



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

Master de Recherche en Efficacité Energétique et Energies Renouvelables (MR-3ER)

Rapport de stage

Thème :

Effets du rapport optimal fenêtre-mur ROM (WWR) sur le confort thermique du bâtiment au sud du Bénin, pour une orientation optimale.

Présenté par :

KPADJOUA Rodrigue

Ingénieur en Génie Mécanique et Energétique

Encadré par

Sous la direction de

Dr. Edmond C. VODOUNNOU

Dr, Ir Clément AHOUANNOU

Maitre-Assistant des Universités du CAMES

Professeur Titulaire des Universités du CAMES

Enseignant Chercheur à EPAC / UAC

Enseignant Chercheur à EPAC / UAC

Département de Génie Mécanique et Energétique

Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées

DEDICACE

A mon très cher professeur

Clément AHOUANNOU

Je dédie ce mémoire.

Rodrigue KPADJOUA

REMERCIEMENTS

Les recherches qui font l'objet de ce mémoire ont été effectuées au Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées de l'Ecole Polytechnique de l'Université d'Abomey Calavi (UAC, Bénin). Nous voudrions ici adresser nos sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur grain de sel à la réalisation de ce rapport de mémoire.

Nous remercions Dieu pour tout le courage qu'Il nous a donné pour mener à bien ce travail.

Bien entendu, les mots nous manquent pour exprimer toute notre gratitude.

Nos remerciements vont aussi :

- ♣ Au Professeur Mohamed GIBIGAYE, Directeur de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (ED-SDI/EPAC) ;
- ♣ Au Professeur Clément AHOUANNOU, Enseignant- Chercheur à l'EPAC (UAC), Coordonnateur principal du Master de Recherche en Efficacité Energétique et Energies Renouvelables. Vous avez accepté de nous suivre malgré vos multiples occupations. Je vous prie de recevoir l'expression de nos sentiments de gratitude ;
- ♣ Au Professeur Aristide HOUNGAN, Coordonnateur-Adjoint du Master de Recherche Efficacité Energétique et Energies Renouvelables ;
- ♣ A mon encadreur, Docteur Edmond C. VODOUNNOU. Vous avez accepté avec enthousiasme de nous encadrer pour notre mémoire, malgré vos charges. Recevez ici, monsieur l'encadreur, notre profonde sympathie ;
- ♣ **A vous, Doctorant** Berléo D. APOVO, pour l'aide que vous nous avez apportée au cours de ce travail ;
- ♣ Tous les enseignants intervenant dans la formation du Master de Recherche Efficacité Energétique et Energies Renouvelables pour toute l'attention qu'ils m'ont consacrée durant ma formation ;
- ♣ **A vous tous**, enseignants du secondaire en particuliers aux chefs des Groupes permanents spécialisés de Mathématiques et de PCT (IES. Pierre DOSSOU-DOSSA et IES. Amour SOTINKON) et au Conseiller Pédagogique en PCT (CP Alexandre ADJAGBO) qui ont pris leur temps avec la gentillesse d'effectuer des corrections à mes œuvres didactiques ;
- ♣ Tous mes collègues, amis et proches.

RESUME

L'objectif de ce travail est de modéliser sous TRNSYS un bâtiment universitaire à usage de salle de classe, dont la toiture est en tuile de terre cuite avec plafond et dont les parois sont en matériaux brique creuse (BC) ou en mortier renforcé de fibres de bananier (MFB). Cette étude numérique est réalisée sous le logiciel TRNSYS 2017, afin d'apprécier le confort thermique du bâtiment, tout en respectant les contraintes d'orientation et de ratios surfaces menuiseries/parois opaques.

Le bâtiment d'étude est situé dans la zone Master sur le campus de l'Université d'Abomey-Calavi. Il est un local parallélépipédique, dont le plancher de dimensions 20 m sur 8 m est constitué par un remblayage de terre pressée. Les murs de hauteur sous plafond de 3 m sont réalisés en différents matériaux (BC et MFB) et la toiture à deux versants. Les façades principales du bâtiment sont orientées Sud-Nord. Son axe est orienté de l'Est à l'Ouest et les façades Est et Ouest n'ont pas de fenêtres. Les façades Nord et Sud sont principalement occupées par des fenêtres à deux battants et des portes à deux battants de dimensions respectives 2 m x 1,5 m et 2 m x 2,5 m avec encadrement en bois léger, en vitrage simple de 4 mm d'épaisseur. La salle de classe comporte 55 personnes (54 élèves + 1 enseignant), disposant de 28 tables et 55 chaises puis occupée de 8 h à 12 h et de 14 h à 18 h. A cause de l'indisponibilité des données météorologiques de la ville d'Abomey-Calavi dans le module Météonorm de notre simulateur, nous avons utilisé les données de la ville de Lagos Ikeja qui sont proche des données de notre site.

Les résultats de simulation montrent que l'orientation optimale est Sud (façades principales comportant assez d'ouvertures) car elle favorise la bonne ventilation naturelle. Ensuite l'isolation thermique de la toiture (utilisation des plafonds) et l'utilisation des matériaux de bonne résistance thermique (MFB) améliorent la température à l'intérieur du bâtiment. Le choix optimal des ratios s'appuie sur la plage de température (20°C à 28°C) proposée par les travaux de Givoni et Milne, 1979. Notre étude portant sur une salle de classe et les charges hygrothermiques (infiltration, ventilation, gains, mode d'habillement, métabolisme et vitesse de l'air) peuvent subir des modifications en fonction des besoins donc nous choisissons le bâtiment de ROM2_5 (18,48%) pour en profiter plus de la ventilation naturelle.

Mots clés : Rapport fenêtre-mur, bâtiment, orientation optimale, confort thermique

ABSTRACT

The objective of this work is to model under TRNSYS a university building used as a classroom, whose roof is made of clay tiles with ceiling and whose walls are made of hollow brick (BC) or banana fiber reinforced mortar (MFB) materials. This numerical study is carried out under the TRNSYS 2017 software, in order to appreciate the thermal comfort of the building, while respecting the constraints of orientation and the window/shade wall surface ratios.

The study building is located in the Master area on the campus of the University of Abomey-Calavi. It is a parallelepipedic room, whose floor of dimensions 20 m by 8 m is constituted by a filling of pressed earth. The walls with a ceiling height of 3 m are made of different materials (BC and MFB) and the roof has two slopes. The main facades of the building are oriented South-North. Its axis is oriented from East to West and the East and West facades have no windows. The North and South facades are mainly occupied by double windows and double doors of 2 m x 1.5 m and 2 m x 2.5 m respectively with light wood frames, single glazed with 4 mm thick glass. The classroom has 55 people (54 students + 1 teacher), with 28 tables and 55 chairs and is occupied from 8 am to 12 pm and from 2 pm to 6 pm. Because of the unavailability of meteorological data of the city of Abomey-Calavi in the Meteororm module of our simulator, we used the data of the city of Lagos Ikeja which are close to the data of our site.

The simulation results show that the optimal orientation is South (main facades with enough openings) because it promotes good natural ventilation. Then the thermal insulation of the roof (use of ceilings) and the use of materials of good thermal resistance (MFB) improve the temperature inside the building. The optimal choice of ratios is based on the temperature range (20°C to 28°C) proposed by the work of Givoni and Milne, 1979. Our study is based on a classroom and the hygrothermal loads (infiltration, ventilation, gains, mode of clothing, metabolism and air velocity) can undergo changes according to the needs so we choose the building of ROM2_5 (18.48%) to take more advantage of natural ventilation.

Key words : Window-wall ratio, building, optimal orientation, thermal comfort

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
NOMENCLATURE.....	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
Introduction	6
1.1. Typologie des bâtiments (Guarry MONTROSE, 2021).....	6
1.1.1. Bâtiment à basse consommation d'énergie	6
1.1.2. Bâtiment passif	6
1.1.3. Bâtiment producteur d'énergie	6
1.1.4. Bâtiment zéro énergie.....	7
1.1.5. Bâtiment à énergie positive	7
1.1.6. Bâtiment autonome.....	7
1.2. Conception bioclimatique du bâtiment (IFDD, 2015).....	7
1.2.1. Forme du bâtiment.....	8
1.2.2. Orientation du bâtiment	9
1.3. Enveloppe du bâtiment (IFDD, 2015)	10
1.3.1. Toit	10
1.3.2. Murs.....	12
1.3.3. Ouvertures	13
1.4. Exigences sur les ouvertures des bâtiments en climat tropical.....	14
1.5. Le confort thermique (MAGALIE TECHER, 2017).....	17
1.5.1. Facteurs environnementaux.....	18
1.5.2. Facteurs liés aux occupants	21
1.6. Approche d'estimation du confort thermique (RIANTSOA Donatien René, 2020).....	23
1.6.1. Le modèle de Olgyay	23
1.6.2. Le modèle de Fanger	24
1.6.3. Le modèle de Givoni	26
1.7. Confort thermique en climat tropical humide.....	27

1.8. Outil numérique de simulation TRNSYS (Kimnenh TAING, 2020).....	29
1.8.1. Modélisation multizone du bâtiment par le Type 56 « TRNBuild »	30
1.8.2. Description mathématique des composantes utilisées dans la simulation.....	30
1.9. Quelques travaux réalisés sur le confort thermique dans le bâtiment	35
Conclusion.....	38
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODE	39
Introduction	40
2.1. Matériel	40
2.1.1. Outil de représentation du prototype de bâtiment (Google SketchUp 8)	40
2.1.2. Bâtiment d'étude	41
2.1.3. Outils de simulation (TRNSYS 2017).....	43
2.2. Méthode.....	44
2.2.1. Donnés climatiques	45
2.2.2. Données de construction.....	47
2.2.3. Charges hygrothermiques	48
2.2.4. Les paramètres de simulation (données d'entrées).....	50
2.2.5. Effet de l'orientation du bâtiment.....	50
2.2.6. Ratios des surfaces ouvertures par les surfaces des parois murs.....	51
Conclusion.....	52
CHAPITRE 3 : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSION	53
Introduction	54
3.1. Résultats obtenus sur le calcul du rapport fenêtre-mur (WWR)	54
3.2. Analyse de l'influence de l'orientations du bâtiment.	55
3.2. Analyse des résultats sur les éléments constitutifs de l'enveloppe de notre bâtiment.....	56
3.2.1. Influence des matériaux de construction	57
3.2.2. Influence de la composition de la toiture.....	60
3.3. Analyse des résultats sur l'influence des ratios ouvertures/murs de notre bâtiment.	66
Conclusion.....	69
CONCLUSION GENERALE	70
PERSPECTIVES.....	71
REFERENCES BIBLIOGRAPGIQUES	72
ANNEXES.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Variation du rapport de la surface au volume (coefficient de forme) pour un cube de volume croissant (IFDD, 2015).....	9
Figure 1. 2 : Orientation de bâtiment face au vent et au soleil. (IFDD, 2015).....	9
Figure 1. 3: Principaux types de toits (IFDD, 2015).....	11
Figure 1. 4 : Installation d'un faux-plafond sous une toiture légère (ECONOLER, 2011).....	11
Figure 1. 5 : Les éléments de maçonnerie (Dirk NATHANIELS, 2018).....	12
Figure 1. 6 : Différents types de fenêtres ; les valeurs entre crochets correspondent à la surface ouverte efficace (perméabilité) en pourcentage de la surface de l'ouverture (IFDD, 2015).....	14
Figure 1. 7 : Facteurs qui influencent le confort thermique des usagers (Virginie GROSDÉMOUGE, 2020).....	18
Figure 1. 8 : Schéma explicatif des échanges thermiques (Magalie Techer. 2017).....	18
Figure 1. 9 : Valeurs exprimées en Clo de tenues vestimentaires (Saddok, 2016).....	22
Figure 1. 10 : Comportements adaptatifs (Celis Mercier, 2009).....	23
Figure 1. 11 : Diagramme de Olgyay.....	24
Figure 1. 12 : Les Plages de sensibilité à la vitesse d'air correspondant à un PMV compris entre -0,5 et +0,5.....	25
Figure 1. 13 : Le diagramme du Givoni.....	26
Figure 1. 14 : zone de confort en climat tropical humide.....	28
Figure 1. 15 : La relation des 4 composants TRNSYS (Kimnénh TAING, 2020).....	30
Figure 1. 16 : Flux de chaleur et températures d'une paroi de bâtiment (TRNSYS, 2010).....	31
Figure 1. 17 : Flux de chaleur convectifs sur un nœud d'air (TRNSYS, 2010).....	33
Figure 1. 18 : Flux de chaleur radiatifs dans une paroi (TRNSYS, 2010).....	34
Figure 2. 1 : Espace de travail de GOOGLE SKETCHUP 8.....	40
Figure 2. 2 : Façade principale du bâtiment orienté Sud-Nord.....	41
Figure 2. 3 : Façade arrière du bâtiment orienté Sud-Nord.....	41
Figure 2. 4 : Configuration du bâtiment obtenu avec le logiciel Autocad.....	42
Figure 2. 5 : Composition du mur et du plancher.....	43
Figure 2. 6 : Simulation studio de TRNSYS 2017.....	43
Figure 2. 7 : Organigramme de simulation.....	44
Figure 2. 8 : Représentation du bâtiment d'étude dans Trnsys3d zone.....	45
Figure 2. 9 : Organigramme de simulation.....	46

Figure 3. 1 : Température opérative durant le mois de mars dans la salle de cours en tuile pour les différentes orientations	55
Figure 3. 2 : Température opérative durant le mois d’août dans la salle de cours en tuile sans plafond pour les différentes orientations	56
Figure 3. 3 : Température opérative durant le mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas du bâtiment en tuile sans plafond	57
Figure 3. 4 : Température opérative durant le mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas du bâtiment en tuile avec plafond.....	58
Figure 3. 5 : : Humidité relative durant le mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas du bâtiment en tuile sans plafond.....	59
Figure 3. 6 : Humidité relative durant le mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas du bâtiment en tuile avec plafond.....	59
Figure 3. 7: Température opérative durant le mois de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC.....	60
Figure 3. 8 : Température opérative durant le mois de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en MFB.....	61
Figure 3. 9 : Humidité relative durant le mois de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC	62
Figure 3. 10: Humidité relative durant le mois de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en MFB	62
Figure 3. 11 : Température opérative pendant une journée pour une orientation Sud-Nord durant la première semaine d’août, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC	63
Figure 3. 12 : Température opérative durant le mois d’août, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en MFB.....	63
Figure 3. 13 : Humidité relative pendant une journée pour une orientation Sud-Nord durant la première semaine d’août, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC	65
Figure 3. 14 : Humidité relative durant le mois d’août, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en MFB	65
Figure 3. 15 : Température opérative durant le mois de mars, orientation Sud-Nord dans la salle de cours en tuile pour les différents ratios ouvertures/murs	66
Figure 3. 16 : Température opérative durant le mois de mars, orientation Sud-Nord dans la salle de cours en tuile pour les différents ratios ouvertures/murs.	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 : Plages des directions dominantes de base du vent (GBAGUIDI Victor S. & al 2011).	10
Tableau 1. 2: Zonage climatique proposé pour l'UEMOA,2020	14
Tableau 1. 3 : Valeurs à respecter pour l'enveloppe de bâtiment	15
Tableau 1. 4 : Valeurs à respecter par les parois vitrées.....	16
Tableau 1. 5 : Refroidissement équivalent à la vitesse relative de l'air (MAGALIE TECHER, 2017)	21
Tableau 1. 6 : Valeur de référence du métabolisme selon le type d'activité	22
Tableau 1. 7 : Echelle du confort thermique (ISO, 2005 ; ASHRAE-55, 2017)	24
Tableau 2. 1: Coordonnées géographiques du site d'étude (Google Earth ; Meteonorm Trnsys , version 2017).....	45
Tableau 2. 2 : Les différents paramètres de l'organigramme de simulation.....	46
Tableau 2. 3 : Description du bâtiment.....	47
Tableau 2. 4 : Valeurs par défaut de $n50$ (S. GBENOU,2017)	48
Tableau 2. 5 : Entrées et sorties dans le logiciel.....	50
Tableau 2. 6 : Surface des parois et d'ouvertures de l'enveloppe du bâtiment.....	51
Tableau 3. 1 : Différents ROM calculés	54
Tableau 3. 2 : Résultats du choix de rapport optimal fenêtre-mur	68

NOMENCLATURE

Sigles	Signification
3D	Trois Dimensions
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BC	Brique Creuse
BP	Brique pleine
BTC	Blocs de Terre Comprimée
CLO	Courte longueur d'onde
EN	Norme Européenne
GLO	Grande longueur d'onde
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
Idf	Instrument Definition File
IEPF	Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie
IFDD	Institut de la Francophonie et du Développement Durable
ISO	International Organization for Standardization
MFB	Mortier renforcé des Fibres de Bananier
MFC	Mortier renforcé des Fibres de coco
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied
ROM (WWR)	Ratio Ouverture-Mur
TRNSYS	TRaNsient SYstem Simulation
VV	Vitesse du Vent
WWR	Windows Wall and Ratio

Lettres grecques	Signification	Unité
λ	Conductivité thermique du matériau	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
φ	Densité de flux	W/m^2
φ_c	Densité de flux liée à la convection	W/m^2
φ_r	Densité de flux de chaleur par rayonnement	W/m^2
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W/m^2 \cdot K^4$
ρ	Masse volumique	kg/m^3
ρ_a	Masse volumique de l'air	kg/m^3

Symbole	Signification	Unité
$S_{s,i}$	Flux de chaleur de rayonnement de courte longueur d'onde absorbé par la surface intérieure (gains solaires)	W
$S_{s,e}$	Flux de chaleur de rayonnement de courte longueur d'onde absorbé par la surface extérieure (gains solaires)	W
$T_{vent,i}$	Température du vent de la zone i	°C
T_{air}	Température de l'air	°C
$T_{zone,i}$	Température de la zone « i »	°C
$T_{ext,i}$	Température extérieure	°C
$T_{a,s}$	Température du nœud de la zone i	°C
$T_{s,o}$	Température de la surface externe du mur	°C
$T_{s,i}$	Température de la surface interne du mur.	°C
$q_{r,s,t}$	Flux net radiatif échangé avec toutes les surfaces extérieures à la zone.	W
$q_{w,g,t}$	Gain dans la paroi ou dans la surface de la fenêtre défini par l'utilisateur	W
$q_{s,t}$	Flux conductif dans le mur vers la surface interne.	W
$q_{c,s,o}$	Flux convectif à partir de la surface externe du mur vers l'air ambiant.	W
$q_{c,s,i}$	Flux convectif à partir de la surface interne du mur vers l'air de la zone.	W
$q_{s,o}$	Flux conductif dans le mur à partir de la surface externe.	W
$Q_{surf,i}$	Gains convectifs provenant des parois intérieures	W
$Q_{inf,t}$	Gains d'infiltration	W
$Q_{vent,i}$	Gains de ventilation	W
$Q_{gc,t}$	Gains convectifs internes	W
$Q_{cplg,t}$	Les gains convectifs dus à l'écoulement de l'air entre les zones.	W
$Q_{solar,t}$	Gains solaires entrant dans une zone à travers les fenêtres externes et qui sont transférés en gain convectif à l'air intérieur.	W
$Q_{ISHCCI,t}$	Rayonnement solaire absorbé par les dispositifs d'ombrage internes de la zone, qui est transféré comme un gain convectif à l'air intérieur.	W
Q_{r,w_t}	Gains radiatifs reçus par un nœud surfacique d'une paroi	W
Q_{g,r,t,w_t}	Gains radiatifs internes reçus par une paroi.	W
Q_{sol,w_t}	Gains solaires reçus par une paroi via les fenêtres.	W
Q_{long,w_t}	Gains à travers les échanges de chaleur par rayonnement entre une paroi et les autres parois de la zone.	W
$Q_{wall-gain}$	Flux de chaleur radiatif spécifique à une paroi donnée.	W
\dot{V}	Débit volumique d'air	m ³ /s

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les bâtiments sont conçus pour jouer un rôle de filtre thermique permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. La forme, l'orientation, l'agencement et la composition des éléments constitutifs déterminent les caractéristiques de ce filtre. Les ambiances intérieures ne répondant pas toujours aux exigences de confort des occupants, la réponse du bâtiment est corrigée par des appareils de climatisation agissant comme des sources contrôlées de chaleur ou de froid, et ayant parfois un effet sur les taux d'humidité. Les normes de confort sont encore relativement frustrées, les appareils de climatisation consomment de l'énergie et entraînent de ce fait des coûts de fonctionnement qui peuvent être très élevés (Smail BENDARA, 2019)

Le secteur du bâtiment demeure à l'échelle mondiale un poste important de consommation énergétique et d'émissions polluantes (Lou, 2012 ; Daouadji, 2017). La réduction de la consommation d'énergie d'un bâtiment et l'amélioration de la qualité de l'ambiance intérieure sont les deux enjeux majeurs auxquels sont confrontés les professionnels de la construction dans le monde entier (Valdiserri, et al., 2015; Kim, et al., 2017). Les pays situés en région tropicale, comme le Bénin, sont marqués par un climat relativement chaud, ce qui nécessite des technologies appropriées et une optimisation des performances énergétiques des bâtiments afin d'offrir aux utilisateurs un niveau de confort souhaité.

Beaucoup de technologies ont été produites pour aider à assurer une meilleure performance et à fournir un environnement confortable aux occupants. Le climatiseur et le ventilateur de plafond ont été utilisés pour aider à réduire la température et ainsi améliorer l'environnement intérieur du bâtiment. Cependant, l'utilisation du climatiseur augmente la pollution de l'environnement en libérant des gaz à effet de serre dans l'environnement. De plus, l'utilisation de toutes ces technologies telles que le climatiseur et le ventilateur de plafond peut également nécessiter une consommation d'énergie plus élevée. Pour l'architecte et le designer, l'utilisation de matériaux naturels et réutilisables, d'énergie réutilisable et de la ventilation est une approche qui n'affecte pas l'environnement.

Cependant, concevoir de manière durable un bâtiment tout en garantissant un environnement confortable pour les occupants, impose de connaître la situation actuelle de ce bâtiment afin de déterminer quelles stratégies passives et actives de conception peuvent être utilisées pour aider à améliorer les performances de ce bâtiment en climat tropical. On attend alors du bâtiment, qu'il offre un confort naturel en toute saison (Hollmuller, et al., 2003; Zhongting, et al., 2016).

Pour répondre à cette problématique, nous nous sommes basés sur certains travaux sur le confort dans le bâtiment afin de définir les caractéristiques de notre bâtiment d'étude. GBAGUIDI Victor S. et all (2011) ont montré que sur un site d'implantation, il faut choisir les directions dominantes des vents. Ensuite MAGALIE TECHER (2017) a montré que dans les écoles élémentaires en milieu tropical, il faut orienter le bâtiment dans la direction Nord-Sud pour son confort global. En outre NATHANIELS Dirk Rudy (2018) a montré que pour un bâtiment résidentiel au Sud du Bénin, il faut utiliser les toits en paille ou en tuile de terre cuite pour son confort. Les travaux de APOVO Berléo (2014) et de OSSENI Sibiath (2017) sur les matériaux composites respectivement mortiers renforcés des fibres de coco (MFC) et mortiers renforcés par des fibres du tronc de bananier(MFB) ont montré que ces matériaux composites présentent des caractéristiques thermo physiques meilleures. Nous pouvons les utiliser comme les parois (murs) des bâtiments. La plupart des anciennes études ont porté sur la direction dominante du vent des différents sites au Bénin, l'orientation des bâtiments scolaires pour son confort global, le type de la toiture des bâtiments résidentiels au Sud Bénin et la caractérisation thermo physique et mécaniques de certains matériaux composites pour la conception des bâtiments sans pour autant prendre en compte l'orientation du bâtiment par rapport au vent ou par rapport au soleil sur le site d'implantation, le nombre d'occupants du bâtiment pour son dimensionnement et la durabilité des matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment (toits et murs) aux intempéries et au feu afin de pouvoir les utiliser dans le bâtiment en toute sécurité.

La simulation dans le bâtiment a pour but d'imiter les conditions physiques réelles en utilisant des modèles mathématiques pouvant représenter tous les flux d'énergies ainsi que leurs interactions. Les récentes avancées dans les recherches permettent d'avoir des outils performants, des codes validés, des possibilités de couplage et des méthodologies permettant de simuler de façon globale le comportement du bâtiment.

Le présent travail de recherche porte sur le thème intitulé ; « **Effets du rapport optimal fenêtre mur ROM (WWR) sur le confort thermique du bâtiment au sud Bénin, pour une orientation optimale** ». WWR se traduit en anglais par Windows, Wall et Ratio puis désigne le ROM en français. Ces simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel TRNSYS version 17, et les résultats obtenus sont analysés et transcrits dans ce mémoire qui comprend trois chapitres organisés de la façon suivante :

Après la présentation de notre revue bibliographique au premier chapitre, le matériel et la méthode utilisés durant nos travaux seront abordés au deuxième chapitre. Le dernier chapitre sera consacré à la présentation des résultats de simulation et à la discussion de nos résultats.

Les objectifs de nos travaux sont les suivants :

✓ **Objectif général (OG) :**

L'objectif général visé, à travers cette étude, est de modéliser un bâtiment et de simuler son comportement thermodynamique sous le logiciel TRNSYS 17, tout en jouant sur les ratios ouvertures (surfaces menuiseries) /parois opaques (mur), pour le confort thermique du bâtiment.

✓ **Objectifs spécifiques (OS) :**

Spécifiquement il s'agira de :

- OS1 : modéliser un bâtiment dont les constituants de son enveloppe permettent d'avoir de bonne performance énergétique avec le module google SketchUp 8 ;
- OS2 : évaluer l'effet de l'orientation optimale sur le comportement du bâtiment avec le logiciel TRNSYS 17 ;
- OS3 : évaluer l'effet des ROM (ratios ouvertures/murs) afin d'identifier le rapport optimal pour un meilleur confort thermique dans le bâtiment ;
- OS4 : évaluer l'effet simultané orientation optimale/ROM pour un meilleur confort thermique du bâtiment.

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

L'homme a toujours défini son espace dans lequel il vit. Le bâtiment constitue un besoin essentiel pour l'individu, la famille et la société, au même titre que les besoins en alimentation, habillement et éducation.

Avant de parler sur « l'effet du rapport optimal fenêtre-mur (WWR) sur le confort thermique du bâtiment au sud du Bénin, pour une orientation optimale », il est nécessaire de commencer tout d'abord par, définir les concepts liés aux deux notions : bâtiment et confort thermique

Dans ce chapitre, nous avons fait l'état de l'art des connaissances sur l'orientation des bâtiments afin de comprendre les différents paramètres influant sur le confort thermique en son sein puis les méthodes d'études de ce confort.

1.1. Typologie des bâtiments (Guarry MONTROSE, 2021)

Au niveau mondial, le secteur du bâtiment représente en effet des enjeux considérables sur les trois piliers du développement durable à savoir l'environnement, le social, et l'économie. Le secteur du bâtiment est le plus gourmand en énergie de la planète.

Chaque type de bâtiment a une particularité, qui est liée au niveau de maîtrise de l'énergie qui soit différent pour chacun d'eux.

1.1.1. Bâtiment à basse consommation d'énergie

Les caractéristiques d'un tel bâtiment sont :

- Besoin énergétique faible, optimisation de l'isolation, réduction des ponts thermiques ainsi que l'accroissement des apports passifs.
- Pas de production locale d'énergie

1.1.2. Bâtiment passif

Il est reconnu à travers les critères suivants :

- Très faible consommation d'énergie, système de chauffage ou rafraîchissement actif non nécessaire, production d'énergie à base des énergies renouvelables.
- Apport solaire passif et système de ventilation naturel suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable.

1.1.3. Bâtiment producteur d'énergie

Les caractéristiques d'un tel bâtiment sont :

- Production d'énergies locales,

- Niveau de consommation non spécifié par rapport à la production ainsi que la nature de l'énergie produite

1.1.4. Bâtiment zéro énergie

Il est reconnu à travers les critères suivants :

- Faible besoin d'énergie, faible production locale d'énergie
- Production d'énergie égale consommation d'énergie ce qui implique bilan annuel nul

1.1.5. Bâtiment à énergie positive

Les caractéristiques d'un tel bâtiment sont :

- Production d'énergie supérieure au bâtiment zéro énergie, production d'énergie supérieure à la consommation d'énergie
- Exportation du surplus de sa production : raccordement à un réseau de distribution.

1.1.6. Bâtiment autonome

Il est reconnu à travers les critères suivants :

- Totalité énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressource énergétique locale intégrée.
- Bilan d'énergie nul à tout instant, adapté aux sites isolés ou insulaires, coût de raccordement évités aux divers réseaux.
- Usage de moyens de stockage d'énergie imposé (batterie)

D'après la typologie des bâtiments, nous avons opté pour la modélisation d'un bâtiment passif en utilisant les ressources naturelles disponibles et en valorisant les constituants des enveloppes d'un tel bâtiment.

1.2. Conception bioclimatique du bâtiment (IFDD, 2015).

Plusieurs stratégies sont à prendre en compte lors d'une conception bioclimatique. Surtout dans un environnement tropical où les températures et l'humidité sont élevées ; ces stratégies s'articulent autour de plusieurs piliers, dont les principaux sont :

- Limiter les apports de chaleur ;
- Favoriser la ventilation naturelle ;
- Exploiter les possibilités d'utilisation de l'éclairage naturel ;
- Respecter les limites de confort interne du bâtiment.

La forme, l'orientation du bâtiment et la nature des matériaux sont les premiers choix à faire par le concepteur. Ces choix doivent être pertinents, parce qu'ils ont des répercussions décisives

sur le confort thermique, visuel, acoustique et sur la consommation d'énergie de la structure. La troisième décision importante à prendre a trait à la masse thermique et à l'isolation de l'enveloppe, ainsi qu'au dimensionnement des ouvertures. Ces décisions s'appliquent à la conception d'un bâtiment n'importe où dans le monde.

1.2.1. Forme du bâtiment

La capacité d'un bâtiment à stocker ou à libérer de la chaleur est liée à son volume (ainsi qu'à sa masse et à sa forme), car les pertes ou les gains se font à travers ses surfaces. Ainsi, le rapport de la surface au volume détermine le débit du chauffage pendant la journée et du refroidissement pendant la nuit. À un volume constant (et par conséquent à une surface utile constante), les pertes et les gains augmentent lorsque l'on s'éloigne de la forme compacte, le cube (figure 1.1). De plus, en réduisant le rapport de la surface au volume (S/V), on réduit aussi la quantité de matériau nécessaire à la construction de l'enveloppe, les coûts et la quantité d'énergie intrinsèque. En revanche, pour les besoins de l'éclairage et de la ventilation naturelle, une forme longue et étroite est préférable à une forme carrée. La forme optimale dépend du type de climat tropical : dans la zone de climat chaud et humide, où les fluctuations quotidiennes de la température sont modestes, la forme devrait être aussi ouverte que possible pour permettre une ventilation naturelle en même temps. Cependant, la protection solaire est essentielle et toutes les mesures possibles devraient être prises pour l'assurer. Les bâtiments en hauteur ont un rapport S/V plus bas que les bâtiments bas ; en outre, pour un même volume, c'est-à-dire une même surface de sol, leur surface de toit exposée au soleil est moindre (figure 1.1). La profondeur du bâtiment, c'est-à-dire la distance entre les façades opposées, est un autre facteur décisif du point de vue conceptuel. Sous un climat chaud et humide, cette profondeur doit être restreinte pour favoriser la circulation de l'air, et les pièces doivent être disposées en rangée, avec de grandes ouvertures dans les murs extérieurs opposés. Le moyen le plus efficace d'optimiser ces besoins contrastés est donné par le bâtiment traditionnel avec cour. La distribution des espaces intérieurs est intimement liée à la forme du bâtiment. Le tracé et l'espacement sont très importants, car ils déterminent les dimensions, les proportions et la relation entre l'intérieur et l'extérieur, et enfin le flux de chaleur, la ventilation, la lumière du jour et la vue.

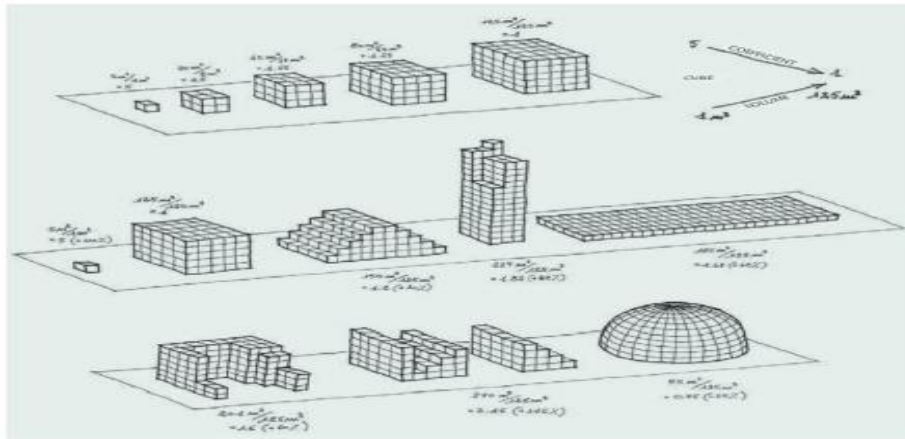


Figure 1. 1 : Variation du rapport de la surface au volume (coefficient de forme) pour un cube de volume croissant (IFDD, 2015)

1.2.2. Orientation du bâtiment

L'orientation du bâtiment dans les régions tropicales est très importante, et la règle de base est la suivante : réduire au minimum la surface des façades faisant face à l'est et à l'ouest et tenir compte des vents dominants, à cause de leur lien avec la ventilation naturelle (Figure 1.2). Un bâtiment possédant une orientation et une forme idéales serait allongé sur l'axe est-ouest pour maximiser les façades nord et sud (faciles à protéger par de petits surplombs) et pour réduire au minimum les façades est et ouest (difficiles à protéger), de manière à optimiser l'atténuation des apports de chaleur. Il faut éviter d'orienter les plus grandes façades vers l'ouest, car c'est l'après-midi que le rayonnement solaire et la température atteignent leur sommet. Les murs légers offrent davantage de liberté dans le choix de l'orientation. Dans la zone de climat chaud et humide, le bâtiment doit être ouvert sur l'extérieur, allongé (rapport S/V élevé) et orienté de manière à capter la moindre brise, sinon la température de l'air sera plus élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur. Très souvent, malheureusement, la meilleure orientation par rapport au soleil n'est pas la meilleure par rapport au vent.

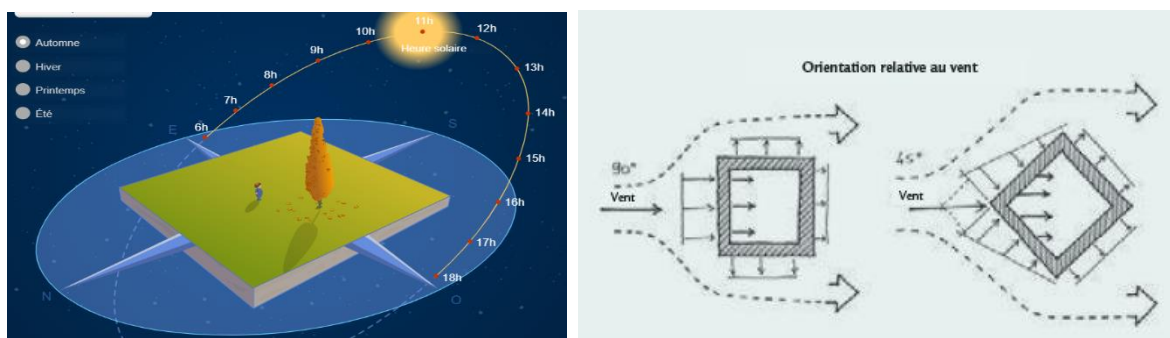


Figure 1. 2 : Orientation de bâtiment face au vent et au soleil. (IFDD, 2015)

GBAGUIDI Victor S. & al (2011) ont travaillé sur la cartographie des directions dominantes des vents au Bénin : outil de conception et de dimensionnement des ouvrages. Ils ont élaboré un tableau résumant des plages des directions dominantes de base du vent.

Tableau 1. 1 : Plages des directions dominantes de base du vent (GBAGUIDI Victor S. & al 2011)

Types de données	Stations météorologiques principales					
	Cotonou-Aéroport	Bohicon	Savè	Parakou	Natitingou	Kandi
Directions de vents	SSW-SW	SW	S-SW	S et ENE	E et W	NE et S

Nous pouvons constater que les localités du Sud (Cotonou, Bohicon) et du centre (Savè) du Bénin, ont une plage de directions dominantes du vent : SW (Sud- Ouest). Ainsi, pour bénéficier de plus de ventilation naturelle, la salle doit être orientée dans cette direction.

1.3. Enveloppe du bâtiment (IFDD, 2015)

Murs, menuiseries extérieures et toiture composent l'enveloppe de protection contre les éléments naturels : chaleur, froid, vent, pluie. Les décisions concernant la forme du toit ainsi que la couleur et la composition du toit et des murs sont importantes, parce qu'elles déterminent le rendement général du bâtiment.

1.3.1. Toit

Le toit est la partie du bâtiment qui reçoit le plus de rayonnement solaire. La surface externe absorbe le rayonnement et se réchauffe ; le toit transmet alors cette chaleur à la surface intérieure, dont la température augmente ; la chaleur rayonne vers l'intérieur, réchauffe l'air intérieur, puis est absorbée par les occupants et les objets à l'intérieur. Le rendement thermique du toit est essentiel au confort thermique. Le toit doit être incliné vers la brise dominante pour garantir la fraîcheur et toute obstruction susceptible d'empêcher la circulation de l'air le long des surfaces du toit doit être évitée. La ventilation de l'espace entre le toit et le plafond est essentielle au confort.

En milieu tropical humide, les toitures sont de préférence réfléchissantes, isolées, ventilées et légères. Les plus utilisées dans ce climat sont celles à simple lame. Le matériau le plus approprié pour la couche supérieure du toit est la tôle en aluminium.

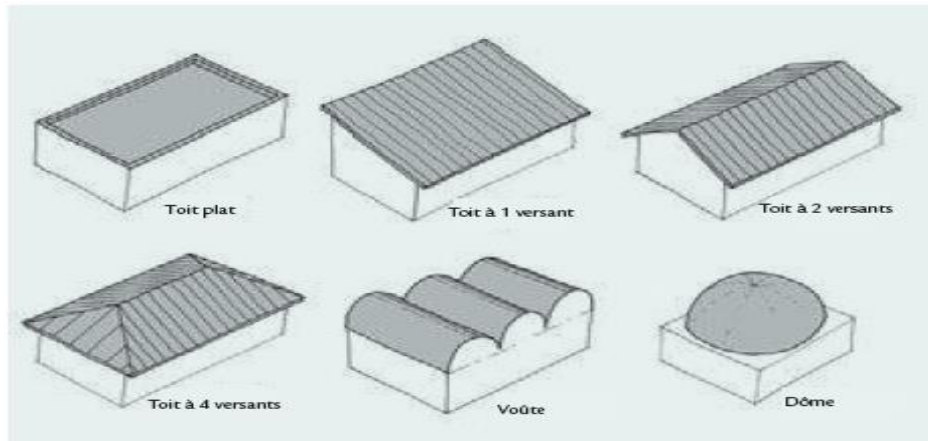


Figure 1. 3: Principaux types de toits (IFDD, 2015)

Il est exigé d'installer un faux-plafond dans tous les bâtiments ciblés par le code efficacité énergétique : normes relatives aux bâtiments publics ayant une toiture légère, telle qu'illustrée à la figure suivante

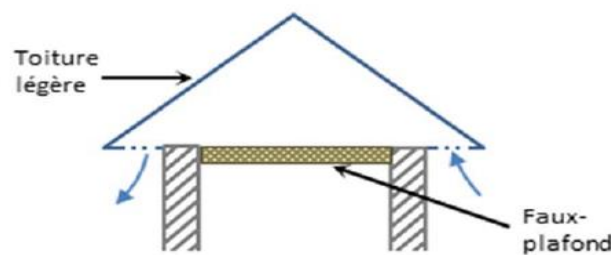


Figure 1. 4 : Installation d'un faux-plafond sous une toiture légère (ECONOLER, 2011)

Le matériau constituant le faux-plafond devrait avoir un coefficient de transmission thermique K équivalent ou supérieur à une plaque de contreplaqué de conductivité thermique $\approx 0,115 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ et de 2 cm d'épaisseur, c'est-à-dire un coefficient K d'environ $6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

D'après les différentes formes de toiture, nous avons choisi la toiture à deux versants pour rester en conformité avec les bâtiments résidentiels disponibles dans l'entourage car elle permet d'avoir des combles aménageables et nécessite un budget de construction moindre par rapport aux autres formes de toitures. Le besoin de refroidissement de la toiture de tuile en terre cuite est moindre comparativement à la toiture en tôle justifié dans l'un des travaux sur le confort thermique.

1.3.2. Murs

Les murs constituent la majeure partie de l'enveloppe du bâtiment. Les principaux éléments de la constitution des murs sont : le parpaing creux appelé communément la brique creuse de ciment, la brique pleine, le Bloc de Terre Comprimée (BTC) et Blocs de Terre Stabilisé (BTS). Il est confectionné facilement par les acteurs sur les sites de construction.



Brique pleine (BP)



Brique creuse (BC)



Blocs de Terre Comprimée (BTC)



Blocs de Terre Stabilisé (BTS)

Figure 1. 5 : Les éléments de maçonnerie (Dirk NATHANIELS, 2018)

Un mur qui n'est pas protégé du soleil se réchauffe et transmet la chaleur à l'intérieur. L'épaisseur et le matériau d'un mur peuvent être variés pour contrôler l'apport de chaleur. Il y a plusieurs façons d'augmenter la résistance au flux de chaleur à travers les murs exposés :

- augmenter l'épaisseur du mur ;
- adopter une construction à murs creux ;
- utiliser des matériaux calorifuges adéquats ;
- fixer un matériau calorifuge à l'intérieur ou à l'extérieur du mur expose ;
- utiliser des lames anti rayonnement ;
- appliquer de la chaux de couleur claire sur le côté expose du mur.

Dans la zone de climat chaud et humide, les murs extérieurs et intérieurs doivent être aussi légers que possible et avoir une capacité de stockage minimale. Les murs doivent obstruer le moins possible la circulation d'air et refléter le rayonnement, du moins là où le rayonnement solaire atteint les surfaces. La surface extérieure doit être réfléchive et de couleur claire. Pour le béton, la brique ou la pierre, une épaisseur de 15 à 20 cm suffit si le matériau reçoit un rayonnement direct, et une épaisseur de 5 à 10 cm , s'il reçoit un rayonnement réfléchi. Les

matériaux sont recommandés. D'autres matériaux formant des panneaux légers peuvent être utilisés avec un cadre pour satisfaire aux exigences structurales surtout les matériaux locaux.

En ce qui concerne les matériaux locaux, plusieurs études ont porté sur la caractérisation des matériaux composites susceptibles d'être utilisés dans la construction à fin d'obtenir un meilleur confort dans les bâtiments en climat tropical humide. Parmi ces matériaux, nous pouvons citer le mortier de ciment renforcé aux fibres de coco suite aux travaux de (APOVO, 2014) et le mortier de ciment renforcé aux fibres du tronc de bananier suite aux travaux de (OSSENI, 2017). Ces deux matériaux composites ont des caractéristiques très voisines. Mais les coques de coco sont utilisées pour le chauffage et la cuisson grâce aux foyers améliorés puis une étude n'étant pas portée sur les propriétés mécaniques des matériaux composites en fibres de coco. Il sera donc difficile de le recommander pour la construction sans que cela ne soit source de conflit.

De tout ce qui précède nous avons retenu la brique creuse et la brique en mortier renforcé de fibres de bananier pour la conception des parois de notre bâtiment.

1.3.3. Ouvertures

La chaleur non désirée qui s'accumule dans une maison entre par les fenêtres. La protection des fenêtres contre le soleil est donc impérative. Les écrans solaires sont un moyen efficace de réduire la lumière indésirable du soleil. Le premier moyen permettant de réduire les apports solaires est d'intégrer au bâtiment une casquette solaire. Les ouvertures doivent être grandes, pour permettre une ventilation naturelle. Il est préférable de les concevoir plus larges que hautes. Les meilleures fenêtres sont celles dont la surface ouverte efficace (aussi appelée perméabilité) est réglable au maximum, telles que les fenêtres à battants, à jalousie et à auvent. Dans la zone de climat chaud et aride, le type de fenêtre à battants est le plus recommandé, car il favorise l'étanchéité pendant la journée et possède la plus vaste surface ouverte efficace pour la ventilation nocturne.

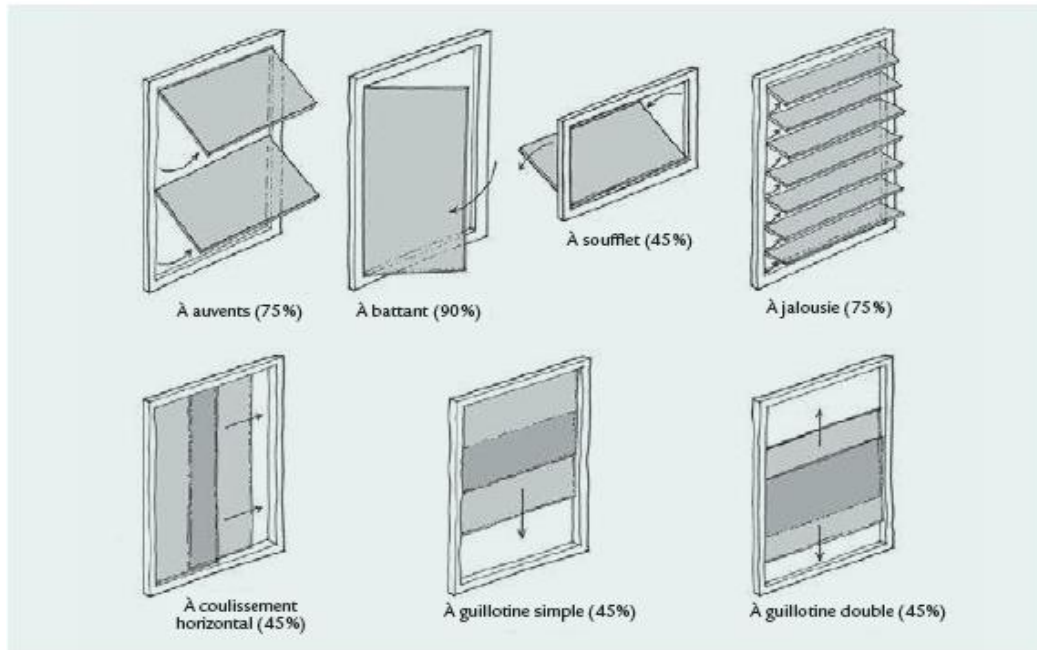


Figure 1. 6 : Différents types de fenêtres ; les valeurs entre crochets correspondent à la surface ouverte efficace (perméabilité) en pourcentage de la surface de l'ouverture (IFDD, 2015)

D'après les différents types de fenêtres, nous proposons la fenêtre à battant car elle permet une bonne intégration d'air à l'intérieur du bâtiment comparativement aux autres.

1.4. Exigences sur les ouvertures des bâtiments en climat tropical

Une approche prescriptive sur les enveloppes du bâtiment a été élaborée dans l'espace UEMOA définissant le coefficient de transmission thermique (coefficient U) maximal des toitures, des murs extérieurs et des fenêtres (vitres et cadres), le facteur solaire (F S) maximal des fenêtres et le ratio ouverture-mur (R O M) maximal selon les zones climatiques, (UEMOA, 2020).

Tableau 1. 2: Zonage climatique proposé pour l'UEMOA,2020

Climat	
0A	Climat tropical de type mousson
1A	Climat tropical de type savane
2A	Climat tropical de type équatorial
3A	Climat tropical de type équatorial de transition et des montagnes
0B	Climat aride de type subtropical
1B	Climat aride de type sahélien
2B	Climat semi-aride chaud

Le Bénin est caractérisé par un climat tropical de type équatorial donc il correspond à la zone climatique 2A dans le tableau ci-dessus. Le tableau suivant résume ces prescriptions.

Tableau 1. 3 : Valeurs à respecter pour l'enveloppe de bâtiment

Zone climatique	Coefficient U maximal ($W/m^2\text{°C}$)				FS maximal	ROM maximal (%)	
	Toiture	Murs extérieurs	Parois vitrées (fenêtres, portes ou portes-fenêtres)			Moyen	Sud, Est et Ouest
			Simple vitrage	Double vitrage			
0A	1,1	1,1	6,8	6,8	0,82	19	25
1A	1,1	1,8	6,8	6,8		20	25
2A	1,1	1,8	6,8	6,8		20	25
3A	1,1	1,8	6,8	6,8		20	25
0B	0,8	0,8	6,2	6,2		18	22
1B	0,8	1,1	6,2	6,2		18	22
2B	0,8	1,1	6,2	6,2		18	22

Afin d'évaluer l'impact de l'ouverture sur le confort d'un bâtiment, il est capital de connaître les caractéristiques des vitrages à utiliser. Il existe plusieurs types de vitrages présentant des coefficients différents comme le montre le Tableau 1.3

Tableau 1. 4 : Valeurs à respecter par les parois vitrées

Coefficient U maximal des vitrages nus ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)				
Type de vitrage	Epaisseur de la lame d'air (mm)	Nature de la menuiserie	Paroi verticale	Paroi horizontale
Simple vitrage	-	Bois	5	6,2
	-	Métal	5,8	6,8
Double vitrage avec lame d'air	5 à 7	Bois	3,3	3,5
		Métal	4	4,3
	8 à 9	Bois	3,1	3,3
		Métal	3,9	4,2
	10 à 11	Bois	3,0	3,2
		Métal	3,8	4,1
	12 à 13	Bois	2,9	3,1
		Métal	3,7	4
Double fenêtre	Plus de 30 mm	Bois	2,6	2,7
	Plus de 30 mm	Métal	3,0	3,2

1.5. Le confort thermique (MAGALIE TECHER, 2017)

L'un des facteurs qui ont un impact sur la conception d'un espace pour le concepteur est de fournir un certain confort aux utilisateurs. Aussi difficile que cela puisse paraître, le confort thermique est l'un des facteurs les plus complexes dans la conception du bâtiment et il joue un rôle important dans l'amélioration des performances énergétiques du bâtiment. Comme ce paramètre est différent pour chaque individu, le confort thermique est généralement un terme utilisé pour décrire l'état et la satisfaction des personnes, c'est pourquoi chaque personne a une préférence différente en termes de confort. La définition du confort thermique peut être énoncée comme étant une condition d'esprit ou de satisfaction qui précise le jugement de confort par l'individu. Deux personnes assises côte à côte dans la même pièce à la même température pourraient avoir un état de satisfaction du confort thermique différent l'un de l'autre.

Afin de découvrir l'influence sur le confort thermique des occupants et l'exigence de confort dont ils ont besoin, différentes études et expériences réalisées par des chercheurs dans différentes régions climatiques du monde ont été menées tout au long de l'année. À partir de toutes ces recherches, une norme pertinente a été développée concernant la qualité de l'environnement intérieur et de certains de ses composants (Markov, 2016). Les normes qui concernent directement le confort thermique et l'environnement thermique sont :

- ASHRAE 55 : Conditions environnementales thermiques pour l'occupation humaine
- ISO 7730 : Environnements thermiques modérés - Détermination des indices PMV et PPD et spécification de la condition de confort thermique.
- ISO 7993 : Environnements chauds - Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique à l'aide du calcul du taux de sudation requis.

Ce sont les trois normes généralement utilisées pour calculer et déterminer le confort thermique des occupants sur la base des facteurs d'influence. Ils incluent des facteurs environnementaux tels que la température de l'air, la température radiante, l'humidité et la vitesse de l'air et des facteurs personnels tels que le taux métabolique ou l'activité et l'habillement.

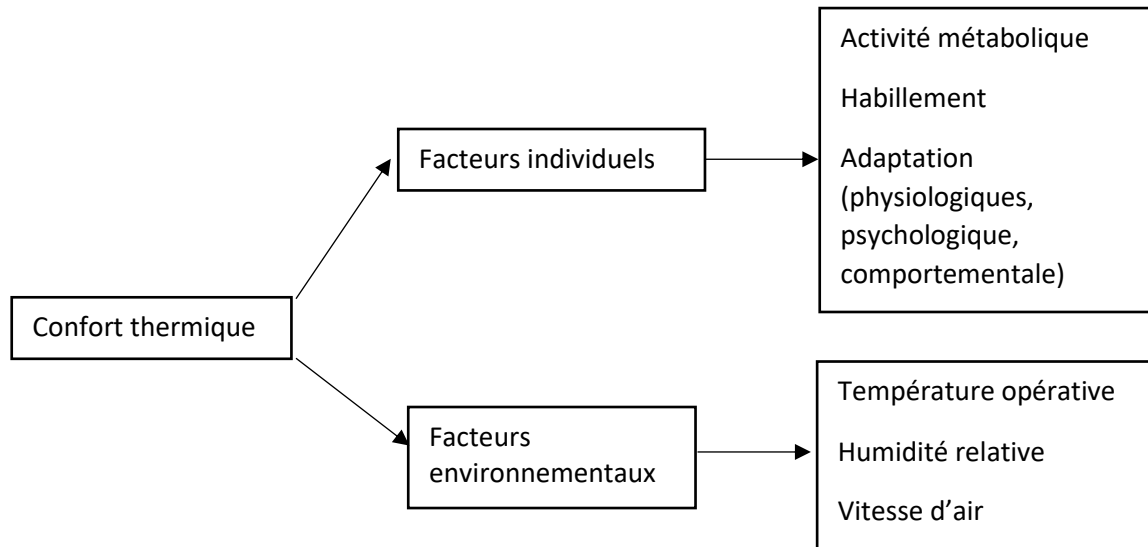


Figure 1. 7 : Facteurs qui influencent le confort thermique des usagers (Virginie GROSDÉMOUGE, 2020)

1.5.1. Facteurs environnementaux

1.5.1.1. Modes de transfert de chaleur

Il est nécessaire dans un premier temps, de comprendre le fonctionnement des différents modes de transfert de chaleur qui influent sur les ambiances thermiques du bâtiment.

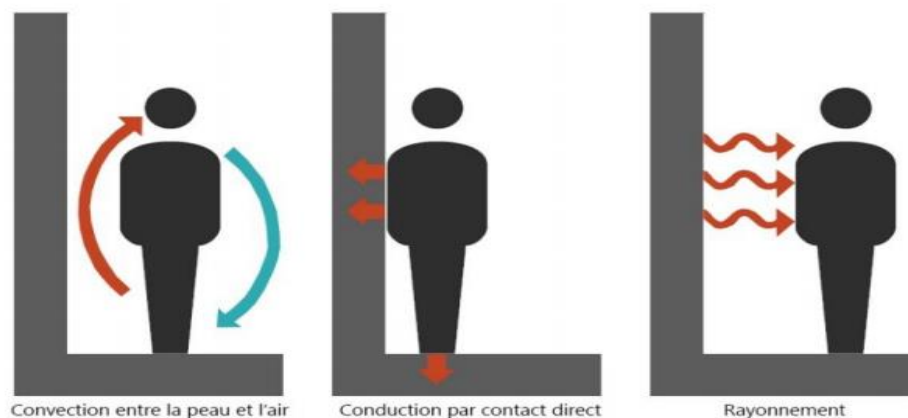


Figure 1. 8 : Schéma explicatif des échanges thermiques (Magalie Techer. 2017)

- Le transfert par convection est un échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact ou le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement de ses molécules d'un point à un autre. Le cas qui nous intéresse est l'échange de chaleur produit entre la peau et l'air ambiant (Saddok Amel, 2016). Quel que soit le type de convection (libre ou

forcée) et quel que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur φ est donné par la relation dite loi de Newton :

$$\varphi = hS\Delta T \quad (\text{I. 1})$$

Avec : φ : Flux de chaleur transmis par convection (W) ,

h : Coefficient d'échange convectif ($W/m^2\text{°C}$)

ΔT : Différence de température entre celle de la paroi et le fluide (°C)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

- Le transfert par conduction est un mode de transfert thermique où la transmission se produit de proche en proche, une molécule cède une partie de son énergie à une molécule voisine, par interaction moléculaire. Dans notre cas, il s'agit d'un échange par contact direct entre la peau et une surface, un objet (Saddok Amel, 2016).

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température : $\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T)$ ou sous forme algébrique

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{I. 2})$$

Avec : φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W) ,

λ : Conductivité thermique du milieu ($W/m\text{°C}$)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

- Le transfert par rayonnement se produit entre deux corps par émission et absorption des rayonnements électromagnétiques par les surfaces de ces corps (Saddok Amel, 2016). La densité surfacique de flux de chaleur échangée par rayonnement entre une paroi de température T_p et le milieu ambiant à la température T_a , est régie par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\varphi = \sigma\varepsilon(T_p^4 - T_a^4) \quad (\text{I. 3})$$

Avec : σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^4$)

ε : facteur total d'émission

1.5.1.2. La température opérative

L'être humain est influencé par son environnement thermique en rapport avec la température de l'air et la température des parois. Ces deux paramètres combinés influencent notre confort, car pour une même température de l'air, la sensation de bien-être est modifiée si l'on se trouve près d'une surface chaude ou froide, on parle « d'effets de parois » (Saddok Amel, 2016).

La température opérative est une variable qui combine les deux paramètres précédents grâce aux effets de rayonnement et de convection, en cela, c'est un indicateur lisible et simple du confort thermique qui est assimilé à la température ressentie réellement.

Une étude effectuée par Jannot et Djiako, 1994, portant sur le confort thermique et les performances énergétiques dans l'habitat en zone tropicale, a révélé que la température de l'air était le paramètre le plus pondéré dans la température ressentie pour ce type de climat.

Nous considérons que si la vitesse du vent est très faible (inférieur à 0,2 m/s) et donc négligeable, la relation permettant de trouver la température opérative est la moyenne de la température de l'air et de la température des parois (Magalie Techer. 2017).

$$T^{\circ}_{\text{opérative}} = \frac{(T^{\circ}_{\text{air}} + T^{\circ}_{\text{paroi}})}{2} \quad (\text{I. 4})$$

1.5.1.3. L'humidité relative

L'humidité relative est un pourcentage représentant la pression de vapeur d'eau contenu dans l'air par rapport à la pression de saturation de la vapeur d'eau dans l'air. Ce paramètre influe sur la capacité de notre corps à éliminer la chaleur en excès. L'humidité a peu d'influence sur le confort, hormis lorsque ses valeurs sont extrêmes, on considère qu'une humidité comprise entre 30 et 70% ne gêne pas le confort. Cependant, un taux d'humidité trop bas ou trop élevé peut entraîner des problèmes de santé, dus au développement des moisissures et des bactéries (Becker et al., 2007), mais également à la mobilité très facile de ces bactéries.

1.5.1.4. La vitesse de l'air

Il s'agit de la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu. Il s'agit d'un paramètre important, car il influence les échanges de chaleur tels que la convection et l'évaporation à la surface de la peau entre l'individu et son environnement. Ce paramètre peut permettre d'abaisser la température corporelle en été mais peut-être gênant en hiver par la présence de courants d'air.

Tableau 1. 5 : Refroidissement équivalent à la vitesse relative de l'air (MAGALIE TECHER, 2017)

Vitesse de l'air [m/s]	Refroidissement équivalent [°C]
0,1	0
0,3	1
0,7	2
1,0	3
1,6	4
2,2	5
3,3	6
4,5	7

1.5.2. Facteurs liés aux occupants

1.5.2.1. Le métabolisme

Le métabolisme considéré ici est lié à la production de chaleur interne permettant à l'individu de conserver une température corporelle optimale, il joue donc un rôle primordial sur les sensations de confort thermique. Par exemple, l'organisme humain produit de l'énergie et de la chaleur lors de la digestion des aliments. Le métabolisme est représenté par l'effort physique dépensé pendant une activité : le métabolisme de travail correspond à une activité physique particulière s'ajoutant au métabolisme de base au repos. Le métabolisme est différent chez l'enfant car celui-ci dépend de l'âge, du poids, de la taille et du sexe de l'individu. Le métabolisme au repos diminue avec l'âge, ainsi celui de l'enfant est deux fois plus élevé que l'adulte. Il est calculé grâce à la formule de **Black et Al (1996)** qui nous sert de référence.

$$\text{Femme : } MB = 0,963 \times P^{0,48} \times T^{0,50} \times A^{-0,13} \quad (I.5)$$

$$\text{Homme : } MB = 1,083 \times P^{0,48} \times T^{0,50} \times A^{-0,13} \quad (I.6)$$

Où MB est le métabolisme de base en mégajoules ; P est la masse en kilogrammes ; T est la taille en mètres ; A est l'âge en années

Tableau 1. 6 : Valeur de référence du métabolisme selon le type d'activité

Activité	W/m^2	Met
Repos, couché	45	0,8
Repos, assis	58	1,0
Activité légère, assis (bureau, école)	70	1,2
Activité légère, debout (laboratoire, industrie légère)	95	1,6
Activité moyenne, debout (travail sur machine)	115	2,0
Activité soutenue, debout (travail lourd sur machine)	175	3,0

1.5.2.2. L'habillement

Les vêtements représentent une résistance thermique aux échanges de chaleur convectifs et radiatifs entre l'individu et son environnement. Ils influencent le processus d'évaporation de la sueur également. Ceux-ci diminuent la sensibilité de l'individu aux variations de températures et de vitesse de l'air. Pour pouvoir étudier l'impact de l'habillement sur le confort thermique, il existe une unité « le Clo » qui permet de relier la façon dont l'individu est habillé à des valeurs quantitatives (**Lenoir, 2013**). La nature du tissu et la coupe des vêtements ont également une influence sur les échanges de chaleur avec l'environnement, pourtant elles ne sont pas prises en compte dans cette quantification.

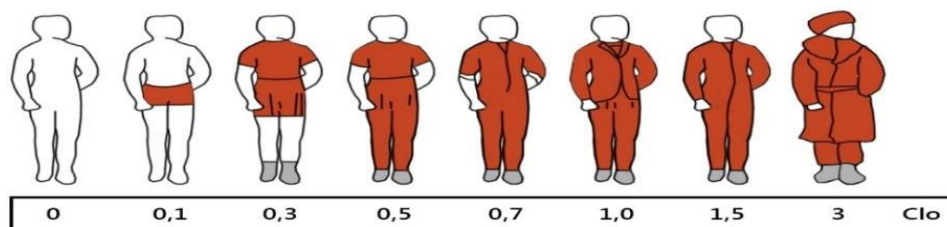


Figure 1. 9 : Valeurs exprimées en Clo de tenues vestimentaires (Saddok, 2016)

1.5.2.3. Le niveau d'adaptation

L'homme est capable de répondre par un ensemble de réactions diverses à tout déséquilibre touchant à son confort. Il a la possibilité d'effectuer des ajustements sur lui-même ou sur son cadre de vie afin de s'adapter à son environnement (Celis Mercier, 2009).

Ces ajustements peuvent être regroupés en deux catégories :

- ajustements de l'environnement : il s'agit du contrôle effectué par l'homme en fonction de ses besoins sur les installations (allumer les ventilateurs, ouvrir ou fermer une fenêtre). De plus en plus, ces ajustements se font de manière mécanique en enclenchant une commande.
- ajustements personnels : cela englobe tous les changements que l'homme porte sur son habillement ou sur son activité.

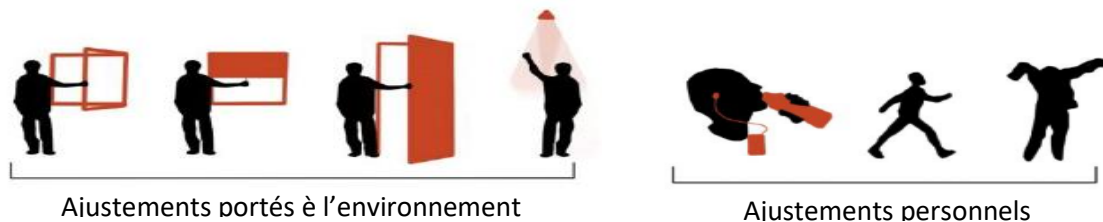


Figure 1. 10 : Comportements adaptatifs (Celis Mercier, 2009)

1.6. Approche d'estimation du confort thermique (RIANTSOA Donatien René, 2020)

Il existe aujourd'hui plusieurs manières d'analyser l'effet des caractéristiques architecturales et climatiques sur le confort des individus.

1.6.1. Le modèle de Olgyay

Dans les années 1950, l'architecte hongrois Victor Olgyay a constaté l'influence des conditions climatiques extérieures sur le confort d'un bâtiment. Il développa ainsi un outil d'aide à la décision appelée diagramme bioclimatique, illustré par le diagramme de la figure 1.11 ci-dessous. Olgyay met en relation dans ce graphique les températures (axe des ordonnées) et taux d'humidité relative (abscisses). Une zone de confort correspondant à des températures extérieures variant de 20 à 30 °C et à des taux d'humidité extérieure situés entre 18 % et 75 % figure au centre. Cela permet ainsi d'analyser graphiquement les conditions climatiques locales et de définir en conséquence la stratégie à privilégier dans la conception du bâtiment. La notion de confort reste cependant subjective et dépend non seulement des paramètres climatiques, mais également des facteurs physiologiques et psychologiques.

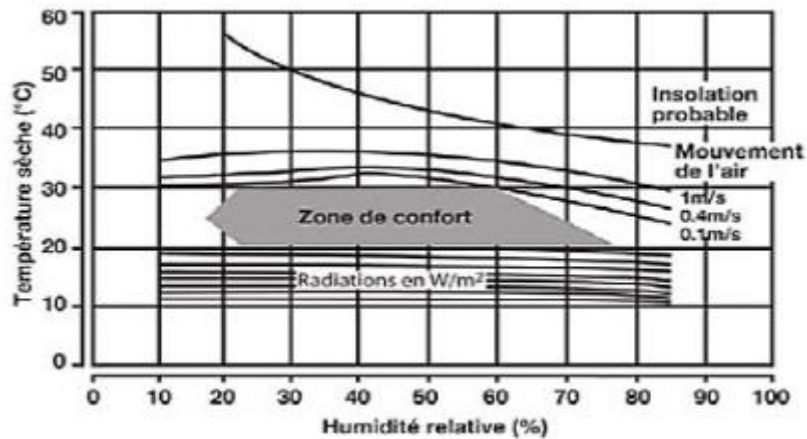


Figure 1. 11 : Diagramme de Olgay

1.6.2. Le modèle de Fanger

Ce modèle traduit l'équation de l'équilibre thermique du corps humain. Pour cela, Fanger combine les paramètres d'ambiance (température de l'air, température de parois, humidité de l'air, vitesse de l'air) aux paramètres de comportement (habillement et l'activité de l'individu) pour déterminer l'indicateur de confort représentant l'avis moyen d'un groupe de personnes suivant leur sensation de confort thermique. Cet indicateur est le PMV (Predicted Mean Vote), se mesure sur une échelle de sensation thermique à 7 niveaux.

Tableau 1. 7 : Echelle du confort thermique (ISO, 2005 ; ASHRAE-55, 2017)

+3	Trop Chaud	Inconfortable
+2	Chaud	
+1	Légèrement chaud	Confortable
0	Neutre	
-1	Légèrement froid	
-2	Frais	Inconfortable
-3	Froid	

Ce modèle a été créé en confrontant les équations physiques avec des expériences réalisées en chambre climatique, et a été validé à la fin des années 1970 par une enquête statistique sur 500 individus placés dans des conditions thermiques prédéfinies. Ce modèle permet ainsi de

mesurer la sensibilité des différents paramètres comportementaux et d'ambiance d'un individu dans un local. Les Plages de sensibilité à la vitesse d'air correspondant à un PMV compris entre -0,5 et +0,5 de ce modèle sont illustrées dans la figure ci-dessous.

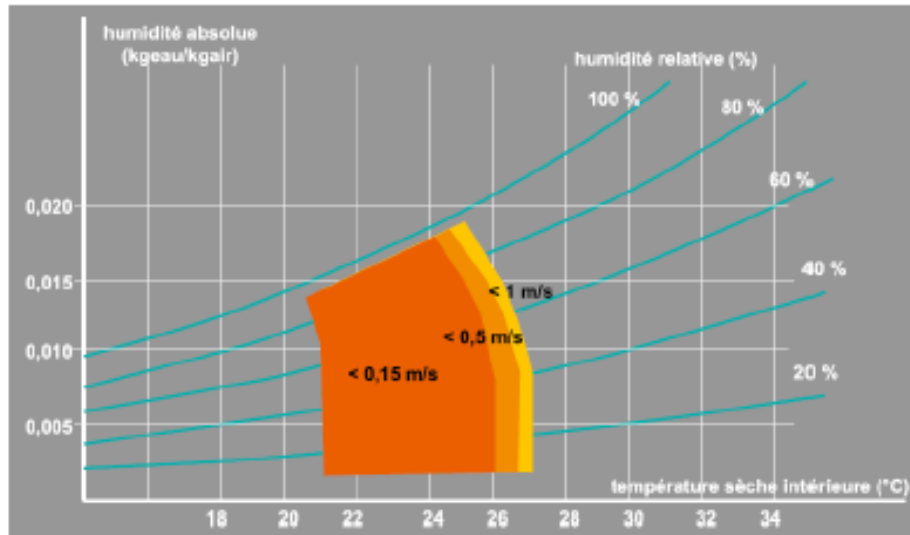


Figure 1. 12 : Les Plages de sensibilité à la vitesse d'air correspondant à un PMV compris entre -0,5 et +0,5

La plage de confort optimale pour ce modèle est comprise entre 21 °C à 26 °C, c'est-à-dire dans des conditions classiques de travail de bureau. Le modèle est très sensible à l'habillement (4 °C de différence entre une tenue d'hiver et une tenue d'été), à l'activité (6 °C et plus entre une activité sédentaire et une marche sportive) et à l'humidité : Une baisse d'environ 2 °C de la zone de confort pour une humidité relative passant de 40 % à près de 100 %. Par contre, une vitesse de l'air passant de 0 m/s à 1 m/s n'autorisera qu'une augmentation de 1 °C de la plage de confort.

1.6.3. Le modèle de Givoni

Établi par Burach Givoni à peu près à la même époque que le modèle de Fanger, ce modèle d'évaluation de confort thermique intègre l'évapotranspiration. Est issu de ce modèle, le diagramme de Givoni établi pour une activité sédentaire et avec un habillement adapté à l'été, définit sur le diagramme de l'air humide, des zones de confort correspondant à différentes plages de vitesse d'air (jusqu'à 1,5 m/s, vitesse au-delà de laquelle un risque de nuisance existe).

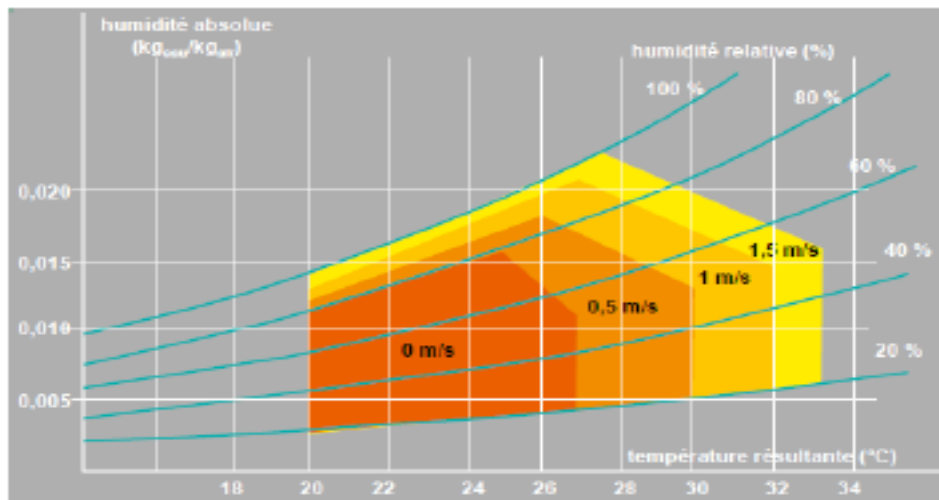


Figure 1. 13 : Le diagramme du Givoni

- La plage 0 m/s correspond aux modèles de confort classiques (valables jusqu'à 0,20 m/s) ;
- La plage 0,5 m/s peut être atteinte avec des dispositions de ventilation naturelle. Pour les valeurs de vitesses supérieures, elles sont atteintes grâce à des dispositifs mécaniques (brasseurs d'air).

L'utilisation de cet outil est basée sur deux relevés, à savoir :

- La moyenne des températures maximales journalières (abscisse) rapportée à celle des taux d'humidité absolue minimums journaliers (ordonnée), et, inversement ;
- La moyenne des températures minimales journalières rapportée à celle des taux d'humidité absolue maximums.

En reliant ainsi les deux points obtenus, on obtient un tracé qui en fonction de son positionnement par rapport aux zones précitées, permet de définir des objectifs stratégiques sur le mois étudié.

▪ Analyse et conclusion de la synthèse bibliographique

Parmi les modèles ci-dessus développés, on remarque que :

- Pour déterminer les zones de confort, les auteurs des précédentes études ont exploité :
 - La température sèche, humidité relative et vitesse du vent (avec la particularité que la vitesse du vent n'a pas d'influence sur le confort) : Modèle de Olgyay (1950);
 - La température sèche intérieure, humidité relative et vitesse du vent (pour des valeurs comprises entre 0,15 et 1 m/s : Modèle de Fanger (1970)
 - la température résultante, l'humidité relative et la vitesse du vent sur une grande plage de valeurs : modèle de Givoni (1969).

◆ Recommandation

Seul le modèle de confort de Givoni permet d'étudier le confort thermique d'un bâtiment avec une large plage sur la valeur de la vitesse du vent, elle offre également la possibilité d'une étude sur un bâtiment naturellement ventilé.

1.7. Confort thermique en climat tropical humide

- Victor Olgyay, 1950, confirme que la plage de température pour le confort thermique est de 20°C à 30°C et celle de l'humidité relative de l'air de 18% à 75%.
- Tandis que Givoni et Milne, 1979, précise que la plage de température pour le confort thermique est de 20°C à 28°C et celle de l'humidité relative de l'air de 20% à 80%.
- D'après le code EE, UEMOA, 2020, en climat tropical humide, la plage de température de consigne dans un bâtiment publique est de 24°C à 27°C et celle de l'humidité relative de l'air de 30% à 70% puis en climat tropical sec, la plage de température de consigne dans un bâtiment publique est de 25°C à 27°C et celle de l'humidité relative de l'air de 30% à 70%.

Le digramme psychrométrique ci-dessous indique les zones de confort en climat tropical humide.

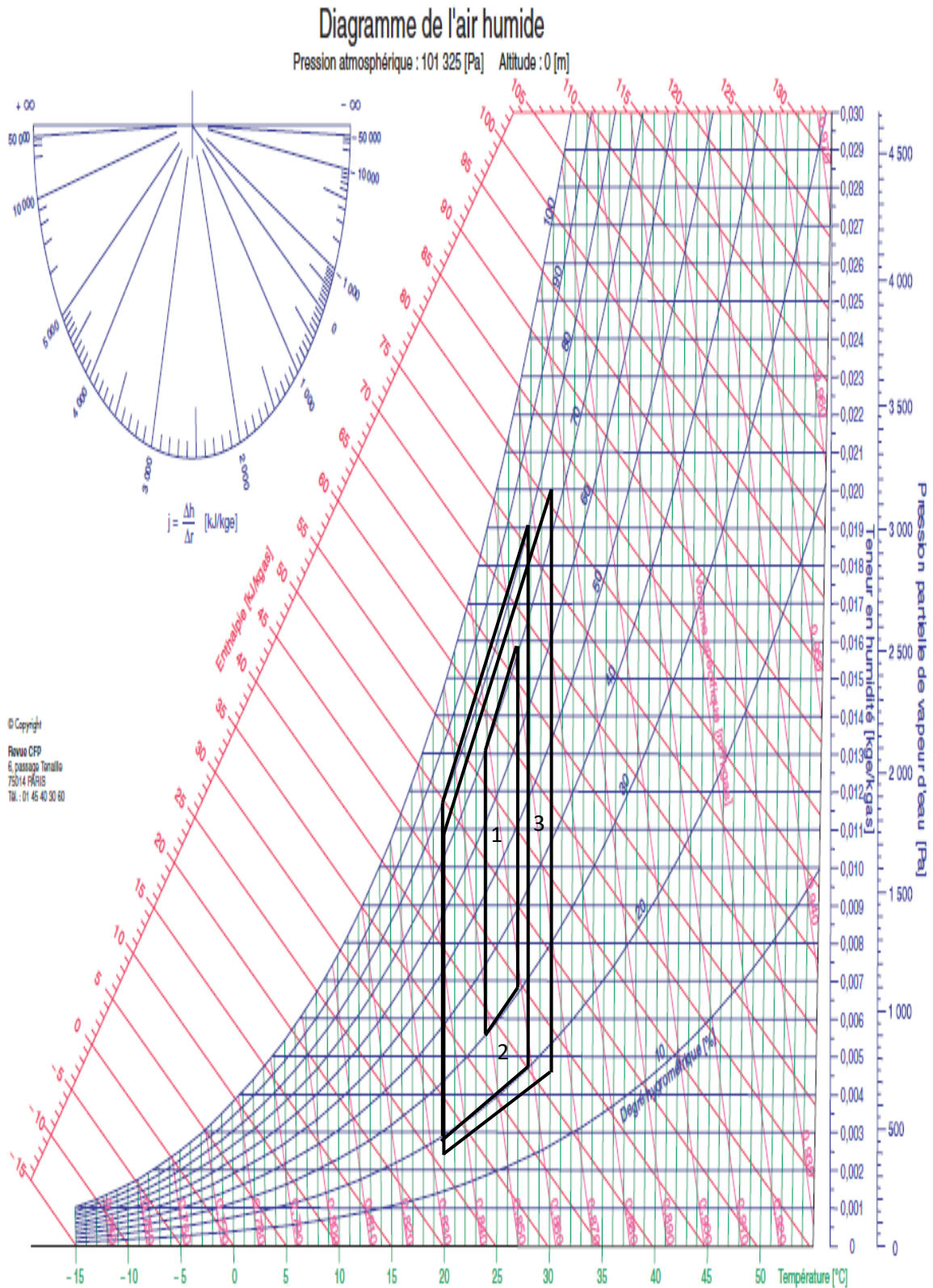


Figure 1. 14 : zone de confort en climat tropical humide

- 1- UEMOA, 2020 ; 2- Givoni et Milne, 1979 ; 3- Victor Olgyay, 1950

1.8. Outil numérique de simulation TRNSYS (Kimnengh TAING, 2020)

TRANsient SYstem Simulation, principalement connu sous le nom de TRNSYS, est « un environnement logiciel graphique extrêmement flexible utilisé pour simuler le comportement des systèmes transitoires ». Le logiciel TRNSYS est un logiciel conçu et développé par l'Université du Wisconsin à partir de la fin des années 1970. Il est majoritairement utilisé pour faire la simulation qui se concentre sur l'évaluation des performances du système d'énergie thermique et électrique. En plus, il peut également être utilisé pour modéliser d'autres systèmes dynamiques tels que les flux de trafic ou les processus biologiques (TRNSYS, 2017).

TRNSYS se compose de deux parties :

- Le moteur qui peut être appelé le noyau lit, traite le fichier d'entrée, résout le système détermine la convergence et trace les variables systèmes. Il détermine également les propriétés thermo-physiques, inverse les matrices, effectue des régressions linéaires et interpole les fichiers de données externes.
- La deuxième partie est une vaste bibliothèque de composants, chacun modélisant les performances d'une partie du système. La bibliothèque standard comprend environ 150 modèles allant des pompes aux bâtiments multizones, des éoliennes aux électrolyseurs, des processeurs de données météorologiques aux routines économiques, et des équipements HVAC de base aux technologies émergentes de pointe.

Avec son modèle et ses données largement répandus dans la bibliothèque, il facilite et accélère la modélisation et la simulation pour l'utilisateur. Les utilisateurs peuvent également créer un modèle personnalisé en fonction des différents besoins.

Ces deux parties sont constituées de 4 composants différents qui sont :

- Trnsys3d : utilisé pour modéliser l'énergie du bâtiment/données 3D (sont normalement utilisés pour les grands bâtiments qui ont beaucoup de zones thermiques ou de formes complexes pour profiter du temps de modélisation de la zone thermique)
- TRNSYS Studio : interface pour entrer des environnements du bâtiment telles que les données météo, l'orientation du bâtiment, ... ; il est également utilisé pour exécuter la simulation et évaluer les performances du bâtiment
- TRNBuild : interface pour entrer la définition du bâtiment telle que la couche du mur, le matériau d'utilisation dans le bâtiment, le nombre d'occupants, l'habillement, le système HVAC...

- TRNEXE (TRNSYS - simulation) : faire le calcul et transmettre le résultat de la simulation

La relation entre ces 4 composants (Trnsys3d , TRNSYS Studio, TRNBuild et TRNEXE) est illustrée dans la figure ci-dessous.

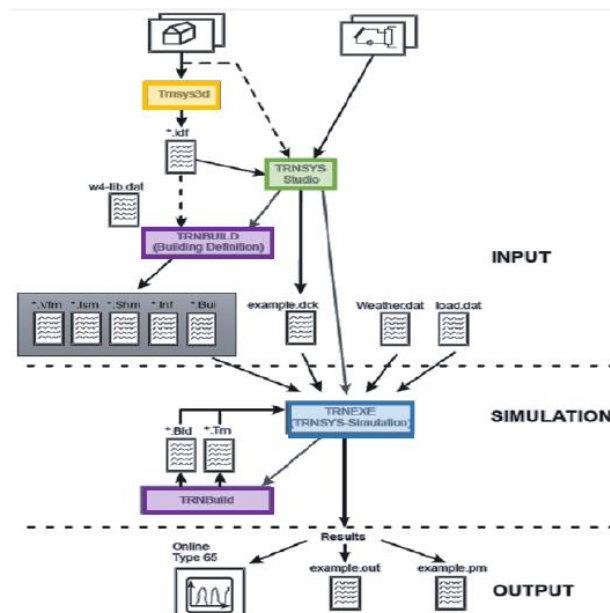


Figure 1. 15 : La relation des 4 composants TRNSYS (Kimneh TAING, 2020)

1.8.1. Modélisation multizone du bâtiment par le Type 56 « TRNBuild »

Le Type 56 permet de simuler le comportement thermique d'un bâtiment donné sous forme d'une ou de plusieurs zones thermiques. Le programme TRNBuild qui est l'interface graphique du Type 56 génère un fichier avec une extension de type (*. b17) contenant la description du bâtiment (matériaux de construction, composition, dimensions et position des parois opaques et transparentes, protections solaires, équipement de chauffage/refroidissement/ventilation, calendrier d'activités...). Ce fichier est la source d'informations nécessaires à la simulation thermique dynamique du bâtiment multizone en question. A l'instar de tout Type de TRNSYS, les entrées et les sorties du Type 56 peuvent être configurées en fonction de la description du bâtiment et des besoins de l'utilisateur.

1.8.2. Description mathématique des composantes utilisées dans la simulation

- **Transfert thermique par conduction dans une paroi d'un bâtiment**

Dans le Type 56 (Bâtiment multizone) correspondant à la simulation des bâtiments à zones thermiques multiples, le transfert thermique par conduction à travers les parois du bâtiment est modélisé par les fonctions de transfert de Mitalas et Arsenault (TRNSYS, 2010). Cette méthode

est basée sur l'analyse des échanges de chaleur, qui permet de calculer avec une bonne précision la conduction dans les parois en régime transitoire.

TRNSYS modélise les parois à travers les fonctions de transfert de Mitalas et Arsenault. Cette méthode est basée sur l'analyse des échanges de chaleur, qui permet de calculer avec une bonne précision la conduction dans les parois en régime transitoire. La figure 1.16 présente les flux de chaleur et les températures qui caractérisent le comportement thermique d'un mur ou d'une fenêtre.

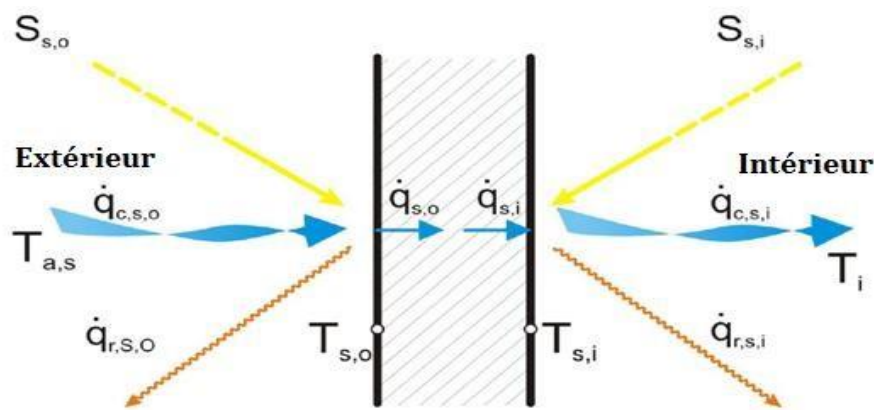


Figure 1. 16 : Flux de chaleur et températures d'une paroi de bâtiment (TRNSYS, 2010)

La nomenclature utilisée dans cette figure est la suivante :

$S_{s,i}$: Flux de chaleur de rayonnement de courte longueur d'onde absorbé par la surface intérieure

$S_{s,o}$: Flux de chaleur de rayonnement de courte longueur d'onde absorbé par la surface extérieure

$q_{r,s,l}$: Flux net radiatif de grande longueur d'onde échangé avec toutes les autres surfaces de la zone.

$q_{r,s,o}$: Flux net radiatif échangé avec toutes les surfaces extérieures à la zone.

$q_{w,g,l}$: Gain dans la paroi ou dans la surface de la fenêtre défini par l'utilisateur.

$q_{s,l}$: Flux conductif dans le mur vers la surface interne.

$q_{s,o}$: Flux conductif dans le mur à partir de la surface externe.

$q_{c,s,l}$: Flux convectif à partir de la surface interne du mur vers l'air de la zone.

$q_{c,s,o}$: Flux convectif à partir de la surface externe du mur vers l'air ambiant.

$T_{s,i}$: Température de la surface interne du mur.

$T_{s,o}$: Température de la surface externe du mur.

T_i : Température du nœud de la zone i .

$T_{a,s}$: Température de l'air ambiant.

Pour une paroi, le transfert de chaleur par conduction au niveau des surfaces est donné par les équations I.4 et I.5.

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^k \quad (\text{I.7})$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,o}^k \quad (\text{I.8})$$

Ces équations de séries temporelles en termes de température de surface et de flux de chaleur sont évaluées à des intervalles de temps égaux. L'exposant k se rapporte à la limite de la série chronologique telle que l'heure courante est $k = 0$ et le temps suivant est $k = 1$, etc. La base de temps sur laquelle ces calculs sont effectués est spécifiée par l'utilisateur dans la description du bâtiment sous TRNBuild. La paroi est considérée comme une boîte noire, et elle est définie par quatre coefficients qui représentent son comportement thermique. Ces coefficients de la série chronologique (a_s , b_s , c_s et d_s) sont déterminés dans le programme TRNBUILD en utilisant les fonctions de la « transformé en Z ». (Mitalas, G.P. and Arseneault, 1972)

- **Transferts convectifs sur un nœud d'air**

Le modèle du bâtiment dans le Type 56 est un modèle avec un nœud d'air représentant toute la masse d'air d'une zone donnée. Ce nœud d'air représente la capacité thermique du volume d'air étudié et le bilan thermique sur le nœud d'air fait intervenir l'ensemble des apports générés dans l'environnement de la zone étudiée. En effet, le flux de chaleur convectif reçu par un nœud d'air d'une zone thermique (Eq. I.9) est la somme des flux convectifs provenant des différentes surfaces de la zone (Eq. I.10), des gains par infiltration (Eq. I.11), des gains par ventilation (Eq. I.12), des gains internes dus aux occupants, aux équipements et à l'éclairage, des gains dus au couplage de l'air avec les différentes zones adjacentes (Eq. I.13) et des gains solaires à travers les fenêtres. La Figure 1.16 présente les différents flux convectifs reçus par un nœud d'air (TRNSYS, 2010).

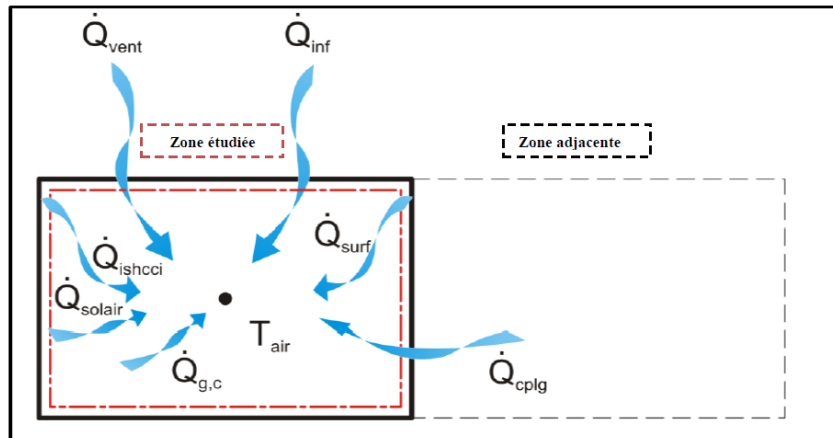


Figure 1. 17 : Flux de chaleur convectifs sur un nœud d'air (TRNSYS, 2010)

Les flux convectifs illustrés dans la Figure 1.15 sont définis par les équations suivantes :

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{gc,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solair,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad (I.9)$$

Avec :

$\dot{Q}_{surf,i}$: Les gains convectifs provenant des parois intérieures

$$\dot{Q}_{surf,i} = U_{w,i} A_{w,i} (T_{paroi} - T_{air}) \quad (I.10)$$

$\dot{Q}_{inf,i}$: Les gains d'infiltration (débit d'air provenant de l'extérieur)

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{V} \rho C_p (T_{ext,i} - T_{air}) \quad (I.11)$$

$\dot{Q}_{vent,i}$: Les gains de ventilation (débit d'air provenant d'une source définie par l'utilisateur, système de HVAC)

$$\dot{Q}_{vent,i} = \dot{V} \rho C_p (T_{vent,i} - T_{air}) \quad (I.12)$$

$\dot{Q}_{gc,i}$: Les gains convectifs internes (par les occupants, par les équipements, par l'éclairage, etc.).

$\dot{Q}_{cplg,i}$: Les gains convectifs dus à l'écoulement de l'air entre les zones.

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \dot{V} \rho C_p (T_{zone,i} - T_{air}) \quad (I.13)$$

$\dot{Q}_{solair,i}$: Les gains solaires entrant dans une zone à travers les fenêtres externes et qui sont transférés en gain convectif à l'air intérieur.

$\dot{Q}_{ISHCCI,i}$: Le rayonnement solaire absorbé par les dispositifs d'ombrage internes de la zone, qui est transféré comme un gain convectif à l'air intérieur.

- **Transferts radiatifs sur un nœud d'air**

Quant aux échanges par rayonnement, TRNSYS distingue les échanges de courtes longueurs d'onde (CLO) correspondant à du rayonnement à longueurs d'onde inférieures à $2.5 \mu\text{m}$ et à celui à grandes longueurs d'onde (GLO) supérieures à $2.5 \mu\text{m}$.

Le transfert interne de chaleur par rayonnement d'une paroi de la zone que reçoit un nœud (Figure 1.17) est la somme des gains radiatifs internes à la zone étudiée (Eq. I.14). Ces gains sont le résultat de l'échange par rayonnement entre la paroi et les autres surfaces ainsi que les gains radiatifs spécifiés éventuellement par l'utilisateur et les gains solaires reçus par la paroi à travers les fenêtres. La Figure 1.17 présente les flux de chaleur radiatifs internes d'une paroi de la zone reçus par un nœud.

$$Q_{r,w_i} = Q_{g,r,i,w_i} + Q_{sol,w_i} + Q_{long,w_i} + Q_{wall-gain} \quad (I.14)$$

Q_{r,w_i} : Les gains radiatifs reçus par un nœud surfacique d'une paroi

Q_{g,r,i,w_i} : Les gains radiatifs internes reçus par une paroi.

Q_{sol,w_i} : Les gains solaires reçus par une paroi via les fenêtres.

Q_{long,w_i} : Les gains à travers les échanges de chaleur par rayonnement entre une paroi et les autres parois de la zone.

$Q_{wall-gain}$: Le flux de chaleur radiatif spécifique à une paroi donnée.

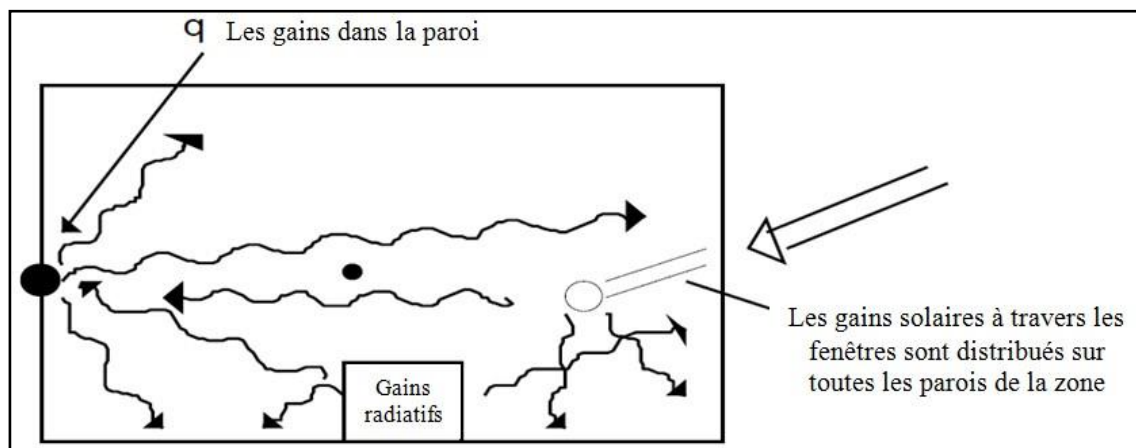


Figure 1. 18 : Flux de chaleur radiatifs dans une paroi (TRNSYS, 2010)

Pour tenir compte de l'ombrage externe des murs et des fenêtres extérieures, TRNBuild génère les matrices d'ombrage et d'insolation, à l'aide des données 3D de TRNSYS3D, qui permettent

de déterminer la quantité d'énergie solaire qui arrive sur chaque façade du bâtiment. Pour générer cette matrice, TRNBuild fait appel à TRNSHD : un sous-programme de TRNSYS.

- **Méthode de calcul de la charge thermique**

La variation de l'énergie thermique dans une zone est égale au flux de chaleur net « Q_i » échangé par cette zone selon l'équation I.9. (TRNSYS 2010). La température d'une zone thermique au sein d'un bâtiment (nœud thermique) est calculée par TRNSYS en utilisant l'équation I. 15 qui s'écrit :

$$C_i \cdot \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i \quad (\text{I.15})$$

De plus, la charge thermique d'un bâtiment est la quantité de chaleur à extraire (refroidissement) ou à fournir (chauffage) durant une période donnée afin d'y maintenir une température prédéfinie (température de consigne). Cette charge thermique de chauffage ou de refroidissement est reliée directement à la température de l'air de la zone. L'équation I. 15 peut être reformulée en incluant la puissance thermique (TRNSYS, 2010).

$$C_i \cdot \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i - P_i \quad (\text{I.16})$$

Où P_i est la charge thermique de la zone i (négative pour le chauffage et positive pour le refroidissement).

1.9. Quelques travaux réalisés sur le confort thermique dans le bâtiment

Plusieurs chercheurs ont en effet travaillé sur un aspect du confort thermique dans le bâtiment. Voici quelques résultats de ces recherches

Les travaux de **LAKHDARI Khaoula (2021)** sur l'impact du ratio d'ouverture des murs de façade sur la performance lumineuse, thermique et énergétique d'un bâtiment : Cas des régions chaudes et arides. Il a révélé que le rapport fenêtre/mur (WWR) joue un rôle crucial dans la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation ainsi que l'éclairage électrique. En climats chauds et secs, les petits ratios d'ouvertures sont recommandés pour réduire la consommation d'énergie, cependant, ils produisent un inconfort visuel, surtout dans les établissements scolaires où le besoin de l'éclairage naturel est important.

RIANTSOA Donatien René (2020) a étudié le confort thermique d'un bâtiment en briques artisanales d'argile cuite naturellement ventilé : détermination de l'orientation optimale ». Les

résultats obtenus permettent de trancher que l'orientation du modèle vers l'ouest offre la meilleure stabilité de confort thermique pour l'occupant du bâtiment toute l'année.

Les travaux de **D. Zekraoui *** et **N. Zemourri (2018)** sur l'impact de WWR, l'orientation et le type de vitrage sur la consommation énergétique dans les bureaux sous un climat chaud et sec. Il ressort des éclaircissements concernant des phénomènes tel que : l'orientation a un impact primordial sur la consommation énergétique ; l'augmentation de ratio de l'ouverture veut dire l'augmentation de la consommation de l'énergie totale ; l'utilisation de double vitrage et triple vitrage offre une réduction importante de la consommation et les déperditions thermique vers l'extérieur et l'utilisation de double vitrage à basse émissivité, reste la meilleure solution pour minimiser les rayons solaires entrants au niveau de l'orientation Sud, Est, Ouest, et minimiser par conséquence la consommation énergétique.

NATHANIELS Dirk Rudy (2018) a travaillé sur la simulation thermique dynamique de l'influence des apports thermiques par la toiture sur le confort dans un bâtiment résidentiel au Sud du Bénin. L'étude a montré que la toiture en paille permet de réduire de 37 % le besoin en refroidissement par rapport au bâtiment de référence en dalle. Quant à la toiture en tuile de terre cuite, le besoin en refroidissement est réduit de 15 %. Par contre la toiture en tôle zinc augmente le besoin en refroidissement de 40%. L'isolation thermique de la toiture par le polystyrène ainsi que l'isolation par les bottes de paille va réduire jusqu'à 40 % le besoin en refroidissement

MAGALIE TECHER (2017) sur le confort global dans les écoles élémentaires en milieu tropical : un réaménagement des échelles et étude de l'impact de la forme architecturale. Il ressort que les typologies dont les dimensions s'approchent d'un carré présentent une consommation énergétique moins élevée que les typologies plus allongées ; les orientations Nord et Sud démontrent un meilleur équilibre entre les performances thermique et lumineuses et la consommation énergétique puis l'augmentation de la surface vitrée de la façade Nord, entraîne une diminution trop significative de la performance énergétique, c'est pourquoi, nous recommandons de prioriser un nombre d'ouvertures plus important au Sud qu'au Nord, pour empêcher l'entrée de l'important apport solaire que subit la façade Nord dans l'hémisphère Sud

OLISSAN Olagoké Aurélien (2017) sur l'influence de la fenestration en vitre sur le confort thermique des bâtiments en climat tropical et humide : cas de la bande côtière du Benin. il ressort que l'utilisation des vitrages détériore le confort thermique des bâtiments administratifs entièrement vitrés ou à fenestration en vitre dans cette région, et la climatisation active qui

entraînerait une dépense d'énergie supplémentaire serait la seule manière d'améliorer ce confort.

OSSENI Sibiath (2017) a travaillé sur la formulation et la caractérisation thermomécanique de mortiers renforcés par des fibres du tronc de bananier. Elle ressort que les propriétés thermo physiques et mécaniques du matériau composite permettent de l'exploiter dans la conception d'un bâtiment en milieu tropical.

Mlle AKAB Hassiba et Mlle BELLATA Rima (2016) ont travaillé sur l'effet de l'orientation sur le confort thermique dans les habitations individuelle cas d'étude quartiers El-Salem Ain Fakroun. Elles ressortent qu'une bonne orientation favorise l'ensoleillement et permet de réduire la consommation d'énergies en récupéra les apports solaires en hiver (moins de dépense de chauffage) et réduire les apports en été (moins de dépense de climatisation). Pour limiter les consommations de chauffage, il est nécessaire de limiter les déperditions et il faut réaliser une maison compacte et optimiser son orientation pour profiter le maximum les gains solaires en hiver.

GBAGUIDI Victor S. et all (2011) ont travaillé sur la cartographie des directions dominantes des vents au Bénin : outil de conception et de dimensionnement des ouvrages. Les résultats ont révélé que chaque ville du Bénin correspond à une orientation dominante des vents. Il est important de prendre en compte cette direction lors de l'implantation du bâtiment sur un site.

S. BELLARA LOUAFI et S. ABDOU (2010) ont travaillé sur l'impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective. Les résultats ont révélé que la radiation solaire directe a participé dans la performance des séjours analysés, le fait est dû à l'inefficacité des protections utilisées et par le manque d'ombrage. Les résultats de l'investigation démontrent que l'orientation Sud-est reste la plus confortable par rapport aux deux autres orientations. Le microclimat environnant marque aussi une certaine importance dans l'augmentation des températures de l'air du site et qui participe à l'augmentation des températures de surfaces extérieures des façades. Leurs conceptions favorisent la réflexion des rayons solaires vers le bâtiment et augmente les températures des parois externes.

Conclusion

Au terme de ce chapitre qui porte sur une synthèse bibliographique sommaire, nous venons de nous informer sur la typologie des bâtiments, les types d'orientations, les facteurs influençant le confort thermique et les approches d'estimations du confort thermique. De plus en se basant sur les travaux de recherches antérieurs sur le confort thermique dans le bâtiment, notre objectif est d'effectuer une étude paramétrique en jouant sur les ratios surfaces menuiseries (fenêtre) par rapport aux parois opaques (mur) pour apprécier le confort thermique d'un bâtiment de forme parallélépipédique, sous le logiciel TRNSYS 17. La caractérisation thermodynamique des enveloppes d'un bâtiment a fait déjà l'objet d'études antérieures. Ici nous associons à ce bâtiment type l'orientation d'axe Sud-Nord et reprenons la simulation dynamique pour l'étude du confort thermique.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODE

- 2.1. Matériel
- 2.2. Méthode

Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthodologie utilisée pour déterminer le ROM d'un bâtiment d'enseignement au Bénin. Nous prenons également en compte la présentation du bâtiment d'étude, des outils d'exploitation et d'analyse du confort thermique du bâtiment pour une orientation optimale.

2.1. Matériel

2.1.1. Outil de représentation du prototype de bâtiment (Google SketchUp 8)

Le logiciel Google SketchUp 8 nous permet de faire une représentation en 3 dimensions du bâtiment retenu, tout en permettant une analyse thermique complète grâce à Trnsys3d zone. Nous l'avons réalisé grâce à un plan dessiné sous le logiciel Autocad.

- **Principe du logiciel**

Google SketchUp 8 est un logiciel de traitement d'image en 3 dimensions (3D). Il permet de concevoir, visualiser et de modifier des images en 3D. Son emploi est destiné à de nombreux domaines : architecture, construction, ingénierie, planification urbaine, conception de jeux, cinématographie et autres. Ce logiciel permet avant tout de créer des modèles avec des comportements et des attribues personnalisés.

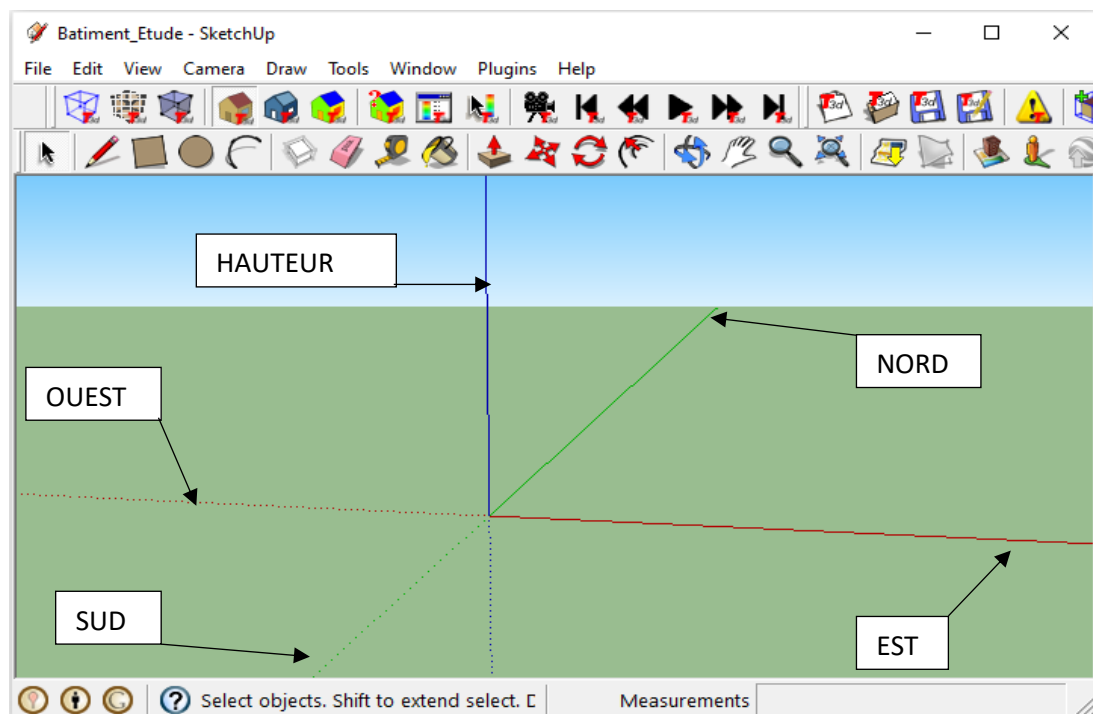


Figure 2. 1 : Espace de travail de GOOGLE SKETCHUP 8

2.1.2. Bâtiment d'étude

Le bâtiment étudié est une salle de cours magistral (amphi) situé dans la zone Master sur le campus de l'université d'Abomey Calavi dont les coordonnées géographiques sont : Latitude : 6°25'18" Nord ; Longitude : 2°20'24" Est et Altitude : 12 m Google Earth). Le dessin de cet amphi est réalisé sur Google SketchUp 8 en se basant sur sa configuration obtenue grâce au logiciel Autocad.



Figure 2. 2 : Façade principale du bâtiment orienté Sud-Nord



Figure 2. 3 : Façade arrière du bâtiment orienté Sud-Nord

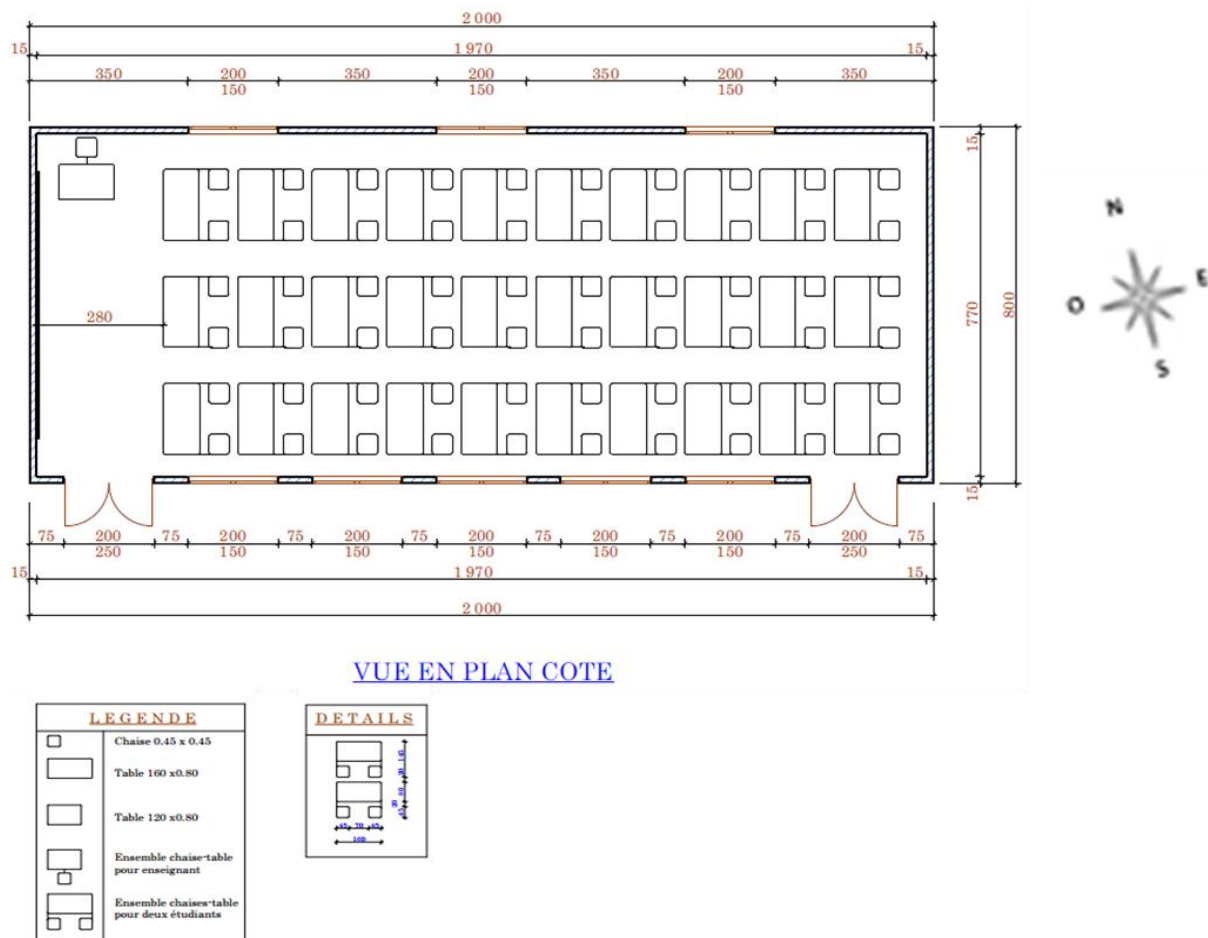


Figure 2. 4 : Configuration du bâtiment obtenu avec le logiciel Autocad

Le bâtiment est construit sur une surface de 160 m^2 au sol, soit une longueur de 20 m et une largeur 8 m ; avec une hauteur de 3 m sous-plafond puis d'une toiture en tuile de terre cuite à deux versants. Les façades principales du bâtiment sont orientées Nord-Sud comme l'indique la figure 2.4. Son axe est orienté de l'est à ouest et les façades est et ouest n'ont pas de fenêtres. Les façades nord et sud sont principalement occupées par des fenêtres à deux battants et des portes à deux battants de dimensions respectives 2 m x 1,5 m et 2 m x 2,5 m avec encadrement en bois léger, en vitrage simple de 4 mm d'épaisseur. La salle de classe comporte 55 personnes (54 élèves + 1 enseignant), disposant de 28 tables et 55 chaises.

La figure 2.5 montre la composition de la paroi et du plancher. La paroi est construite avec des briques (creuse en mortier : BC ou mortier renforcé de fibre de bananier : MFB) de 150/100 mm d'épaisseur et sont recouverts à l'extérieur et à l'intérieur d'enduit de ciment d'épaisseur 15/10 mm. Le plancher est de terre pressée de 15 cm d'épaisseur avec un revêtement en enduit de ciment de 10 mm d'épaisseur.

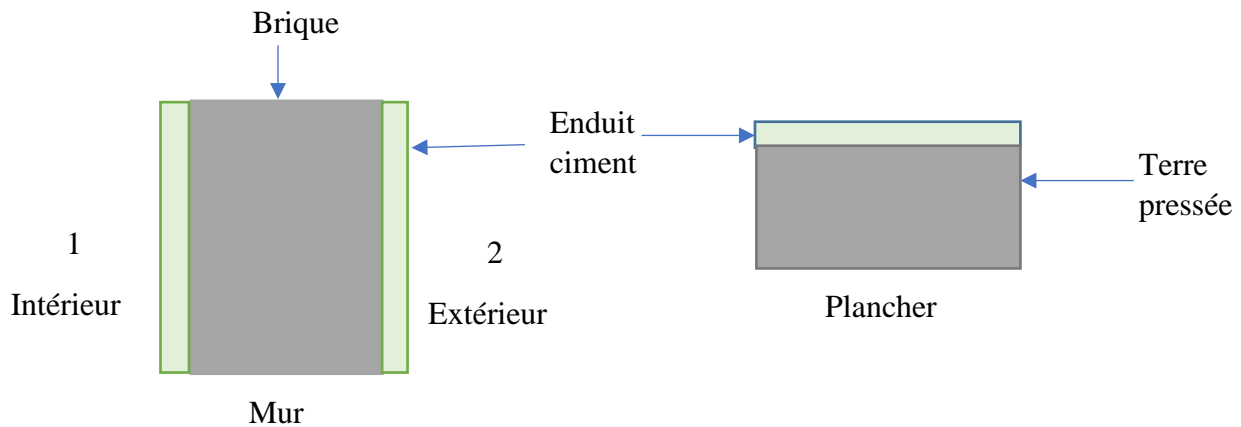


Figure 2. 5 : Composition du mur et du plancher

2.1.3. Outils de simulation (TRNSYS 2017)

Notre étude portant sur la simulation numérique a été faite à l'aide d'un ordinateur portable de marque Hp sur lequel est installé le logiciel de simulation TRNSYS 2017 . TRNSYS est un outil flexible comprenant une interface graphique, un moteur de simulation, et une bibliothèque de composants qui inclut différentes compositions d'enveloppe et des équipements standards et d'énergie renouvelable. La méthode des bilans énergétiques est utilisée pour déterminer le flux du transfert de chaleur. Cet outil de simulation permet le dimensionnement et l'analyse des systèmes, la simulation des flux d'air multizones, la simulation de l'énergie électrique, la conception solaire et l'analyse de la performance thermique des bâtiments.

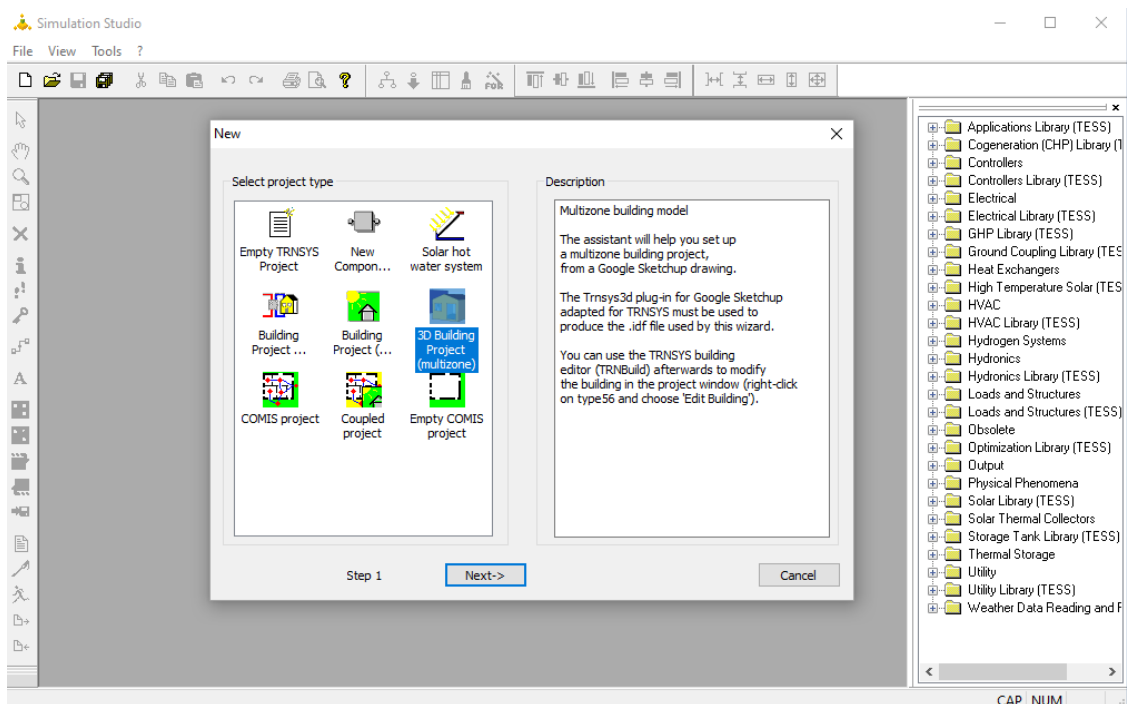


Figure 2. 6 : Simulation studio de TRNSYS 2017

2.2. Méthode

2.2.1. Méthodologie adoptée dans l'étude

La méthodologie adoptée dans l'étude consiste d'abord à présenter le principe du logiciel TRNSYS et à spécifier les critères pour identifier le confort thermique dans un bâtiment. Nous avons ensuite retenu un modèle de bâtiment. Ce modèle s'appuie sur les constituants de son enveloppe et son orientation pour favoriser une bonne ventilation naturelle ; il a été ensuite représenté avec le logiciel Google SketchUp dans la zone « Trnsys3d zone ». En outre nous avons fait le choix du nombre de portes à mettre sur l'une des parois du bâtiment. Enfin, nous avons varié le nombre de fenêtre concernant le calcul du ROM pour l'analyse de ce paramètre sur le confort thermique dans le bâtiment.

2.2.2. Principe du logiciel TRNSYS

Le processus de simulation dans le logiciel TRNSYS passe par les démarches classiques de modélisation numérique reconnues dans la littérature. Nous présentons un organigramme expliquant les procédures de modélisation et de simulation de l'amphi étudié.

La démarche de simulation s'effectue en 4 étapes

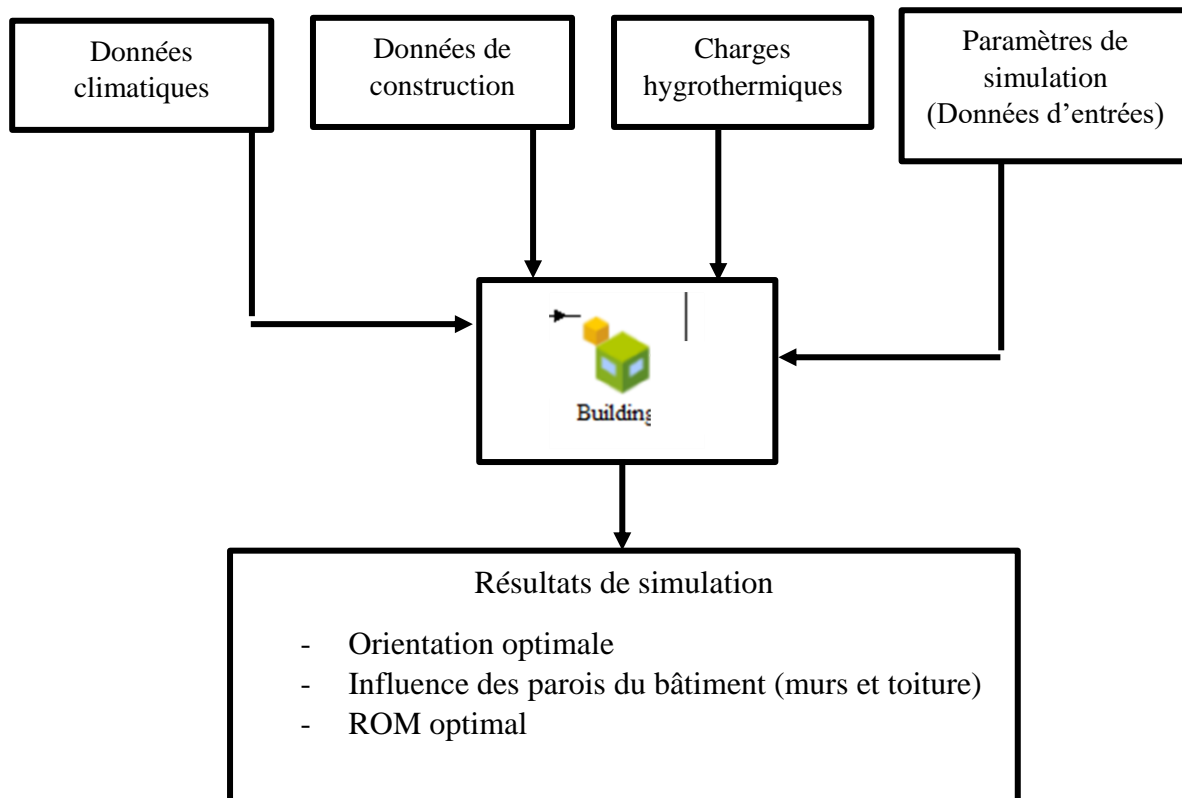


Figure 2. 7 : Organigramme de simulation

2.2.1. Donnés climatiques

Le logiciel METEONORM dispose pour TRNSYS, des données climatiques fiables. Pour intégrer ces données climatiques, nous partons d'abord de la modélisation de l'amphi avec Google SketchUp dans « Trnsys3d zone » et de l'enregistrement sous l'extension (.idf) contenant les données décrivant notre amphi à simuler (orientations des façades, dimensions, ouvertures...). La figure 2.8 montre la représentation de la salle de cours dans Trnsys3d zone. Ensuite, l'ouverture de l'espace "Simulation studio" et la sélection de "3D Building projet (multizone)", puis le choix des données météorologiques de la ville d'implantation du bâtiment.

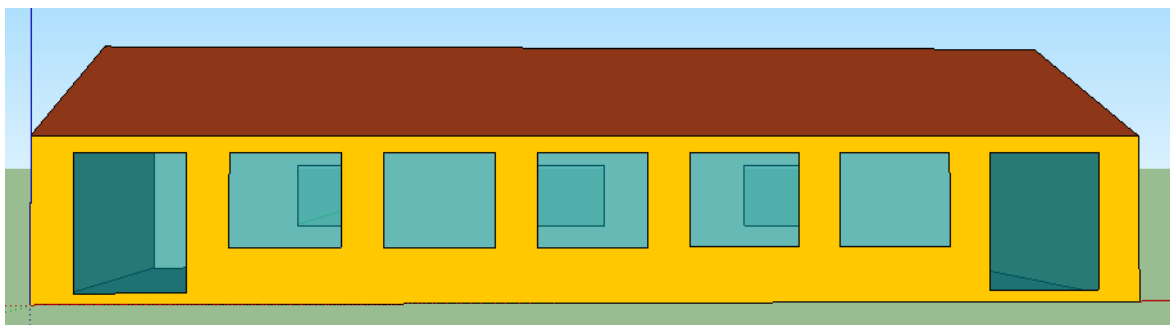


Figure 2. 8 : Représentation du bâtiment d'étude dans Trnsys3d zone

Tableau 2. 1: Coordonnées géographiques du site d'étude (Google Earth ; Meteonorm Trnsys , version 2017)

Lieux	Latitude	Longitude	Altitude
Abomey-Calavi	6°25'18" Nord	2°20'24" Est	12 m
Benin City	6°33' Nord	5°37'156" Est	88 m
Lagos Ikeja*	6°35' Nord	3°20'40" Est	63 m

* : Seule la ville de Lagos Ikeja est disponible sur la plateforme Météonorm.

Les données de la ville de Lagos Ikeja sont utilisées dans notre simulateur en raison de l'indisponibilité des données météorologiques de la ville d'Abomey-Calavi dans le Météonorm. L'importation du fichier (idf) du bâtiment, la création du projet et la validation, nous a permis

d'afficher l'organigramme de programmation dans le studio de simulation du logiciel TRNSYS. Ledit organigramme présente les différents paramètres qui interviennent dans la simulation.

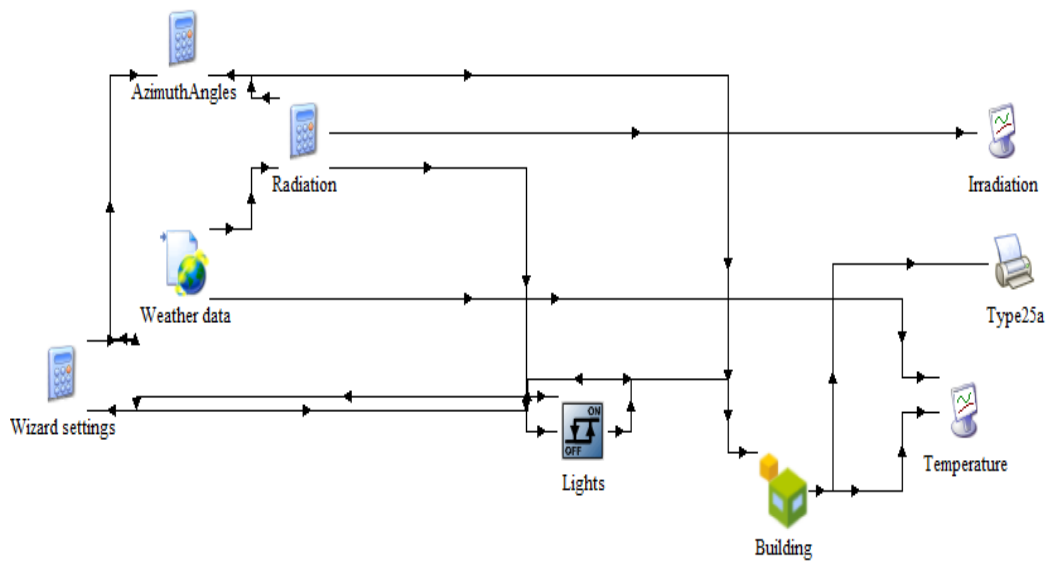











Figure 2. 9 : Organigramme de simulation

Tableau 2. 2 : Les différents paramètres de l'organigramme de simulation

Icônes	Désignation
	Données météorologiques fournies par le module meteonorm
	Fichier (. idf) de description du bâtiment fourni par le module Google SketchUp
	Calculateur de l'irradiation solaire
	Calculateur de la radiation solaire
	Présence de la lumière du jour et de l'obscurité de la nuit
	Angle d'azimut
	Facteur d'ombrage
	Imprimante des données de la boîte noire
	Afficheur des courbes

2.2.2. Données de construction

Après avoir établi l'organigramme de simulation, le fichier comprenant la description du bâtiment sera finalisé dans le module TRNBuild où seront renseignées toutes les propriétés thermophysiques des parois et des éléments constituant le bâtiment, ainsi que l'épaisseur des parois. D'après le rapport de l'Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie, 2002, traitant de l'efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale, nous avons tiré le tableau 2.2 qui récapitule les caractéristiques des parois et des éléments du bâtiment, ainsi que leur épaisseur.

Tableau 2. 3 : Description du bâtiment

Parois	Matériaux	(λ) [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	(C_p) [$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$]	(ρ) [$kg.m^{-3}$]	Epaisseur [mm]
Toiture	Tuile en terre cuite	1,15	0,90	1900	10
Toiture	Tuile en terre cuite	1,15	0,90	1900	10
	Contreplaqué	0,14	2,72	600	5
Façades (Mûrs)	Enduit extérieur en ciment	0,87	1,05	2200	15
	Mortier renforcé de fibre de bananier (MFB)(OSSENI, 2017)	0,21	0,80	1049	100
	Brique creuse en ciment (BC)	0,4	0,88	1200	150
	Enduit intérieur en ciment	0,87	1,05	2200	10
Plancher	Enduit intérieur en ciment	0,87	1,05	2200	10
	Terre pressée	1,15	0,90	1800	150

Les fenêtres et les portes sont toutes à battantes pour notre bâtiment, elles sont avec un châssis en bois et à simple vitrage. Elles ont donc un coefficient $U = 5,05 W.m^{-1}.K^{-1}$ et un coefficient $g = 0.87$ (TRNSYS, 2017).

Nous avons fait la simulation du bâtiment en considérant deux différents types de matériaux de paroi, tels que la brique creuse en mortier (BC) et la brique en mortier renforcé de fibre de bananier (MFB), dont les caractéristiques sont renseignées dans le tableau 2.2 et la figure 2.6,

De plus nous considérons également deux types de toitures, la toiture en tuile de terre cuite et la toiture en tuile de terre cuite + un plafond en contreplaqué.

DIRK RUDY, 2018 a fait une étude sur la simulation thermique dynamique de l'influence des apports thermiques par la toiture sur le confort dans un bâtiment résidentiel au Sud du Bénin. L'auteur a recommandé l'usage de la paille et de la tuile pour la conception des bâtiments en climat tropical. Vue la zone d'implantation et l'usage du bâtiment, nous avons opté pour l'utilisation de la tuile en terre cuite, car la paille est une matière qui ne résiste pas aux intempéries, ni au feu. Le second type de toiture est en tuile de terre cuite avec un aménagement d'un plafond en contreplaqué.

2.2.3. Charges hygrothermiques

◆ Infiltration

Il existe toujours des infiltrations d'air lorsque le bâtiment est clos. Le taux d'infiltration (n_{50}) est donné par le taux horaire de renouvellement d'air résultant d'une différence de pression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (S. GBENOU, 2017).

Tableau 2. 4 : Valeurs par défaut de n_{50} (S. GBENOU,2017)

Types du local	$n_{50}(h^{-1})$
Pièce habitable (par défaut)	0,5
Cuisine ou salle de bains avec fenêtre	1,5
Bureau	1,0
Salle de réunion, salle de classe	2,0

Dans notre cas, en se référant au tableau ci-dessus, nous avons pris $n_{50}=2 h^{-1}$ par défaut

◆ Ventilation

En ce qui concerne la ventilation, les portes et les fenêtres du bâtiment étudié sont à deux battants. En se référant à l'IFDD, 2015, ces ouvertures peuvent laisser passer une quantité maximale d'air correspondant à 90% du volume du local, lorsqu'elles sont dans la direction dominante du vent.

D'après toujours IEPF, 2002 les portes et les fenêtres sont ouvertes totalement afin de favoriser la ventilation naturelle, ainsi on peut considérer que le renouvellement d'air est égal à un volume du local/heure. Ainsi, sur la base de ces deux affirmations, nous pouvons estimer le volume de renouvellement d'air égal à $576 m^3/h$, pour le cas du bâtiment étudié.

◆ Gains de chaleur (sensible + latent)

Le bâtiment est conçu pour recevoir des étudiants en situation d'apprentissage, ainsi, il est important de renseigner à ce niveau le nombre d'occupants et leur degré d'activité selon la norme ISO 7730 intégrée dans TRNSYS. Notre amphi comporte 55 personnes adultes dont 54 étudiants et un enseignant. Elles sont considérées assises, faisant un travail léger, tout comme le métier de dactylographie. Dans cet amphi nous n'avons pas pris en compte de l'éclairage artificiel (utilisation des lampes électrique) et l'utilisation des ordinateurs car leurs apports de chaleurs seront énormes et engendrent aussi des dépenses pour le concepteur en cas de défaillance.

◆ Confort

A ce niveau, il est important de renseigner des informations qui concernent les occupants à savoir leur mode d'habillement, leur métabolisme et la vitesse de l'air.

Commençant par l'habillement, la nature du tissu et la coupe des vêtements ont également une influence sur les échanges de chaleur avec l'environnement. En se référant à la figure 1.9 (chapitre 1) des valeurs exprimées en Clo de tenues vestimentaires, nous optons pour la valeur 0,7 Clo qui définit le mode d'habillement désiré dans notre salle de cours sans distinction du sexe

Le métabolisme étant lié à la production de la chaleur interne permettant à l'individu de conserver sa température corporelle optimale, il dépend de l'âge, du poids, de la taille et du sexe de l'individu. Le tableau 1.6 (Chapitre 1) donne les valeurs de référence du métabolisme selon le type d'activité, ce qui nous a permis de choisir la valeur 1,2 Met correspondant à l'activité pour laquelle le bâtiment est conçu.

Enfin la vitesse de l'air joue un rôle important dans la sensation de confort ressentie par les individus. Ce paramètre permet d'abaisser la température corporelle en été mais peut-être gênant par la présence de courants d'air. Le début de sensation du vent par les individus est caractérisé par la vitesse 0,2 m/s, la vitesse moyenne 1.5 m/s est conseillée dans les locaux et le début d'inconfort absolu à partir de 5 m/s (IFFD, 2015). Le tableau 1.4 (Chapitre 1) donne le refroidissement équivalent à la vitesse relative de l'air, ce qui nous a permis de choisir la valeur 1,5 m/s qui engendre un refroidissement équivalent de 4°C suffisant pour une ventilation naturelle.

2.2.4. Les paramètres de simulation (données d'entrées)

Les paramètres d'entrée et de sortie utilisés dans TRNBuild se résument dans le tableau 2.4.

Tableau 2. 5 : Entrées et sorties dans le logiciel

Paramètres d'entrée (données initiales)	Paramètres de sortie
Période de simulation : Mars [1416 h ; 2159 h] et Août [5088 h ; 5831 h] Durée de simulation : 24 h Heure d'occupation : de 8 h à 12 h et de 14 h à 18 h Température opérative initiale : 25 °C Humidité relative initiale : 50 %	Température opérative (TOP) Humidité relative intérieure (HR)

Nous entrons les paramètres d'entrée et nous choisissons nos paramètres de sortie avant de sauvegarder le projet sous l'extension (imported). Après cela, nous pouvons définir la période de simulation. L'étude du comportement thermique de l'amphi a été menée pendant le mois de mars (le mois le plus chaud de l'année), période au cours de laquelle les valeurs min et max de la température sont respectivement 26°C et 32°C et aussi pendant le mois d'août (le mois le plus froid de l'année), période au cours de laquelle les valeurs min et max de la température sont respectivement 24°C et 28°C. Donc dans la simulation studio les mois de mars et d'août sont définis respectivement par les intervalles de temps ci-après [1416 ; 2159] et [5088 ; 5831] en heures à compter du premier jour de l'année. A cette étape la simulation est lancée et le traitement des données obtenues se fait avec le logiciel Excel.

2.2.5. Effet de l'orientation du bâtiment

En se référant à la littérature (IFDD,2015), pour améliorer le confort thermique dans un bâtiment, il faut une bonne orientation. Pour ce faire en climat tropical, il est recommandé d'orienter les façades principales dans la direction Sud-Nord et de choisir la direction des vents dominants sur le site pour favoriser la libre circulation de l'air dans l'édifice.

GBAGUIDI Victor, 2011 a réalisé une étude sur la cartographie des directions dominantes du vents au Bénin. Il ressort que les localités du sud (Cotonou, Bohicon) et du centre (Savè) du Bénin, ont une plage de directions dominantes du vent. Mais la direction dominante ponctuelle de base du vent est SUD - OUEST.

Pour ce travail nous orientons notre bâtiment dans la direction Sud-Nord ; ainsi les façades principales suivent cette orientation ; nous n'avons donc pas prévu des ouvertures sur les façades EST et OUEST à cause de l'exposition au rayonnement solaire. Par contre sur les façades principales, nous avons décidé d'augmenter plus les ouvertures au SUD afin de bénéficier de la ventilation naturelle à cause de la direction du vent.

Après avoir recueilli les résultats de la première simulation de notre amphi dont les façades principales sont orientées SUD-NORD, nous ouvrons le fichier du projet sous l'extension (imported) dans simulation studio et nous ajoutons de façon progressive des ouvertures sur les façades principales, tout en respectant particulièrement la valeur moyenne maximal du ROM du bâtiment et aussi le ROM maximal au Sud, à l'Est et à l'Ouest avant de relancer la simulation. Les résultats de chaque ROM dans cette orientation optimale sont à exploiter afin d'apprécier l'effet des ouvertures sur le confort thermique dans le bâtiment.

2.2.6. Ratios des surfaces ouvertures par les surfaces des parois murs

Les surfaces d'ouvertures considérées ici, prennent en compte les portes et les fenêtres, par contre les surfaces des parois murs représentent les quatre façades latérales omis la toiture et le plancher. Le ratio ouverture-mur, noté ROM est le rapport entre la surface totale occupée par les ouvertures (portes et fenêtres) à la surface des façades du bâtiment. Il est exprimé en pourcentage (%) et a pour expression :

$$ROM = \frac{\text{Surface totale des ouvertures}}{\text{surface des facades du batiment}} \times 100 \quad (II.1)$$

Tableau 2. 6 : Surface des parois et d'ouvertures de l'enveloppe du bâtiment

Grande façade	$1 \text{ m}^2 \times 20 \times 3 = 60 \text{ m}^2$
Petite façade	$1 \text{ m}^2 \times \left[(8 \times 3) + \frac{8 \times 2}{2} \right] = 32 \text{ m}^2$
Surface total des quatre (4) façades (S_T)	$1 \text{ m}^2 \times [2 \times 60 + 2 \times 32] = 184 \text{ m}^2$
Fenêtre (S_F)	$1 \text{ m}^2 \times 2 \times 1,5 = 3 \text{ m}^2$
Porte (S_P)	$1 \text{ m}^2 \times 2 \times 2,5 = 5 \text{ m}^2$

Nous avons fixé comme objectif au départ que les petites façades ne vont pas porter des ouvertures, parce qu'elles sont orientées Est-Ouest (lever et coucher du soleil) ; mais plutôt les grandes façades.

Les grandes façades du bâtiment vont recevoir les ouvertures. La plupart des grands amphithéâtres que nous disposons sur le campus possède deux portes, nous avons donc décidé d'uniformiser en gardant aussi deux portes pour notre bâtiment au SUD. Ainsi, le calcul du ROM prend en compte la recommandation faite dans le document fixant des mesures d'efficacité énergétique dans la construction des bâtiments dans les états membres de l'UEMOA, 2020 en s'appuyant sur le climat auquel appartient la zone d'implantation du bâtiment. La valeur moyenne maximale du ROM pour un bâtiment est de 20% et le ROM maximal au Sud, à l'Est et à l'Ouest est de 25 %.

Sur les grandes façades de notre bâtiment de 20 m sur 3 m, il nous faut un décalage de 0,75 m entre les surfaces menuiseries (porte ou fenêtre) de 2 m de longueur positionnées afin d'assurer la rigidité de la paroi. Nous pouvons que positionner au maximum 7 surfaces menuiseries. Notre bâtiment de base est constitué de deux (02) portes et quatre (04) fenêtres. Etant donné que la façade principale Sud doit recevoir plus d'ouvertures que la façade Nord, nous avons positionné les surfaces menuiseries comme suit :

Orientation grande façade	Disposition/Nombres des ouvertures				
SUD façade	2P, 1F	2P, 2F	2P, 3F	2P, 4F	2P, 5F
NORD façade	3F	3F	3F	3F	3F

P : porte ; F : fenêtre

La codification (ROM_{i-j}) suivante est retenue pour une meilleure compréhension des résultats.

$$ROM_{i-j} = \frac{n.S_P + m.S_F + 9}{S_T} . 100 \quad II.2$$

Avec

$$i = n \text{ et } j = 1, \dots, m ; n \text{ et } m \in \mathbb{N}$$

n : le nombre de porte ; m : le nombre de fenêtre ; S_P : surface d'une porte ; S_F : surface d'une fenêtre et S_T : surface totale des façades

Conclusion

Le logiciel TRNSYS du fait de son approche très scientifique et de sa réputation dans le domaine de la simulation thermique dynamique des bâtiments a été utilisé pour notre étude. Les différents paramètres et données de simulation ont été présentés dans ce chapitre afin d'analyser les différents résultats dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 3 : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSION

Introduction

L'objectif assigné à ce travail est d'obtenir les différents résultats des simulations et de les analyser. L'analyse des courbes au regard de l'évolution de certains paramètres du confort thermique comme la température opérative (TOP) et l'humidité relative intérieure (HR) à l'intérieur du bâtiment étudié nous a permis de tirer des conclusions à propos des objectifs fixés. Nous avons choisi le mois de mars (le mois le plus chaud de l'année) et le mois d'août (le mois le plus froid de l'année) pour faire la simulation. La durée de simulation est choisie par l'utilisateur en fonction de ses attentes. Ainsi pour notre étude, nous avons choisi une durée de 24 h compte tenue des horaires d'occupations du bâtiment par des étudiants de 8 h à 12 h et de 14 h à 18 h. Cette durée de simulation correspond à un des jours ouvrables de la première semaine du mois de mars (période estivale) ou du mois d'août (période hivernale) à cause des perturbations météorologiques (des intempéries) engendrées en climat tropical. Pendant le mois d'août, les activités académiques sur le Campus d'université d'Abomey-Calavi sont au ralenti, ainsi, nous avons plus axé la période de simulation sur le mois de mars (période estivale). Comme il existe une corrélation entre les deux paramètres du confort thermique, nous pouvons utiliser soit la température opérative ou l'humidité relative intérieure pour en faire l'analyse de nos différents résultats des simulations.

3.1. Résultats obtenus sur le calcul du rapport fenêtre-mur (WWR)

L'utilisation de la relation II. 2 du chapitre 2, nous a permis de calculer les différents ROM qui se résument dans le tableau ci-dessous

Tableau 3. 1 : Différents ROM calculés

Nombre d'ouvertures au sud	Taux calculés	Recommandation sur le ROM du bâtiment (UEMOA, 2020)
02 portes et 01 fenêtre	$ROM_{2_1} = 11,96 \%$	La VMM du ROM pour un bâtiment est de 20%
02 portes et 02 fenêtres	$ROM_{2_2} = 13,59 \%$	
02 portes et 03 fenêtres	$ROM_{2_3} = 15,22 \%$	
02 portes et 05 fenêtres	$ROM_{2_4} = 16,85\%$	Le ROM maximal au Sud, à l'Est et à l'Ouest est de 25%
02 portes et 05 fenêtres	$ROM_{2_5} = 18,48 \%$	

Selon les recommandations faites par UEMOEA et le positionnement des ouvertures sur les façades principales du bâtiment, nous avons obtenu cinq (5) ROM avec les pourcentages : **11,96 % ; 13,59 % ; 15,22 % ; 16,85 % et 18,48 %**

3.2. Analyse de l'influence de l'orientations du bâtiment.

L'architecte ou le concepteur a la possibilité d'orienter son édifice dans les directions Nord, Sud, Est et Ouest. Mais il est important de prendre les dispositions pour assurer à l'intérieur du bâtiment un meilleur confort thermique pour les occupants. Ces dispositions prennent en compte l'orientation relative au soleil et l'orientation relative au vent Très souvent, malheureusement, la meilleure orientation par rapport au soleil n'est pas la meilleure par rapport au vent (IFFD, 2015). Plusieurs bâtiments scolaires existent sans être plafonnés car cela engendre des coûts supplémentaires. Nous prenons le bâtiment de ROM_{2,1}(2P,1F) = 11,96 %, avec des parois réalisées en BC ou en MFB, orienté dans les quatre directions afin d'apprécier leurs influences sur la TOP (°C) au cours de la première semaine du mois de mars (période estivale).

- **Pour le mois de mars : cas du bâtiment en BC**

La figure 3.1 montre l'évolution de la température opérative en une journée (24h) durant la première semaine du mois de mars dans une salle de cours de toiture en tuile selon les différentes orientations.

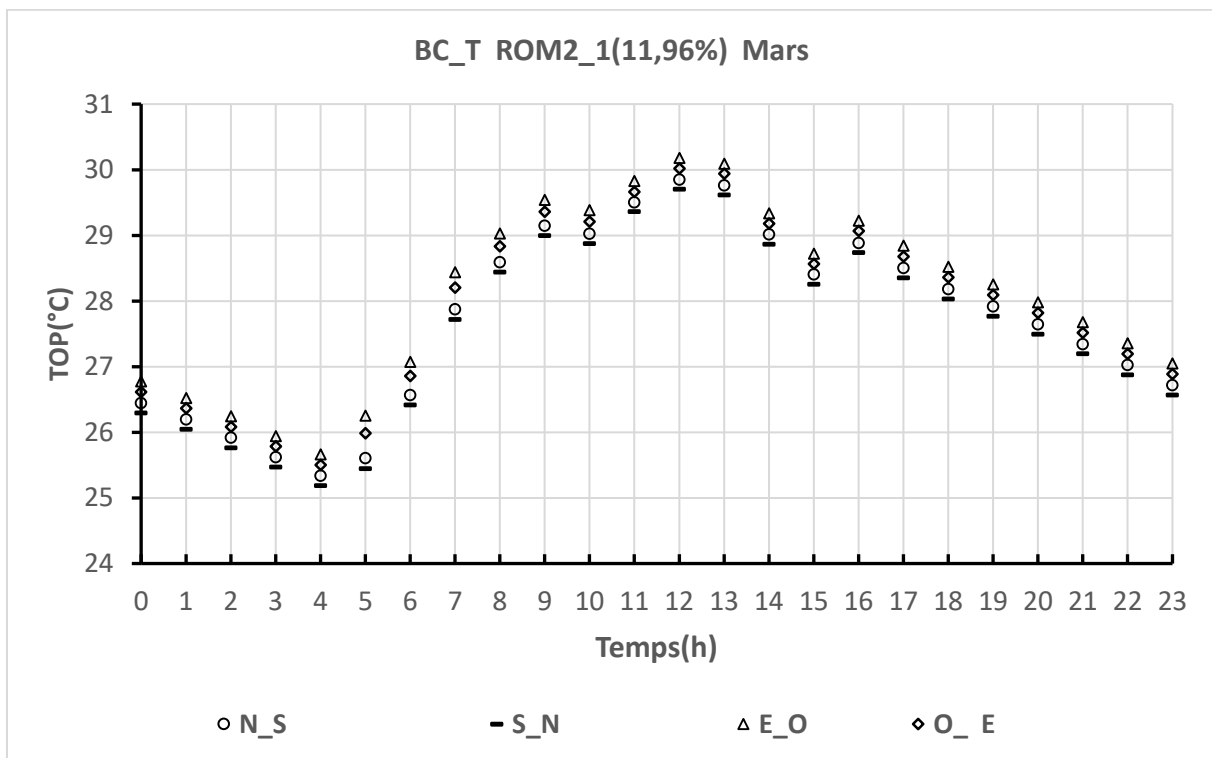


Figure 3. 1 : Température opérative durant le mois de mars dans la salle de cours en tuile pour les différentes orientations

• Pour le mois d'août : cas du bâtiment en MFB

La figure 3.2 montre l'évolution de la température opérative en une journée(24h) durant la première semaine du mois d'août dans la salle de cours de toiture en tuile sans plafond selon les différentes orientations.

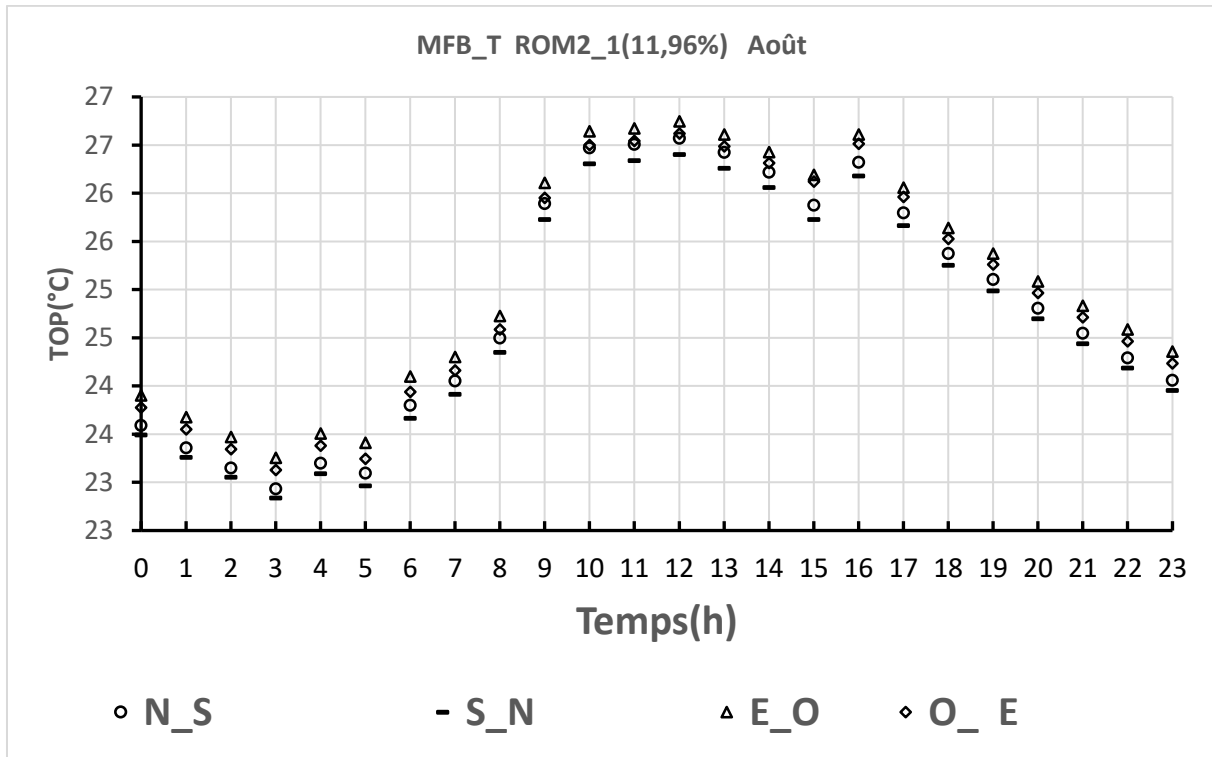


Figure 3. 2 : Température opérative durant le mois d'août dans la salle de cours en tuile sans plafond pour les différentes orientations

D'après les figures 3.1 et 3.2, nous remarquons que quel que soit la période de l'année, la température opérative dans le bâtiment montre un accroissement important, si le bâtiment est orienté Est ou Ouest ou Nord, et ceci entre 8h et 12h. Les résultats obtenus prouvent que les parois orientées Est et Ouest reçoivent une quantité importante des rayonnements solaires dans un intervalle de temps dans la journée. Par contre la paroi orientée Sud reçoit également le soleil mais la température à l'intérieur du bâtiment n'est pas trop élevée. Nous pouvons donc déduire que l'orientation Sud-nord favorise la ventilation naturelle du bâtiment.

3.2. Analyse des résultats sur les éléments constitutifs de l'enveloppe de notre bâtiment.

Les éléments de l'enveloppe de notre bâtiment qui ont été pris en compte sont : les matériaux de construction comme la brique creuse (BC) et le mortier renforcé de fibre de bananier (MFB) puis la toiture en tuile de terre cuite sans ou avec plafond(contreplaqué). Il

nous faut choisir dans un premier temps, un bâtiment de ROM connu avec une toiture en tuile de terre cuite ou une toiture en tuile de terre cuite plus le plafond (contreplaqué) et varier la composition de la paroi (en BC et en MFB) afin de voir l'évolution de TOP dans ce bâtiment pendant la période de l'année. Ensuite, nous avons pris un type de mur (en BC et en MFB) pour notre bâtiment et varié en retour les formes de toiture afin de voir l'influence du plafond dans ce bâtiment. Nous prenons également le bâtiment à ROM_{2,1}(2P ;1F), orienté Sud-Nord dont son ROM est 11,96 %.

3.2.1. Influence des matériaux de construction

La matière du mur joue aussi un rôle primordial sur le confort thermique intérieur et la consommation énergétique de l'habitat. La résistance thermique et l'inertie thermique de la matière constituent alors un facteur non négligeable pour le choix de ces matériaux.

- Evolution de la température à l'intérieur du bâtiment

Les figures 3.3 et 3.4 montrent l'évolution de la température opérative en une journée (24h) durant la première semaine du mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas des bâtiments en terre cuite sans ou avec plafond.

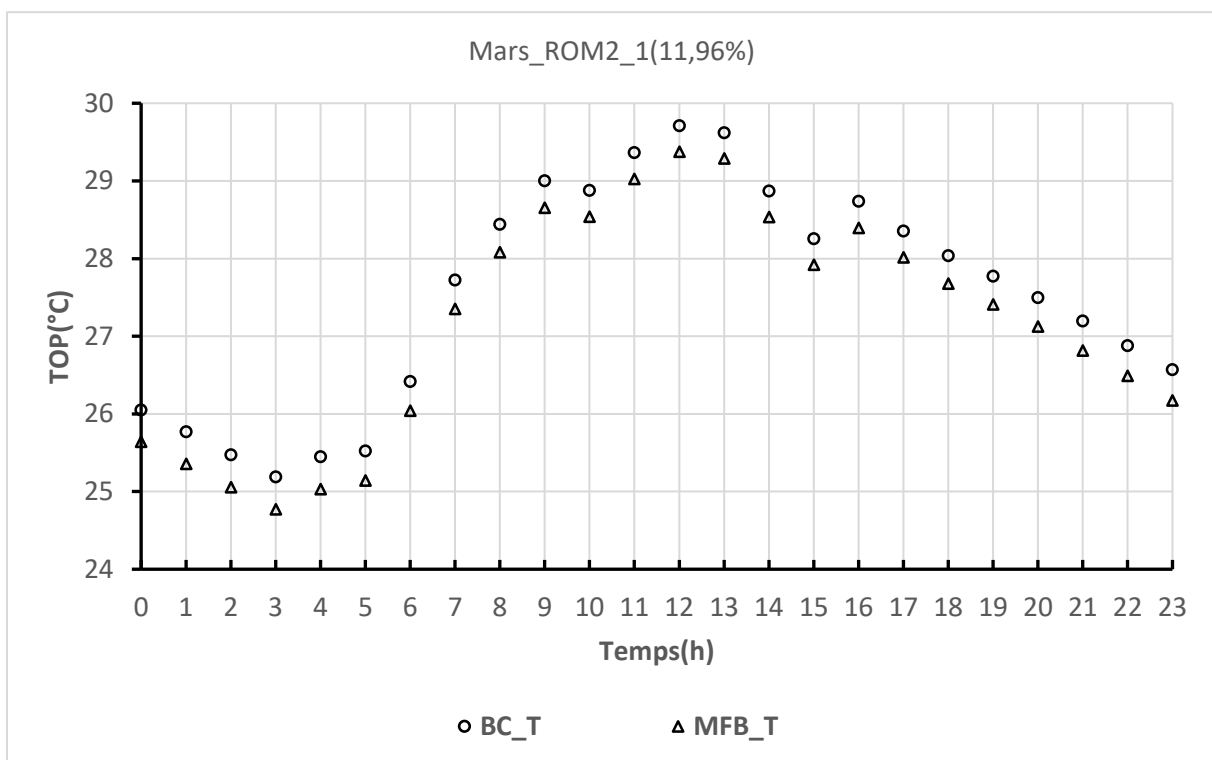


Figure 3. 3 : Température opérative durant le mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas du bâtiment en tuile sans plafond

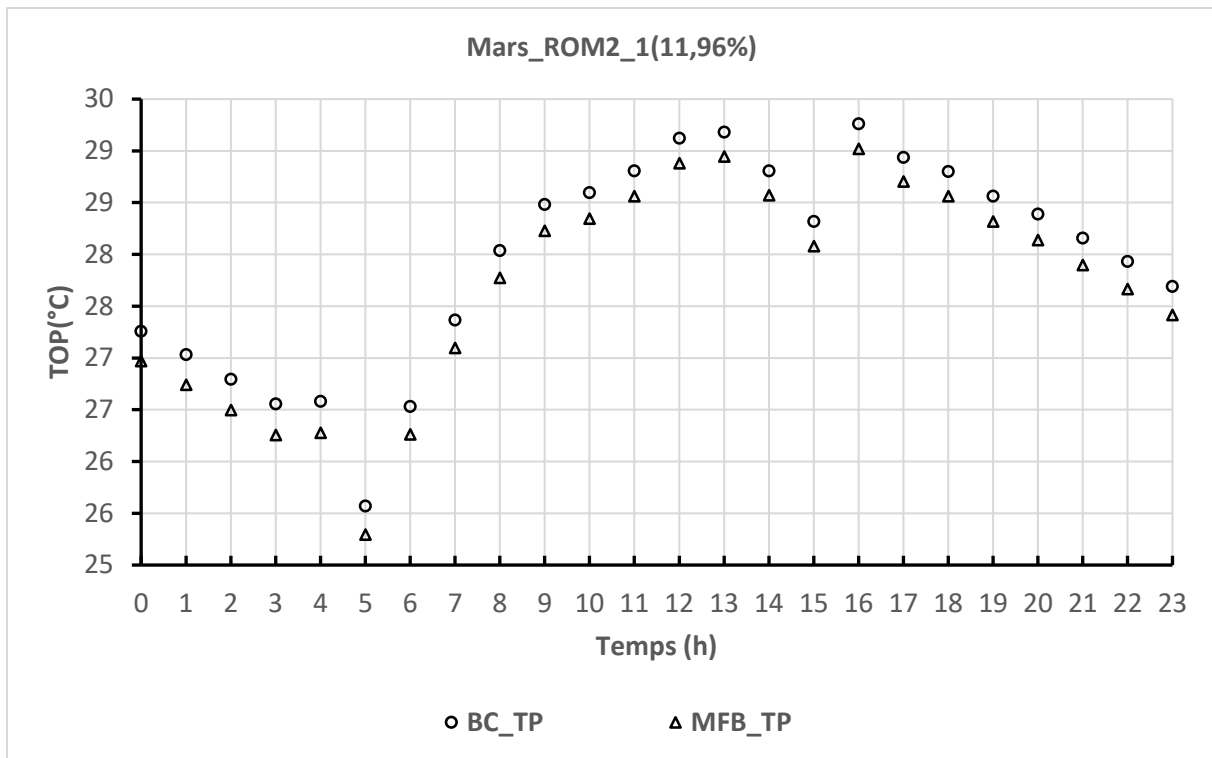


Figure 3. 4 : Température opérative durant le mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas du bâtiment en tuile avec plafond

D'après les figures 3.3 et 3.4 de la période estivale, nous remarquons que le mortier renforcé de fibre de bananier apporte le meilleur compromis de confort par rapport à la brique creuse car la température opérative dans le bâtiment en MFB est en-dessous de celle de bâtiment en BC quel que soit la toiture considérée. Les résultats obtenus prouvent que l'interaction des propriétés thermiques et physiques des matériaux d'une part et la spécificité du climat d'autre part intervient sensiblement pour la prise d'une telle décision dans ces genres de problèmes. Le MTB est plus isolant que le BC à voir déjà les propriétés thermiques dont il améliore l'ambiance intérieure du bâtiment.

- **Evolution de l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment**

Les figures 3.5 et 3.6 montrent l'évolution de l'humidité relative en une journée (24h) durant la première semaine du mois de mars, en fonction des matériaux de construction. Cas des bâtiments en tuile de terre cuite sans ou avec plafond.

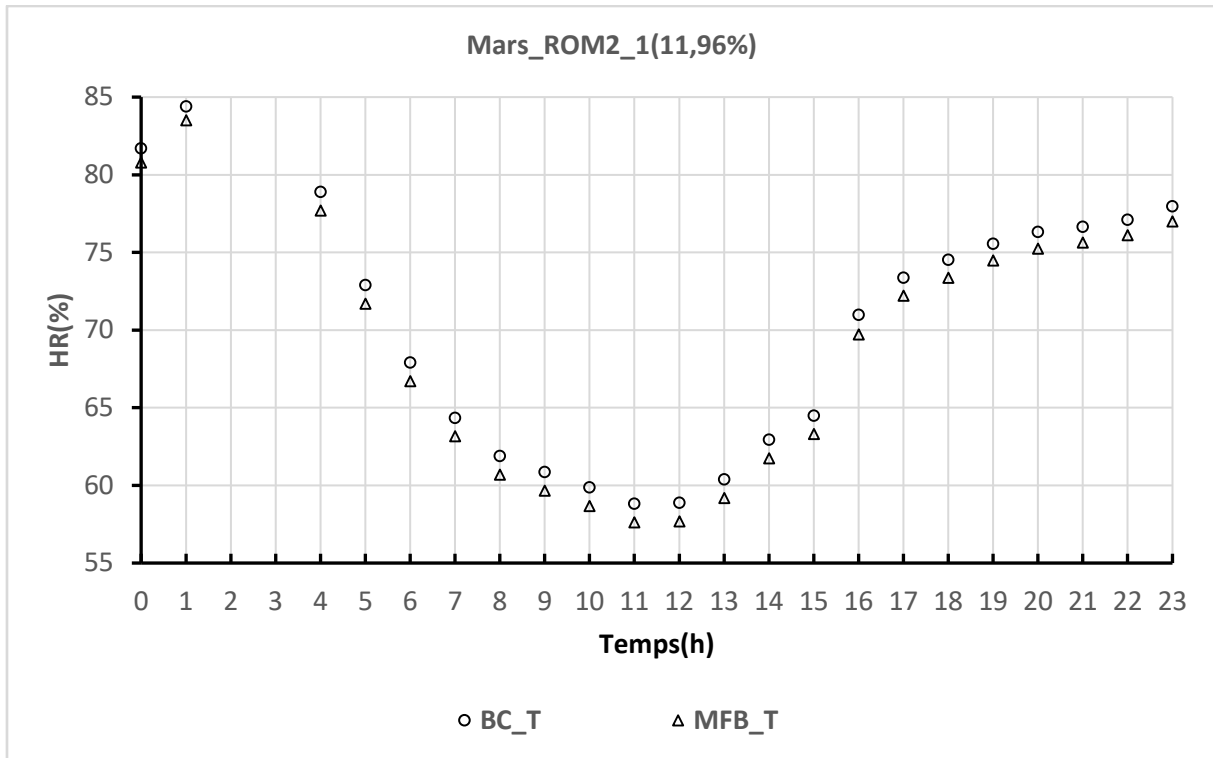


Figure 3. 5 : : Humidité relative durant le mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas du bâtiment en tuile sans plafond

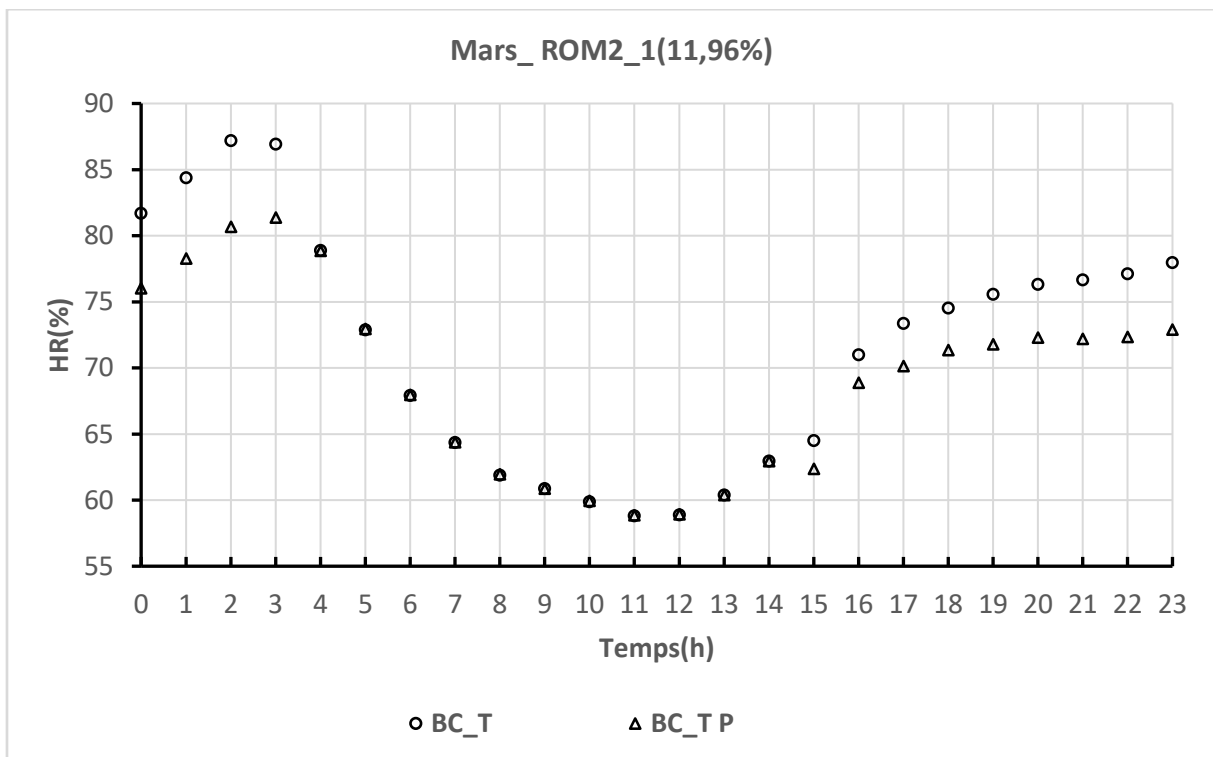


Figure 3. 6 : Humidité relative durant le mois de mars, en fonction des matériaux de construction : Cas du bâtiment en tuile avec plafond.

D'après les figures 3.5 et 3.6 de la période estivale, nous remarquons que le mortier renforcé de fibre de bananier apporte le meilleur compromis de confort par rapport à la brique creuse car l'humidité relative dans le bâtiment en MFB est en-dessous de celle de bâtiment en BC quel que soit la toiture considérée. De plus on constate que pendant un intervalle de temps lorsque la température opérative croît ou décroît à l'intérieur du bâtiment, nous observons que l'humidité relative en retour décroît ou croît. Ce qui explique la corrélation qui existe entre TOP et HR

3.2.2. Influence de la composition de la toiture

La toiture joue un rôle primordial sur le confort thermique intérieur de bâtiment et la consommation énergétique de l'habitat. L'être humain produit de l'énergie après la digestion, l'équilibre entre l'humain et le local, s'établit par l'air ambiant.

- Pour le mois de mars avec la composition de la toiture

Les figures 3.7 et 3.8 montrent l'évolution de la température opérative en une journée durant la première semaine du mois de mars, en fonction de la composition de la toiture. Cas des bâtiments en BC ou en MFB.

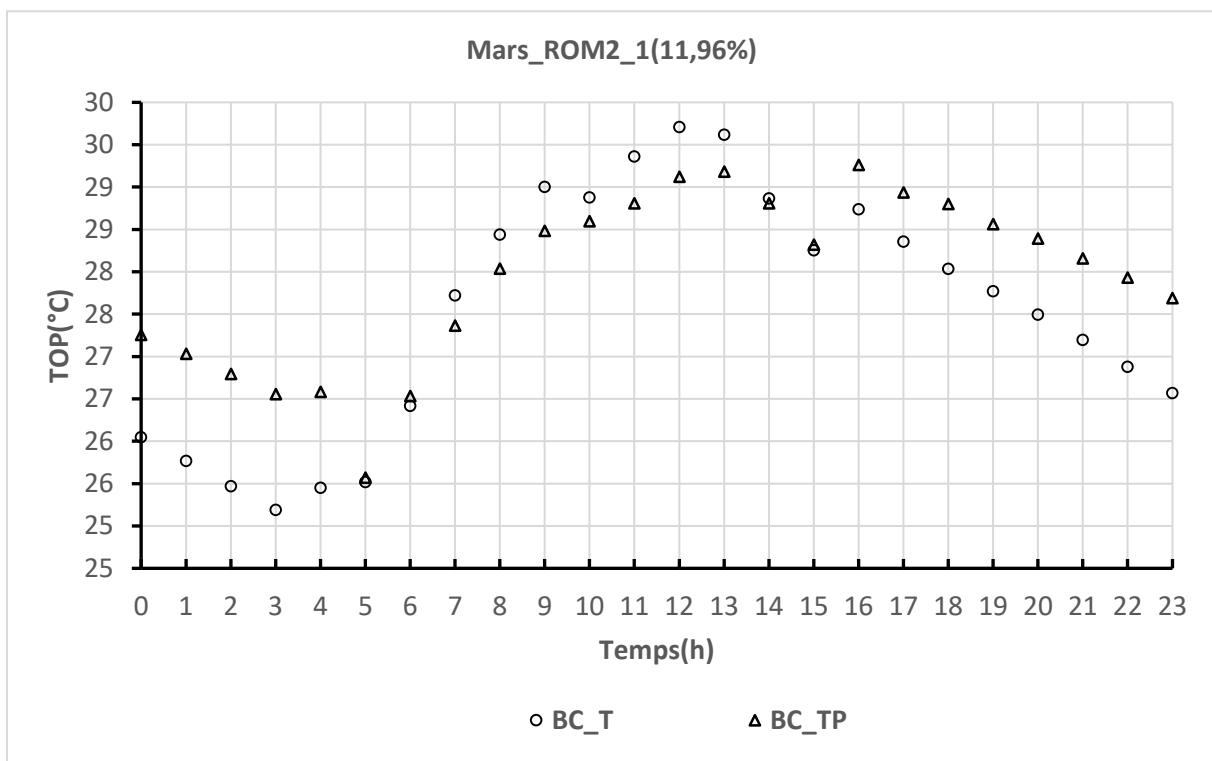


Figure 3. 7: Température opérative durant le mois de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC

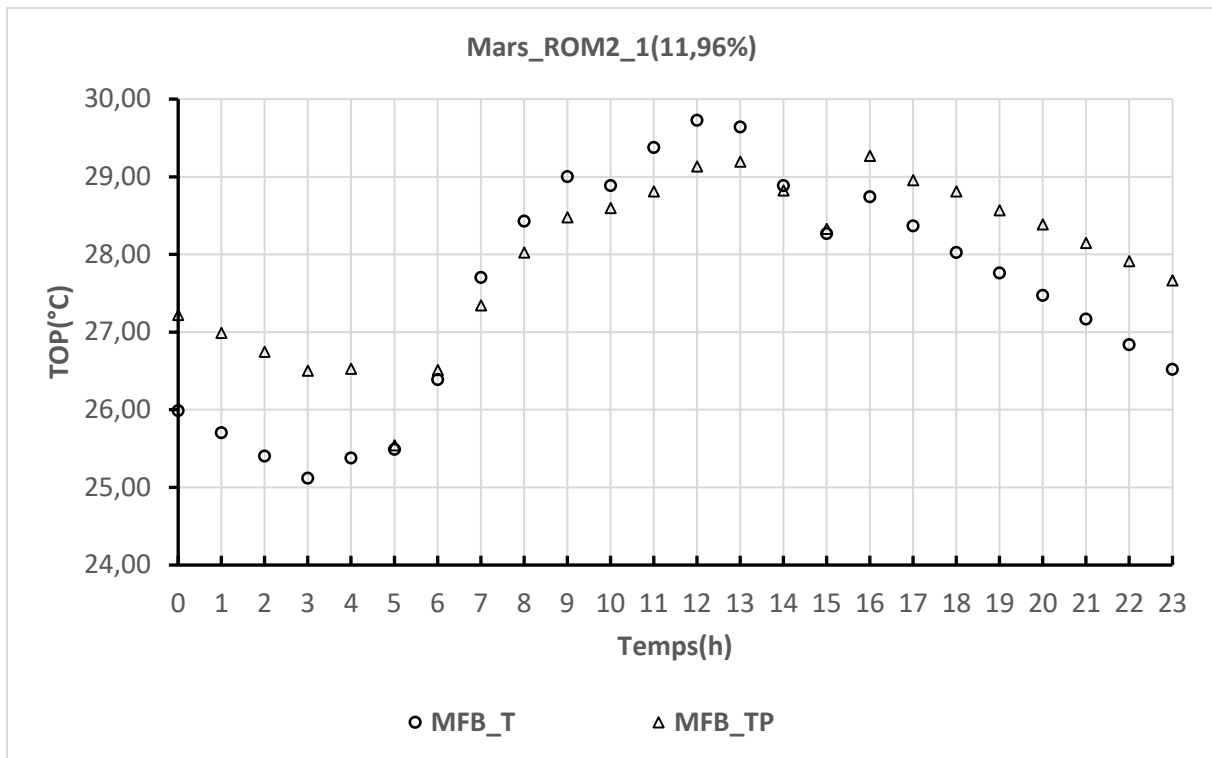


Figure 3. 8 : Température opérative durant le mois de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en MFB

D'après les figures 3.7 et 3.8 de la période estivale, nous remarquons qu'aux heures de fort ensoleillement allant de 8h à 12h, la température opérative dans notre salle de cours avec la toiture en tuile munie de plafond est en-dessous à la température opérative dans la salle de cours en tuile quel que soit la composition de la paroi du bâtiment. Nous remarquons dans cet intervalle de temps que le plafond a réduit la température au sein du bâtiment. Ensuite entre 12h et 15h, nous observons une diminution de la TOP, ce qui peut s'expliquer par l'absence d'un nombre important d'étudiants au sein du local et le débit d'air qui entre, refroidit l'intérieur du local. Nous observons également entre 15h à 16h une augmentation de la TOP, qui explique par un apport de chaleur à l'intérieur dans local à cause des aliments consommés entre 12h et 14h par les apprenants et les efforts physiques déployés dans la salle. De plus nous assistons après 16h une diminution progressive de la température jusqu'au coucher du soleil. Nous déduisons donc que le rayonnement solaire devient faible, le local bénéficie encore de la ventilation mais le contreplaqué utilisé comme plafond restitue la chaleur emmagasinée durant cet intervalle de temps car sa capacité thermique est élevée. Ce qui justifie l'écart de température observé.

Les figures 3.9 et 3.10 montrent l'évolution de l'humidité relative en une journée durant la première semaine du mois de mars, en fonction de la composition de la toiture. Cas des bâtiments en BC ou en MFB.

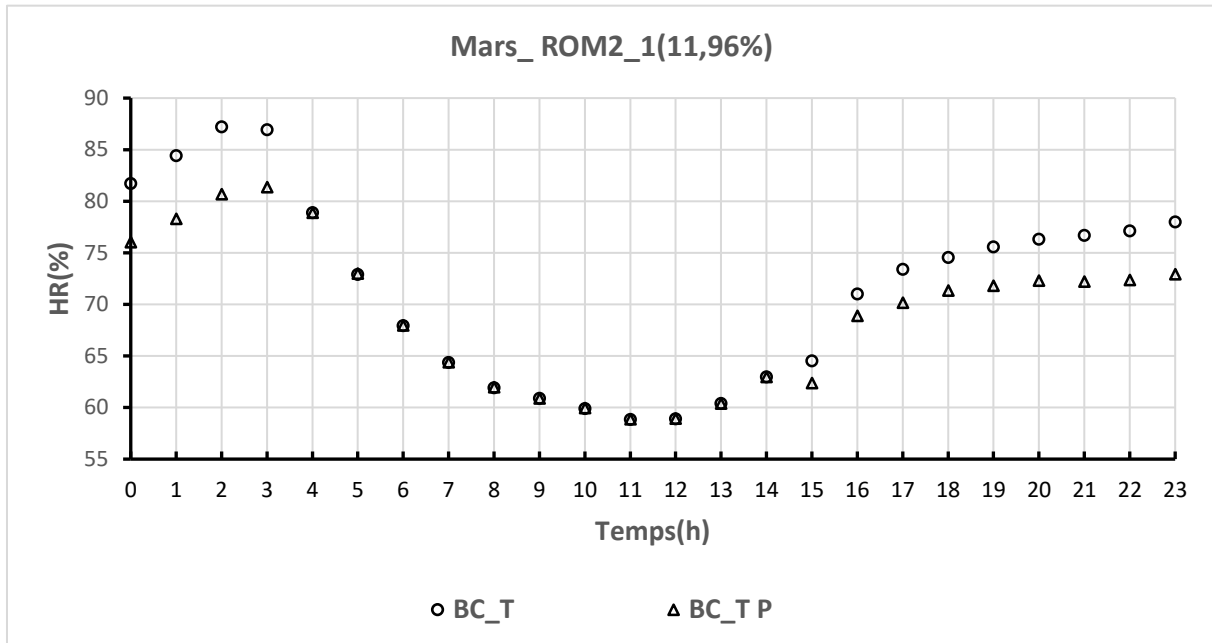


Figure 3. 9 : Humidité relative durant le mois de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC

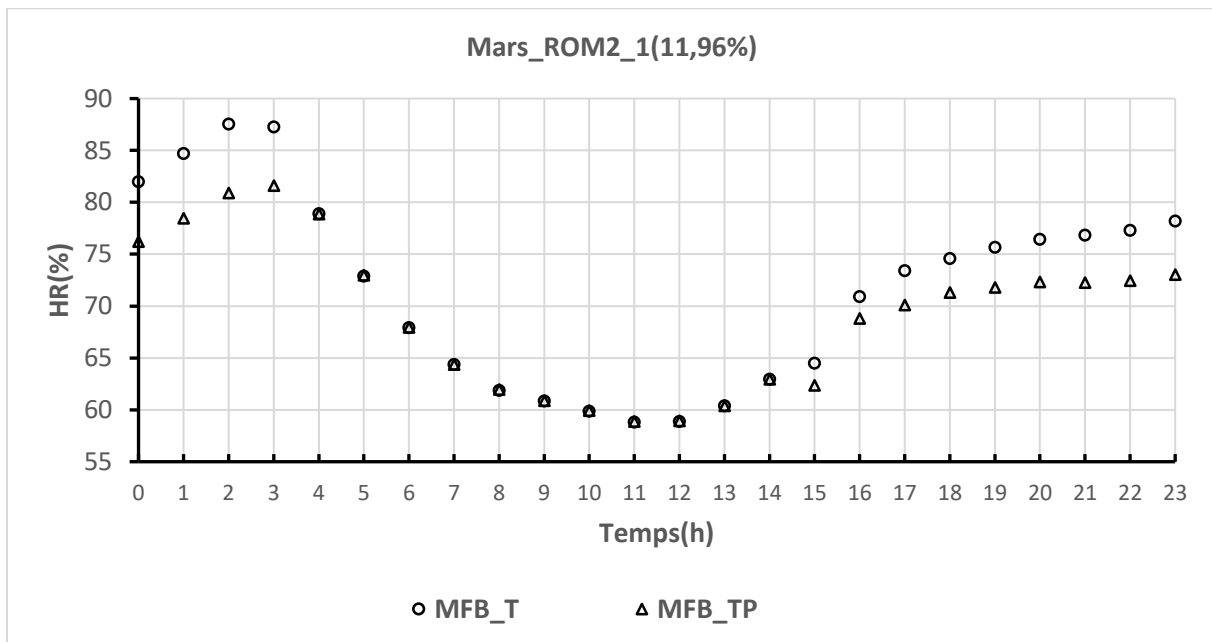


Figure 3. 10: Humidité relative durant le mois de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en MFB

- Pour le mois d'août avec la composition de la toiture

Les figures 3.11 et 3.12 montrent l'évolution de la température opérative durant le mois d'août, en fonction de la toiture. Cas des bâtiments en BC

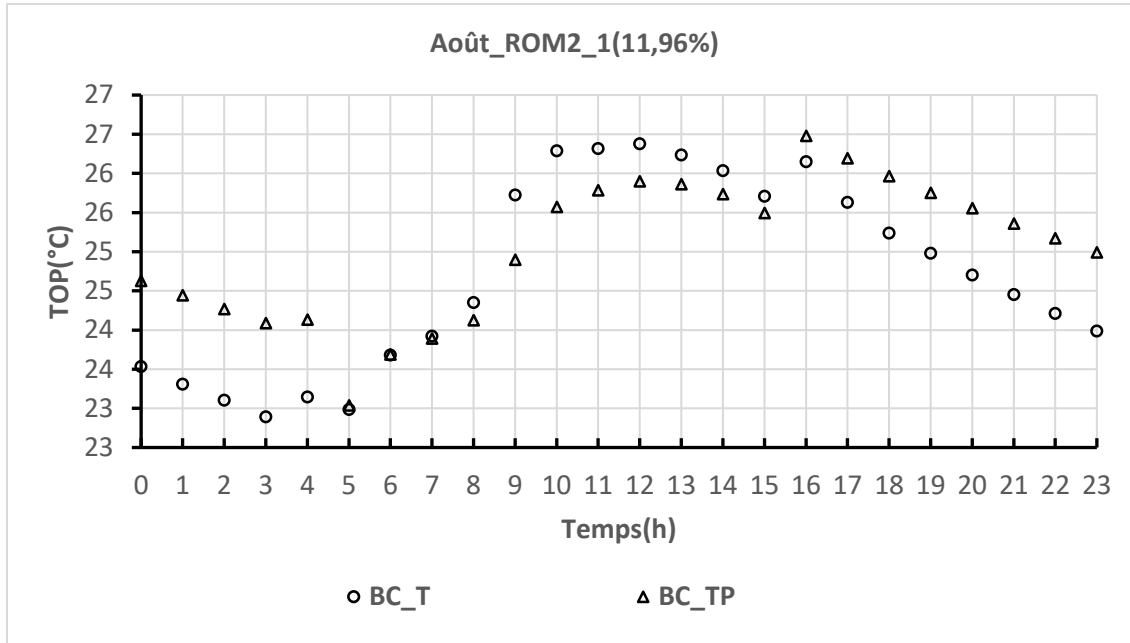


Figure 3. 11 : Température opérative pendant une journée pour une orientation Sud-Nord durant la première semaine d'août, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC

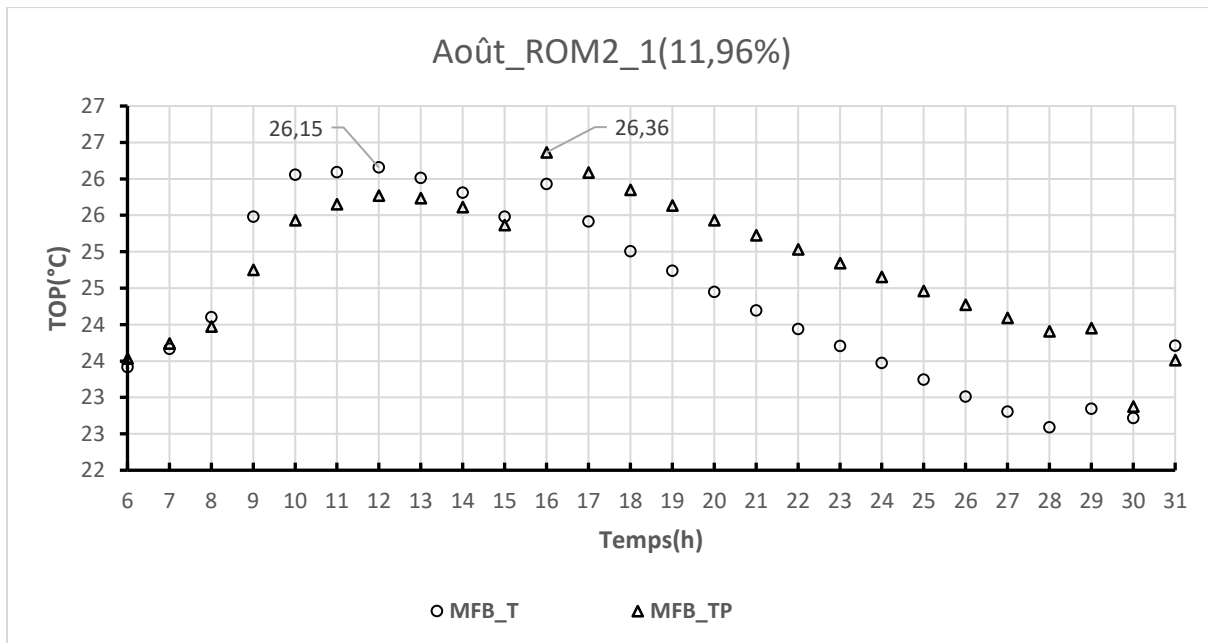


Figure 3. 12 : Température opérative durant le mois d'août, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en MFB

D'après les figures 3.11 et 3.12 de la période hivernale, nous remarquons qu'aux heures de fort ensoleillement allant de 9h à 12h, la température opérative dans notre salle de cours avec la toiture en tuile munie de plafond est en-dessous à la température opérative dans la salle de cours en tuile quel que soit la composition de la paroi du bâtiment. Nous remarquons dans cet intervalle de temps que le plafond a réduit la température au sein du bâtiment. Ensuite entre 12h et 15h, nous observons une diminution de la TOP, ce qui peut s'expliquer par l'absence d'un nombre important d'étudiants au sein du local et le débit d'air qui entre, refroidit l'intérieur du local. Nous observons également entre 15h à 16h une augmentation de la TOP, qui explique par un apport de chaleur à l'intérieur dans local à cause des aliments consommés entre 12h et 14h par les apprenants et les efforts physiques déployés dans la salle. De plus nous assistons après 16h une diminution progressive de la température jusqu'au coucher du soleil. Nous déduisons donc que le rayonnement solaire devient faible, le local bénéficie encore de la ventilation mais le contreplaqué utilisé comme plafond restitue la chaleur emmagasinée durant cet intervalle de temps car sa capacité thermique est élevée. Ce qui justifie l'écart de température observé.

De tout ce qui précède, quel que soit la période été ou hier, l'usage d'un matériau pour le plafond dans le bâtiment a toujours une influence sur son comportement thermique. Donc il participe à la performance énergétique du bâtiment dans la période où l'ensoleillement est élevé mais il faut choisir un matériau à faible capacité thermique volumique pour l'usage d'un plafond. C'est donc la preuve qui justifie l'exigence d'un plafond pour un bâtiment à toiture légère par le code de l'efficacité énergétique au Bénin : Normes relatives aux bâtiments publics.

Les figures 3.13 et 3.14 montrent l'évolution de l'humidité relative en une journée durant la première semaine du mois de mars, en fonction de la composition de la toiture. Cas des bâtiments en BC ou en MFB.

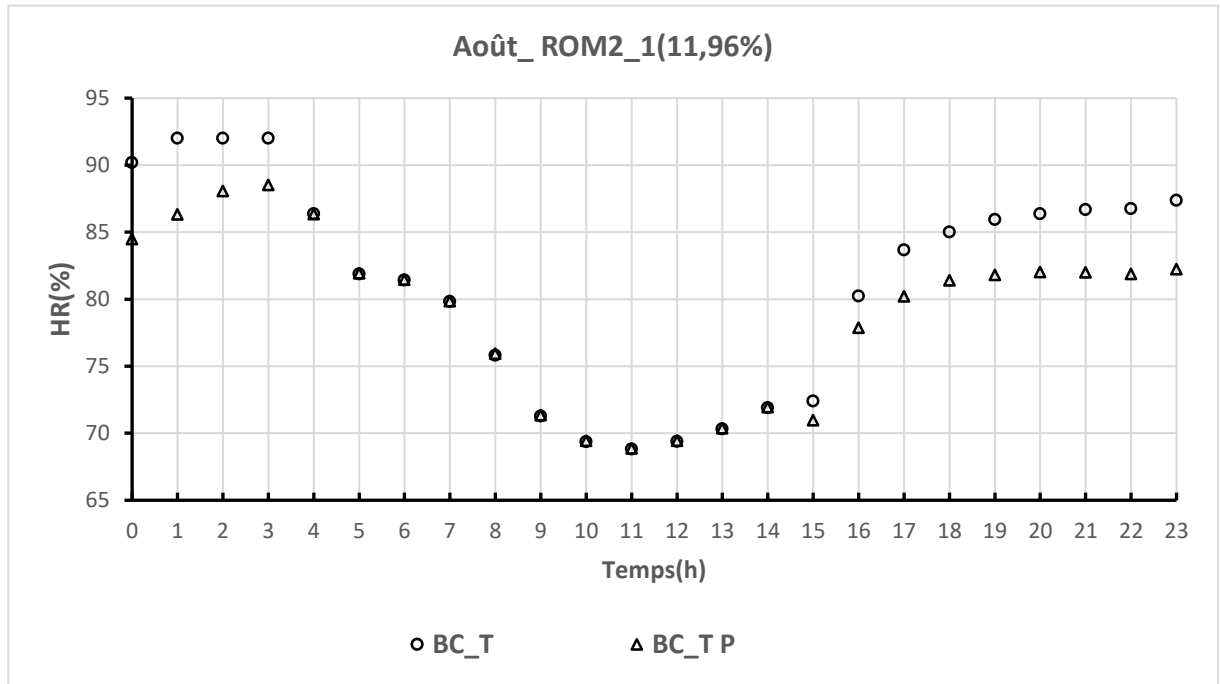


Figure 3. 13 : Humidité relative pendant une journée pour une orientation Sud-Nord durant la première semaine d’août, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC

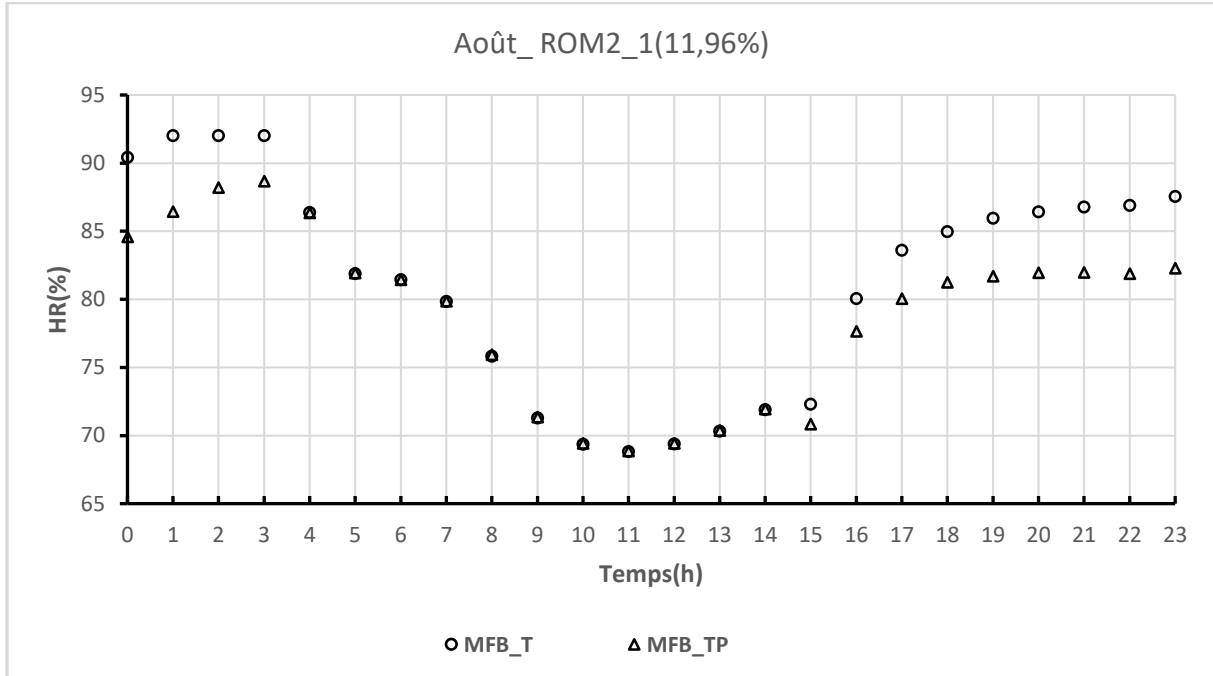


Figure 3. 14 : Humidité relative durant le mois d’août, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en MFB

3.3. Analyse des résultats sur l'influence des ratios ouvertures/murs de notre bâtiment.

L'orientation relative au vent est prise en compte pour la bonne ventilation naturelle, ce qui a permis d'avoir différents ratios ouvertures/murs. Nous avons compté au total sept (07) ratios en tenant compte de la recommandation de l'UEMOA sur de la valeur moyenne maximal de ROM pour un bâtiment en climat tropical. Il s'agit des ratios : ROM_{2,1}; ROM_{2,2}; ROM_{2,3}; ROM_{2,4} et ROM_{2,5}. Nous allons apprécier leurs influences sur la TOP pour les bâtiments en BC.

Les figures 3.15 et 3.16 montrent l'évolution de la température opérative en une journée durant le mois de mars dans la salle de cours de toiture en tuile selon les différents ratios ouvertures/murs en fonction du temps.

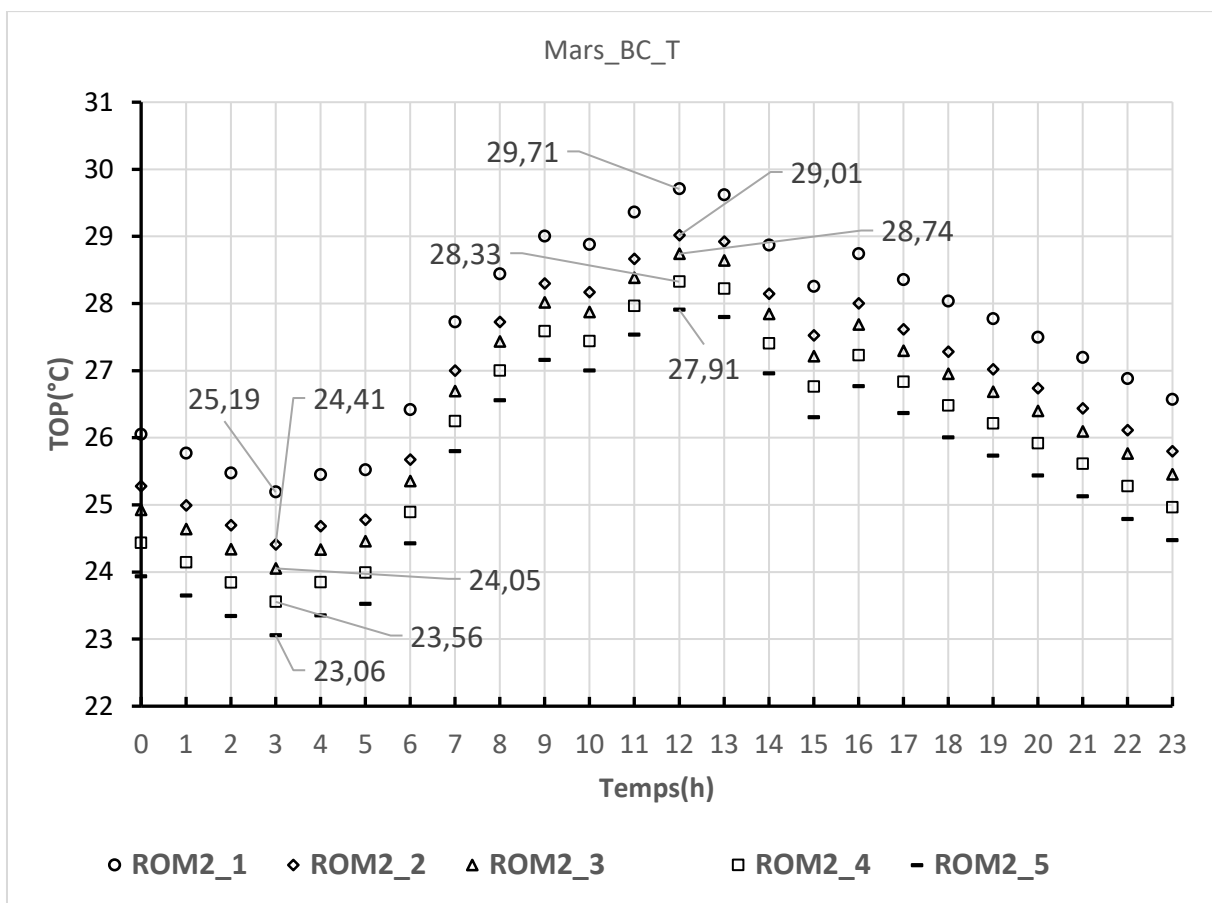


Figure 3. 15 : Température opérative durant le mois de mars, orientation Sud-Nord dans la salle de cours en tuile pour les différents ratios ouvertures/murs

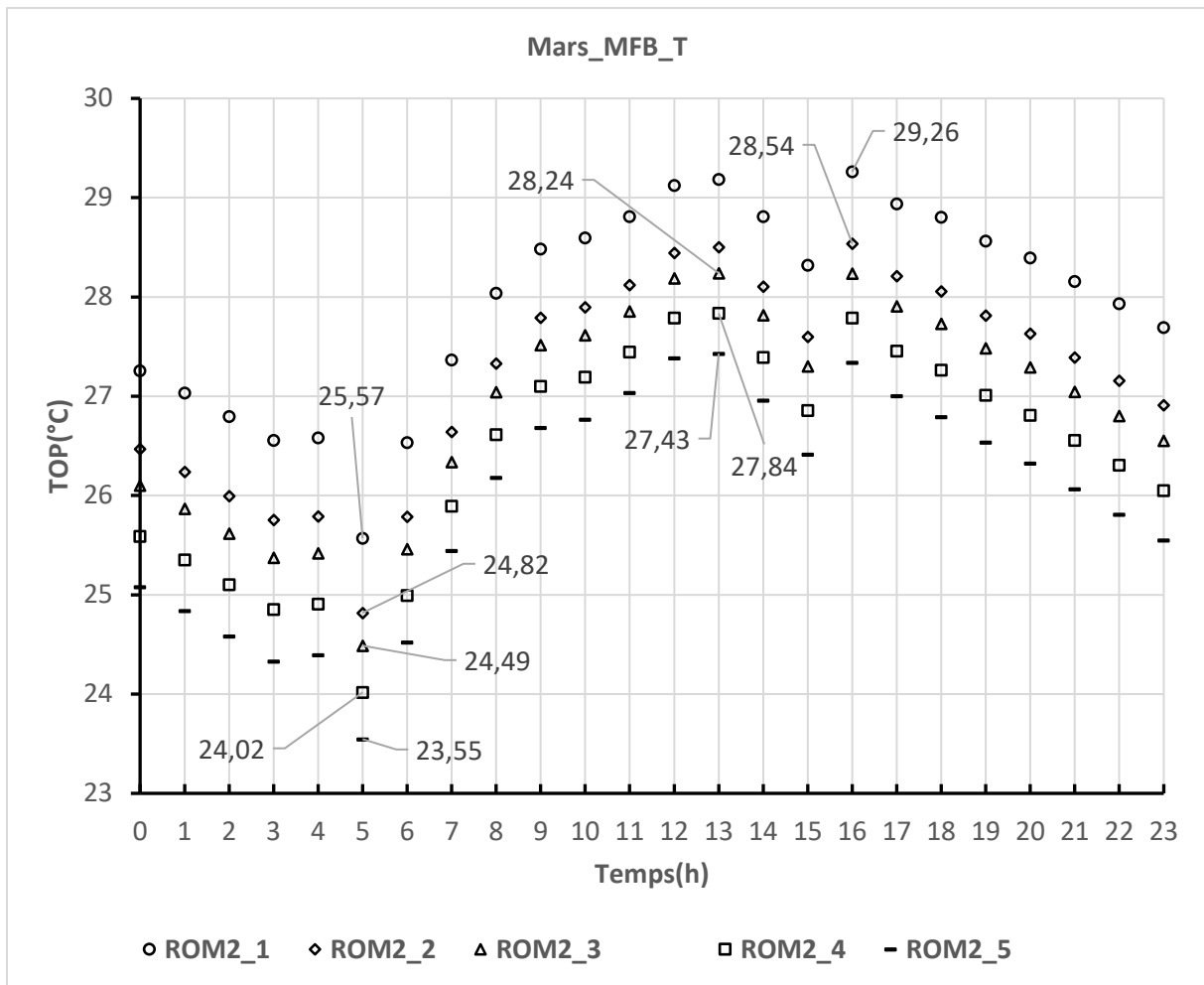


Figure 3. 16 : Température opérative durant le mois de mars, orientation Sud-Nord dans la salle de cours en tuile pour les différents ratios ouvertures/murs.

D’après les figures 3.15 et 3.16, nous remarquons qu’en été, l’augmentation des ratios ouvertures/murs entraînent une diminution de la température opérative dans le bâtiment. Donc plus le nombre d’ouverture est important pour un bâtiment et il est orienté dans la bonne direction, cela améliore le confort des occupants.

Tableau 3. 2 : Résultats du choix de rapport optimal fenêtre-mur

ROM optimaux	Bâtiment en BC avec $V_v = 1,5 \text{ m/s}$	Bâtiment en MFB avec $V_v = 1,5 \text{ m/s}$	Code EE, UEMOA, 2020	Victor Olgyay , 1950	Givoni et Milne, 1979
ROM_{2_1} (11,96 %)	25,19°C à 29,71°C	25,57°C à 29,26°C			
ROM_{2_2} (13,59 %)	24,41°C à 29,01°C	24,82°C à 28,54°C			
ROM_{2_3} (15,22 %)	24,05°C à 28,74°C	24,49°C à 28,24°C	24°C à 27°C	20°C à 30°C	20°C à 28°C
ROM_{2_4} (16,85%)	23,56°C à 28,33°C	24,02°C à 27,84°C			
ROM_{2_5} (18,48 %)	23,06°C à 27,91°C	23,55°C à 27,43°C			

Pour le choix du ratio optimal, nous allons nous référer à des plages des températures proposées pour la zone de confort. En se référant au tableau ci-dessus, la plage de température fixé par l'UEMOA ne nous permet pas d'opérer le choix optimal de ROM. Mais avec celle de Givoni et Milne, 1979, nous pouvons choisir les bâtiments des ROM2_4 et ROM2_5 respectivement 16,85% et 18,48%.

Conclusion

Dans cette étude, le logiciel TRNSYS a été utilisé comme un simulateur pour apprécier le comportement thermique d'un bâtiment en climat tropicale humide, en fonction de son orientation géographique, des matériaux utilisés pour la construction de ses murs, de la toiture et du ROM (rapport surface d'ouverture sur la surface totale du bâtiment). Nous retenons que l'orientation optimale est Sud-Nord pour un bâtiment en climat tropical. L'isolation thermique de sa toiture et l'utilisation des matériaux composites comme paroi améliorent le confort à l'intérieur du bâtiment. Les bâtiments favorisant plus une bonne ventilation naturelle ont pour ratios 16,85% et 18,48%. Nous optons pour le bâtiment de ROM2_5 (18,48%) pour bien bénéficier de la ventilation naturelle car c'est un bâtiment à usage de salle de classe, dont les charges hygrothermiques peuvent subir des modifications à la longue (effectifs de la salle, usages des lampes électriques...) compte tenu de l'ambiance souhaitée par les occupants.

CONCLUSION GENERALE

Construire, ce n'est pas simplement poser une maison sur un terrain ; c'est intégrer la maison et tirer profit de son comportement thermodynamique dans son environnement immédiat. Le présent travail porte sur l'effet du rapport optimal fenêtre-mur ROM(WWR) sur le confort thermique du bâtiment au sud du Bénin, pour une orientation optimale. L'étude du confort thermique a été implémentée sur un bâtiment scolaire en prenant en considération certains paramètres d'influence tels que la nature des matériaux de construction des murs et la toiture, le type de ventilation (naturelle ou forcée), l'existence des ouvertures et l'orientation du bâtiment, grâce à l'outil de simulation thermique, le TRNSYS 2017. La démarche adoptée a permis de faire un rappel des notions sur la conception du bâtiment en climat tropical, de donner les paramètres intervenant dans le confort thermique, les méthodes d'étude du confort et de présenter un synthèse bibliographe des travaux réalisés sur le confort thermique dans le bâtiment. L'influence des éléments de l'enveloppe du bâtiment comme la toiture en tuile de terre cuite avec ou sans plafond, la paroi en brique creuse (BC) et la paroi en mortier renforcé de fibre de bananier, les effets de l'orientation géographique et des ratios de surface d'ouvertures / murs (11,96 % ,13,59% , 15,22%, 16, 85% et 18, 48%), a été analysée pour évaluer le confort thermique du bâtiment. Il ressort que la conception d'un bâtiment en climat tropical humide avec la toiture en tuile de terre cuite plus le plafond et avec des matériaux de bonne résistance thermique améliore la température à l'intérieur du bâtiment dans les périodes estivale et hivernale. L'orientation commence déjà par le terrain, l'orientation par rapport au sud représente un critère choix pour nous car elle favorise la bonne ventilation naturelle. En ce qui concerne les différents ratios du bâtiment, pour opérer le choix optimal, nous nous sommes appuyés sur la plage de température (20°C à 28°C) du confort thermique dans le bâtiment donné par des travaux de Givoni et Milne, 1979. Seuls les bâtiments de ROM 16, 85% et de 18, 48% permettent d'avoir des TOPs dans cette plage des températures fixées par Givoni. Nous optons donc pour le bâtiment de ROM2_5 (18,48%) pour mieux profiter de la ventilation naturelle, car notre étude a porté sur un bâtiment de classe et les charges hygrothermiques peuvent subir des modifications en fonction des besoins.

PERSPECTIVES

Le présent travail a montré le rôle important que jouent les logiciels de simulation thermique dans l'optimisation des projets de construction. Avec une bonne maîtrise de l'outil informatique nous pouvons réaliser des économies importantes d'énergie sur des projets de construction.

Pour la suite de ce travail, ce serait bien de faire :

- L'étude du confort visuel, acoustique dans le même type de bâtiment étudié, selon le moment de la journée et nature des matériaux de construction ;
- L'étude des interactions entre le confort hygrothermique, visuel et acoustique dans le même type le bâtiment étudié.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AYAT SOUHEYLA. (2019). L'impact de l'orientation sur le confort thermique dans l'habitat durable, Mémoire de master 2 en architecture, Université L'ARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, Faculté des sciences de la terre et d'architecture, 122p

BENDARA, S., (2019). Stratégies de contrôle passif pour l'amélioration du confort thermo-aérodynamique des bâtiments multi-zones. Algérie: Laboratoire Automatique Tlemcen (LAT). 176p

BECKER, R., GOLDBERGER, I., ET PACIUK, M. (2007), Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation, Building and Environment, N°42, 16p

BOUCHAHM GUERMIA ET BOUREBIA FATIHA. (2010). L'impact de l'orientation des parois transparentes sur le confort thermique dans une salle de classe à Constantine, Laboratoire d'Architecture, Bioclimatique et Environnement, Département d'Architecture et d'Urbanisme Faculté des Sciences de la Terre, Université Mentouri Constantine Algérie, 10p

CELIS MERCIER, S.J. (2009), La température agréable- Manipulation des fenêtres et dynamique du confort environnemental dans une salle climatisée naturellement. Mémoire de Master, Université de Laval, 154p

D. ZEKRAOUI * ET N. ZEMOURRI (2018), L'impact de WWR, l'orientation et le type de vitrage sur la consommation énergétique dans les bureaux sous un climat chaud et sec. Revue des Energies Renouvelables SIENR'18 Ghardaïa, Université Mohamed khider, Biskra, Alegria, 11p

DAOUADJI, Y., (2017). Evaluation d'un système de rafraîchissement passif dans les zones chaudes et arides par l'application d'un couplage puits Canadien et cheminée solaire. Biskra: Université Mohamed Khider.

ECONOLER (2011). Elaboration d'un code d'efficacité énergétique au Bénin : Normes relatives aux bâtiments publics, Direction Générale de l'énergie, 27p

GBAGUIDI VICTOR S. ET ALL (2011). Cartographie des directions dominantes des vents au Bénin : outil de conception et de dimensionnement des ouvrages. Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi / Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 16p

GUARRY MONTROSE. (2021). Maîtrise de l'Energie dans les bâtiments en Climat Tropical Humide : étude des matériaux biosourcés d'origine végétale pour l'efficacité énergétique et le

confort thermique. Thèse de Doctorat en énergétique, UNIVERSITE DES ANTILLES, Facultés des Sciences Exactes et Naturelles, 223p

HOLLMULLER, P., LACHAL, B., ROMERIO, F. & WEBER, W., 2003. Habitat, Confort et Energie. p. 76.

INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE. (2015A). Régulation du confort visuel dans une pièce : analyse pour la mise en œuvre. INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE (2015). Conception Architecturale Durable En Milieu Tropical, Québec, Canada, 426p.

ISO 7730. (1994). Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort (éd. deuxième édition).

JACQUES-REMY MINANE, (2010). Confort thermique et Méthode de climatisation passive ou à faible cout : Application au puits Canadien, Master en Ingénierie de l'eau et de l'environnement, Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'environnement, 71p

JANNOT, Y., ET DJIAKO, T. (1994), Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale, International Journal of Refrigeration, 17, 7p.

JOEL ZINSALO, (2013). Génie Climatique : Projet de climatisation, Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi

KIMNENH TAING (2020), Analyse et modélisation des données d'un bâtiment pour l'évaluation de son comportement thermique, Master Ingénieur Civil Architecte, Université Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 143p

KIM, J. ET AL., (2017). Establishment of an optimal occupant behavior considering the energy consumption and indoor environmental quality by region. Applied Energy, Volume 204, pp. 1431-1443.

LAKHDARI KHAOULA (2021). Impact du ratio d'ouverture des murs de façade sur la performance lumineuse, thermique et énergétique d'un bâtiment : Cas des régions chaudes et arides. Thèse de Doctorat en Architecture, Université Mohamed Khider – Biskra, 208p

LENOIR, A. (2013). On Comfort in Tropical Climates, The Design and Operation of Net Zero Energy Buildings, Thèse doctorale spécialité Mécanique et Environnement, Université de la Réunion, 236p

LOU, C., 2012. Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon: Ecole Doctorale Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique.

MAGALIE TECHER (2017). Le confort global dans les écoles élémentaires en milieu tropical : un réaménagement des échelles et étude de l'impact de la forme architecturale. Mémoire de Master 2, Domaine Thématique : architecture et milieu, Ecole nationale Supérieure d'architecture Montpellier, 150p

MLLE AKAB HASSIBA ET MLLE BELLATA RIMA (2016), L'effet d'orientation sur le confort thermique dans les habitations individuelle cas d'étude quartiers El-Salem Ain Fakroun. Diplôme 2^{ème} année mastère spécialité : Architecture, Université L'ARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, Faculté des sciences de la terre et d'architecture, 168p

NATHANIELS DIRK RUDY. (2018), Simulation thermique dynamique de l'influence des apports thermiques par la toiture sur le confort dans un bâtiment résidentiel au Sud du Bénin, Diplôme de Master en énergie renouvelables et systèmes énergétiques, Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, 77p.

OLISSAN OLAGOKE AURELIEN. (2017), Influence de la fenestration en vitre sur le confort thermique des bâtiments en climat tropical et humide : cas de la bande côtière du Benin, Thèse de Doctorat en sciences, Université de Liège, 284p

ORGANISATION INTERNATIONALE DE LA FRANCOPHONIE (2015). Guide du bâtiment durable en régions tropicales, Tome 1 : Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales, Québec, Canada, 212p

OSSENI SIBIATH (2017), Formulation et caractérisation thermomécanique de mortiers renforcés par des fibres du tronc de bananier, Thèse de Doctorat en énergétique et environnement, Ecole Doctorale Sciences De l'Ingénieur (ED-SDI), Université d'Abomey-Calavi, 113p.

PIERRE CRESUS GBADO DOUALA (2020), Optimisation de systèmes énergétiques intégrés pour un centre de santé en milieu rural- Cas du Bénin, Thèse de Doctorat en énergétique et environnement, Ecole Doctorale Sciences De l'Ingénieur (ED-SDI), Université d'Abomey-Calavi, 204p.

RIANTSOA DONATIEN RENE (2020). Le confort thermique d'un bâtiment en briques artisanales d'argile cuite naturellement ventilé : détermination de l'orientation optimale ».

Thèse de Doctorat en Technologie des poudres divisées et Ecobâtiments, UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO, 285p

SADDOK AMEL (2016), Etude du confort thermique des salles de cours des établissements scolaires à différentes typologies, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 226p.

SYLVANUS GBENOU. (2017). Etude hygrothermique du comportement hygrothermique et d'un prototype de bâtiment réalisé en matériaux biosourcés. Diplôme d'ingénieur en énergétique, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, 84p.

S. BELLARA LOUAFI et S. ABDOU. (2010), Impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective, département d'architecture et d'urbanisme ; faculté de l'aménagement du territoire, Université Mentouri Constantine (Algérie), 8p

TRNSYS. (2010). University of Wisconsin Madison, "TRNSYS 17"

UEMOA. (2020). Directive n° 05/20207cm/UEMOA fixant Des mesures d'énergétique dans la construction de bâtiments dans les états membres de l'UEMOA.

VALDISERRI, P., BISERNI, C., TOSI, G. & GARAI, M., (2015). Retrofit strategies applied to a tertiary building assisted by Trnsys energy simulation tool. Energy Procedia, Volume 78, pp. 765-770.

VIRGINIE GROSDÉMOUGE. (2020). Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Thèse de Doctorat en Physique du Bâtiment et Génie Urbain, Université de La Réunion, Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'Environnement et le Bâtiment, 324p

ANNEXES

Annexe 1 : TRNBuild

En raison de la complexité d'un bâtiment multizone, les paramètres du TYPE 56 ne sont pas définis directement dans le dossier d'entrée de TRNSYS. Au lieu de cela, deux dossiers sont assignés contenant l'information exigée, la description de bâtiment (*BLD) et la fonction de transfert d'ASHRAE pour des murs (*TRN). Plus d'information sur le type56 peuvent être obtenues à partir du TRNSYS principal Manuel de référence. TRNBUILD (autrefois connu sous le nom de PREBID) a été développé pour fournir un outil facile à utiliser pour *BLD et les dossiers de *TRN. Commenant par quelques données de base de projet, l'utilisateur décrit chaque zone thermique alternativement.

En conclusion, les sorties désirées sont choisies. Toutes les données saisies sont archivées dans un prétendu dossier de bâtiment (*BUI), un dossier lisible des textes. Le dossier BUI est très maniable pour vérifier les données saisies dans TRNBUILD.

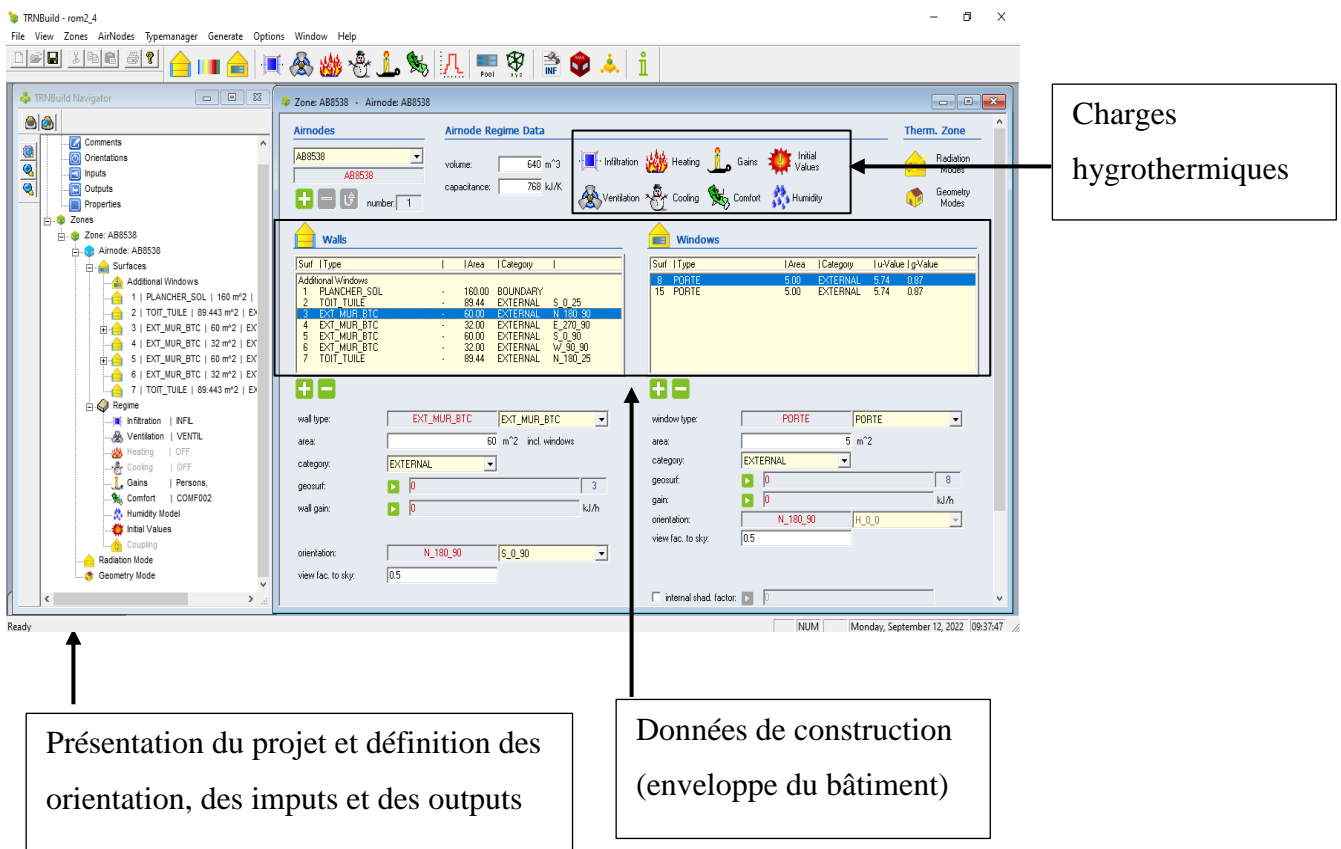


Figure 1 : Interface de TRNBuild

Annexe 2 : horaires d'occupation

Schedule Type Manager

"Schedule Type" Manager

schedule type:

daily weekly

Daily

From	Until	Value
00:00	06:00	0.00
06:00	08:00	0.00
08:00	12:00	1.00
12:00	14:00	0.00
14:00	18:00	1.00
18:00	24:00	0.00

from until value

h:

min:

Figure 2 : Horaires d'occupation des salles de cours [8h ; 12h] et [14h ; 18h]

Schedule Type Manager

"Schedule Type" Manager

schedule type:

daily weekly

Daily

From	Until	Value
00:00	06:00	0.00
06:00	08:00	0.00
08:00	18:00	1.00
18:00	24:00	0.00

from until value

h:

min:

Figure 3 : Horaires d'occupation des salles de cours [8h ; 18h]

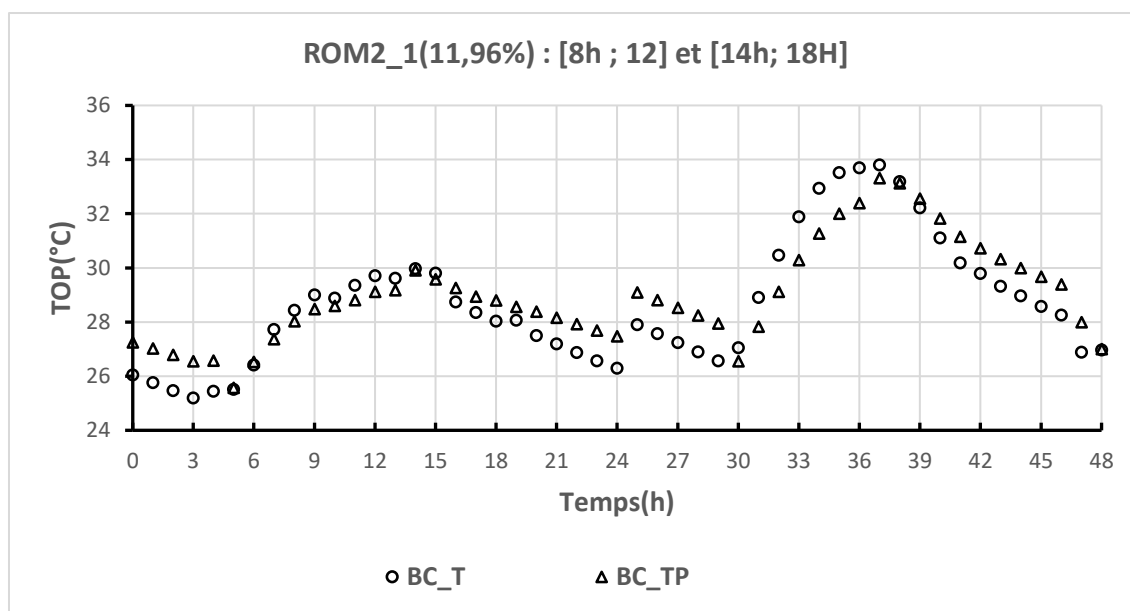


Figure 4: Température opérative pendant deux jours (48h) pour une orientation Sud-Nord durant la première semaine de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC

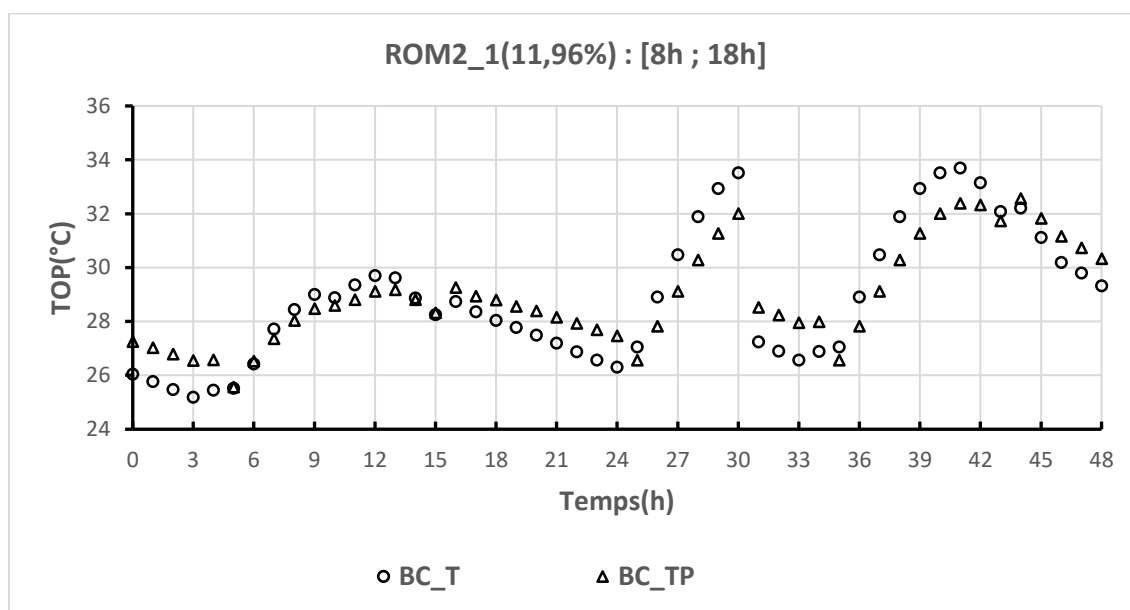
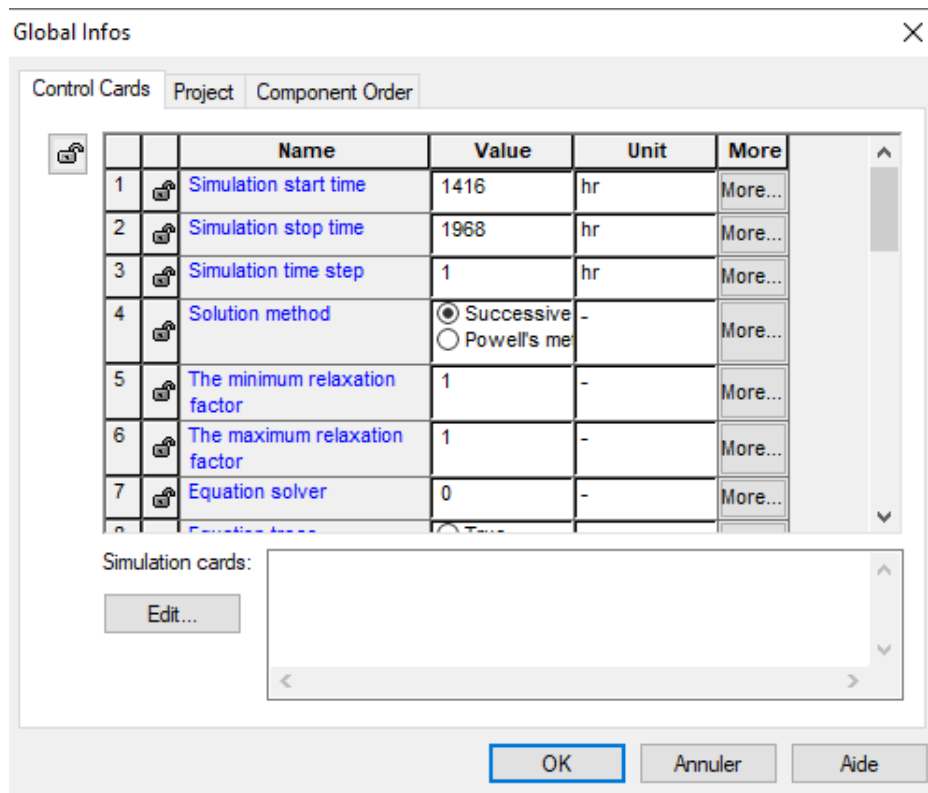


Figure 5 : Température opérative pendant deux jours (48h) pour une orientation Sud-Nord durant la première semaine de mars, en fonction de la toiture : Cas du bâtiment en BC

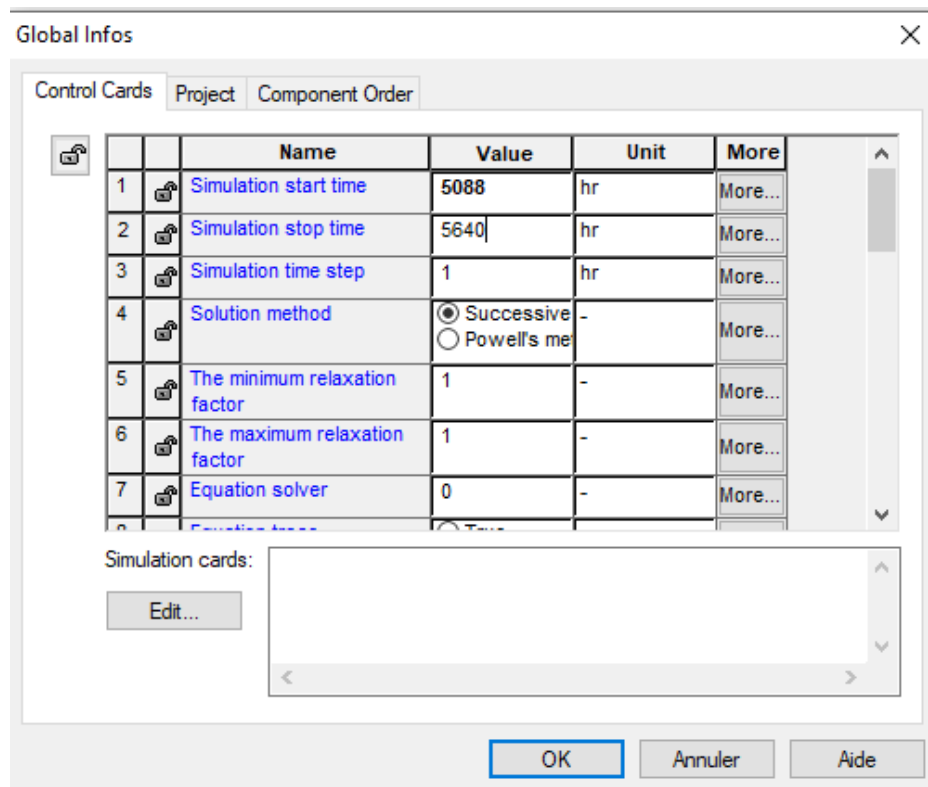
D'après les figures 4 et 5, nous remarquons que pendant deux jours successifs, on observe pratiquement la même évolution de la température mais seulement une augmentation des températures au niveau de la deuxième journée qui peut s'expliquer par les perturbations météorologiques. Lorsque le bâtiment est occupé entre de façon continue de 8h à 18h durant les deux jours, la diminution de la température est progressive à partir de l'heure (12h) où le

rayonnement est intense. Après une pause entre 12h et 14h puis la reprise des activités au sein du bâtiment à influencer l'évolution de la température.

Annexe 2 : configuration de la période de simulation pour le mois de mars



Annexe 3 : configuration de la période de simulation pour le mois de mars



RESUME

L'objectif de ce travail est de modéliser sous TRNSYS un bâtiment universitaire à usage de salle de classe, dont la toiture est en tuile de terre cuite avec ou sans plafond et dont les parois sont en matériaux brique creuse (BC) ou en mortier renforcé de fibres de bananier (MFB). Cette étude numérique est réalisée sous le logiciel TRNSYS 2017, afin d'apprécier le confort thermique du bâtiment, tout en respectant les contraintes d'orientation et de ratios surfaces menuiseries/parois opaques.

Le bâtiment d'étude est situé dans la zone Master sur le campus de l'Université d'Abomey Calavi. Il est un local parallélépipédique, dont le plancher de dimensions 20 m sur 8 m est constitué par un remblayage de terre pressée. Les murs de hauteur sous plafond de 3 m sont réalisés en différents matériaux (BC et MFB) et la toiture à deux versants. Les façades principales du bâtiment sont orientées Sud-Nord. Son axe est orienté de l'Est à l'Ouest et les façades Est et Ouest n'ont pas de fenêtres. Les façades Nord et Sud sont principalement occupées par des fenêtres à deux battants et des portes à deux battants de dimensions respectives 2 m x 1,5 m et 2 m x 2,5 m avec encadrement en bois léger, en vitrage simple de 4 mm d'épaisseur. La salle de classe comporte 55 personnes (54 élèves + 1 enseignant), disposant de 28 tables et 55 chaises puis occupée de 8 h à 12 h et de 14 h à 18 h. A cause de l'indisponibilité des données météorologiques de la ville d'Abomey-Calavi dans le module Météonorm de notre simulateur, nous avons utilisé les données de la ville de Lagos Ikeja qui sont proche des données de notre site.

Les résultats de simulation montrent que l'orientation optimale est Sud (façades principales comportant assez d'ouvertures) car elle favorise la bonne ventilation naturelle. Ensuite l'isolation thermique de la toiture (utilisation des plafonds) et l'utilisation des matériaux de bonne résistance thermique (MFB) améliorent la température à l'intérieur du bâtiment. Le choix optimal des ratios s'appuie sur la plage de température (20°C à 28°C) proposée par les travaux de Givoni et Milne, 1979. Notre étude portant sur une salle de classe et les charges hygrothermiques (infiltration, ventilation, gains, mode d'habillement, métabolisme et vitesse de l'air) peuvent subir des modifications en fonction des besoins donc nous choisissons le bâtiment de ROM2_5 (18,48%) pour en profiter plus de la ventilation naturelle.

Mots clés : Rapport fenêtre-mur, bâtiment, orientation optimale, confort thermique

ABSTRACT

The objective of this work is to model under TRNSYS a university building used as a classroom, whose roof is made of clay tiles with or without ceiling and whose walls are made of hollow brick (BC) or banana fiber reinforced mortar (MFB) materials. This numerical study is carried out under the TRNSYS 2017 software, in order to appreciate the thermal comfort of the building, while respecting the constraints of orientation and the window/shade wall surface ratios.

The study building is located in the Master area on the campus of the University of Abomey Calavi. It is a parallelepipedic room, whose floor of dimensions 20 m by 8 m is constituted by a filling of pressed earth. The walls with a ceiling height of 3 m are made of different materials (BC and MFB) and the roof has two slopes. The main facades of the building are oriented South-North. Its axis is oriented from East to West and the East and West facades have no windows. The North and South facades are mainly occupied by double windows and double doors of 2 m x 1.5 m and 2 m x 2.5 m respectively with light wood frames, single glazed with 4 mm thick glass. The classroom has 55 people (54 students + 1 teacher), with 28 tables and 55 chairs and is occupied from 8 am to 12 pm and from 2 pm to 6 pm. Because of the unavailability of meteorological data of the city of Abomey-Calavi in the Meteororm module of our simulator, we used the data of the city of Lagos Ikeja which are close to the data of our site.

The simulation results show that the optimal orientation is South (main facades with enough openings) because it promotes good natural ventilation. Then the thermal insulation of the roof (use of ceilings) and the use of materials of good thermal resistance (MFB) improve the temperature inside the building. The optimal choice of ratios is based on the temperature range (20°C to 28°C) proposed by the work of Givoni and Milne, 1979. Our study is based on a classroom and the hygrothermal loads (infiltration, ventilation, gains, mode of clothing, metabolism and air velocity) can undergo changes according to the needs so we choose the building of ROM2_5 (18.48%) to take more advantage of natural ventilation.

Key words : Window-wall ratio, building, optimal orientation, thermal comfort