



# VALIDATION D'UN MODELE DE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE A PARTIR DE MESURES EXPERIMENTALES SUR DES BATIMENTS PILOTES

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE  
MASTER

**SPECIALITE : ENERGIES RENOUVELABLES**

-----

Présenté et soutenu publiquement le 15/01/2018 par

**Claude Boris AMOUGOU (201430632)**

**Mémoire dirigé par : M. Adamah MESSAN,**  
Maître de conférences CAMES  
Responsable du Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD, 2iE)

**Encadrant 2iE : M. Daniel YAMEGUEU NGUEWO,**  
Maître Assistant CAMES  
Enseignant-chercheur en Génie Energétique

Jury d'évaluation du stage :

Président : M. Yezouma COULIBALY, Maître de Conférences

Membres et correcteurs : M. Adamah MESSAN, Maître de Conférences  
Dr. K. Edem N'TSOUPOUE, Maître Assistant  
M. Daniel YAMEGUEU NGUEWO, Maître Assistant

**Promotion [2017/2018]**



## Dédicace

*A ma très chère mère Comfort TABI EBAI*

*Tu représentes tout pour moi, tu n'as pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de faire pour moi depuis ma naissance.*

*Je te dédie ce modeste travail en témoignage de mon profond amour.*

*Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

## Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier le Seigneur Dieu Tout-Puissant pour la force, le courage, l'esprit de patience, de sagesse, de piété et d'intelligence qu'il m'a donné tout au long de mon stage. Par ailleurs, j'aimerais exprimer ma profonde reconnaissance aux personnes suivantes :

- Pr. Adamah MESSAN / Chef du Laboratoire Eco-Matériaux Construction (LEMC) de 2iE pour son encadrement et ses encouragements ;
- Dr. Daniel YAMEGUEU / Chef du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de 2iE pour son encadrement et son soutien ;
- Morgane Giorgi et Skander Zahar du Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT) de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG VD, Suisse) pour avoir bien voulu m'aider en apportant leur expertise à ce travail ;
- M. Arnaud OUEDRAOGO, Doctorant au Laboratoire Eco-Matériaux Construction (LEMC) de 2iE pour sa disponibilité ;
- ma famille, mes amis et collègues pour leur aide et leur soutien.



## Avant-propos

L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) est un établissement d'enseignement supérieur et de recherche basé à Ouagadougou au Burkina Faso. Sa création en 2006, résulte de la fusion et la restructuration des écoles inter-États EIER (École d'Ingénieurs de l'Équipement Rural) et ETSHER (École des Techniciens de l'Hydraulique et de l'Équipement Rural), créées respectivement en 1968 et 1970 par 14 États d'Afrique de l'Ouest et Centrale pour former des ingénieurs spécialisés dans les domaines de l'équipement et de l'hydraulique. Véritable partenariat Public/Privé, 2iE rassemble, dans une communauté de valeurs, les États fondateurs, les entreprises privées et les partenaires institutionnels, académiques et scientifiques. 2iE dispense une formation de pointe dans les domaines de l'Eau et l'Assainissement, l'Energie et l'Electricité, l'Environnement et le Développement Durable, le Génie Civil et les Mines, le Management et l'Entrepreneuriat conformément au Processus de Bologne : Licence, Master, Doctorat ; en partenariat avec les meilleures universités du monde, offrant ainsi une grande mobilité aux étudiants.

Les diplômes de 2iE sont accrédités et reconnus en Afrique et à l'international à travers le Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur (CAMES) et la Conférence Française des Grandes Ecoles (CGE). Les diplômes d'Ingénieur sont accrédités par la Commission Française des Titres d'Ingénieur (Cti), labellisés EUR-ACE en Europe et AACRAO aux Etats Unis.

Dans un souci de former des Ingénieurs de Conception et des Techniciens Supérieurs hautement qualifiés et aptes à relever les challenges, les étudiants bénéficient d'une formation théorique et d'une formation pratique qui consiste en des travaux pratiques et visites sur site. Les formations pour le niveau master sont sanctionnées par des stages de production en entreprise ou dans un laboratoire de recherche en vue de la rédaction d'un mémoire.

C'est dans cette optique que j'ai été retenu au sein du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) et du Laboratoire Eco-Matériaux Construction (LEMC) pour mon stage de fin d'études d'ingénieur dont le thème s'intitule : « *Validation d'un modèle de simulation thermique dynamique à partir de mesures expérimentales sur des bâtiments pilotes* ».

Le présent rapport en est la parfaite illustration et rend compte des travaux effectués.

## Résumé

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche appliqué dans le domaine du bâtiment et des éco-matériaux de construction financé par la Direction du Développement et de la Coopération Suisse (DDC).

Dans le but de promouvoir l'efficacité énergétique à travers la construction des bâtiments qui sont plus respectueux de l'environnement avec des matériaux locaux, nous avons créé un modèle thermique dynamique d'un bâtiment pilote afin qu'il puisse servir d'outil d'aide à la décision plus tard en nous aidant à mesurer l'efficacité des différentes solutions qui seront proposées pour le développement des éco habitats au Burkina Faso.

Puisque la qualité d'un modèle de simulation thermique dynamique repose entièrement sur la précision de ses prédictions, la deuxième phase de cette étude a donc porté sur l'amélioration de la précision des prédictions du modèle créé. Cette étape a consisté à récolter des mesures de températures et d'humidité relative du bâtiment pilote objet de notre étude afin que ces mesures soient utilisées pour calibrer notre modèle de référence.

Les résultats obtenus durant cette étude ont permis de relever la forte influence des propriétés thermophysiques des matériaux locaux utilisés ainsi que des conditions météorologiques sur l'efficacité énergétique des bâtiments.

**Mots clés :** (i) Modèle, (ii) Simulation thermique dynamique, (iii) Eco habitats, (iv) Matériaux locaux.



## Abstract

The present study is part of an applied research project in the field of construction and eco-building materials funded by the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC).

In order to promote energy efficiency through the construction of buildings that are more environmentally friendly with local materials, we have created a dynamic thermal model of a pilot so that it serves as a decision-making aid later on by helping us to measure the effectiveness of the different solutions proposed for the development of eco habitats in Burkina Faso.

Since the quality of a dynamic thermal simulation model relies entirely on the precision of its predictions, the second phase of this study focused on improving the precision of the predictions of the model. This stage consisted in collecting measurements of temperature and relative humidity of the pilot building studied so that these measurements could be used to calibrate our reference model.

The results obtained during this study show the influence of the thermo-physical properties of local materials as well as the meteorological conditions on the energy efficiency of a habitat.

**Keywords :** (i) Model, (ii) Dynamic thermal simulation, (iii) Eco habitats, (iv) Local materials.

## Table des matières

Dédicace .....	i
Remerciements .....	ii
Avant-propos .....	iii
Résumé .....	iv
Abstract.....	v
Table des matières .....	vi
Liste des sigles et des abréviations .....	viii
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux .....	xi
Introduction .....	1
I. Présentation des structures d'accueil : LEMC et LESEE.....	2
I.1 Présentation du LEMC .....	2
I.2 Présentation du LESEE .....	3
II. Présentation du projet .....	5
II.1 Contexte de l'étude .....	5
II.2 Objectifs visés par l'étude .....	5
II.3 Travail à faire .....	6
III. Généralités sur la simulation thermique dynamique.....	7
III.1 Qu'est-ce que la simulation numérique ? .....	7
III.2 Qu'est-ce que la simulation thermique dynamique ? .....	8
III.3 Les grandes étapes d'un calcul de simulation thermique dynamique.....	10
III.3.1 Saisie du bâtiment .....	10
III.3.2 Définition des zones thermiques.....	11
III.3.3 Simulation du cas de base et des variantes .....	12



## VALIDATION D'UN MODELE DE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE A PARTIR DE MESURES EXPERIMENTALES SUR DES BATIMENTS PILOTES

III.3.4	Analyse des résultats .....	12
III.4	Les applications de la simulation thermique dynamique.....	13
III.5	Avantages et inconvénients de la simulation thermique dynamique .....	14
III.5.1	Avantages de la simulation thermique dynamique .....	15
III.5.2	Inconvénients de la simulation thermique dynamique .....	15
III.6	Zoom sur les logiciels de simulation thermique dynamique actuel.....	17
III.7	Calibration et validation d'un modèle de simulation thermique dynamique .....	19
IV.	Modélisation du bâtiment pilote .....	21
IV.1	Description du bâtiment pilote .....	21
IV.2	Hypothèses de modélisation.....	24
IV.3	Saisie du fichier météo .....	24
IV.4	Saisie de la géométrie du bâtiment.....	27
IV.5	Saisie des compositions des parois du bâtiment.....	28
IV.5	Modélisation de la convection et de la conduction .....	32
IV.5.1	Modélisation de la convection interne et externe .....	32
IV.5.2	Modélisation de la conduction.....	33
IV.6	Modélisation des infiltrations dans la zone bâtiment et la zone comble .....	33
IV.7	Modélisation de la ventilation naturelle de la zone comble .....	34
IV.8	Comparaison des résultats de simulation aux mesures expérimentales.....	38
V.	Calibration du modèle du bâtiment pilote .....	41
V.1	Méthodologie de calibration.....	41
V.2	Application de la méthodologie de calibration.....	42
V.3	Comparaison des résultats de simulation aux mesures expérimentales après calibration .....	44
	Conclusion et perspectives .....	48
	Bibliographie .....	49
	Annexes .....	I

## Liste des sigles et des abréviations

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

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

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

BLT : Blocs de Latérites Taillées

BTC : Blocs de Terre Comprimée

CAMES : Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur

CGE : Conférence Française des Grandes Ecoles

CSP : Concentrating Solar Power Plant

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

CTFs : Conduction Transfer Function

Cti : Commission Française des Titres d'Ingénieur

CVEQM : Coefficient de Variation de l'Erreur Quadratique Moyenne

CVRMSE : coefficient variation of Root Mean squared Error

Dymola : DYnamic MOdeling LABoratory

EBMN : Erreur de Biais Moyenne Normalisée

EIER : École d'Ingénieurs de l'Équipement Rural

Epw : EnergyPlus Weather data

ETSHER : École des Techniciens de l'Hydraulique et de l'Équipement Rural

HEIG VD: Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

IEA : International Energy Agency

IPMVP : International performance measurement and verification protocol

LEMC : Laboratoire Eco-Matériaux Construction

LESBAT : Laboratoire d'Énergétique Solaire et de Physique du Bâtiment



## VALIDATION D'UN MODELE DE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE A PARTIR DE MESURES EXPERIMENTALES SUR DES BATIMENTS PILOTES

LESEE : Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie

NMBE : Normal mean bias error

PV : Photovoltaïque

$R^2$  : Coefficient de détermination

SoDa : Solar radiation Data

STD : Simulation Thermique Dynamique

TARP : Thermal Analysis Research Program

Trnsys : Transient System Simulation Tool

## Liste des figures

Figure 1 : Etapes d'un calcul de simulation thermique dynamique [6] .....	10
Figure 2 : Diagramme de Sankey [6].....	13
Figure 3 : Le programme EnergyPlus [8] .....	18
Figure 4 : Bâtiment pilote sur le site de Kamboinsé .....	21
Figure 5 : Evolution des températures de l'air du comble et de la zone intérieure en fonction de la température extérieure .....	22
Figure 6 : Evolution des températures des façades internes en fonction de la température extérieure .....	23
Figure 7 : Température sèche de l'air extérieur.....	25
Figure 8 : Humidité relative de l'air extérieur .....	25
Figure 9 : Plans du bâtiment pilote .....	27
Figure 10 : Bâtiment pilote modélisé sur SKETCH'UP .....	27
Figure 11 : Méthodologie de calibration.....	42
Figure 12 : Courbes des températures et humidité relative de l'air intérieur.....	45
Figure 13 : Courbes des températures des murs mesurés et simulés après calibration .....	46
Figure 14 : Extraits de la table 1 : Effective air leakage area [27].....	IV
Figure 15 : Mise en évidence des surfaces calculées en toiture sur les plans .....	VIII
Figure 16 : Extrait de la table des coefficients d'infiltration par l'effet du vent et d'infiltration par tirage thermique [15] .....	X
Figure 17 : Mur du bâtiment pilote avec une thermopuce mesurant sa température .....	XI
Figure 18 : Thermopuces et HygroPuces sur porte-clés fixe avec un lecteur thermopuce [28].....	XI
Figure 19 : Position des thermopuces dans le bâtiment pilote .....	XII
Figure 20 : La température mesurée et simulée de la zone intérieure.....	XIII
Figure 21 : L'humidité relative mesurée et simulée de la zone intérieure .....	XIV
Figure 22 : La température mesurée et simulée du comble .....	XV
Figure 23 : La température mesurée et simulée du mur Est.....	XVI
Figure 24 : La température mesurée et simulée du mur Ouest .....	XVII
Figure 25 : La température mesurée et simulée du mur Sud .....	XVIII
Figure 26 : La température mesurée et simulée du mur Nord.....	XIX
Figure 27 : La température mesurée et simulée de la zone intérieure après calibration .....	XX
Figure 28 : L'humidité relative mesurée et simulée de la zone intérieure après calibration .....	XXI
Figure 29 : La température mesurée et simulée du comble après calibration .....	XXII
Figure 30 : La température mesurée et simulée du mur Est après calibration .....	XXIII
Figure 31 : La température mesurée et simulée du mur Ouest après calibration .....	XXIV
Figure 32 : La température mesurée et simulée du mur Sud après calibration .....	XXV
Figure 33 : La température mesurée et simulée du mur Nord après calibration .....	XXVI

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Critères pour l'évaluation de la calibration .....	20
Tableau 2 : Propriétés physiques et thermiques de la tôle en acier galvanisé.....	28
Tableau 3 : Propriétés physiques et thermiques du BTC .....	29
Tableau 4 : Propriétés physiques et thermiques du béton .....	30
Tableau 5 : Propriétés physiques et thermiques du contre-plaqué.....	31
Tableau 6 : Propriétés physiques et thermiques de la partie inférieure de la porte.....	32
Tableau 7 : Evaluation des critères de validation du modèle de référence .....	40
Tableau 8 : Plage d'incertitude et valeurs des paramètres trouvées après optimisation .....	43
Tableau 9 : Evaluation des critères de validation du modèle après calibration .....	44
Tableau 10 : Coefficient de rugosité.....	I
Tableau 11 : Dimensions des murs, de la porte et des fenêtres.....	V
Tableau 12 : Dimensions du comble.....	VII
Tableau 13 : Dimensions de la toiture .....	VII
Tableau 14 : Optimisation de l'écart de hauteur entre le milieu de l'ouverture la plus basse et le niveau de pression neutre.....	XXVII
Tableau 15 : Optimisation de la surface effective de fuite du comble .....	XXVII
Tableau 16 : Optimisation de la surface effective de fuite de la zone bâtiment.....	XXVIII
Tableau 17 : Optimisation de l'absorptivité solaire de la tôle d'acier galvanisé .....	XXVIII
Tableau 18 : Optimisation de l'absorptivité solaire du béton.....	XXIX
Tableau 19 : Optimisation des propriétés thermo-physiques du béton .....	XXIX
Tableau 20 : Optimisation des propriétés thermo-physiques du BTC .....	XXXIII
Tableau 21 : Optimisation des propriétés thermo-physiques du contre-plaqué .....	XXXVIII

## Introduction

La contrainte de réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi que la hausse du coût de l'énergie liée à l'épuisement progressif des ressources fossiles impliquent la nécessité d'agir sur le secteur du bâtiment pour réduire ses consommations [1].

En effet, le secteur du bâtiment consomme environ 40% de l'énergie mondiale, et compte pour environ 1/3 des émissions des gaz à effet de serre dans le monde [2]. Les bâtiments des secteurs résidentiels et tertiaires consomment environ 60% de l'électricité mondiale. Dans les pays en voie de développement, le taux d'urbanisation jusque là, faible augmente rapidement et les besoins en nouveaux bâtiments sont de plus en plus élevés.

Dans ce contexte, la généralisation de bâtiments à basse consommation énergétique et même à énergie zéro ou positive semble être incontournable. Cependant, la simulation thermique dynamique (STD) est une étape importante pour réussir des bâtiments écologiques, aussi bien dans la construction que dans la rénovation.

Une modélisation fine du comportement du bâtiment est nécessaire non seulement pour quantifier à l'avance les impacts de la conception architecturale sur le confort thermique mais aussi pour tester différentes solutions techniques à la recherche de l'optimum entre performances et investissements.

C'est dans le même ordre d'idées que dans le cadre d'un projet mené au Laboratoire Eco-Matériaux Construction (LEMC) et au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de 2iE consistant à concevoir et développer des bâtiments écologiques adaptés au contexte sahélien en exploitant au mieux les ressources locales disponibles, il m'a été confié la tâche de créer un modèle thermique dynamique d'un bâtiment pilote, qui devra par la suite être validé à l'aide de mesures expérimentales.

Ce document commence d'abord par présenter les structures d'accueil, le LEMC et le LESEE, puis il présente le projet duquel découle le thème de notre travail à savoir : « *Validation d'un modèle de simulation thermique dynamique à partir de mesures expérimentales sur des bâtiments pilotes* ». Ensuite, après les généralités sur la simulation thermique dynamique (STD), il présente le modèle de STD du bâtiment pilote développé sur le logiciel Energyplus et l'analyse des résultats de simulation pour enfin proposer des solutions de calibration de ce modèle sur les mesures du pilote afin qu'il soit validé.

## I. Présentation des structures d'accueil : LEMC et LESEE

### I.1 Présentation du LEMC

Le Laboratoire Eco-Matériaux et Construction (LEMC) fait partie de la Direction de la Recherche de l'Institut International d'Ingénierie (2iE) de Ouagadougou.

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

- Eco-Matériaux de Construction
  - Terre (Latérite, BTC, BLT, etc.) ;
  - Déchets urbains miniers et industriels ;
  - Fibres végétales (bois et sous-produits de l'agriculture) ;
  - Eco-Béton, matériaux composites ;
  - Matériaux de constructions recyclés.
- Structures mixtes : Terre-Bois, Bois-Béton, Acier-Béton.
- Durabilité des ouvrages.

Ses enjeux sont les suivants :

- Accès des populations à un logement décent et maîtrise des villes africaines ;
- Défis du développement des infrastructures de transport en Afrique ;
- Protection de l'environnement et changement climatique ;
- Emergence de l'économie verte.

Les domaines d'expertise du LEMC sont les suivants :

- Caractérisation physico-chimique et mécanique de matériau ;
- Etudes géotechniques ;
- Emergence du bâtiment ;
- Modélisation et simulation multi-échelle des matériaux et des structures.

Ses produits / services sont les suivants :

- Recherche, développement, innovation ;
- Contrôle qualité de matériaux naturels et élaborés ;
- Formation par la recherche (thèses, stages académiques, perfectionnements techniques).

## I.2 Présentation du LESEE

Le LESEE fait partir de la Direction de la Recherche de l'Institut International d'Ingénierie (2iE) de Ouagadougou. Ces activités se regroupent autour de deux principaux axes de recherche à savoir :

### **Axe 1 : Conversion de l'énergie solaire sous environnement chaud et rude**

Cet axe est subdivisé en trois sous-axes dont les objectifs sont présentés ci-dessous :

#### **❖ Système PV**

- Etudier les comportements thermoélectriques et le vieillissement de différents types de modules PV (monocristallins, polycristallins, amorphes, hybrides HIT...) pour différents contextes climatiques (tropical humide, soudano-sahélien, sahélien, etc ...)
- Etudier et optimiser les méthodes de nettoyage de modules PV dans des régions à fort taux de poussière
- Développer et optimiser des systèmes PV dans un contexte de faible taux d'électrification et de réseaux faiblement maillés

#### **❖ CSP pour mini-réseaux**

- Concevoir, développer et vulgariser des microcentrales solaires à concentration appropriées avec une forte valeur ajoutée locale
- Développer des matériaux de stockage thermique à base de matériaux disponibles localement
- Etudier le couplage des microcentrales solaires à concentration avec des procédés thermiques utilisant la chaleur à plus ou moins haute température

#### **❖ Habitat solaire**

- Etudier l'intégration optimale des systèmes solaires, des éco-matériaux et des variétés architecturales pour un confort thermique et une économie d'énergie dans le bâtiment en Afrique
- Etudier et optimiser les systèmes de climatisation solaire adaptés aux zones rurales et péri-urbaines d'Afrique

### **Axe 2 : Gestion optimale d'énergie durable : production, transport, distribution**

Cet axe est subdivisé en deux sous-axes dont les objectifs sont présentés ci-dessous :

#### **❖ Systèmes énergétique multi-sources**

- Concevoir, développer et vulgariser des systèmes hybrides innovants (solaire (PV, CSP) /Générateur Diesel (gasoil et/ou biocarburant)
- Maîtriser par l'expérimentation le fonctionnement des différentes architectures de systèmes hybrides PV/Générateur Diesel/Batteries/réseau usuel



## VALIDATION D'UN MODELE DE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE A PARTIR DE MESURES EXPERIMENTALES SUR DES BATIMENTS PILOTES

- Développer des algorithmes de gestion de l'énergie dans les systèmes énergétiques multi-sources
  - ❖ **Interaction sources-utilisateurs : réseaux intelligents**
- Etudier, modéliser et optimiser les systèmes électriques : Application aux mini-réseaux et micro-réseaux électriques
- Etudier et optimiser la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux de distribution faiblement maillé et de faibles puissances en présence de sources de production instables

Les prestations du LESEE sont :

- Caractérisation des modules photovoltaïques (PV) ;
- Formation continue sur : la conception et le dimensionnement des systèmes solaires PV et hybrides ;
- Les systèmes solaires thermiques, et l'efficacité énergétique ;
- Base de données météorologiques ;
- Test d'efficacité des lampes.

## II. Présentation du projet

### II.1 Contexte de l'étude

Le secteur du bâtiment du Burkina Faso fait face à une explosion de la demande en logements et en infrastructures. Ce constat s'explique d'une part par une augmentation rapide de la population urbaine et d'autre part par une démographie croissante. Ainsi 75% des bâtiments qui seront présents à l'horizon 2050 restent encore à construire. Il existe donc d'importants leviers d'action sur le choix des matériaux et sur la conception d'habitats permettant de satisfaire les besoins de ces habitants. Un des enjeux concerne notamment la maîtrise des contraintes climatiques parfois extrêmes en zone sahélienne sur le confort thermique des habitants. Il est, par exemple, possible de jouer sur différents paramètres tels que le choix des matériaux utilisés pour les murs et la toiture, l'épaisseur de ces parois, la présence d'une ventilation, le type de revêtement extérieur et intérieur, etc. Dans ce domaine, pour comparer l'impact de ces différents choix constructifs sur le confort thermique, on utilise des modèles de simulation thermique dynamique (STD), seuls capables de tenir compte de phénomènes transitoires. Ce type d'approche peut ensuite permettre d'orienter les bonnes pratiques en matière d'approche bioclimatique. Un point important concerne, cependant, la validité de ces modèles de simulation pour le contexte sahélien. En effet, les résultats fournis ne sont pas toujours suffisamment calibrés et nécessitent une validation à l'aide de mesures sur des bâtiments réels.

Le présent travail a donc pour objectif de valider un modèle de simulation thermique dynamique développé sur le logiciel EnergyPlus à partir de mesures sur un bâtiment pilote instrumenté. Ce bâtiment pilote a été instrumenté par des thermopuces (capteurs de température et d'humidité relative).

### II.2 Objectifs visés par l'étude

Notre travail vise à :

- Modéliser le bâtiment pilote sur le logiciel EnergyPlus ;
- Analyser les différences de résultats obtenus entre mesures et simulations ;
- Rechercher les principaux paramètres influents ;
- Calibrer le modèle de simulation sur les mesures du pilote.

## II.3 Travail à faire

La réalisation de cette étude consistera à :

- Modéliser le bâtiment sur le logiciel EnergyPlus ;
- Participer au suivi des mesures sur le bâtiment pilote ;
- Analyser et interpréter des résultats issus des données de simulation et expérimentales ;
- Proposer des solutions pour calibrer le modèle de simulation sur le pilote.

### III. Généralités sur la simulation thermique dynamique

Pour construire bien du premier coup, les concepteurs de bâtiment doivent aujourd'hui évaluer les performances des ouvrages sur de très nombreux critères et faire des choix. Si le développement du bâtiment répond, toujours et avant tout, au besoin fondamental d'offrir des espaces pour les activités humaines, à l'abri des conditions climatiques extérieures, au fil du temps, les exigences et les contraintes relatives aux constructions se sont significativement accrues. Un bâtiment doit aujourd'hui satisfaire à de nombreuses contraintes réglementaires, ou portés par la demande des clients, ciblant sur la sécurité structurelle, la durabilité, l'accessibilité, la sécurité incendie, le confort visuel et thermique, l'isolation acoustique, les consommations énergétiques en usage, le bilan environnemental, tout au long de son cycle de vie... L'évaluation de la qualité d'un bâtiment sur l'ensemble de ces aspects réclame des outils performants. Pour les pays en développement, l'utilisation de ces outils peut permettre de mener des réflexions intéressantes sur les interactions entre climat et bâtiment dans le but de maîtriser les besoins énergétiques et d'améliorer le bien-être dans les environnements intérieurs.

#### III.1 Qu'est-ce que la simulation numérique ?

La simulation numérique n'est ni plus ni moins qu'une méthode de représentation sur ordinateur, un outil pour comprendre le réel et chercher à le prévoir. Évidemment, d'autres méthodes permettent également d'appréhender la réalité comme la reproduction directe du phénomène à étudier et son observation ou l'expérimentation sur des maquettes à échelle réduite (encore très utilisée en mécanique des fluides et en aéraulique aujourd'hui) [3].

Il est primordial de bien comprendre qu'une simulation met en œuvre un modèle théorique. Or un modèle n'est pas l'exacte représentation d'un phénomène ; il cherche à l'approximer de la manière la plus juste possible. Un modèle ne peut être mis en œuvre que sur un certain domaine de validité, là où les hypothèses qui le gouvernent sont vérifiées.

La simulation numérique permet donc de reproduire sur un ordinateur un phénomène complexe que l'on souhaite étudier et prédire. Cette expérience numérique repose sur des modèles théoriques qui sont formulés par des lois mathématiques qu'il convient d'évaluer numériquement à chaque instant et en tout point de l'espace sur la totalité du domaine d'étude. Comme il y a une infinité de valeurs à calculer, cet objectif est inaccessible : c'est pourquoi, pour des raisons de faisabilité, il est admis de ne considérer qu'un nombre fini de points en discrétisant l'espace d'étude.

Le nombre d'opérations à effectuer devient alors abordable pour un ordinateur. Cette discrétisation qui repose souvent sur un maillage de l'espace est le résultat d'un compromis entre :

- L'utilisation d'une discrétisation la plus fine possible pour « coller » au mieux à la réalité ;
- L'utilisation d'une discrétisation la moins raffinée possible pour diminuer le nombre des calculs à effectuer et donc accélérer la rapidité de la simulation.

La simulation numérique est un formidable outil pour l'investigation et l'exploration du réel. Utilisée dans l'industrie de manière intensive, son utilisation tend à se généraliser dans le secteur de la construction (architecture, structure, thermique, ...). Elle permet dans des temps très brefs et à des coûts réduits, d'évaluer des scénarios selon un certain nombre d'objectifs qui peuvent être :

- Thermiques : confort d'été et confort d'hiver, efficacité thermique du système de régulation, dimensionnement adapté au fonctionnement du bâtiment, coût de service...
- Relatifs à la ventilation : confort et efficacité de la ventilation.
- Environnementaux : le coût environnemental de la construction, de l'exploitation, de la réhabilitation et du démantèlement du bâtiment ; l'énergie grise sur l'ensemble du cycle de vie...

Les résultats d'une simulation numérique peuvent être visualisés sous la forme de rendus (c'est-à-dire des images ou des vidéos de synthèse) extrêmement réalistes et « parlants ». Chacun sait que les choses deviennent beaucoup plus intelligibles lorsqu'on peut les représenter graphiquement : un schéma est en général bien plus explicite qu'une équation mathématique. Actuellement, les outils de simulation, lorsqu'ils permettent la production de tels rendus, sont de véritables outils de communication et de collaboration autour des projets de construction voire d'aide à la décision. Ils facilitent, par une pédagogie nouvelle, la communication d'informations pertinentes relatives au projet ; dans toutes ses dimensions. Il sera par exemple plus facile d'expliquer au maître d'ouvrage un choix de conception (la place d'un poteau au milieu d'un hall par exemple) sur une image 3D projetée via un vidéo projecteur que sur un plan d'exécution papier au format A0.

### **III.2 Qu'est-ce que la simulation thermique dynamique ?**

La simulation thermique dynamique (STD) est un outil permettant la modélisation multi-zone d'un ou plusieurs bâtiments en vue d'effectuer une optimisation de la performance énergétique et du confort.

La simulation thermique permet d'estimer les besoins de chaleur ou de froid d'un bâtiment sur une période donnée (généralement une année), grâce à une modélisation des transferts de chaleur entre le

bâtiment et son environnement extérieur. Ces outils de simulation effectuent la synthèse entre les divers phénomènes thermiques en compétition :

- Les apports de chaleurs extérieurs (irradiation solaire & ventilation) ;
- Les apports payants (les chauffages électriques, à gaz, au fioul ou biomasse ; les systèmes de froid) ;
- Les apports gratuits (les usagers du bâtiment, les équipements informatiques, les machines ,... ) ;
- Les dissipations (fonctions de l'isolation du bâtiment et de son étanchéité à l'air).

Ces outils offrent aux concepteurs la possibilité de rechercher des optimums garantissant le confort des usagers tout en minimisant la consommation d'énergie du bâtiment, qui constitue une part importante de son coût d'exploitation et mobilise des ressources naturelles non renouvelables.

La STD simule heure par heure le métabolisme du bâtiment en fonction de la météo, de la saison, de l'occupation des locaux et de leur usage. On accède ainsi aux températures et aux besoins en chauffage et climatisation à chaque instant et en tout point du bâtiment. Ce type de simulation permet de rendre compte avec plus de finesse des phénomènes thermiques mis en jeu comme :

- L'inertie thermique du bâtiment ;
- L'impact des usagers et de l'utilisation des équipements ;
- La stratégie de régulation des systèmes de contrôle de la température (chauffage, climatisation & ventilation) [4].

Véritables outils d'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrage et les concepteurs, les logiciels de STD permettent d'optimiser la conception d'un bâtiment. Comment ? En proposant une approche réaliste du fonctionnement thermique de l'ouvrage à l'aide de calculs énergétiques détaillés. La STD nécessite une bonne maîtrise des logiciels et une méthodologie soignée.

Dans le bâtiment, la STD est apparue dans les années 1970-1980, parallèlement à l'application des premières réglementations thermiques [5]. L'intérêt de ce calcul mathématique ? **Décrire l'évolution temporelle de l'état thermique d'une construction.** Il permet d'apprécier les phénomènes thermiques de systèmes difficiles à appréhender globalement sur le cycle complet d'une année : impact des apports gratuits, effets de masque ou de brise-soleil...

Comparés aux premiers outils de simulation utilisés dans les années 1970 au pas mensuel et dont beaucoup ne prenaient pas en compte la dynamique des évolutions, les logiciels actuels fournissent une richesse de données indispensable pour affiner la prévision de comportement des bâtiments ou le dimensionnement des équipements.

### III.3 Les grandes étapes d'un calcul de simulation thermique dynamique

Le principe d'un calcul de simulation thermique dynamique d'un bâtiment consiste à étudier sur une année entière ou sur une période définie d'au moins quelques jours, au pas de temps horaire ou à un pas de temps inférieur, le comportement thermique d'un bâtiment, soit uniquement de son enveloppe, soit avec des systèmes techniques. Ce calcul tient compte de tous les paramètres influant sur le bilan thermique : apports internes et externes, inertie du bâtiment, transmission à travers les parois, ...

La réalisation d'une étude de STD se décompose en plusieurs étapes, résumées ci-dessous (Figure 1) :



Figure 1 : Etapes d'un calcul de simulation thermique dynamique [6]

#### III.3.1 Saisie du bâtiment

Pour cette saisie, la plupart des outils disponibles proposent une saisie en 3D de l'enveloppe du bâtiment intégrant toutes les parois opaques et vitrées, ainsi que différents éléments de protections solaires. Les compositions de parois sont saisies, les différentes compositions de parois d'un projet sont créées et sauvegarder dans la bibliothèque du logiciel.

Les différentes parois constituant l'enveloppe du bâtiment, mais aussi les parois internes de séparation entre locaux sont décrites dans toutes leurs caractéristiques thermiques, voire hygrothermiques, qui sont au moins les trois suivantes [7] :

- $\lambda$  : conductivité thermique
- $\rho$  : masse volumique
- $C_p$  : capacité calorifique

Ces trois caractéristiques sont décrites pour chaque couche de chaque paroi et chaque paroi est ainsi définie. C'est l'ensemble de ces paramètres qui influe sur le bilan qui est fait de façon dynamique. Le bâtiment est plongé dans un climat qui est décrit d'une part sous la forme d'une position longitude-latitude, et d'autre part par des données météorologiques décrivant heure par heure et sur la période de calcul les sollicitations thermiques extérieures, qui sont au moins la température extérieure, rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus, et qui peuvent être sur certains outils, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent.

La sélection et la pertinence de ces données météorologiques est un point crucial de l'analyse en STD, qui est malheureusement souvent négligé.

### III.3.2 Définition des zones thermiques

A partir de la saisie du bâtiment, le logiciel simule le comportement thermique du bâtiment en fonction d'un découpage choisi par l'ingénieur qui réalise l'étude. Le principal découpage s'effectue au niveau de zones thermiques, généralement une zone thermique étant associée à une pièce ou à un regroupement de pièces de même typologie. Les différents locaux (voire parties de locaux) constituant le bâtiment sont regroupés au sein de zones thermiquement homogènes : on entend par zones thermiquement homogènes, des zones qui sont soumises aux mêmes sollicitations thermiques ou à des sollicitations thermiques équivalentes que ce soit par des apports internes, par des transmissions au travers des parois ou par des apports solaires. Au sein de chaque zone thermique définie, le concepteur va décrire, en général au pas de temps horaire, les apports internes qui ont lieu dans chaque zone. Les apports sont les suivants :

- Apport d'énergie par l'éclairage artificiel ;
- Apport d'énergie sous forme sensible et dans certains cas également sous forme latente (quand les logiciels le prennent en compte) des occupants ;
- Apports sensibles et éventuellement latents des équipements.

L'ensemble de ces apports est saisi heure par heure sur des plannings types. Par exemple, pour une occupation de bureau d'une personne, on pourra saisir des dégagements de chaleur correspondant à une personne de 8h à 12h puis de 14h à 18h, le dégagement de chaleur correspondant à un ordinateur individuel, et des dégagements de chaleurs correspondant à l'éclairage, ces dégagements pouvant varier en fonction de la luminosité extérieure [7]. Ainsi, les scénarii sont affectés par zone thermique (scénarii d'occupation, de ventilation, de chauffage, de rafraîchissement, de puissance dissipée...). Ces scénarii permettent de différencier le fonctionnement de chaque zone thermique. Les scénarii de ventilation sont par exemple différents pour les zones bureaux et les zones sanitaires.

La pertinence de ces données conditionne évidemment le résultat obtenu et un bon nombre de ces données échappe à la maîtrise du concepteur. Il est ainsi primordial qu'elles puissent être présentées de façon claire et facilement compréhensible au maître d'ouvrage, voire s'ils sont connus aux utilisateurs, de façon à ce qu'ils puissent se prononcer et valider les hypothèses d'occupation pour

assurer la pertinence de l'analyse. Pour la plupart des analyses, ces saisies permettent de mener l'analyse sur le comportement thermique en hiver et/ou en été du bâtiment. Pour certains types d'analyse et avec certains outils, une description des systèmes vient s'ajouter à cette description du bâtiment, cette description des systèmes pouvant être plus ou moins fine selon les outils.

### III.3.3 Simulation du cas de base et des variantes

Une fois les éléments des étapes précédentes vérifiés, la simulation peut être lancée. La première simulation effectuée, appelée cas de base, correspond toujours au bâtiment dans son état initial. C'est la simulation de référence pour le projet.

En fonction des objectifs de l'étude STD, des variantes sont ensuite simulées. Ces variantes peuvent intervenir sur les épaisseurs d'isolants, la présence d'une ventilation, les caractéristiques des vitrages, la présence et la taille des brises soleil... Une simulation est effectuée pour chaque valeur du paramètre étudié.

Les calculs permettent d'obtenir des résultats concernant le comportement global du bâtiment mais aussi pour chaque zone thermique, ce qui permet d'évaluer les conditions de confort en tout point du bâtiment.

### III.3.4 Analyse des résultats

Le comportement thermique de l'objet simulé peut être défini grâce à de nombreux paramètres qui constituent le résultat du calcul [6] :

- Besoin de chauffage (kWh/m<sup>2</sup>/an)
- Besoin de climatisation (kWh/m<sup>2</sup>/an)
- Indices de confort
  - Surchauffe maximale
  - Taux d'inconfort
  - Amplification de la température extérieure
- Diagramme de Sankey (modélisation graphique des besoins et déperditions, Figure 2)
- Evolution des températures suivant plusieurs échelles de temps
- Apports solaires

- Histogramme des températures atteintes en fonction du temps
- Etc.

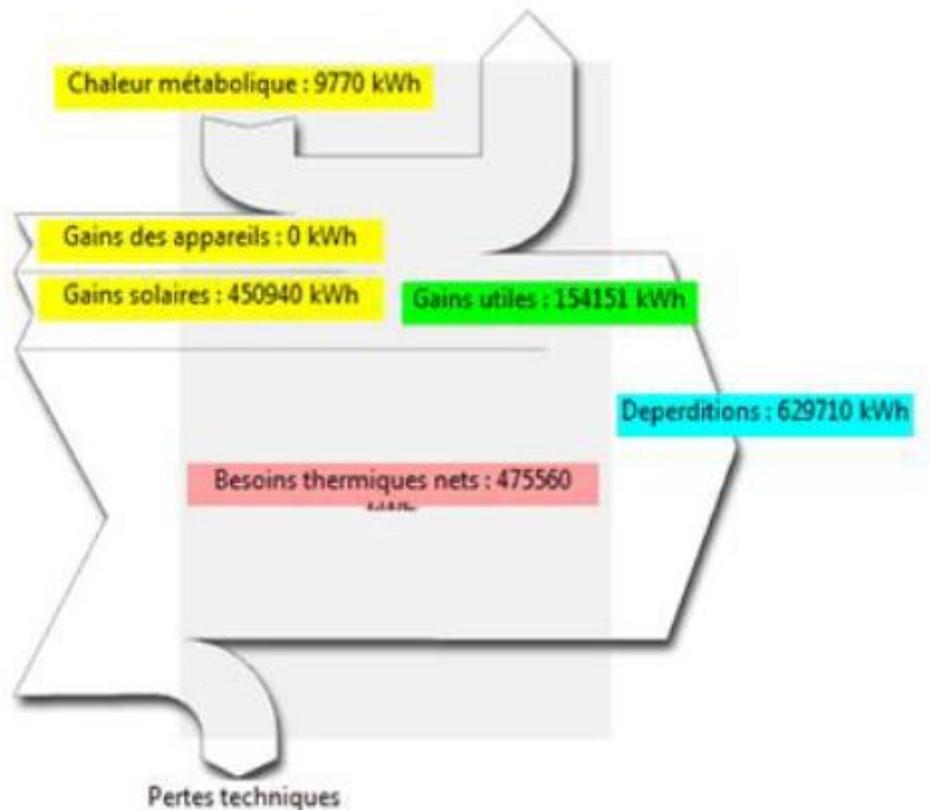


Figure 2 : Diagramme de Sankey [6]

Des comparaisons sont effectuées entre le cas de base et les différentes variantes pour les besoins de chauffage et de climatisation, les indices de confort, les apports solaires, l'évolution des températures. Ces comparaisons sont généralement réalisées sur l'année entière, puis sur la semaine la plus chaude et la semaine la plus froide de l'année [6]. L'analyse est effectuée en recoupant les comparaisons de ces différents résultats, afin de déterminer la solution optimale pour le projet.

### III.4 Les applications de la simulation thermique dynamique

En Europe, l'application la plus courante consiste en l'analyse du confort thermique d'été en l'absence de climatisation. Pour cela il est fréquent que les programmes indiquent un certain nombre d'heures de dépassement d'une température seuil assez souvent de 28°C [7]. Une autre application de la STD est la quantification de besoins de chaleur pour le chauffage et de froid en présence d'un système de rafraîchissement actif, de façon à étudier les conséquences de différentes solutions techniques sur l'enveloppe.

Enfin, parmi les applications courantes, on trouve moins fréquemment l'estimation de consommation prévisionnelle réaliste qui nécessite de mettre en œuvre des moteurs de calcul tenant compte de façon affinée des systèmes techniques, des systèmes de ventilation, ou des systèmes d'émission de chaleur et de froid, voire de distribution et de production ...

Ainsi, fondamentalement, les logiciels de STD décrivent les échanges thermiques classiques (convection, conduction, rayonnement, changement d'état). Leurs développements récents leur confèrent aussi la capacité très appréciée :

- De dimensionner les solutions énergétiques complexes en développant une approche globale (prise en compte de différentes sources d'énergie, du bilan carbone, de l'énergie grise...)
- De procéder à une approche globale de l'éclairage (en tenant compte de la lumière naturelle et de la modulation de l'appoint artificiel, des protections solaires...)
- De simuler l'impact du vent sur les façades, les phénomènes de ventilation naturelle, l'intérêt d'un puits climatique ;
- Et surtout, d'estimer les consommations réelles d'énergie à partir des informations sur l'enveloppe du bâtiment, de son inertie, des systèmes énergétiques (quelle que soit l'énergie exploitée et en prenant en compte les apports gratuits externes ou internes), du comportement des occupants et du climat local.

La « reproduction » du comportement d'un système démultiplie les possibilités d'analyse d'une construction.

### **III.5 Avantages et inconvénients de la simulation thermique dynamique**

La STD est de plus en plus souvent demandée dans les programmes de projets de construction et est considérée parfois comme une fin en soi. Pourtant, il s'agit bien d'un outil au service de la conception qui peut apporter de multiples indications aux concepteurs et aux maîtres d'ouvrages. Comme tout outil, la STD présente des inconvénients (limites) et des avantages qu'il est important de connaître pour l'exploiter dans des conditions optimales.

### III.5.1 Avantages de la simulation thermique dynamique

Une STD peut être utilisée pour atteindre un ou plusieurs des objectifs suivants :

- Optimiser le concept architectural d'un bâtiment (optimisation des épaisseurs d'isolant, dimensionnement des protections solaires, choix du système constructif, minimisation du besoin thermique d'un bâtiment...);
- Choisir l'orientation optimale d'un bâtiment ;
- Evaluer les risques de surchauffes estivales dans une zone précise d'un bâtiment ;
- Evaluer les besoins énergétiques d'un bâtiment ;
- Préconiser des températures de consigne de fonctionnement permettant de minimiser les consommations énergétiques futures... ;
- Observer le comportement du bâtiment, ses réactions dans le temps en fonction de son utilisation et de la météo ;
- Maitriser confort et inconfort ;
- Eviter de climatiser ;
- Garantir des temps de retour sur investissement cohérents ;
- Evaluer les systèmes innovants dans des configurations particulières (canicules, grands vents, sur-occupation...) [5];
- Concevoir des projets avec des approches, des systèmes, des techniques non courantes et/ou manquant de retours d'expériences [5].

Si la simulation thermique dynamique permet d'optimiser la conception et le dimensionnement d'un bâtiment, c'est parce qu'elle associe très intimement les données liées à l'enveloppe de l'ouvrage, les données qui ont trait à son système technique et les données climatiques locales avec les scénarios d'usage du bâtiment.

### III.5.2 Inconvénients de la simulation thermique dynamique

#### ❖ Les données d'entrée

Une première limite des outils de STD consiste dans la validation des données d'entrée. La plupart des outils distribués sur le marché sont en effet validés au travers de travaux de recherche soit en comparaison avec des cellules tests, soit en comparaison entre logiciels [5]. La robustesse des données de sortie dépend plus de la pertinence des données d'entrée que du logiciel utilisé. Parmi les

hypothèses particulièrement délicates à valider et à obtenir, les données météorologiques sont importantes. Leur sélection demande de se projeter sur l'analyse qui va être faite : il n'existe pas de fichier météorologique idéal. En fonction de l'analyse qui doit être menée, une sélection des données météorologiques pertinentes à utiliser doit être effectuée. Par exemple, si l'ambition du calcul par simulation thermique dynamique est d'établir un bilan prévisionnel de consommation réaliste, on s'attachera à sélectionner un fichier météorologique qui correspond à une moyenne des années précédentes. En revanche, si l'objectif est d'étudier les conditions de confort d'été en absence de climatisation, la sélection d'un été légèrement plus chaud qu'un été moyen des 10/15 dernières années, voire dans certains cas d'un été extrême, peut parfois s'avérer utile. Il existe plusieurs sources de données météorologiques plus ou moins fiables et d'origine mesurée ou extrapolée à partir de moyennes.

❖ **Les hypothèses de base élaborées sur le modèle de la « zone »**

Une autre limite des calculs de STD réside dans les hypothèses de base de ce type de calcul qui est du modèle zone.

En effet, on considère qu'une zone représente la plupart du temps un local ou un groupement de locaux définis par une température d'air unique quelle que soit la position à l'intérieur de cette zone. Par conséquent on ne tient pas compte des phénomènes de stratification à l'intérieur d'une zone ni des phénomènes convectifs localisés qui pourraient avoir lieu suite à un échauffement sur une paroi par exemple. Cette limite pose de véritables difficultés lorsqu'on est amené à modéliser des volumes importants [5].

❖ **La modélisation des transferts d'air entre des zones et l'extérieur et entre zones elles-mêmes**

La modélisation des transferts d'air entre des zones et l'extérieur et / ou entre zones est un élément délicat. Dans la plupart des logiciels, les transferts d'air sont définis comme des saisies par l'utilisateur et doivent être définies au préalable. Cette façon de procéder ferme la porte à la modélisation des phénomènes aléatoires et non prévisibles tel que la ventilation naturelle par l'ouverture des fenêtres ou des transferts d'air par convection naturelle [5].

❖ **Les scénarios**

La STD s'appuie sur des scénarios d'utilisation. Si ceux-ci évoluent (plus ou moins grande occupation, comportement énergivore des utilisateurs...) les consommations réelles ne sont plus en phase avec les résultats de la STD.

### ❖ La cohérence entre les hypothèses et les équations (modèles) choisies

Toute simulation de modèle est basée sur des équations, des principes et des hypothèses. Les résultats peuvent être incorrectes, si certaines hypothèses ne sont pas prises en compte dans la simulation ou ne cadrent pas avec la réalité. Il existe de nombreuses méthodes de modélisation du bâtiment.

## III.6 Zoom sur les logiciels de simulation thermique dynamique actuel

Le recours à la STD est devenu très courant dans de nombreux projets, tout particulièrement pour, au moins en théorie prédire l'évolution de la température interne du bâtiment dans différents contextes (scénarios) afin d'optimiser l'enveloppe du bâtiment. Elle est donc très souvent demandée dans les phases de conception ou de rénovation de bâtiment. En effet, aujourd'hui, il existe divers logiciels dédiés au problème de l'évolution du confort interne. Quelques-uns de ces Logiciels de simulation thermique sont donnés ci-dessous :

### ❖ Trnsys (Transient System Simulation Tool)

Référence mondiale proposée par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), le logiciel TRNSYS est spécialisé dans la simulation thermique dynamique appliquée au bâtiment.

Ce logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment et de son équipement (systèmes de chauffage, climatisation) pour mener une étude mono ou multi-zone détaillée de son comportement thermique. TRNSYS intègre les variables d'emplacement, de matériaux de construction, d'architecture globale, de concept énergétique choisi, y compris les plus complexes tels que les systèmes solaires innovants. Modulaire et évolutif, la base de données des composants de TRNSYS peut être enrichie de nouveaux composants, systèmes et concepts énergétiques par son utilisateur [8].

### ❖ Dymola

Dymola est un environnement de modélisation et de simulation développé par Dassault Systèmes. Basé sur le langage libre Modelica, il permet de modéliser de manière pratique des systèmes dynamiques complexes multi-physiques. En plus des bibliothèques standards, les utilisateurs peuvent créer leur propre bibliothèque de modèles pour leurs besoins spécifiques [1].

### ❖ EnergyPlus

EnergyPlus a ses racines dans les programmes BLAST et DOE-2. Comme les programmes dont il découle, EnergyPlus est un programme d'analyse énergétique et de simulation de charge thermique. Basé sur la description d'un bâtiment du point de vue de la composition physique du bâtiment, des systèmes mécaniques associés, etc., EnergyPlus calcule les charges de chauffage et de refroidissement nécessaires pour maintenir les consignes de régulation thermique, et la consommation d'énergie du matériel d'usine primaire ainsi que de nombreux autres détails de simulation qui sont nécessaires pour vérifier que la simulation fonctionne comme le serait le bâtiment réel [9]. Il se comporte comme un gestionnaire de simulation qui utilise plusieurs modules pour estimer les besoins en énergie des bâtiments (Figure 3). Il ne possède pas d'interface graphique propre mais, plusieurs interfaces sont disponibles pour la saisie des données d'entrée et le traitement des résultats de la simulation, on a par exemple le plug-in "OpenStudio" qui a été développé récemment pour pouvoir utiliser le modèleur 3D GOOGLE SKETCH'UP.

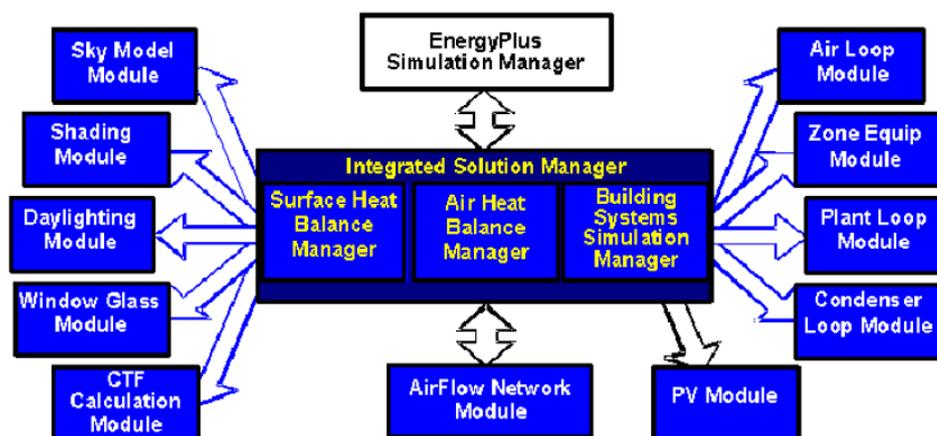


Figure 3 : Le programme EnergyPlus [10]

### ❖ Pléiades+COMFIE

Pléiades+Comfie est un outil de simulation thermique dynamique développé par le Centre d'Énergétique de l'école des Mines de Paris en collaboration avec Izuba Energies. Il permet notamment de déterminer des besoins de chauffage et de refroidissement et de définir des niveaux d'inconfort grâce à une modélisation multizone. Le calcul consiste à réduire un modèle aux différences finies par analyse modale. Pour élaborer un modèle, on n'accède pas au modèle numérique Comfie mais on renseigne directement les données de construction, les scénarios, les informations sur l'environnement et les fichiers météo grâce à l'interface graphique Pléiades [1].

### III.7 Calibration et validation d'un modèle de simulation thermique dynamique

Une approche curative des problèmes d'incertitudes des résultats de simulations est d'ajouter de l'information en installant des capteurs sur place et en comparant les résultats numériques aux données mesurées. Ce domaine s'appelle la calibration de modèle et ouvre des perspectives importantes vers la démocratisation des outils de simulation numérique. Le protocole IPMVP (International performance measurement and verification protocol) fournit d'ailleurs des recommandations quant au calibrage de la modélisation [11]. Une fois un modèle bien calibré, il peut être validé. La validité des modèles de simulation est un point important en STD car les résultats fournis ne sont pas toujours suffisamment calibrés et nécessitent une validation à l'aide de mesures sur des bâtiments réels.

En effet, le grand nombre de paramètres que requièrent ces outils en entrée et les simplifications lors de la modélisation des phénomènes physiques affectent la fiabilité de la simulation et sont à l'origine de contradictions entre mesures et prédictions.

Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ces contradictions ; il peut s'agir :

- d'une connaissance imparfaite de la géométrie ;
- d'une connaissance imparfaite des propriétés des matériaux ;
- des hypothèses de modélisation, des méthodes de résolution et des simplifications dans la description des phénomènes physiques complexes (formulation mathématique et algorithmique) ;
- des informations relatives aux conditions extérieures du bâtiment, y compris les données météorologiques.

Face à ce constat, la calibration des modèles du bâtiment est souvent utilisée dans l'optique d'avoir des modèles qui représentent mieux des comportements thermiques s'approchant de la réalité. Il est souvent possible de faire varier les paramètres d'entrée pour réduire les écarts entre les résultats des mesures expérimentales et ceux de la simulation du modèle mais, la difficulté réside dans le fait d'assurer une intervention judicieuse.

Ainsi, les données expérimentales sont utilisées pour calibrer le modèle. Par ce moyen, un modèle peut être calé pour représenter un système. Le modèle calibré peut ensuite être utilisé, avec prudence, et extrapolé pour l'étude du système sous d'autres conditions de fonctionnement.

#### ❖ Critères de validation

Deux indices statistiques que sont : l'erreur de biais moyenne normalisée (NMBE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CVRMSE) seront utilisés pour évaluer la qualité des résultats de simulation [12].

Plus la valeur de ces paramètres tend vers zéro, mieux le modèle représente la réalité. La valeur de NMBE peut être négative ou positive. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [13] donne des limites à ne pas dépasser de 5% et 15% pour un modèle calibré sur une base mensuelle ( $n = 12$ ), et 10% et 30% pour un modèle calibré sur une base horaire ( $n=8760$ ) respectivement pour le NMBE et le CVRMSE. L'IPMVP [14] propose une valeur de 20% pour le NMBE mensuel et pour les plages horaires, 5% et 20% pour le NMBE (1) et le CVRMSE (2) respectivement.

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{si} - y_{mi})}{(n-1) \times \bar{y}_m} \times 100 \quad (1)$$

$$CVRMSE = \frac{1}{\bar{y}_m} \times 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{si} - y_{mi})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Où  $y_m$  sont les valeurs mesurées ;  $y_s$  les valeurs prédites ;  $\bar{y}_m$  la valeur moyenne des données mesurées.

Tableau 1 : Critères pour l'évaluation de la calibration

Standard	Critère mensuel		Critère horaire	
	NMBE (%)	CVRMSE (%)	NMBE (%)	CVRMSE (%)
ASHARE Guideline 14	5	15	10	30
IPMVP	20	-	5	20

La norme ASTM D5157 reprise dans ASHRAE [15] pour la validation de test de pressurisation et de qualité de l'environnement intérieur, propose l'utilisation du coefficient de détermination  $R^2$  dans l'évaluation de la qualité intérieure du bâtiment. Elle préconise un coefficient de corrélation entre mesures et prédictions supérieur à 0,9.

## IV. Modélisation du bâtiment pilote

### IV.1 Description du bâtiment pilote

Le bâtiment pilote sur lequel porte notre étude a une morphologie de forme rectiligne (Figure 4). Ses murs sont faits en BTC (les blocs de terre comprimée) de 14 cm d'épaisseur. Le BTC est un matériau obtenu par le compactage dans une presse d'une terre latéritique adéquate pour donner un bloc régulier aux arêtes vives. L'ajout d'un stabilisant (ciment, chaux ou bitume) rend les BTC résistants à l'abrasion et moins sensibles aux effets érosifs de l'eau. Le compactage leur permet d'acquérir la résistance mécanique nécessaire à leur utilisation. Ce bâtiment repose sur un plancher constitué d'une couche de béton de 10 cm et d'un remblai de latérite de 40 cm. Sa toiture est en tôle en acier galvanisé de 1,5 mm d'épaisseur. Il a également un plafond fait en contre-plaqué de 0,5 cm. Il possède une fenêtre de type simple vitrage avec un cadre en métal située sur sa façade Sud et une autre fenêtre identique située sur sa façade Nord. Sa porte est sur sa façade Sud et a une partie supérieure faite du même verre que les fenêtres et une partie inférieure constituée d'une lame d'air d'épaisseur 3 cm environ confinée par des fines lames faites du même métal que celui des cadres des fenêtres.



Figure 4 : Bâtiment pilote sur le site de Kamboinsé

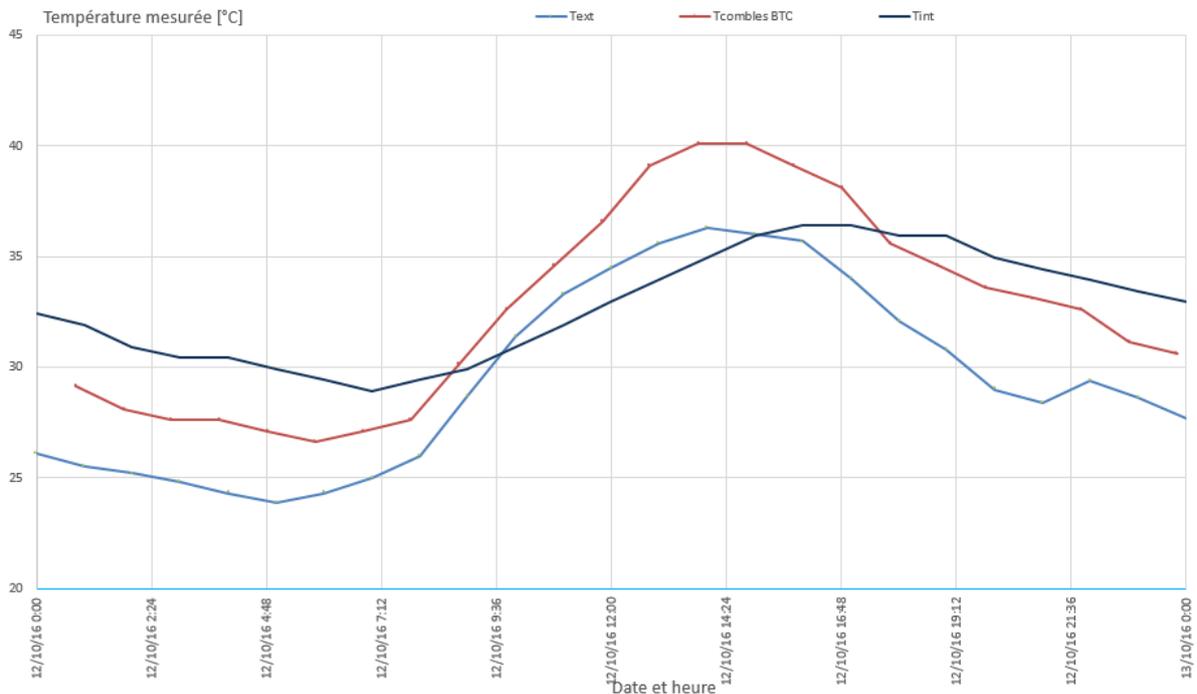


Figure 5 : Evolution des températures de l'air du comble et de la zone intérieure en fonction de la température extérieure

On remarque que la température du comble ne descend jamais aussi bas que la température extérieure (Figure 5). Ce constat est valable pour tous les autres jours de la phase d'expérimentation.

En effet, les parois du comble en BTC et le plafond en contre-plaqué stockent de la chaleur par inertie provenant essentiellement de la toiture qui est en tôle car avec sa faible inertie thermique (épaisseur trop faible) et sa grande diffusivité, la tôle transmet les flux de chaleur extérieures reçus (principalement le rayonnement solaire direct) à sa face interne pratiquement sans amortissement et sans déphasage.

La température des combles a donc tendance à être plus élevée que la température extérieure au moment le plus chaud de la journée. C'est cette chaleur stockée qui est restituée quand la température extérieure chute.

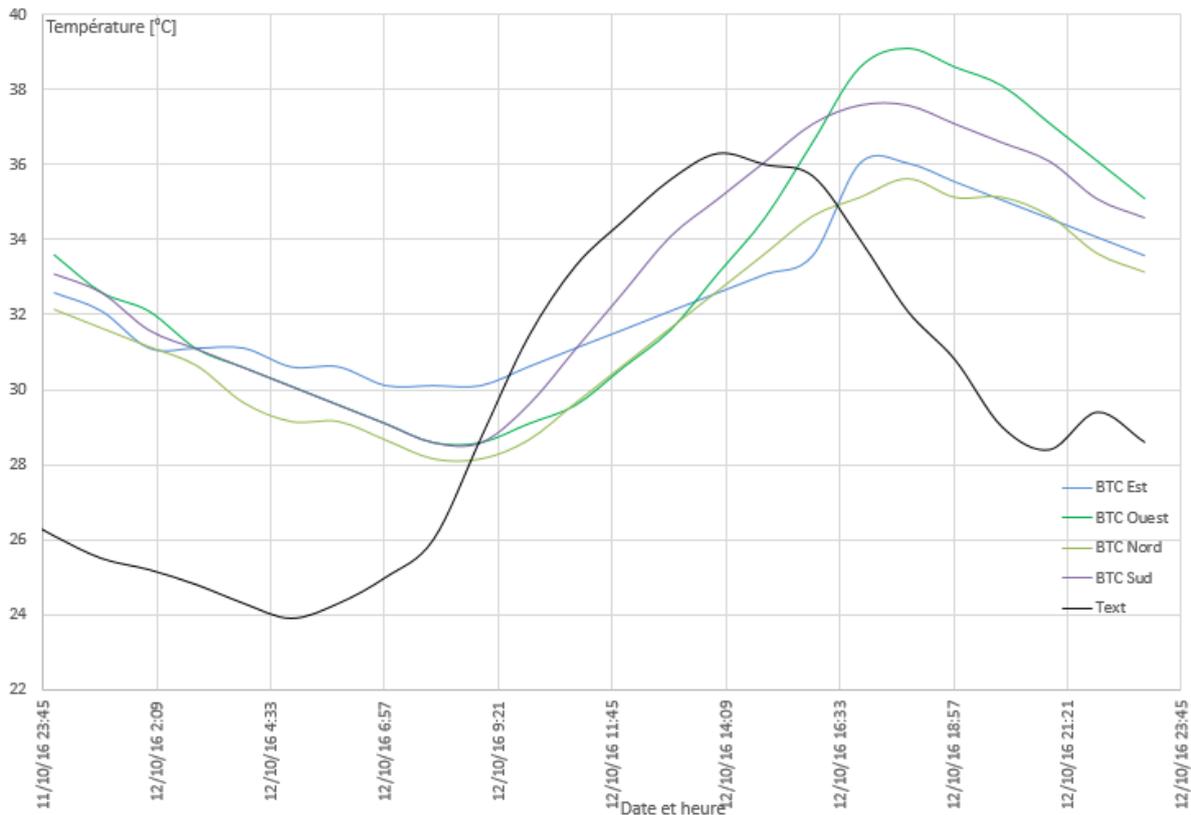


Figure 6 : Evolution des températures des façades internes en fonction de la température extérieure

On peut observer sur ces courbes que les façades sont de plus en plus chaudes dans l'ordre suivant :

$T_{Nord} < T_{Est} < T_{Sud} < T_{Ouest}$  (Figure 6). Ce constat est valable pour tous les autres jours de la phase d'expérimentation.

Au Nord, le rayonnement solaire direct ne heurte jamais la façade. Cette dernière n'est donc chauffée que par le diffus et l'air ambiant. La façade Est ne reçoit le rayonnement solaire direct que le matin : elle est donc chauffée par le rayonnement solaire direct à un moment où il fait encore assez frais, elle dissipe donc cette chaleur rapidement. La façade Sud reçoit le rayonnement solaire direct au moment de la journée où il fait chaud à l'extérieur et le bâtiment a bien commencé à se réchauffer. Enfin, la façade Ouest a accumulé pendant toute la journée la chaleur du bâtiment, transmise en partie par les façades Est et Sud chauffées directement, puis reçoit le rayonnement solaire direct en fin de journée : au moment où le soleil tape, elle est déjà bien chaude, ce qui explique que ce soit la façade la plus chaude.

## IV.2 Hypothèses de modélisation

La mise en œuvre d'un modèle n'a de sens que sous la définition d'un certain nombre d'hypothèses. C'est la raison pour laquelle, nous avons pris soin de définir des scénarii de fonctionnement du bâtiment pilote modélisé et de procéder à un découpage en zones thermiques du bâtiment cohérent avec notre contexte d'étude. Ces hypothèses sont présentées ci-dessous :

- Le bâtiment pilote est en évolution libre c'est-à-dire sans système énergétique
- Il n'y a pas d'apports internes dans la zone
- Le remblai de latérite n'a pas été modélisé
- Les dépassements de la toiture ont été modélisés comme des protections solaires afin de minimiser les apports solaires des zones protégées par ces derniers et surtout éviter les divergences dans les simulations du programme
- La porte et les fenêtres du bâtiment sont toujours fermées car on entre dans le bâtiment que pour la récolte de données
- Deux zones thermiques ont été créées pour modéliser le local et son comble car les masses d'air qui les occupent sont à des états thermiques différents

## IV.3 Saisie du fichier météo

L'utilisation d'un fichier météo avec un pas de temps horaire du lieu où se trouve le bâtiment modélisé est nécessaire pour effectuer une STD. Le bâtiment est plongé dans un climat qui est décrit d'une part sous la forme d'une position longitude-latitude, et d'autre part par des données météorologiques décrivant heure par heure et sur la période de calcul les sollicitations thermiques extérieures, qui sont principalement : la température sèche extérieure ( $^{\circ}\text{C}$ ), la température du point de rosée ( $^{\circ}\text{C}$ ), l'humidité relative (%), la vitesse du vent (m/s), la direction du vent (degrés), la pression atmosphérique (Pa), le rayonnement global horizontal ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), le rayonnement direct normal ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), le rayonnement diffus horizontal ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Dans le cadre d'une comparaison avec des mesures expérimentales, la création du fichier météorologique est une étape clé du processus pour maîtriser au mieux les incertitudes qui lui sont liées [12]. C'est la raison pour laquelle des dispositions ont été prises pour la création d'un fichier

météo le plus fiable possible. Les mesures des vitesses et des différentes directions du vent ainsi que les mesures des températures sèches et humidités relatives de l'air de la localité où se fait l'étude sont obtenues à partir d'une station météorologique située sur le site de l'Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à Kamboinsé. Les Figure 7 et 8 montrent à titre d'exemple les courbes de la température et de l'humidité pendant la période du 11/10/2016 au 28/12/2016. Les données d'irradiations proviennent du Service SoDa (Solar radiation Data), l'un des plus importants fournisseurs par internet de données et de services relatifs au rayonnement solaire, qui les calcule avec un modèle mathématique.

### Température sèche air extérieur

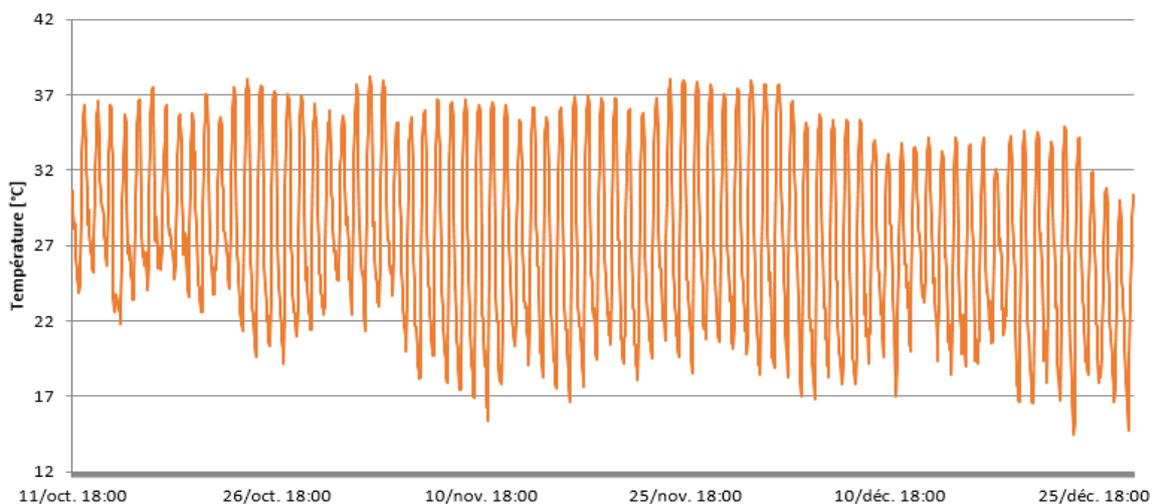


Figure 7 : Température sèche de l'air extérieur

### Humidité relative air extérieur

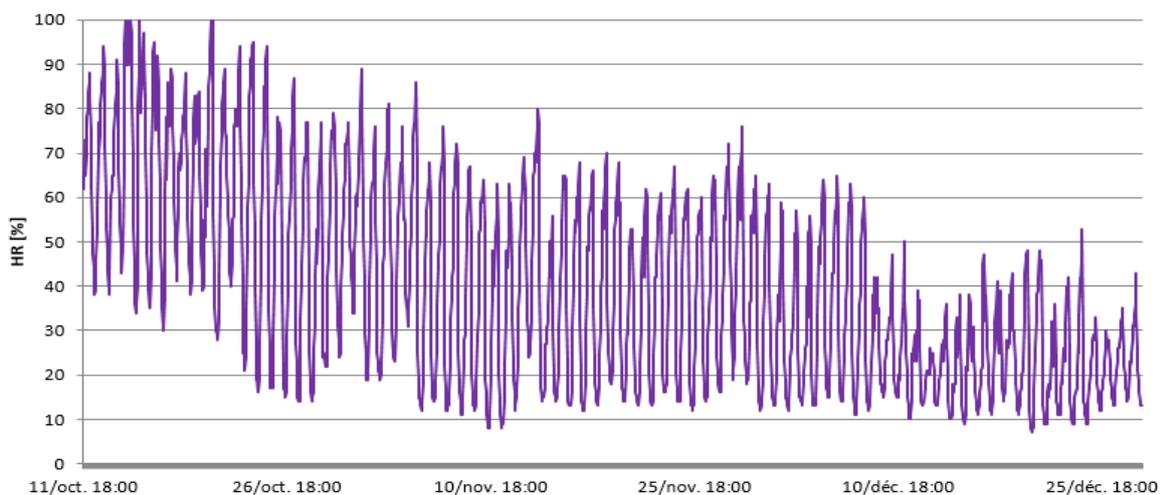


Figure 8 : Humidité relative de l'air extérieur

La température de rosée a été calculée à l'aide de la formule (3) [16] :

$$T_{rosée} = \sqrt[8]{H} [112 + (0,9 \times T)] + (0,1 \times T) - 112 \quad (3)$$

Avec

$T_{rosée}$	Point de rosée en °C
$T$	Température de bulbe sec en °C
$H$	Humidité relative [-]

Et l'intensité infrarouge horizontale du rayonnement a été calculée à l'aide de la formule (4) [17] :

$$Horizontal_{IR} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

Avec

$Horizontal_{IR}$	Intensité infrarouge horizontale du rayonnement en W/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Emissivité du ciel [-]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann = $5,6697 \times 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
$T$	Température de bulbe sec en K

L'émissivité du ciel est donnée par la formule (5) [17] :

$$\varepsilon = \left( 0,787 + 0,764 \ln \left( \frac{T_{rosée}}{273} \right) \right) \left( 1 + 0,0224N + 0,0035N^2 + 0,00028N^3 \right) \quad (5)$$

Avec

$T_{rosée}$	Température de rosée en K
$N$	Taux de couverture de ciel [-]

Pour ce qui est des autres paramètres (pression atmosphérique, taux de couverture totale du ciel, profondeur des précipitations liquides) ce sont les valeurs d'un fichier météo standard de 2005 de Ouagadougou qui ont été utilisées.

Ces données météo ont été traitées (transformation du fichier csv en fichier epw) pour servir de données d'entrée au programme de simulation du modèle détaillé du bâtiment.

#### IV.4 Saisie de la géométrie du bâtiment

Les formes géométriques et les dimensions du bâtiment pilote ont été modélisées à l'aide du modelleur 3D GOOGLE SKETCH'UP via le plug-in « OpenStudio » en se basant rigoureusement sur les plans ci-dessous (Figure 9) :

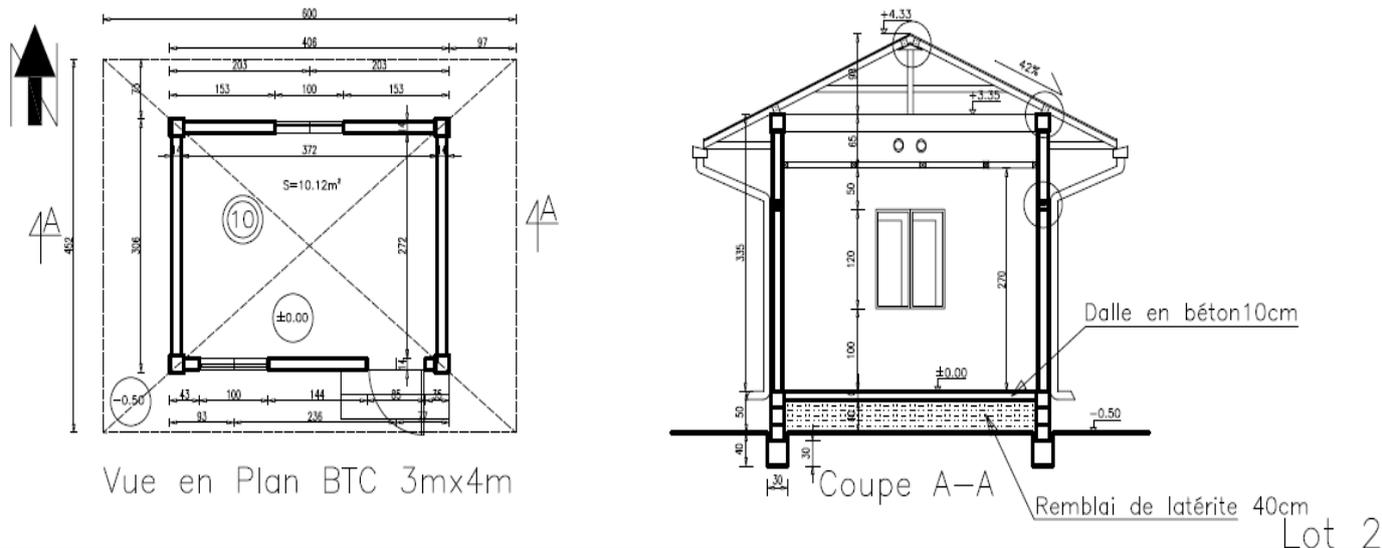


Figure 9 : Plans du bâtiment pilote

Cet outil permet donc une modélisation 3D du bâtiment (Figure 10). Il faut noter que cette modélisation prend également en compte l'orientation des différentes façades du bâtiment.

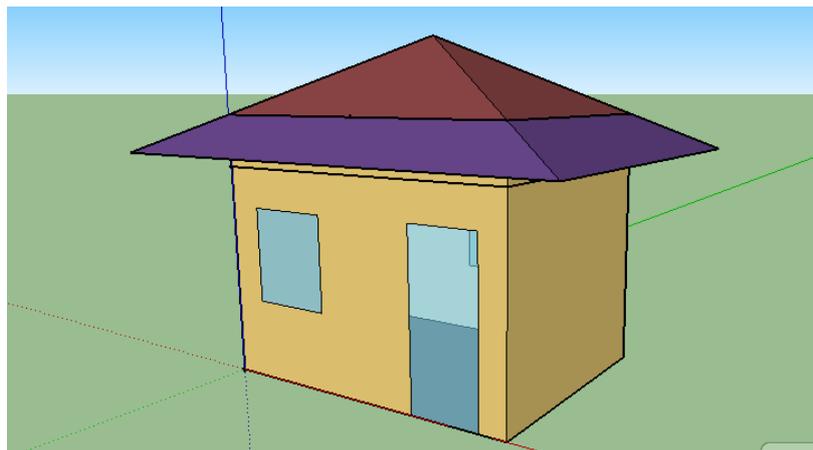


Figure 10 : Bâtiment pilote modélisé sur SKETCH'UP

## IV.5 Saisie des compositions des parois du bâtiment

La grande incertitude liée aux propriétés thermo-physiques des matériaux du bâtiment pilote nous a contraint à nous reposer en grande partie sur la littérature scientifique pour définir des plages dans lesquelles les bonnes valeurs devraient se trouver. L'approche consiste à fixer les premières valeurs qu'on fera ensuite varier dans leurs plages respectives pour réduire les écarts entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales.

Les plages considérées pour les différentes composantes du bâtiment sont ci-dessous présentées :

### ❖ La toiture

Tableau 2 : Propriétés physiques et thermiques de la tôle en acier galvanisé

Tôle en acier galvanisé				
Source	LEMC [12]	LEMC	Intervalle de calibration	Premier choix
Conductivité (W/m.°C)	50	50	50	50
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	7800	7800	7800	7800
Chaleur spécifique (kJ/(kg.°C))	450	115	450	450
Absorptivité solaire	0,45	0,9	0,4 - 0,52	0,45
Absorptivité visible	-	0,9	0,9	0,9
Absorptivité thermique	-	0,7	0,7	0,7

## ❖ Les murs

Tableau 3 : Propriétés physiques et thermiques du BTC

Source	BTC						
	Alain Micoulet (encadrant BTC) [18]	RECKNAGEL 1995	Isotop [19]	LEMC	LEMC	Intervalle de calibration	Premier choix
Conductivité (W/m.°C)	1,3	1,05	1,05	1,1 – 3,5	1,05	1,05 – 1,35	1,2
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2000	-	-	1700 - 2200	1870	1700 - 2200	1950
Chaleur spécifique (kJ/(kg.°C))	900	-	-	613 - 751	1337	613 -751	682
Absorptivité solaire	-	-	-	-	0,75	0,75	0,75
Absorptivité visible	-	-	-	-	0,75	0,75	0,75
Absorptivité thermique	-	-	-	-	0,8	0,8	0,8

## ❖ Le sol

Tableau 4 : Propriétés physiques et thermiques du béton

<b>Béton</b>					
<b>Source</b>	<b>Guide de l'écoconstruction [20]</b>	<b>LEMC [12]</b>	<b>LEMC</b>	<b>Intervalle de calibration</b>	<b>Premier choix</b>
Conductivité (W/m.°C)	-	1,4	1,7	1,4 – 1,7	1,4
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	-	2200	2300	2200 - 2300	2200
Chaleur spécifique (kJ/(kg.°C))	-	1001	850	850 - 1001	1001
Absorptivité solaire	0,6	-	0,65	0,6 – 0,65	0,65
Absorptivité visible	-	-	0,65	0,65	0,65
Absorptivité thermique	-	-	0,9	0,9	0,9

## ❖ Le plafond

Tableau 5 : Propriétés physiques et thermiques du contre-plaqué

Contre-plaqué							
Source	Energieplus [21]	A.JAMES CLARK School of engineering databases [22]	Concise encyclopedia of building and construction materials [23]	jjfelite [24]	LEMC	Intervalle de calibration	Premier choix
Conductivité (W/m.°C)	0,13 - 0,15	0,12	0,11 – 0,15	0,13	0,11	0,11 – 0,15	0,13
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400 - 600	545	-	-	400	400 - 600	500
Chaleur spécifique (kJ/(kg.°C))	1880	1215	-	2500	1300	1215 - 2500	1857,5
Absorptivité solaire	-	-	-	-	0,8	0,8	0,8
Absorptivité visible	-	-	-	-	0,8	0,8	0,8
Absorptivité thermique	-	-	-	-	0,9	0,9	0,9

❖ **Les fenêtres**

Les verres classiques (Regular Transparent Glass) utilisés pour nos fenêtres ont des épaisseurs allant de 3 mm à 5 mm, une conductivité de 0,9 W/m.°C, une transmittance solaire allant de 0,77 à 0,86 et une transmittance visible allant de 0,88 à 0,9 [25].

Puisque la variante « clear » proposée par la bibliothèque « glazing window materials » de « OpenStudio » a les caractéristiques similaires, nous pouvons en déduire que cette variante correspond au verre utilisé pour les fenêtres de notre bâtiment pilote.

❖ **La porte**

- La partie supérieure de la porte est faite du même verre que les fenêtres : la variante « clear » proposée par la bibliothèque « glazing window materials » de « OpenStudio ».
- La partie inférieure de la porte est constituée d'une lame d'air d'épaisseur 3 cm environ confinée par des fines lames de « métal F08 » (Tableau 6) proposée par la bibliothèque de « OpenStudio » d'épaisseur 0,8 mm [26].

Tableau 6 : Propriétés physiques et thermiques de la partie inférieure de la porte

Matériau	Surface métallique F08
Rugosité	Lisse (smooth)
Conductivité (W/m.K)	45,28
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	7824
Chaleur spécifique (J/kg.K)	500
Coefficient d'absorption du rayonnement solaire	0,7
Coefficient d'absorption du rayonnement thermique	0,9
Coefficient d'absorption du rayonnement visible	0,7

## IV.5 Modélisation de la convection et de la conduction

### IV.5.1 Modélisation de la convection interne et externe

Concernant les échanges convectifs, il y a plusieurs choix pour la modélisation des coefficients de convection dans EnergyPlus [10] qui propose plusieurs corrélations pour les surfaces intérieures et les surfaces extérieures. Nous avons considéré la corrélation TARP (Thermal Analysis Research Program) proposée par l'ASHRAE pour les surfaces intérieures et extérieures [12] (ANNEXE 1).

### IV.5.2 Modélisation de la conduction

La méthode des fonctions de transfert « CTFs » Conduction Transfer Function (ANNEXE 1) a été utilisée pour la résolution des équations de transfert de chaleur dans les parois, au plafond et au niveau de la toiture [12].

## IV.6 Modélisation des infiltrations dans la zone bâtiment et la zone comble

Open Studio propose deux méthodes permettant de prédire les débits d'air extérieur qui s'infiltrent à travers les ouvertures d'un bâtiment [10] :

- La méthode « Zone Infiltration : Design Flow Rate »
- La méthode « Zone Infiltration : Effective Leakage Area »

Compte tenu du manque d'information sur les données nécessaires à l'utilisation de la méthode « Zone Infiltration : Design Flow Rate », la méthode « Zone Infiltration : Effective Leakage Area » a été choisie.

Cette méthode est définie par une formule empirique (6) qui se base sur des données des tests de pressurisation (la différence de pression normalisée) :

$$Q_{infiltration} = F_{schedule} \times \frac{A_L}{1000} \times \sqrt{C_S \times \Delta T + C_W \times S_{wind}^2} \quad (6)$$

Avec

$Q_{infiltration}$	Débit d'air généré par infiltration [m <sup>3</sup> /s]
$F_{schedule}$	Planning d'infiltration défini par l'utilisateur [-]
$A_L$	Surface de fuite effective pour une différence de pression de 4Pa [cm <sup>2</sup> ]
$C_S$	Coefficient d'infiltration par tirage thermique (effet cheminée) [(L/s) <sup>2</sup> /(cm <sup>4</sup> K)]
$C_W$	Coefficient d'infiltration par l'effet du vent [(L/s) <sup>2</sup> /(cm <sup>4</sup> (m/s))]
$S_{wind}$	Vitesse du vent [m/s]
$\Delta T$	Différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur [K]

Cette équation fait intervenir un paramètre que nous ne connaissons pas a priori,  $A_L$ , qui est la surface de fuite effective pour une différence de pression de 4Pa. Pour déterminer cette surface, il est possible d'utiliser la table 1 : Effective air leakage areas (ANNEXE 2). Cette table donne pour différents

éléments de construction la surface de fuite effective par unité de surface de l'élément, en  $\text{cm}^2\text{m}^{-2}$ . Il est donc possible, grâce à cette équation, de modéliser les infiltrations d'air à travers les différents éléments de construction du bâtiment pilote.

On obtient alors pour notre cas les surfaces suivantes :

- $A_{L\_ZoneBatiment} = 59,58 \text{ cm}^2$  (ANNEXE 2) ;
- $A_{L\_ZoneComble} = 55,21 \text{ cm}^2$  (ANNEXE 3).

Et les coefficients suivants :

- $C_S = 0,000145$  (ANNEXE 4) ;
- $C_W = 0,000246$  (ANNEXE 4).

Cette méthode est parfaitement adaptée au calcul du débit d'infiltration d'air à travers les éléments mais ne convient pas à la modélisation du débit d'air à travers les alésages réalisés dans les murs du comble orientés au Nord et au Sud. En effet, la surface  $A_L$  ne correspond pas à la surface ouverte, mais à une surface équivalente pour une différence de pression fixée. On ne peut donc pas prendre la surface des alésages, car ce n'est pas le même paramètre. Et comme il s'agit d'une ouverture, on ne peut pas non plus s'appuyer sur la table 1 : Effective air leakage areas (ANNEXE 2) citée plus haut. Cette méthode n'est donc pas adaptée à la modélisation de la ventilation à travers les alésages. Il a donc fallu trouver un autre objet dans EnergyPlus permettant de modéliser un débit d'air à travers une ouverture de dimension connue.

## IV.7 Modélisation de la ventilation naturelle de la zone comble

Pour modéliser la ventilation à travers une surface ouvrante comme une porte ou une fenêtre, EnergyPlus propose quatre objets [27] :

- ZoneVentilation : DesignFlowRate ;
- ZoneVentilation : WindandStackOpenArea ;
- AirflowNetwork : MultiZone : Component : SimpleOpening ;
- AirflowNetwork : MultiZone :Component : DetailedOpening.

Chaque objet est étudié de façon à déterminer lequel répond au mieux à la problématique des alésages dans le comble du bâtiment pilote.

### ❖ ZoneVentilation : DesignFlowRate

Cet objet permet de calculer un débit d'air entre l'extérieur et une zone thermique de façon relativement simple. L'équation (7) intervenant dans cet objet est la suivante [10] :

$$Q_{ventilation} = V_{design} \times F_{schedule} \times \left[ A + B |T_{zone} - T_{ODB}| + C \times S_{wind} + D \times S_{wind}^2 \right] \quad (7)$$

Avec

$Q_{ventilation}$	Débit d'air généré par ventilation [ $m^3/s$ ]
$V_{design}$	Débit d'air dimensionné, calculé à partir de la surface de plancher, du nombre d'habitant, du taux de renouvellement d'air ou fixé [ $m^3/s$ ]
$F_{schedule}$	Planning d'infiltration défini par l'utilisateur [-]
$T_{zone}$	Température intérieure de la zone [K]
$T_{ODB}$	Température extérieure de bulbe sec [K]
$S_{wind}$	Vitesse du vent [m/s]
A	Coefficient constant
B	Coefficient de température [ $s^{-1}$ ]
C	Coefficient de vitesse [ $m^{-1}.s$ ]
D	Coefficient de vitesse quadratique [ $m^{-2}.s^2$ ]

Cette méthode présente deux difficultés majeures. La première est qu'il faut définir le paramètre  $V_{design}$ . Cependant, dans le cas du bâtiment pilote, on ne connaît pas le débit d'air réel. En utilisant cette méthode, il y aurait donc une grande incertitude sur ce paramètre.

D'autre part, on ne connaît pas les coefficients A, B, C et D. Par défaut, ces coefficients sont fixés à {1, 0, 0, 0}, ce qui aboutirait à un débit constant basé uniquement sur ce paramètre  $V_{design}$ , ne prenant pas en compte les conditions extérieures de température et de vitesse du vent. Cela ne représenterait donc pas la réalité.

Il serait possible d'utiliser des paramètres définis de façon empirique par la méthode BLAST : {0,606 ; 0,03636 ; 0,1177 ; 0}. Cependant, cela reste une approche empirique déterminée dans d'autres conditions climatiques, ce qui ne s'appliquerait pas nécessairement au cas du bâtiment pilote.

En conclusion, cette méthode présente trop d'incertitudes concernant plusieurs paramètres, ce qui ne la rend pas pertinente pour l'étude du bâtiment pilote. Cette méthode n'est donc pas retenue.

❖ **ZoneVentilation : WindAndStackOpenArea**

Cette méthode consiste à calculer le débit par tirage thermique et par effet du vent dans une zone thermique par l'équation (8) suivante [10] :

$$Q_{WindAndStack} = \sqrt{Q_w^2 + Q_s^2} \quad (8)$$

Avec

$Q_{WindAndStack}$	Débit d'air total généré par tirage thermique et l'effet du vent [m <sup>3</sup> /s]
$Q_w$	Débit d'air généré par l'effet du vent [m <sup>3</sup> /s]
$Q_s$	Débit d'air généré par tirage thermique [m <sup>3</sup> /s]

Le débit d'air généré par l'effet du vent est calculé grâce à l'équation (9) suivante :

$$Q_w = C_w \times A_{opening} \times F_{schedule} \times V \quad (9)$$

Avec

$Q_w$	Débit d'air généré par l'effet du vent [m <sup>3</sup> /s]
$C_w$	Effectivité de l'ouverture, paramètre calculé [-]
$F_{schedule}$	Planning d'infiltration défini par l'utilisateur [-]
$A_{opening}$	Surface d'ouverture [m <sup>2</sup> ]
$V$	Vitesse du vent, définie par le fichier météo [m/s]

L'effectivité de l'ouverture est un paramètre qui dépend de l'angle d'incidence du vent sur l'ouverture. Elle est calculée dans l'objet selon la formule (10) suivante :

$$C_w = 0,55 - 0,25 \times \frac{|EffectiveAngle - WindDirection|}{180} \quad (10)$$

Le débit  $Q_w$  prend donc en compte l'orientation des ouvertures dans le bâtiment. Cela permet de prendre en compte l'effet traversant à travers une zone, du fait des ouvertures de part et d'autre de celle-ci. Le débit d'air généré par tirage thermique est défini par l'équation (11) suivante :

$$Q_s = C_D \times A_{opening} \times F_{schedule} \times \sqrt{2g \times \Delta H_{NPL} \times \left( \frac{|T_{zone} - T_{ODB}|}{T_{zone}} \right)} \quad (11)$$

Avec

$Q_S$	Débit d'air généré par tirage thermique [ $m^3/s$ ]
$C_D$	Coefficient de décharge, calculé [-]
$F_{\text{schedule}}$	Planning d'infiltration défini par l'utilisateur [-]
$A_{\text{opening}}$	Surface d'ouverture [ $m^2$ ]
$g$	Accélération de la pesanteur [ $m/s^2$ ]
$\Delta H_{\text{NPL}}$	Ecart de hauteur entre le milieu de l'ouverture la plus basse et le niveau de pression neutre [m]
$T_{\text{zone}}$	Température intérieure de la zone [K]
$T_{\text{ODB}}$	Température extérieure de bulbe sec [K]

Le niveau de pression neutre dépend de la hauteur des ouvertures et/ou des hauteurs entre les ouvertures. Les alésages mesurent 10 cm de diamètre, ce qui ne permet pas de générer une différence de pression notable. D'autre part, nous avons à faire ici à un espace qui communique avec l'extérieur via des ouvertures alignées horizontalement (parallèle deux à deux). Cela signifie que s'il y a un effet de tirage, il devra être proportionnelle non pas à la différence d'altitude entre l'ouverture la plus basse et celle des alésages comme ça aurait été le cas s'il y avait eu d'autres ouvertures en dessous de celles des alésages mais il devra plutôt être proportionnelle à la hauteur de l'ouverture de nos orifices. De plus, d'après l'équation (12) [28], la hauteur de plan neutre maximale qu'on pourrait avoir est la moitié de la hauteur de l'ouverture, soit 0,05 m dans notre cas.

$$\frac{H_n}{H_c} = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_\infty}{T_c}\right)^{1/3}} \quad (12)$$

Avec

$T_c$	Température de l'air de la zone en K
$T_\infty$	Température de l'air extérieur en K
$H_n$	Hauteur de l'ouverture en m
$H_c$	Hauteur de plan neutre en m

Nous allons considérer pour un début qu'il n'y a donc pas de paramètre  $\Delta H_{\text{NPL}}$ , il n'y a donc pas de tirage thermique dans le bâtiment pilote :  $Q_S = 0 \text{ m}^3/s$

Donc  $Q_{\text{WindAndStack}} = Q_W$

Ce modèle ZoneVentilation : WindAndStackOpenArea pourrait donc être utilisé pour modéliser le flux d'air à travers les alésages dans le comble de notre bâtiment pilote.

#### ❖ **AirflowNetwork :SimpleOpening**

Cet objet spécifie les propriétés du flux d'air à travers une fenêtre, une porte ou une baie-vitrée, quand elles sont ouvertes et fermées. Pour que le modèle fonctionne, ces ouvertures doivent être verticales ou quasiment verticales. En effet, le modèle considère que la différence de pression à travers l'ouverture est une fonction de la hauteur de l'ouverture qui varie du bas vers le haut, de façon à ce qu'un flux à double sens puisse apparaître si les conditions s'y prêtent [27].

Ce modèle est donc adapté à la modélisation des grandes ouvertures, où un gradient de pression en fonction de la hauteur peut apparaître. Dans le cas des alésages du comble, ces derniers mesurent 10 cm de diamètre, il est donc possible de négliger le gradient de pression.

Cette modélisation n'est donc pas adaptée au cas d'étude du bâtiment pilote.

#### ❖ **AirflowNetwork :DetailedOpening**

Ce modèle est la version plus poussée de AirflowNetwork : SimpleOpening. Il prend en compte la différence de pression et la densité de l'air comme fonction de la hauteur au niveau de l'ouverture, de façon à ce qu'un flux à triple sens puisse apparaître si les conditions s'y prêtent [27].

Cette modélisation n'est donc pas adaptée non plus au cas d'étude du bâtiment pilote.

**En conclusion, il apparaît que la meilleure fonction à utiliser pour modéliser les entrées d'air par les alésages dans le comble est l'objet ZoneVentilation : WindAndStackOpenArea.**

## **IV.8 Comparaison des résultats de simulation aux mesures expérimentales**

Les études ont été menées sur un bâtiment pilote de 2iE (Figure 4). Le bâtiment pilote a été instrumenté avec des enregistreurs miniaturisés programmables de température (thermopuce) et d'humidité relative (hygropuce) de Waranet Solution (ANNEXE 5). Au total, cinq thermopuces de type G (quatre pour la mesure des températures des quatre faces internes des murs de notre bâtiment et une autre pour l'air du comble) et une thermopuce de type TH (pour la température et l'humidité relative de l'air du bâtiment) ont été utilisées pour le monitoring du bâtiment pilote. Les thermopuces chargées de mesurer les températures des faces internes des murs étaient isolées par des morceaux de laines de verre et l'ensemble était relié au mur par du ruban adhésif (ANNEXE 5). Tous ces enregistreurs étaient situés à environ 1 m du sol à l'exception de celui du comble qui était situé à

40 cm de la partie supérieure du plafond (ANNEXE 6). La récolte des données a été effectuée via le logiciel de contrôle des mesures « Warito II ».

Ainsi, la comparaison est focalisée sur l'humidité relative et la température de l'air intérieur du bâtiment, sur la température de l'air intérieur du comble et sur les températures des surfaces intérieures des murs Nord, Sud, Ouest et Est. La validation de ces paramètres devrait permettre la validation du modèle. Les figures de l'annexe 7 montrent les courbes de comparaison des résultats de simulation du modèle de référence aux mesures expérimentales. On peut observer que les courbes des résultats de simulation et celles des mesures se comportent de façon similaire, elles ont l'air d'être assez en phase.

Par contre, les écarts entre ces courbes sont plutôt importants, surtout les écarts des courbes d'humidité relative.

Dans l'ensemble, on note que les prédictions du modèle sont plus mauvaises (écarts les plus importants entre les mesures et les résultats de simulation) en l'absence de rayonnement solaire. Ce qui pourrait signifier que le modèle prédit mal les situations de refroidissement radiatif du bâtiment où ce dernier devrait perdre de la chaleur par émission de rayonnement infrarouge au profit du ciel en particulier. On doit sûrement cette limite du modèle aux manques d'informations sur la température du ciel (13) [17], au manque de données sur le taux de couverture du ciel.

$$T_{ciel} = \left( \frac{Horizontal_{IR}}{\sigma} \right)^{0,25} \quad (13)$$

Avec

$T_{ciel}$	Température du ciel en K
$Horizontal_{IR}$	Intensité infrarouge horizontale du rayonnement en W/m <sup>2</sup>
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann = 5,6697×10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>

L'évaluation de notre modèle à travers les NMBE, les CVRMSE, les  $R^2$ , les écarts maximaux, les écarts minimaux et écarts moyens nous donnent les résultats ci-dessous (Tableau 7) :

Tableau 7 : Evaluation des critères de validation du modèle de référence

	Température air intérieur	Humidité air intérieur	Température air du comble	Température mur Est	Température mur Ouest	Température mur Sud	Température mur Nord
NMBE	13,59	-25,37	7,66	7,63	4,53	7,71	6,88
CVRMSE	14,5	38,9	11,98	9,49	10,61	10,23	9,4
$R^2$	0,92	0,93	0,9	0,9	0,82	0,91	0,84
Ecart maximale	-0,73	36,46	4,84	2,41	10,55	2,56	2,67
Ecart minimale	-7,47	-7,56	-6,3	-6,04	-6,47	-6,15	-5,58
Ecart moyen	4,27	8,68	3,17	2,48	2,9	2,85	2,38

**NB :** Pour les paramètres d'évaluation des critères de validation (NMBE, CVRMSE et  $R^2$ ) :

- Les valeurs en noir sont celles qui respectent les limites fixées par l'IPMVP et celles fixées par l'ASHRAE
- Les valeurs en bleu sont celles qui ont dépassé les limites fixées par l'IPMVP mais respectent quand même celles de l'ASHRAE
- Les valeurs en rouge sont celles qui ont non seulement dépassé les limites fixées par l'IPMVP mais aussi celles fixées par l'ASHRAE

Ces critères sont hors des recommandations de l'IPMVP qui préconise 5% et 20% respectivement pour le NMBE et le CVRMSE avec  $R^2$  supérieur à 0,9. Après évaluation des trois critères pour chaque paramètre analysé, nous considérons que ce modèle n'est pas valide. L'étape suivante consistera à appliquer une méthode de calibration au modèle.

## V. Calibration du modèle du bâtiment pilote

### V.1 Méthodologie de calibration

Comme souligné plus haut dans les généralités, la calibration est un processus indispensable en STD car une bonne calibration permet d'assurer des résultats de simulation de qualité. Cette calibration consiste ici à identifier parmi les différents paramètres d'entrée du modèle (paramètres de géométrie, fichier météo, modèles mathématiques...) ceux qui pourraient être à l'origine des écarts entre résultats de simulation et mesures afin d'adapter ces paramètres en les faisant varier dans des plages bien définies pour que le modèle puisse donner des résultats qui reflètent au mieux la réalité.

Etant donné que nous estimons que la connaissance de la géométrie de notre bâtiment est parfaite, que les hypothèses de modélisation et les méthodes de résolution choisies sont suffisamment bonnes), notre méthode de calibration sera par conséquent axée sur la recherche des meilleures valeurs possibles des paramètres thermo-physiques et optiques des matériaux, de la hauteur de pression neutre du modèle de ventilation naturelle et des surfaces de fuite effective permettant le calcul des débits d'infiltration. Les intervalles définis pour la variation des paramètres thermo-physiques et optiques ont été définis plus haut au niveau de la saisie des compositions des parois du bâtiment et ceux définis pour la variation des surfaces de fuite effective ont été définis sur la base des résultats des calculs d'estimation des surfaces de fuite effective du bâtiment (annexe 2 et annexe 3).

Puisque nous n'avons pas à notre disposition des outils nous permettant de balayer ces intervalles de façon continue, nous avons dû tester pour chaque paramètre des valeurs choisies aléatoirement dans son intervalle afin de nous faire une idée de l'influence qu'il a sur les résultats de simulation et faire le meilleur choix possible.

Ainsi, la méthodologie adoptée pour ce processus de calibration consistera à choisir des valeurs optimales pour chacun des paramètres incertains identifiés en suivant les étapes de la figure ci-dessous (Figure 11) :

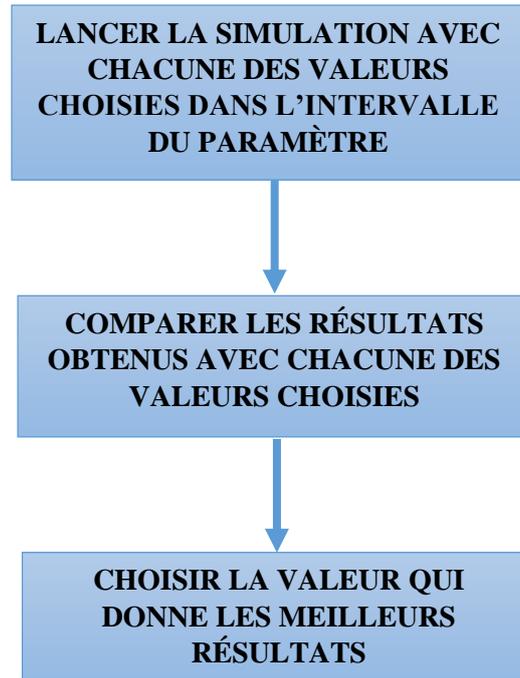


Figure 11 : Méthodologie de calibration

## V.2 Application de la méthodologie de calibration

Il a été question comme dit plus haut de tester pour tous les paramètres ciblés des valeurs choisies aléatoirement dans leur intervalle de calibration respectif. La fiabilité des valeurs des paramètres thermo-physiques et optiques des matériaux tels que le béton, le contre-plaqué ou les BTC a été évaluée en observant l'effet que leur variation engendre sur les écarts entre températures mesurée et simulée de l'air de la zone car il s'agit ici de matériaux qui sont directement en contact avec cet air.

Le choix de la meilleure valeur de l'absorptivité solaire de la tôle par contre s'est fait en observant l'effet de sa variation sur les écarts entre températures mesurée et simulée de l'air du comble car ce matériau est directement en contact avec cet air.

De même, la surface effective de fuite du comble et la hauteur de pression neutre de la ventilation naturelle du comble ont été évalués sur la base des écarts entre températures mesurée et simulée de l'air du comble tandis que la surface effective de fuite du bâtiment a été évaluée sur la base des écarts entre températures mesurée et simulée de l'air de la zone. Ces analyses nous ont permis d'obtenir les valeurs optimisées présentées ci-dessous (Tableau 8) :

Tableau 8 : Plage d'incertitude et valeurs des paramètres trouvées après optimisation

<b>Paramètre de calibration</b>	<b>Intervalle de calibration</b>	<b>Valeur initiale</b>	<b>Valeur optimisée</b>
Ecart de hauteur entre le milieu de l'ouverture la plus basse et le niveau de pression neutre (m)	0 - 0,05	0	0,05
Surface effective de fuite comble (cm <sup>2</sup> )	14,25 - 107,45	55,21	107,45
Surface effective de fuite zone bâtiment (cm <sup>2</sup> )	19,64 - 129,76	59,58	129,76
Absorptivité solaire de la tôle d'acier galvanisé (-)	0,4 - 0,52	0,45	0,42
Absorptivité solaire du béton (-)	0,6 - 0,65	0,65	0,6
Conductivité thermique du béton (W/m.K)	1,4 - 1,7	1,4	1,4
Masse volumique du béton (kg/m <sup>3</sup> )	2200 - 2300	2200	2200
Chaleur spécifique du béton (J/kg.K)	850 - 1001	1001	850
Conductivité thermique du BTC (W/m.K)	1,05 - 1,35	1,2	1,35
Masse volumique du BTC (kg/m <sup>3</sup> )	1700 - 2200	1950	2200
Chaleur spécifique du BTC (J/kg.K)	613 - 751	682	751
Conductivité thermique du contre-	0,11 - 0,15	0,13	0,15

plaqué (W/m.K)			
Masse volumique du contre-plaqué (kg/m <sup>3</sup> )	400 - 600	500	600
Chaleur spécifique du contre-plaqué (J/kg.K)	1215 - 2500	1857,5	2500

### V.3 Comparaison des résultats de simulation aux mesures expérimentales après calibration

Les figures de l'annexe 8 montrent les courbes de comparaison des résultats de simulation du modèle calibré aux mesures expérimentales. On peut observer qu'en dehors des petites réductions d'écarts au niveau des températures, les courbes n'ont pas beaucoup changé par rapport à celles du modèle de référence.

L'évaluation du modèle calibré est résumée dans le tableau 9.

Tableau 9 : Evaluation des critères de validation du modèle après calibration

	Température air intérieur	Humidité air intérieur	Température air du comble	Température mur Est	Température mur Ouest	Température mur Sud	Température mur Nord
NMBE	13,05	-25,31	7,74	7,08	3,69	6,88	6,42
CVRMSE	13,49	38,89	10,82	7,99	7,78	8,14	7,66
R <sup>2</sup>	0,94	0,93	0,91	0,93	0,9	0,95	0,9
Ecart maximale	-1,5	35,64	3,63	1,71	8,97	1,38	1,57
Ecart minimale	-6,68	-8,11	-5,62	-5,16	-5,47	-5,01	-4,55
Ecart moyen	4,09	8,75	2,83	2,21	2,08	2,31	1,97

**NB :** Pour les paramètres d'évaluation des critères de validation (NMBE, CVRMSE et R<sup>2</sup>) :

- Les valeurs en noir sont celles qui respectent les limites fixées par l'IPMVP et celles fixées par l'ASHRAE
- Les valeurs en bleu sont celles qui ont dépassé les limites fixées par l'IPMVP mais respectent quand même celles de l'ASHRAE
- Les valeurs en rouge sont celles qui ont non seulement dépassé les limites fixées par l'IPMVP mais aussi celles fixées par l'ASHRAE

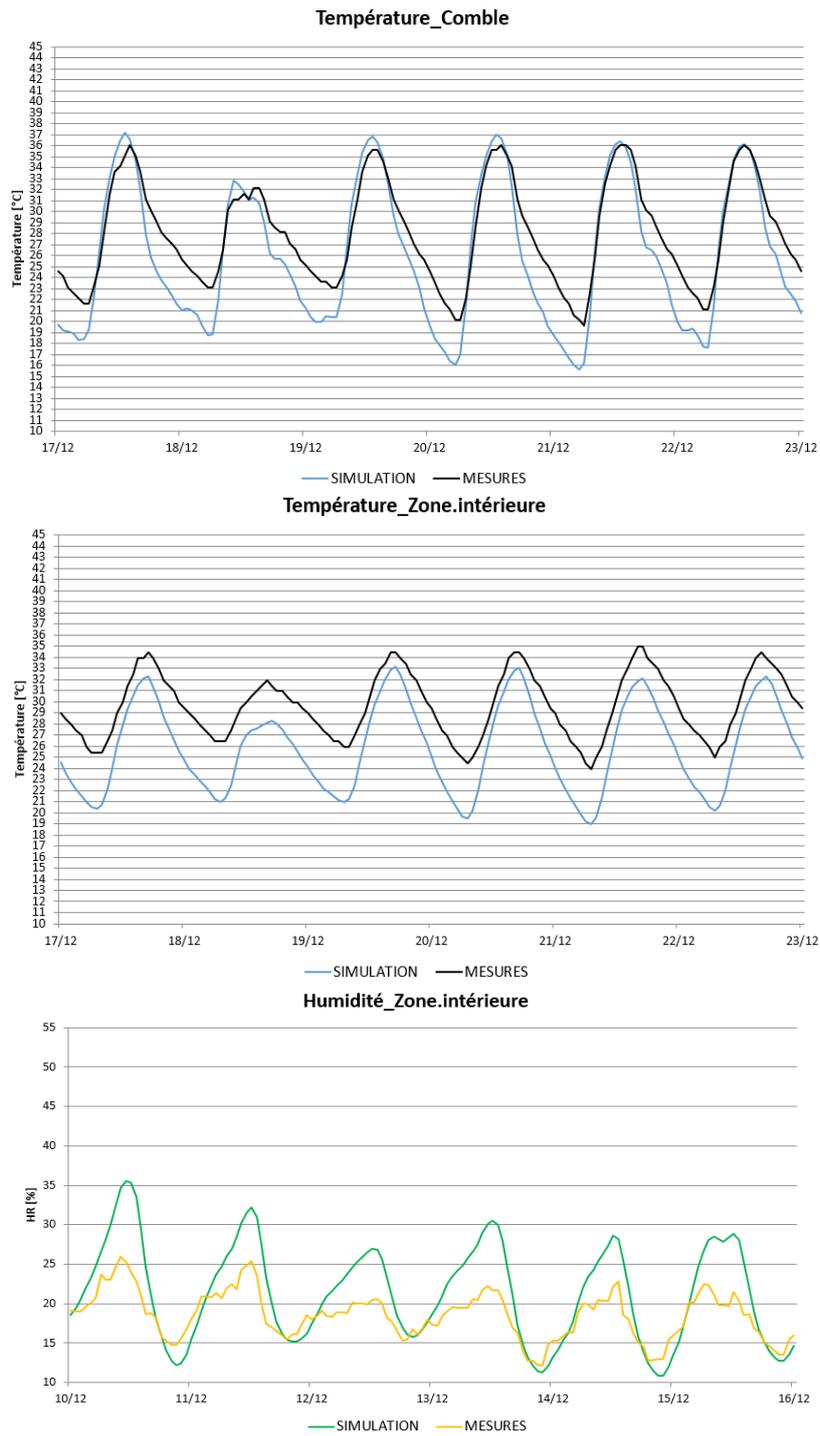


Figure 12 : Courbes des températures et humidité relative de l'air intérieur

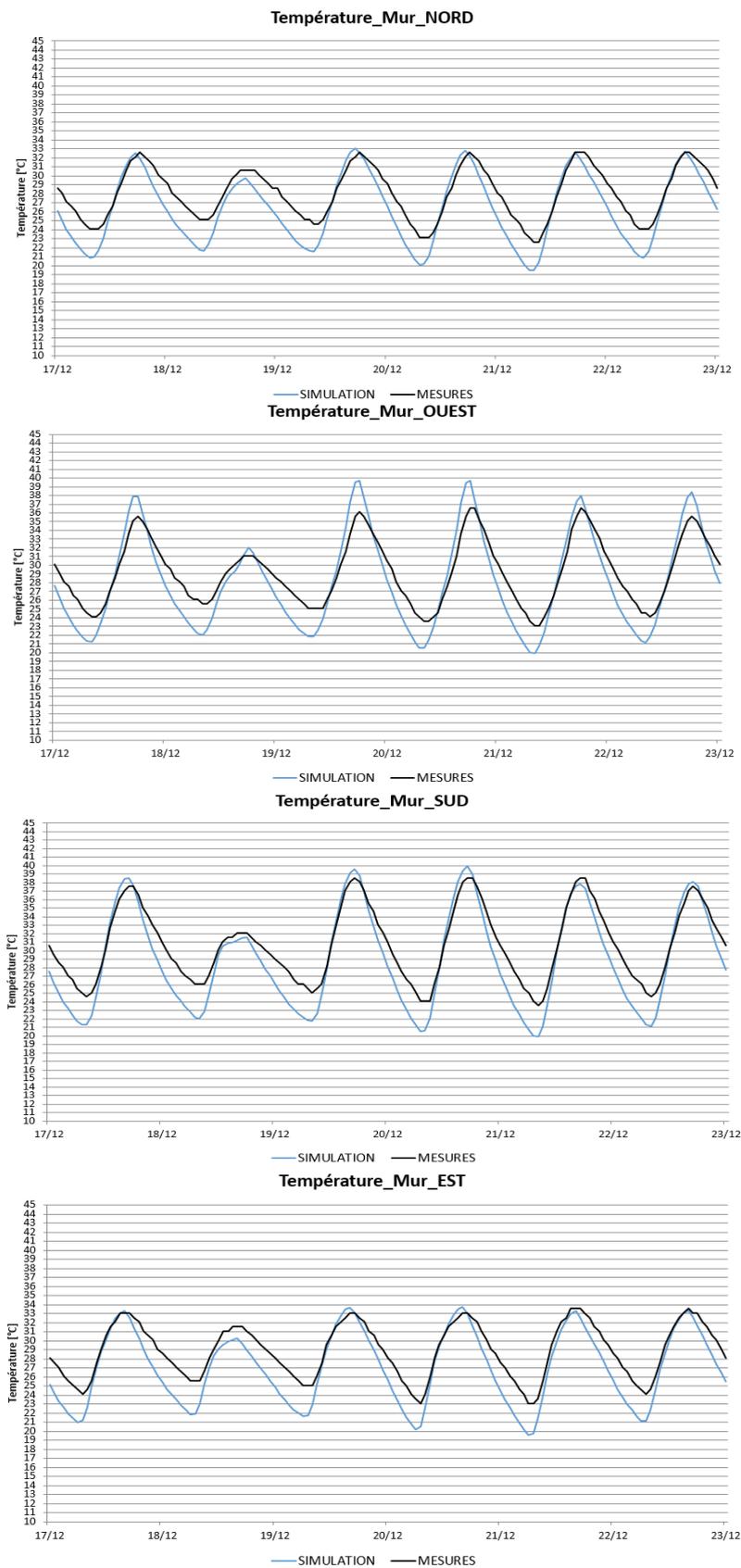


Figure 13 : Courbes des températures des murs mesurés et simulés après calibration

Ainsi, en dehors de la NMBE de la température de l'air intérieur, de la NMBE et de la CVRMSE de l'humidité de l'air intérieur, tous les autres critères restent dans les plages des recommandations de l'ASHRAE. Nous pouvons donc en déduire que notre modèle donne des prédictions suffisamment intéressantes. Cependant, les trois paramètres hors plage mettent en évidence l'insuffisance de ces résultats qui est dû à de nombreux facteurs :

- **Notre connaissance limitée des propriétés thermo-physiques et optiques des matériaux constitutifs du bâtiment pilote sur lequel a été mené notre étude.**

En effet, tous les paramètres de ces matériaux sont des paramètres incertains mais nous avons seulement choisi ceux sur lesquels nous avons suffisamment d'information pour définir des plages fiables. En plus quand on parle de la fiabilité de ces plages, c'est également avec des réserves car une bonne partie des valeurs des paramètres de calibration a été déduite de la littérature scientifique au lieu d'être mesurées par nous-même comme il aurait fallu procéder pour un travail plus efficace.

- **Nous n'avons pas pu modéliser le remblai de latérite car nous n'avons pas pu récolter assez d'information sur sa structure pour estimer ses propriétés thermo-physiques et optiques.**
- **Notre fichier météo a été en partie constitué de données standards sans aucune garantie qu'elles reflètent correctement la réalité et les irradiances ont été calculées et non mesurées**

## Conclusion et perspectives

Rendu au terme de notre étude qui a porté sur la validation d'un modèle de simulation thermique dynamique d'un bâtiment en évolution libre, nous pouvons affirmer qu'élaborer un modèle dont les prédictions sont suffisamment fiables pour qu'il soit validé est une tâche extrêmement compliquée. Après avoir créé le modèle du bâtiment pilote objet de notre étude sur Energyplus, nous avons mené une démarche afin d'amener les prédictions de notre modèle à approcher au mieux les mesures réelles. Cette démarche qui consistait essentiellement à faire varier la valeur des paramètres incertains dans des plages bien définies au préalable nous a permis d'améliorer la précision des prédictions du modèle de référence mais ces prédictions restent perfectibles. Nous retenons de cette étude que la précision des prédictions d'un modèle est intimement liée à la qualité de ses données d'entrée car c'est à cause du manque d'information sur les propriétés thermo-physiques et optiques des matériaux de construction d'une part et de l'absence de certaines données météorologiques d'autre part que notre méthodologie de calibration a été limitée. Ce constat nous amène à dégager les perspectives suivantes à notre travail :

- **Mesurer les propriétés thermo-physiques et optiques des matériaux utilisés**
- **Mesurer le maximum de paramètres météorologiques nécessaires à l'étude sur le site d'étude**

## Bibliographie

- [1] Stéphanie BONTEMPS et al., La fiabilité d'outils de simulation thermique dynamique dans le contexte de bâtiments basse consommation, 2011.
- [2] ONU habitat, «<http://unhabitat.org/urban-themes-2/>,» [En ligne].
- [3] [En ligne]. Available: [http://www.unit.eu/cours/bim/u04/co/u04\\_170\\_4-1-5-5.html](http://www.unit.eu/cours/bim/u04/co/u04_170_4-1-5-5.html). [Accès le 3 Août 2017].
- [4] «Environnement numérique en AEC,» Janvier 2012. [En ligne]. Available: [http://www.unit.eu/cours/bim/u04/co/u04\\_170\\_4-1-5-5.html](http://www.unit.eu/cours/bim/u04/co/u04_170_4-1-5-5.html). [Accès le 15 Août 2017].
- [5] «CEGIBAT L'expertise efficacité énergétique de GRDF,» 26 Avril 2017. [En ligne]. Available: <https://cegibat.grdf.fr/dossier-techniques/conception-batiments/simulation-thermique-dynamique>. [Accès le 15 Août 2017].
- [6] DELMAS, Marion DUPRE et Thomas, La Simulation Thermique Dynamique, Dauchez Payet eco initiatives, 2014.
- [7] Jean Pascal ROCHE, «XPAIR,» 01 Décembre 2013. [En ligne]. Available: [https://conseils.xpair.com/actualite\\_experts/simulation-thermique-dynamique.htm](https://conseils.xpair.com/actualite_experts/simulation-thermique-dynamique.htm). [Accès le 15 Août 2017].
- [8] Actu-Environnement, 2018. [En ligne]. Available: <https://www.actu-environnement.com/materiels-services/produit/logiciel-trnsys-cstb-simulation-thermique-batiments-et-systemes-2473.php>. [Accès le 23 Janvier 2018].
- [9] The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California, Getting Started with EnergyPlus, THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2010.
- [10] U.S Department of Energy, Engineering Reference, THE UNIVERSITY OF ILLINOIS OR THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY., 2016.
- [11] J. Brouns, «Ecotropy,» 22 Septembre 2016. [En ligne]. Available: <https://www.ecotropy.fr/2016/09/simulation-thermique-batiments/>. [Accès le 16 Août 2017].

- [12] M. KABORE, «Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne,» 2iE, 2015.
- [13] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers), Guideline 14-2002 : Measurement of Energy and Demand Savings, Atlanta, 2002.
- [14] IPMVP, Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings Volume I, 2002..
- [15] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers), ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 13 : Indoor environmental modeling, Atlanta, 2009.
- [16] [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Point\\_de\\_ros%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_de_ros%C3%A9).
- [17] U.S Department of Energy, Input Output Reference, THE UNIVERSITY OF ILLINOIS OR THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY., 2016.
- [18] [En ligne]. Available: [www.associationlevillage.fr](http://www.associationlevillage.fr).
- [19] «isoltop,» [En ligne]. Available: [www.isoltop.com](http://www.isoltop.com).
- [20] Agence Regionale de l'Environnement en Lorraine, Guide de l'écoconstruction.
- [21] [En ligne]. Available: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15348#c20932607>.
- [22] A. JAMES CLARCK School of engineering, databases. [En ligne]. Available: <http://www.firebid.umd.edu/material-database.php>.
- [23] «Concise encyclopedia of building and construction materials,» [En ligne]. Available: <https://books.google.bf> “concise encyclopedia of building and construction materials”.
- [24] «jfelite,» 2017. [En ligne]. Available: <http://www.jfelite.com/artice/proprietes-thermiques-de-contreplaque.html>. [Accès le 25 07 2017].
- [25] [En ligne]. Available: [http://new-learn.info/packages/clear/.../matrix/.../glazing\\_materials.html](http://new-learn.info/packages/clear/.../matrix/.../glazing_materials.html). [Accès le 04 Juillet 2017].
- [26] R. TCHOUATEU, «Etude et développement d'un écohabitat sahélien à haute efficacité énergétique,» 2iE, 2013.
- [27] «bigladder SOFTWARE,» The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory,

1996-2014 . [En ligne]. Available: <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/input-output-reference/page-029.html#airflownetworkmultizonecomponentsimpleopening>.

- [28] J. H. Klote, A General Routine for Analysis of Stack Effect, National Institute of Standards and Technology, 1991.
- [29] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers), «CHAPTER 26 VENTILATION AND INFILTRATION,» chez Fundamentals Handbook, 2001, p. 519.
- [30] «Waranet Solutions,» 2016. [En ligne]. Available: <https://www.waranet-solutions.com/fr/tracabilite/thermopuces-et-hygropuces>. [Accès le 30 Août 2017].

## Annexes

### ANNEXE 1 : MODELES DE TRANSFERT DE CHALEUR

#### ❖ Modèle de transfert de chaleur par convection

Le coefficient de convection total est la somme de deux composants.

$$h_c = h_f + h_n \quad (\text{A.1})$$

$h_f$  le coefficient de convection forcé ;

$h_n$  le coefficient de convection naturel.

La valeur du coefficient de convection extérieur, est étroitement liée à la vitesse du vent et peut être estimée, par la corrélation suivante :

$$h_f = 2,53W_f R_f \left( \frac{PV_z}{A} \right)^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

$W_f$  prend en compte l'orientation par rapport au vent. Il prend la valeur 1 pour les côtés exposés au vent et 0,5 pour ceux sous le vent.

Le paramètre  $R_f$  définit la rugosité de la surface, il prend les valeurs indiquées dans le tableau 8.

Tableau 10 : Coefficient de rugosité

Rugosité	Très rugueux	Rugueux	Peu rugueux	Peu lisse	Lisse	Très lisse
$R_f$	2,17	1,67	1,52	1,13	1,11	1

- Pour une surface verticale

$$h = 1,31|\Delta T|^{1/3} \quad (\text{A.3})$$

- Pour  $\Delta T < 0$  et la surface est orientée vers le haut ou bien  $\Delta T > 0$  et la surface est orientée vers le bas ;

$$h = \frac{9,482|\Delta T|^{1/3}}{7,283 - |\cos \Sigma|} \quad (\text{A.4})$$

- Pour  $\Delta T > 0$  et la surface est orientée vers le haut ou bien  $\Delta T < 0$  et la surface est orientée vers le bas

$$h = \frac{1,81|\Delta T|^{1/3}}{1,382 + |\cos \Sigma|} \quad (\text{A.5})$$

$\Delta T$  la différence entre la température de l'air et celle de la paroi ;

$\Sigma$  l'inclinaison de la surface.

### ❖ Modèle de transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction en régime dynamique à travers la paroi est réalisé à l'aide de la méthode des "Conduction Transfer Functions" (CTFs). Pour le calcul des fonctions de transferts EnergyPlus se base sur la méthode des représentations d'état. Lorsque la représentation est appliquée à l'analyse des équations de la conduction de chaleur en régime transitoire, et que le domaine de l'espace est discrétisé au moyen de la méthode des différences finies on obtient la formulation suivante :

$$\frac{d \begin{bmatrix} T_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ T_n \end{bmatrix}}{dx} = [A] \begin{bmatrix} T_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ T_n \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{bmatrix} q_i'' \\ q_o'' \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} T_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ T_n \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Avec ( $T_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ ) : les variables d'état étant les températures aux nœuds discrets ;

$T_i$  et  $T_o$  : les entrées, la température intérieure et extérieure ;

$q_i''$  et  $q_o''$  : le flux de chaleur à travers les deux surfaces.

Pour une paroi donnée, le flux de chaleur des faces à l'intérieur  $q_{ki}''$  et à l'extérieur  $q_{ko}''$  sont les suivantes :

$$q_{ki}''(t) = -Z_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_0 T_{0,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{0,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} \phi_j q_{ki,t-j\delta}'' \quad (\text{A.8})$$

$$q_{ko}''(t) = -Y_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_0 T_{0,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{0,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} \phi_j q_{ko,t-j\delta}'' \quad (\text{A.9})$$

- $X_j$  coefficient de facteur de réponse extérieur ;
- $Y_j$  coefficient de facteur de réponse aux intersections ;
- $Z_j$  coefficient de facteur de réponse de l'intérieur ;
- $T_i$  la température de la paroi interne ;  $\phi_j$  : coefficient de facteur de réponse du flux de chaleur ;
- $T_0$  la température de la paroi externe ;
- $q_{ko}''$  flux de chaleur par conduction sur la paroi externe ;
- $q_{ki}''$  flux de chaleur par conduction sur la paroi interne ;
- $\delta$  le pas de temps.

## ANNEXE 2 : CALCUL DE LA SURFACE EFFECTIVE DE FUITE DANS LA ZONE BATIMENT

L'ASHRAE Fundamentals Handbook donne des valeurs minimale, maximale et de meilleure estimation pour plusieurs types de composants constructifs pour les bâtiments résidentiels de faible hauteur [29]. La zone bâtiment est constituée de mur en BTC et de sol en béton. Les éléments considérés selon la table 1 sont mis en évidence sur les extraits de la Figure 9 ci-dessous :

### Ventilation and Infiltration

26.15

Table 1 Effective Air Leakage Areas (Low-Rise Residential Applications Only)

	Units (see note)	Best Estimate	Mini- mum	Maxi- mum		Units (see note)	Best Estimate	Mini- mum	Maxi- mum
<b>Ceiling</b>					<b>Piping/Plumbing/Wiring penetrations</b>				
General	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.8	0.79	2.8	Uncaulked	cm <sup>2</sup> ea	6	2	24
Drop	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.19	0.046	0.19	Caulked	cm <sup>2</sup> ea	2	1	2
<b>Ceiling penetrations</b>					<b>Vents</b>				
Whole-house fans	cm <sup>2</sup> ea	20	1.6	21	Bathroom with damper closed	cm <sup>2</sup> ea	10	2.5	20
Recessed lights	cm <sup>2</sup> ea	10	1.5	21	Bathroom with damper open	cm <sup>2</sup> ea	20	6.1	22
Ceiling/Flue vent	cm <sup>2</sup> ea	31	28	31	Dryer with damper	cm <sup>2</sup> ea	3	2.9	7
Surface-mounted lights	cm <sup>2</sup> ea	0.82			Dryer without damper	cm <sup>2</sup> ea	15	12	34
Chimney	cm <sup>2</sup> ea	29	21	36	Kitchen with damper open	cm <sup>2</sup> ea	40	14	72
<b>Crawl space</b>					Kitchen with damper closed	cm <sup>2</sup> ea	5	1	7
General (area for exposed wall)	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	10	8	17	Kitchen with tight gasket	cm <sup>2</sup> ea	1		
200 mm by 400 mm vents	cm <sup>2</sup> ea	129			<b>Walls (exterior)</b>				
<b>Door frame</b>					Cast-in-place concrete	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.5	0.049	1.8
General	cm <sup>2</sup> ea	12	2.4	25	Clay brick cavity wall, finished	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.68	0.05	2.3
Masonry, not caulked	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	5	1.7	5	Precast concrete panel	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.2	0.28	1.65
Masonry, caulked	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1	0.3	1	Low-density concrete block, unfinished	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	3.5	1.3	4
Wood, not caulked	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.7	0.6	1.7	Low-density concrete block, painted or stucco	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.1	0.52	1.1
Wood, caulked	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.3	0.1	0.3	High-density concrete block, unfinished	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.25		
Trim	cm <sup>2</sup> /lmc	1			Continuous air infiltration barrier	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.15	0.055	0.21
Jamb	cm <sup>2</sup> /lmc	8	7	10	Rigid sheathing	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.35	0.29	0.41
Threshold	cm <sup>2</sup> /lmc	2	1.2	24	<b>Window framing</b>				
<b>Doors</b>					Masonry, uncaulked	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	6.5	5.7	10.3
Attic/crawl space, not weatherstripped	cm <sup>2</sup> ea	30	10	37	Masonry, caulked	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.3	1.1	2.1
Attic/crawl space, weatherstripped	cm <sup>2</sup> ea	18	8	18.5	Wood, uncaulked	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.7	1.5	2.7
Attic fold down, not weatherstripped	cm <sup>2</sup> ea	44	23	86	Wood, caulked	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.3	0.3	0.5
Attic fold down, weatherstripped	cm <sup>2</sup> ea	22	14	43					
<b>Electrical outlets/Switches</b>					Double-hung with pressurized track, weatherstripped	cm <sup>2</sup> /lmc	0.48	0.39	0.56
No gaskets	cm <sup>2</sup> ea	2.5	0.5	6.2	Jalousie	cm <sup>2</sup> /louver	3.38		
With gaskets	cm <sup>2</sup> ea	0.15	0.08	3.5	Lumped	cm <sup>2</sup> /lms	0.471	0.009	2.06
<b>Furnace</b>					Single horizontal slider, weatherstripped	cm <sup>2</sup> /lms	0.67	0.2	2.06
Sealed (or no) combustion	cm <sup>2</sup> ea	0	0	0	Single horizontal slider, aluminum	cm <sup>2</sup> /lms	0.8	0.27	2.06
Retention head or stack damper	cm <sup>2</sup> ea	30	20	30	Single horizontal slider, wood clad	cm <sup>2</sup> /lms	0.44	0.27	0.99
Retention head and stack damper	cm <sup>2</sup> ea	24	18	30	Single horizontal slider, wood clad	cm <sup>2</sup> /lms	0.64	0.54	0.81
<b>Floors over crawl spaces</b>					Single-hung, weatherstripped	cm <sup>2</sup> /lms	0.87	0.62	1.24
General	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	2.2	0.4	4.9	Sill	cm <sup>2</sup> /lmc	0.21	0.139	0.212
Without ductwork in crawl space	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.98			Storm inside, heat shrink	cm <sup>2</sup> /lms	0.018	0.009	0.018
With ductwork in crawl space	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	2.25			Storm inside, rigid sheet with magnetic seal	cm <sup>2</sup> /lms	0.12	0.018	0.24
<b>Fireplace</b>					Storm inside, flexible sheet with mechanical seal	cm <sup>2</sup> /lms	0.154	0.018	0.833
With damper closed	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	43	10	92	Storm inside, rigid sheet with mechanical seal	cm <sup>2</sup> /lms	0.4	0.045	0.833
With damper open	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	350	145	380	Storm outside, pressurized track	cm <sup>2</sup> /lmc	0.528		
With glass doors	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	40	4	40	Storm outside, 2-track	cm <sup>2</sup> /lmc	1.23		
With insert and damper closed	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	36	26	46	Storm outside, 3-track	cm <sup>2</sup> /lmc	2.46		
With insert and damper open	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	65	40	90					
Gas water heater	cm <sup>2</sup> ea	20	15	25					
<b>Joints</b>									
Ceiling-wall	cm <sup>2</sup> /lmc	1.5	0.16	2.5					
Sole plate, floor/wall, uncaulked	cm <sup>2</sup> /lmc	4	0.38	5.6					
Sole plate, floor/wall, caulked	cm <sup>2</sup> /lmc	0.8	0.075	1.2					
Top plate, band joist	cm <sup>2</sup> /lmc	0.1	0.075	0.58					

Note: Air leakage areas are based on values found in the literature. The effective air leakage area (in square centimetres) is based on a pressure difference of 4 Pa and C<sub>D</sub> = 1. Abbreviations: m<sup>2</sup> = gross area in square metres; lmc = linear metre of crack; ea = each; lms = linear metre of sash

Figure 14 : Extraits de la table 1 : Effective air leakage area [29]

Pour pouvoir utiliser ces valeurs, les surfaces des éléments du faux plafond, de la porte, des fenêtres et des murs ont dû être calculées à partir des plans (Figure 6).

❖ **Calcul de la surface effective de fuite au niveau des murs, de la porte et des fenêtres**

➤ *Calcul de la surface des murs, de la porte et des fenêtres*

Tableau 11 : Dimensions des murs, de la porte et des fenêtres

Grandeur	Mesure (m)
Hauteur des murs	2,7
Hauteur de la porte	2,2
Hauteur des fenêtres	1,2
Largeur des murs Nord et Sud	4,06
Largeur des murs Est et Ouest	3,06
Largeur de la porte	0,85
Largeur des fenêtres	1

$$S_{Façade\_Nord} = S_{Façade\_Sud} = 2,7 \times 4,06 = 10,96 \text{ m}^2$$

$$S_{mur\_Est} = S_{mur\_Ouest} = 2,7 \times 3,06 = 8,26 \text{ m}^2$$

$$S_{Fenêtre\_Nord} = S_{Fenêtre\_Sud} = 1,2 \times 1 = 1,2 \text{ m}^2$$

$$S_{Porte} = 2,2 \times 0,85 = 1,87 \text{ m}^2$$

$$S_{mur\_Sud} = S_{Façade\_Sud} - S_{Fenêtre\_Sud} - S_{Porte} = 10,96 - 1,2 - 1,87 = 7,89 \text{ m}^2$$

$$S_{mur\_Nord} = S_{Façade\_Nord} - S_{Fenêtre\_Nord} = 10,96 - 1,2 = 9,76 \text{ m}^2$$

$$S_{mur} = S_{mur\_Nord} + S_{mur\_Sud} + S_{mur\_Est} + S_{mur\_Ouest} = 34,17 \text{ m}^2$$

➤ *Calcul de la surface de fuite effective au niveau des murs, de la porte et des fenêtres*

$$S_{FuiteMur\_bestEstimate} = 0,68 \times 34,17 = \mathbf{23,24 \text{ cm}^2}$$

$$S_{FuiteMur\_min} = 0,05 \times 34,17 = 1,71 \text{ cm}^2$$

$$S_{FuiteMur\_max} = 2,3 \times 34,17 = 78,59 \text{ cm}^2$$

$$\text{D'où } S_{fuiteMur} = \{1,71; 23,24; 78,59\} \text{ cm}^2$$

$$S_{FuitePorte\_bestEstimate} = 5 \times 1,87 = \mathbf{9,35 \text{ cm}^2}$$

$$S_{FuitePorte\_min} = 1,7 \times 1,87 = 3,18 \text{ cm}^2$$

$$S_{FuitePorte\_max} = 5 \times 1,87 = 9,35 \text{ cm}^2$$

$$\text{D'où } S_{fuitePorte} = \{3,18 ; 9,35\} \text{ cm}^2$$

$$S_{FuiteFenêtres\_bestEstimate} = 6,5 \times 1,2 \times 2 = \mathbf{15,6 \text{ cm}^2}$$

$$S_{FuiteFenêtres\_min} = 5,7 \times 1,2 \times 2 = 13,68 \text{ cm}^2$$

$$S_{FuiteFenêtres\_max} = 10,3 \times 1,2 \times 2 = 24,72 \text{ cm}^2$$

$$\text{D'où } S_{fuiteFenêtres} = \{13,68; 15,6; 24,72\} \text{ cm}^2$$

➤ **Calcul de la longueur du joint entre les murs et la dalle**

La longueur du joint correspond au périmètre du bâtiment :

$$L_{joint} = 2 \times (L + l) = 2 \times (4,06 + 3,06) = 14,24 \text{ m (noté « lmc » dans la table)}$$

D'où d'après la Figure 9 :

$$S_{FuiteJoint\_bestEstimate} = 0,8 \times 14,24 = \mathbf{11,39 \text{ cm}^2}$$

$$S_{FuiteJoint\_min} = 0,075 \times 14,24 = 1,07 \text{ cm}^2$$

$$S_{FuiteJoint\_max} = 1,2 \times 14,24 = 17,1 \text{ cm}^2$$

$$\text{D'où } S_{FuiteJoint} = \{1,07; 11,39; 17,1\} \text{ cm}^2$$

❖ **Calcul de la surface effective de fuite totale au niveau de la zone bâtiment**

Pour une première évaluation, on choisit les valeurs « best estimate » données par la table de l'ASHRAE (Figure 6). On obtient alors :

$$S_{Fuitezone\_bâtiment} = S_{FuiteJoint} + S_{FuiteFenêtres} + S_{FuitePorte} + S_{FuiteMur} = 59,58 \text{ cm}^2$$

## ANNEXE 3 : CALCUL DE LA SURFACE EFFECTIVE DE FUITE DANS LE COMBLE

La zone des combles est constituée de mur en BTC et de la toiture. Les éléments considérés selon la table 1 sont mis en évidence sur la Figure 9.

### ❖ Calcul de la surface effective de fuite au niveau des murs

#### ➤ Calcul de la surface de mur

Tableau 12 : Dimensions du comble

Grandeur	Mesure (m)
Hauteur H	0,98
Largeur du mur nord (identique à mur sud) L	4,06
Largeur du mur est (identique à mur ouest) l	3,06
Nombre d'alésages dans les murs N	12
Diamètre d'un alésage D	0,10

$$S_{mur} = 2 \times H \times (L + l) - N \times \pi \frac{D^2}{4} = 13,86 \text{ m}^2$$

#### ➤ Calcul de la surface de fuite effective au niveau des murs

$$S_{FuiteMur\_bestEstimate} = 0,68 \times 13,86 = 9,42 \text{ cm}^2$$

$$S_{FuiteMur\_min} = 0,05 \times 13,86 = 0,69 \text{ cm}^2$$

$$S_{FuiteMur\_max} = 2,3 \times 13,86 = 31,88 \text{ cm}^2$$

$$D'où S_{fuiteMur} = \{0,69; 9,42; 31,88\} \text{ cm}^2$$

### ❖ Calcul de la surface effective de fuite au niveau de la toiture

#### ➤ Calcul de la surface de toiture

Tableau 13 : Dimensions de la toiture

Grandeur	Mesure (m)
Hauteur entre base et sommet tôle H <sub>tôle</sub>	0,98
Largeur du mur est (identique à mur ouest) B <sub>1</sub>	3,06
Largeur du mur nord (identique à mur sud) B <sub>2</sub>	4,06
Hauteur du triangle de toiture orienté est (identique à celui orienté ouest) h <sub>1</sub>	À calculer
Hauteur du triangle de toiture orienté nord (identique à celui orienté sud) h <sub>2</sub>	À calculer

Aire du triangle de toiture orienté est (identique à celui orienté ouest) $A_1$	À calculer
Aire du triangle de toiture orienté nord (identique à celui orienté sud) $A_2$	À calculer

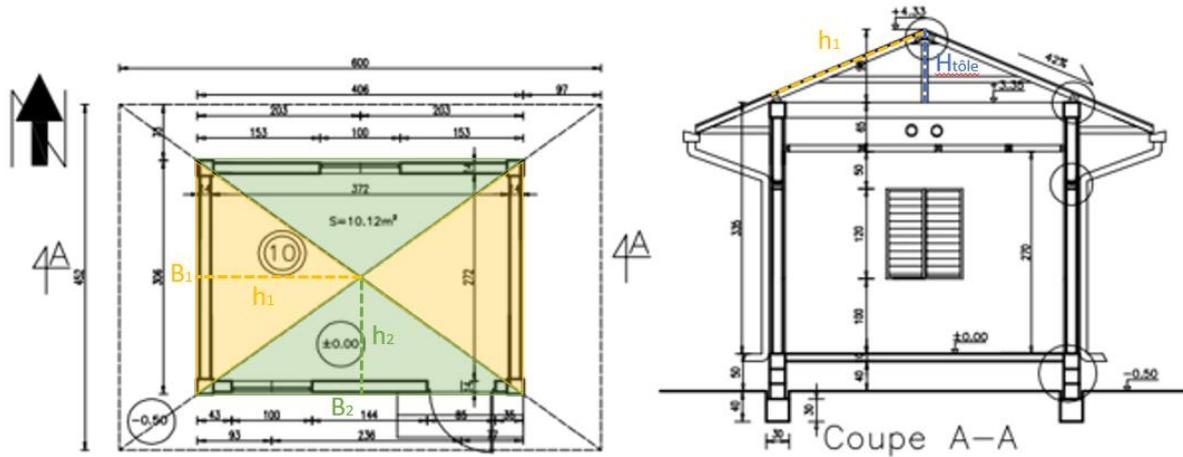


Figure 15 : Mise en évidence des surfaces calculées en toiture sur les plans

Calcul des hauteurs de « triangles »  $h_1$  et  $h_2$  :

$$h_1 = \sqrt{H_{tôle}^2 + \left(\frac{B_2}{2}\right)^2} = \sqrt{0,98^2 + \left(\frac{4,06}{2}\right)^2} \approx 2,25 \text{ m}$$

$$h_2 = \sqrt{H_{tôle}^2 + \left(\frac{B_1}{2}\right)^2} = \sqrt{0,98^2 + \left(\frac{3,06}{2}\right)^2} \approx 1,82 \text{ m}$$

Calcul des surfaces de triangles  $A_1$  et  $A_2$  :

$$A_1 = \frac{B_1 \times h_1}{2} \approx \frac{3,06 \times 2,25}{2} \approx 3,45 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{B_2 \times h_2}{2} \approx \frac{4,06 \times 1,82}{2} \approx 3,69 \text{ m}^2$$

Calcul de la surface de toiture :

$$A = 2 \times (A_1 + A_2) = B_1 \times h_1 + B_2 \times h_2 = B_1 \times \sqrt{H_{tôle}^2 + \left(\frac{B_2}{2}\right)^2} + B_2 \times \sqrt{H_{tôle}^2 + \left(\frac{B_1}{2}\right)^2}$$

$$A = 3,06 \times \sqrt{0,98^2 + \left(\frac{4,06}{2}\right)^2} + 4,06 \times \sqrt{0,98^2 + \left(\frac{3,06}{2}\right)^2} \approx 14,27 \text{ m}^2$$

➤ *Calcul de la surface de fuite effective en toiture*

Calcul de la surface de fuite effective au niveau de la tôle :

$$S_{FuiteTôle\_bestEstimate} = 1,8 \times 14,27 = \mathbf{25,69 \text{ cm}^2}$$

$$S_{FuiteTôle\_min} = 0,79 \times 14,27 = 11,28 \text{ cm}^2$$

$$S_{FuiteTôle\_max} = 2,8 \times 14,27 = 39,97 \text{ cm}^2$$

$$\text{D'où } S_{fuiteTôle} = \{11,28; 25,69; 39,97\} \text{ cm}^2$$

Calcul de la longueur du joint entre les murs et la toiture :

La longueur du joint correspond au périmètre du bâtiment donc, on a

$$L_{joint} = 2 \times (L + l) = 2 \times (4,06 + 3,06) = 14,24 \text{ m (noté « lmc » dans la table)}$$

D'où d'après la table 1 :

$$S_{FuiteJoint\_bestEstimate} = 1,5 \times 14,24 = \mathbf{21,36 \text{ cm}^2}$$

$$S_{FuiteJoint\_min} = 0,16 \times 14,24 = 2,28 \text{ cm}^2$$

$$S_{FuiteJoint\_max} = 2,5 \times 14,24 = 35,6 \text{ cm}^2$$

❖ **Calcul de la surface effective de fuite totale au niveau du comble**

Pour une première évaluation, on choisit les valeurs « best estimate » données par la table de l'ASHRAE de la Figure 6. On obtient alors :

$$S_{FuiteComble} = S_{FuiteJoint} + S_{FuiteTôle} + S_{FuiteMur} = 56,47 \text{ cm}^2$$

## ANNEXE 4 : CHOIX DES COEFFICIENT D'INFILTRATION PAR L'EFFET DU VENT ET D'INFILTRATION PAR TIRAGE THERMIQUE

Shelter class	One story house	Two story house	Three story house
1	0.000319	0.000420	0.000494
2	0.000246	0.000325	0.000382
3	0.000174	0.000231	0.000271
4	0.000104	0.000137	0.000161
5	0.000032	0.000042	0.000049

Shelter class	Description
1	No obstructions or local shielding
2	Typical shelter for an isolated rural house
3	Typical shelter caused by other buildings across the street
4	Typical shelter for urban buildings on larger lots
5	Typical shelter produced by buildings that are immediately adjacent.

One story house	Two story house	Three story house
0.000145	0.000290	0.000435

Figure 16 : Extrait de la table des coefficients d'infiltration par l'effet du vent et d'infiltration par tirage thermique [17]

**ANNEXE 5 : IMAGES DES THERMOPUCES ET DU BATIMENT  
PILOTE**

Figure 17 : Mur du bâtiment pilote avec une thermopuce mesurant sa température



Figure 18 : Thermopuces et HygroPuces sur porte-clés fixe avec un lecteur thermopuce [30]

## ANNEXE 6 : POSITION DES THERMOPUCES DANS LE BATIMENT PILOTE

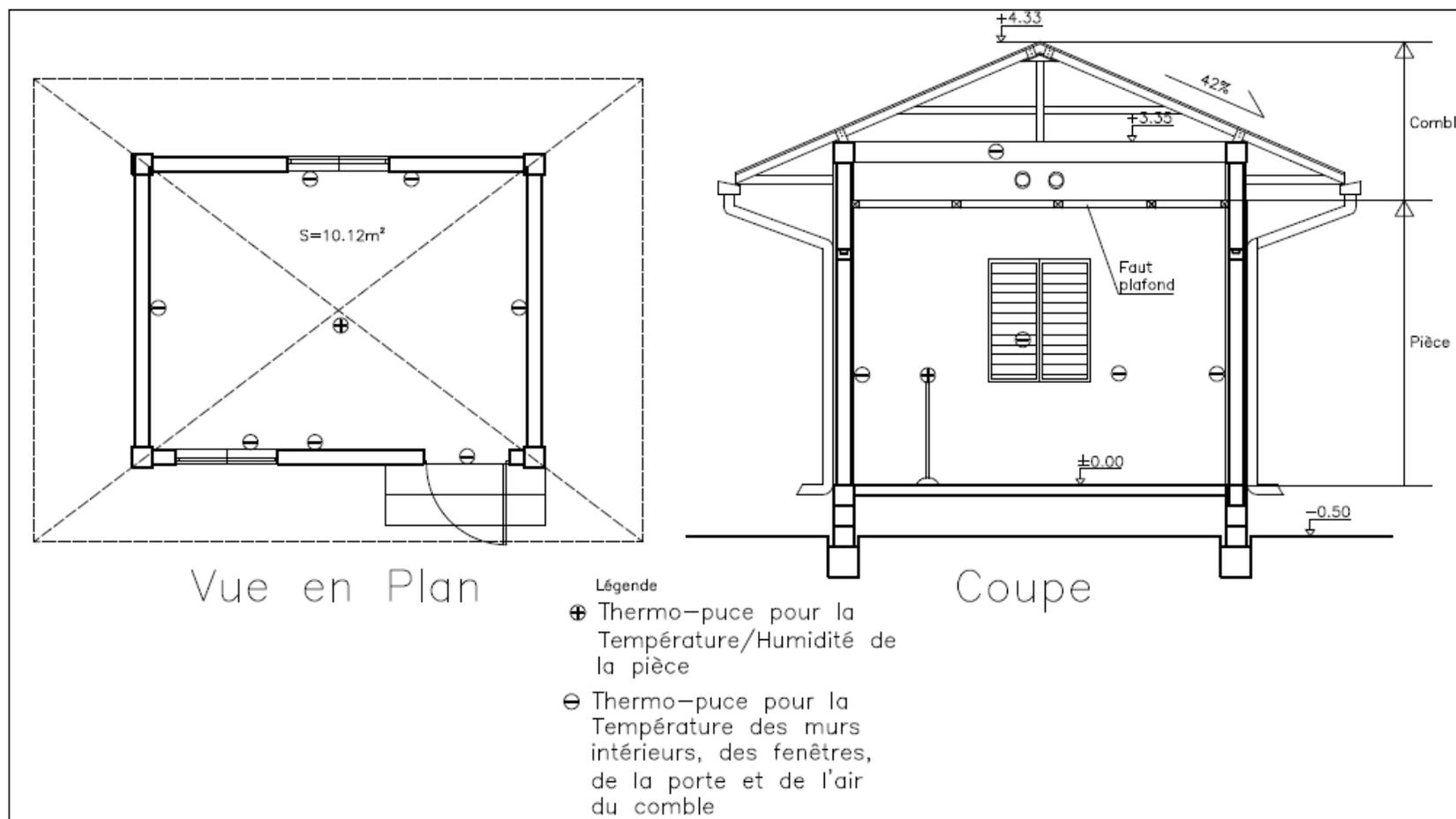


Figure 19 : Position des thermopuces dans le bâtiment pilote

## ANNEXE 7 : COURBES DE COMPARAISON DES RESULTATS DE SIMULATION AUX MESURES EXPERIMENTALES AVANT CALIBRATION

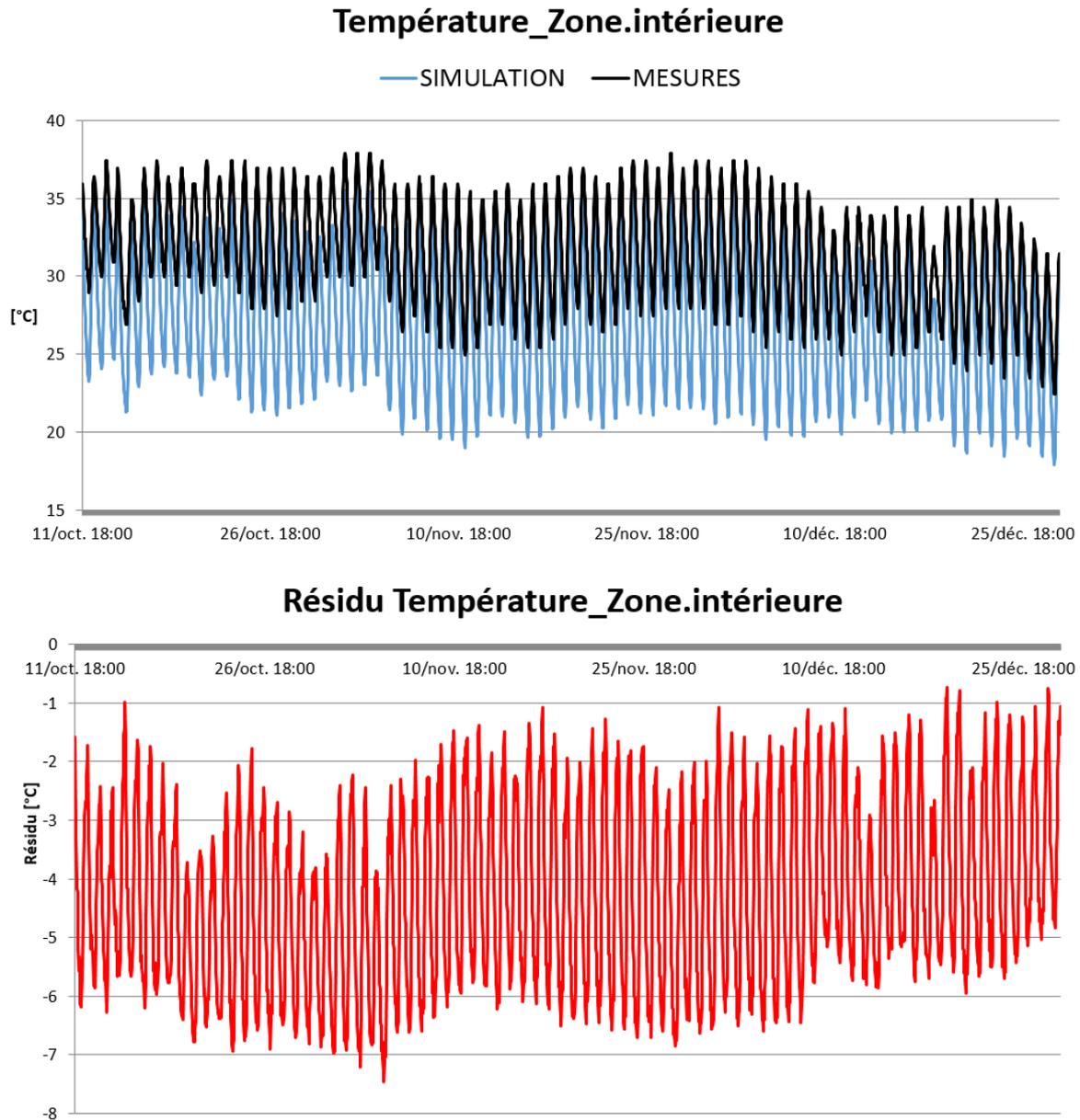
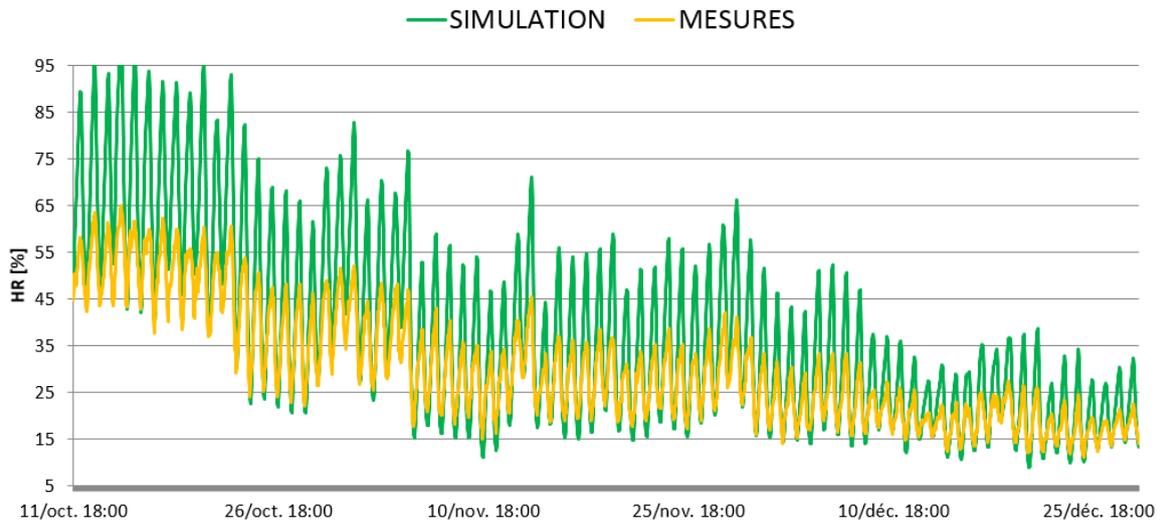


Figure 20 : La température mesurée et simulée de la zone intérieure

### Humidité\_Zone.intérieure



### Résidu Humidité\_Zone.intérieure

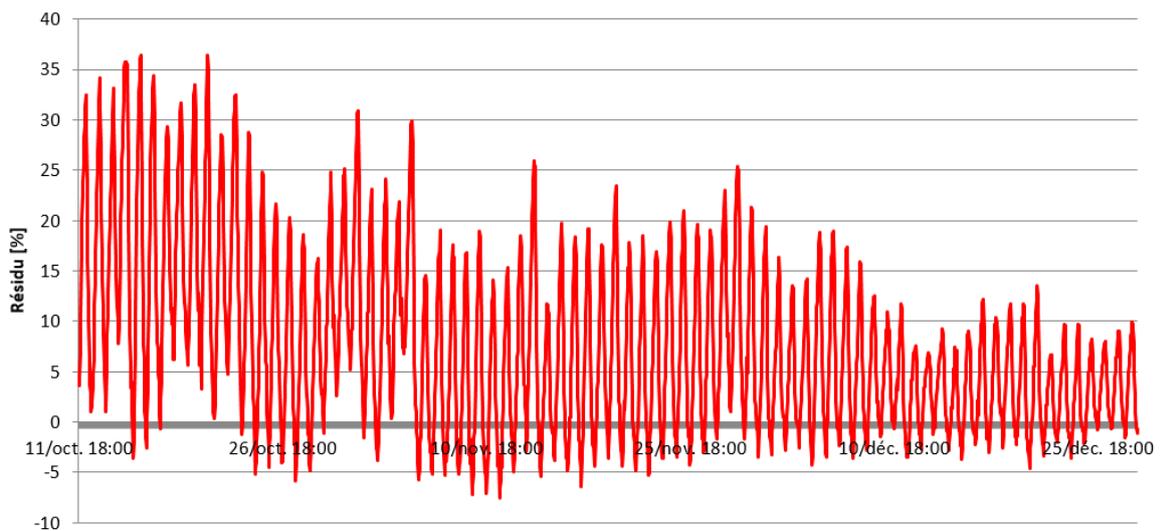


Figure 21 : L'humidité relative mesurée et simulée de la zone intérieure

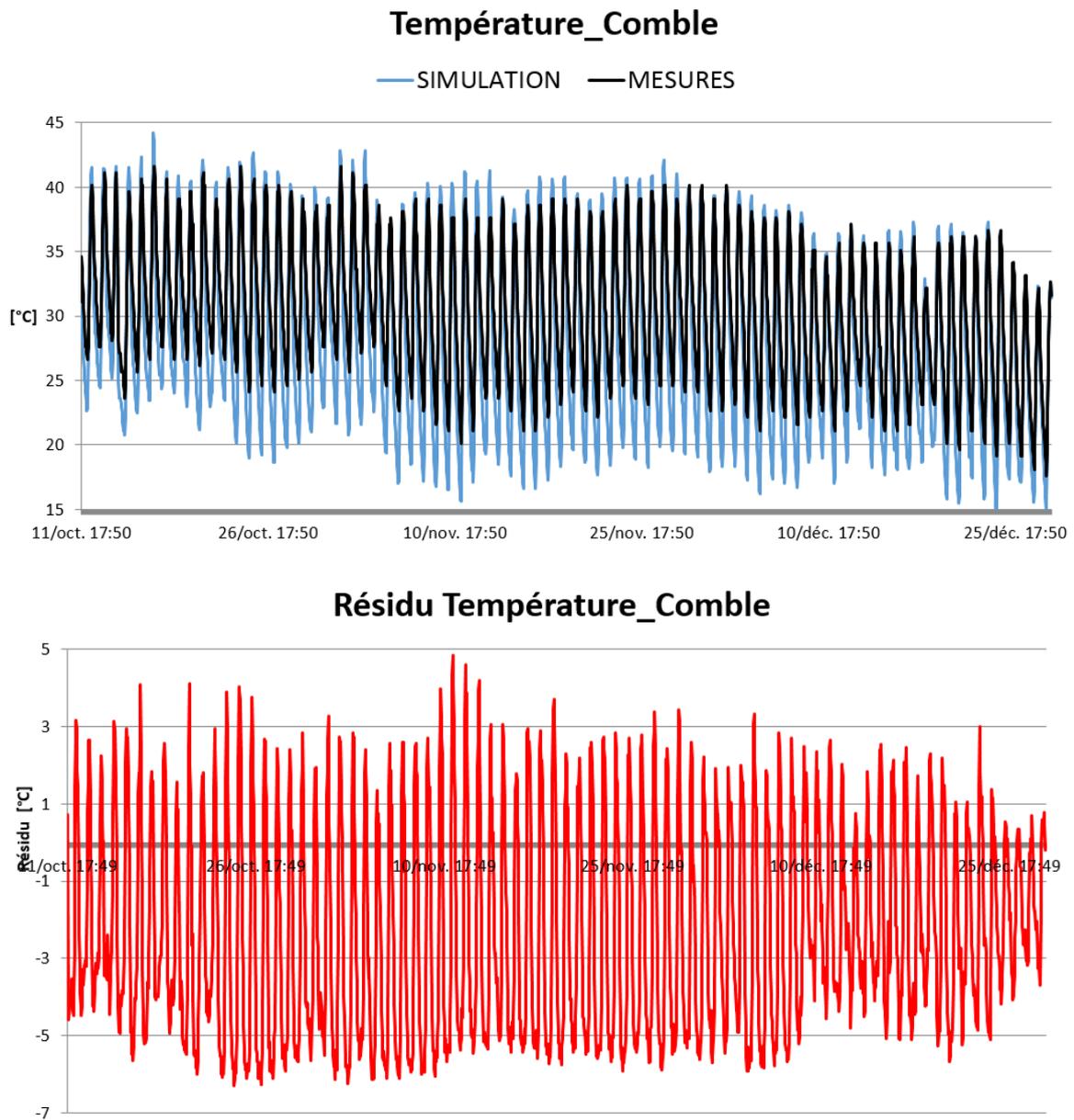


Figure 22 : La température mesurée et simulée du comble

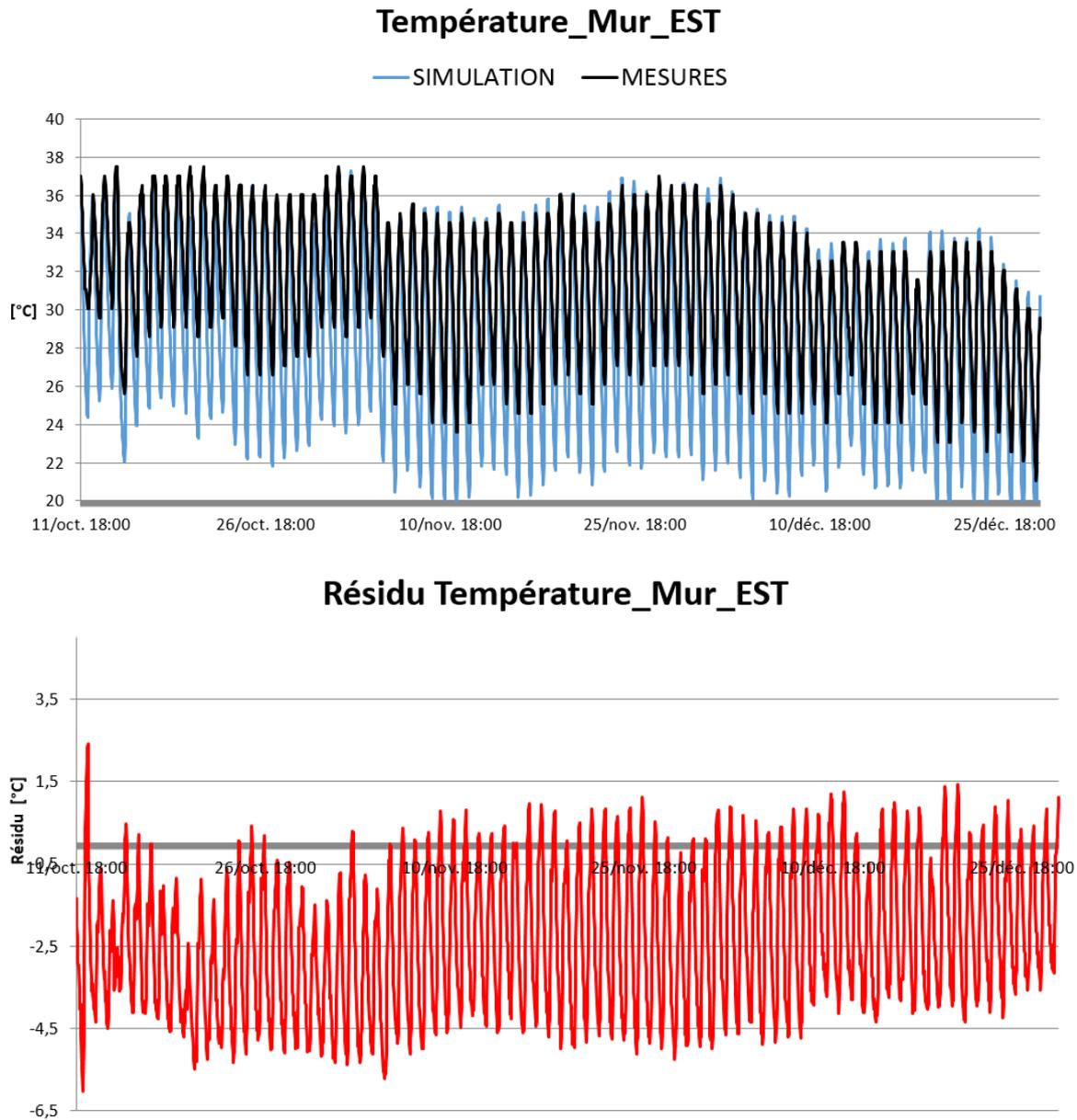


Figure 23 : La température mesurée et simulée du mur Est

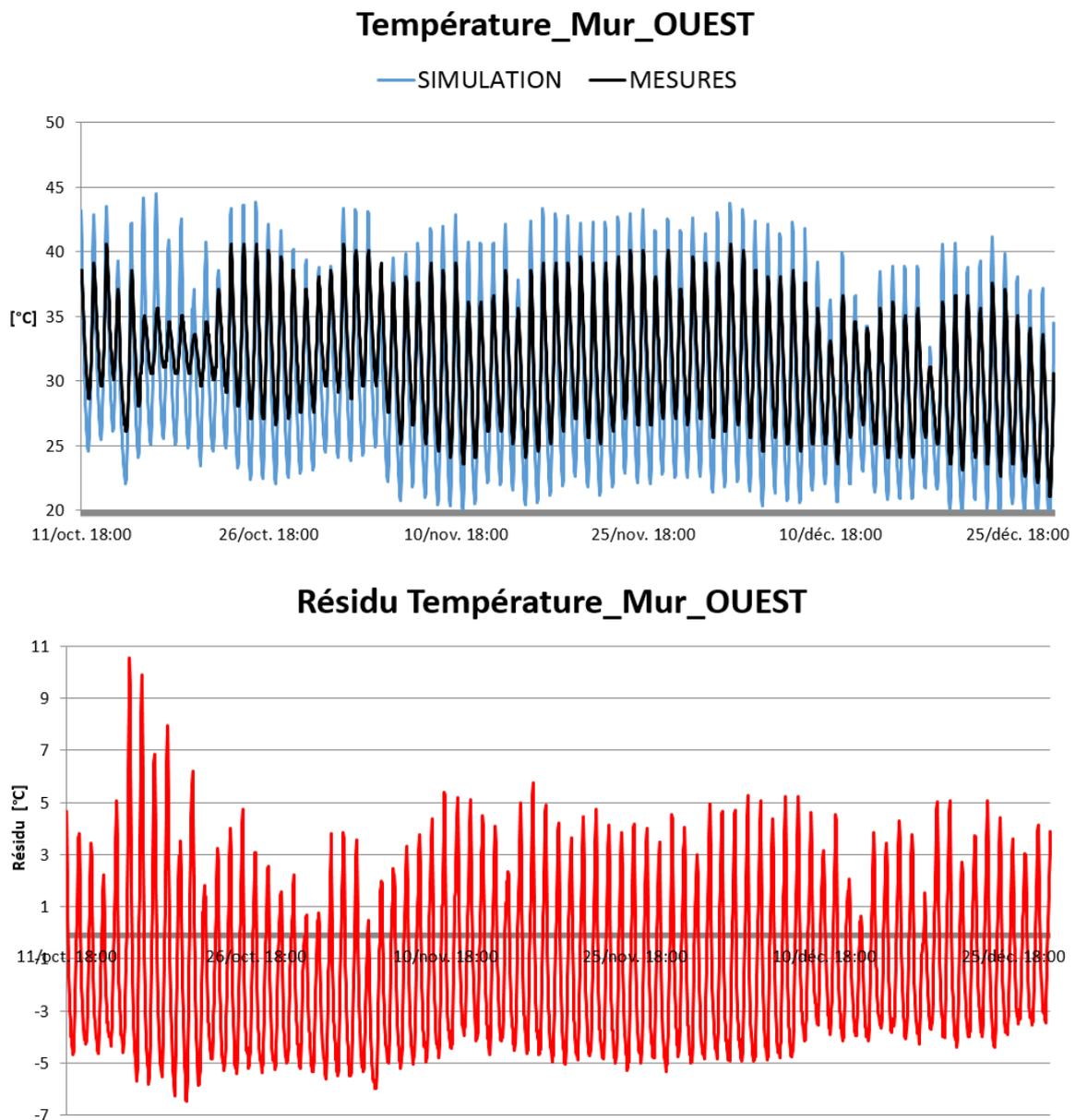


Figure 24 : La température mesurée et simulée du mur Ouest

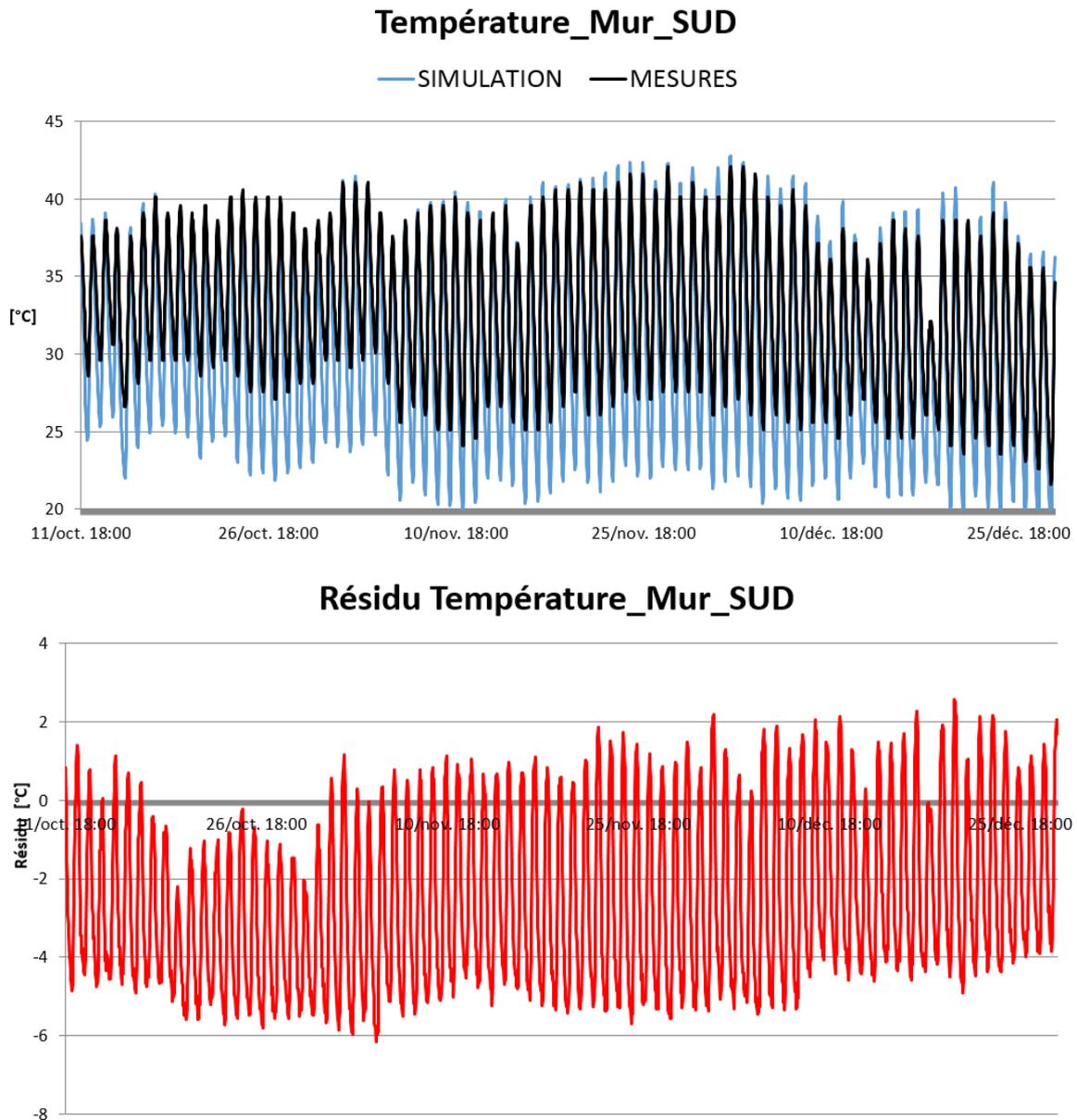


Figure 25 : La température mesurée et simulée du mur Sud

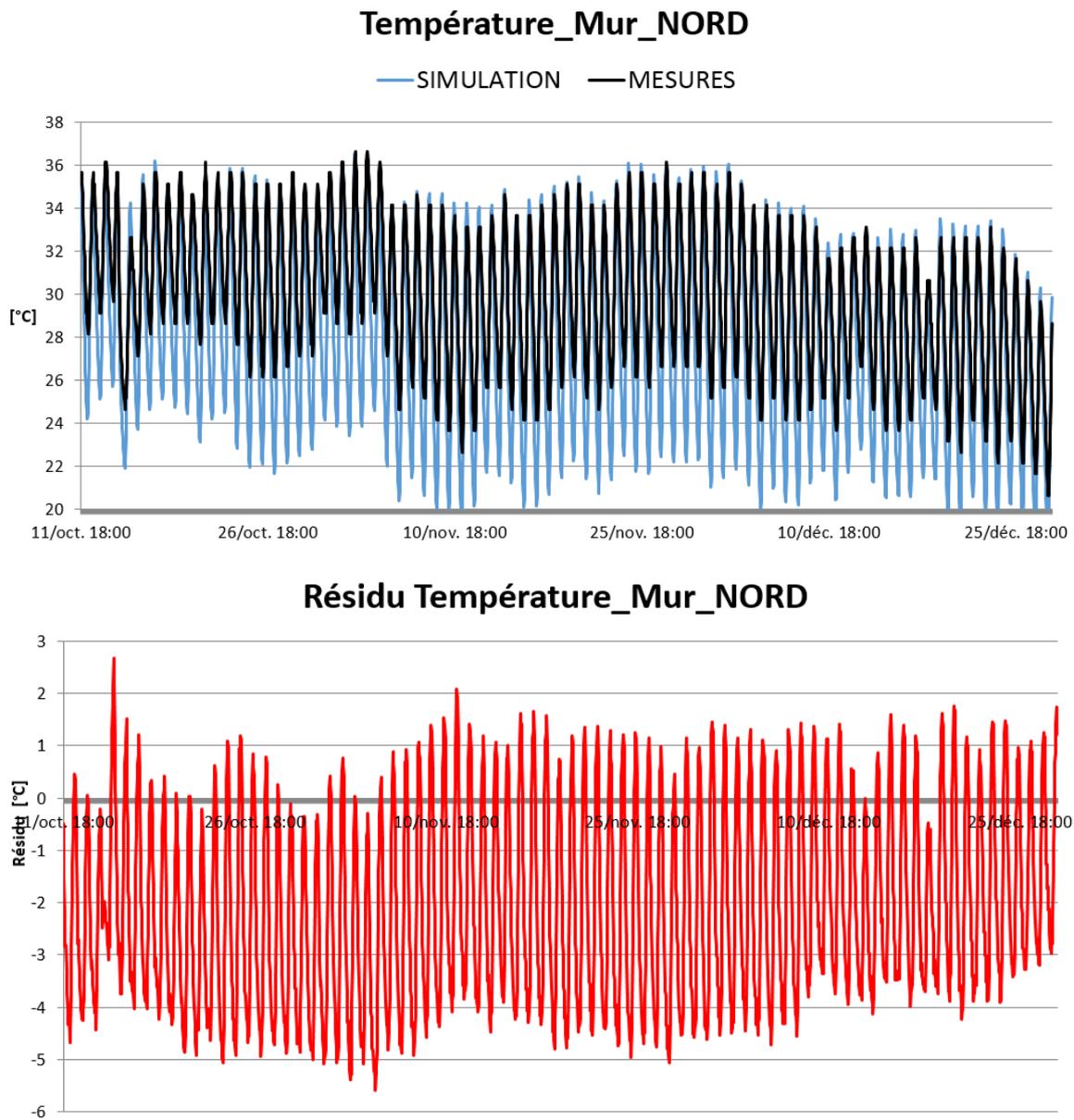


Figure 26 : La température mesurée et simulée du mur Nord

## ANNEXE 8 : COURBES DE COMPARAISON DES RESULTATS DE SIMULATION AUX MESURES EXPERIMENTALES APRES CALIBRATION

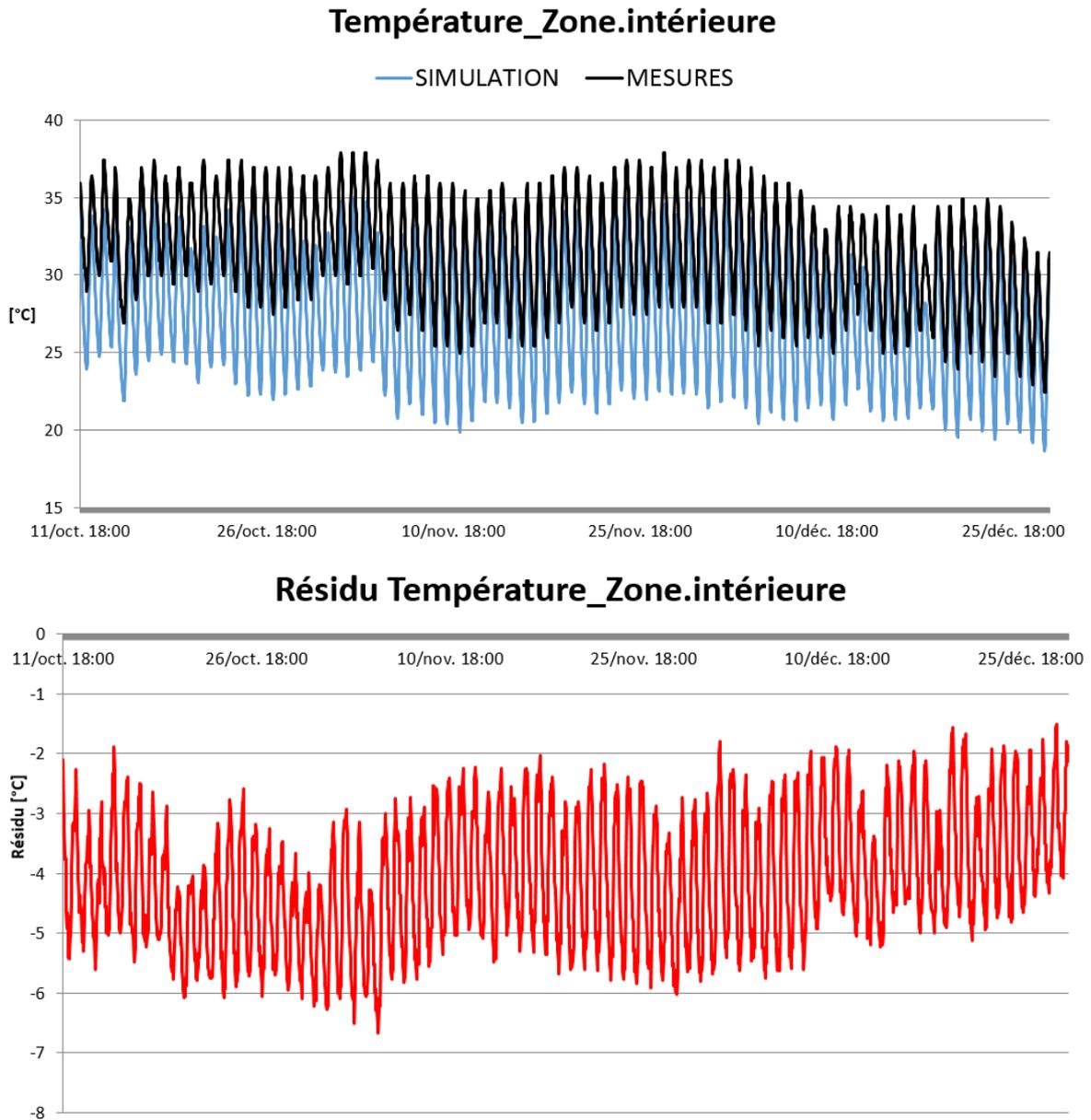
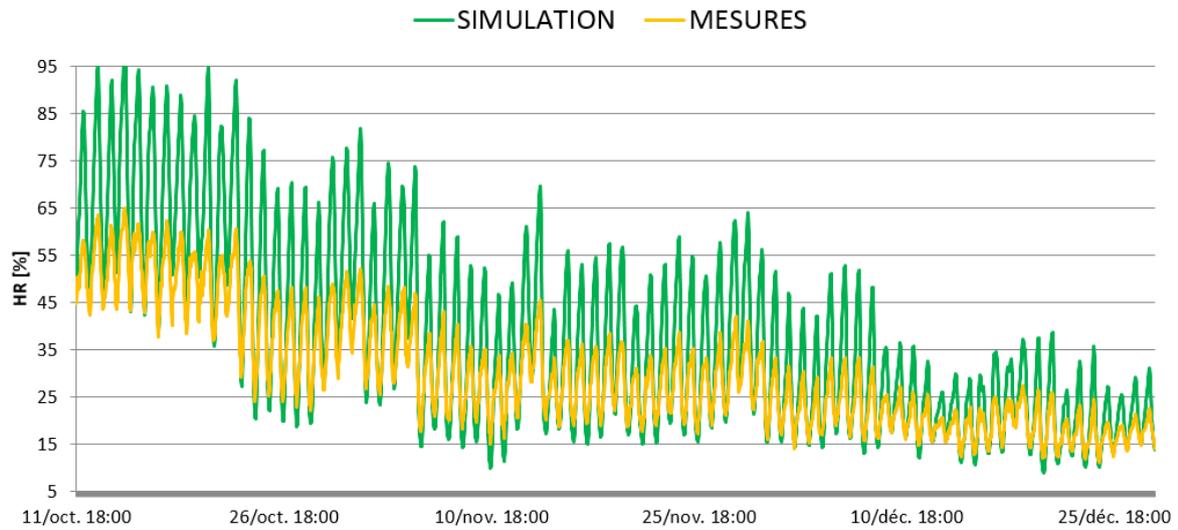


Figure 27 : La température mesurée et simulée de la zone intérieure après calibration

### Humidité\_Zone.intérieure



### Résidu Humidité\_Zone.intérieure

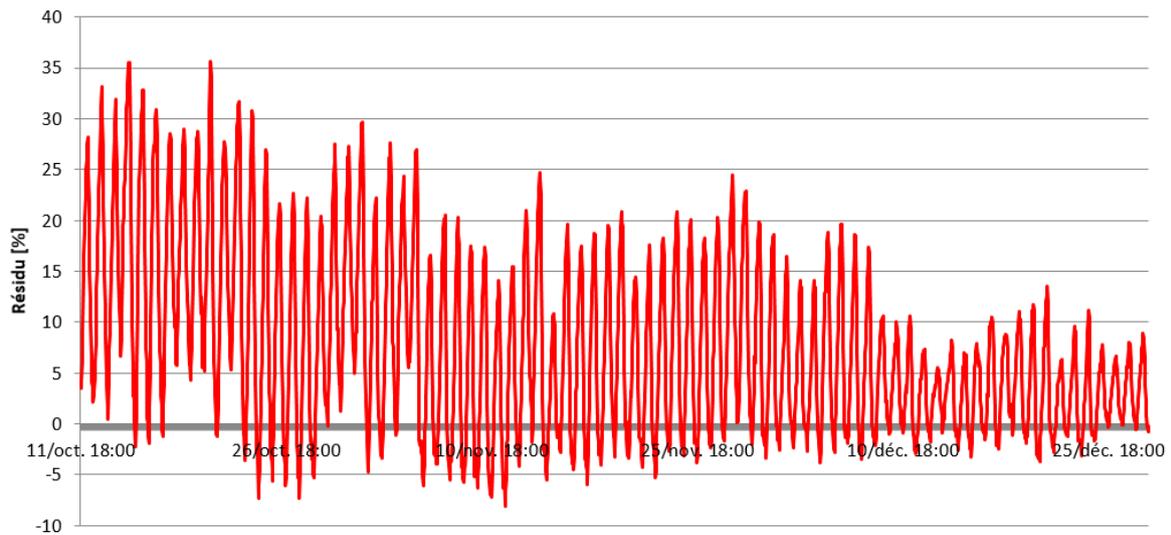


Figure 28 : L'humidité relative mesurée et simulée de la zone intérieure après calibration

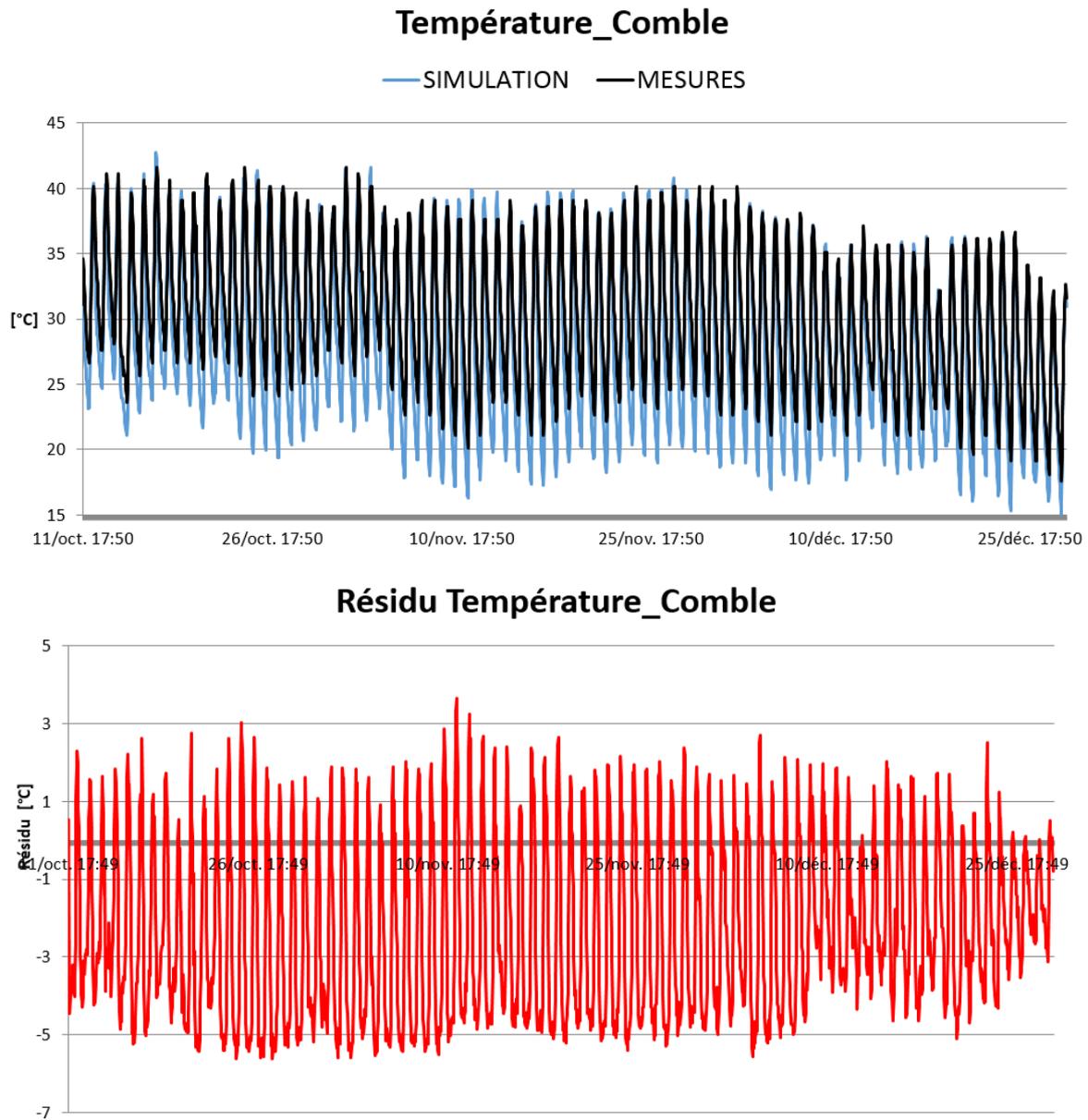


Figure 29 : La température mesurée et simulée du comble après calibration

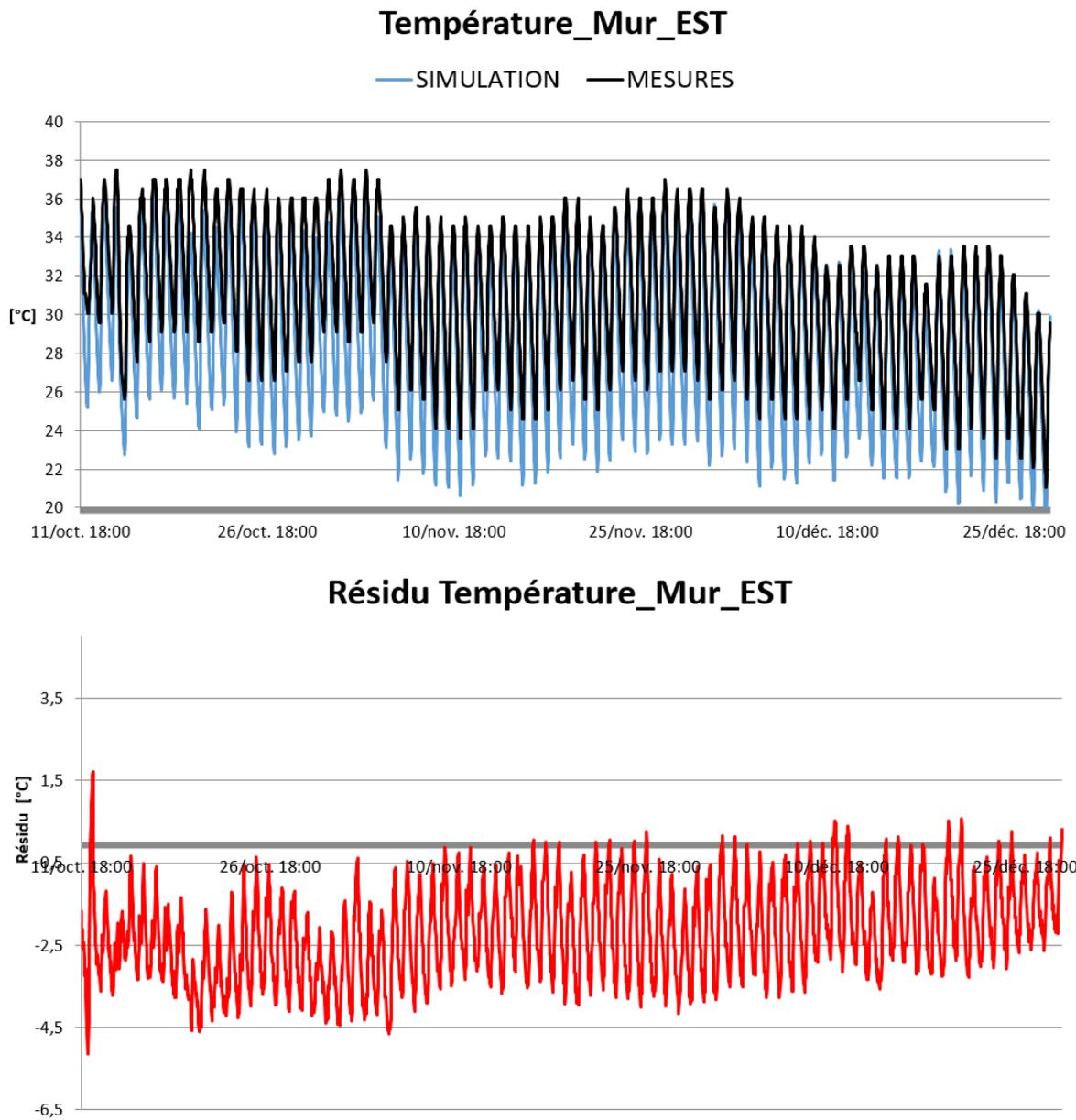


Figure 30 : La température mesurée et simulée du mur Est après calibration

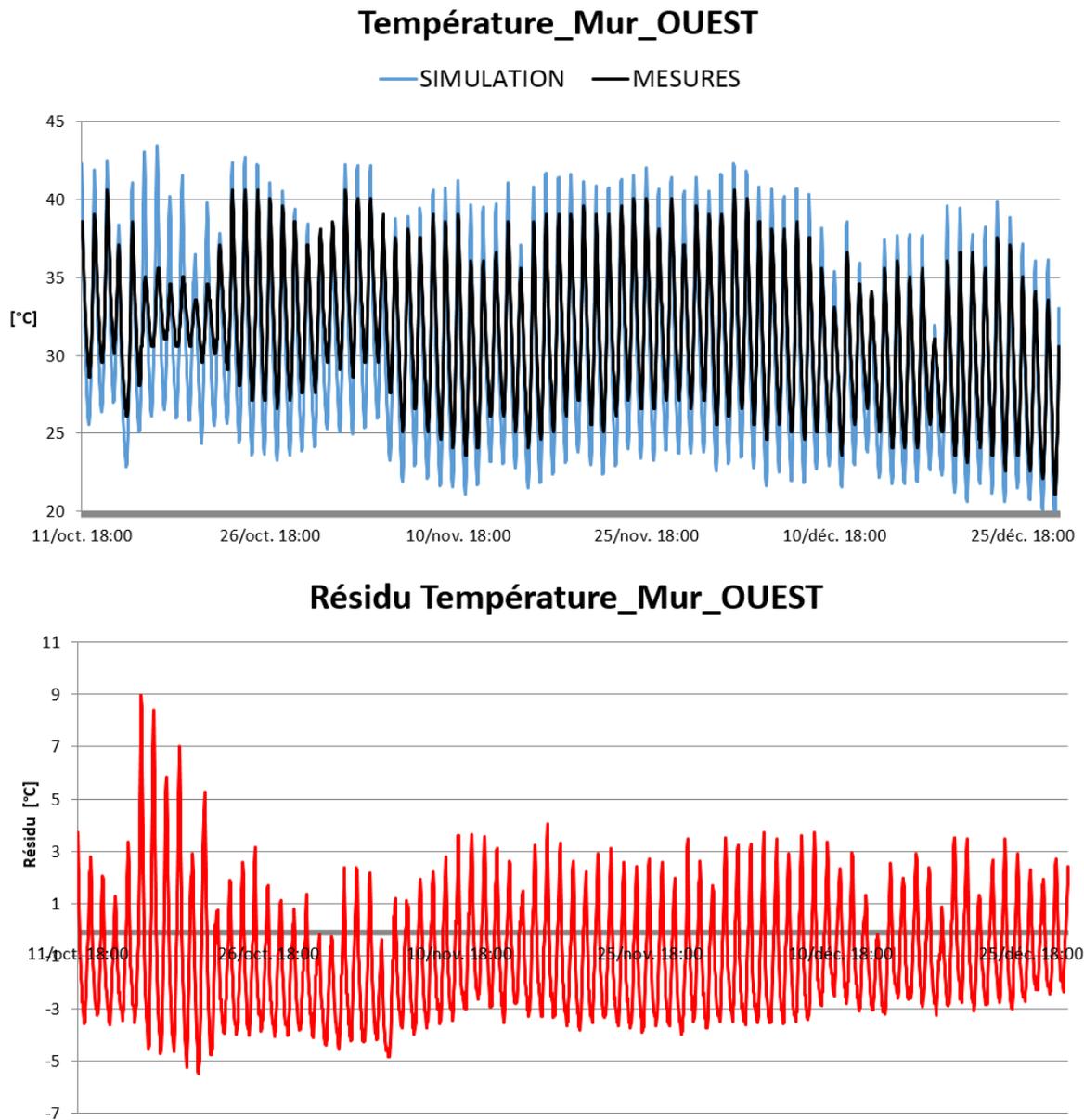


Figure 31 : La température mesurée et simulée du mur Ouest après calibration

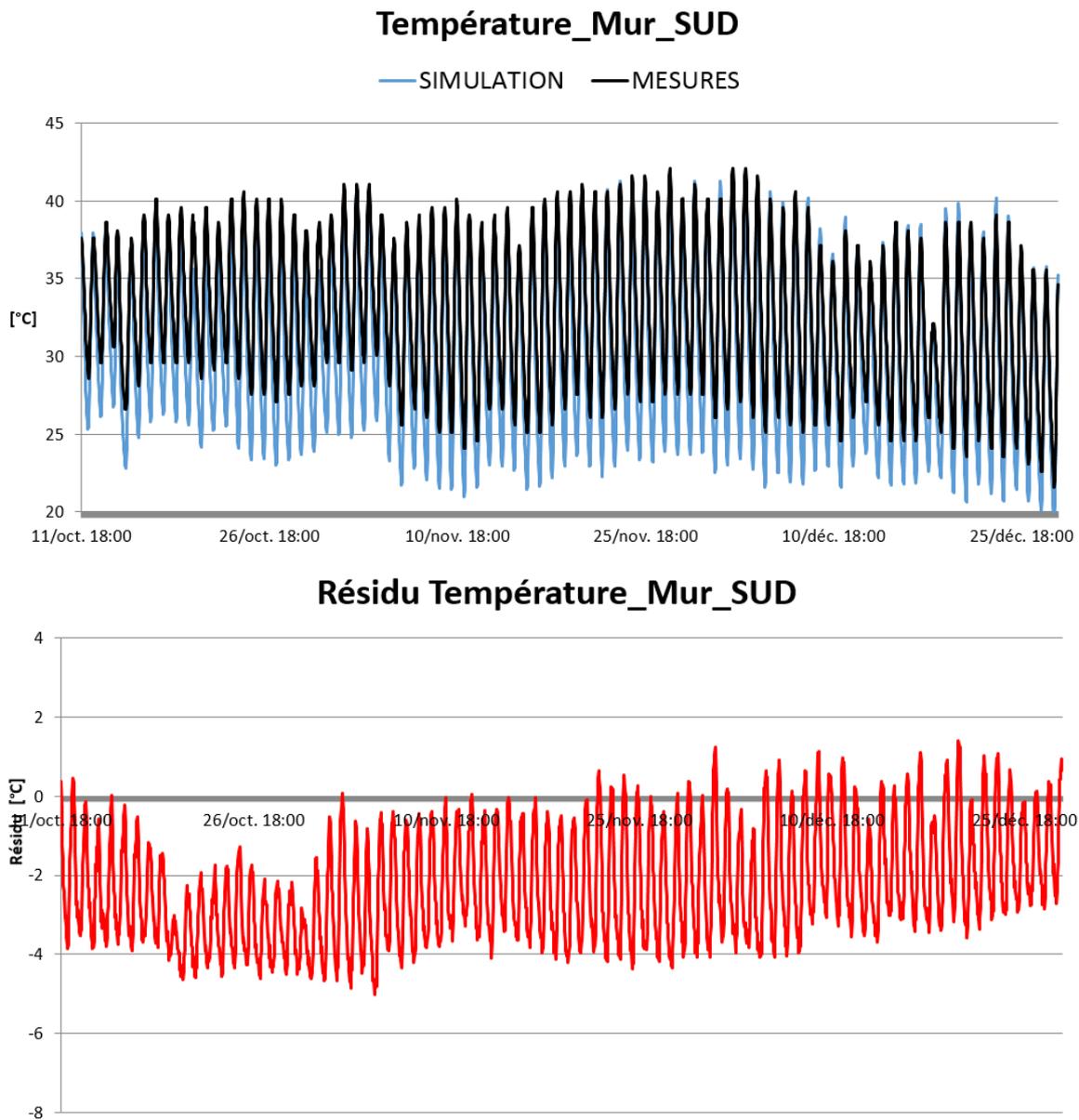


Figure 32 : La température mesurée et simulée du mur Sud après calibration

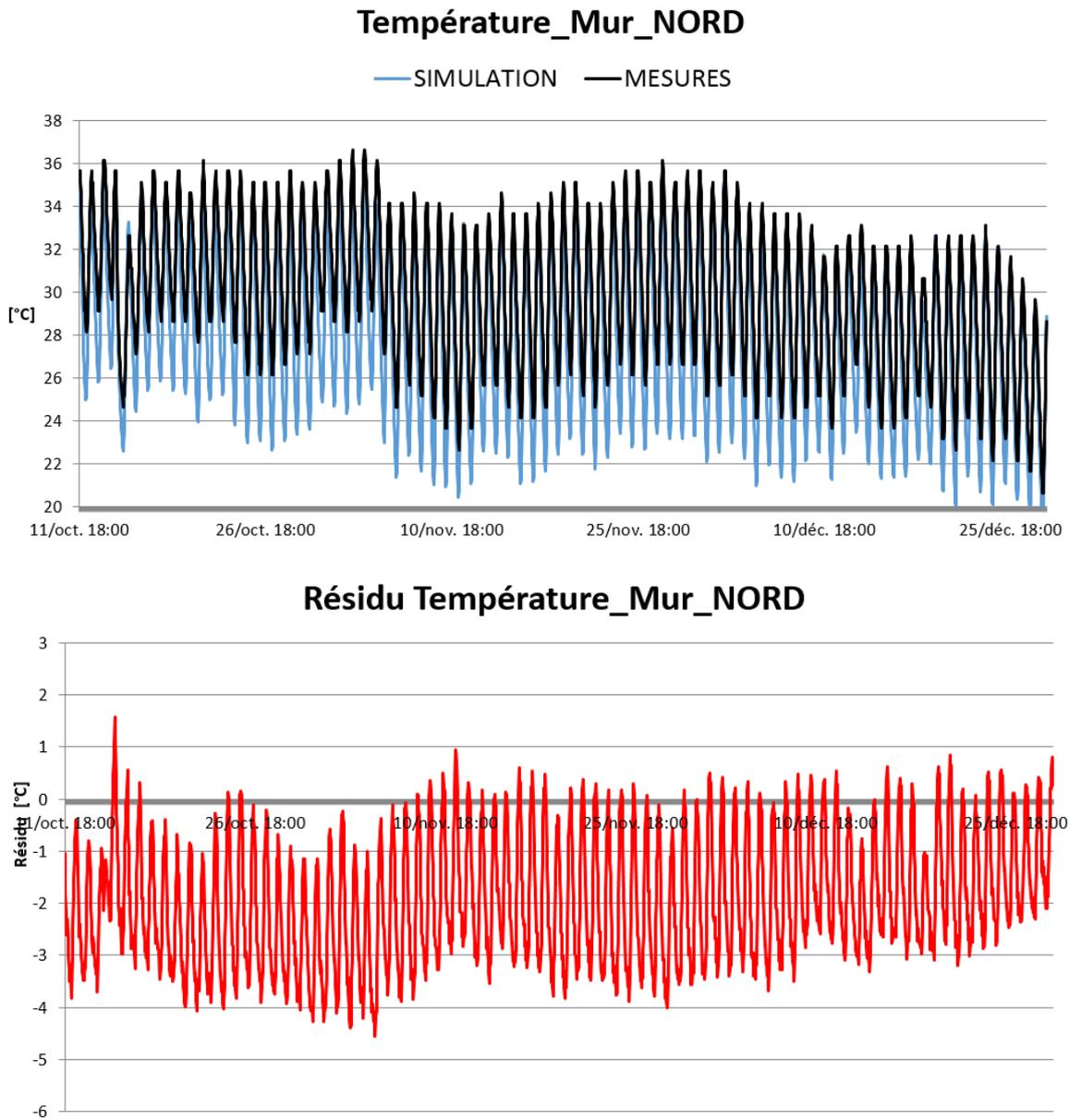


Figure 33 : La température mesurée et simulée du mur Nord après calibration

## ANNEXE 9 : OPTIMISATION DES PARAMETRES DE CALIBRATION

Tableau 14 : Optimisation de l'écart de hauteur entre le milieu de l'ouverture la plus basse et le niveau de pression neutre

<b>Ecart de hauteur entre le milieu de l'ouverture la plus basse et le niveau de pression neutre (m)</b>	<b>Ecart moyen Température comble</b>	<b>Ecart maximal Température comble</b>
0	2,95555	5,64
0,01	2,9552	5,642
0,02	2,955	5,643
0,03	2,955	5,645
0,04	2,955	5,65
0,05	2,954	5,647

Tableau 15 : Optimisation de la surface effective de fuite du comble

<b>Surface effective de fuite comble (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Ecart moyen Température comble</b>	<b>Ecart maximal Température comble</b>
14,25	2,95555	5,6407
23,57	2,9536	5,64375
32,89	2,95	5,6467
42,21	2,9499	5,6497
51,53	2,948	5,65268
60,85	2,946	5,6556
70,17	2,9445	5,65848
79,49	2,943	5,6614
88,81	2,94	5,66425
98,13	2,939	5,667
107,45	2,938	5,66998

Tableau 16 : Optimisation de la surface effective de fuite de la zone bâtiment

<b>Surface effective de fuite zone bâtiment (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Ecart moyen Température zone intérieure</b>	<b>Ecart maximal Température zone intérieure</b>
19,64	4,407	6,7824
33,405	4,396	6,7463
47,17	4,386	6,7091
60,935	4,375	6,6733
74,7	4,36	6,6434
88,465	4,35	6,6529
102,23	4,345	6,6623
115,995	4,34	6,6716
<b>129,76</b>	<b>4,33</b>	<b>6,6809</b>

Tableau 17 : Optimisation de l'absorptivité solaire de la tôle d'acier galvanisé

<b>Absorptivité solaire de la tôle d'acier galvanisé (-)</b>	<b>Ecart moyen Température comble</b>	<b>Ecart maximal Température comble</b>
0,4	2,8589	5,7664
0,41	2,856	5,7489
<b>0,42</b>	<b>2,8558</b>	<b>5,73</b>
0,43	2,857	5,7141
0,44	2,861	5,7059
0,45	2,868	5,6976
0,46	2,876	5,6894
0,47	2,886	5,6813
0,48	2,8972	5,673
0,49	2,909	5,665
0,5	2,924	5,6569
0,51	2,939	5,6488
0,52	2,955	5,6407maxopti

Tableau 18 : Optimisation de l'absorptivité solaire du béton

<b>Absorptivité solaire du béton</b> (-)	<b>Ecart moyen Température</b> <b>zone intérieure</b>	<b>Ecart maximal Température</b> <b>zone intérieure</b>
0,6	4,4287	6,81
0,61	4,43	6,6816
0,62	4,4318	6,6822
0,63	4,4333	6,6828
0,64	4,4349	6,6834
0,65	4,4364	6,6839

Tableau 19 : Optimisation des propriétés thermo-physiques du béton

<b>Propriétés thermo-physiques du béton</b>	<b>Ecart moyen</b> <b>Température zone</b> <b>intérieure</b>	<b>Ecart maximal</b> <b>Température zone</b> <b>intérieure</b>
Conductivité thermique (W/m.K)	1,4	4,37225334
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200	
Chaleur spécifique (J/kg.K)	850	
Conductivité thermique (W/m.K)	1,4	4,3727124
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200	
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1001	
Conductivité thermique (W/m.K)	1,4	4,37234388
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2300	
Chaleur spécifique	850	

(J/kg.K)			
Conductivité thermique	1,4	4,372835	6,6656
(W/m.K)			
Masse volumique	2300		
(kg/m <sup>3</sup> )			
Chaleur spécifique	1001		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique	1,5	4,4534959	6,7354
(W/m.K)			
Masse volumique	2200		
(kg/m <sup>3</sup> )			
Chaleur spécifique	850		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique	1,5	4,453823	6,7294
(W/m.K)			
Masse volumique	2200		
(kg/m <sup>3</sup> )			
Chaleur spécifique	1001		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique	1,5	4,453570	6,734
(W/m.K)			
Masse volumique	2300		
(kg/m <sup>3</sup> )			
Chaleur spécifique	850		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique	1,5	4,453969	6,7273
(W/m.K)			
Masse volumique	2300		
(kg/m <sup>3</sup> )			

Chaleur spécifique (J/kg.K)	1001		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,6	4,526790	6,789
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	850		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,6	4,527076	6,7841
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1001		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,5	4,526856	6,7879
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2300		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	850		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,5	4,527183	6,7823
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2300		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1001		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,7	4,593470	6,8373
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		

(kg/m <sup>3</sup> )			
Chaleur spécifique (J/kg.K)	850		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,7	4,593654	6,8332
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1001		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,7	4,593456	6,8363
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2300		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	850		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,7	4,593741	6,8317
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2300		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1001		

Tableau 20 : Optimisation des propriétés thermo-physiques du BTC

<b>Propriétés thermo-physiques du BTC</b>		<b>Ecart moyen</b>	<b>Ecart maximal</b>
		<b>Température zone</b>	<b>Température zone</b>
		<b>intérieure</b>	<b>intérieure</b>
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,495292	8,2357
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	613		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,461933	7,87
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,434383	7,5357
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,452673	7,7657
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	613		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,423867	7,3924
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682		

(J/kg.K)			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,3998	7,0543
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,420328	7,343
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	613		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,393857	6,9696
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,05	4,372835	6,6656
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,2	4,41518	8,3007
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	613		
(J/kg.K)			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,2	4,3768	7,9377
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		

(kg/m <sup>3</sup> )			
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,2	4,349	7,6
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,2	4,3674	7,83
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	613		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,2	4,33757	7,4567
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,2	4,3133	7,1157
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751		
Conductivité thermique (W/m.K)	1,2	4,3339	7,4074
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	613		
Conductivité	1,2	4,3073	7,0302

thermique (W/m.K)			
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682		
Conductivité	1,2	4,2857	6,6924
thermique (W/m.K)			
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751		
Conductivité	1,35	4,357453	8,3548
thermique (W/m.K)			
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	613		
Conductivité	1,35	4,30826	7,9931
thermique (W/m.K)			
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682		
Conductivité	1,35	4,2783365	7,6563
thermique (W/m.K)			
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751		
Conductivité	1,35	4,2978	7,8872
thermique (W/m.K)			
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950		
Chaleur spécifique	613		

	(J/kg.K)			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,35	4,267	7,5119	
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950			
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,35	4,2418	7,1691	
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1950			
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,35	4,26332	7,4622	
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200			
Chaleur spécifique (J/kg.K)	613			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,35	4,2359	7,0829	
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200			
Chaleur spécifique (J/kg.K)	682			
Conductivité thermique (W/m.K)	1,35	4,214	6,7425	
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200			
Chaleur spécifique (J/kg.K)	751			

Tableau 21 : Optimisation des propriétés thermo-physiques du contre-plaqué

<b>Propriétés thermo-physiques du contre-plaqué</b>		<b>Ecart moyen Température zone intérieure</b>	<b>Ecart maximal Température zone intérieure</b>
Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,37456	6,817
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,37389	6,7706
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,3732	6,7246
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,3743	6,7951
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,3734	6,7373
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		

Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,3729	6,68
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,3739	6,7731
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,3729	6,7041
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,11	4,3728	6,6656
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3586	6,8308
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3577	6,784
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		

Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3572	6,7376
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3579	6,8086
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3573	6,7505
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3569	6,6927
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3578	6,7866
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3571	6,7171

Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13	4,3568	6,6637
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3453	6,8419
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3448	6,7951
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3441	6,7483
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	400		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3449	6,8198
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		

Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3443	6,7613
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3437	6,7032
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	500		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3448	6,7976
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1215		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3441	6,7277
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1857,5		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,15	4,3435	6,6619
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	600		
Chaleur spécifique (J/kg.K)	2500		