit comme la satisfaction exprimée à l'égard de l'ambiance thermique du milieu environnant.

Pour qu'une personne se sente confortable, trois conditions doivent être réunies :

- Le corps doit maintenir une température interne stable.
- La production de sueur ne doit pas être trop abondante et la température moyenne de la peau doit être confortable.
- Aucune partie du corps ne doit être trop chaude ni trop froide (inconfort local).

b) Les phénomènes physiologiques

L'homme est un homéotherme, il doit donc stabiliser sa température interne à 37°C, en dépit des variations de la température extérieure.

Il s'agit d'un équilibre entre la thermogénèse (production de chaleur) et la thermolyse (perte de chaleur). Pour adapter la production et les pertes caloriques, l'organisme dispose des thermo-détecteurs et des thermorégulateurs.

(1) Thermo-détecteurs

Les thermo-détecteurs au chaud et au froid sont répartis dans les organes et au niveau cutané muqueux. Ils présentent une sensibilité statique (fonction du niveau de température) et une sensibilité dynamique (fonction de la vitesse de variation de la température).

(2) Thermorégulateurs

Les thermorégulateurs sont situés dans le cerveau et comparent la température du corps à un moment "t" à la température de référence (37°C) et commandent les différentes adaptations nécessaires qui sont :

- La thermogénèse de réchauffement déclenchée par la lutte contre le froid,
- Le transfert interne de chaleur par redistribution de débit sanguin en modifiant la fréquence cardiaque et par le jeu de la vasoconstriction (rétrécissement des vaisseaux sanguins) et de la vasodilatation,
- Le transfert externe de la chaleur (régulation par sudation),

L'acclimatation.

c) Les phénomènes physiques

La tenue de la température interne du corps humains autour de 37°C requiert un équilibre thermique avec son entourage. Pour cela, la chaleur produite à l'intérieur du corps humain, portée à sa surface cutanée, doit être compensée par des déperditions de chaleur dans son environnement. Les fluctuations dans les conditions externes et internes impliquent un état d'équilibre dynamique. Si la chaleur produite dans le corps dépasse celle perdue à l'environnement, le corps se réchauffe et sa température interne s'élève ; dans le cas inverse, il se refroidit avec un abaissement de sa température interne.

Les phénomènes qui participent à l'interaction thermique entre le corps humain et son environnement sont : les effets de la tenue vestimentaire, les phénomènes physiques influant sur le bilan thermique, et l'inertie thermique.

(1) L'effet de la tenue vestimentaire

Les vêtements permettent de créer un microclimat, à travers leurs résistances thermiques, en modifiant les échanges de chaleur et de masse entre la peau et l'environnement. Leur rôle essentiel est de maintenir le corps dans des conditions acceptables surtout en hiver. Le comportement thermique des vêtements d'une personne en activité est complexe et dynamique. Les transferts de chaleur à travers les tissus se font par conduction, les transferts de masse par diffusion pour la phase vapeur et par migration pour la phase liquide. A la surface extérieure, les échanges s'effectuent avec l'environnement par convection, rayonnement et évaporation.

De nombreux facteurs peuvent influencer les échanges de chaleur et de masse à travers les vêtements. A part leurs résistances thermiques et leurs résistances à l'évaporation, il peut y avoir un effet tampon par adsorption de l'eau, un effet de pompage de l'air dû au mouvement du corps ou la pénétration de l'air à travers les tissus ou les orifices. La nature du tissu, la coupe des vêtements, l'activité et la posture du sujet influencent aussi les différentes modes de transfert (THELLIER, 1999).

(2) Les phénomènes ayant impact sur le bilan thermique

La chaleur (métabolique) produite par l'organisme est dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire sous forme de chaleur sensible et latente. La convection, le rayonnement et la conduction sont les trois mécanismes de transfert de chaleur sensible à la surface cutanée, la chaleur latente est reprise par évaporation de la sueur à la surface de la peau. La ventilation respiratoire dissipe la chaleur du corps par convection (chaleur sensible) et par évaporation (chaleur latente)

(a) Production de chaleur par l'organisme : métabolisme

Le métabolisme énergétique de l'organisme comprend le métabolisme de base et le métabolisme d'exercice.

Le métabolisme de base $B_M [W/m^2]$ est le métabolisme d'une personne couchée au repos dans des conditions définies. C'est la production de chaleur minimale nécessaire aux fonctions vitales de l'organisme.

Le métabolisme d'exercice comprend les composantes posturales $M_P [W/m^2]$, d'activité $M_W [W/m^2]$ et de déplacement du corps en fonction de la vitesse $M_M [W/m^2]$; ces composantes sont données dans des tableaux pour les différentes positions.

$$M = B_M + M_P + M_W + M_M \quad (20)$$

Remarque :

Le métabolisme dépend énormément de la thermorégulation.

(b) Les transferts de chaleur cutanée

La température de la peau de l'homme se situe habituellement entre 28 et 36°C. L'enveloppe corporelle sert de tampon thermique : elle peut absorber de la chaleur tant qu'elle n'a pas elle-même atteint la température interne.

Cette dernière commence à augmenter lorsque la température de la peau à l'extérieur l'a rejointe.

Inversement l'enveloppe corporelle peut perdre de la chaleur vers l'extérieur sans que diminue la température interne pour de brèves périodes. Pour des périodes plus longues, un équilibre est nécessaire.

(c) Les transferts de chaleur sensible

Le transfert de chaleur entre le bâtiment et son environnement s'effectue suivant trois manières différentes, qui sont généralement simultanées. Il s'agit de la conduction, de la convection et du rayonnement.

(i) La conduction

La conduction s'effectue par contact direct entre deux corps solides, liquides ou gazeux (l'organisme peut être assimilé à un solide) ; et la chaleur s'écoule naturellement de l'endroit le plus chaud vers l'endroit le plus froid.

La conduction thermique est fonction de :

- La différence de température entre les deux corps,
- La conductivité thermique du solide en contact,
- L'épaisseur e du solide,
- La surface de contact entre la peau et le solide.

(ii) La convection

La convection est un phénomène se produisant dans un fluide en mouvement, ou entre un fluide (liquide ou gaz) en mouvement et une surface rigide (l'organisme).

Elle dépend de:

- La vitesse du fluide,
- La température de l'air,
- La température de la peau.

La quantité de chaleur transmise par convection est donnée par la relation (ASHRAE, 1997):

$$C = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad (21)$$

C : Flux de chaleur convectif [W]

T_{cl} : Température de la surface externe du vêtement [$^{\circ}C$]

T_a : Température d'air [$^{\circ}C$]

h_c : Coefficient d'échange convectif [$W^{\circ}C/m^2$]

f_{cl} : Facteur d'habillement

(iii) Le rayonnement

Le rayonnement est l'échange de chaleur entre un organisme vivant et un corps par ondes électromagnétiques. Ce phénomène dépend de l'émissivité de la paroi et de la température de la surface considérée et de celles qui l'entourent.

Pour simplifier le calcul du flux radiatif, la température moyenne de rayonnement est utilisée à condition que l'environnement thermique soit homogène. Elle est une moyenne pondérée des températures de surface des parois locales en fonction de leur émissivité et de leurs positions relatives par rapport au sujet. En plus, une approximation linéaire est utilisée pour écrire l'équation du flux radiatif :

$$R = f_{cl} h_r (T_{cl} - \bar{T}_r) \quad (22)$$

Avec

$$h_r = 4 \varepsilon \sigma f_{eff} \left(273,2 - \frac{T_{cl} - \bar{T}_r}{2} \right)^3 \quad (23)$$

R : Flux de chaleur radiatif [W]

T_{cl} : Température de la surface externe du vêtement [$^{\circ}C$]

$\bar{T}_r$: Température moyenne radiante [$^{\circ}C$]

f_{cl} : Facteur d'habillement

h_r : Coefficient d'échange linéaire [$W^\circ C/m^2$]

ε : Emissivité moyenne du corps

σ : Constante de Stefan Boltzmann ; $5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 K^4]$

f_{eff} : Coefficient effectif de surface rayonnante

Le coefficient f_{eff} est le rapport entre la surface du corps qui rayonne et la surface corporelle totale. Il joue le facteur de forme et dépend de la posture : 0,70 pour une personne assise et 0,73 pour une personne debout. Quant à l'émissivité, elle est quasiment proche de l'unité (ASHRAE, 1997).

Dans la plupart des cas, les environnements thermiques dans les bâtiments peuvent être considérés homogènes dans les zones occupées. Mais si l'environnement radiatif est trop hétérogène, la température moyenne de rayonnement est insuffisante, il faut prendre en compte l'asymétrie de rayonnement.

Les équations du flux de chaleur par convection et par rayonnement sont combinées en vue d'exprimer l'échange total de chaleur sensible en terme de température opérative T_o et le coefficient d'échange de chaleur sensible h .

$$(C + R) = f_{cl} h (T_{cl} - T_o) \quad (24)$$

$$T_o = \frac{h_c T_a - h_r \bar{T}_r}{h_c + h_r} \quad (25)$$

$$h = h_c + h_r \quad (26)$$

$(C + R)$: Échange de chaleur sensible cutané [W/m^2]

T_o : Température opérative [$^\circ C$]

h : Coefficient d'échange de chaleur [$W/m^2 K$]

En considérant le vêtement comme une seule couche à travers laquelle les transferts de chaleur se font uniquement par conduction entre la peau à température T_{sk} et la surface du tissu à température T_{cl} , les transferts de chaleur sensible peuvent être écrits de façon suivante :

$$(C + R) = \frac{T_{cl} - T_{sk}}{R_{cl}} \quad (27)$$

$$(C + R) = \frac{T_{cl} - T_o}{R_{cl} + \frac{1}{f_{cl} h}}$$

R_{cl} : Résistance thermique vestimentaire [$m^2 K/W$]

(d) Les transferts de chaleur latente : évaporation

Elle est le moyen le plus efficace et usité pour éliminer la chaleur produite par les corps humains. Elle peut s'effectuer sous différentes formes :

- Par la perte de vapeur d'eau par les poumons,
- Par la respiration,
- Par la sudation (évaporation d'eau par la voie cutanée).

Le phénomène moteur de l'évaporation sur une surface humide est le gradient de pression de vapeur entre la surface cutanée, l'air environnant et la mouillure cutanée.

Le flux de chaleur transmise par évaporation s'écrit de la manière suivante (ASHRAE, 1997) :

$$E_{sk} = \frac{\omega(P_{sk,s} - P_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl}h_e}} \quad (28)$$

Avec

E_{sk} : Echange de chaleur évaporatoire cutanée [W/m^2]

ω : Mouillure cutanée

$P_{sk,s}$: Pression de vapeur à la surface de la peau [kPa] (considérée saturée)

P_a : Pression de vapeur d'air [kPa]

$R_{e,cl}$: Résistance vestimentaire à l'évaporation [$m^2 kPa/W$] (similaire à R_{cl}).

h_e : Coefficient d'échange de chaleur par évaporation [$W/m^2 kPa$]

(e) Les échanges de chaleur par respiration

Pendant la respiration, l'organisme échange de la chaleur latente et sensible (par évaporation et par convection) avec l'air absorbé. A la sortie des poumons, l'air est expiré à une température proche de la température interne du corps et il est presque saturé. La respiration s'accompagne ainsi d'un transfert de chaleur et de masse. Ces échanges dépendent des différences de température et d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant, et du débit ventilatoire.

Le flux de chaleur transmise par évaporation s'écrit de la manière suivante (ASHRAE, 1997) :

$$C_{res} + E_{res} = 0,0014 M(T_{exp} - T_a) + 0,0173 M(P_{exp} - P_a) \quad (29)$$

C_{res} : Flux de chaleur échangé par convection respiratoire [W/m^2]

E_{res} : Flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire [W/m^2]

T_{exp} : Température de l'air expiré [$^{\circ}C$], ($\sim 34^{\circ}C$)

T_a : Température de l'air ambiant [$^{\circ}C$]

P_{exp} : Pression de vapeur dans l'air expiré [kPa], ($5,87 kPa$ à $34^{\circ}C$)

P_a : Pression de vapeur dans l'air [kPa]

(3) L'inertie thermique

(a) Principe

Lorsque les rayons du soleil frappent une paroi opaque, une partie de l'énergie rayonnée est absorbée, le reste est réfléchi. Un flux de chaleur s'établit alors entre la face externe et la face interne de la paroi du bâtiment. La chaleur, qui se transmet par onde de l'extérieur à l'intérieur, se propage avec un certain déphasage et subit un amortissement. Le maximum de température atteint sur la face extérieure n'est pas immédiatement senti sur la face intérieure de la paroi.

L'inertie thermique est utilisée en construction pour amoindrir les variations de température extérieure, et permet de limiter un refroidissement ou une surchauffe trop importante à l'intérieur. Elle n'est toutefois pas adaptée aux locaux occupés et chauffés de manière irrégulière.

En été, l'inertie thermique de la construction est exploitée pour amortir l'onde quotidienne de température et d'ensoleillement, et l'onde séquentielle de la température extérieure.

En hiver, grâce à l'inertie thermique, l'énergie, disponible des gains solaires et les gains internes durant le jour, est stockée dans la masse et lentement restituée dans l'environnement intérieur plus tard lorsqu'on a besoin, contribuant ainsi à la diminution de la charge du chauffage. (BALARAS, 1996)

La performance de l'inertie thermique dépend de plusieurs facteurs. Salah, en 1989, a stipulé les paramètres suivants : le micro climat du site, l'orientation des bâtiments, la masse des bâtiments, l'enveloppe et les fenêtres, l'infiltration d'air, les besoins de l'utilisateur et ses activités (SALAH, 1989).

Le terme d'inertie thermique est habituellement lié au matériel de stockage qui est la masse du bâtiment lui-même. En générale elle est constituée par les murs, cloisons, plafonds et planchers du bâtiment qui sont construits en matériaux de haute capacité thermique.

(b) Les grandeurs agissant sur l'inertie thermique

La diffusivité, l'effusivité et l'épaisseur des parois définissent l'inertie thermique.

(i) La diffusivité

La diffusivité thermique "a" exprime la capacité d'un matériau à transmettre (rapidement) une variation de température.

$$a = \frac{\lambda}{\rho * c} [m^2/h] \text{ ou } [m^2/h] \quad (30)$$

λ : Conductivité [$W/m^\circ C$]

ρ : Masse volumique [kg/m^3]

c : Chaleur massique [$kJ/kg^\circ C$]

(ii) L'effusivité thermique

L'effusivité thermique "b" exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou restituer) une puissance thermique.

$$b = \sqrt{\lambda * \rho * c} [J m^{-2} ^\circ C^{-1} s^{-1/2}] \text{ ou } [Wh^{1/2} m^{-2} ^\circ C^{-1}] \quad (31)$$

4. Synthèse de la démarche méthodologique

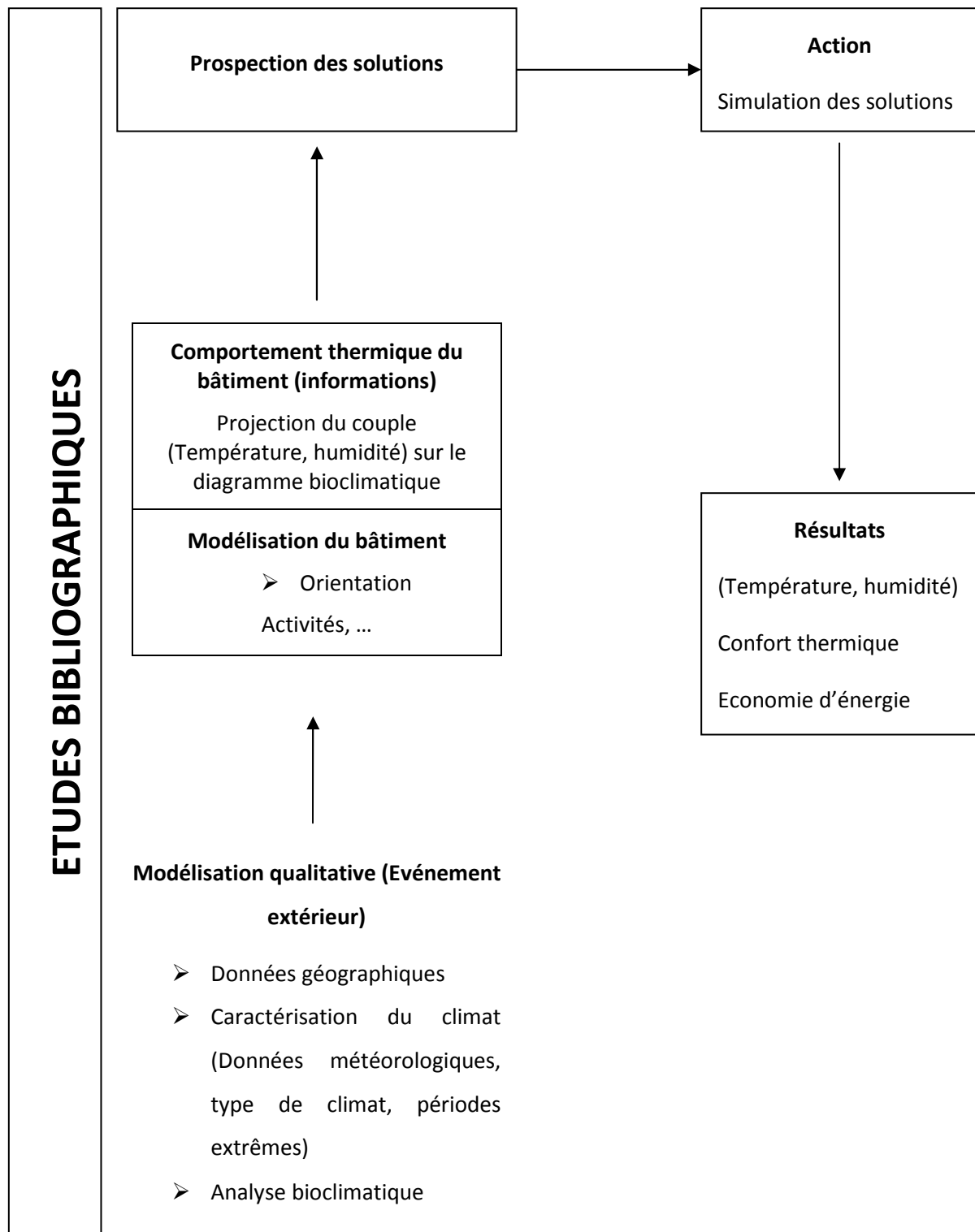


Figure 7. Synthèse de la démarche méthodologique

5. Cadre opératoire

Tableau 7. Cadre opératoire

Problématique : Comment les solutions passives contribuent-elle à l'obtention du confort thermique dans un bâtiment ?

Hypothèses	Indicateurs	Méthodes	Résultats
H1 : Le confort résulte essentiellement de la température et de l'humidité de l'air ambiant.	Zones de contrôle potentiel	Modélisation qualitative (événement extérieur)	Diagramme bioclimatique
	Nombre d'heures de confort	Modélisation du bâtiment de base (Orientation, Activités, ...)	Comportement thermique du bâtiment
H2 : Les solutions passives sont des sources d'économie d'énergie en améliorant le confort dans un bâtiment.	Passivité des solutions	Analyse des phénomènes influents sur le confort thermique	Solutions passives
	Différence entre les nombres d'heures de confort	Application des solutions passives	Influence de chaque solution passive
	Quantité d'énergie	Simulation	Gain d'énergie

III. Résultats et discussions

A. Diagramme bioclimatique de la région d'Antananarivo

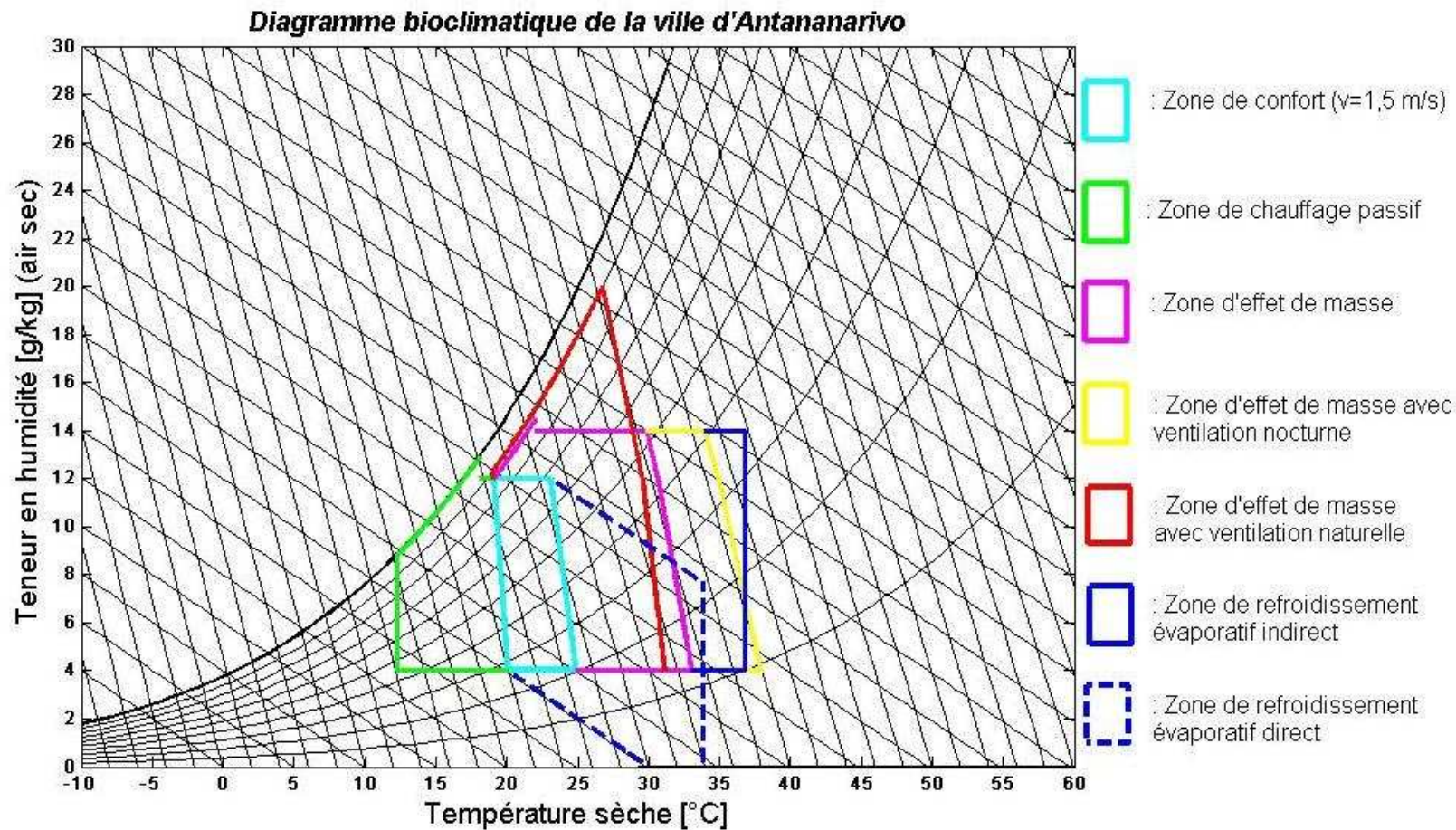


Figure 8. Diagramme bioclimatique de la ville d'Antananarivo (de Szockolay réadapté par l'auteur)

Ce diagramme est basé sur les données météorologiques de l'année type 2009 de la région d'Antananarivo en considérant une vitesse de vent $v = 1,5[m/s]$.

Pour obtenir un confort hygrothermique, les températures de l'air ambiant dans les locaux doivent être comprises entre $19,5^{\circ}C$ et $24,8^{\circ}C$, et l'air ambiant doit avoir un taux d'humidité relative entre 30% et 80%.

La zone de contrôle potentiel pour la saison froide, dans laquelle le chauffage passif est nécessaire, est délimitée par la température $12,3^{\circ}C$ portée à la courbe de saturation $HB = 100\%$.

La zone de contrôle potentiel pour les périodes chaudes est subdivisée en 5 zones :

- La zone d'effet de masse est délimitée par les points de coordonnées respectives (29,85 ; 14), (30,64 ; 12), (33,02 ; 4) sur le diagramme. La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'humidité relative du premier point de la zone de confort.
- La zone d'effet de masse avec ventilation nocturne est délimitée par les points de coordonnées respectives (33,93 ; 14), (34,92 ; 12), (37,91 ; 4) sur le diagramme.
- La zone d'effet de masse avec ventilation naturelle est délimitée par 4 points : les 2 premiers points sont définis par (29,55 ; 12), (31,10 ; 4) ; les 2 autres points sont portés par la courbe d'humidité relative 90% dont les températures sont respectivement égales à $19,05^{\circ}C$ et $26,75^{\circ}C$.
- La zone de refroidissement évaporatif direct est délimitée par un seul point $33,79^{\circ}C$. Les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracées à partir des lignes de températures humides du deuxième et troisième point de la zone de confort.
- La zone de refroidissement évaporatif indirect est limitée par un seul point $36,79^{\circ}C$. Ce point est porté par la ligne $14[g/Kg]$ d'humidité absolue.

B. Comportement thermique du bâtiment de base

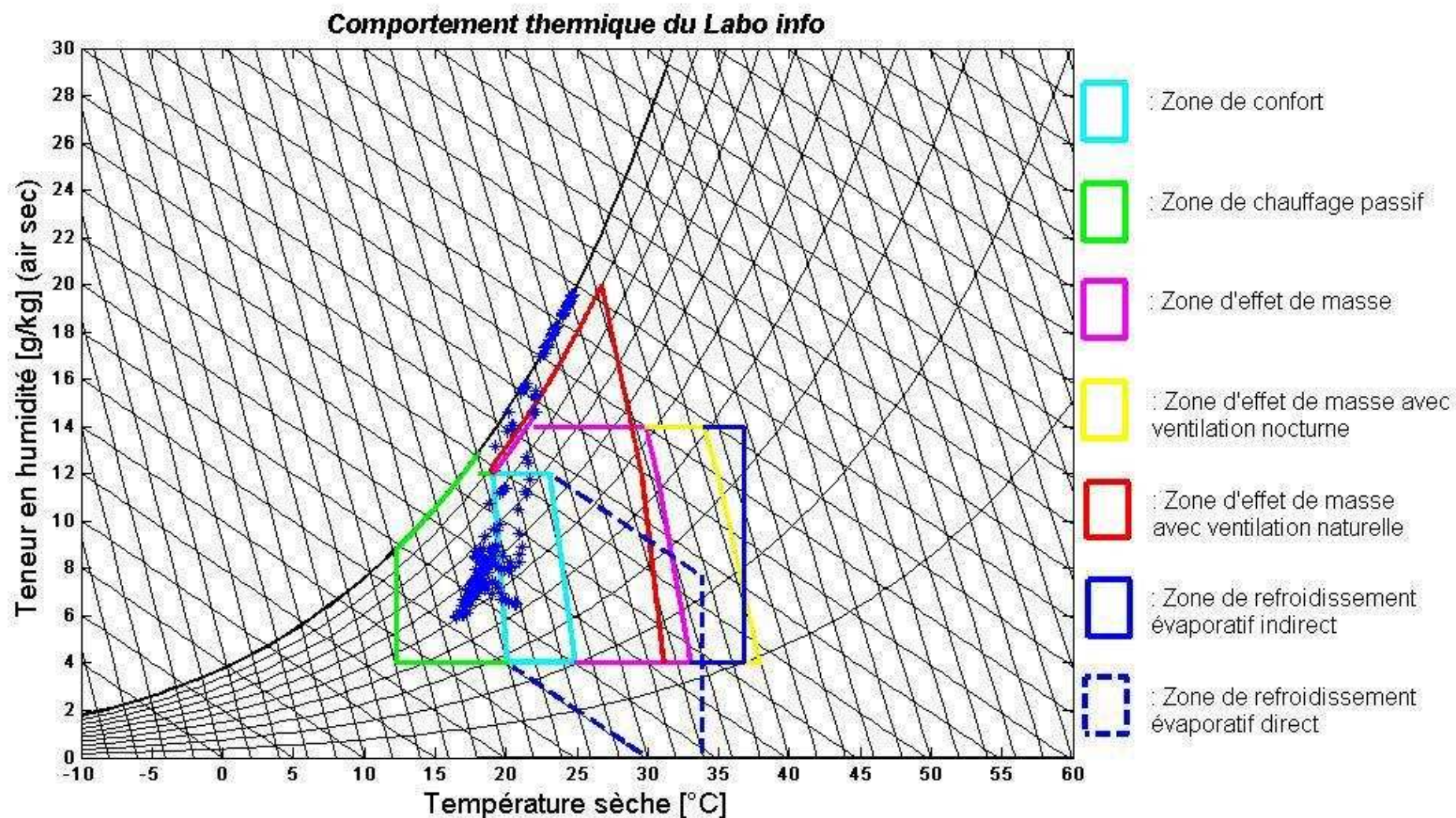


Figure 9. Comportement thermique du bâtiment de base (zone: Labo info)

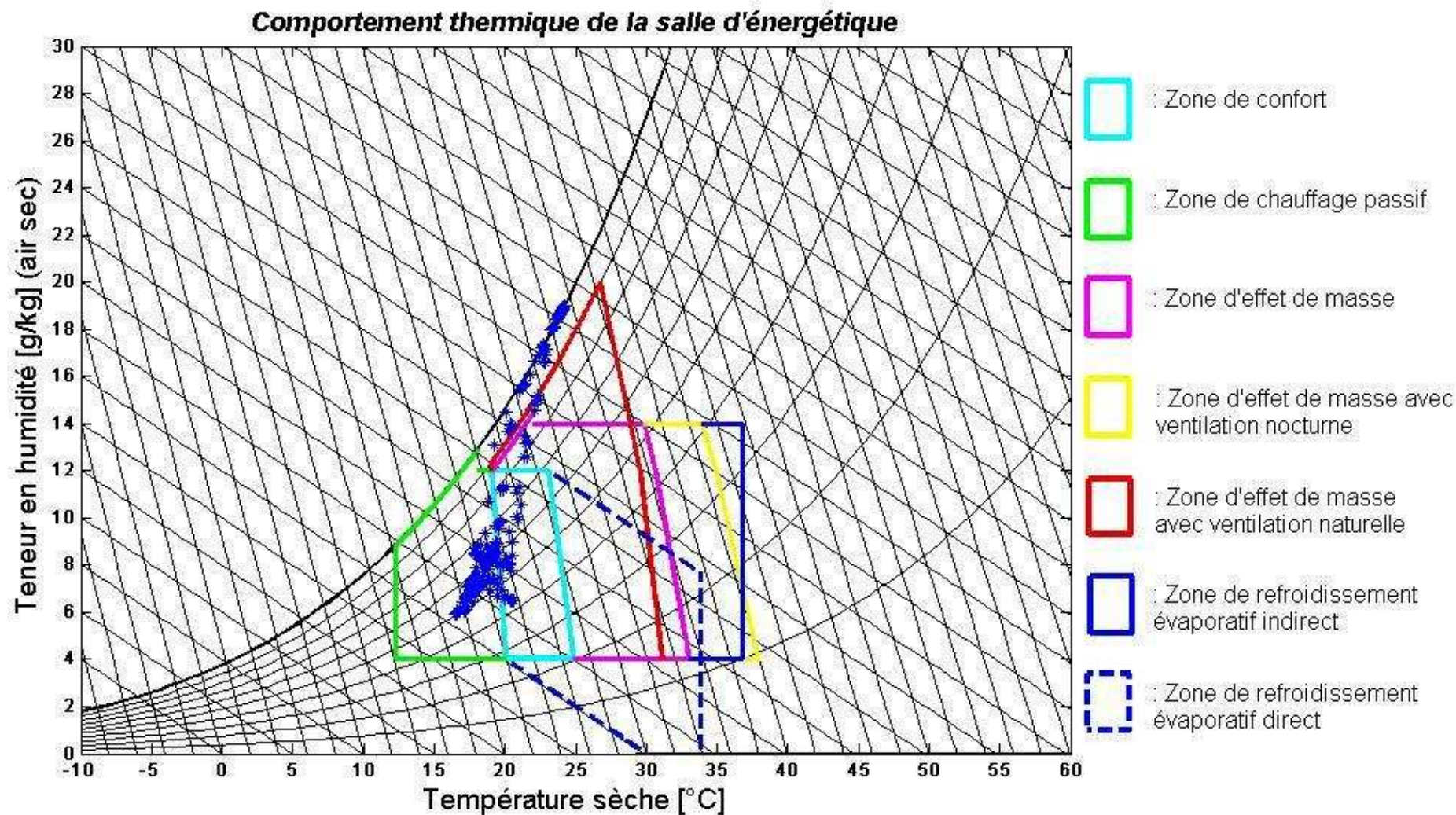


Figure 10. Comportement thermique du bâtiment de base (zone: Salle d'énergétique)

L'ambiance dans les deux zones (Labo info et salle d'énergétique) est trop froide, ce qui génère une sensation d'inconfort pour les occupants. Pendant la majorité du temps d'occupation, les couples (température, humidité) se trouvent dans la zone où des chauffages passifs sont nécessaires.

Pendant les premières heures de l'après midi (Annexe), l'humidité relative atteint le taux de 100% ; ceci est dû au phénomène de condensation qui se passe au niveau des murs.

Ces parois sont donc froides à cause du contact avec l'air extérieur et provoquent des sensations d'inconfort. Les espaces à proximité des parois deviennent ainsi "inutilisables"

C. Solutions passives

1. Isolation thermique des enveloppes

L'isolation thermique des enveloppes diminue, d'une part, l'effet parois froides qui se manifeste au niveau des enveloppes opaques.

Effectivement, l'air extérieur en contact avec les parois provoque des sensations d'inconfort. De ce fait, les espaces à proximité de ces parois sont inutilisables et l'intérieur de l'habitation n'est pas isolé acoustiquement. En outre, une certaine déperdition thermique dans l'habitation se fait au niveau des toitures et murs non isolés. De plus, le rayonnement solaire réchauffe les parties opaques de l'enveloppe qui, par conduction thermique, diffuse cette chaleur à l'intérieur du bâtiment.II.D.3.c)

D'autre part, pour que les matériaux de construction, dense et bon conducteur de chaleur, soient efficaces au stockage des chaleurs, il faut les combiner avec des matériaux isolants.

En effet, quand la chaleur est appliquée sur des matériaux de propriétés différentes, il y aura un effet différent sur eux. La basse conductivité (i.e. une haute résistance thermique) des matériaux isolants fait que ces matériaux sont des bons isolants thermiques mais faibles pour le stockage d'énergie. II.D.3.c)(3)

2. La couleur

Les couleurs des surfaces ont un impact sur le comportement thermique à cause de son aptitude d'absorption.

En effet, les couleurs foncées sont plus absorbantes que les couleurs claires.II.D.3.c)(3)

3. Vitrages

La forte inertie doit obligatoirement être associée à un surdimensionnement du vitrage pour qu'on puisse profiter du rayonnement solaire.

Afin de favoriser l'apport solaire en hiver, l'AFME recommande 1m^2 de vitrage ensoleillé pour au moins 3m^2 de surface primaire (soumise au rayonnement solaire direct II.D.3.c)(2)(c)(i)) et 8 à 10m^2 de surface lourde secondaire (sollicitée principalement par convection comme le plancher II.D.3.c)(2)(c)(ii)). (AFME (Agence Française pour la Maîtrise d'Energie), 1988)

Ainsi, par rapport à un simple vitrage, un double vitrage permet de réduire la déperdition.

4. Récapitulatif des solutions proposées

Tableau 8. Récapitulatifs des solutions proposées

Composants	Phénomènes		Modifications
Toiture	Transferts de chaleur sensible	Résistance thermique	Isolation
	Inertie thermique	Densité	
		Diffusivité et effusivité	Couleur du toit
Plafonds	Transferts de chaleur sensible	Résistance thermique	Isolation
	Inertie thermique		
Planchers	Transferts de chaleur sensible	Résistance thermique	Isolation
	Inertie thermique	Densité	
		Diffusivité et effusivité	Couleur
Murs	Transferts de chaleur sensible	Résistance thermique	Isolation
	Inertie thermique	Densité	
		Diffusivité et effusivité	Couleur
Vitrage	Transferts de chaleur sensible	Dimension du vitrage	Dimension
	Inertie thermique	Diffusivité et effusivité	Paramètres conductifs du vitrage

D. Influence des solutions passives

En tenant compte de l'inertie thermique des enveloppes et son efficacité, on a opté sur l'isolation des parois pour maintenir le confort thermique dans les deux zones. En effet, les solutions passives provenant de l'inertie thermique participent à la diminution de la consommation de l'énergie et au maintien du confort thermique dans le bâtiment (SILDER, 2003).

1. Solutions passives adoptées : Isolations

Pour isoler les enveloppes, l'utilisation du polystyrène est recommandée à cause de sa performance. Effectivement, le polystyrène d'épaisseur 5[cm] est idéal pour améliorer le comportement thermique à l'intérieur du bâtiment (ANDRIANIAINA, 2007).

a) *Murs*

Tableau 9. Propriétés générales et de surface des murs isolés

			GÉNÉRALES			PROPRIÉTÉ DE SURFACE			
Murs	Couches	Épaisseur [m]	Conductivité [W/Km ²]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m ³]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Murs externes	Brique de Madagascar	0,22	0,69	950	1500	0,9	0,7	0,7	<i>Rugueux</i>
	Enduit	0,01	1	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
	Polystyrène (source : uralita)	0,05	0,034	1400	35	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
	Enduit	0,01	1	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
	Plâtre (source : ISO 10456)	0,005	0,4	1000	1000	0,9	0,5	0,5	<i>Rugueux</i>
Murs internes	Enduit	0,005	1	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
	Brique de Madagascar	0,22	0,69	950	1500	0,9	0,7	0,7	<i>Rugueux</i>
	Enduit	0,005	1	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
Cloison (1)	Aluminium	0,001	160	880	2800	0,3	0,3	0,3	<i>Lisse</i>

b) Toits / planchers/ dalles/plafonds

Tableau 10. Propriétés générales et de surface du toit, plancher, dalle, plafond (isolé)

			GENERAL			PROPRIETE DE SURFACE			
composants	Couches	Epaisseur [m]	Conductivité [W/Km ²]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m ³]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Toit	Tôle ondulée	0,001	50	450	7500	0,3	0,3	0,3	<i>Lisse</i>
	Polystyrène (source : uralita)	0,05	0,034	1400	35	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
Plancher bas sur terrain	Carreaux	0,01	1,3	840	2300	0,9	0,4	0,4	<i>Moyen</i>
	Dalle (béton)	0,2	1,3	1000	1800	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
Plafond	Polystyrène (source : uralita)	0,05	0,034	1400	35	0,9	0,6	0,6	<i>Rugueux</i>
	Bois	0,01	0,14	1200	650	0,9	0,78	0,78	<i>Rugueux</i>

2. Influence de l'isolation

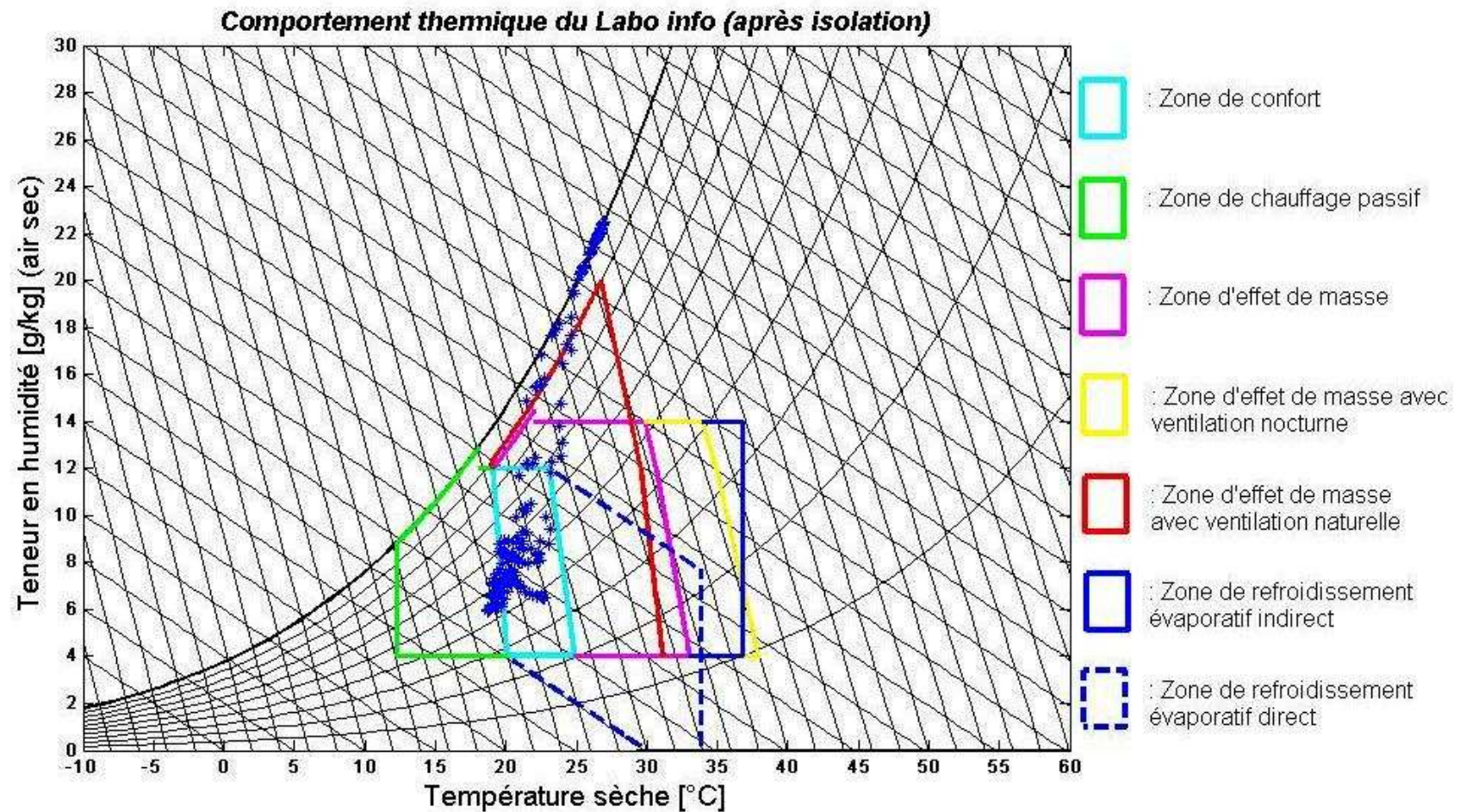


Figure 11. Comportement thermique du bâtiment modifié (zone: Labo info)

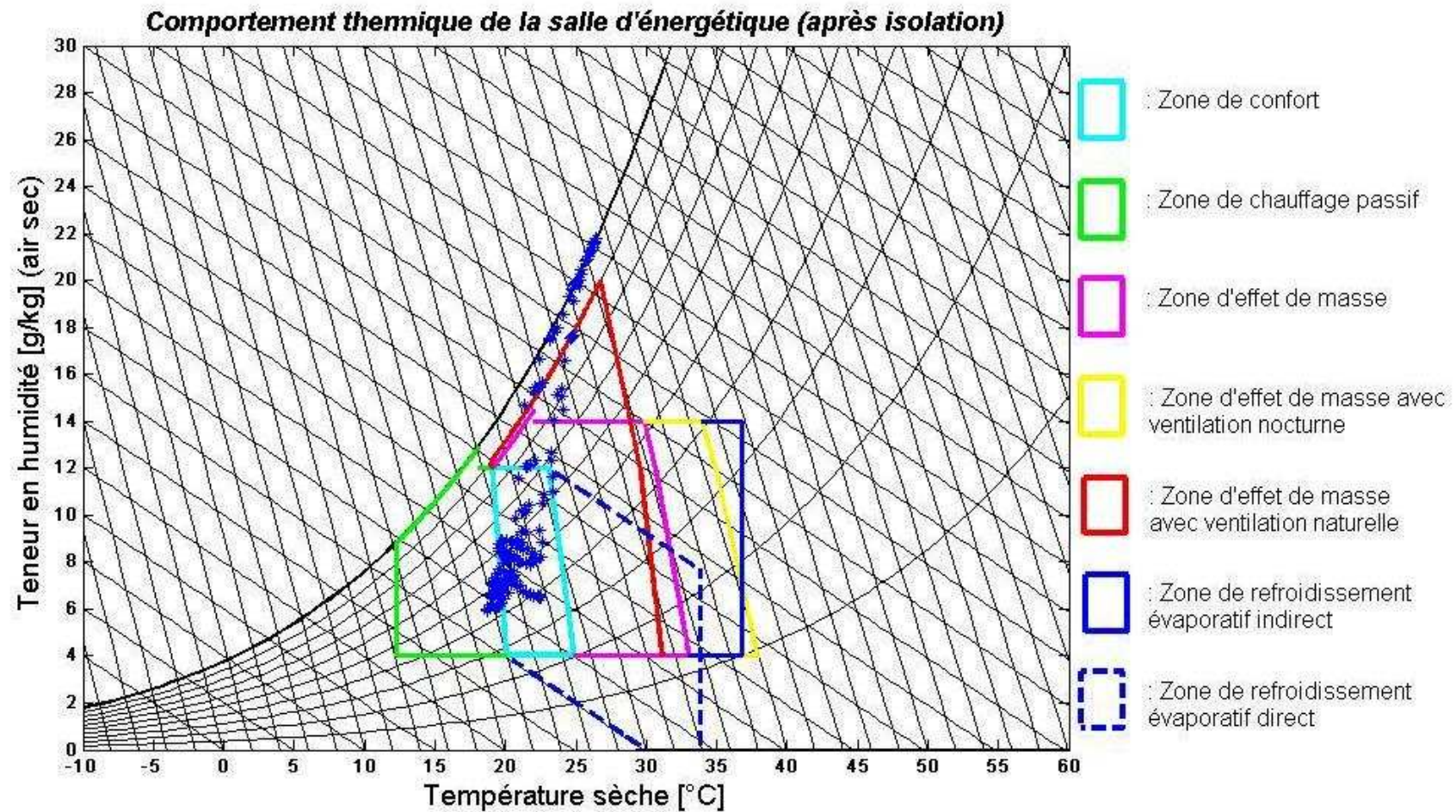


Figure 12. Comportement thermique du bâtiment modifié (zone: Salle d'énergétique)

3. Différence entre les nombres heures de confort

La période de simulation est une semaine (plus extrême de la période froide). Le nombre d'heures de simulation est donc $24[\text{heures}] * 7[\text{Jours}]$ soit $168[\text{heures}]$.

Le Comparaison des nombres et pourcentages d'heures de confort Tableau 11 donne le nombre et le pourcentage d'heures de confort dans les 2 zones pour les deux types de bâtiment (base et modifié).

Tableau 11. Comparaison des nombres et pourcentages d'heures de confort

Heures de confort	Bâtiment de base	Bâtiment modifié
Labo info	17,26% (29 Heures)	49,4% (83 Heures)
Salle d'énergétique	18,45% (31 Heures)	50% (84 Heures)

L'isolation a permis d'améliorer le confort hygrométrique dans les deux zones. La durée d'inconfort a été diminuée. L'isolation thermique permet aussi d'améliorer l'isolation acoustique. Effectivement, Une bonne isolation supprime l'« effet paroi froide » au niveau des parois. En outre, le rayonnement solaire réchauffe les parties opaques de l'enveloppe qui, par conduction, diffusent cette chaleur à l'intérieur du bâtiment. En effet, l'isolation des parois opaques permet de conserver la chaleur reçue dans le bâtiment II.D.3.c)(3).

L'isolation des parois ne permet pas de résoudre le problème de condensation au niveau des murs. L'utilisation de chauffage d'appoint permet d'amoindrir ce problème.

Pour que l'inertie thermique soit efficace, les isolations doivent être associées avec un choix justifié des couleurs de surface et des ouvertures (emplacements, dimensions).

E. Apport thermique et étude économique

1. Apport thermique de chaque composant

Autre l'ambiance dans les locaux, l'apport thermique des solutions passives est un des critères d'appréciation des bâtiments bioclimatiques.

Tableau 12. Apports thermiques de chaque composant

	Murs extérieurs [kWh]	Plafonds (int) [kWh]	Toits [kWh]	Total [kWh]
Bâtiment de base	2807,534	3541,764	2548,733	8898,031
Bâtiment modifié	-1692,564	-968,1855	-1794,899	-4455,6485
Gain en énergie	4500,098	4509,9495	4343,632	13353,6795

A l'état de base du bâtiment, les parois consomment 8898,031[kWh] pendant une année pour équilibrer l'ambiance à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment. Tandis que, à l'état isolé, elles permettent d'économiser 4455,6485[kWh] durant une année.

2. Coût des investissements

Coût de l'isolation en utilisant le polystyrène comme isolant : 46000 Ar / m². (ANDRIANIAINA, 2007)

Tableau 13. Coût d'investissement de l'isolation

Composants	Surface m ²	Coût de l'isolation
Mur extérieurs	186,00	8556000,00
Plafonds (intérieurs)	193,53	8902564,00
Toits	199,00	9153880,40
TOTAL	578,53	26612444,40

3. Le temps de retour de l'investissement

Le temps de retour d'investissement *TRI* est la durée d'exploitation d'un équipement nécessaire pour que les revenus (bénéfices) dégagés permettent de récupérer le montant de l'investissement.

On admet que :

- Les revenus sont constants d'une année à une autre :

En moyenne, le coût de l'énergie est de $PU = 537 \text{ Ar par kilowattheure}$ (JIRAMA, 2008). Ainsi, le revenu annuel est donné par la relation :

$$B = PU * \text{gain total} \quad (32)$$

Soit

$$B = 537 * 13353,6795$$

$$B = 7170925,62 \text{ Ar}$$

- Les capitaux sont empruntés :

$$I = 26612444,40 \text{ Ar}$$

- Les bénéfices sont soumis à des prélèvements fiscaux :

$$a = 20\%$$

- L'amortissement linéaire, la valeur résiduelle nulle :

Le taux d'amortissement pour les immobilisations est de 5%. L'annuité est donnée par la relation :

$$A = I * \text{taux d'amortissement} \quad (33)$$

Soit

$$A = \frac{26612444,40 * 5}{100}$$

$$A = 1330622 \text{ Ar}$$

Le temps de retour d'investissement TRI est donné par la relation :

$$TRI = \frac{I}{B(1 - a) + A} \quad (34)$$

Soit

$$TRI = \frac{26612444,40}{7170925,62(1 - 0,2) + 1330622}$$

$$TRI = 3,77 \text{ années ou 3 ans et 10 mois}$$

F. Perspectives

1. Application d'une démarche systémique

La méthodologie idéale utilisée pour effectuer des futures études concernant les solutions passives pour maintenir le confort thermique est basée sur une démarche systémique. Elle repose sur l'appréhension d'un certain nombre de notions tels que : système, interaction, rétroaction, régulation, organisation, finalité, vision globale, évolution, etc.

Cette démarche se concrétise dans le processus de modélisation, lequel va de l'élaboration de modèles qualitatifs utilisant largement le langage graphique en forme de "cartes", à la construction de modèles quantifiés et dynamiques, opérables sur ordinateur et débouchant sur la simulation. Par la simulation, il est possible de tester un certain nombre de scénarios alternatifs, situés chacun dans le champ des possibles, et de nourrir ainsi une réflexion prospective qui ne soit pas seulement hypothétique et subjective. (DONNADIEU, et al., 2002)

2. Validation expérimentale du modèle numérique

Il est souvent recommandé de faire une validation du modèle numérique. Cette validation peut se faire en deux façons : analytique ou expérimentale.

La validation analytique a pour objective de comparer les résultats obtenus à partir du modèle développé avec un modèle analytique. Dans notre cas, l'élaboration de ce modèle analytique est

impossible à causes des différents phénomènes qui entrent en jeu lors de l'évaluation du confort thermique.

La validation expérimentale consiste à comparer les résultats théoriques avec des valeurs obtenues par expérience. Cette méthode est faisable en utilisant des appareils de mesure adéquats tels qu'une station météorologique, ENERCO (403 ou 407) du CIMEL ELECTRONIQUE, pour la modélisation qualitative et des appareils d'acquisition de données à l'intérieur du bâtiment nécessaires pour l'évaluation du confort thermique.



Conclusion

Le confort se définit par la sensation que ressent chaque individu par rapport à la température et l'humidité. Le but de la présente étude est d'évaluer l'apport des solutions passives pour le maintien du confort hygrométrique : cas d'un bâtiment universitaire. L'étude s'est focalisée sur l'analyse de l'ambiance intérieure dans deux zones différentes : salle de classe et laboratoire informatique.

L'analyse bioclimatique a permis d'énumérer différentes zones de contrôle potentiel (zone de confort, zone de contrôle potentiel pour les saisons froides et zones de contrôle potentiel pour les périodes chaudes) pour la ville d'Antananarivo en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant. La présence d'une ambiance inconfortable a été constatée pendant la saison froide.

L'étude a aussi pour objectif la prospection de solutions passives pour maintenir une ambiance confortable dans les deux zones. Pour atteindre cet objectif, une analyse des phénomènes ayant impact sur le confort thermique a été faite. Les phénomènes considérés sont les phénomènes psychologiques, physiologiques et physiques. Cette analyse a permis de voir des solutions naturelles pour améliorer l'ambiance dans ces zones.

Les résultats ont stipulé que l'isolation des enveloppes permet d'améliorer l'ambiance dans les zones étudiées. En effet, un bâtiment isolé présente un nombre d'heures de confort trois fois plus élevé qu'un bâtiment ordinaire. L'apport thermique de ces solutions passives est important. L'isolation des enveloppes permet de diminuer significativement la consommation d'énergie. Toutefois, un problème de condensation se pose dans les deux zones, ce qui nécessitera l'utilisation d'une source d'énergie d'appoint.

Les relations de la consommation d'énergie avec les problèmes d'environnement (rejets polluants, transport des combustibles, etc.) et souvent avec le confort du personnel incitent de plus en plus à maîtriser au mieux l'utilisation de l'énergie, c'est-à-dire à l'analyser en vue de procéder aux choix les mieux appropriés à chacun des cas. L'application des solutions naturelles pour le maintien du confort hygrométrique contribue à l'instauration d'un développement durable. Pour satisfaire aux exigences (sociales, économiques, environnementales) de ce développement qui se veut être durable, pour les travaux futurs, l'utilisation d'une démarche systémique et la validation expérimentale du modèle numérique sont conseillés.

Références bibliographiques

1. **AFME (Agence Française pour la Maîtrise d'Energie). 1988.** Conception thermique de l'habitat guide pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. EDISUD.
2. **ANDRIANIAINA, Harimalala. 2007.** *Modelisation de l'habitat type Tsipoy du trano gasy vaovao dans la région d'Antananarivo - Recherche de solutions passives.* s.l. : Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Formation doctorale en physique.
3. **ASHRAE. 1997.** *ASHRAE handbook and fundamentals.* Atlanta : SI edition.
4. **BALARAS, C. 1996.** *The role of thermal mass on cooling load of buildings. An overview of computational methods.* s.l. : Energy and Buildings. Vol 24.
5. **BLOCH-LAINE., J M. 1979.** *Construire avec le Climat.* Paris : Ministère de l'environnement et du cadre de vie.
6. **CANDAS, Victor. 1998.** *Confort thermique.* In: *Génie énergétique.* Paris : Les techniques de l'ingénieur.
7. **Centre de recherche en architecture et en urbanisme (CRAU) en collaboration avec l'université des nations unis (UNU). 1988.** *Village solaire intégré.* s.l. : OPU.
8. **Comité Territorial pour la Maîtrise de l'Energie. 2006.** *Opération de qualification de la qualité thermique et des performances énergétiques des logements neufs.* Nouvelle Calédonie : Cahier de prescriptions techniques et de recommandations.
9. **DEPEKECKER, Patrick. 1985.** Constitution et modes de transfert d'un savoir scientifique dans le champs de l'architecture : le cas de la thermique.
10. **DONNADIEU, Gérard et KARSKY, Michel. 2002.** *La systémique, penser et agir dans la complexité.* s.l. : Editions Liaison.
11. **GAUZIN-MULLER, Dominique. 2002.** *L'architecture écologique.* Paris : LE MONITEUR, 2002.
12. **GIVONI, Baruch. 1978.** *L'homme, l'architecture et le climat.* s.l. : Moniteur, 1978.
13. **google earth. 2012.**
14. **LAVIGNE, Pierre et Al. 1998.** *l'architecture climatique : une contribution au développement durable. tome2: Concepts et dispositifs.* Aix en Provence France : EDISUD.
15. **LAVIGNE, Pierre, BREJON, Paul et FERNANDEZ, Pierre. 1994.** *Architecture climatique: une contribution au développement durable. TOME1: Base physique.* Aix en Provence : s.n.

16. **NARCON, Sandrine. 2001.** *Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire- Contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort.* Paris : Ecole Pratique des Hautes Etudes.
17. **PARSONS, Ken. 2003.** *Human thermal environment.* London : Taylor & Francis.
18. **RAKOTOMALALA, Minoson et Al. 2007.** *Transfert de technologie et estimation des besoins prioritaires dans le cadre des changements climatiques.* Antananarivo : CCNUCC.
19. **ROSENFELD, A H et al. 1995.** *Mitigation of urban heat island : materials unity programs, and updates.* s.l. : Energy and Buildings. pp. 255-265. Vol. 22.
20. **SALAH, Eben. 1989.** *Impact of thermal insulation location on building in hot dry climates.* s.l. : King Saud University, Department of Architecture and building sciences.
21. **SILDER, Olivier. 2003.** *L'inertie thermique en climat méditerranéen: Confort et consommation d'énergie.* Montpellier .
22. **SZOKOLAY, Steeve et Al. 1980.** *Environmental science handbook for architects and builder.* Lacastre, London, New York : The construction press.
23. **THELLIER, Françoise. 1999.** *L'homme et son environnement thermique - Modélisation.* Toulouse : Université Paul Sabatier.

Référence webographique :

1. **JIRAMA. 2008.** Tarification - électricité. *Site Web JIRAMA.* [En ligne]. [Citation : 22 Décembre 2011.] <http://www.jirama.mg>.

ANNEXESAnnexe 1 : Données météorologiques (2009)Statistics for MDG_Antananarivo.670830_IWEC

Location : ANTANANARIVO - MDG {S 18° 47'} {E 47° 28'} {GMT +3.0 Hours}

Elevation : 1276m above sea level

Standard Pressure at Elevation : 86906Pa

Data Source : IWEC Data

WMO Station 670830

Using Design Conditions from "Climate Design Data 2009 ASHRAE Handbook" :

- If the design condition source is ASHRAE, the design conditions are carefully generated
- from a period of record (typically 30 years) to be representative of that location and
- be suitable for use in heating/cooling load calculations. If the source is not ASHRAE,
- please consult the referenced source for the reasoning behind the data.

Monthly Statistics for Dry Bulb temperatures °C

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Maximum	29.5	29.3	29.4	28.6	26.0	26.1	22.9	23.5	27.5	28.8	29.8	29.0
Minimum	13.8	16.0	15.8	10.5	10.6	8.4	6.7	5.8	9.1	9.6	11.0	14.8
Daily Avg	20.8	20.6	21.0	19.5	17.4	15.4	14.4	14.6	16.7	18.7	20.8	20.4

- Maximum Dry Bulb temperature of 29.8°C on Nov 1
- Minimum Dry Bulb temperature of 5.8°C on Aug 2

Monthly Statistics for Dew Point temperatures °C

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Maximum	19.2	19.0	19.0	19.5	15.9	22.8	13.2	17.1	15.7	18.0	18.9	19.0
Minimum	10.4	14.7	7.0	7.8	8.4	5.5	3.7	5.4	5.0	5.0	2.6	9.0
Daily Avg	16.7	17.2	16.4	15.2	13.1	11.6	9.7	10.1	11.4	12.3	13.3	15.8

- Maximum Dew Point temperature of 22.8°C on Jun 7

- Minimum Dew Point temperature of 2.6°C on Nov 21

Monthly Statistics for Relative Humidity %

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Maximum	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100	100	100
Minimum	37	45	25	36	34	37	33	34	33	25	22	33
Daily Avg	80	82	76	78	77	80	75	77	73	70	66	77

Monthly Indicators for Precipitation/Moisture (kPa)

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1.8	2.0	1.8	1.7	1.4	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.7

Monthly Wind Direction % {N=0 or 360,E=90,S=180,W=270}

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
North	27	13	38	12	21	29	26	22	19	8	38	28
NorthEast	15	10	6	8	7	1	1	2	3	3	8	24
East	30	42	35	43	38	46	46	40	58	47	30	15
SouthEast	10	17	1	20	18	13	18	26	13	18	8	7
South	4	10	6	16	14	10	6	10	6	10	2	15
SouthWest	4	2	0	0	1	0	0	0	1	8	1	5
West	4	3	9	0	1	0	1	0	0	6	8	5
NorthWest	6	2	4	0	0	0	1	0	0	1	7	1

Monthly Statistics for Wind Speed m/s

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Maximum	13.4	10.8	7.2	8.2	8.7	7.2	8.7	13.4	8.7	9.8	7.2	12.9
Minimum	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Daily Avg	3.3	3.7	1.7	2.9	2.4	1.8	2.1	2.7	3.1	4.5	1.9	3.8

- Maximum Wind Speed of 13.4 m/s on Jan 4
- Minimum Wind Speed of 0.0 m/s on Jan 1

Monthly Statistics for Solar Radiation (Direct Normal, Diffuse, Global Horizontal) Wh/m²

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Direct Avg	2567	1492	2660	2973	2795	2802	3453	3868	4675	4502	4266	2480
Direct Max	8325	4580	7329	7307	5518	7166	7077	7421	8108	8921	8938	7962
Diffuse Avg	3606	3728	3166	2620	2255	1946	1923	2157	2308	2860	3215	3713
Global Avg	5589	4916	5088	4558	3923	3528	3948	4633	5635	6281	6524	5663

- Maximum Direct Normal Solar of 8938 Wh/m² on Nov 20

Monthly Calculated "undisturbed" Ground Temperatures** °C

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.5 m	20.1	21.1	21.4	21.1	19.7	18.1	16.7	15.6	15.4	15.9	17.1	18.6
2.0 m	19.2	20.1	20.6	20.6	19.8	18.7	17.6	16.6	16.1	16.3	17.0	18.0
4.0 m	18.6	19.3	19.8	19.9	19.6	19.0	18.2	17.4	16.9	16.8	17.2	17.8

- **These ground temperatures should NOT BE USED in the GroundTemperatures object to compute building floor losses.
- The temperatures for 0.5 m depth can be used for GroundTemperatures:Surface.
- The temperatures for 4.0 m depth can be used for GroundTemperatures:Deep.
- Calculations use a standard soil diffusivity of 2.3225760E-03 {m**2/day}

Climate type "Csb" (Köppen classification)** :

Mediterranean climate (dry warm summer, mild winter, lat. 30-45°S)

- **Note that the Köppen classification shown here is derived algorithmically from the source weather data.
- It may not be indicative of the long term climate for this location.

Climate type "3A" (ASHRAE Standards 90.1-2004 and 90.2-2004 Climate Zone)** :

Warm - Humid, Probable Köppen classification=Cfa, Humid Subtropical (Warm Summer)

- **Note that the ASHRAE classification shown here is derived algorithmically from the source weather data.
- It may not be indicative of the long term climate for this location.

Typical/Extreme Period Determination

- Summer is Jan:Mar

Extreme Summer Week (nearest maximum temperature for summer)

Extreme Hot Week Period selected: Mar 19:Mar 25, Maximum Temp= 29.50°C, Deviation=| 7.588|°C

Typical Summer Week (nearest average temperature for summer)

Typical Week Period selected: Feb 12:Feb 18, Average Temp= 20.81°C, Deviation=| 0.055|°C

- Winter is Jul:Sep

Extreme Winter Week (nearest minimum temperature for winter)

Extreme Cold Week Period selected: Jul 29:Aug 4, Minimum Temp= 5.80°C, Deviation=| 7.485|°C

Typical Winter Week (nearest average temperature for winter)

Typical Week Period selected: Jul 8:Jul 14, Average Temp= 15.20°C, Deviation=| 0.074|°C

➤ Autumn is Apr:Jun

Typical Autumn Week (nearest average temperature for autumn)

Typical Week Period selected: May 20:May 26, Average Temp= 17.46°C, Deviation=| 0.035|°C

➤ Spring is Oct:Dec

Typical Spring Week (nearest average temperature for spring)

Typical Week Period selected: Oct 29:Nov 4, Average Temp= 19.96°C, Deviation=| 0.031|°C

Annexe 2 : Ambiance dans les 2 zones étudiées (bâtiment de base)

➤ **Labo-info**

Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air
	%	°C		%	°C		%	°C
29/07/2009 01:00	61,4	18,6	30/07/2009 15:00	42,8	20,6	01/08/2009 01:00	59,6	18,6
29/07/2009 02:00	62,9	18,4	30/07/2009 16:00	42,4	20,8	01/08/2009 02:00	57,8	18,3
29/07/2009 03:00	63,8	18,3	30/07/2009 17:00	42,9	20,7	01/08/2009 03:00	56,4	18,1
29/07/2009 04:00	64,5	18,2	30/07/2009 18:00	44,6	20,2	01/08/2009 04:00	55,4	17,9
29/07/2009 05:00	65,2	18,0	30/07/2009 19:00	46,1	20,0	01/08/2009 05:00	55,0	17,8
29/07/2009 06:00	65,9	17,9	30/07/2009 20:00	48,4	19,7	01/08/2009 06:00	55,2	17,6
29/07/2009 07:00	66,4	17,9	30/07/2009 21:00	51,1	19,4	01/08/2009 07:00	55,7	17,6
29/07/2009 08:00	67,0	17,9	30/07/2009 18:00	53,4	19,2	01/08/2009 08:00	57,1	17,6
29/07/2009 09:00	68,3	17,9	30/07/2009 19:00	54,4	19,0	01/08/2009 09:00	61,1	20,9
29/07/2009 10:00	68,1	18,1	30/07/2009 20:00	54,6	18,8	01/08/2009 10:00	77,6	21,5
29/07/2009 11:00	67,0	18,4	30/07/2009 21:00	54,7	18,6	01/08/2009 11:00	92,3	21,9
29/07/2009 12:00	65,2	18,8	30/07/2009 22:00	54,9	18,3	01/08/2009 12:00	100,0	22,4
29/07/2009 13:00	62,9	19,2	30/07/2009 23:00	55,0	18,0	01/08/2009 13:00	100,0	22,8
29/07/2009 14:00	59,5	19,7	31/07/2009	54,9	17,8	01/08/2009 14:00	100,0	23,0
29/07/2009 15:00	55,9	20,3	31/07/2009 01:00	54,6	17,6	01/08/2009 15:00	100,0	23,3
29/07/2009 16:00	54,1	20,4	31/07/2009 02:00	54,3	17,4	01/08/2009 16:00	100,0	23,3
29/07/2009 17:00	53,7	20,3	31/07/2009 03:00	54,1	17,2	01/08/2009 17:00	100,0	23,3
29/07/2009 18:00	54,8	19,9	31/07/2009 04:00	53,5	17,2	01/08/2009 18:00	100,0	23,2
29/07/2009 19:00	55,9	19,7	31/07/2009 05:00	55,6	20,9	01/08/2009 19:00	98,9	20,2
29/07/2009 20:00	57,2	19,5	31/07/2009 06:00	70,8	21,4	01/08/2009 20:00	94,4	19,3
29/07/2009 21:00	58,8	19,2	31/07/2009 07:00	88,5	22,0	01/08/2009 21:00	79,7	18,8
29/07/2009 22:00	60,2	19,1	31/07/2009 08:00	98,6	22,7	01/08/2009 22:00	70,5	18,5
29/07/2009 23:00	60,9	18,9	31/07/2009 09:00	100,0	23,4	01/08/2009 23:00	65,6	18,2
30/07/2009	60,9	18,8	31/07/2009 10:00	100,0	24,0	02/08/2009	62,1	17,9
30/07/2009 01:00	61,0	18,5	31/07/2009 11:00	100,0	24,4	02/08/2009 01:00	59,4	17,6
30/07/2009 02:00	60,7	18,2	31/07/2009 12:00	100,0	24,7	02/08/2009 02:00	57,4	17,3
30/07/2009 03:00	60,1	18,0	31/07/2009 13:00	100,0	24,6	02/08/2009 03:00	55,6	17,0
30/07/2009 04:00	59,4	17,7	31/07/2009 14:00	100,0	24,3	02/08/2009 04:00	53,7	16,9
30/07/2009 05:00	58,6	17,5	31/07/2009 15:00	98,8	21,3	02/08/2009 05:00	52,4	16,7
30/07/2009 06:00	58,1	17,3	31/07/2009 16:00	94,0	20,4	02/08/2009 06:00	51,3	16,5
30/07/2009 07:00	57,7	17,3	31/07/2009 17:00	78,6	19,8	02/08/2009 07:00	50,9	16,5
30/07/2009 08:00	57,0	17,5	31/07/2009 18:00	69,4	19,5	02/08/2009 08:00	50,8	16,5
30/07/2009 09:00	56,6	17,8	31/07/2009 19:00	64,8	19,2	02/08/2009 09:00	53,3	20,2
30/07/2009 10:00	55,8	18,0	31/07/2009 20:00	61,8	18,9	02/08/2009 10:00	68,4	20,8
30/07/2009 11:00	53,8	18,5	31/07/2009 21:00	42,8	20,6	02/08/2009 11:00	79,6	21,4
30/07/2009 12:00	50,5	19,1	31/07/2009 22:00	42,4	20,8	02/08/2009 12:00	93,0	22,1
30/07/2009 13:00	46,9	19,7	31/07/2009 23:00	42,9	20,7	02/08/2009 13:00	99,7	22,8
30/07/2009 14:00	44,4	20,2	01/08/2009	44,6	20,2	02/08/2009 14:00	100,0	23,5

Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air
	%	°C		%	°C		%	°C
02/08/2009 15:00	100,0	24,1	03/08/2009 10:00	72,8	21,6	04/08/2002 05:00	51,2	17,1
02/08/2009 16:00	100,0	24,4	03/08/2002 11:00	91,2	22,2	04/08/2002 06:00	50,7	16,9
02/08/2009 17:00	100,0	24,4	03/08/2002 12:00	99,7	22,9	04/08/2002 07:00	50,2	17,0
02/08/2009 18:00	100,0	24,1	03/08/2009 13:00	100,0	23,5	04/08/2002 08:00	49,9	17,2
02/08/2009 19:00	98,7	21,1	03/08/2009 14:00	100,0	24,0	04/08/2002 09:00	53,3	20,9
02/08/2009 20:00	93,6	20,1	03/08/2009 15:00	100,0	24,5	04/08/2002 10:00	69,3	21,5
02/08/2009 21:00	79,1	19,6	03/08/2002 16:00	100,0	24,7	04/08/2002 11:00	87,6	22,1
02/08/2009 22:00	69,8	19,2	03/08/2002 17:00	100,0	24,7	04/08/2002 12:00	99,0	22,9
02/08/2009 23:00	64,0	18,8	03/08/2002 18:00	100,0	24,4	04/08/2002 13:00	100,0	23,5
03/08/2009	60,3	18,5	03/08/2002 19:00	98,6	21,4	04/08/2002 14:00	100,0	24,0
03/08/2009 01:00	57,9	18,2	03/08/2002 20:00	93,0	20,4	04/08/2002 15:00	100,0	24,4
03/08/2009 02:00	56,4	17,9	03/08/2009 21:00	78,0	19,8	04/08/2002 16:00	100,0	24,7
03/08/2009 03:00	55,3	17,6	03/08/2009 22:00	68,4	19,4	04/08/2002 17:00	100,0	24,7
03/08/2009 04:00	54,6	17,4	03/08/2009 23:00	62,4	19,0	04/08/2002 18:00	100,0	24,5
03/08/2009 05:00	54,3	17,3	04/08/2009	58,5	18,7	04/08/2002 19:00	98,6	21,5
03/08/2009 06:00	54,8	17,2	04/08/2002 01:00	55,9	18,3	04/08/2002 20:00	93,1	20,5
03/08/2009 07:00	55,1	17,2	04/08/2002 02:00	54,2	18,0	04/08/2002 21:00	78,4	20,0
03/08/2009 08:00	54,9	17,3	04/08/2002 03:00	52,9	17,7	04/08/2002 22:00	69,4	19,6
03/08/2009 09:00	57,1	21,1	04/08/2002 04:00	51,9	17,4	04/08/2002 23:00	64,0	19,3
						05/08/2002	60,6	19,0

➤ **Salle d'énergétique**

Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air
	%	°C		%	°C		%	°C
29/07/2009 01:00	61,1	18,7	29/07/2009 17:00	54,1	20,2	30/07/2009 09:00	56,1	18,0
29/07/2009 02:00	62,5	18,5	29/07/2009 18:00	55,0	19,8	30/07/2009 10:00	54,3	18,3
29/07/2009 03:00	63,4	18,4	29/07/2009 19:00	55,9	19,7	30/07/2009 11:00	51,0	18,9
29/07/2009 04:00	64,2	18,3	29/07/2009 20:00	57,1	19,5	30/07/2009 12:00	47,4	19,5
29/07/2009 05:00	64,9	18,1	29/07/2009 21:00	58,6	19,3	30/07/2009 13:00	44,9	20,0
29/07/2009 06:00	65,6	18,0	29/07/2009 22:00	60,0	19,1	30/07/2009 14:00	43,3	20,4
29/07/2009 07:00	66,2	17,9	29/07/2009 23:00	60,6	19,0	30/07/2009 15:00	42,9	20,6
29/07/2009 08:00	66,9	17,9	30/07/2009	60,6	18,8	30/07/2009 16:00	43,2	20,5
29/07/2009 09:00	68,2	17,9	30/07/2009 01:00	60,7	18,6	30/07/2009 17:00	44,6	20,2
29/07/2009 10:00	68,3	18,1	30/07/2009 02:00	60,3	18,4	30/07/2009 18:00	46,1	20,0
29/07/2009 11:00	67,5	18,3	30/07/2009 03:00	59,6	18,1	30/07/2009 19:00	48,3	19,7
29/07/2009 12:00	65,8	18,7	30/07/2009 04:00	58,9	17,9	30/07/2009 20:00	51,0	19,5
29/07/2009 13:00	63,6	19,0	30/07/2009 05:00	58,2	17,6	30/07/2009 21:00	53,2	19,3
29/07/2009 14:00	60,2	19,5	30/07/2009 06:00	57,6	17,4	30/07/2009 22:00	54,2	19,1
29/07/2009 15:00	56,6	20,1	30/07/2009 07:00	57,3	17,4	30/07/2009 23:00	54,4	18,9
29/07/2009 16:00	54,7	20,3	30/07/2009 08:00	56,9	17,5	31/07/2009	56,1	18,0

Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air
	%	°C		%	°C		%	°C
31/07/2009 01:00	54,5	18,7	01/08/2009 17:00	100,0	22,7	03/08/2009 09:00	55,8	20,5
31/07/2009 02:00	54,7	18,4	01/08/2009 18:00	100,0	22,7	03/08/2009 10:00	67,6	21,1
31/07/2009 03:00	54,7	18,1	01/08/2009 19:00	98,9	20,1	03/08/2009 11:00	81,7	21,6
31/07/2009 04:00	54,6	17,9	01/08/2009 20:00	93,9	19,3	03/08/2009 12:00	90,2	22,3
31/07/2009 05:00	54,4	17,7	01/08/2009 21:00	79,2	18,8	03/08/2009 13:00	97,9	22,9
31/07/2009 06:00	54,1	17,4	01/08/2009 22:00	70,1	18,6	03/08/2009 14:00	100,0	23,4
31/07/2009 07:00	53,9	17,3	01/08/2009 23:00	65,2	18,3	03/08/2009 15:00	100,0	23,9
31/07/2009 08:00	53,6	17,2	02/08/2009	61,6	18,0	03/08/2009 16:00	100,0	24,1
31/07/2009 09:00	54,1	20,3	02/08/2009 01:00	59,0	17,7	03/08/2009 17:00	100,0	24,2
31/07/2009 10:00	65,4	20,8	02/08/2009 02:00	56,9	17,4	03/08/2009 18:00	100,0	24,0
31/07/2009 11:00	78,9	21,4	02/08/2009 03:00	55,1	17,2	03/08/2009 19:00	98,4	21,3
31/07/2009 12:00	87,5	22,1	02/08/2009 04:00	53,4	17,0	03/08/2009 20:00	92,0	20,4
31/07/2009 13:00	96,1	22,7	02/08/2009 05:00	52,0	16,8	03/08/2009 21:00	77,0	19,9
31/07/2009 14:00	100,0	23,3	02/08/2009 06:00	51,0	16,6	03/08/2009 22:00	67,5	19,5
31/07/2009 15:00	100,0	23,8	02/08/2009 07:00	50,7	16,5	03/08/2009 23:00	61,5	19,2
31/07/2009 16:00	100,0	24,1	02/08/2009 08:00	50,7	16,6	04/08/2009	57,7	18,9
31/07/2009 17:00	100,0	24,1	02/08/2009 09:00	51,9	19,7	04/08/2002 01:00	55,2	18,5
31/07/2009 18:00	100,0	23,9	02/08/2009 10:00	63,5	20,3	04/08/2002 02:00	53,4	18,2
31/07/2009 19:00	98,8	21,2	02/08/2009 11:00	72,0	20,8	04/08/2002 03:00	52,2	17,9
31/07/2009 20:00	93,4	20,4	02/08/2009 12:00	82,1	21,5	04/08/2002 04:00	51,2	17,6
31/07/2009 21:00	78,0	19,9	02/08/2009 13:00	88,7	22,1	04/08/2002 05:00	50,6	17,4
31/07/2009 22:00	68,9	19,6	02/08/2009 14:00	95,1	22,8	04/08/2002 06:00	50,0	17,1
31/07/2009 23:00	64,3	19,3	02/08/2009 15:00	99,5	23,4	04/08/2002 07:00	49,8	17,1
01/08/2009	61,4	19,0	02/08/2009 16:00	100,0	23,8	04/08/2002 08:00	49,8	17,2
01/08/2009 01:00	59,2	18,7	02/08/2009 17:00	100,0	23,9	04/08/2002 09:00	51,9	20,4
01/08/2009 02:00	57,4	18,5	02/08/2009 18:00	100,0	23,7	04/08/2002 10:00	64,0	21,0
01/08/2009 03:00	56,0	18,2	02/08/2009 19:00	98,6	21,0	04/08/2002 11:00	78,2	21,5
01/08/2009 04:00	55,1	18,0	02/08/2009 20:00	92,7	20,2	04/08/2002 12:00	89,1	22,3
01/08/2009 05:00	54,8	17,8	02/08/2009 21:00	78,1	19,7	04/08/2002 13:00	96,6	22,9
01/08/2009 06:00	55,0	17,7	02/08/2009 22:00	68,9	19,3	04/08/2002 14:00	99,9	23,4
01/08/2009 07:00	55,5	17,6	02/08/2009 23:00	63,2	19,0	04/08/2002 15:00	100,0	23,8
01/08/2009 08:00	57,1	17,6	03/08/2009	59,5	18,7	04/08/2002 16:00	100,0	24,1
01/08/2009 09:00	59,5	20,5	03/08/2009 01:00	57,1	18,4	04/08/2002 17:00	100,0	24,2
01/08/2009 10:00	72,7	21,0	03/08/2009 02:00	55,6	18,1	04/08/2002 18:00	100,0	24,0
01/08/2009 11:00	84,6	21,4	03/08/2009 03:00	54,6	17,8	04/08/2002 19:00	98,4	21,4
01/08/2009 12:00	98,8	21,7	03/08/2009 04:00	53,9	17,6	04/08/2002 20:00	92,2	20,5
01/08/2009 13:00	100,0	22,1	03/08/2009 05:00	53,8	17,5	04/08/2002 21:00	77,5	20,0
01/08/2009 14:00	100,0	22,4	03/08/2009 06:00	54,4	17,3	04/08/2002 22:00	68,7	19,7
01/08/2009 15:00	100,0	22,6	03/08/2009 07:00	54,8	17,2	04/08/2002 23:00	63,3	19,4
01/08/2009 16:00	100,0	22,7	03/08/2009 08:00	54,8	17,4	05/08/2002	60,0	19,1

Annexe 3 : Ambiance dans les 2 zones étudiées (bâtiment modifié)

➤ **Labo-info**

Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air
	%	°C		%	°C		%	°C
29/07/2009 01:00	55,8	20,2	30/07/2009 18:00	40,4	21,8	01/08/2009 07:00	48,8	19,7
29/07/2009 02:00	56,9	20,0	30/07/2009 19:00	42,8	21,3	01/08/2009 08:00	49,8	19,7
29/07/2009 03:00	57,6	19,9	30/07/2009 20:00	45,0	21,0	01/08/2009 09:00	55,0	22,4
29/07/2009 04:00	58,2	19,8	30/07/2009 21:00	46,8	20,8	01/08/2009 10:00	69,0	23,2
29/07/2009 05:00	58,7	19,7	30/07/2009 18:00	49,1	20,6	01/08/2009 11:00	82,1	23,7
29/07/2009 06:00	59,3	19,6	30/07/2009 19:00	49,9	20,4	01/08/2009 12:00	98,3	24,1
29/07/2009 07:00	59,7	19,6	30/07/2009 20:00	49,9	20,3	01/08/2009 13:00	100,0	24,5
29/07/2009 08:00	60,3	19,6	30/07/2009 21:00	49,8	20,1	01/08/2009 14:00	100,0	24,7
29/07/2009 09:00	61,7	19,5	30/07/2009 22:00	49,8	19,9	01/08/2009 15:00	100,0	24,9
29/07/2009 10:00	61,7	19,8	30/07/2009 23:00	49,6	19,7	01/08/2009 16:00	100,0	25,0
29/07/2009 11:00	60,7	20,1	31/07/2009	49,3	19,5	01/08/2009 17:00	100,0	25,0
29/07/2009 12:00	58,8	20,5	31/07/2009 01:00	49,0	19,3	01/08/2009 18:00	100,0	24,9
29/07/2009 13:00	56,6	21,0	31/07/2009 02:00	48,6	19,1	01/08/2009 19:00	98,4	22,4
29/07/2009 14:00	53,4	21,5	31/07/2009 03:00	48,4	19,0	01/08/2009 20:00	92,3	21,4
29/07/2009 15:00	50,2	22,0	31/07/2009 04:00	48,1	19,0	01/08/2009 21:00	75,2	20,9
29/07/2009 16:00	48,3	22,2	31/07/2009 05:00	50,8	21,9	01/08/2009 22:00	64,6	20,7
29/07/2009 17:00	48,3	22,0	31/07/2009 06:00	62,7	22,7	01/08/2009 23:00	59,0	20,4
29/07/2009 18:00	49,7	21,5	31/07/2009 07:00	77,6	23,5	02/08/2009	55,0	20,1
29/07/2009 19:00	51,2	21,1	31/07/2009 08:00	87,2	24,2	02/08/2009 01:00	52,2	19,9
29/07/2009 20:00	52,5	20,8	31/07/2009 09:00	96,8	24,9	02/08/2009 02:00	49,9	19,6
29/07/2009 21:00	54,1	20,6	31/07/2009 10:00	100,0	25,4	02/08/2009 03:00	48,2	19,4
29/07/2009 22:00	55,3	20,4	31/07/2009 11:00	100,0	25,9	02/08/2009 04:00	46,6	19,2
29/07/2009 23:00	55,8	20,3	31/07/2009 12:00	100,0	26,1	02/08/2009 05:00	45,4	19,0
30/07/2009	55,6	20,2	31/07/2009 13:00	100,0	26,0	02/08/2009 06:00	44,5	18,7
30/07/2009 01:00	55,5	20,0	31/07/2009 14:00	100,0	25,7	02/08/2009 07:00	44,2	18,7
30/07/2009 02:00	55,0	19,8	31/07/2009 15:00	98,4	23,2	02/08/2009 08:00	44,3	18,7
30/07/2009 03:00	54,3	19,6	31/07/2009 16:00	92,5	22,1	02/08/2009 09:00	48,3	21,7
30/07/2009 04:00	53,4	19,4	31/07/2009 17:00	75,1	21,6	02/08/2009 10:00	60,9	22,6
30/07/2009 05:00	52,6	19,2	31/07/2009 18:00	64,6	21,3	02/08/2009 11:00	70,6	23,3
30/07/2009 06:00	52,0	19,0	31/07/2009 19:00	59,2	21,1	02/08/2009 12:00	82,4	24,0
30/07/2009 07:00	51,7	19,0	31/07/2009 20:00	55,7	20,9	02/08/2009 13:00	90,3	24,6
30/07/2009 08:00	51,2	19,2	31/07/2009 21:00	53,1	20,6	02/08/2009 14:00	97,6	25,3
30/07/2009 09:00	50,9	19,4	31/07/2009 22:00	51,1	20,4	02/08/2009 15:00	100,0	25,8
30/07/2009 10:00	50,2	19,7	31/07/2009 23:00	49,6	20,2	02/08/2009 16:00	100,0	26,1
30/07/2009 11:00	48,3	20,2	01/08/2009	48,7	20,0	02/08/2009 17:00	100,0	26,1
30/07/2009 12:00	45,2	20,8	01/08/2009 01:00	48,3	19,9	02/08/2009 18:00	100,0	25,7
30/07/2009 13:00	41,9	21,5	01/08/2009 02:00	48,4	19,7	02/08/2009 19:00	98,2	23,2
30/07/2009 14:00	39,7	21,9	01/08/2009 03:00	40,4	21,8	02/08/2009 20:00	91,9	22,0
30/07/2009 15:00	38,3	22,4	01/08/2009 04:00	42,8	21,3	02/08/2009 21:00	75,6	21,5
30/07/2009 16:00	38,1	22,5	01/08/2009 05:00	45,0	21,0	02/08/2009 22:00	65,1	21,1
30/07/2009 17:00	38,7	22,3	01/08/2009 06:00	46,8	20,8	02/08/2009 23:00	58,5	20,8

Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air
	%	°C		%	°C		%	°C
03/08/2009	54,0	20,6	03/08/2009 16:00	100,0	26,3	04/08/2002 08:00	43,1	19,5
03/08/2009 01:00	51,2	20,4	03/08/2009 17:00	100,0	26,3	04/08/2002 09:00	47,9	22,5
03/08/2009 02:00	49,4	20,2	03/08/2009 18:00	100,0	26,0	04/08/2002 10:00	61,2	23,4
03/08/2009 03:00	48,1	19,9	03/08/2009 19:00	97,8	23,5	04/08/2002 11:00	77,1	24,1
03/08/2009 04:00	47,3	19,7	03/08/2009 20:00	90,8	22,4	04/08/2002 12:00	89,8	24,8
03/08/2009 05:00	47,2	19,6	03/08/2009 21:00	74,0	21,8	04/08/2002 13:00	99,2	25,4
03/08/2009 06:00	47,6	19,4	03/08/2009 22:00	63,4	21,4	04/08/2002 14:00	100,0	25,9
03/08/2009 07:00	47,9	19,4	03/08/2009 23:00	56,5	21,1	04/08/2002 15:00	100,0	26,3
03/08/2009 08:00	47,9	19,5	04/08/2009	52,1	20,9	04/08/2002 16:00	100,0	26,4
03/08/2009 09:00	51,4	22,6	04/08/2002 01:00	49,1	20,7	04/08/2002 17:00	100,0	26,4
03/08/2009 10:00	64,2	23,4	04/08/2002 02:00	47,1	20,4	04/08/2002 18:00	100,0	26,2
03/08/2009 11:00	80,1	24,0	04/08/2002 03:00	45,6	20,1	04/08/2002 19:00	97,9	23,7
03/08/2009 12:00	90,1	24,7	04/08/2002 04:00	44,5	19,9	04/08/2002 20:00	90,8	22,6
03/08/2009 13:00	98,5	25,3	04/08/2002 05:00	43,8	19,7	04/08/2002 21:00	74,4	22,0
03/08/2009 14:00	100,0	25,8	04/08/2002 06:00	43,2	19,5	04/08/2002 22:00	64,2	21,7
03/08/2009 15:00	100,0	26,2	04/08/2002 07:00	43,2	19,4	04/08/2002 23:00	57,8	21,5
						05/08/2002	53,8	21,3

➤ **Salle d'énergétique**

Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air
	%	°C		%	°C		%	°C
29/07/2009 01:00	55,8	20,2	30/07/2009	55,6	20,2	30/07/2009 23:00	49,9	20,4
29/07/2009 02:00	56,9	20,0	30/07/2009 01:00	55,5	20,0	31/07/2009	49,9	20,3
29/07/2009 03:00	57,6	19,9	30/07/2009 02:00	55,0	19,8	31/07/2009 01:00	49,8	20,1
29/07/2009 04:00	58,2	19,8	30/07/2009 03:00	54,3	19,6	31/07/2009 02:00	49,8	19,9
29/07/2009 05:00	58,7	19,7	30/07/2009 04:00	53,4	19,4	31/07/2009 03:00	49,6	19,7
29/07/2009 06:00	59,3	19,6	30/07/2009 05:00	52,6	19,2	31/07/2009 04:00	49,3	19,5
29/07/2009 07:00	59,7	19,6	30/07/2009 06:00	52,0	19,0	31/07/2009 05:00	49,0	19,3
29/07/2009 08:00	60,3	19,6	30/07/2009 07:00	51,7	19,0	31/07/2009 06:00	48,6	19,1
29/07/2009 09:00	61,7	19,5	30/07/2009 08:00	51,2	19,2	31/07/2009 07:00	48,4	19,0
29/07/2009 10:00	61,7	19,8	30/07/2009 09:00	50,9	19,4	31/07/2009 08:00	48,1	19,0
29/07/2009 11:00	60,7	20,1	30/07/2009 10:00	50,2	19,7	31/07/2009 09:00	50,8	21,9
29/07/2009 12:00	58,8	20,5	30/07/2009 11:00	48,3	20,2	31/07/2009 10:00	62,7	22,7
29/07/2009 13:00	56,6	21,0	30/07/2009 12:00	45,2	20,8	31/07/2009 11:00	77,6	23,5
29/07/2009 14:00	53,4	21,5	30/07/2009 13:00	41,9	21,5	31/07/2009 12:00	87,2	24,2
29/07/2009 15:00	50,2	22,0	30/07/2009 14:00	39,7	21,9	31/07/2009 13:00	96,8	24,9
29/07/2009 16:00	48,3	22,2	30/07/2009 15:00	38,3	22,4	31/07/2009 14:00	100,0	25,4
29/07/2009 17:00	48,3	22,0	30/07/2009 16:00	38,1	22,5	31/07/2009 15:00	100,0	25,9
29/07/2009 18:00	49,7	21,5	30/07/2009 17:00	38,7	22,3	31/07/2009 16:00	100,0	26,1
29/07/2009 19:00	51,2	21,1	30/07/2009 18:00	40,4	21,8	31/07/2009 17:00	100,0	26,0
29/07/2009 20:00	52,5	20,8	30/07/2009 19:00	42,8	21,3	31/07/2009 18:00	100,0	25,7
29/07/2009 21:00	54,1	20,6	30/07/2009 20:00	45,0	21,0	31/07/2009 19:00	98,4	23,2
29/07/2009 22:00	55,3	20,4	30/07/2009 21:00	46,8	20,8	31/07/2009 20:00	92,5	22,1
29/07/2009 23:00	55,8	20,3	30/07/2009 22:00	49,1	20,6	31/07/2009 21:00	75,1	21,6

Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air	Date/Heure	Humidité relative	Temp d'air
	%	°C		%	°C		%	°C
31/07/2009 22:00	64,6	21,3	02/08/2009 07:00	44,2	18,7	03/08/2009 16:00	100,0	26,3
31/07/2009 23:00	59,2	21,1	02/08/2009 08:00	44,3	18,7	03/08/2009 17:00	100,0	26,3
01/08/2009	55,7	20,9	02/08/2009 09:00	48,3	21,7	03/08/2009 18:00	100,0	26,0
01/08/2009 01:00	53,1	20,6	02/08/2009 10:00	60,9	22,6	03/08/2009 19:00	97,8	23,5
01/08/2009 02:00	51,1	20,4	02/08/2009 11:00	70,6	23,3	03/08/2009 20:00	90,8	22,4
01/08/2009 03:00	49,6	20,2	02/08/2009 12:00	82,4	24,0	03/08/2009 21:00	74,0	21,8
01/08/2009 04:00	48,7	20,0	02/08/2009 13:00	90,3	24,6	03/08/2009 22:00	63,4	21,4
01/08/2009 05:00	48,3	19,9	02/08/2009 14:00	97,6	25,3	03/08/2009 23:00	56,5	21,1
01/08/2009 06:00	48,4	19,7	02/08/2009 15:00	100,0	25,8	04/08/2009	52,1	20,9
01/08/2009 07:00	48,8	19,7	02/08/2009 16:00	100,0	26,1	04/08/2002 01:00	49,1	20,7
01/08/2009 08:00	49,8	19,7	02/08/2009 17:00	100,0	26,1	04/08/2002 02:00	47,1	20,4
01/08/2009 09:00	55,0	22,4	02/08/2009 18:00	100,0	25,7	04/08/2002 03:00	45,6	20,1
01/08/2009 10:00	69,0	23,2	02/08/2009 19:00	98,2	23,2	04/08/2002 04:00	44,5	19,9
01/08/2009 11:00	82,1	23,7	02/08/2009 20:00	91,9	22,0	04/08/2002 05:00	43,8	19,7
01/08/2009 12:00	98,3	24,1	02/08/2009 21:00	75,6	21,5	04/08/2002 06:00	43,2	19,5
01/08/2009 13:00	100,0	24,5	02/08/2009 22:00	65,1	21,1	04/08/2002 07:00	43,2	19,4
01/08/2009 14:00	100,0	24,7	02/08/2009 23:00	58,5	20,8	04/08/2002 08:00	43,1	19,5
01/08/2009 15:00	100,0	24,9	03/08/2009	54,0	20,6	04/08/2002 09:00	47,9	22,5
01/08/2009 16:00	100,0	25,0	03/08/2009 01:00	51,2	20,4	04/08/2002 10:00	61,2	23,4
01/08/2009 17:00	100,0	25,0	03/08/2009 02:00	49,4	20,2	04/08/2002 11:00	77,1	24,1
01/08/2009 18:00	100,0	24,9	03/08/2009 03:00	48,1	19,9	04/08/2002 12:00	89,8	24,8
01/08/2009 19:00	98,4	22,4	03/08/2009 04:00	47,3	19,7	04/08/2002 13:00	99,2	25,4
01/08/2009 20:00	92,3	21,4	03/08/2009 05:00	47,2	19,6	04/08/2002 14:00	100,0	25,9
01/08/2009 21:00	75,2	20,9	03/08/2009 06:00	47,6	19,4	04/08/2002 15:00	100,0	26,3
01/08/2009 22:00	64,6	20,7	03/08/2009 07:00	47,9	19,4	04/08/2002 16:00	100,0	26,4
01/08/2009 23:00	59,0	20,4	03/08/2009 08:00	47,9	19,5	04/08/2002 17:00	100,0	26,4
02/08/2009	55,0	20,1	03/08/2009 09:00	51,4	22,6	04/08/2002 18:00	100,0	26,2
02/08/2009 01:00	52,2	19,9	03/08/2009 10:00	64,2	23,4	04/08/2002 19:00	97,9	23,7
02/08/2009 02:00	49,9	19,6	03/08/2009 11:00	80,1	24,0	04/08/2002 20:00	90,8	22,6
02/08/2009 03:00	48,2	19,4	03/08/2009 12:00	90,1	24,7	04/08/2002 21:00	74,4	22,0
02/08/2009 04:00	46,6	19,2	03/08/2009 13:00	98,5	25,3	04/08/2002 22:00	64,2	21,7
02/08/2009 05:00	45,4	19,0	03/08/2009 14:00	100,0	25,8	04/08/2002 23:00	57,8	21,5
02/08/2009 06:00	44,5	18,7	03/08/2009 15:00	100,0	26,2	05/08/2002	53,8	21,3

Annexe 4: Apports thermiques

➤ Bâtiment de base

Mois	Murs [kWh]	Plafonds (int) [kWh]	Cloisons (int) [kWh]	Toits [kWh]
Janvier	426,11	502,24	471,19	426,11
Février	272,37	371,26	296,62	272,37
Mars	535,58	546,47	539,58	535,58
Avril	332,75	322,40	217,70	332,75
Mai	157,22	111,92	-35,10	157,22
Juin	-3,09	-38,96	-241,83	-3,09
Juillet	-67,23	-63,65	-226,53	-67,23
Août	-80,20	-27,66	-168,18	-80,20
Septembre	125,99	242,28	168,41	125,99
Octobre	240,75	399,22	368,21	240,75
Novembre	497,90	670,86	710,76	497,90
Décembre	369,38	505,40	447,89	369,38

➤ Bâtiment modifié

Mois	Murs [kWh]	Plafonds (int) [kWh]	Cloisons (int) [kWh]	Toits [kWh]
Janvier	-66,18	117,26	105,39	-66,18
Février	-116,52	2,97	-60,99	-116,52
Mars	-34,51	130,59	138,69	-34,51
Avril	-102,44	-71,51	-161,91	-102,44
Mai	-164,28	-250,44	-381,38	-164,28
Juin	-208,17	-359,55	-547,46	-208,17
Juillet	-234,69	-366,10	-517,61	-234,69
Août	-251,51	-346,46	-470,52	-251,51
Septembre	-182,41	-116,74	-175,32	-182,41
Octobre	-157,57	-13,86	-32,53	-157,57
Novembre	-58,68	244,00	294,94	-58,68
Décembre	-115,61	61,66	13,80	-115,61

RESUME

Ce travail consiste à mettre en évidence l'apport des solutions passives à l'obtention du confort thermique hivernal dans une salle de classe et un laboratoire informatique d'un bâtiment universitaire. L'évaluation du confort est effectuée en projetant les couples (température de l'air ambiant, humidité), issue de la modélisation sous DesignBuilder du bâtiment, sur le diagramme bioclimatique de la région d'Antananarivo.

Mots clés : confort, solutions passives, température, humidité, bioclimatique, isolation, simulation, DesignBuilder.

ABSTRACT

The aim of this work is to highlight the passive solutions' contribution in obtaining winter thermal comfort in a classroom and an informatics laboratory at the university. The comfort valuation was done by making the coordinates (temperature, humidity) out the bioclimatic diagram of Antananarivo. These coordinates was obtained by modelling the house in DesignBuilder.

Key words: comfort, passive solutions, temperature, humidity, bioclimatic diagram, isolation, simulation, DesignBuilder.