



# CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DES OUTILS DE CALCUL DES CHARGES DE CLIMATISATION EN REGION TROPICALE

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

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 29 octobre 2015 par :

**Aristide Bopahbé KAGONBE**

**Travaux dirigés par :**

**Dr Kokouvi Edem N'TSOUKPOE**

Enseignant-Chercheur, Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE).

**Dr Adamah MESSAN**

Enseignant-Chercheur, Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC).

**Dr Sayon SIDIBE**

Enseignant-Chercheur, Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB).

LABORATOIRE ENERGIE SOLAIRE ET ECONOMIE D'ENERGIE (LESEE)

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Pr. Yézouma COULIBALY**

Membres et correcteurs : **Dr. K. Edem N'TSOUKPOE**  
**Ing. Francis SEMPORE**

**Promotion [2014/2015]**

## DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- ❖ Ma mère KOUCAKBA Passiri Marie et mon père BOUHPABE Patchanne Théophile pour leur éducation indispensable à ma réussite
- ❖ Ma grande sœur FOYAHBE Megie Nadège.
- ❖ Ma petite sœur KOUYABE Sandrine.
- ❖ Mes amis GBEULEUBE Méthone et ANON Amos.
- ❖ A mes frères, sœurs et amis,

## REMERCIEMENT

Aujourd'hui si nous arrivons au terme de notre travail, c'est bien grâce à la collaboration et au soutien de plusieurs personnes que nous tenons à remercier sincèrement. Ces remerciements s'adressent à:

- ✓ Monsieur **Daniel YAMEGUEU** le chef du Laboratoire LESEE ;
- ✓ Mes encadreurs **Dr Kokouvi Edem N'TSOUKPOE**; **Dr Adamah MESSAN** et **Dr Sayon SIDIBE** pour leur disponibilité, leurs compétences scientifiques et leurs conseils qui ont été d'un précieux secours sur tout plan lors du déroulement de mon stage ;
- ✓ Aux membres du personnel du laboratoire LESEE pour leur gentillesse et leur soutien ;
- ✓ A la DDC pour les allocations de ce stage ;
- ✓ Au corps professoral qui s'est engagé à nous accompagner jusqu'à la fin de nos études en nous donnant des bases indispensables pour l'accomplissement de ce travail;
- ✓ Mes amis et frères de promotion pour les agréables moments passés ensemble durant les deux années d'études ;
- ✓ A tous ceux qui m'ont porté dans la prière.

Finir mes études, c'est vraiment le fruit de vos efforts.

Merci à tous.

## RÉSUMÉ

L'inertie thermique constitue un atout essentiel pour stocker l'énergie reçue par le bâtiment et la restituer quand cela est nécessaire. Elle permet d'emmagasiner les apports du rayonnement solaire afin de réduire la charge de la climatisation. Une exploitation optimale de l'inertie passe par une sélection appropriée des matériaux de construction depuis la phase de conception. Cette étude a consisté à élaborer un outil de calcul des charges thermiques en prenant en compte l'inertie thermique et à fournir des éléments d'analyse économique dans le choix des matériaux de construction. Nous avons tout d'abord étudié et appliqué quelques outils de calcul de bilan thermique qu'utilisent les bureaux d'études. Il ressort de cette étude que les bilans thermiques obtenus conduisent à des résultats disparates. L'évaluation d'un bilan thermique sur un bâtiment de 12 m<sup>2</sup> construit en BTC, conduit à une réduction de la charge thermique de **18,40 %** par rapport à un bâtiment en parpaing. Le bâtiment en BTC, nous permet de faire une économie de **15 450 872 FCFA** sur une période de 40 ans sur la charge de climatisation et de faire une dépense de **114 315 FCFA** sur l'investissement initial.

### Mots Clés:

---

**1** - Inertie thermique; **2** - Confort thermique; **3** - Bilan thermique; **4** – BTC; **5** – Parpaing

## ABSTRACT

Thermal inertia constitutes an essential asset to store the energy received by some building and to restore it when that is necessary. It makes it possible to store the contributions of the solar radiation to reduce the load of air-conditioning. An optimal exploitation of inertia passes by a suitable selection of building materials since the phase of design. This study consisted in working out a thermal computational tool of the loads by taking of account thermal inertia and to provide elements of economic analysis in the choice of building materials. We first of all studied and applied some computational tools of heat balance which the engineering and design departments use. It comes out from this study that the heat balances obtained lead to disparate results. The evaluation of a heat balance on a building of **12 m<sup>2</sup>** built in BTC, reduced the thermal load of **18,40 %** compared to a building in breeze block. The building in BTC, enables us to make a saving of **15 450 872 FCFA** for a 40 years period on the load of air-conditioning and to lost in order of **114 899 FCFA** on the initial investment.

### Key words:

---

**1** - Thermal inertia; **2** – Thermal comfort; **3** - Heat balance; **4** - BTC; **5** – Breeze block

## NOMENCLATURE

2iE	Institut International de l'eau et de l'Environnement
ASHRAR	American Society of Heating and Air-conditioning Engineers
VBA	Visual Basic for Application

<b>Nomenclature</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$C_p$	Capacité thermique spécifique	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$C_a$	Coefficient d'absorption	
$U_p$	Coefficient de transmission thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\Delta T$	Ecart de température	$^{\circ}\text{C}$
$h$	Coefficient de transfert par convection	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\lambda$	Conductivité thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\varphi$	Densité de flux	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
$A$	Coefficient d'absorption	
$F$	Facteur multiplicatif	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
$I$	Rayonnement solaire	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
$K$	Coefficient de conduction du mur	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$K$	Coefficient de conductivité de la porte	-
$Q$	Fux de chaleur	$\text{W}$
$S$	Surface du corps	$\text{m}^2$
$T$	Température	$^{\circ}\text{C}$
$T_d$	Type de dalle	-
$\beta$	Caractéristique des matériaux	-
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
$\sigma$	Coefficient d'isolation	-
$E$	Effusivité	$\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$D$	Diffusivité	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$SC$	Coefficient d'ombrage	-
$SHGF$	Gains solaire	$\text{W} \cdot \text{m}^2$
<b>Indice</b>	<b>Désignation</b>	
$Equi$	Température équivalente	
$Fluide$	Température du fluide	
$b$	Température de l'air	

<i>ev</i>	Température virtuelle
<i>ext</i>	Température extérieure
<i>extv</i>	Température extérieure virtuelle
<i>d</i>	Dalle
<i>fictif</i>	Température fictif
<i>int</i>	Température intérieure
<i>m</i>	Surface du mur
<i>moy</i>	Température moyenne
<i>p</i>	Porte
<i>S</i>	Température de la paroi interne
<i>Dr</i>	Droite
<i>G</i>	Gauche
<i>Sa</i>	Soleil-air

## Sommaire

<i>Dédicaces</i> .....	<i>i</i>
<i>Remerciement</i> .....	<i>ii</i>
<i>Résumé</i> .....	<i>iii</i>
<i>Nomenclature</i> .....	<i>v</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>1</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>2</i>
<i>Liste des annexes</i> .....	<i>3</i>
<b>I. Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>I.1 Contexte</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2 Problématique</b> .....	<b>4</b>
<b>I.3 Objectifs</b> .....	<b>5</b>
<b>I.4 Structure d'accueil</b> .....	<b>6</b>
<b>II. Etude bibliographique</b> .....	<b>7</b>
<b>II.1 Bilan thermique</b> .....	<b>7</b>
<b>II.2 Confort thermique</b> .....	<b>7</b>
<b>II.3 Transfert thermique dans le bâtiment</b> .....	<b>8</b>
<b>II.4 Inertie thermique</b> .....	<b>8</b>
<b>II.5 Les expressions du déphasage thermique et du facteur d'amortissement d'une paroi</b> .....	<b>10</b>
<b>II.6 Les apports thermiques</b> .....	<b>10</b>
<b>II.7 Les apports de chaleur par les parois</b> .....	<b>11</b>
<b>III. Description des différentes méthodes d'évaluation des charges thermiques</b> .....	<b>13</b>
<b>III.1 Méthodes arbitraire de la puissance</b> .....	<b>13</b>
<b>III.2 Méthode de surface ou de ratio</b> .....	<b>13</b>
<b>III.3 Méthode simplifiée de l'Efficacité Energétique de la Climatisation en Région Tropicale</b> .....	<b>14</b>
<b>III.4 Méthode détaillée</b> .....	<b>15</b>
<b>III.5 Méthode simplifiée de York</b> .....	<b>16</b>
<b>III.6 Méthode simplifiée de Carrier</b> .....	<b>16</b>

<b>III.7</b>	<b>Méthode simplifiée d'Aham .....</b>	<b>17</b>
<b>III.8</b>	<b>Méthode UCL .....</b>	<b>17</b>
<b>III.9</b>	<b>Méthode de bilanclim .....</b>	<b>19</b>
<b>III.10</b>	<b>Méthode de BilanTherm .....</b>	<b>21</b>
<b>III.11</b>	<b>Méthode simplifiée de airwell .....</b>	<b>22</b>
<b>III.12</b>	<b>Méthode simplifiée Xpair .....</b>	<b>22</b>
<b>III.13</b>	<b>Méthode simplifiée France Air .....</b>	<b>22</b>
<b>III.14</b>	<b>Méthode ASHRAE .....</b>	<b>23</b>
<b>IV.</b>	<b><i>Calcul du bilan thermique par les différentes méthodes .....</i></b>	<b>26</b>
<b>IV.1</b>	<b>Hypothèses de calculs .....</b>	<b>26</b>
<b>IV.2</b>	<b>Calcul de bilan thermique par la méthode simplifiée de l'IEPF.....</b>	<b>27</b>
IV.1.1	Les apports de chaleur par transmission et rayonnement à travers les parois.....	27
<b>IV.3</b>	<b>Calcul de bilan thermique par la méthode ASHRAE.....</b>	<b>29</b>
IV.3.1	Les apports de chaleur à travers les vitres .....	29
IV.3.2	. Les apports de chaleur à travers les murs .....	29
<b>V.</b>	<b><i>Résultats et discussions .....</i></b>	<b>32</b>
<b>V.1</b>	<b>Bilan évalué par les différentes méthodes.....</b>	<b>32</b>
<b>V.2</b>	<b>Choix des matériaux de construction.....</b>	<b>33</b>
<b>V.3</b>	<b>Présentation de l'outil.....</b>	<b>34</b>
	<b><i>Conclusions .....</i></b>	<b>36</b>
<b>VI.</b>	<b><i>Recommandations – Perspectives .....</i></b>	<b>38</b>
<b>VII.</b>	<b><i>Bibliographie .....</i></b>	<b>39</b>
	<b><i>Annexes.....</i></b>	<b>40</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Propriétés des matériaux <sup>[10,11]</sup> .....	11
Tableau 2 : Les différentes valeurs de Cp .....	20
Tableau 3 : L'angle d'orientation des parois.....	20
Tableau 4 : Classification des différentes méthodes .....	25
Tableau 5 : Hypothèse de calcul .....	26
Tableau 6 : Dimensions du local .....	27
Tableau 7 : Apports de chaleur par transmission à travers les parois .....	28
Tableau 8 : Apports de chaleur par rayonnement à travers les parois.....	28
Tableau 9 : Apports de chaleur par transmission (bâtiment en BTC).....	28
Tableau 10 : apports de chaleur par rayonnement (bâtiment en BTC) .....	28
Tableau 11 : Les apports par les vitres du bâtiment en parpaing et en BTC.....	29
Tableau 12 : les apports de chaleur par les parois opaques du bâtiment en parpaing .....	30
Tableau 13 : Les apports de chaleur par les parois opaques du bâtiment en BTC.....	30
Tableau 14 : L'investissement initial du bâtiment en BTC et en parpaing .....	32
Tableau 15 : Caractéristiques du BTC et parpaing et le gain de chaleur engendré.....	32
Tableau 16 : Caractéristiques du parpaing <sup>[10]</sup> .....	52
Tableau 17 : Données du problème.....	52
Tableau 18 : Ecarts de températures en fonction des orientations des murs.....	53
Tableau 19 : les apports de chaleur du bâtiment en parpaing .....	56
Tableau 20 : Les apports par les vitres non ensoleillées (parpaing).....	56
Tableau 21 : Les apports par les vitres ensoleillées (parpaing).....	56
Tableau 22 : les apports de chaleur du bâtiment en BTC.....	57
Tableau 23 : Les apports par les vitres non ensoleillées (BTC).....	57
Tableau 24 : Les apports par les vitres ensoleillées (BTC).....	57
Tableau 25 ; Investissement initial du bâtiment en BTC .....	58
Tableau 26 : Investissement initial du bâtiment en parpaing .....	58
Tableau 27 : Puissance du climatiseur .....	59
Tableau 28 : Consommation de l'énergie par la climatisation.....	60

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les différentes étapes de travail .....	6
Figure 2: Zone de confort et type de climat <sup>[5]</sup> .....	8
Figure 3 : Les trois modes de transfert thermique <sup>[7]</sup> .....	8
Figure 4 : Déphasage et amortissement de l'onde thermique dans le bâtiment <sup>[2]</sup> .....	9
Figure 5 : Temps de déphasage en fonction des matériaux et de son épaisseur <sup>[4]</sup> .....	10
Figure 6 : Plan du bâtiment .....	26
Figure 7 : Récapitulatif des différents résultats du bilan thermique .....	31
Figure 8 : Exemple de méthode de choix des matériaux des constructions .....	34
Figure 9 : Méthode des volumes finis appliquée à la conduction .....	49
Figure 10 : Ecart de température du bâtiment en parpaing .....	54
Figure 11 : Ecart de température du bâtiment en BTC .....	54
Figure 12: Ecart de température du bâtiment en BTC avec apport solaire .....	54
Figure 13: Ecart de température du bâtiment en parpaing avec apport solaire .....	54
Figure 14 : Profil de la température .....	60
Figure 15: Allure de la température intérieure amortie (parpaing) .....	61
Figure 16: Allure de la température intérieure amortie (BTC) .....	61

## LISTE DES ANNEXES

Annexe i : Méthode de ratio <sup>[8,12]</sup> .....	40
Annexe ii : Méthode détaillée <sup>[8,12]</sup> .....	41
Annexe iii: Méthode simplifié de York <sup>[1,8,12]</sup> .....	43
Annexe iv: Méthode de Carrier <sup>[1,12]</sup> .....	44
Annexe v: Méthode simplifier Aham.....	45
Annexe vi: Méthode simplifiée Airwell <sup>[14,18]</sup> .....	46
Annexe vii: Méthode Xpair <sup>[14,15]</sup> .....	47
Annexe viii: Méthode simplifiée de Franc Air <sup>[12,14]</sup> .....	48
Annexe ix : Résolution de l'équation de la chaleur .....	49
Annexe x : Détermination des différences des températures amorties ( $\Delta T_a$ ) .....	53
Annexe xi : Evaluation du bilan thermique des charges de climatisation en prenant en compte l'inertie thermique .....	56
Annexe xii : Etude économique comparative basée sur deux types de bâtiment.....	57
Annexe xiii : Allure de la température à l'intérieure du bâtiment .....	61
Annexe xiv : Expression du déphasage thermique.....	62

# I. INTRODUCTION

## I.1 CONTEXTE

La climatisation est la science du maintien de la température et de l'humidité de l'air dans des locaux qui contribuent au confort de l'individu ou qui sont nécessaires à certains procédés de fabrication et de conservation. Elle est aussi l'ensemble du traitement de l'air ayant pour but l'obtention d'une ambiance interne d'abord définie en température, et ensuite en humidité. Les conditions à obtenir dans les locaux doivent, toute l'année, être favorable à la vie des occupants, à leur santé, à leur bien-être ou leur mieux-être <sup>[1]</sup>. Elle est d'une très grande importance en Afrique vu son application dans plusieurs domaines. De façon générale, en Afrique de l'Ouest et en l'occurrence au Burkina Faso, il apparait que la climatisation représente environ 60 % de la consommation énergétique dans les bâtiments climatisés. Les calculs de bilan thermique des charges de climatisation des bâtiments par les bureaux d'études se font par des méthodes diverses (méthodes simplifiées, détaillées et autre) qui peuvent conduire à des résultats assez disparates. Les méthodes simplifiées de calculs de charge thermique ne prennent pas en compte l'inertie qu'offrent certains matériaux comme les blocs de terre comprimés/Brique en Terre Cuite (BTC), propriété qui pourtant confère à ces matériaux, un intérêt certain en termes de confort thermique et de réduction de charge thermique du bâtiment. C'est ainsi que l'intérêt est de plus en plus croissant pour des matériaux de construction locaux et des éco-matériaux conduit à des questions sur leurs pertinences d'un point de vue énergétique et économique.

Ce projet a été mis sur pied par le Laboratoire d'Energie Solaire et d'Economie d'Energie (LESEE) afin de fournir une méthode ou un outil simplifié de calcul des charges en prenant en compte l'inertie thermique du bâtiment ainsi que les matériaux de construction locaux et des éco-matériaux. Cette étude sera faite sur deux types de bâtiments à savoir les bâtiments en BTC et les bâtiments en parpaing.

## I.2 PROBLÉMATIQUE

Le système de climatisation des bâtiments est souvent la cause de la consommation très élevée de l'énergie dans les pays à climat tropical. Le calcul du bilan thermique des charges de climatisation se fait par plusieurs méthodes qui parfois ne prennent pas en compte l'inertie thermique des parois, ce qui conduit à des résultats divers et moins pertinents. L'inertie thermique du bâtiment stocke de l'énergie reçue par le soleil et la restitue quand cela est nécessaire. En climat froid, l'inertie thermique permet d'emmagasiner les apports solaires et contribue à la conservation aussi longtemps que possible de la chaleur à l'intérieur du bâtiment.

En climat chaud, l'inertie thermique permet un meilleur confort thermique en accumulant la chaleur

dans les parois au cours de la journée et l'évacuant la nuit. Il permet de stabiliser la température à l'intérieur des bâtiments. Vu tous ces avantages, il est intéressant de savoir comment on peut considérer l'inertie thermique dans le calcul de bilan thermique de climatisation. Quelle est l'influence de l'inertie thermique sur les charges de climatisation ? Comment élaborer ou fournir une méthode simplifiée de calcul de bilan thermique en tenant compte de l'inertie thermique ?

Le concept de l'inertie thermique est très souvent ambigu mais son exploitation optimale dépend principalement de la nature des interactions des matériaux de construction avec l'environnement. Ces interactions sont liées à plusieurs paramètres tels que leurs propriétés thermophysiques, leurs dispositions à l'intérieur de l'enveloppe, les caractéristiques architecturales du bâtiment ainsi que les conditions climatiques [2]. Cette étude est aussi consacrée à fournir des éléments d'analyses énergétiques et économiques dans le choix des matériaux de construction.

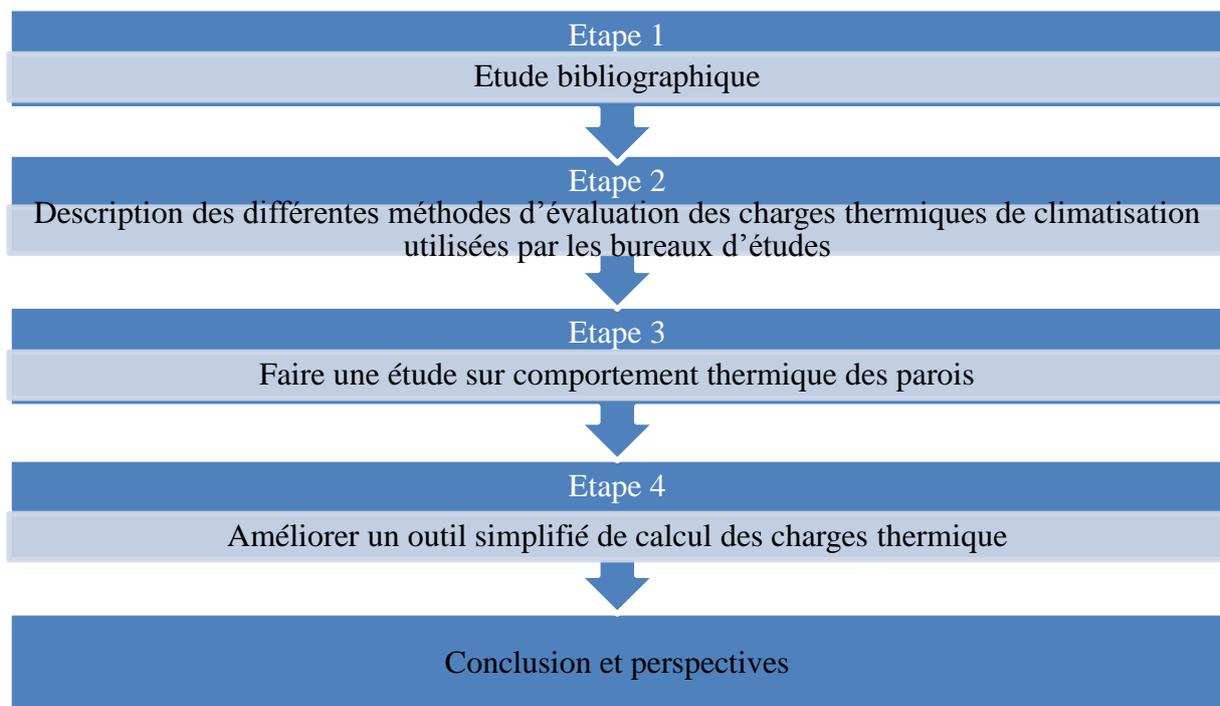
### **I.3 OBJECTIFS**

Ce projet vise à effectuer un bilan thermique des charges de climatisation en tenant compte de l'inertie thermique de la paroi du bâtiment et ensuite de fournir un outil amélioré simple d'utilisation prenant en compte l'inertie thermique du bâtiment.

Pour ce faire, nous allons :

- décrire les méthodes existantes, les appliquer sur un bâtiment afin de comparer les résultats ;
- développer une méthode de calcul de charge thermique en prenant en compte l'inertie du bâtiment.

Pour ce faire, notre travail s'articulera sur les étapes énumérées dans la (Figure 1).



**Figure 1 : Les différentes étapes de travail**

## I.4 STRUCTURE D'ACCUEIL

Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Énergie (LESEE) est un laboratoire de recherche scientifique situé sur le site 2iE de Kamboinsé à environ 15 km et au Nord de Ouagadougou. Créé en novembre 2008, le LESEE a été dirigé depuis sa création jusqu'en 2014 par le Dr Yao AZOUMAH, et est actuellement dirigé depuis 2014 par Dr Daniel YAMEGEU. Le LESEE est constitué d'une équipe dynamique d'enseignants-chercheurs, de post-doctorants, d'ingénieurs de recherches et de doctorants. Le laboratoire accueille également des stagiaires issus de différents niveaux d'études.

Les travaux effectués au laboratoire sont relatifs à deux grands axes de recherche qui sont:

- Axe1 : Conversion de l'énergie solaire sous-environnements chaud et rude.

Trois sous-axes sont développés :

- ✓ Système solaire photovoltaïque en milieu hostile,
- ✓ Centrale solaire à concentration pour mini réseau,
- ✓ Habitat solaire.
- Axe2 : Gestion optimale d'énergie durable : production, transport, distribution. Cet axe se décompose en deux sous-axes :
  - ✓ Hybridation des systèmes énergétiques
  - ✓ L'interaction source-réseau intelligent-utilisateurs.

L'équipe actuelle de recherche au LESEE est composé de 05 enseignants-chercheurs, de 07

ingénieurs recherche de 06 doctorants et des stagiaires de différents niveaux.

## **II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **II.1 BILAN THERMIQUE**

L'évaluation des charges thermiques des bâtiments à climatiser est un exercice très compliqué qui nécessite habituellement beaucoup de temps et représente une des étapes les plus importantes dans la conception et le dimensionnement d'un système de climatisation <sup>[3]</sup>. Il s'agit d'évaluer tous les gains de chaleur dans un local. Ceci nous permet de connaître la quantité de chaleur dans le local qu'il faut vaincre afin d'obtenir les conditions de confort thermique souhaité.

### **II.2 CONFORT THERMIQUE**

Le confort thermique est une notion complexe qui dépend de plusieurs paramètres. On peut le définir comme étant une condition dans laquelle un individu ne ressent la sensation ni de chaud ni de froid, et varie de 20 °C à 27 °C (Figure 2) appelé zone de confort. Cette zone de confort est tirée des travaux de GIVONO et MILNE, ils nous proposent des limites aux paramètres de confort thermique, humidité et température pour les régions tropicales humide et sèches <sup>[4]</sup>. Il exprime le bien-être des individus en fonction des différents paramètres (la température, le taux d'humidité relative, la vitesse du vent). Il est difficile d'espérer satisfaire la totalité des individus se trouvant dans une même enceinte climatisée. Cette difficulté est dû à des de nombreux facteurs qui sont :

- la santé,
- l'âge,
- la façon dont on est vêtu,
- les habitudes...

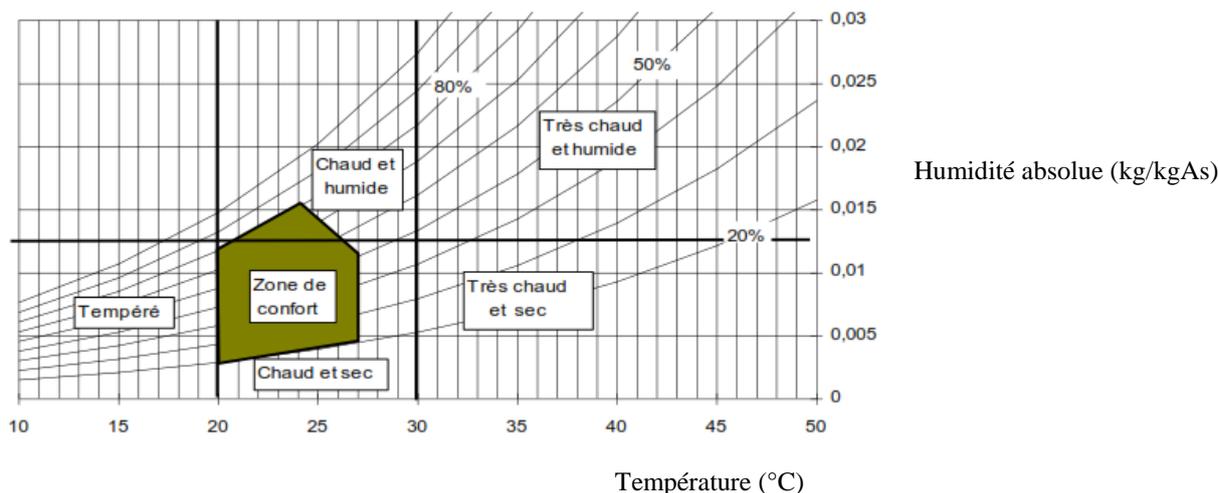


Figure 2: Zone de confort et type de climat [5]

### II.3 TRANSFERT THERMIQUE DANS LE BÂTIMENT

Un bâtiment est un ensemble complexe de matériaux en contact avec un environnement aux températures fluctuantes ; des transferts de chaleur s'y produisent en permanence. Le bâtiment est composé d'éléments qui sont liés entre eux et les transferts d'énergie se font simultanément selon trois modes [5] (Figure 3). Les échanges thermiques par conduction interviennent au niveau des parois opaques et transparentes. Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, masse volumique et capacité calorifique) interviennent dans ce mode d'échange thermique [6].

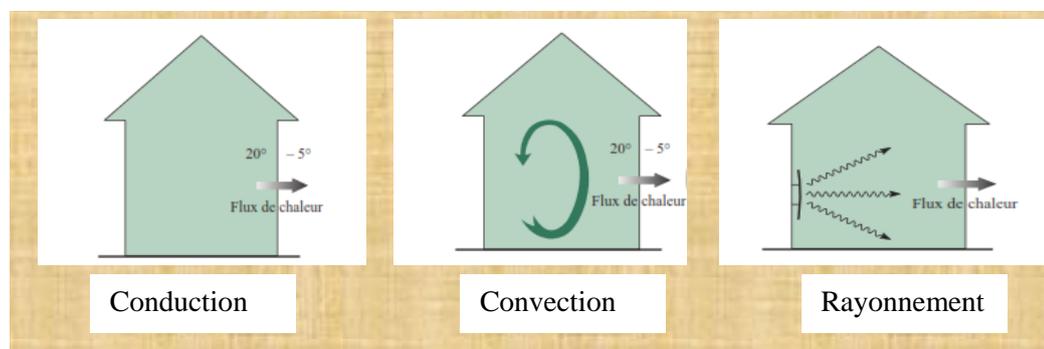


Figure 3 : Les trois modes de transfert thermique [7]

### II.4 INERTIE THERMIQUE

L'inertie thermique est définie comme étant la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer. Elle est encore définie comme étant la vitesse avec laquelle le bâtiment réagit à des perturbations extérieures. Elle n'est pas facile à appréhender. La réponse du bâtiment face aux sollicitations dépend en grande partie des propriétés des matériaux qui le constituent [2]. Il occasionne un déphasage entre la température d'un corps massif et la température extérieure. Un bâtiment bien conçu doit limiter les gains thermiques ou encore limiter ses pertes de chaleur (déperdition). L'ensemble des bâtiments se refroidissent la nuit par rayonnement infrarouge, par

convection et par renouvellement d'air. C'est là, l'importance de l'inertie thermique.

L'inertie thermique est due à la capacité thermique que possèdent les matériaux. Il est très important de connaître comment la chaleur est stockée et restituée et à quelle vitesse ces deux phénomènes se produisent. La vitesse de stockage ou déstockage de la chaleur est déterminée par deux autres grandeurs que sont la diffusivité et l'effusivité [7].

La diffusivité et l'effusivité thermique donnent une information importante sur la transmission de la chaleur à l'échelle d'un matériau (Tableau 1). L'effusivité est la capacité d'un matériau à absorber l'énergie et la restituer et est déterminée par l'équation (1) tandis que la diffusivité thermique décrit la rapidité du déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau [3,5-7]. Elle est déterminée par l'équation (2).

$$E = \sqrt{\rho * \lambda * C_p} \quad (1)$$

$$D = \frac{\lambda}{\rho * C_p} \quad (2)$$

$$\left[ \begin{array}{l} E: \text{effusivité } (\text{W} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \\ D: \text{diffusivité } (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \\ \lambda: \text{conductivité thermique } (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \\ C_p: \text{capacité thermique spécifique } (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \\ \rho: \text{masse volumique } (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \end{array} \right.$$

Pour le calcul des charges, l'inertie thermique du local joue un rôle très important dans la restitution du flux solaire. Elle crée un déphasage de température et l'amortissement de l'énergie [7], comme l'illustre la (Figure 4). Ce déphasage varie en fonction de la structure des matériaux et de leur épaisseur (Figure 5).

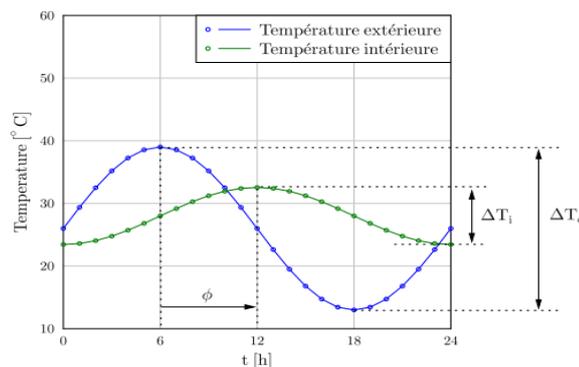


Figure 4 : Déphasage et amortissement de l'onde thermique dans le bâtiment [2]

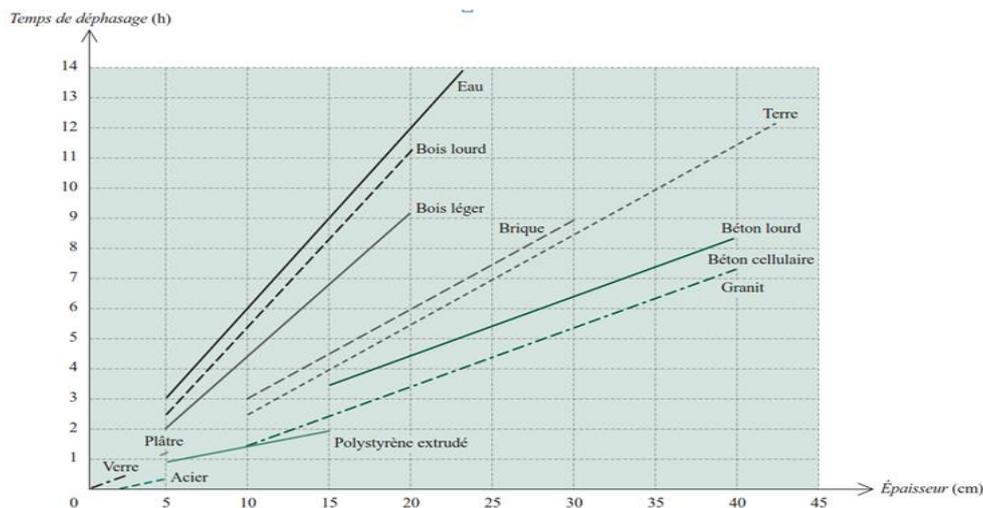


Figure 5 : Temps de déphasage en fonction des matériaux et de son épaisseur <sup>[4]</sup>

## II.5 LES EXPRESSIONS DU DÉPHASAGE THERMIQUE ET DU FACTEUR D'AMORTISSEMENT D'UNE PAROI

Le déphasage d'un matériau est donné par l'équation (3), il s'exprime en heure (h) <sup>[9]</sup>. Le détail de cette expression est donnée en (Annexe xiv).

$$\phi = \sqrt{\frac{6 \cdot \rho \cdot C_p}{\pi \cdot \lambda}} \cdot e \quad (3)$$

L'inertie thermique d'un bâtiment est recherchée afin de minimiser les apports thermiques. Un bâtiment à forte inertie thermique équilibrera sa température en accumulant le jour, la chaleur qu'il restituera la nuit pour assurer une température moyenne. L'amortissement est donné par l'équation (4).

$$f = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_o} \quad (4)$$

## II.6 LES APPORTS THERMIQUES

Il existe plusieurs paramètres qui ont une grande incidence sur le comportement thermique du bâtiment :

- la température de l'air ;
- les différents flux de chaleur interne ;
- l'orientation du bâtiment ;
- les flux solaires ;
- l'inertie thermique du bâtiment ;
- les types de matériaux pour les constructions.

Dans le document, nous mettrons l'accent sur les trois derniers points : les flux solaires ; l'inertie thermique du bâtiment et les types de matériaux pour construction.

Il s'agit ici de mettre en œuvre les moyens pour que le confort thermique soit le moins dégradé possible et que la consommation en énergie soit économique.

## II.7 LES APPORTS DE CHALEUR PAR LES PAROIS

L'apport de chaleur périodique dû au soleil est introduit en régime transitoire dans le calcul des apports calorifiques. En régime transitoire, le moment où l'apport d'énergie est réalisé sur la face externe d'une paroi diffère du moment où cette chaleur arrive à la surface interne. On dit qu'il y a déphasage. Ce déphasage peut être de quelques heures selon la constitution du mur (Figure 5). De la même façon que l'amplitude de la chaleur subit un amortissement dépendant de la caractéristique du matériau qui compose ce mur (Figure 4). Pour atténuer ces apports, il faut jouer sur les paramètres suivants :

- l'isolation des parois ;
- la forme de la toiture ;
- les matériaux de construction (Tableau 1) ;
- l'inertie thermique des parois.

**Tableau 1 : Propriétés des matériaux** <sup>[10,11]</sup>

Matériaux	Conductivités thermiques ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Masses volumiques ( $kg \cdot m^{-3}$ )	Chaleur massique ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Effusivité ( $W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	Diffusivité ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
Amiante de ciment	0,4	1800	0,96	831,38	$2,31 \cdot 10^{-07}$
Béton	0,9-1,75	2200-2400	0,850-0,950	1997,50	$8,95 \cdot 10^{-07}$
Béton armé	1,5-2,04	2300-2400	1,09	2310,12	$7,80 \cdot 10^{-07}$
Bitume	0,23	1050	1.305	561,39	$1,68 \cdot 10^{-07}$
Brique terre cuite	1,15	1800-2000	0,9	1438,75	$6,39 \cdot 10^{-07}$
Bois naturel	0,12-0,044	300-750	0,9	172,34	$6,52 \cdot 10^{-08}$
Brique pleine	1,00	1850	1,00	1360,15	$5,41 \cdot 10^{-07}$
Carrelage	2,4	2400	0,875	2244,99	$1,14 \cdot 10^{-06}$
Contre-plaqué	0,14	600	2,72	478,00	$8,58 \cdot 10^{-08}$
Copeaux de bois	0,081	140	2,51	168,71	$2,31E-07$
Enduit à la chaux, au	0,87	1600	0,94	1143,89	$5,78 \cdot 10^{-07}$

plâtre lissé					
Enduit au ciment	0,87	2200	1,05	1417,64	$3,77.10^{-07}$
Enduit mortier	1,15	1800-2100	0,88	1457,81	$6,22.10^{-07}$
Enduit plâtre	0,45	1450	0,88	757,76	$3,53.10^{-07}$
Laine de mouton	0,038-0,049	135-136	1,26	91,63	$2,86.10^{-07}$
Laine de roche	0,052-0,074	120-220	0,8-0,84	116,94	$4,00.10^{-07}$
Laine de verre	0,051	8	0,875	18,89	$7,29.10^{-06}$
	0,045	10	0,880	19,90	$5,11.10^{-06}$
	0,041	15	0,880	23,26	$3,11.10^{-06}$
Mur brique creuse	0,4	1200	0,88	649,92	$3,79.10^{-07}$
Parpaing creux	0,67	1250	0,88	858,49	$6,09.10^{-07}$
Parpaing plein	1,1	2100	0,88	1425,76	$5,95.10^{-07}$
Pierre calcaire	1,05-2,2	1650-2580	0,92	2285,15	$9,27.10^{-07}$
Polystyrène expansé	0,036-0,044	9-35	1,200-1,880	53,81	$6,69.10^{-07}$
Plâtre	0,48	1440	0,840	761,98	$3,97.10^{-07}$
Sciure de bois	0,06-0,07	213	2,51	193,45	$1,31.10^{-07}$
Granite	2,8	2600	1,000	2698,15	$1,08.10^{-06}$
Gravier	0,7	1800	0,889	1058,37	$4,37.10^{-07}$

La (Tableau 1) présente les caractéristiques, l'effusivité et la diffusivité des matériaux de construction des bâtiments les plus utilisées en région tropicale <sup>[10,11]</sup>.

### III. DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES CHARGES THERMIQUES

L'évaluation des charges thermiques de climatisation ou encore le bilan thermique d'un bâtiment permet de déterminer la puissance frigorifique de l'appareil de climatisation à installer afin d'obtenir les conditions de confort souhaité. Cette évaluation des charges thermiques est l'une des étapes les plus importantes et la plus complexe dans la conception et le dimensionnement d'un système de climatisation. Elle nécessite beaucoup de temps et une maîtrise parfaite en calcul des charges. C'est ainsi qu'on fait souvent recours à des outils des calculs. Nous avons répertorié différentes méthodes ou différents outils de calcul pour l'évaluation du bilan thermique à partir de la littérature existante et aussi auprès de quelques bureaux d'études dont la pluparts sont situés Ouagadougou.

#### III.1 MÉTHODES ARBITRAIRE DE LA PUISSANCE

Cette méthode est basée sur le choix arbitraire d'une puissance frigorifique. Elle est utilisée principalement par les installateurs expérimentés. A partir de la taille et de la disposition du local par rapport à la trajectoire du soleil, on décide arbitrairement de la puissance frigorifique à installer. Les erreurs sont fréquentes lorsqu'on utilise cette méthode. Très souvent, les installations sont surdimensionnées <sup>[12]</sup>. Cette méthode convient pour les bâtiments de faibles surfaces (bureaux, chambre) et pour des puissances relativement faibles (généralement inférieures à 10 kW <sup>[13]</sup>).

#### III.2 MÉTHODE DE SURFACE OU DE RATIO

Cette méthode consiste à calculer les charges basées sur un ratio. Ce ratio est choisi suivant de la configuration du local (voir Annexe i).

Cette méthode ne donne aucun renseignement sur la température extérieure considérée ainsi que des conditions de confort à satisfaire. Elles doivent être utilisées avec précaution car les conditions de température et d'hygrométries sont exigées <sup>[1]</sup>.

Pour l'obtention de la puissance, il faut multiplier la surface habitable par un facteur ou un ratio comme l'illustre l'équation (5).

$$Q = S * R \quad (5)$$

$$\left[ \begin{array}{l} Q: \text{Flux de chaleur en (W)} \\ S: \text{surface en (m}^2\text{);} \\ R: \text{facteur en (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \end{array} \right.$$

Les étapes de calcul de charge thermiques ne sont pas respectées et le type des parois, ainsi que l'inertie thermique ne sont pas pris en compte. Il faut noter que cette méthode n'est pas toujours fiable. Son utilisation requiert une grande expérience dans le calcul de charges basées sur les

méthodes détaillées.

### III.3 MÉTHODE SIMPLIFIÉE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE LA CLIMATISATION EN RÉGION TROPICALE

L'Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie (IEPF) a élaboré une méthode simplifiée de calcul des charges thermiques en région tropicale. Cette méthode fut l'œuvre d'une dizaine d'experts francophones en climatisation. Cette méthode est constituée de deux étapes donc la première consiste à relever les données et la deuxième à effectuer des calculs des charges thermiques. Ces étapes sont décrites comme suit<sup>[10]</sup> :

#### ❖ Première étape : relevé des données

- inscrire les informations sur le local ;
- déterminer les conditions de base en déduire d'autres paramètres sur le diagramme de l'air humide ;
- déterminer les écarts de température et de teneur en eau ;
- déterminer l'heure à laquelle le calcul du bilan ;
- déterminer le type de renouvellement d'air et son débit ;
- identifier chaque paroi et vitrage du local suivant les orientations ;
- déterminer les caractéristiques dimensionnelles des parois et vitrages ;
- calculer les surfaces nettes des parois et vitrages ;
- rechercher les écarts de température entre les différentes surfaces donnant soit à l'extérieur, soit dans un local adjacent.

Les données de la première étape sont obtenues grâce à des tableaux inscrits dans le document.

#### ❖ Seconde étape : calcul des charges

- apports par transmissions à travers les parois opaques,
- apports dus au rayonnement solaire sur les murs et vitrages ;
- apports de chaleur sensible et latente par les occupants ;
- apports de chaleur sensible et latente par les appareils électriques ;
- apports de chaleur sensible et latente par les sources diverses ;
- apports de chaleur sensible et latente par renouvellement d'air.

Dans cette méthode, l'inertie thermique est prise en compte de façon sommaire grâce à un paramètre : la masse par unité de surface du mur<sup>[10]</sup> :

masse  $< 75 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  cas des structures légères ;

$75 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} \leq \text{masses} \leq 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  cas de structure moyenne,

masse  $> 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  cas de structure lourde.

Les apports de chaleur par transmission et apports de chaleur par rayonnement solaire à travers les parois opaques sont calculés respectivement par les équations (6) et (7).

$$Q = k * S * \Delta T \quad (6)$$

Avec :  $\left[ \begin{array}{l} k: \text{coefficient de conduction du mur (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{);} \\ S: \text{surface du mur (m}^2\text{);} \\ \Delta T: \text{différence de température extérieure et intérieure (}^\circ\text{C).} \end{array} \right.$

$$Q = \alpha * F * S * R_m \quad (7)$$

Avec :  $\left[ \begin{array}{l} \alpha: \text{coefficient d'absorption de la paroi;} \\ F: \text{facteur de rayonnement solaire;} \\ R_m: \text{rayonnement solaire (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{).} \end{array} \right.$

Les détails de calcul sont donnés dans le paragraphe (V.2) et les résultats sont donnés par la (Figure 7).

L'apport de chaleur par rayonnement solaire sur les vitrages est déterminé par l'équation (8).

$$Q = \alpha * g * S * R_v \quad (8)$$

Avec :  $\left[ \begin{array}{l} g: \text{facteur de réduction de la fenêtre;} \\ R_v: \text{intensité du rayonnement solaire sur les vitrages (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{).} \end{array} \right.$

### III.4 MÉTHODE DÉTAILLÉE

Cette méthode consiste au renseignement d'une feuille de calcul prédéterminée (Voir Annexe ii).

Elle tient compte des :

- apports par conduction ;
- apports solaires ;
- apports sensibles internes ;
- apports latents internes ;
- conditions intérieures et extérieures ;
- orientation des parois ;
- inertie <sup>[5]</sup>.

Le calcul des apports par conduction (murs, vitrés, portes et fenêtres) est effectué grâce l'équation (6) et les apports solaires par les murs et toitures est déterminé par l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) de climatisation calcul de charges

Avec :  $\left[ \begin{array}{l} S: \text{surface de la paroi (m}^2\text{);} \\ K: \text{coefficient de conduction (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{);} \\ \Delta T: \text{écart de température (}^\circ\text{C);} \\ \Delta T_{fictif}: \text{écart de température fictif (}^\circ\text{C).} \end{array} \right.$

$$\Delta T_{fictif} = \frac{\alpha * G}{h_e} * F \quad (9)$$

$$\left[ \begin{array}{l} h_e : \text{Coefficient de convection } (W \cdot m^{-2} K^{-1}); \\ G : \text{rayonnement global } (W \cdot m^{-2}). \end{array} \right.$$

Cette méthode introduit un écart de température fictif (équation (9)) dû à l'ensoleillement et cet écart de température fictif dépend de l'inertie thermique du mur. L'inertie thermique est prise en compte de façon sommaire grâce à un paramètre : la masse par unité de surface du mur <sup>[5]</sup> :

masse < 150 kg·m<sup>-2</sup> structure légère et F=1 ;

150 kg·m<sup>-2</sup> ≤ masse ≤ 350 kg·m<sup>-2</sup> structure moyenne et F=0.9 ;

350 kg·m<sup>-2</sup> ≤ masse ≤ 700 kg·m<sup>-2</sup> structure lourde et F=0.8.

Contrairement à la méthode précédente, les valeurs des masses sont différentes de la méthode détaillée <sup>[5]</sup>.

### III.5 MÉTHODE SIMPLIFIÉE DE YORK

Elle consiste, à rassembler les données sur les taux de renouvellement d'air, des surfaces des vitrages, des surfaces des murs et des cloisons, du nombre d'occupants et des appareils électriques, à appliquer des facteurs multiplicatifs pour obtenir les apports de chaleur du local (Annexe iii). L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne tient pas compte :

- du niveau de température extérieure ;
- de l'organisation du bâtiment par rapport à la course du soleil ;
- du degré d'isolation thermique des murs ;
- des variations de la chaleur dues au renouvellement d'air ;
- du type de parois.

Le flux de chaleur est déterminé grâce à l'équation (5). Cette méthode ne donne pas des informations concernant le mois, l'heure ni la température de consigne <sup>[1]</sup>. Elle ne prend pas l'inertie thermique en compte ainsi qu'une différence de température comme la méthode détaillée.

### III.6 MÉTHODE SIMPLIFIÉE DE CARRIER

La méthode de Carrier est conçue par le constructeur de climatiseur du même nom. Elle se présente sous la forme d'un progiciel fait sous forme de feuille de calcul Excel <sup>[1]</sup>.

Elle est conçue pour les zones de latitude nord uniquement et est adaptée aux conditions climatiques des pays tropicaux pour éviter le surdimensionnement ou surconsommation énergétique. Elle impose le choix entre trois températures extérieures (32 °C ; 35 °C et 38 °C) et fixe une température intérieure de 24 °C (Voir Annexe iv). Cette méthode consiste à entrer les données et Excel génère les puissances de chaque poste. Le flux est obtenu grâce à l'équation (5). A

la fin, nous obtenons la puissance frigorifique à installer. Elle permet de déterminer les charges thermiques, de dimensionnement pour n'importe quel type de bâtiment. Elle se limite à la définition des coefficients moyens de calcul. Il faut aussi noter que l'inertie est prise en compte car cette méthode nous laisse choisir la taille de la structure (lourde ou légère). Cette méthode a l'avantage de tenir compte des variations de la température extérieure.

### **III.7 MÉTHODE SIMPLIFIÉE D'AHAM**

La méthode aham prend en compte les :

- apports solaire et conduction par les fenêtres et les portes;
- apports de chaleur par les murs ;
- apports de chaleur par le plafond, planché et par la toiture ;
- apports de chaleur interne ;
- renouvellement d'air.

La détermination du flux par les murs fait intervenir la structure de la pièce (mur d'épaisseur inférieure à 2 cm est considéré comme une structure légère et toute structure d'épaisseur supérieure à 2 cm est considérée comme une structure lourde). Ce qui confirme la prise en compte de l'inertie thermique dans le calcul des charges thermiques. Pour l'évaluation des apports de chaleur par les vitrages, les ratios sont déterminés en fonction du type de protections des vitres. En moyenne les stores externes retiennent  $2/3$  et laissent passer le  $1/3$  du rayonnement alors que sans stores, les stores internes retiennent  $5/9$  et laissent passer le  $4/9$  du rayonnement sans stores (voir Annexe v).

### **III.8 MÉTHODE UCL**

Cette méthode a été conçue par les étudiants de l'Université Catholique de Louvain en Belgique. Elle prend en compte les conditions climatiques du local et des apports calorifiques.

- les conditions climatiques sont les conditions extérieures et intérieures du local (températures extérieures et intérieures ; humidité relative extérieure et intérieure) ainsi que l'heure de calcul.
- les calculs des apports calorifiques
- des orientations des parois ;
- nature du mur ;
- des apports internes ;
- parois opaques extérieures ensoleillées (murs, portes en bois) : ceci consiste à déterminer la surface, la couleur et la nature du mur ainsi que la surface et le type de porte. Le gain de chaleur est donné par l'équation (10).

$$Q = [(S_m * K_m) + (S_p * K_p)] * \Delta T + [(S_m * 0.05 * K_m * \alpha) + (0.035 * K_p * S_p)] * G \quad (10)$$

Avec :

- S: surface de la paroi ( $m^2$ );
- $\alpha$ : coefficient d'absorption
- K: coefficient de conduction  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ;
- $\Delta T$ : écart de température ( $^{\circ}C$ );
- G: rayonnement solaire

- Le flux de chaleur par les parois opaques en contact avec les locaux non climatisés est obtenu par l'équation (11)

$$Q = S * \alpha * (T_{ext} - T_{int} - 3) \quad (11)$$

Avec :

- $T_{ext}$ : température extérieure ( $^{\circ}C$ );
- $T_{int}$ : température intérieure ( $^{\circ}C$ ).

- Parois opaques en contact avec la cuisine ;
- Le flux par les toitures ensoleillées est donné par l'équation(12).

$$Q = S * \sigma * \beta \quad (12)$$

Avec :

- $\sigma$ : coefficient d'isolation;
- $\beta$ : caractéristique du matériaux.

- Plafond sous local non climatisé est donné par l'équation(13).

$$Q = S * T_d * (T_{ext} - T_{int} - 3) \quad (13)$$

Avec  $T_d$ : le type de dalle

- Plafond sous comble ;
- Plancher sur local non climatisé ;
  - portes et fenêtres en bois non ensoleillées (épaisseur en centimètre et type de châssis);
  - renouvellement d'air ;
  - occupants en tenant compte du genre ;
  - éclairage interne du local ;
  - machines et appareillages utilisés dans le local.

Après avoir tout rempli, la feuille UCL nous donne la valeur totales des charges (sensibles et latentes) ; la puissance frigorifique (Watt) ; la puissance du climatiseur (cheval) ; le facteur de chaleur sensible ; la puissance de deshumification ; la chaleur sensible des différents apports en pourcentage et graphique. L'inertie de bâtiment est prise en compte par ce progiciel par le fait que le coefficient d'absorption intervient dans les calculs des bilans thermiques et la nature du mur. Elle

est un peu différente de la méthode détaillée car cette dernière tient compte du coefficient d'absorption et de la masse de la structure. Cette méthode permet de spécifier les conditions (intérieures et extérieures) de base pour le calcul de charge thermique.

### III.9 MÉTHODE DE BILANCLIM

Cette méthode est conçue grâce au classeur Excel "Bilan clim.xls" pour effectuer tous les calculs complexes qui provoquent de l'ennui. Elle comprend 5 types principaux de charges thermiques :

- les charges thermiques par les parois vitrées, qui sont souvent prépondérantes ;
- les charges thermiques par les parois opaques ;
- les charges thermiques dues au renouvellement d'air ;
- les charges thermiques dues aux occupants ;
- les charges thermiques dues à l'éclairage et aux appareils électroménagers.

Seule la charge thermique par les parois opaques et les parois vitrées qui seront traitée dans ce document afin de comprendre l'influence de l'inertie thermique sur les charges de climatisation.

Pour calculer les apports dus à l'ensoleillement des parois opaques et prendre en compte l'inertie thermique, Bilanclim utilise le concept de la température extérieure virtuelle ( $T_{ev}$ ) qui intègre le flux solaire et les caractéristiques des parois opaques (capacité d'absorption et rayonnement solaire). La température extérieure virtuelle est en fait, la température extérieure fictive dont la différence de température avec la température intérieure occasionnerait le même flux de chaleur en régime permanent établi (donc sans fluctuation des températures) que celui du à l'ensoleillement et à l'inertie de la paroi. Le calcul de cette température virtuelle intègre une température extérieure équivalente mais aussi le déphasage et l'amortissement des parois, ce qui caractérise heure par heure le régime transitoire. Le calcul de la température extérieure virtuelle est relativement complexe puisqu'il est le résultat du produit de deux matrices (température et réponse impulsionnelle de la paroi) et ceci pour chaque heure de la journée. La notion de la température équivalente correspond à la température extérieure produisant le même flux de chaleur à travers la paroi opaque et ceci sans ensoleillement. Cette température traduit l'absorption de chaleur par la paroi par une élévation de la température équivalente que l'on obtient d'après l'équation (14) :

$$T_{e_{Equi}} = T_{ext} + C_a * I_{si} / h_e \quad (14)$$

$$\left[ \begin{array}{l} T_{e_{Equi}} : \text{température équivalente (}^\circ\text{C)}; \\ C_a : \text{capacité d'absorption du parement extérieur de la paroi ;} \\ I_{si} : \text{flux solaire incident (direct et diffus) en (} W \cdot m^{-2} \text{)} ; \\ h_e : \text{coefficient d'échange extérieur en (} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \text{)} \end{array} \right.$$

Le  $C_a$  dépend de la couleur du parement et les valeurs données dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2 : Les différentes valeurs de Cp**

Couleur	Blanche	Claire	Moyenne	Sombre
C <sub>a</sub>	0,5	0,6	0,7	0,9

$$Q = U_p * S * (T_{extv} - T_{int}) \quad (15)$$

Avec :  $\left[ \begin{array}{l} U_p: \text{coefficient de transmission thermique de la paroi en } (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \\ T_{extv}: \text{température extérieure virtuelle en } (^\circ C). \end{array} \right.$

Les valeurs du flux solaire incident (direct et diffus) sont incorporées dans le progiciel et sont dépendant de plusieurs paramètres qui sont:

- de l'orientation de la paroi en degré (Tableau 3):

**Tableau 3 : L'angle d'orientation des parois**

Orientation	Angle (°C)	Orientation	Angle (°C)
Nord	(+) 180	Sud	0
Nord-Nord-Est	-157,5	Sud-Sud-Ouest	22,5
Nord-Est	-135	Sud-Ouest	45
Est-Nord-Est	112,5	Ouest-Sud-Ouest	67,5
Est	-90	Ouest	90
Est-Sud-Est	-67,5	Ouest-Nord-Ouest	112,5
Sud-Est	-45	Nord-Ouest	135
Sud-Sud-Est	-22,5	Nord-Nord-Ouest	157,5

- de l'inclinaison de la paroi, 0 ° pour une paroi horizontale, 90 ° pour une paroi verticale. Les parois dont l'angle avec l'horizontale est égal ou supérieur à 60 ° sont considérées comme parois verticales ;

- de la latitude du lieu;

- du mois (de juin à septembre) ;

- de l'heure solaire de 0 heure à 23 heures) ;

- de l'azimut du soleil ;

- de la déclinaison.

Dans le cas où les parois intérieures (cloisons refends ou adjacents) donnent sur un local non climatisé ou la température d'ambiance est susceptible d'être bien supérieure à celle de la pièce étudiée, le flux de chaleur venant de ce local est considéré en régime permanent établi et donc, le

calcul des charges thermiques de ces parois est à faire pour le calcul des charges thermiques :

$$Q = U_p * A * (T_{moy} - T_i) \quad (16)$$

$T_{moy}$  : Température moyenne du local adjacent.

### III.10 MÉTHODE DE BILANTHERM

Le BilanTherm est un programme de calcul écrit en VBA et assure l'automatisation des tâches sur un tableau de calcul créé sur Excel.

Bilantherm permet d'effectuer des calculs de bilan thermique et de déperditions pour les locaux à climatiser et notamment d'en estimer la puissance frigorifique nécessaire. Il tient compte tout particulièrement des conditions de fonctionnement et des particularités spécifiques, telles que :

- le niveau d'altitude où est située l'installation ;
- le lieu géographique du site,
- le mois, le jour et l'heure choisie ;
- les conditions de températures extérieure et intérieure des locaux ;
- les caractéristiques de température de l'air extérieur évoluant le long de la journée ;
- la position réelle des parois vitrées ou opaques ensoleillées ou non en fonction du soleil;
- l'inclinaison des vitrages entre la position horizontale et verticale ;
- l'inertie thermique.

La température des surfaces opaques d'un bâtiment peut monter au-dessus de la température de l'air ambiant extérieur dû à l'effet du rayonnement direct. L'écoulement de chaleur, par conséquent, sera augmenté dans l'espace conditionné. Indépendamment du rayonnement solaire direct, cette température est également affectée par la couleur et le poids extérieurs (densité) des matériaux. Les apports thermiques dus au gain de chaleur par conduction des parois externes sont calculés d'après l'équation <sup>[3]</sup> (17).

$$Q_{ext} = K * A * T_{equ} \quad (17)$$

Avec :  $\left[ \begin{array}{l} K: \text{coefficient de transmission thermique (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \\ T_{equ}: \text{température équivalente en (}^\circ\text{C)} \end{array} \right.$

- cette température dépend également de la couleur d'absorption de la paroi :
- couleur sombre : indice 1
- couleur moyenne : indice 0,78
- couleur claire : indice 0,55.

BilanTherm détermine automatiquement la température équivalente en fonction du moment considéré (heure, jour, mois), de la situation géographique, de l'orientation de la paroi et du

coefficient d'absorption.

Les apports thermiques dus aux gains de chaleurs par conduction des cloisons, plafonds et planchers intérieurs sont calculés selon l'équation <sup>[3]</sup>(18).

$$Q_{ext} = K * A * (T_b - T_i) \quad (18)$$

Avec :  $\left[ \begin{array}{l} T_b: \text{température de l'air adjacent en } (^\circ\text{C}); \\ T_i: \text{température de l'air intereur du local à climatiser en } (^\circ\text{C}). \end{array} \right.$

### III.11 MÉTHODE SIMPLIFIÉE DE AIRWELL

Les apports thermiques sont de trois ordres :

- apports par transmission ;
- apports par rayonnement solaire ;
- apports internes.

La quantité de chaleur traversant le mur est donnée par l'équation (19).

$$Q = I(\text{mur}) * \alpha * F \quad (19)$$

$\left[ \begin{array}{l} \alpha: \text{coefficient d'absorption de la paroi;} \\ F: \text{facteur du rayonnement de la paroi;} \\ I(\text{mur}): \text{rayonnement solaire absorbé par le mur en } W \cdot m^{-2} \end{array} \right.$

La méthode Airwell (voir Annexe vi) utilise des tableaux et des abaques en fonction des orientations et types des locaux pour déterminer l'heure ou l'apport thermique est maximum. Il ne tient pas compte de l'inertie thermique du bâtiment en faisant intervenir le coefficient d'absorption de la paroi <sup>[14]</sup>.

### III.12 MÉTHODE SIMPLIFIÉE XPAIR

La méthode Xpair détermine que trois apports thermiques qui sont :

- apports internes ;
- apports par les parois ;
- apports par les vitrages.

Elle consiste à entrer les données convenablement et cliquer dans la case 'Calculer', on obtient la puissance totale (voir Annexe vii).

Ce méthode ne spécifie ni sur les conditions (température et hygrométrie) de l'environnement intérieur et extérieur ni sur l'inertie thermique mais se limite aux trois apports (internes ; parois et vitrages).

### III.13 MÉTHODE SIMPLIFIÉE FRANCE AIR

France Air est une méthode simplifiée proposée par le constructeur France Air (voir Annexe

viii). Cette méthode empirique est basée sur des ratios d'évaluation des charges thermiques dans le bâtiment. Le flux de chaleur est calculé grâce à l'équation (5). Les ratios des vitrages sont déterminés selon le type de protection des vitres ainsi celui des murs. Elle s'applique uniquement pour le confort et dans les conditions standards à savoir : température extérieure fixée à 30 °C et une hygrométrie de 50 % ce qui ne pas approprier aux conditions en climat tropical <sup>[4]</sup>. Elle ne tient pas compte de l'inertie thermique.

### III.14 MÉTHODE ASHRAE

ASHRAE (1997) a développé quatre méthodes de calcul des charges thermiques d'un bâtiment :

- la méthode de la température équivalente totale ;
- la méthode de la fonction de transfert par conduction
- la méthode de différence de température de la charge refroidissante;
- le principe de la balance de la chaleur.

La détermination du gain thermique est fonction de la température sol-air, de la température intérieure et des plusieurs coefficients appelés coefficient de la fonction de transfert. Ces coefficients sont déterminés en tenant compte de la géométrie, de la configuration, de la masse, et aussi des différentes couches qui constituent la paroi. Ce qui signifie que le gain de la chaleur est déterminé en tenant compte de l'inertie thermique. Le gain de chaleur par les parois opaques et par vitres est obtenu respectivement par les équations <sup>[15]</sup> (20) ; (21).et (22).

$$Q = S * \left[ \sum_{n=0} b_n * (t_{sa,t-n\Delta}) - \sum_{n=1} d_n * \frac{(Q_{s,t-n\Delta})}{S} - t_{int} * \sum_{n=0} C_n \right] \quad (20)$$

$b_n$ ,  $d_n$  et  $c_n$  étant des coefficients de transfert

$$Q_{sol} = S(SC)(SCL) \quad (21)$$

$$Q_{conv} = US(t_{ext} - t_{int}) \quad (22)$$

$$\text{Avec : } t_{sa} = t_{ext} + \alpha * \frac{I_t}{h_o} - \varepsilon * \frac{\Delta R}{h_o} \quad (23)$$

$$\left[ \begin{array}{l} SC : \text{coefficient d'ombrage}^{[16]} ; \\ SHGF : \text{gain solaire pour les vitres}^{[17]} \text{ en } W \cdot m^{-2} \end{array} \right.$$

Les détails de calculs sont donnés au paragraphe (VI.3).

Après cette description des différentes méthodes, nous les classons selon les paramètres qui sont pris en compte (Tableau 4). Les différentes méthodes étudiées sont indiquées à la première ligne et les différents paramètres qui interviennent dans chaque méthode à la première colonne. Nous pouvons classer ces méthodes en deux catégories celles qui prennent en compte l'inertie thermique

et celles qui ne prennent pas en compte l'inertie thermique comme indique la dernière ligne du (Tableau 4). Le oui indique que l'élément est pris en compte par la méthode et le non le contraire.

**Tableau 4 : Classification des différentes méthodes**

Méthodes	Choix arbitraire	Surface	Détaillée	York	Carrier	UCL	Bilanclim	Bilantherm	Airwell	X paire	France air	Aham	AHRAE
Ration	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
Apports par conduction	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Apports solaire	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Apports internes	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Conditions climatique	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui
Orientation des parois	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui
Nature des parois	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui
Inertie thermique	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui

Après avoir décrit les différentes méthodes de l'évaluation de bilan thermique, nous poursuivons notre étude à l'application ou l'évaluation du bilan thermique en utilisant les méthodes étudiées au paragraphe (III) afin de comparer les résultats obtenus.

## IV. CALCUL DU BILAN THERMIQUE PAR LES DIFFÉRENTES MÉTHODES

Nous utiliserons les différentes méthodes pour le calcul de bilan d'un bâtiment puis comparer les résultats obtenus. Le bâtiment retenu pour notre étude est un bâtiment simple de type F1 d'une superficie de 12 m<sup>2</sup> (3m×4m) construit à Ouagadougou. L'entrée du bâtiment est orientée plein Sud et quatre fenêtres à chaque façade du bâtiment. Nous considérons premièrement que le mur est construit avec des agglomérés de ciment de 14 cm et recouverts à l'intérieur et l'extérieur d'un enduit et deuxièmement en BTC sans les enduits (Figure 6). Le toit est en tôle d'acier sous comble. Le plancher est surmonté de 40 cm.

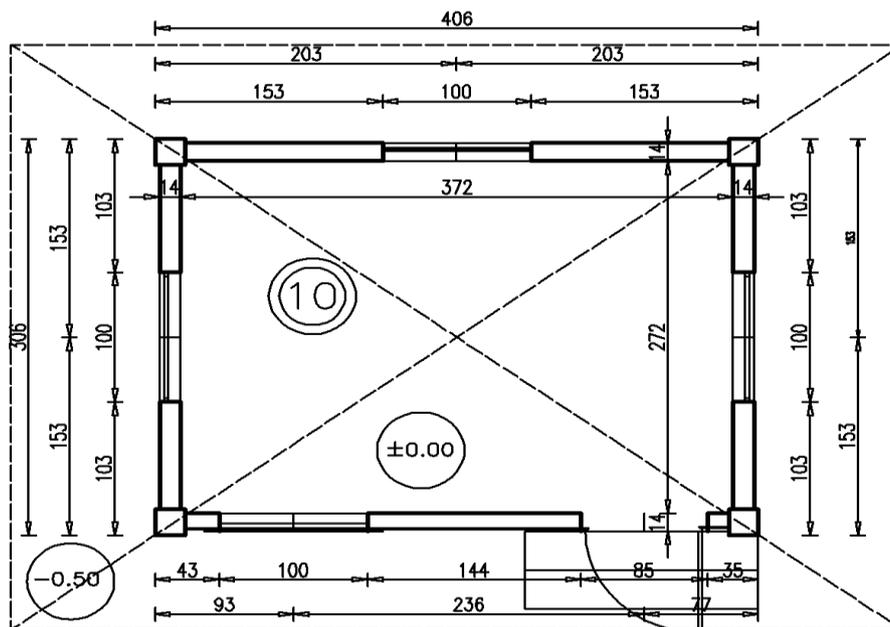


Figure 6 : Plan du bâtiment

### IV.1 HYPOTHÈSES DE CALCULS

Nous avons retenu les hypothèses suivantes qui conviennent aux conditions climatiques de Ouagadougou pour les calculs du bilan thermique :

Tableau 5 : Hypothèse de calcul

Hypothèses de calcul			
Conditions extérieures		Conditions intérieures	
Température (°C)	40	Température (°C)	24
Humidité (%)	30	Humidité (%)	50

Afin d'effectuer les calculs, nous avons considéré :

- le bâtiment en évolution libre (sans charges internes) ;
- le mois d'avril et à 13 h comme le mois le plus ensoleillé de l'année à Ouagadougou ;
- la position géographique ou l'orientation des façades du bâtiment ;
- la nature des matériaux pour certaines méthodes.

Il faut noter que, pour simplifier les calculs, seuls les apports par les opaques et les vitrages sont considérés.

**Tableau 6 : Dimensions du local**

Façades	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Surface brute mur (m <sup>2</sup> )	Surface fenêtres (m <sup>2</sup> )	Surface porte (m <sup>2</sup> )	Surface nette murs (m <sup>2</sup> )	Surface plafond (m <sup>2</sup> )	Surface plancher (m <sup>2</sup> )
Droite	0	2,72	2,70	7,34	1,20	0	<b>6,14</b>	<b>10,12</b>	<b>10,12</b>
Gauche	0	2,72	2,70	7,34	1,20	0	<b>6,14</b>		
Arrière	3,72	0	2,70	10,04	1,20	0	<b>8,84</b>		
Principale	3,72	0	2,70	10,04	1,20	1,87	<b>6,97</b>		

## **IV.2 CALCUL DE BILAN THERMIQUE PAR LA METHODE SIMPLIFIEE DE L'IEPF**

### **IV.1.1 Les apports de chaleur par transmission et rayonnement à travers les parois**

Les apports de chaleur par transmission sont déterminés par l'équation (6) et les apports par rayonnement sont obtenus par l'équation (7).

**Tableau 7 : Apports de chaleur par transmission à travers les parois**

Apports de chaleur par transmission à travers les parois (bâtiment en parpaing)				
Orientations	Surface (m <sup>2</sup> )	K (W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	ΔT (°C)	Q (W)
Est	6,14	2,27	16	223,00
Ouest	6,14		16	223,00
Nord	8,84		16	321,07
Sud	6,97		16	253,15
Plafond	10,12	3,1	13	407,84
Q total (W)				1428,06

**Tableau 8 : Apports de chaleur par rayonnement à travers les parois**

Apport de chaleur par rayonnement (bâtiment en parpaing)					
Orientations	Surface (m <sup>2</sup> )	α	F	R <sub>m</sub> (W·m <sup>-2</sup> )	Q (W)
Ouest	6,14	0,7	0,15	359	231,45
Nord	8,84			280	259,90
Sud	6,97			284	207,85
Q total par rayonnement (W)					699,19

Les apports de chaleur total à travers les parois opaque du bâtiment en parpaing est de : **2127,25 W**

**Tableau 9 : Apports de chaleur par transmission (bâtiment en BTC)**

Apports de chaleur par transmission à travers les parois				
Orientations	Surface (m <sup>2</sup> )	K (W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	ΔT (°C)	Q (W)
Est	6,14	2,9	16	284,90
Ouest	6,14	2,9	16	284,90
Nord	8,84	2,9	16	410,18
Sud	6,97	2,9	16	323,41
Plafond	10,12	3,1	13	407,84
Q total par transmission (W)				1711,21

**Tableau 10 : apports de chaleur par rayonnement (bâtiment en BTC)**

Apport de chaleur par rayonnement à travers les parois opaques (bâtiment BTC)					
Orientations	Surface (m <sup>2</sup> )	α	F	R <sub>m</sub>	Q
Ouest	6,14	0,7	0,12	359	231,45
Nord	8,84			280	259,90
Sud	6,97			284	207,85
Q total (W)					699,19

Les apports de chaleur total à travers les parois opaque du bâtiment en BTC est de : **2410,40 W**.

## IV.3 CALCUL DE BILAN THERMIQUE PAR LA MÉTHODE ASHRAE

### IV.3.1 Les apports de chaleur à travers les vitres

Les apports de chaleur par rayonnement sont déterminés par l'équation (21) et l'équation (22). Le bilan total est donné dans le (Tableau 11).

**Tableau 11 : Les apports par les vitres du bâtiment en parpaing et en BTC**

Local en parpaing (vitres)					
Type des parois	Orientation	Surface (m <sup>2</sup> )	SC	SHGF (W·m <sup>-2</sup> )	Q (W)
Ensoleillée	Ouest	1,2	1	46,90	56,27
	Nord	1,2		45,59	54,70
	Sud	1,2		141,09	169,30
Non ensoleillée	Est	1,2	5,8	16	111,36
Q total des vitres (W)					<b>391,66</b>

### IV.3.2. Les apports de chaleur à travers les murs

Les apports de chaleur par transmission à travers les murs peuvent être calculés par les formules l'équation (20) et la température sol- air est obtenue par l'équation (23).

La température sol-air ( $t_{sa}$ ) est la température de l'air extérieure fictive. Elle est fonction du rayonnement solaire et du coefficient d'échange.

- Pour les surfaces verticales :  $\Delta R = 0$  ; l'équation (23) devient :  $t_{sa} = t_{ext} + \alpha * \frac{I_t}{h_o}$

$$\frac{\alpha}{h_o} = 0,052 \text{ pour des surfaces noires.}$$

$$t_{sa} = 40 + 0,052 * I_t$$

- Pour les surfaces horizontales :  $\Delta R = 63W/m^2$  et  $\varepsilon = 1$
- $t_{sa} = 40 + 0,052 * I_t - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_{ext}}$

Les bâtiments sont constitués des couches suivantes :

- bâtiment en parpaing : E0A2C5B19A6A0
- toiture : E0A3B25E3E2A0

Le bilan thermique du local en parpaing est donné dans le (Tableau 12).

**Tableau 12 : les apports de chaleur par les parois opaques du bâtiment en parpaing**

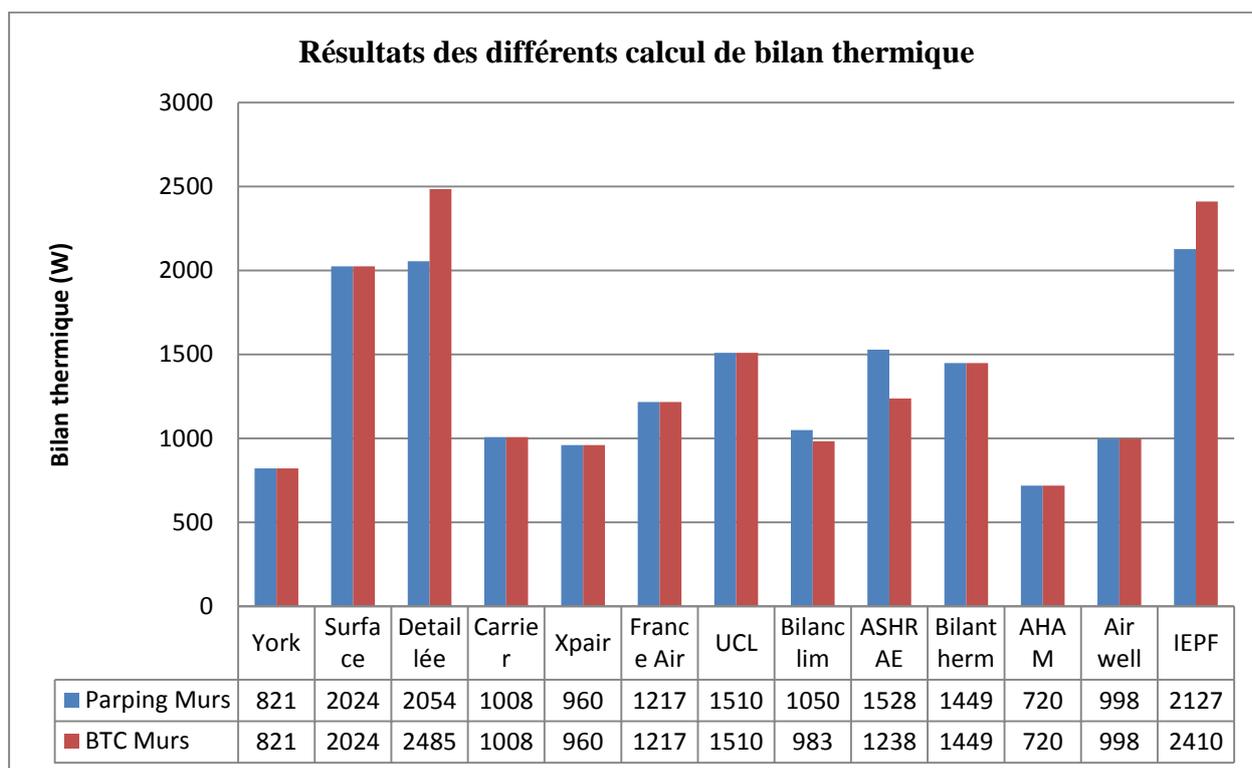
Bâtiment en parpaing						
Parois	Orientation	K ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	Surface ( $m^2$ )	$T_{sa}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{int}$ ( $^{\circ}C$ )	Q (W)
Non ensoleillés	Ouest	1,42	6,14	40	24	139,50
	Nord		8,84			200,84
	Sud		6,97			158,34
	Est		6,14			139,58
Ensoleillés	Ouest		6,14	50,19		228,36
	Nord		8,84	45,54		270,36
	Sud		6,97	46,84		226,04
	Toit		0,45	10,12		60,24
Q total (W)						1528,00

- bâtiment en BTC : E0C3B5A6A0A0 ;

Le bilan du local en BTC est donné dans le (Tableau 13). **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

**Tableau 13 : Les apports de chaleur par les parois opaques du bâtiment en BTC**

Bâtiment en BTC						
Parois	Orientation	K ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	Surface ( $m^2$ )	$T_{sa}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{int}$ ( $^{\circ}C$ )	Q (W)
Non ensoleillés	Ouest	1,08	6,14	40	24	106,0992
	Nord		8,84			152,7552
	Sud		6,97			120,4416
	Est		6,14			142,82
Ensoleillés	Ouest		6,14	50,19		173,68
	Nord		8,84	45,54		205,63
	Sud		6,97	46,84		171,92
	Toit		0,45	10,12		60,24
Q total (W)						1238,38



**Figure 7 : Récapitulatif des différents résultats du bilan thermique**

La (Figure 7) présente les différents résultats des bilans thermiques obtenus par les méthodes étudiées dans ce document. Pour un même type de bâtiment, les résultats sont vraiment disparates. La plus grande valeur de charge thermique est donnée par la méthode détaillée suivis des méthodes IEPF et la méthode surface. Les plus petites valeurs sont données par la méthode Aham suivis des méthodes York et Xpair. Les méthodes bilanlim et ASHRAE illustrent bien l'influence de l'inertie thermique dans le calcul des bilans thermiques du bâtiment. Ce qui confirme que l'inertie thermique qu'offrent les matériaux contribue à la réduction la charge thermique de climatisation. Ces raisonnements sont spécifiques à cette étude, elles peuvent être modifiées dans le cas d'un bâtiment isolé ou un local dans un immeuble. C'est pourquoi nous avons porté un intérêt particulier aux matériaux de construction et les éco-matériaux pour leur performance énergétique. Les écarts sont dus à la non prise en compte de certains paramètres tel que :

- l'inertie thermique ;
- la situation géographique ;
- en bref à la conception de ses outils de calcul.

## V. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### V.1 BILAN ÉVALUÉ PAR LES DIFFÉRENTES MÉTHODES

Nous constatons dans (Annexe xi) que le bilan thermique du bâtiment en BTC est inférieur au bilan thermique du bâtiment en parpaing soit un pourcentage de **18,40 %**. Ceci explique que l'inertie thermique est d'une grande importance quand il s'agit du confort thermique et des réductions de charge de climatisation (Tableau 15). L'investissement de la charge de climatisation en 40 ans du bâtiment BTC est environ **66 419 259 FCFA** et celui du bâtiment en parpaing d'environ **81 870 132 FCFA** soit une économie d'environ **15 450 872 FCFA** au profit du bâtiment en BTC (Tableau 14) et (Annexe xii).

**Tableau 14 : L'investissement initial du bâtiment en BTC et en parpaing**

Investissement initial	
Bâtiment en parpaing	<b>3 811 031 FCFA</b>
Bâtiment en BTC	<b>3 925 346 FCFA</b>
Différence de gain	<b>114 315 FCFA</b>

L'investissement initial du bâtiment en parpaing et en BTC est donné par le (Tableau 25). Il est de **3 925 346 FCFA** pour le bâtiment en BTC et de **3 811 031 FCFA** pour le bâtiment en parpaing soit une économie **114 315 FCFA** en faveur du bâtiment en parpaing.

Le (Tableau 15) donne les valeurs de la diffusivité et de l'effusivité du BTC et du parpaing. On remarque que la diffusivité du BTC est élevé que celui du parpaing. Ce qui signifie que, le front de chaleur met plus de temps pour traverser l'épaisseur du parpaing, et donc le temps entre le moment où la chaleur parvient sur une face du mur et le moment où elle atteint l'autre face est important. Il en est de même pour l'effusivité du BTC qui est supérieure à celle du parpaing. C'est ainsi que, l'inertie thermique contribue à atténuer les fluctuations de températures brutales dans les locaux en fonction du type de matériaux, et constitue une source de confort thermique. L'importance de l'effusivité c'est quand il y a la convection sur une surface, il perd son importance s'il y a pas évacuation de chaleur ou si l'évacuation est faible.

**Tableau 15 : Caractéristiques du BTC et parpaing et le gain de chaleur engendré**

Matériaux	$\lambda=(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\rho=(kg \cdot m^{-3})$	$C_p=(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$D (m^2 \cdot s^{-1})$	$E (j \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$
<b>Parpaing</b>	0,67	1250	880	6,09091E-07	858,49
<b>BTC</b>	1,15	1900	900	6,72515E-07	1402,32

Il ressort de cette étude que les bâtiments en BTC sont non seulement moins coûteux sur l'investissement initial, mais favorise aussi un confort thermique et une charge de climatisation réduite.

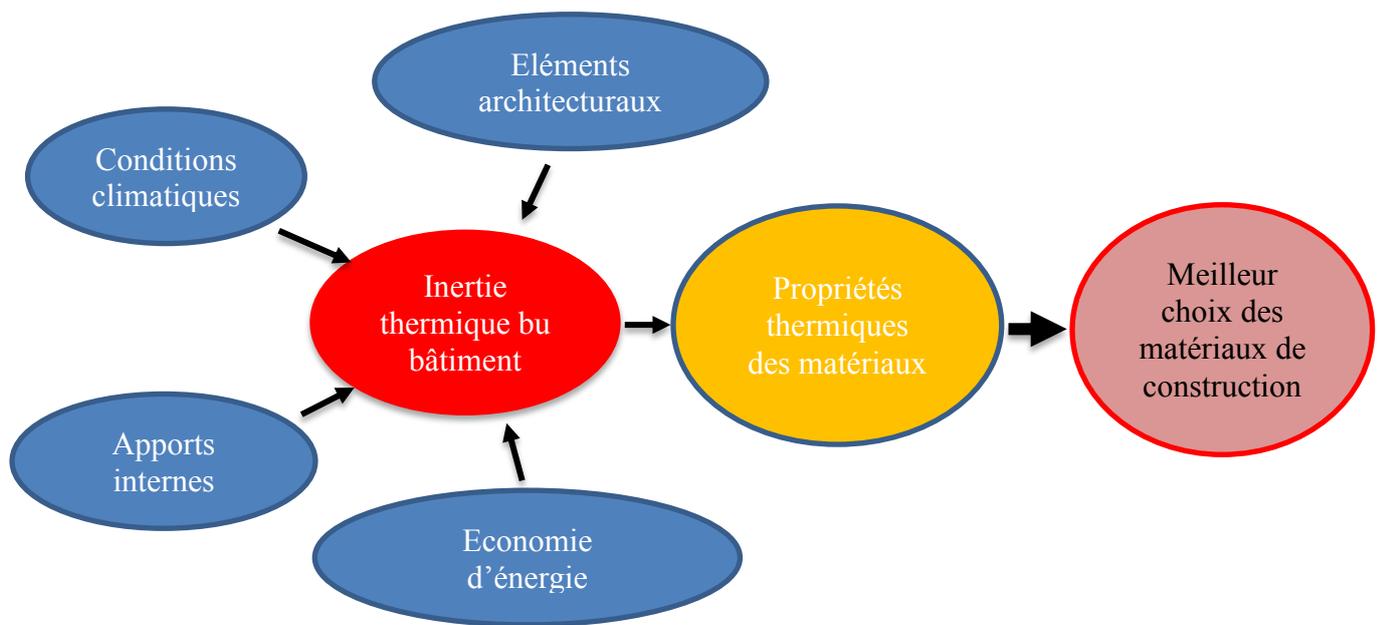
## **V.2 CHOIX DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION**

Il a été prouvé dans notre étude que les propriétés des matériaux de construction ont une grande influence sur le comportement énergétique du bâtiment en termes d'inertie thermique. Plusieurs études ont été faites à ce sujet et sont en train de se poursuivre. Malheureusement, il n'existe pas encore une méthode qui nous permette de faire le choix de ces matériaux. Mais plusieurs tests ont été faits sur la composition de l'enveloppe et le mur du bâtiment pour évaluer une solution meilleure parmi tant d'autres. En plus de l'effusivité et de la diffusivité, nous avons pu retenir d'autres paramètres tels que le coefficient de conductivité, la conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur d'eau et la vitesse de transfert du flux à travers les matériaux. Il est important et même conseillé de faire le choix pendant la conception. Il est presque difficile voire même impossible de faire un meilleur choix à la phase de finition.

Le choix des matériaux de construction locaux et les éco matériaux doit répondre à certains critères de l'écoconception tel que :

- procurer des conditions de confort aux occupants du bâtiment pendant son exploitation ;
- économiser de l'énergie ;
- étudier l'architecture bioclimatique du bâtiment ;
- limiter les impacts environnementaux durant tout son cycle de vie.

En bref, la conception bioclimatique des bâtiments avec des matériaux locaux et les éco matériaux permet ainsi de faire des grandes économies d'énergie (climatisation et éclairage) de bénéficier d'un confort élevé et aussi d'avoir une maison saine.



**Figure 8 : Exemple de méthode de choix des matériaux des constructions**

### V.3 PRÉSENTATION DE L'OUTIL

L'outil de calcul des charges de climatisation pour la région tropicale que nous avons mis en place a été établi à partir de certaines formules proposées par ASHRAE ; de la méthode détaillée et le programme de calcul d'un bilan thermique de climatisation en climat tropical. C'est un outil de calcul de charges thermique écrit en programme Visual Basic (VBA). La méthodologie utilisée est basée sur la résolution des équations développées en

Annexe ix).

Nous distinguerons trois procédures principales qui sont :

- le choix des matériaux : permet de connaître les propriétés du mur ;
- les températures des parois : elles sont calculées à partir des caractéristiques du matériau choisi et de l'épaisseur de mur ;
- bilan de chaleur : il est déterminé grâce aux températures des parois.
- il assure l'automatisation des calculs sur un tableau de calcul créé sur Excel. Il tient compte des paramètres suivants :
  - ❖ Le mois, le jour et l'heure choisie pour le calcul ;
  - ❖ Les températures extérieures et intérieures du local ;
  - ❖ Des orientations des parois ;
  - ❖ Du rayonnement solaire ;
  - ❖ Des températures des parois.

Pour des raisons de sécurité, le classeur contient des procédures et fonctions personnalisées. Il est

nécessaire de l'activer avant toutes opérations. Il est demandé d'entrée toutes les données (le mois, le jour et l'heure choisie, les températures extérieures et intérieures du local et la température de la paroi adjacent etc.) avant de poursuivre le calcul. Les températures des parois sont déterminées automatiquement.

---

## CONCLUSIONS

Le travail est porté sur la contribution de l'inertie thermique dans le calcul des charges thermiques de climatisation des bâtiments. Pour ce faire, nous avons proposé un outil de calcul des charges thermiques prenant en compte l'inertie thermique des bâtiments afin de limiter la consommation d'énergie et de fournir les éléments d'analyse économique dans le choix des matériaux de construction.

Nous avons comparé les bilans thermiques obtenus par quelques outils de calcul de bilan thermique par les méthodes décrites dans le document. Il ressort de cette comparaison que les résultats sont disparates, ce qui entrainera sûrement un surdimensionnement, entraînant ainsi une surconsommation du climatiseur. C'est ainsi que une étude sera faite sur l'inertie thermique afin de pallier à ce problème.

L'inertie thermique nous permet de voir la vitesse à laquelle la chaleur est stockée et transmise dans le local. La diffusivité et l'effusivité sont les grandeurs qui indiquent le comportement du bâtiment aux perturbations extérieures. En climat tropical, l'air extérieur est au cours de la journée à une température très élevée pour permettre d'évacuer la chaleur intérieure. L'inertie thermique est une condition nécessaire au confort thermique et à la réduction de charge thermique du bâtiment. On dit qu'il est un facteur d'économie d'énergie. Nous avons pu développer dans un outil simplifié de calcul de bilan thermique qui prend en compte l'inertie thermique. Les données consignées dans cet outil sont recommandées car cela nous permet d'économiser sur l'investissement.

Nous avons appliqué notre outil sur un bâtiment en BTC et un bâtiment en parpaing ordinaire et avons obtenu une réduction de charge thermique de **18,40 %** en faveur du bâtiment en BTC.

Malgré les atouts de l'inertie thermique, elle n'est pas une condition suffisante. On peut lui associer certains moyens de refroidissement (ventilation nocturne). Ce qui nous permettra de maintenir la stabilité de la température intérieure (plus basse) au jour suivant. L'inertie trouve son importance beaucoup plus dans les locaux à occupation continue. En plus de la ventilation, il faut préalablement opérer un meilleur choix des matériaux de construction locaux et des éco-matériaux selon leur disponibilité et faire une analyse sur les éléments tels que :

- la résistance thermique et le climat;
- l'économie de l'énergie ;
- étudier l'architecture bioclimatique du bâtiment ;
- limiter les impacts environnementaux durant tout son cycle de vie

En bref, l'inertie thermique reste une stratégie très importante et innovante voir même incontournable pour réduire les besoins énergétiques et assurer le confort dans bâtiment car elle

emmagazine les apports solaires plus longtemps que possible à l'intérieur du bâtiment.

## **VI. RECOMMANDATIONS – PERSPECTIVES**

Les perspectives et recommandations de ce travail sont nombreuses et pourront faire l'objet d'études complémentaires dans chacun des cas suivants :

- coupler à l'inertie thermique à la technique de climatisation passive et de climatisation active pour réaliser des économies d'énergie dans les conceptions de nouveaux bâtiments ;
- établir des normes de constructions en région tropicale afin de concevoir des bâtiments plus respectueux de l'environnement ;
- mettre en valeur les matériaux ayant une bonne inertie thermique pour réduire les charges thermiques de climatisation en tropicale ;
- étudier la stabilité et l'inertie thermique des différents matériaux de constructions et vulgariser dans le secteur de BTP.

## VII. BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. Assoumou Obian, "Calculs des charges frigorifiques de climatisation. Comparaison de Cinq méthodes de calculs avec les résultats expérimentaux.," Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Juin 2007.
- [2] L. Chahwane, "Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments," Docteur de l'université de GRENOBLE Option Génie civil et sciences de l'habitat, Université de Grenoble préparée au sein LOCIE UMR CNRS 5271 et de SISEO, 2011.
- [3] "Calcul de bilan thermique: thermExcel," 2004-2003. [Online]. Available: [www.thermexcel.com](http://www.thermexcel.com). [Accessed: 18-Feb-2015].
- [4] A. kemajou, Ing.-Dr, *De l'initiation à la maîtrise de la climatisation et du conditionnement de l'Air*, MASSEU 2007., vol. 367. Septembre 2007, 2015.
- [5] Y. Coulibaly, "Cours de climatisation calcul de charges." 2iE, 2012.
- [6] M. Kaboré, "Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne," Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'Environnement et Université de Grenoble, ED-SISEO et ED-2iE.
- [7] J.-P. Oliva, "Echange thermique d'une paroi," vol. 9, Dec. 2011.
- [8] F. Sam, "Rehabilitation thermique d'un local dans une zone aride-cas de Chardaia-," Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Mécanique, Algérie, Diplôme de magister en Génie mécanique option thermo-fluides (Energetique), Apr. 2012.
- [9] E. Ouedraogo, "Détermination des données climatiques de bases et caractérisation des blocs de terre comprimée pour l'étude du confort thermique dans le bâtiment en climat tropical sec," Docteur, Université de Ouagadougou, 187, 2015.
- [10] J. Classens, Y. Coulibaly, T. Djiako, M. Gnamke, A. Kanmogne, A. Kemajou, mamadou J. Koné, A. Ndiaye, M. Sako Koita, and S. Dimitris, *Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale, Tome 1. Conception des nouveaux bâtiments*, vol. 186, 7,8,14–15 vols. .
- [11] Y. Jannot, "Transferts thermiques." 2009.
- [12] Y. Coulibaly, "Economie d'énergie dans le bâtiment et dans l'industrie." Dec-2010.
- [13] F. Semporé, "Cours de climatisation." 2iE, Fevrier-2012.
- [14] J. Desmons, *Aide-mémoire Génie climatique consulté*, 2e édition., vol. 428. Paris, 2008.
- [15] S. B. Charles, J. D. Spitier, Phd, PE, and X. Dongyl, *Cooling\_Load\_calculations*, vol. 65, 1–7, 17–40 vols. 1997.
- [16] *ASHRAE Handbook fundamentals-Chp 17 Heat load*, vol. 106, 11 vols. 2001.
- [17] "Solar Heat Gain Factors (SHGFs) for selected latitudes of the Northern Hemisphere." .
- [18] P. D. Zotto, J.-M. Larre, and A. Merlet, *Mémotech Génie énergétique*, 3e édition 2003., vol. 607. 2015.
- [19] G. Lefebvre, *Comportement thermique dynamique des parois planes*, vol. 15. Ecole des Mines de Paris-CENERG, 2015.
- [20] O. Coulibaly, A. Ouedraogo, J. Kouliadiati, and P. Abadie, "Etude thermique d'un bâtiment bioclimatique en double paroi dénommée 'Newango': Inertie thermique, confort et consommation d'énergie\_," vol. 3, 8 avril 2011.

### Sites internet

<http://www.thermexcel.com/french/ressour/bilanth.htm> (site visite le 18 février 2015) ;

<http://www.carrier.fr/Bilan/> (site visité 18 février 2015) ;

<http://outils.xpair.com> (site visité 11 février 2015) .

## ANNEXES

### Annexe i : Méthode de ratio <sup>[8,12]</sup>

<b>Calcul des charges de climatisation base sur la chaleur dégagée par m<sup>2</sup> de surface habitable (W·m<sup>-2</sup> surface habitable)</b>		
<b>Fonction du local</b>	<b>Facteur W·m<sup>2</sup></b>	
Local non exposé au soleil et sans aucune génération de chaleur interne	150	170
local non exposé au soleil mais avec un léger apport de chaleur dû aux appareils ou aux personnes	170	200
Local exposé au soleil sans apport de chaleur interne	200	225
local exposé au rayonnement solaire avec un léger apport de chaleur interne	225	255
Local exposé au rayonnement avec apport important de chaleur dû aux appareils internes	Faire un calcul détaillé dans ce cas en prenant en compte	
	La chaleur effective apportée par chaque élément	

Surface habitable  $S=10.12 \text{ m}^2$  :

Fonction du local : Local exposé au soleil sans apport de chaleur interne.

La valeur minimale du flux de chaleur est :

$$Q_{\text{mini}} = 10.12 * 200 = 2024 \text{ W}$$

La valeur maximale du flux de chaleur est :

$$Q_{\text{maxi}} = 10.12 * 225 = 2277 \text{ W}$$

**Annexe ii : Méthode détaillée<sup>[8,12]</sup>**

L	L	H	TeM	Tem	
3,72	2,72	2,7	40°C	28°C	
Tint	He	Hi	Heure	Mois	
24°C	30%	50%	13h	4	%
<b>Murs</b>	<i>surf. en m<sup>2</sup></i>	<i>K</i>	$\Delta T$	<i>gain</i>	
<i>S</i>	6,97	2,27	16	253,1504	
<i>O</i>	6,14	2,27	16	223,0048	
<i>N</i>	8,84	2,27	16	321,0688	
<i>E</i>	6,14	2,27	16	223,0048	
<i>Plafond</i>	10,12	3,1	16	501,952	
<i>Plancher</i>	0	0	0	0	
<b>Total des gains par conduction par les murs (W)</b>				<b>S</b>	<b>74</b>
<b>Vitrages</b>	<i>surf. en m<sup>2</sup></i>	<i>K</i>	$\square T$	<i>gain</i>	
<i>S</i>	0	0	0	0	
<i>O</i>	0	0	0	0	
<i>N</i>	0	0	0	0	
<i>E</i>	0	0	0	0	
<b>Total des gains de conduction par les fenêtres (W)</b>				<b>S</b>	<b>0</b>
<i>Porte</i>	0	0	0	0	
<b>Calcul des apports solaires</b>		0	0	0	
<b>Murs+portes closes</b>	<i>surf en m<sup>2</sup></i>	<i>K</i>	$\Delta T$ fictive	<i>gain</i>	
<i>S</i>	6,97	2,27	10,1	159,470	
<i>O</i>	6,14	2,27	15,0	209,38	
<i>N</i>	8,84	2,27	8,2	163,80	
<i>E</i>	0	1,9	8,2	0	
<i>Toit</i>	0	3,1	35,3	0	
<b>Total des apports solaires par les murs (W)</b>				<b>1011,57</b>	<b>25,9</b>
<b>Vitrages</b>	<i>Surface</i>	<i>F1*F2</i>	<i>Flux</i>	<i>gain</i>	
<i>S</i>	0	0	44	0	
<i>Porte</i>	0	0	6,09	0	
<i>N</i>	0	0	44	0	
<i>E</i>	0	0	44198	0	
<b>Total des apports solaires par les fenêtres (W)</b>				<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Calcul des apports sensibles internes</b>					
<i>Nature</i>	<i>Quantité</i>	<i>Facteurs</i>	$\square T$	<i>gain</i>	
<i>Occupants</i>	0	0	12	0	
<i>Eclairage</i>	0	0	12	0	
<i>Moteurs</i>	0	0	13	0	
<i>divers App.</i>	0	0	14	0	<b>0</b>

<i>infiltration, renouvellement</i>	0	0	14	0	
<b>Total des gains sensibles internes (W)</b>					
<b>Calcul des apports latents internes</b>					
<i>Nature</i>	<i>Quantité</i>	<i>Facteurs</i>	$\Delta X$	<i>gain</i>	
<i>Occupants</i>	0	1	0	0	
<i>Infiltrations, renouvellement</i>	0	1	0	0	
<i>Machines</i>	0	1	0	0	
<b>Total des gains latents (W)</b>		0	0	0	0
<b>FCS</b>	0	0	0	0,93	
	0	0	0	0	
<b>TOTAL DES GAINS DU LOCAL EN WATTS</b>			0	<b>2054,83</b>	<b>99,9</b>

La couleur en rouge sont des entrées et la couleur représente les sorties.

**Annexe iii: Méthode simplifié de York<sup>[1,8,12]</sup>**

charges thermiques		Unités	Quantité	Facteur	Puissance
	à l'ombre	m <sup>2</sup>	0	50	0
Vitrage	ensoleillé sans stores	m <sup>2</sup>	0	180	0
	ensoleillé avec stores intérieurs	m <sup>2</sup>	0	135	0
	ensoleillé avec stores extérieurs	m <sup>2</sup>	0	90	0
	ensoleillés, isolés	m <sup>2</sup>	0	9	0
murs extérieurs	ensoleillés, non isolés	m <sup>2</sup>	21,95	23	504,850
	non ensoleillés, isolés	m <sup>2</sup>	0	7	0
	non ensoleillés, non isolés	m <sup>2</sup>	6,14	12	73,68
Cloisons		m <sup>2</sup>	0	10	0
	Isolé	m <sup>2</sup>	0	5	0
plafond ou toit	non isolé	m <sup>2</sup>	10,12	12	121,44
	sous toit isolé	m <sup>2</sup>	0	10	0
	sous toit non isolé	m <sup>2</sup>	10,12	24	242,880
Plancher	Isolé	m <sup>2</sup>	0	7	0
	non isolé	m <sup>2</sup>	0		0
renouvellement d'air		m <sup>3</sup> /h	0		S
Occupants		Nb	0		0
Appareils électriques éclairage		Nombre .Puissance	0		S
<b>Puissance à installer en W</b>			<b>0</b>		<b>942,85</b>

Annexe iv: Méthode de Carrier<sup>[1,12]</sup>

Poste	DESCRIPTION	Unité	Quantité	Température ext.			Pf (W)	
				32 °C	35 °C	38 °C		
<b>1 Fenêtres</b>	Fenêtres exposées au soleil	S ou E	m <sup>2</sup>	0	132	142	158	0
		SO	m <sup>2</sup>	0	243	252	267	0
		O	m <sup>2</sup>	0	299	315	330	0
		NO ou		0				0
		SE	m <sup>2</sup>		180	190	205	
	toutes fenêtres non exposées ou fenêtre N	m <sup>2</sup>	0	63	79	94	0	
<b>3. Murs extérieurs</b>	murs exposés au soleil comme en 1	struct.		0				0
		Légère	m. linéaire		58	67	77	
		Struct.		6,16				357,28
		Lourde	m. linéaire		38	48	58	
<b>4</b>	tous les autres murs non exposés ou mur N	m. linéaire	1,72	24	34	43	73,96	
<b>5 Cloisons</b>	cloison intérieure d'un local non climatisé	m. linéaire	0	20	29	38	0	
<b>6 Plafonds</b>	plafond : local non conditionné au-dessus	m <sup>2</sup>	0	3	9	16	0	
	plafond : avec mansarde au-dessus	non isolé	m <sup>2</sup>	0	26	31	41	0
		isolant		0				0
	plafond : avec mansarde au-dessus	50 mm	m <sup>2</sup>		9	9	13	
	plafond avec terrasse	non isolé	m <sup>2</sup>	0	22	26	28	0
		isolant		0				0
	plafond avec terrasse	50 mm	m <sup>2</sup>		9	9	13	
plafond : toiture	non isolé	m <sup>2</sup>	10,12	44	50	57	576,84	
<b>7 Planchers</b>	plancher au-dessus de local on climatisé	m <sup>2</sup>	0	6	9	16	0	
<b>8 Occupants</b>	Occupants + renouvellement d'air	Pers			293		0	
<b>9 divers appareils</b>	éclairage et autres appareils électriques	W	0		1		0	
<b>10. Porte ouverte</b>	portes continuellement ouvertes sur espace non climatisé	m. linéaire	0		240	288	0	
	<b>Charge de climatisation</b>						<b>1008,08</b>	

**Annexe v: Méthode simplifier Aham**

	Quantité	Unité	NUIT		JOUR				Puissance W	
			BTU	W	BTU	W	BTU	W		
<b>1 fenêtre : gains solaires uniquement</b>										
sans stores, stores internes ou stores externes			SS	SS	SI	SI	SE	SE	0	
NE	0	m <sup>2</sup>	0	60	169	25	70	20	56	0
E	0	m <sup>2</sup>	0	80	226	40	113	25	70	0
SE	0	m <sup>2</sup>	0	75	212	30	84	20	56	0
S	0	m <sup>2</sup>	0	75	212	35	99	20	56	0
SO	0	m <sup>2</sup>	0	110	311	45	127	30	84	0
O	0	m <sup>2</sup>	0	150	424	65	184	45	127	0
NO	0	m <sup>2</sup>	0	120	339	50	141	35	99	0
N ou paroi à l'ombre	0	m <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>2 Fenêtres : conduction</b>	0		BTU	W	BTU	W				0
simple vitrage	0	m <sup>2</sup>	14	39	14	39				0
double vitrage	0	m <sup>2</sup>	7	19	7	19				0
<b>3 murs + portes fermées</b>			(mur d'ép. inf à 2cm = S. légère)		S Lourde		S légères			0
Basé sur la largeur du mur	0		BTU	W	BTU	W	BTU	W		0
Au nord ou à l'ombre	1,72	M	20	17	30	25	20	17		29,24
autres orientations ou	0									0
Ensoleillés	6,16	M	20	17	60	51	30	25		154
cloisons contigües à	0									0
locaux non climatisés	0	M	30	25	30	25	30	25		0
<b>4 Plafond et toitures</b>	0		BTU	W	BTU	W				0
toit non isolé	10,12	10,12m <sup>2</sup>	5	14	19	53				536,36
toit isolé de 2,54 cm de L	0	m <sup>2</sup>	3	8	8	22				0
plafond avec local habité	0	m <sup>2</sup>	3	8	3	8				0
plafond isolé avec grenier	0	m <sup>2</sup>	4	11	5	14				0
plafond non isolé et grenier	0	m <sup>2</sup>	7	19	12	33				0
<b>5 Plancher</b>	0		BTU	W	BTU	W				0
à ignorer quand il est en	0	m <sup>2</sup>	3	8	3					0
contact direct avec le sol	0									0
<b>6 Portes</b>	0		BTU	W	BTU	W				0
continuellement ouvertes	0	M	200	172	300	259				0
sur espace non climatisé	0									0
<b>7 sous-totaux</b>	0		somme de 1 à 6 =				A			0
<b>8 corrections de localisation</b>	0		A * facteur de localisation							0
<b>Géographique</b>	0									0
<b>9 nb de personnes</b>	0		BTU	W	BTU	W				0
	0		600	157	600	157				0
<b>10 Lumière et</b>	0	Nb	Watts							0
équipements électriques	0		160							0
<b>11 Puissance à installer = 8 + 9 + 10</b>										719,6

**Annexe vi: Méthode simplifiée Airwell [14,18]**

Local	Désignation: _____ Situation: _____							
	Dimensions: ..... m <sup>2</sup> de surface x ..... m de hauteur = ..... h <sup>3</sup> de volume du local							
CONDITIONS	T° sèche	T° humide	Humidité relative	Humidité absolue	Enthalpie	• Calcul effectués pour....h		
Air extérieur :	°C	°C	%	g/kg	kJ/kg	• Débit de fuites = .....m <sup>3</sup> /h		
Air du local	°C	°C	%	g/kg	kJ/kg			
Δt = .....		Δr <sub>v</sub> = .....		ΔH = .....				
Renouvellement d'air ..... = m <sup>3</sup> /h								
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Paroi: Désignation et exposition	Dimension de la paroi	Surface brute de la paroi en m <sup>2</sup>	-		Apports par transmission	-	-	Apports rayonnement solaire
	Nombre et dimensions des vitrages	Surface totale des vitrages en m <sup>2</sup>	K <sub>v</sub>	Différence des températures sèches en °C	III.IV.V (W)	g × A × Iv = Rv		III.VIII (W)
	-	Surface nette de la paroi en m <sup>2</sup>	K <sub>m</sub>		III.IV.V (W)	S × A × Im = Rm		III.VIII (W)

**APPORTS DE CHALEUR LATENTE**

Total par transmission

W

Total par rayonnement solaire----- W

Occupants : nombre..... × W/personne .....=.....

Appareil électriques : Watts dissipé.....=.....

Sources diverses :.....

 Renouvellement d'air : Δt.....m<sup>3</sup>/h.....=.....

**(1) CHARGES CALORIFIQUE SENSIBLE = W**

Occupants : nombres..... × W/personnes.....=.....

Sources diverses : eau en g/h..... × 0.7 =.....

 Renouvellement d'air : Δr<sub>v</sub>..... × m<sup>3</sup>/h..... × 1.2 × 0.7 =.....

**(2) CHARGES CALORIFIQUE LATENTE = W**
**CHARGES CALORIFIQUE TOTALE (1) +(2) = .....W**

**Annexe vii: Méthode Xpair** <sup>[14,15]</sup>

<b>Pour un fonctionnement en été</b>			
<b>APPORTS INTERNES</b>		<b>APPORTS PAR LES PAROIS</b>	
Personnes présentes et appareils en fonctionnement aux heures les plus chaudes		Murs Sud et Ouest (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="13,11"/>
Occupants (hors air neuf)	<input type="text" value="0"/>	Murs Nord et Est (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="14,98"/>
Eclairage (W)	<input type="text" value="0"/>	Plancher (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="0"/>
Appareils électriques (W)	<input type="text" value="0"/>	Plafond isolé (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="0"/>
		Plafond non isolé (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="10,12"/>
		Chassis vitré (m <sup>2</sup> )	
<b>TOTAL 1 (W)</b>	<input type="text" value="0"/>	<b>TOTAL 2 (W)</b>	<input type="text" value="960"/>
<b>APPORT PAR LES VITRAGES</b>			
	Sud et Ouest au soleil	Nord et Est à l'ombre	
Sans store (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Avec store intérieur (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Avec store extérieur (m <sup>2</sup> )	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
	<b>TOTAL 3 (W)</b>	<b>TOTAL 4 (W)</b>	<input type="text" value="0"/>
<input type="text" value="Calculer"/>	<b>PUISSANCE TOTALE (W)</b>		<input type="text" value="960"/>

**Annexe viii: Méthode simplifiée de Franc Air** <sup>[12,14]</sup>

Charges thermiques		Unité (m <sup>2</sup> )	Ratio	Puissance (W)
Vitrages	Soleil (Sud et Nord) sans stores	0	350	0
	Soleil (Sud et Nord) avec stores intérieurs	0	150	0
	Soleil (Sud et Nord) avec stores extérieurs	0	90	0
	Ombres (Nord et Est) sans stores	0	100	0
	Ombres (Nord et Est) avec stores	0	50	0
	Murs	Soleil (Sud et Ouest) sans stores	21,95	15
Ombres (Nord et Ouest) avec stores		6,14	10	61,4
Intérieurs		0	10	0
Plafond	Isolé	0	25	0
	Non isolé	10,12	60	607,85
plancher	Isolé	0	E	0
	Non isolé	0	E	0
Occupants	Au repos	0	E	0
	En activité	0	E	0
Renouvellement d'air (environ 25 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> par personne)		0	4	0
Appareils électriques		0	1	0
<b>TOTAL DES APPORTS</b>		<b>0</b>		<b>997,85</b>

## Annexe ix : Résolution de l'équation de la chaleur

### 1. Méthode des volumes finis

Il s'agit ici de la résolution de l'équation de la chaleur et la méthode adoptée est la méthode des volumes finis. La méthode des volumes finis consiste à partitionner le système en domaines contigus (les volumes finis) et à écrire les bilans thermiques de chacun de ces volumes élémentaires [19]. Nous appliquons cette méthode des volumes finis à la conduction monodimensionnelle dans un mur en parpaing (Tableau 16) d'épaisseur ( $e$ ) partitionné en quatre domaines contigus (Figure 9). Elle nous permettra d'observer les profils des températures à l'intérieure de la paroi.

- **Hypothèses :**

Nous avons choisi un maillage régulier et un pas de temps aussi régulier.

$$\begin{cases} \Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = \Delta x_4 \\ \Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 \end{cases}$$

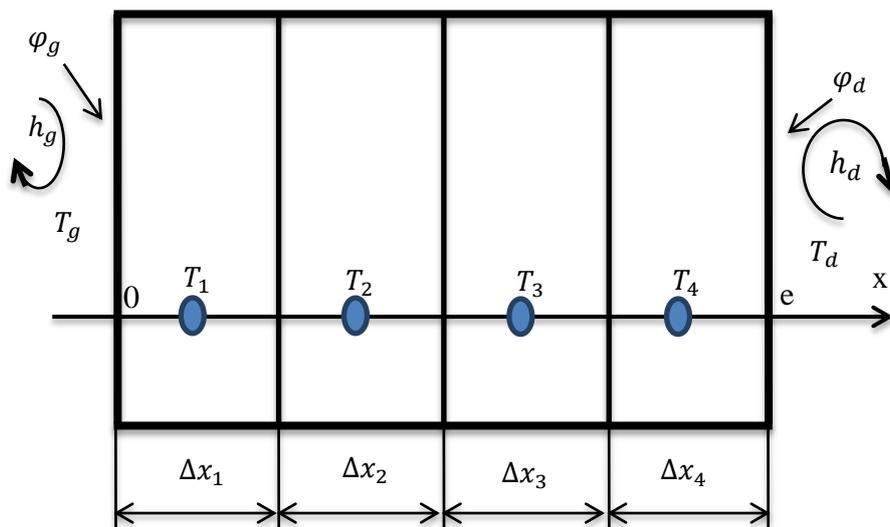
- **Conditions aux limites :**

$$\begin{cases} T(x < 0, t) = T_{ext} = T_g = 40^\circ C \\ T(x = e, t) = T_4 = T_d = 24^\circ C \end{cases}$$

- **Condition initiale :**

$$T_1^t = T_2^t = T_3^t = T_4^t = 28^\circ C$$

$$\begin{cases} T_g; T_d: \text{températures respectivement à gauche et à droite} \\ h_g; h_d: \text{coefficient d'échange à droite et à gauche} \\ \varphi_g: \text{densité de flux absorbé directement par la face gauche} \\ \varphi_d: \text{densité de flux absorbé directement par la face droite} \end{cases}$$



**Figure 9 : Méthode des volumes finis appliquée à la conduction**

Dans cette méthode, on introduit une variable d'état  $T$ , température moyenne de l'élément.

En considérant le bilan de volume  $n$  c'est-à-dire les volumes intermédiaires ( $T_2$  et  $T_3$ ) et connaissant les données du problème (Tableau 17), on peut écrire par l'équation (24)

$$cS\Delta x_n \frac{dT_n}{dt} = \lambda S \frac{T_{n-1} - T_n}{\frac{\Delta x_{n-1}}{2} + \frac{\Delta x_n}{2}} + \lambda S \frac{T_{n+1} - T_n}{\frac{\Delta x_n}{2} + \frac{\Delta x_{n+1}}{2}} \quad (24)$$

$$\rho c S \Delta x_n \frac{dT_n}{dt} = \frac{\lambda S}{h} (T_{n-1} - 2T_n + T_{n+1})$$

$$T_n^{(t+\Delta t)} - T_n^t = \frac{a\Delta t}{h^2} (T_{n-1}^t - 2T_n^t + T_{n+1}^t)$$

Avec:

$$r = \frac{a\Delta t}{h^2} \text{ et } h = \Delta x$$

$$T_n^{(t+\Delta t)} = rT_{n-1}^t + (1 - 2r)T_n^t + rT_{n+1}^t \quad (25)$$

L'équation (25) donne la température à tout instant pour chaque volume intermédiaire.

Etablissons aussi le bilan thermique pour des volumes placés en limite de paroi (à gauche et à droite) :

- Le bilan pour un volume placé en limite gauche  $T_1$  de paroi peut être écrit comme l'équation (26)

$$\rho c S \Delta x_1 \frac{dT_1}{dt} = S \frac{T_g - T_1}{\frac{1}{h_g} + \frac{\Delta x_1}{2\lambda}} + S \varphi_g \frac{\frac{1}{h_g}}{\frac{1}{h_g} + \frac{\Delta x_1}{2\lambda}} + \lambda S \frac{T_2 - T_1}{\frac{\Delta x_1}{2} + \frac{\Delta x_2}{2}} \quad (26)$$

$$\rho c S \Delta x_1 \frac{dT_1}{dt} = S \frac{T_g - T_1}{\frac{1}{h_g} + \frac{h}{2\lambda}} + S \varphi_g \frac{\frac{1}{h_g}}{\frac{1}{h_g} + \frac{h}{2\lambda}} + \lambda S \frac{T_2 - T_1}{h}$$

$$\Delta T_1 = \frac{T_{ext} - T_1}{\frac{\rho ch}{h_g \Delta t} + \frac{h^2}{2a\Delta t}} + \varphi_g \frac{\frac{1}{h_g}}{\frac{\rho ch}{h_g \Delta t} + \frac{h^2}{2a\Delta t}} + \frac{T_2 - T_1}{\frac{h^2}{a\Delta t}}$$

$$\Delta T_1 = \frac{1}{\frac{\rho ch}{h_g \Delta t} + \frac{h^2}{2a\Delta t}} (T_{ext} - T_1 + \frac{\varphi_g}{h_g}) + r(T_2 - T_1)$$

$$\text{avec } \beta_{ext} = \frac{1}{\frac{\rho ch}{h_g \Delta t} + \frac{h^2}{2a\Delta t}} \text{ et } \delta_{ext} = \frac{\varphi_g}{h_g}$$

$$\Delta T_1 = \beta_{ext}(T_{ext} - T_1 + \delta_{ext}) + r(T_2 - T_1)$$

$$T_1 = \beta_{ext}T_{ext}^t + (1 - \beta - r)T_1^t + rT_2^t + \beta_{ext}\delta_{ext} \quad (27)$$

L'équation (27) est la solution pour le volume à gauche.

- Le bilan pour un volume placé en limite droite  $T_N$  de paroi peut être écrit comme l'équation (28).

$$\rho c S \Delta x_N \frac{dT_N}{dt} = S \frac{T_g - T_N}{\frac{1}{h_d} + \frac{\Delta x_N}{2\lambda}} + \varphi_d S \frac{1/h_d}{\frac{1}{h_d} + \frac{\Delta x_N}{2\lambda}} + \lambda S \frac{T_{N+1} - T_N}{\frac{\Delta x_{N-1}}{2} + \frac{\Delta x_N}{2}} \quad (28)$$

On pose  $\varphi_d = 0$  car pas de flux absorbé par la face intérieure.

$$\begin{aligned} \varphi_d S \frac{1/h_d}{\frac{1}{h_d} + \frac{\Delta x_N}{2\lambda}} &= 0 \\ \rho c S \Delta x_N \frac{dT_N}{dt} &= S \frac{T_g - T_N}{\frac{1}{h_d} + \frac{\Delta x_N}{2\lambda}} + \lambda S \frac{T_{N+1} - T_N}{\frac{\Delta x_{N-1}}{2} + \frac{\Delta x_N}{2}} \\ \rho c S h \frac{dT_N}{dt} &= S \frac{T_g - T_N}{\frac{1}{h_d} + \frac{h}{2\lambda}} + \lambda S \frac{T_{N+1} - T_N}{h} \\ \frac{\Delta T_N}{\Delta t} &= \frac{T_g - T_N}{\frac{\rho c h}{h_d} + \frac{h^2}{2\alpha}} + \frac{T_{N+1} - T_N}{\frac{h^2}{\alpha}} \\ \Delta T_N &= \frac{T_g - T_N}{\frac{\rho c h}{h_d \Delta t} + \frac{h^2}{2\alpha \Delta t}} + \frac{T_{N+1} - T_N}{\frac{h^2}{\alpha \Delta t}} \\ &= \frac{T_g - T_N}{\frac{\rho c h}{h_d \Delta t} + \frac{h^2}{2\alpha \Delta t}} + r(T_{N-1} - T_N) \\ &= \beta_{int}(T_g - T_N) + r(T_{N-1} - T_N) \end{aligned}$$

Avec :

$$\beta_{int} = \frac{1}{\frac{\rho c h}{h_d \Delta t} + \frac{h^2}{2\alpha \Delta t}} \text{ et } T_N = T_4$$

$$T_4^{t+\Delta t} + T_4^t = \beta_{int}(T_d^t - T_4^t) + r(T_3^t - T_4^t)$$

$$\mathbf{T}_4^{t+\Delta t} = \beta_{int} \mathbf{T}_{int}^t + (\mathbf{1} - \beta_{int} - r) \mathbf{T}_4^t + r \mathbf{T}_3^t \quad (29)$$

L'équation (29) donne la solution pour le volume à gauche.

**Tableau 16 : Caractéristiques du parpaing<sup>[10]</sup>**

Matériaux	$\alpha(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\rho(\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\text{Cp}(\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$a(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta t(\text{s})$	$\Delta x=h(\text{m})$
Parpaing creux	0,67	1250	880	6,0909E-07	60	0,05

**Tableau 17 : Données du problème**

$T_{\text{ext}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{int}}(^{\circ}\text{C})$	$h_g(\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1})$	$h_d(\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1})$	$\beta_{\text{ext}}$	$\beta_{\text{int}}$	$\delta(^{\circ}\text{C})$	R
40	24	17	9	0,011	0,007	36,47	0.015

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1^{t+\Delta t} = 0,011 * 40 + (1 - 0,011 - 0,015) * 28 + 0,015 * 28 + 0,011 * 36,47 = \mathbf{28,533^{\circ}\text{C}} \\ T_2^{t+\Delta t} = 0,015 * 28 + (1 - 2 * 0,015) * 28 + 0,015 * 28 = \mathbf{28^{\circ}\text{C}} \\ T_3^{t+\Delta t} = 0,015 * 28 + (1 - 2 * 0,015) * 28 + 0,015 * 28 = \mathbf{28^{\circ}\text{C}} \\ T_4^{t+\Delta t} = 0,007 * 24 + (1 - 0,007 - 0,015) * 28 + 0,015 * 28 = \mathbf{27,860^{\circ}\text{C}} \end{array} \right.$$
  

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1^{t+\Delta t} = 0,011 * 40 + (1 - 0,011 - 0,015) * 28,533 + 0,015 * 28 + 0,011 * 36,47 = \mathbf{29,052^{\circ}\text{C}} \\ T_2^{t+\Delta t} = 0,015 * 28,533 + (1 - 2 * 0,015) * 28 + 0,015 * 28 = \mathbf{28,008^{\circ}\text{C}} \\ T_3^{t+\Delta t} = 0,015 * 28 + (1 - 2 * 0,015) * 28 + 0,015 * 27,860 = \mathbf{27,997^{\circ}\text{C}} \\ T_4^{t+\Delta t} = 0,007 * 24 + (1 - 0,007 - 0,015) * 27,126 + 0,015 * 28 = \mathbf{27,009^{\circ}\text{C}} \end{array} \right.$$

La (Figure 14) présente le profil de la température dans le mur en parpaing creux. On remarque une importante augmentation (de 25 °C à 62 °C) de la température  $T_1$  au bout de 7 h du temps et tend à être constante avec une légère augmentation durant le reste de la journée. La température  $T_2$  augmente également jusqu'à 54 °C et tend à être constante après un temps  $t=15$  h. la température  $T_4$  évolue très lentement par rapport aux trois autres et tend à être constante à un temps  $t=14$  h après. On constate une évolution progressive des températures au sein du mur entre la température extérieure, celle proche de la surface extérieure et la température au plus profond (15 cm) du mur. Nous dirons ici que l'inertie du mur provoque un amortissement des variations des températures extérieures si nous progression en profondeur.

**Annexe x : Détermination des différences des températures amorties ( $\Delta T_a$ )****1. Hypothèses**

Nous avons émis des hypothèses suivantes pour le calcul du bilan thermique :

- les portes seront en bois et les fenêtres en vitrage simple ;
- le bâtiment sera considéré en évolution libre (sans charges internes) ;
- la période de calcul sera entre le 01 Mars au 30 mai ;
- températures extérieure et intérieure sont respectivement 40 °C et 24 °C ;
- les températures  $T_1$  et  $T_4$  sont respectivement et sensiblement égales aux températures à la surface extérieure et à la surface intérieure du bâtiment.

**Tableau 18 : Ecarts de températures en fonction des orientations des murs**

Type de local	Local en parpaing			Local en BTC		
	Mars	Avril	Mai	Mars	Avril	Mai
Toiture	35,8	35,8	35,8	29,4	29,4	27
Mur Est non ensoleillé	8	8	8	6,4	6,4	6,4
Mur Ouest ensoleillé	18,5	18,5	18,8	15,1	15	16,25
Mur Sud ensoleillé	20,4	16	16,5	16,8	13	13,6
Mur Nord ensoleillé	14	14,3	14,3	11,5	11,6	11,81

$$Q = K * S * \Delta T_a \quad (30)$$

La résolution de l'équation de la chaleur de façon numérique, nous permet de déterminer la différence de la température ( $T_1 - T_4$ ). Le calcul du bilan thermique sera fait à partir de l'équation (30).

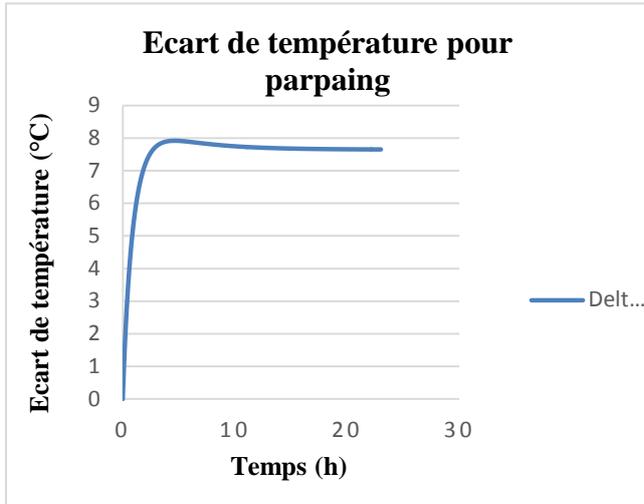
Avec  $\Delta T_a = (T_1 - T_4)$  : différence de température amortie.

Les températures  $T_1$  et  $T_4$  sont obtenu grâce à la résolution de l'équation. Le (Tableau 18) donne les valeurs de  $\Delta T$  pour les trois mois (Mars ; Avril et Mai), considérés comme les mois ou l'ensoleillement et intense à Ouagadougou. Nous avons choisi le mois d'avril comme le mois de calcul car il donne les valeurs moyennes de  $\Delta T$ . Les propriétés thermophysiques du matériau, la température extérieure et l'épaisseur de la paroi sont les éléments qui caractérisent l'inertie thermique du bâtiment. Il est important de signifier que cet écart de température varie en fonction de la température extérieure et l'épaisseur de la paroi.

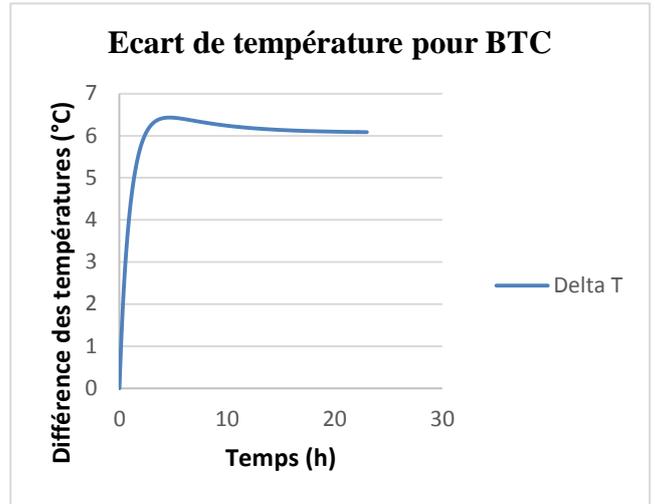
❖ Détermination du flux de chaleur pour les parois opaques non ensoleillées

L'écart de température pour des parois non ensoleillées est obtenu par la résolution de

l'équation de la chaleur sans apport solaire c'est-à-dire  $\varphi_g = 0$ . Les Figure 11 et Figure 10, nous donnent l'écart de la température.



**Figure 10 : Ecart de température du bâtiment en parpaing**

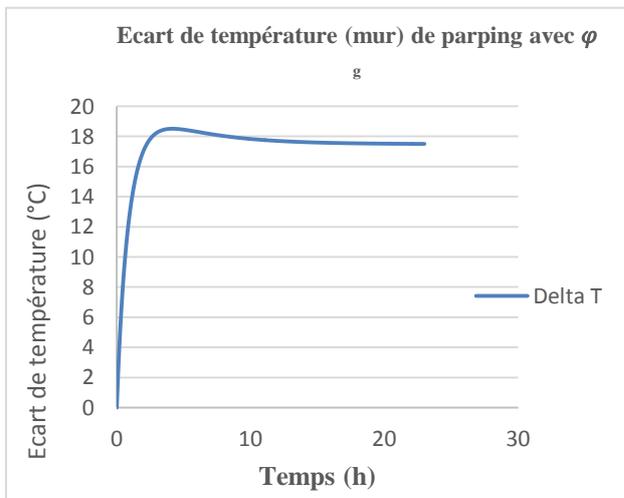


**Figure 11 : Ecart de température du bâtiment en BTC**

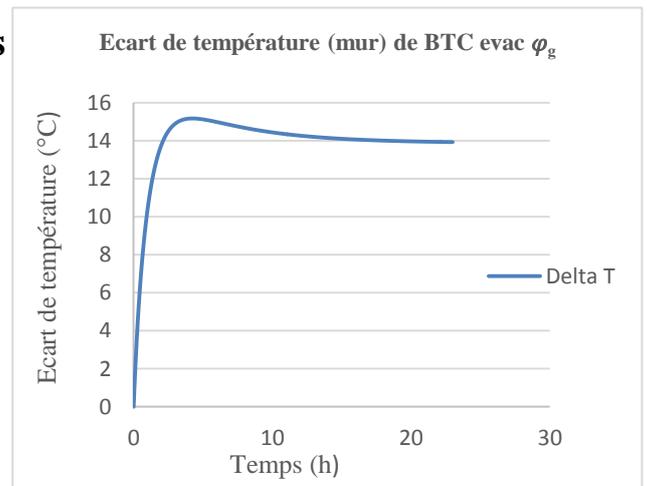
On observe de ces résultats (Figure 11 et Figure 10) un écart de 6.4 °C pour un BTC et un écart de 8 °C pour le parpaing. La température à l'intérieur du bâtiment en parpaing subit des variations plus importantes que celles du bâtiment en BTC. Ces écarts de température seront utilisés dans le reste de l'étude. Ils nous permettront de faire un bilan thermique de climatisation en tenant en compte l'inertie thermique du bâtiment.

❖ Les apports solaires sur les parois opaques

Pour les apports solaires, nous procéderons de la même manière que précédemment mais en considérant les apports solaires ( $\varphi_g \neq 0$ ).



**Figure 13: Ecart de température du bâtiment en parpaing avec apport solaire**



**Figure 12: Ecart de température du bâtiment en BTC avec apport solaire**

tion de l'.....re

pour le mur en parpaing est de 18.5 °C et celui du mur en est de BTC 15 °C (Figure 12 et Figure 13).

## **2. Gains de chaleur par les toitures**

Dans la plupart des cas les toitures sont ensoleillées et il faut tenir compte des apports solaires. Lorsque que le toit est en dalle, tuiles ou autres, le calcul du flux de chaleur se fait de la même façon que pour les murs ensoleillés compte tenu de l'inertie de la toiture. Il faut déterminer l'écart de température au niveau de la toiture. Par contre, on procèdera de la même façon que murs non ensoleillés dans le cas des toitures en tôles avec une différence de température ( $T_{ext} - T_{int}$ ).

## **3. Les parois vitrées ensoleillées et non ensoleillées**

Le bilan thermique sur les vitrages non ensoleillées sera évalué de la même manière que pour les parois opaques non ensoleillées avec une différence de température ( $T_{ext} - T_{int}$ ). Mais par contre pour les vitrages ensoleillés, nous nous conférerons à la méthode déjà proposées par ASHREA équation (21) et équation (22).

### Annexe xi : Evaluation du bilan thermique des charges de climatisation en prenant en compte l'inertie thermique

Nous allons déterminer un bilan thermique des climatisations de notre local en tenant compte de l'inertie thermique du bâtiment. Pour ce faire, nous considérons les mêmes hypothèses énumérées au paragraphe V.1.2.

- ❖ Local construit en parpaing

**Tableau 19 : les apports de chaleur du bâtiment en parpaing**

Bâtiment en parpaing					
Parois	Orientation	K ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	S	delta Ta	Q
Non ensoleillés	Ouest	2,27	6,14	8	111,5024
	Nord		8,84		160,5344
	Sud		6,97		126,5752
	Est		6,14		111,5024
Ensoleillés	Ouest	0,45	6,14	18,50	257,85
	Nord		8,84		371,24
	Sud		6,97		292,71
	Toit		10,12		424,99
Q total (W)					1856,89

**Tableau 20 : Les apports par les vitres non ensoleillées (parpaing)**

Local en parpaing (vitres)					
Type des parois	Orientation	Surface ( $m^2$ )	K ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	$\Delta T a(^{\circ}C)$	Q(W)
Non ensoleillée	Est	1,2	5,8	16	111,36
Q total vitres non ensoleillées					111,36

**Tableau 21 : Les apports par les vitres ensoleillées (parpaing)**

Local en parpaing (vitres)					
Type des parois	Orientation	Surface ( $m^2$ )	SC	SHGF ( $W \cdot m^{-2}$ )	Q (W)
Ensoleillée	Ouest	1,2	1	141,09	169,30
	Nord	1,2		46,90	55,30
	Sud	1,2		45,59	54,70
Q total des vitres (W)					390,65
Q total du local (W)					2247,54

Le (Tableau 19) et le (Tableau 21) donnent le flux total transmis dans le local construit en parpaing

est : **2247,54 W**.

❖ Local en BTC

**Tableau 22 : les apports de chaleur du bâtiment en BTC**

Bâtiment en BTC					
Parois	Orientation	K ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	Surface ( $m^2$ )	$\Delta T_a$ ( $^{\circ}C$ )	Q (W)
Non ensoleillés	Ouest	2,27	6,14	6,5	90,5957
	Nord		8,84		130,4342
	Sud		6,97		102,84235
	Est		6,14		90,5957
Ensoleillés	Ouest	0,45	6,14	15,00	209,07
	Nord		8,84		301,00
	Sud		6,97		237,33
	Toit	10,12	344,59		
Q total (W)					1506,45

**Tableau 23 : Les apports par les vitres non ensoleillées (BTC)**

Local en BTC (vitres)					
Type des parois	Orientation	Surface ( $m^2$ )	K ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	$\Delta T$ ( $^{\circ}C$ )	Q (W)
non ensoleillée	Est	1,2	5,8	16	111,36
Q total vitre non ensoleillée (W)					111,36

**Tableau 24 : Les apports par les vitres ensoleillées (BTC)**

Type des parois	Orientation	Surface ( $m^2$ )	SC	SHGF ( $W \cdot m^{-2}$ )	Q (W)
Ensoleillée	Ouest	1,2	1	141,09	169,30
	Nord	1,2		65,90	55,30
	Sud	1,2		45,509	54,70
Q total vitre ensoleillées (W)					390,65
Q total du local (W)					1898,11

Le (Tableau 22), et le (Tableau 24) nous donnent le flux total transmis dans le local construit en BTC est : **1898,11 W**.

En appliquant l'équation (3), nous obtenons un déphasage presque identique (4 h) pour les deux types de bâtiment.

### **Annexe xii : Etude économique comparative basée sur deux types de bâtiment**

Dans ce paragraphe, nous réalisons une étude économique comparative d'un bâtiment construit

en BTC et d'un bâtiment construit en parpaing. Cette étude tiendra compte en premier lieu de l'investissement initial et en suite de la consommation énergétique due à la climatisation.

### 1. Investissement initial

Nous avons évalué le prix du m<sup>2</sup> pour connaître le coût initial du projet. Le Tableau 25 et le Tableau 26 donnent le coût du projet. Ils présentent l'investissement initial sur les bâtiments en parpaing et bâtiment en BTC.

**Tableau 25 ; Investissement initial du bâtiment en BTC**

N°	DESIGNATION DES OUVRAGES	Prix total (FCFA)
I	Terrassement	71 104
II	Béton-maçonnerie de BTC	932 330
III	Menuiseries métalliques-bois	614 000
IV	Charpente-Couverture	1 282 830
V	Revêtement-Peinture	425 300
VI	<b>Total général H TVA</b>	<b>3 326 564</b>
VII	<b>TVA = 18%</b>	<b>598 782</b>
VIII	<b>Total général TTC (FCFA)</b>	<b>3 925 346</b>

**Tableau 26 : Investissement initial du bâtiment en parpaing**

N°	Désignation des ouvrages	Prix total(FCFA)
I	Terrassement	71 104
II	Béton-maçonnerie	835 453
III	Menuiseries métalliques bois	615 000
IV	Charpente-Couverture	1 282 830
V	Revêtement-Peinture	425 300
VI	<b>Total général h tva</b>	<b>3 229 687</b>
VII	<b>TVA = 18%</b>	<b>581 344</b>
VIII	<b>Total général TTC (FCFA)</b>	<b>3 811 031</b>

:

### 2. Prévision de la consommation de charge de climatisation

#### ❖ Temps de fonctionnement du climatiseur

Les hypothèses de calcul sont basées sur le calendrier annuel du Burkina-Faso, en tenant compte

de plusieurs facteurs qui sont entre autres :

- Les jours fériés et fêtes légales du Burkina ;
- Destination de la salle (Bureau) ;

Ainsi à partir du calendrier 2015, nous obtenons 9 jours fériés. Compte tenu de la destination du local, nous considérons 5 jours ouvrables (lundi au vendredi) par semaine et continuellement occupé de 7 h-13 h et de 15 h-18 h par semaine soit environ 9 h par jour et 243 jours ouvrables pour l'année 2015.

#### ❖ Puissance du climatiseur

La puissance du compresseur est généralement déduite à partir des catalogues des constructeurs, on peut aussi utiliser la notion de coefficient d'efficacité frigorifique ou performance frigorifique ( $COP_{\text{froid}}$ ) pour une approximation par l'équation (5). Seul le flux de chaleur par les parois opaques est considéré.

$$P_a = \frac{P_f}{COP_{\text{froid}}}$$

$$COP_{\text{froid}} = \frac{P_f}{P_a}$$

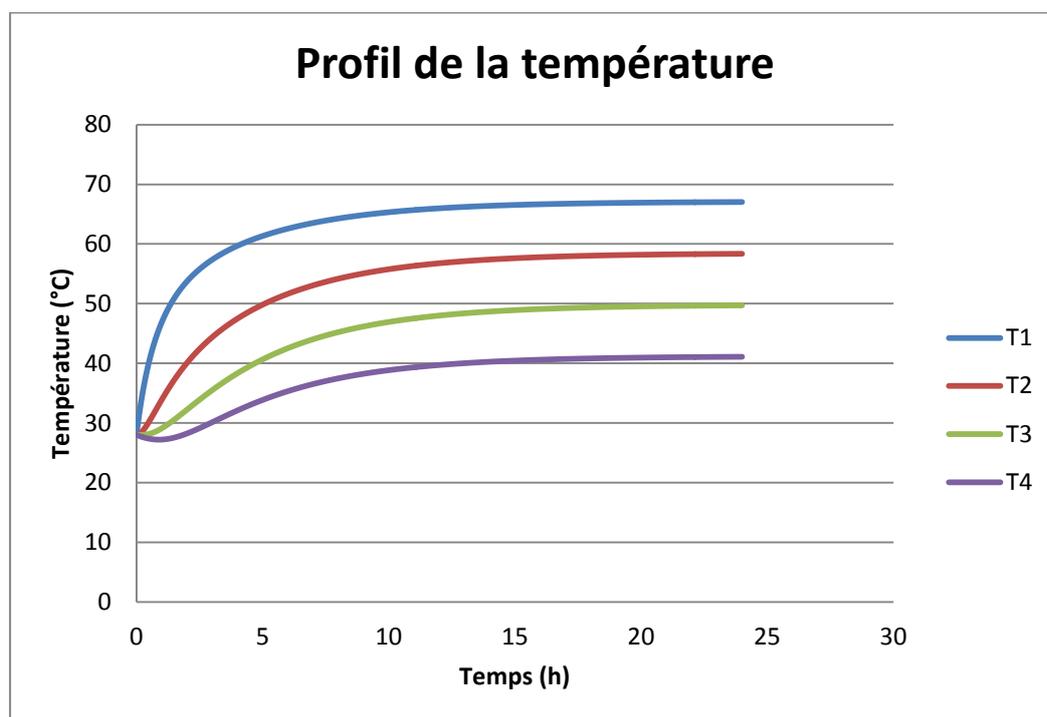
**Tableau 27 : Puissance du climatiseur**

Matériaux	Puissance frigorifique (kW)	COP froid	Puissance absorbée (kW)
Parpaing	1,85	2,5	0,74
BTC	1,51	2,5	0,60

L'énergie consommée est donnée par le Tableau 28.

**Tableau 28 : Consommation de l'énergie par la climatisation**

Consommation de l'énergie par la climatisation								
Type du bâtiment	Nombre d'heures par jour (h/j)	Nombre de jours par an (j/an)	Nombre d'heures par an (h/an)	Energie journalière (kW)	Energie consommée annuelle	Energie consommée pour 40 ans	Gain pour 40 ans (FCFA)	Economie engendré en 40 ans (FCFA)
Parpaing	9	243	2187	6,68	14 619,67	584 786,65	<b>81 870 131,55</b>	<b>15 450 871,56</b>
BTC				5,42	11 860,58	474 423,28	<b>66 419 259,98</b>	



**Figure 14 : Profil de la température**

**Annexe xiii : Allure de la température à l'intérieure du bâtiment**

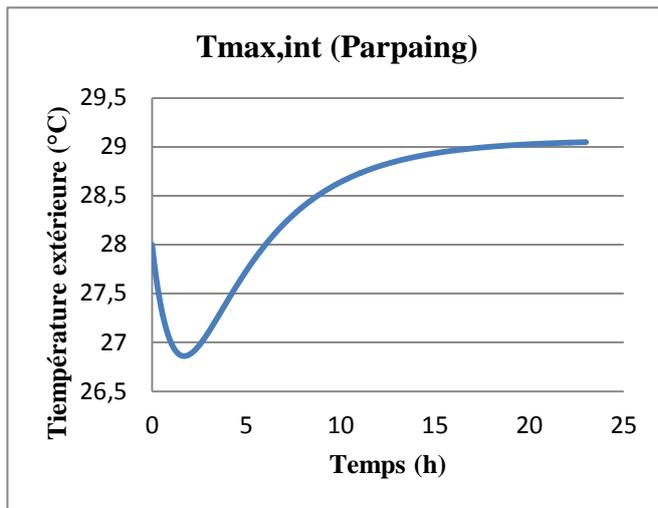


Figure 15:Allure de la température intérieure amortie (parpaing)

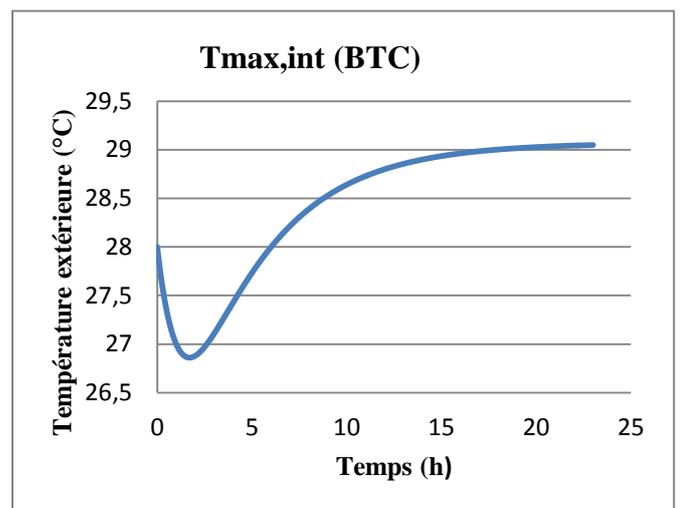


Figure 16: Allure de la température intérieure amortie (BTC)

### Annexe xiv : Expression du déphasage thermique

Le déphasage peut être calculé à l'aide des formules suivantes <sup>[20]</sup> :

La constante de temps est donnée par l'équation (31).

$$\tau = R * C_{P_{surf}} \quad (31)$$

$$\text{Avec } R = \frac{e}{\lambda} \text{ et } C_{P_{surf}} = e * \rho * C_p \quad (32)$$

$$\tau = \frac{e^2 * \rho * C_p}{\lambda} \quad (33)$$

$$\tau = \frac{e^2}{D} \quad (33)$$

$$\left[ \begin{array}{l} R: \text{résistance thermique de la paroi } (m^2KW^{-1}) \\ C_{P_{surf}}: \text{capacité thermique surfacique de la paroi } (Whm^{-2}K^{-1}) \\ \tau: \text{constante de temps}(h); \\ e; \text{épaisseur du matériaux } (m); \\ D: \text{diffusivité thermique } (m^2h^{-1}) \end{array} \right.$$

En divisant la constante de temps par la période (p=24), on obtient la constante de temps relative.

$$C_r = \frac{\tau}{24}$$

En remplaçant  $\tau$  par son expression, on a :

$$C_r = \frac{e^2 * \rho * C_p}{24 * \lambda} \quad (34)$$

$$C_r = \frac{e^2}{24 * D}$$

Le temps de déphasage en radian est déterminé à l'aide de la relation ci-après <sup>[20]</sup>

:

$$\phi = \sqrt{\pi * C_r} \quad (35)$$

Remplaçons  $C_r$  par son expression, on aura :

$$\phi = \sqrt{\frac{\pi * e^2 * \rho * C_p}{24 * \lambda}}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{\pi}{24 * D}} * e \quad (36)$$

Afin d'obtenir la valeur du temps de déphasage en heures, on multiplie l'équation par  $\frac{24}{2 * \pi}$ .

$$\phi = \frac{24}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{\pi * e^2 * \rho * C_p}{24 * \lambda}} * e$$

$$\phi = \sqrt{\frac{6 * \rho * C_p}{\pi * \lambda}} * e \quad (37)$$