



CONCEPTION D'UN LOGICIEL DE BILAN THERMIQUE DES BATIMENTS EN AFRIQUE TROPICALE

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPÉCIALITÉ GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 16 juillet 2024 par :

Axel Eric BANTSANTSA (20170284)

Directeur de mémoire : **Dr. Ing. Sayon Sadio dit SIDIBE, Maître de Conférences (CAMES), Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE, Institut 2iE)**

Structure d'accueil du stage : Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE) du 2iE

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : **Dr. Ing. Habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE**

Membres et correcteurs : **Dr. Aly Ngoné NGOM** (examineur)

Ing. Madiembe Gaye (examineur)

Promotion [2023-2024]

Dédicaces

Ce travail est dédié :

*A ma grand-mère, **Mme MBANZOU Jeannette**, pour ton amour grand-maternel inconditionnel, ta protection constante, et ton soutien indéfectible, même lorsque je ne le méritais pas.*

*A ma mère, **Mme MBINI SAUSSY Judith**, pour ton amour incommensurable, ta protection maternelle sans relâche, et ton soutien immortel. Merci d'avoir toujours cru en moi, même lorsque les défis semblaient insurmontables. Ta force, ta sagesse et ton dévouement inébranlable ont été les pierres angulaires de mon succès. Comme je le dis souvent : << **Tu es la plus grande chance de ma vie, et même dans une autre vie, je te choisirais toujours.** >>. Ta présence illumine mon existence et ton amour est le phare qui guide chacun de mes pas. Tu es plus qu'une mère ; tu es mon héroïne, mon modèle et la source de toute ma détermination.*

*A mon grand frère, mon confident **M. BANTSANTSA Yann Anthony**, pour tout ton amour inconditionnel, ta protection fraternelle constante et ton soutien inébranlable. Ta sagesse, ta force et ta générosité m'ont toujours inspiré et encouragé à donner le meilleur de moi-même. Tu es non seulement un frère, mais aussi un modèle et un pilier inestimable dans ma vie.*

*A mes deux petits frères, **M. MBINI Neven Ashley** et **M. MAGNOGNOU KOUMBA Thierry Jay**, pour votre patience et compréhension infinies. Merci d'avoir supporté avec tant de bienveillance la tête de mule que je suis. Votre amour et votre soutien constant me sont précieux au-delà des mots. Vous êtes non seulement mes frères, mais aussi mes amis les plus chers, et je suis immensément fier de vous avoir pour petits frères.*

Citations

"Personnellement je suis toujours prêt à apprendre, bien que je n'aime pas toujours qu'on me donne des leçons " : Winston Churchill.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à :

- Tout le personnel enseignant et administratif de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), sous la direction du **Prof. El Hadji Bamba Diaw**, pour m'avoir accueilli et formé au cours de ces dernières années ;
- **Dr. Sayon dit SIDIBE** pour avoir toujours été présent, patient et compréhensif à mon égard. Merci pour vos conseils avisés, remarques et recommandations. Vous êtes un model et votre parcours m'inspire et me sert d'exemple ;
- **Dr. Mamadou DIOP** pour son assistance et ses conseils précieux pour la réalisation de ce mémoire ;
- **M. Glen NGUIAMBA**, pour son engagement constant en tant qu'analyste programmeur, ainsi que pour ses précieuses remarques et conseils;
- **M. Nick Aurels Edou Mve**, pour son soutien inébranlable, sa sagesse et ses conseils avisés, toujours disponibles. Comme je le dis souvent : << **Ayez un M. Mve dans votre vie** >> ;
- **M. Moukoumou Mbomo Aramand**, pour son soutien indéfectible et ses conseils ;
- Mes camarades de classe, dont la contribution, qu'elle soit direct ou indirecte, a été essentiel à la réalisation de ce travail.

Résumé

Cette étude propose une informatisation des méthodes de calculs de bilan thermique des bâtiments en zone tropicale, afin de prendre en compte les climats tropicaux africains et de faciliter l'accès direct aux données climatiques spécifiques à ces régions, souvent absentes des logiciels actuels.

Grâce à la facilité d'accès aux données météorologiques types (TMY) de l'application web PVGIS, nous avons développé un logiciel de bilan thermique des bâtiments avec une interface graphique conviviale, en utilisant la bibliothèque Tkinter du langage Python.

Une étude comparative des résultats issus de notre logiciel et du logiciel HAP 4.90, a été réalisée pour un local d'une surface de 11,4 m². Il en ressort de nos simulations un écart significatif 12,26 % pour les puissances frigorifiques, 5,09 % pour les charges sensibles et 18,34 % pour les charges latentes. Ces résultats obtenus mettent en évidence la nécessité d'apporter des améliorations au logiciel développé dans des travaux futur.

Mots Clés

1 – Bilan thermique

2 – Données météorologiques

3 – PVGIS

4 – Python

5 – Rayonnement solaire

6 – Simulation thermique

Abstract

This study proposes the digitization of thermal balance calculation methods for buildings in tropical zones, aiming to consider African tropical climates and facilitate direct access to specific climatic data for these regions, which are often missing in current software.

By leveraging easy access to typical meteorological year (TMY) data from the PVGIS web application, we developed a thermal balance software for building with a user-friendly graphical interface using Python's Tkinter library.

A comparative study of the results from our software and HAP 4.90 was conducted for a room with an area of 11.4 m². Our simulations revealed significant differences: 12.26% for cooling loads, 5.09% for sensible loads, 18.34% for latent loads. These results highlight the need to improve the software developed in future work.

Keywords

1 – Heat balance

2 – Weather data

3 – PVGIS

4 – Python

5 – Solar radiation

6 – Heat simulation

Table des matières

Dédicaces	i
Citations	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Table des matières	vi
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations	x
I. Introduction	1
I.1 Contexte global	1
I.2 Les objectifs du stage	1
I.3 Présentation de la structure d'accueil	2
I.4 Méthodologie utilisée	3
I.5 Structure du document	3
II. Synthèse bibliographique	4
II.1.1 Carrier HAP	5
II.1.2 LATS HVAC	6
II.1.3 Energyplus	6
II.1.4 DesignBuilder	7
II.1.5 TRNSYS	7
II.2 Bilan	8
II.3 Spécificités des bâtiments en Afrique tropicale	11
III. Méthodologie de développement	12
III.1 Base de données climatique	12

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

III.1.1	PVGIS	12
III.1.2	Acquisition et traitement de données météorologiques.....	15
III.2	Choix des outils et technologies de développement	17
III.2.1	Environnement logiciel	17
III.2.2	Langage de développement : Python	18
III.3	Programmation orientée objet.....	18
IV.	Conception et Développement du logiciel	19
IV.1	Méthodes de calcul pour le bilan thermique	19
IV.1.1	Calcul des apports internes.....	19
IV.1.2	Calcul des apports externes	22
IV.2	Conception de l'architecture logiciel	33
IV.2.1	Architecture générale	33
IV.2.2	Architecture modulaire.....	33
IV.2.3	Logigramme du logiciel	33
IV.3	Présentation et interface du logiciel	39
IV.3.1	Fonctionnalité du logiciel.....	39
IV.3.2	Interface utilisateur et fonctionnalités interactives.....	40
V.	Validation du logiciel et discussion des résultats	43
V.1	Validation	44
V.2	Discussion.....	50
VI.	Conclusion.....	55
VII.	Perspectives.....	56
	Bibliographie	57
	Sites internet.....	58
	ANNEXES	I

Liste des figures

Figure 1: Zone de couverture climatique de PVGIS [7]	13
Figure 2: Générateur d'année météorologique typique (TMY) PVGIS [6]	13
Figure 3: Surface azimutale, Mesurés depuis le Sud [7]	27
Figure 4: Diagramme de séquence	35
Figure 5: Logigramme - Interface graphique et gestion des évènements	33
Figure 6: Logigramme - Traitement et extraction des données météorologiques	34
Figure 7: Logigramme - Interface de saisie des données pour les éléments structurels	35
Figure 8: Logigramme - Interface de saisie de données pour les ouvertures	35
Figure 9: Logigramme - Saisie des données pour les Occupants/Infiltration d'air	36
Figure 10: Logigramme - Interface de saisie de données des équipements électriques	37
Figure 11: Logigramme - Traitement des données et affichage des résultats	38
Figure 12: Interface principale du logiciel actuel	40
Figure 13: Boîte de dialogue de saisie du nom de la pièce à climatiser	41
Figure 14: Interface graphique principale après saisie du nom de la pièce	42
Figure 15: Fenêtre modale du bouton "Données météorologiques".	43
Figure 16: Plan de cotation	45
Figure 17: Graphiques des résultats obtenus avec la simulation du logiciel actuel	49
Figure 18: Histogramme - Répartition des charges sensibles HAP 4.90	50
Figure 19: Graphique en secteur - Répartition des charges sensibles - HAP 4.90	50
Figure 20: Récapitulatif des résultats des deux logiciels	51
Figure 21: Récapitulatif des charges et des puissances frigorifiques des deux logiciels	51

Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison de certains logiciels de simulation énergétique et de conception de systèmes HVAC	8
Tableau 2: Prétraitement des données météorologiques	16
Tableau 3: Chaleur dégagée par les personnes [8]	20
Tableau 4: Détails des données météorologiques	26
Tableau 5: Orientations et Azimuts de Surface, Mesurés depuis le Sud.....	27
Tableau 6: Paramètres du modèle de McAdams [13]	31
Tableau 7: Différence de température entre les différentes faces des parois [8]	32
Tableau 8: Pièces du bâtiment.....	44
Tableau 9: Dimension du local à climatiser	46
Tableau 10: Dimension des portes et de la fenêtre du local à climatiser	46
Tableau 11: Conditions environnementales	47
Tableau 12: Equipements électriques du local à climatiser	47
Tableau 13: Revêtement du local à climatiser	48
Tableau 14: Résultats de la simulation avec le logiciel actuel	48
Tableau 15: Résultats obtenus avec la simulation du logiciel HAP 4.90.....	49

Liste des abréviations

Alphabet latin

Notation	Unité	Signification
ACH	(-)	Air Change Per Hour
A_Z	(°)	Azimet de la paroi
A_{Zs}	(°)	Azimet du soleil
a	(-)	Coefficient d'atténuation
alt	m	Altitude
$C_{Lat.équipement}$	W	Chaleur latente des équipements divers
C_{LatOc}	W	Chaleur latente des occupants
$C_{Sens.équipement}$	W	Chaleur sensible des équipements divers
$C_{Sens.Oc}$	W	Chaleur sensible des occupants
CSV	(-)	Comma-separated values
E_D	W/m ²	Rayonnement direct
E_{DN}	W/m ²	Rayonnement direct sur un plan normal aux rayons du soleil
E_R	W/m ²	Rayonnement réfléchi
E_d	W/m ²	Rayonnement diffus
e_i	m	Epaisseur d'une couche
FCS	(-)	Facteur de chaleur sensible
G	W/m ²	Rayonnement global
H	W/m ² /°C	Coefficient d'échange global
HR	(%)	Humidité relative
h_i	W/m ² /°C	coefficient d'échange thermique par convection de la surface interne
h_e	W/m ² /°C	coefficient d'échange thermique par convection de la surface externe
h_s	(°)	Hauteur du soleil
IAC	(-)	Indoor attenuation coefficient
k_u	(-)	Facteur d'utilisation
LED	(-)	Light – emitting diode
N	(°)	Nord
NE	(°)	Nord - Est
NO	(°)	Nord - Ouest

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

O	(°)	Ouest
POO	(-)	Programmation orientée objet
P_{atm}	Pa	Pression atmosphérique
P_{Sat}	Pa	Pression de vapeur saturante
P_u	W	Puissance utile
$Q_{Fen,\theta}$	W	Gain de chaleur de la fenêtre ensoleillée
$Q_{Lat.\text{équipement}}$	W	Charges latente des équipements divers
$Q_{Lat.Oc}$	W	Charges latente des occupants
$Q_{Lat.inf}$	W	Charge latente par infiltration
$Q_{Sens.\text{écl.fluo}}$	W	Charge sensible des lampes fluorescentes
$Q_{Sens.\text{équipement}}$	W	Charges sensible des équipements divers
$Q_{Sens.Oc}$	W	Charges sensibles des occupants
$Q_{Sens.inf}$	W	Charges sensible par infiltration
$Q_{moteur.\text{ext/int}}$	W	Charge des équipements avec moteur externe et l'équipement entraîné à l'intérieur du local
$Q_{moteur.\text{int/ext}}$	W	Charge des équipements avec moteur interne et l'équipement entraîné à l'extérieur du local
$Q_{moteur.\text{int/int}}$	W	Charge des équipements avec moteur et équipement entraîné à l'intérieur du local
$q_{Op,\theta}$	W	Gains chaleur par la portion opaque de la fenêtre
q_v	m^3	Débit d'air de renouvellement
$q_{v,\theta}$	W	Gain de chaleur par la portion vitrée de la fenêtre
S	(°)	Sud
SE	(°)	Sud-Est
SHGC	(-)	Solar Heat Gain Coefficient
$SHGC_d$	(-)	Solar Heat Gain Coefficient diffuse
SO	(°)	Sud -Ouest
SPA	(-)	Solar Position Algorithm
T_e	°C	Température extérieure
T_i	°C	Température intérieure
V	m/s	Vitesse du vent

Alphabet grec		
Notation	Unité	Signification
λ_i	W/m.°C	Conductivité thermique d'une paroi
ρ_g	(-)	Réfectance du sol
ω_i	g/kg _{air sec}	Humidité absolue intérieur
ω_e	g/kg _{air sec}	Humidité absolue extérieure
β	(°)	Inclinaison de la paroi
γ	(°)	Angle de surface-solaire azimutale
θ	(°)	Angle d'incidence du rayonnement solaire direct par rapport à la normal de la surface
λ	(-)	Facteur de charge
λ	W/m.°C	Conductivité thermique
ρ	(°)	Rendement
φ	(°)	Azimut solaire
ψ	(°)	Surface azimutale
ω	g/kg _{air sec}	Humidité absolue

Sigles	Signification
2iE	Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BIM	Building information modeling
CVC	Chauffage, ventilation et climatisation
HAP	Hourly Analysis Program
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning
IDE	Integrated development environment
IEPF	Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OMM	Organisation météorologique mondiale
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
SOA	Service – oriented architecture
STD	Simulation thermique dynamique
TMY	Typical meteorological year
UML	Unified Modeling Language

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

UTC Universal Time Coordinated

VsCode Visual Studio Code

I. Introduction

I.1 Contexte global

Le développement des logiciels de simulation et de dimensionnement des charges thermiques des bâtiments destinés au public est en cours depuis plus de quatre décennies, et cela principalement par les pays du nord. Actuellement, une variété de logiciels de simulation et de dimensionnement climatique est disponible à travers le monde, certains étant généralistes tandis que d'autres sont spécifiquement conçus pour des études particulières. Malgré une certaine maturité atteinte par certains en termes de robustesse, de fiabilité et de champ d'application, ces derniers présentent encore des lacunes significatives dans la prise en compte des spécificités des climats africains.

Ces limitations se traduisent par le recours des ingénieurs à des méthodes manuelles, fonctionnelles pour des études de petite envergure mais fastidieuses et contraignantes à une plus grande échelle, ce qui altère l'efficacité et la qualité des travaux réalisés. Afin de remédier à cette lacune, l'acquisition d'un outil performant s'avère impérative pour simplifier cette tâche. C'est dans cette optique que nous envisageons la mise en place d'un logiciel de dimensionnement des systèmes climatiques adapté aux conditions géoclimatiques africaines, permettant de sélectionner des équipements plus adaptés et économiques en termes d'énergie et de coût.

I.2 Les objectifs du stage

Ce stage vise de manière globale à développer un logiciel informatique capable d'effectuer des calculs précis et adaptés au contexte des bâtiments en Afrique tropicale pour évaluer leur bilan thermique, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité énergétique et le confort dans ces régions.

De manière spécifique, les objectifs incluent l'analyse du contexte et de la justification de l'étude, l'étude des principes du bilan thermique des bâtiments, l'évaluation des outils logiciels existants, le développement d'un logiciel adapté aux besoins spécifiques, la validation et l'évaluation de la performance du logiciel, ainsi que la proposition de recommandations et de perspectives.

I.3 Présentation de la structure d'accueil

Le Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) de l'Institut 2iE est un laboratoire de recherche dans le domaine des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Il poursuit deux principaux objectifs :

- Développer des solutions innovantes adaptées aux besoins énergétiques des pays africains à travers les énergies renouvelables et l'optimisation des systèmes de production d'énergie ;
- Trouver des solutions optimales en matière d'intégration énergétique pour une valorisation efficace des ressources localement disponibles.

Les axes de recherche du LabEREE sont [1]:

- AXE 1 : Énergies renouvelables et Matériaux pour systèmes énergétiques (ERMaSE)
 - Ressources énergétiques
 - Procédés de conversion et leur efficacité
 - Caractérisation (biomasse, cellules, thermique...)
 - Matériaux pour le stockage thermique
 - Fluides de transfert
 - Matériaux poreux

AXE 2 : Systèmes Multi-sources et Efficacité Énergétique (SMEE)

- Productions coopératives connectées au réseau
- Hybridation des systèmes de production énergétique
- Efficacité énergétique dans le bâtiment
- Systèmes Multi sources pilotables par la demande (résidentiel, minier, industriel)
- Électrification rurale
- Gestion des intermittences (ressources, charges et stockage)

I.4 Méthodologie utilisée

La méthodologie adoptée pour cette étude repose sur plusieurs étapes fondamentales. La collecte et le traitement des données météorologiques débutent par l'utilisation de PVGIS, qui fournit des données climatiques spécifiques à la région de l'Afrique tropicale au format CSV pour être intégrées dans notre logiciel.

L'élaboration du bilan thermique s'appuie sur des formules issues des principes fondamentaux de l'ASHRAE 2017, le programme de calcul d'un bilan thermique de climatisation en climat tropical publié par l'institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF), le Manuel Carrier, de la méthode de BilanTherm. Ces formules sont implémentées via Python, exploitant les différentes équations pour évaluer les flux de chaleur dans les bâtiments.

Python est le langage principal utilisé pour le développement du logiciel. Parallèlement, la bibliothèque 'Tkinter' est également utilisée pour créer une interface utilisateur conviviale, permettant une interaction aisée et une claire visualisation des résultats obtenus à partir des formules utilisés.

La phase de validation consiste en une comparaison des résultats du logiciel avec des données de référence et des simulations d'un outil reconnu. Cette étape cruciale vise à évaluer la précision et l'efficacité du logiciel.

En parallèle, une documentation détaillée est élaborée pour décrire chaque étape du développement, l'implémentation des modèles mathématiques et les aspects techniques de l'interface utilisateur. Cette documentation facilite la compréhension du fonctionnement du logiciel et aide à d'éventuelles adaptations ou améliorations ultérieures.

I.5 Structure du document

Ce rapport est structuré en six parties :

- La première partie résume les informations bibliographiques sur les logiciels de bilan thermique des bâtiments ;
- Le second détaille la méthodologie de développement c'est-à-dire les choix techniques pour la création du logiciel ;

- La troisième partie énumère et explique les principales fonctionnalités du logiciel, ces algorithmes, modèles employés pour effectuer le bilan thermique ainsi qu'une présentation de l'interface utilisateur ;
- La quatrième partie détaille les méthodes de validations et d'évaluations mis en place pour garantir la fiabilité du logiciel ;
- La cinquième partie présente une étude de cas c'est-à-dire l'application de notre logiciel à un bâtiment d'une région tropicale ;
- Enfin, la sixième et ultime partie présente une discussion des résultats appliqués à notre bâtiment.

II. Synthèse bibliographique

De nombreux logiciels de bilan thermique des bâtiments sont disponibles sur le marché, plus ou moins onéreux en fonction de leur convivialité, ergonomie, fiabilité, performance et interopérabilité et d'autres sont opensources. Dans leur étude, Marija Trčka *, Jan L.M. Hensen [1] catégorisent ces logiciels en fonction des problèmes auxquels ils sont destinés à traiter, bien que ces problèmes ne soient pas mutuellement exclusifs et que certains logiciels puissent traiter plusieurs problèmes, ils tendent à être étudiés de manière isolée les uns des autres. Les catégories sont les suivantes :

- **Logiciels pour le dimensionnement des conduites/bouches de ventilation**
Ces logiciels de conception système prennent en compte la distribution du flux et le dimensionnement du système de distribution de liquide/air (AFT Fathom, DOLPHIN, Calculateur de conduits, DUCTSIZE, Pipe-Flo, etc.).
- **Logiciels pour le dimensionnement et la sélection des équipements**
Les logiciels de dimensionnement et de sélection des équipements CVC, tels que Carrier HAP, LATS HVAC, EnergyPlus etc. permettent de dimensionner les équipements de manière précise. La plupart de ces outils se basent sur des procédures et algorithmes standards, comme ceux établis par l'ASHRAE. Cependant, de nombreux outils sont des produits propriétaires fournis par les fabricants d'équipements. Ces derniers proposent également des catalogues numériques qui peuvent être intégrés aux outils de dimensionnement, facilitant ainsi la sélection des composants adaptés aux critères de conception.
- **Logiciels pour l'analyse de la performance énergétique**

Ces outils prévoient la consommation énergétique annuelle des systèmes CVC en se basant sur des équations définissant la performance thermique des bâtiments et des systèmes, avec des conditions données. Par exemple, EnergyPlus, DOE-2 et eQUEST sont utilisés pour simuler et analyser les performances à pleine charge et à charge partielle, ainsi que pour comparer différentes options de conception.

- **Logiciels pour l'optimisation du système**

Utilisés avec les outils d'analyse de la performance énergétique, ces logiciels optimisent un ensemble de paramètres dans de multiples simulations selon une fonction objectif spécifiée. Comme exemple nous pouvons citer OpenStudio et DesignBuilder.

- **Logiciels pour l'analyse et l'optimisation des contrôles**

Ces outils offrent une gamme variée de fonctionnalités, allant de modèles abstraits à des représentations avancées incluant la logique floue (contrairement à la logique booléenne classique qui ne fonctionne qu'avec des valeurs vraies ou fausses (0 ou 1), permet de représenter et de traiter des informations incertaines, imprécises ou approximatives). Leur utilité s'étend à divers domaines tels que les diagnostics de performance et de défauts, la simulation de réponses HVAC (Heat, Ventilation and Air-Conditioning) et l'évaluation de scénarios de contrôle. Parmi ces logiciels, on retrouve ESP-r, EnergyPlus, TRNSYS,...

Dans le cadre de notre projet nous nous focaliseront uniquement sur les logiciels pour le dimensionnement et la sélection des équipements et étant données que certains logiciels sont propriétaires, ils ne publient pas des informations détaillées sur leurs outils. Cependant, nous nous pencheront sur quelques logiciels à savoir : Carrier HAP, LATS HVAC, Energyplus, DesignBuilder et TRNSYS.

II.1.1 Carrier HAP

Carrier HAP est un logiciel de calcul des charges thermiques et de la consommation énergétique des bâtiments tertiaires développé par CARRIER SA. Il s'agit d'un outil professionnel et intuitif qui utilise la méthode des facteurs de réponse pour les calculs de charge horaire.

Le logiciel dispose d'une base de données complète de stations météorologiques couvrant diverses régions du monde. Les sites météo sont définis à partir des pays ou continents suivants : USA, Canada, Amérique centrale, Amérique du sud, Europe, Moyen orient, Afrique, Asie, et

Pacifique. La nouvelle version HAP v6.0.0 possède environ 8100 nouveaux emplacements météorologiques ainsi qu'à peu près le même nombre de nouveaux fichiers météorologiques de simulation utilisant TMY3, CWeather (Canadian Weather Year for Energy Calculation), IWeather2 (International Weather year for Energy Calculations) et Climate.OneBuilding [2]. Le fichier météorologique de simulation est désormais automatiquement sélectionné pour l'utilisateur lorsqu'il choisit l'emplacement météorologique de conception, plutôt que de devoir effectuer cette tâche séparément. Une autre amélioration météorologique majeure inclut la Zone climatique ASHRAE 90.1.

Cependant, il est important de noter que lorsque les données météorologiques ne sont pas disponibles pour un emplacement spécifique dans ASHRAE 90.1, ces dernières sont interpolées à partir de stations météorologiques les plus proches. Ces interpolations sont basées sur des stations météorologiques des pays membres de l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

II.1.2 LATS HVAC

LATS HVAC (LG Air Conditioning Technologies) est un logiciel propriétaire développé par LG Electronics, conçu pour aider les professionnels à sélectionner et configurer des produits de climatisation LG pour des projets spécifiques. C'est un outil gratuit simplifie le processus de sélection des produits pour les systèmes de climatisation LG en garantissant la compatibilité et le dimensionnement approprié des équipements selon les besoins du projet. De plus il fournit des rapports détaillés pour la documentation et la référence ultérieure.

La base donnée météorologique de cet outil couvre tous les continents, toutefois elle est particulièrement exhaustive pour certains pays tels que la Corée du Sud, les Etats-Unis, le Royaume-Unis, la France etc. En revanche, la couverture est plus limitée pour d'autres, comme les pays africains, généralement concentrée autour de leurs capitales.

Cependant, l'outil permet à l'utilisateur de créer une base de données météorologique pour un site qui n'est pas répertorié dans leur base de données existante, comme illustré dans la figure suivante [3].

II.1.3 Energyplus

EnergyPlus est un logiciel de simulation thermique dynamique (STD) dédié à l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments, permettant de modéliser divers systèmes de construction comme le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et la ventilation. Il évalue les

besoins énergétiques nécessaires au maintien des conditions thermiques requises et analyse la consommation d'énergie primaire [4].

Les données météorologiques préchargées sont disponibles pour les pays membres de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) [2], mais il est également possible d'importer des données de sources alternatives pour simuler des bâtiments dans des régions non couvertes par l'OMM. EnergyPlus bénéficie des fonctionnalités héritées de programmes antérieurs tels que BLAST et DOE-2, tout en offrant des capacités avancées. Pour la création de modèles de bâtiments et la configuration des simulations, une interface d'entrée comme DesignBuilder, Easy EnergyPlus ou Google SketchUp est requise.

Ce logiciel s'adresse à une variété d'utilisateurs, notamment les chercheurs, ingénieurs, architectes, concepteurs et étudiants impliqués dans la conception et l'analyse de bâtiments à haute efficacité énergétique. Il est largement utilisé dans la recherche académique, la conception architecturale et le conseil en énergie.

II.1.4 DesignBuilder

DesignBuilder, un logiciel développé par DesignBuilder Software Limited, combine la modélisation BIM (Building Information Modeling) avec la simulation thermique dynamique (STD) pour la conception et l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments. Ses fonctionnalités clés comprennent le calcul précis des déperditions/gains thermiques, le dimensionnement des systèmes de climatisation et de ventilation, la simulation dynamique détaillée, la modélisation 3D réaliste, et l'optimisation énergétique avancée. Avec un contenu riche en français, il simplifie la modélisation avec des assistants intelligents et permet l'importation transparente de modèles BIM [5].

Utilisant le moteur de simulation EnergyPlus, DesignBuilder offre une couverture météorologique mondiale pour des simulations réalistes dans divers climats, avec plus de 4400 stations météorologiques disponibles.

II.1.5 TRNSYS

TRNSYS (TRaNsient System Simulation Tool) est un logiciel de simulation thermique dynamique conçu pour la modéliser et analyser la performance énergétique des systèmes thermiques, incluant les bâtiments, les équipements HVAC (Chauffage, ventilation et climatisation), ainsi que les systèmes énergétiques renouvelables. Initialement développé par l'Université du Wisconsin-Madison, il est particulièrement réputé pour sa flexibilité et sa

modularité, permettant d’intégrer une large gamme de composants personnalisables pour simuler des configurations complexes [3].

TRNSYS utilise un environnement graphique modulaire où chaque composant du système est représenté comme un module distinct, facilitant ainsi la modélisation des interactions entre bâtiments, systèmes énergétiques et conditions environnementales. Ses principales fonctionnalités incluent l’évaluation des besoins énergétiques des bâtiments, la modélisation des flux thermiques et énergétiques, et l’analyse de la performance des systèmes énergétiques intégrés [4].

Le logiciel prend en charge les années météorologiques préchargées pour divers endroits à travers le monde et permet également et permet également l’importation de données personnalisées pour la des simulations spécifiques [5]. Grâce à ses bibliothèques extensibles et à la possibilité de programmer des modules personnalisés en langage Fortran ou autre, TRNSYS s’adapte aux besoins des chercheurs, ingénieurs et concepteurs [6].

TRNSYS est largement utilisé dans les domaines de la recherche académique, du développement technologique et de la conception de systèmes énergétiques, notamment pour l’étude des bâtiments à haute efficacité énergétique, des réseaux de chaleur, et des systèmes solaires thermiques. Il s’adresse à une communauté diversifiée, incluant les chercheurs, les concepteurs, les architectes et les ingénieurs [7].

II.2 Bilan

Un panorama comparatif des quatre logiciels choisis pour la simulation énergétique des bâtiments met en lumière leurs spécificités. Chacun se distingue par son type (propriétaire ou open-source), ses fonctionnalités et son public cible. Des aspects tels que la facilité d’utilisation, la précision des calculs, et la capacité de modélisation 3D sont évalués, permettant ainsi de comprendre les atouts et les limites de chaque solution en fonction des besoins spécifiques des utilisateurs.

Tableau 1: Comparaison de certains logiciels de simulation énergétique et de conception de systèmes HVAC

Caractéristiques	Carrier HAP	LATS HVAC	EnergyPlus	DesignBuilder	TRNSYS
Type	Logiciel propriétaire spécialisé dans	Logiciel propriétaire spécialisé dans les systèmes	Logiciel open-source, moteur de simulation énergétique	Logiciel propriétaire, interface utilisateur	Logiciel open-source, plateforme modulaire de simulation thermique dynamique

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

Caractéristiques	Carrier HAP	LATS HVAC	EnergyPlus	DesignBuilder	TRNSYS
	les systèmes Carrier	Carrier (principalement pour les produits LG)		graphique pour EnergyPlus	
Fonctionnalités	Simulation énergétique, systèmes HVAC, évaluation économique, limité aux systèmes Carrier	Simulation énergétique, conception de système 3Dmes HVAC, évaluation économique, flexibilité dans la configuration des systèmes	Moteur de simulation énergétique hautement personnalisable, large gamme d'applications	Simulation énergétique, conception architecturale, analyse du jour, interface utilisateur intuitive	Simulation thermique dynamique, analyse de la performance énergétique des bâtiments, systèmes HVAC, et énergies renouvelables
Interface utilisateur	Intuitive, basée sur des templates	Intuitive basée sur des diagrammes	Interface de ligne de commande, personnalisable par script	Interface graphique 3D, personnalisable	Environnement graphique modulaire avec composants distincts pour chaque élément du système
Complexité	Modérée, nécessite une formation minimale	Modérée nécessite une formation minimale	Très complexe, nécessite une expertise en modélisation énergétique	Complexité moyenne grâce à l'interface graphique simplifiée pour EnergyPlus	Moyenne à élever, nécessite une certaine expertise, mais la modularité permet une personnalisation facile
Public cible	Ingénieurs en CVC, concepteurs de bâtiments commerciaux	Professionnels utilisant les systèmes CVC de LG	Chercheurs, ingénieurs en efficacité énergétique	Ingénieurs en énergie, architectes	Chercheurs, ingénieurs, architectes, concepteurs de systèmes énergétiques
Modélisation 3D	Non	Non	Non	Oui (intégrée)	Non (modélisation basée sur des composants et modules)
Precision des calculs	Bonne précision pour les systèmes CVC	Bonne pour les systèmes LG, limitée pour d'autres	Très haute précision dans la simulation énergétique	Très haute précision (basée sur EnergyPlus)	Haute précision pour la simulation thermique dynamique

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

Caractéristiques	Carrier HAP	LATS HVAC	EnergyPlus	DesignBuilder	TRNSYS
Support technique	Bon support utilisateur, documentation complète	Documentation spécifique à LG, support limité	Communauté open-source, forums en ligne	Bon support via la communauté et documentation accessible	Support via la communauté, documentation détaillée disponible
Coût	Payant	Gratuit	Gratuit (Open-source)	Payant (avec une version d'essai disponible)	Gratuit (Open-source)
Application	Conception de systèmes HVAC pour les bâtiments commerciaux, évaluation de l'efficacité énergétique	Conception de systèmes HVAC pour les bâtiments commerciaux et industriels, optimisation énergétique	Recherche, développement de nouveaux modèles de bâtiments, validation de normes énergétiques	Conception architecturale intégrée, simulation énergétique, analyse du jour	Recherche, conception et analyse des performances énergétiques des bâtiments et systèmes complexes
Interopérabilité	Intégration avec d'autres logiciels de Carrier	Limité aux outils LG	Compatible avec plusieurs plateformes de simulation	Fonctionne directement avec EnergyPlus, export en formats compatibles avec d'autres outils	Interopérabilité avec d'autres logiciels de simulation et possibilité d'intégrer des modules personnalisés

- **Carrier HAP** : Parfait pour les projets utilisant des équipements Carrier, interface intuitive, mais limité à la gamme de produits Carrier ;
- **LATS HVAC** : Flexibilité dans la configuration des systèmes HVAC, mais moins connu et peut-être moins documenté que d'autres options ;
- **EnergyPlus** : Moteur de simulation énergétique de référence, hautement personnalisable, mais nécessite une expertise technique ;
- **DesignBuilder** : Interface utilisateur intuitive, intégration avec d'autres logiciels, mais peut être coûteux et moins flexible que EnergyPlus pour les utilisateurs avancés.

- **TRNSYS** : Logiciel open-source flexible et modulaire, adapté aux simulations thermiques dynamiques, mais nécessite une expertise technique pour les configurations avancées.

II.3 Spécificités des bâtiments en Afrique tropicale

L'architecture en Afrique tropicale se caractérise par une forte adaptation aux conditions climatiques locales. En milieu rural, les matériaux naturels sont privilégiés pour leur disponibilité et leurs performances thermiques, tandis qu'en milieu urbain, les matériaux modernes, bien que plus durables, posent des défis en matière de confort thermique.

Dans les campagnes, les constructions reposent principalement sur des matériaux naturels, peu transformés et abondants. La terre crue, sous forme de banco, d'adobe ou de pisé, est le matériau de prédilection pour l'élévation des murs, en raison de sa capacité à amortir les variations de température entre le jour et la nuit grâce à son inertie thermique élevée [6]. Ces constructions permettent ainsi de conserver une relative fraîcheur intérieure en journée, tout en limitant les déperditions nocturnes de chaleur. Cependant, leur vulnérabilité à l'érosion due aux intempéries et la nécessité d'un entretien régulier constituent des limites notables. Le bois, lorsqu'il est disponible, est employé pour les charpentes, bien que son usage soit contraint par la déforestation [6]. Pour la couverture, le chaume offre une excellente isolation thermique, mais reste peu durable face aux incendies et aux pluies, tandis que la tôle ondulée, plus répandue, aggrave la surchauffe intérieure en raison de sa forte conductivité thermique [6].

Dans les zones urbaines, les constructions ont progressivement intégré des matériaux industriels tels que le parpaing en ciment, le béton armé et la brique cuite. Si ces matériaux garantissent une meilleure durabilité et une résistance accrue aux intempéries, leurs performances thermiques sont en revanche médiocres. Le béton, en particulier, emmagasine une quantité importante de chaleur durant la journée et la restitue lentement la nuit, contribuant ainsi à l'effet d'îlot de chaleur urbain et augmentant les besoins en climatisation [6]. De plus, les toitures en tôle, encore largement utilisées, amplifient cette problématique en raison de leur capacité à chauffer rapidement sous l'effet du rayonnement solaire [6]. Par ailleurs, l'intégration croissante du verre dans l'architecture contemporaine, notamment pour les façades, accentue la surchauffe lorsqu'il n'est pas accompagné de protections solaires adaptées [6].

Face à ces défis, l'essor des éco-matériaux offre des alternatives durables conciliant confort thermique et réduction de l'empreinte environnementale. Les blocs de terre comprimée (BTC) offrent une alternative durable en combinant résistance mécanique et inertie thermique, tout en réduisant l'impact environnemental [6]. L'intégration de toitures réfléchissantes et de protections solaires améliore également le confort thermique tout en limitant la consommation énergétique [6]. Ces solutions permettent d'adapter les bâtiments aux réalités climatiques locales tout en favorisant une construction plus durable.

III. Méthodologie de développement

La méthodologie de développement détaille la mise en place d'une base de données climatique ainsi que les technologies spécifiques adoptées pour la réalisation de notre projet. Nous explorerons l'ensemble des outils, du choix de l'outil de développement intégré et du langage de programmation utilisé. Cette méthodologie constitue le socle sur lequel repose l'ensemble du processus de développement, assurant cohérence et efficacité tout au long du projet.

III.1 Base de données climatique

La base de données climatique revêt une importance particulière pour notre projet, car la qualité de ces données influencera directement la précision et la pertinence des résultats de notre logiciel. Cette section se penchera sur la création de la base de données, incluant les sources et la méthodologie de collecte.

III.1.1 PVGIS

Pour établir notre base de données climatique, nous avons choisi de nous appuyer sur PVGIS, une application Web offrant des données sur le rayonnement solaire et la production d'énergie photovoltaïque à travers le monde (**Figure 1**). En particulier, nous avons tiré parti des données des années météorologiques type (TMY) de PVGIS, générées à partir de diverses sources telles que des données de réanalyse, des observations satellites, et des mesures au sol dans certaines régions. Son utilisation est totalement gratuite, il n'y a aucune restriction sur l'utilisation des résultats et aucune inscription n'est requise (**Figure 2**).

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

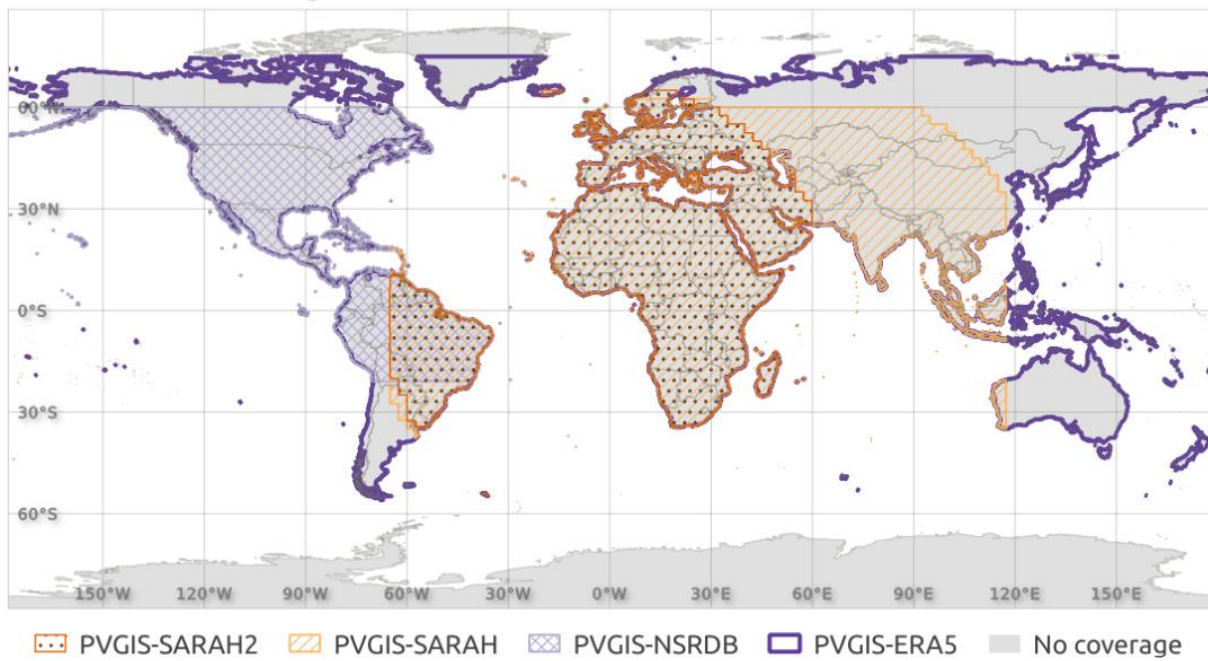


Figure 1: Zone de couverture climatique de PVGIS [7]

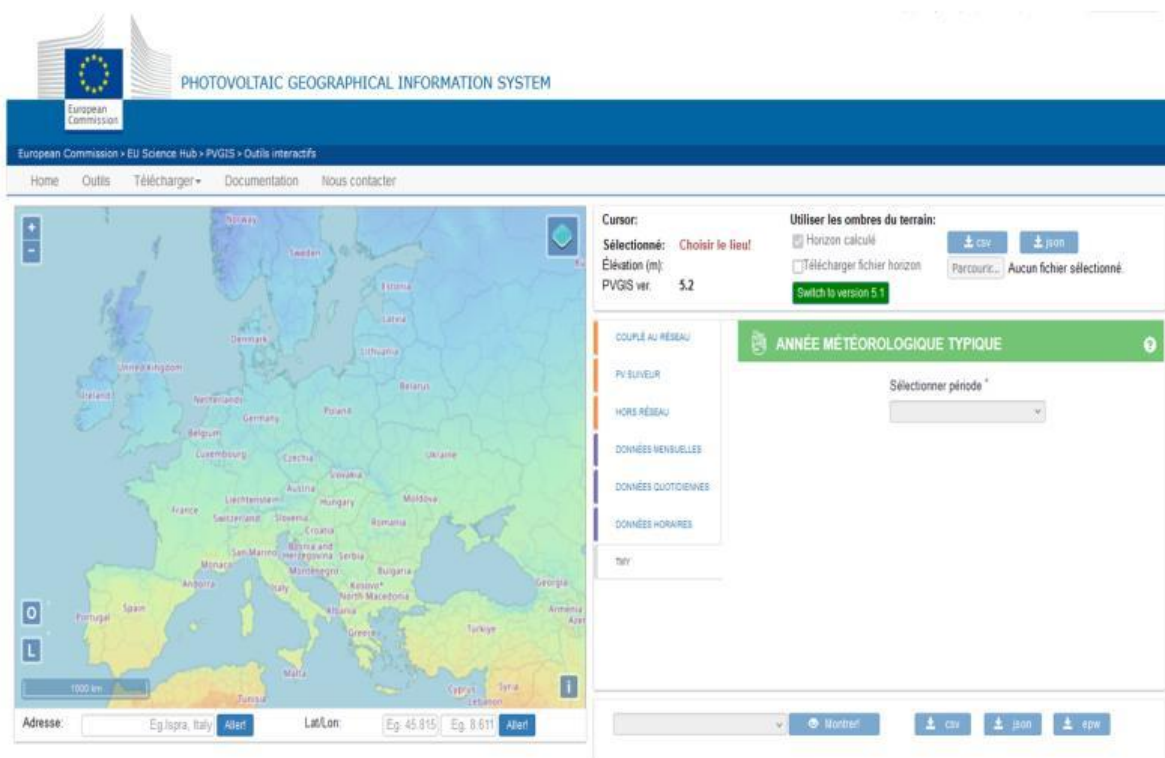


Figure 2: Générateur d'année météorologique typique (TMY) PVGIS [6]

- **Données météorologiques type (TMY) :**

Une année météorologique type est un ensemble de données météorologiques avec des valeurs de données pour chaque heure d'une année (soit 8760 heures) pour un emplacement géographique donné.

- **Méthodologie de PVGIS :**

Dans PVGIS, les TMY sont générées à partir de données de réanalyse ERA-Land, de satellite (PVGIS-SARAH2, PVGIS-NSRDB, ...) et mesures au sol. PVGIS utilise également une méthode de calcul similaire à celle de Meteonorm pour estimer le rayonnement solaire globale. Les données sont interpolées sur une grille géographique d'un pas de 3 km, puis interpolées par procédé stochastique à des pas horaires puis quotidiens.

Les données météorologiques type sont utilisées pour calculer la performance énergétique des systèmes photovoltaïques mais dans le cas de notre projet de bâtiments. PVGIS utilise des modèles numériques de terrain pour estimer l'irradiation solaire globale et inclinée à différentes orientations et inclinaisons de modules photovoltaïques selon une méthode conforme à la norme ISO 15927-4.

- **Avantages et limites des données TMY de PVGIS :**

Les données TMY de PVGIS offrent plusieurs avantages. Elles sont accessibles gratuitement et sans restriction géographiques, garantissant ainsi un accès facile à un large public. Leur fiabilité est assurée par la norme ISO 15927-4, ce qui renforce leur crédibilité [8]. De plus, la méthode utilisée peut fournir des données TMY pour n'importe quel endroit dans les zones continentales, offrant ainsi une couverture géographique étendue par rapport aux stations météorologiques traditionnelles. Les utilisateurs peuvent télécharger les données dans différents formats tels que CSV, json ou epw, ce qui leur offre une grande flexibilité pour leur utilisation dans divers logiciels ou systèmes [8]. Il est également à noter que le concept de TMY, développé il y a plus de 30 ans, s'adapte aux progrès technologiques actuels, permettant des calculs plus rapides avec des séries temporelles plus longues [8].

Cependant, la résolution spatiale des données de réanalyse est relativement faible, pouvant entraîner des imprécisions, en particulier dans les zones avec de grandes différences d'altitude [8]. De plus, le processus de construction des données TMY introduit lui-même une certaine incertitude dans les résultats, avec une marge d'erreur

d'environ 6% pour les besoins de chauffage, qui peut être encore plus élevée pour le refroidissement [8].

Néanmoins, malgré ces défis, les données TMY de PVGIS demeurent précieuses pour les calculs de performance énergétique des bâtiments et peuvent être utilisées avec soin pour informer la conception et l'évaluation des systèmes énergétiques.

III.1.2 Acquisition et traitement de données météorologiques

L'acquisition et le traitement de données météorologiques détaillent le processus d'extraction des données climatiques initialement obtenues via la plateforme PVGIS, ainsi que la transformation de ces données en information exploitables pour notre logiciel.

- **Collecte des données météorologiques :**

La collecte des données météorologique implique le téléchargement des données TMY à partir de la plateforme PVGIS, en suivant plusieurs étapes :

- 1- **Accès à l'outil TMY :** Utilisation de l'interface PVGIS et accéder à l'onglet TMY ou utiliser le service non interactif TMY app ;
- 2- **Sélection de la localisation :** Choix de la localisation pour laquelle les données TMY sont téléchargées, en introduisant les coordonnées géographiques ou le nom du lieu et du pays ;
- 3- **Visualisation interactive :** Utilisation de l'outil pour visualiser de manière interactive toutes les données disponibles ;
- 4- **Téléchargement :** Les données TMY peuvent être téléchargées dans des formats tels que CSV, JSON ou EPW. Pour notre projet, nous avons opté pour le format CSV ;
- 5- **Choix de la base de données de rayonnement solaire :** Sélection de la base de données de rayonnement solaire à utiliser, telles que PVGIS-SARAH2, PVGIS-NSRDB ou PVGIS-ERA5. Pour notre projet nous avons utilisé la base de données PVGIS-SARAH2 (base de données par défaut pour l'Europe, l'Asie, l'Afrique et l'Amérique du Sud [inférieure à 20° S]).

- **Traitement des données météorologiques :**

Une fois le document téléchargé au format CSV, il est importé dans une feuille de calcul Excel pour le rendre exploitable dans notre programme informatique. Les informations

pertinentes du fichier, comprenant localisation géographique, l'horodatage et les conditions climatiques sont présentées dans le **Tableau 2**.

A l'aide de la bibliothèque *Pandas*, reconnue dans la manipulation et l'analyse de données, le fichier CSV est importé dans notre programme informatique pour être traité afin de faciliter leur intégration dans les calculs du bilan thermique. A l'exception de la localisation géographique, les données de l'horodatage et des conditions climatiques totalisent 8760 lignes, correspondant au nombre d'heure dans une année standard (365 jours). Pour assurer la pertinence des données, seules celles correspondant aux températures les plus élevées de chaque mois sont conservées, tandis que les données non conformes à ces critères, ainsi que la colonne du rayonnement infrarouge descendant, sont supprimées.

La colonne « Time (UTC) » est divisée en trois colonnes distinctes : « Mois », « Jour » et « Heure », étant donné que les années ne sont pas pertinentes pour notre analyse et que les minutes sont constantes à zéro.

En résumé, après le traitement, nous obtenons le **Tableau 2** qui est une matrice de 12 lignes et 11 colonnes. La matrice est utilisée pour :

- Sélectionner les températures les plus élevées de chaque mois afin de modéliser des scénarios critiques pour le bilan thermique ;
- Faciliter l'intégration des données dans le programme informatique pour les calculs ultérieurs (charges thermiques, besoin en climatisation, etc.) ;
- Adapter les données brutes à un format exploitable (par exemple, découpage du temps en mois, heure pour simplifier l'analyse et exclure les informations inutiles)

Tableau 2: Prétraitement des données météorologiques

Données		Unités
Localisation géographique	Latitude, longitude	Degrés décimal
	Altitude	m
Horodatage	Temps (UTC)	Année/Mois/Jour/Heure/Minute
	Température sèche	°C
	Humidité relative	%
	Irradiance global horizontale	
	Irradiance direct normale	W/m²

Données		Unités
Conditions climatiques	Irradiance diffuse horizontale	
	Rayonnement infrarouge descendant	
	Vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol	m/S
	Direction du vent à 10 m au-dessus	Degrés
	Pression atmosphérique au niveau de la surface	Pa

III.2 Choix des outils et technologies de développement

La sélection des outils et des technologies de développement est très importante dans la réussite d'un projet de développement. Cette section se penchera sur les décisions qui ont guidés nos choix, notamment en ce qui concerne l'écosystème logiciel d'une part, et d'autre part le langage de programmation privilégié ainsi que l'approche de la programmation orientée objet

III.2.1 Environnement logiciel

Pour le développement de notre projet, nous avons utilisé les outils et logiciels suivants :

- **Système d'exploitation** : Windows 10
- **Environnement de développement intégré** : Visual Code Studio ;
- **Visual Code Studio** :

Un Environnement de Développement Intégré (IDE), est une plateforme logicielle qui simplifie les phases de développement, d'édition, de débogage et de complétion de code. Visual Studio Code, plus communément appelé VS Code, se démarque en tant qu'éditeur de code source multiplateforme développé par Microsoft pour les systèmes d'exploitation Windows, Linux et macOS. Il met à disposition des compilateurs, des outils de complétion de code, des concepteurs graphiques, et diverses fonctionnalités visant à optimiser le processus de développement logiciel.

- **StarUML** :

StarUML est un outil de modélisation logiciel très puissant et intuitif, conçu pour aider les développeurs et architectes à créer des diagrammes UML (Unified Modeling Language) et autres types de diagrammes de modélisation. Il est particulièrement apprécié pour sa simplicité d'utilisation et ses fonctionnalités avancées.

III.2.2 Langage de développement : Python

Python est un langage interprété et se distingue par sa polyvalence, sa facilité d'apprentissage, et une syntaxe claire, le rendant adapté aux applications scientifiques et de traitement des données. Avec une variété de bibliothèques et de Framework, notamment dans le calcul scientifique, l'apprentissage automatique et l'analyse de données, Python est un choix judicieux pour le développement informatique scientifique.

Dans notre projet, le choix de Python s'impose naturellement. Sa flexibilité, ses riches bibliothèques dédiées au traitement des données, et sa capacité à intégrer des solutions de calcul scientifique répondent précisément aux besoins de modélisation et d'analyse thermique de notre application.

III.3 Programmation orientée objet

La Programmation Orientée Objet (POO) est un paradigme de programmation basé sur la conception de structures appelées "**objets**". Ces objets peuvent contenir des données sous forme de champs, souvent appelés attributs, et du code, sous forme de procédures, souvent appelées méthodes. La POO repose sur les principes fondamentaux suivants :

- **Encapsulation :**

Les objets regroupent les données et les méthodes qui les manipulent, limitant l'accès externe et favorisant la modularité.

- **Héritage :**

Les objets peuvent hériter des propriétés et comportements d'autres objets, facilitant la réutilisation du code et la création de hiérarchies.

- **Polymorphisme :**

Les objets d'une classe peuvent être utilisés de manière interchangeable, offrant une flexibilité dans la conception et l'utilisation du code.

Dans le développement logiciel, la POO permet une modélisation plus intuitive du monde réel, facilite la maintenance du code, et encourage la réutilisation des composants. Elle est particulièrement bénéfique pour structurer des projets complexes, améliorer la lisibilité du code et favoriser la collaboration au sein d'une équipe de développement.

IV. Conception et Développement du logiciel

La phase de conception et développement d'un logiciel constitue une étape essentielle dans la réalisation d'un projet informatique. Cette section a pour but de définir les méthodes de calcul pour évaluer les apports internes et externes de chaleur, ainsi que de concevoir et développer l'architecture logicielle nécessaire à leur mise en œuvre. Ce logiciel vise à faciliter le calcul du bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale en intégrant des fonctionnalités clés et une interface utilisateur conviviale.

IV.1 Méthodes de calcul pour le bilan thermique

Dans cette section, nous détaillerons le processus d'élaboration du bilan thermique des bâtiments, en nous appuyant sur les principes fondamentaux de l'ASHRAE 2017, le programme de calcul d'un bilan thermique de climatisation en climat tropical, le Manuel Carrier, ainsi que la résolution des équations élaborées pour évaluer les gains internes et externes de chaleur.

IV.1.1 Calcul des apports internes

Les gains internes représentent les quantités de chaleur produites, qu'elles soient latentes ou sensibles, à l'intérieur des espaces climatisés par divers éléments tels que les occupants, l'éclairage, les équipements divers et les moteurs.

- **Apport de chaleur dus aux occupants :**

Les apports des occupants en termes de chaleur sensible et latente dépendent de plusieurs facteurs tels que la température intérieure et le niveau d'activité. Ces apports se décomposent en deux types :

- **Chaleur sensible :**

$$Q_{Sens.Oc} = n \times C_{Sens.Oc} \quad (1)$$

- **Chaleur latente :**

$$Q_{Lat.Oc} = n \times C_{Lat.Oc} \quad (2)$$

- n : Nombre d'occupants ;
- $C_{Sens.Oc}$: Chaleur sensible des occupants ;

- $C_{Lat.Oc}$: Chaleur latente des occupants

Les valeurs de référence sont établies pour un adulte masculin comme le montre le tableau ci-dessous. Cependant, il est nécessaire d'ajuster ces valeurs en fonction des catégories spécifiques d'occupants (**Tableau 3**) :

Tableau 3: Chaleur dégagée par les personnes [9]

Activités	Application	Température ambiante [°C]					
		25		26		27	
		Chaleur sensible	Chaleur latente	Chaleur sensible	Chaleur latente	Chaleur sensible	Chaleur latente
		[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
Assis au repos	Ecole, théâtre	65	37	62	40	60	42
Travail léger	Bureau, hôtel, appartement	67	49	63	59	56	60
Debout, marche lente	Magasin, boutique	68	63	63	68	57	74
Repos	Restaurant	77	84	71	90	64	97
Travail facile	Atelier	80	140	72	148	67	152
Danse	Boîte de nuit	88	161	80	169	75	174
Travaille difficile	Usine	149	277	142	284	136	290

- **Apport de chaleur dus à l'éclairage :**

Les appareils d'éclairage constituent une source de chaleur sensible et dépend du type de lampe :

🔦 Lampe fluorescente :

$$Q_{Sens.écl_{flu}} = 1,25 \times n \times P_u \times \cos\varphi \quad (3)$$

🔦 Lampe incandescente ou LED :

$$Q_{Sens.écl_{inc}} = n \times P_u \times \cos\varphi \quad (4)$$

- P_u : Puissance utile (W) ;
- $\cos\varphi$: facteur de puissance, il est compris entre 0 et 1 ;

- n : nombre de lampe.

- **Apport de chaleur dus aux moteurs électriques :**

Les moteurs électriques contribuent à la production de chaleur dans un espace climatisé. On distingue trois sources instantanées de chaleur sensible générées par les équipements fonctionnant à l'aide de moteurs électriques, en fonction de leur position relative dans ou hors de l'espace climatisé :

- ✚ **Moteur à l'intérieur et équipement entraîné à l'intérieur :**

Si le moteur et l'équipement qu'il entraîne se situent dans l'espace climatisé, l'on peut estimer la chaleur sensible émise par leur fonctionnement comme suit :

$$Q_{moteur_{int/int}} = \left(\frac{P_u}{\rho}\right) k_u \times \lambda \quad (5)$$

- ✚ **Moteur à l'extérieur et équipement entraîné à l'intérieur :**

Si le moteur se situe à l'extérieur de l'espace climatisé tandis que l'équipement entraîné est à l'intérieur, la quantité de chaleur peut être évaluée comme suit :

$$Q_{moteur_{ext/int}} = P_u \times k_u \times \lambda \quad (6)$$

- ✚ **Moteur à l'intérieur et équipement entraîné à l'extérieur :**

Si le moteur est à l'intérieur de l'espace climatisé tandis que l'équipement entraîné est à l'extérieur de l'espace climatisé, la quantité de chaleur peut être estimée comme suit :

$$Q_{moteur_{int/ext}} = P_u \left(\frac{1-\rho}{\rho}\right) k_u \times \lambda \quad (7)$$

- P_u : Puissance utile (W) ;
- k_u : facteur d'utilisation ;
- ρ : rendement ;
- λ : facteur de charge et $0 \leq \lambda \leq 1$

❖ **Hypothèse de calcul 1 :**

Le facteur de charge est la mesure de la proportion de la capacité maximale d'un moteur ou d'une installation électrique qui est réellement utilisée sur une période donnée. Il se calcule comme suit :

$$\lambda = \frac{\text{Energie réellement consommée}}{\text{Energie maximale}} \quad (8)$$

Un facteur de charge élevé indique une utilisation efficace des ressources, tandis qu'un facteur de charge faible suggère une sous-utilisation des capacités disponibles. Dans notre projet, nous avons supposé que $\lambda = 0,8$ en raison de la difficulté à déterminer le facteur de charge exact. Cette hypothèse implique une évaluation optimiste où l'on suppose que le moteur fonctionne à 80 % la plupart du temps. Cependant, dans la pratique, déterminer le facteur de charge précis nécessite souvent une analyse approfondie des schémas de fonctionnement et de la consommation d'énergie sur une période donnée.

- **Apport de chaleur dus aux équipements divers :**

Pour une variété d'équipements, incluant les appareils électroménagers, les équipements de bureau et électroniques, on prend en compte la chaleur sensible et latente générée par ces appareils, tel que spécifié par les fabricants (**Annexe I**). Il est également nécessaire d'appliquer un facteur d'utilisation adapté, ajusté en fonction de la durée de fonctionnement de ces équipements [9].

Pour un équipement donné nous aurons :

$$Q_{Sens.\text{équipement}} = n \times k_u \times C_{Sens.\text{équipement}} \quad (9)$$

$$Q_{Lat.\text{équipement}} = n \times k_u \times C_{Lat.\text{équipement}} \quad (10)$$

- n : nombre d'équipement ;
- $C_{Sens.\text{équipement}}$: chaleur sensible de l'équipement ;
- $C_{Lat.\text{équipement}}$: chaleur latente de l'équipement.

IV.1.2 Calcul des apports externes

Les apports externes sont essentiellement les gains de chaleurs issus de l'environnement extérieur des espaces climatisés. Ils englobent les apports de chaleur à travers les parois, les

fenêtres, les portes, par renouvellement et infiltration ainsi que les apports par rayonnement solaire.

- **Apport de chaleur par infiltration**

L'infiltration, distincte du besoin d'air frais pour la ventilation et la dilution des odeurs, désigne l'entrée inévitable d'air extérieur à travers les ouvertures des portes, des fenêtres et les fissures, induite par les différences de pression telles que la pression du vent, l'effet de cheminée et l'ouverture des portes. L'infiltration est la source d'apport de chaleur sensible et latente et est évalué comme suit :

- ✚ **Chaleur sensible :**

$$Q_{Sens.inf.} = 0,33q_V(T_e - T_i) \quad (11)$$

- ✚ **Chaleur latente :**

$$Q_{Lat.inf} = 0,84q_V(\omega_e - \omega_i) \quad (12)$$

- T_e : température extérieur (°C) ;
- T_i : température intérieur (°C) ;
- ω_e : humidité absolue extérieur ($g/kg_{air\ sec}$) ;
- ω_i : humidité absolue intérieur ($g/kg_{air\ sec}$) ;
- q_V : débit d'air de renouvellement (m^3/h)

L'estimation de l'infiltration pose le défi de quantifier le débit d'air entrant dans un bâtiment. Pour ce faire, trois méthodes principales sont utilisées lors de la conception : la méthode de renouvellement d'air (ACH), la méthode de la longueur des fissures (Crack Length Method) et la méthode ASHRAE.

Toutefois, en raison de sa simplicité et de son estimation globale des changements d'air par heure, la méthode ACH est préférée aux autres méthodes. Bien que plus précises, ces dernières exigent une évaluation détaillée des fissures, des ouvertures et des données spécifiques sur le bâtiment et son environnement.

- ✚ **Renouvellement d'air (ACH)**

C'est le nombre de fois où l'air occupant l'espace est complètement renouvelé par unité de temps, généralement une heure. Il s'exprime de la manière suivante :

$$q_V = V \times ACH \quad (13)$$

- V : volume du local (m^3) ;
- ACH (renouvellement d'air par heure) :

Le nombre de renouvellement est fonction du type de bâtiment [10]:

- Bâtiment résidentiel : 0,5 ;
- Bâtiment tertiaire (bureaux, commerces, hôtel, restaurant, hôpital, école, ...) : 1 ;
- Bâtiment moderne (étanche, isolation thermique, ...) : 0,2

Humidité absolue :

La teneur en humidité de l'air peut être définie comme la quantité totale d'eau contenue dans un volume donné d'air. Pour évaluer l'humidité absolue extérieure et intérieure de l'air, nous nous sommes appuyés sur les formules empiriques que Roger Cardiergues [11] permettant la conversion de l'humidité relative en l'humidité absolue. Elle s'exprime comme suit :

$$\omega = 0,6221 \left[\frac{HR \times P_{sat}}{P_{atm} - HR \times P_{sat}} \right] \quad (14)$$

Avec :

- HR : humidité relative ;
- P_{sat} : Pression de vapeur saturante (Pa) ;
- P_{atm} : Pression atmosphérique normale (Pa)

▪ Pression de vapeur saturante :

Pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec la phase liquide à une température donnée. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$P_{sat} = 10^u \quad (15)$$

La valeur de « u » varie en fonction de la température, que l'on se trouve dans une plage froide (température comprise entre -30 et 0 °C) ou chaude (température comprise entre 0 et 50 °C). Son expression pour les températures chaudes est la suivante :

$$u = 2,7862 + \left[\frac{7,5526T_s}{239,21 + T_s} \right] \quad (16)$$

Avec :

- T_s : température sèche (°C).

- **Pression atmosphérique normale :**

Aussi appelée pression standard, elle représente la force exercée par l'atmosphère terrestre sur une unité de surface au niveau moyen de la mer. Elle est généralement évaluée à 1013,25 (hPa) et varie en fonction de l'altitude. Son expression est la suivante :

$$P_{atm} = 101325 (1 - 0,0000225577 \times alt)^{5,2554876} \quad (17)$$

Avec :

- alt : altitude (m).

- **Apport de chaleur par rayonnement solaire**

L'énergie solaire représente l'une des principales sources de réchauffement pour les bâtiments en Afrique. Il est donc essentiel de déterminer précisément la position du soleil dans le ciel lors de la conception, notamment lors des pics de charges de climatisation afin d'identifier les façades exposées au rayonnement solaire et d'estimer correctement les gains thermiques qui en découlent.

- **Géométrie du rayonnement solaire :**


La géométrie du rayonnement solaire est déterminée par deux angles lorsqu'on l'observe depuis le sol :

- L'azimut : cet angle de projection de la direction du soleil au sol avec la direction du sud ;
- La hauteur : cet angle de la direction du soleil avec le plan horizontal.

Ces angles varient en fonction de :

- La latitude du lieu considéré ;
- Le jour de l'année ;
- L'heure de la journée.

Pour prédire la position du soleil et les façades exposées à son rayonnement pour le calcul des charges thermiques, nous avons utilisé la fonction `'pvlib.solarposition.get_solarposition()'`.

 `pvlib.solarposition.get_solarposition()`

La fonction `'pvlib.solarposition.get_solarposition()'` est une fonctionnalité de la bibliothèque pvlib Python qui permet de calculer la position du soleil. pvlib (Photovoltaic Library) est un composant important d'un ensemble croissant d'outils open-source pour l'énergie solaire. Cette bibliothèque, largement utilisée et maintenue par une communauté active, fournit un ensemble de fonctions et de classes pour simuler les performances des systèmes photovoltaïques, y compris des modèles de référence pour l'énergie solaire, ainsi que des algorithmes pour la position solaire, l'irradiance du ciel, etc.

Pour estimer la position solaire (Azimut_solaire et hauteur), pvlib Python intègre divers algorithmes dont l'algorithme par défaut est l'algorithme NREL SPA. Dans notre programme, nous avons utilisé cette méthode (NREL SPA) pour calculer la position solaire, comme illustré par la ligne de code suivante : `'solar_position_data = get_solarposition(date_heure, latitude, longitude, altitude)'`. Les arguments passés à cette fonction sont contenus dans le **Tableau 4**. Nous avons choisi cette méthode en raison de sa précision, capable d'estimer la position du soleil avec une précision de 0,0003° et sur un intervalle d'année très large ([-2000 ; 6000]) [12].

Tableau 4: Détails des données météorologiques

Arguments	Description
date_heure	Représente l'année en cours, le mois, le jour et l'heure correspondant aux températures les plus élevées de chaque mois.
Latitude, longitude, altitude	Indiquent la localisation géographique du lieu d'étude.

Ensuite pour déterminer les façades ensoleillées, nous avons procédé comme suit :

- détermination des orientations et des surfaces azimutales :

La surface azimutale ψ est définie comme le déplacement depuis le sud de la projection, sur le plan horizontal, de la normale à la surface comme illustré dans la **Figure 3**. Les surfaces orientées vers l'ouest ont un azimut de surface positif ; celles orientées vers l'est ont un azimut de surface négatif. Les azimuts de surface pour les orientations courantes sont résumés dans le **Tableau 5**.

Tableau 5: Orientations et Azimuts de Surface, Mesurés depuis le Sud [7]

Orientations de surface	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
ψ [°]	180	-135	-90	-45	0	45	90	135

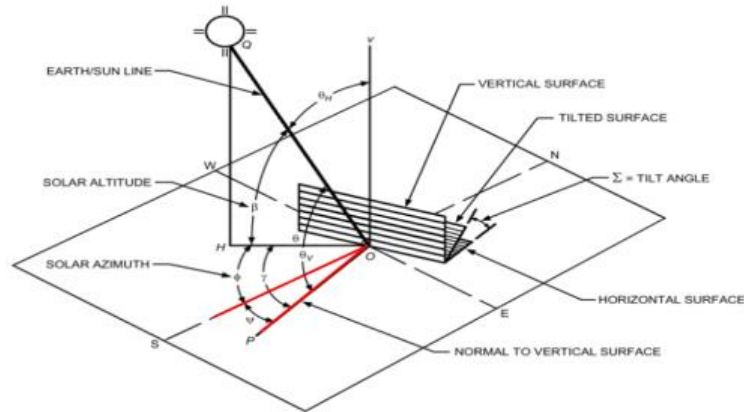


Figure 3: Surface azimutale, Mesurés depuis le Sud [7]

- détermination des façades ensoleillées :

Pour identifier les façades exposées au soleil, nous utilisons l'angle de surface-solaire azimutale (γ) qui est défini comme la différence entre l'azimut solaire (φ) et la surface azimutale (ψ) [7] (**Figure 3**):

$$\gamma = \varphi - \psi \quad (18)$$

Avec : $-90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$

Si $\gamma \notin [-90^\circ; 90^\circ]$, alors la surface est ensoleillée

- Apport de chaleur par rayonnement solaire sur les vitrages

Les menuiseries vitrées sont composées d'une partie transparente et d'une partie opaque, appelée cadre. La majeure partie de l'énergie solaire est captée par la partie transparente, tandis qu'une fraction est absorbée par le cadre, puis transmise à l'intérieur de la pièce. Ainsi, deux types de gains solaires sont associés aux menuiseries vitrées : ceux de la partie transparente et ceux de la partie opaque, tous deux dépendant de l'angle d'incidence du rayonnement solaire.

Basé sur ASHRAE (2017), la formule générale des gains solaires totaux, $Q_{total,\theta}$, pour une fenêtre est définie comme suit :

$$Q_{total,\theta} = q_{V,\theta} + q_{Op,\theta} \quad (19)$$

En détail, nous obtenons :

$$Q_{Fen,\theta} = [q_{V,\theta}(1 - c) + q_{Op,\theta}] \times S \times IAC \quad (20)$$

Avec :

- S : surface totale de la fenêtre (m²) ;
- c : pourcentage de la surface opaque ;
- IAC : coefficient d'atténuation interne des rideaux et des stores (**Annexe 3 et Annexe 4**).

❖ Hypothèse de calcul 2 :

Suivant l'équation (19), nous constatons que le gain total dépend d'un coefficient associé au pourcentage de surface opaque 'c', qui représente le rapport entre la surface du cadre et la surface totale de la fenêtre. Dans notre étude, nous négligerons le gain de la portion opaque $q_{Op,\theta}$, soit $c = 0$. Ce choix se justifie par :

- Simplicité du modèle : En pratique, les calculs de gain solaire peuvent devenir très complexes en prenant en compte tous les détails de la fenêtre ;
- Faible proportion de la surface opaque : Dans de nombreux cas, les fenêtres modernes sont conçues avec une grande surface vitrée par rapport à la structure opaque ;
- Manque de données précises : En raison de la diversité des types de menuiseries vitrées et du manque de données précises sur leur géométrie exacte.

Par conséquent nous obtenons :

$$Q_{Fen,\theta} = q_{V,\theta} \times S \times IAC \quad (21)$$

Ici, S correspond uniquement à la surface de la partie vitrée.

Gains par la portion vitrée

Le gain thermique au travers de la portion vitrée est donnée par

$$q_{V,\theta} = E_D \times SHGC(\theta) + (E_d + E_R)SHGC_d \quad (22)$$

Avec :

- E_D : Rayonnement direct (W/m²) ;
- $SHGC(\theta)$: Coefficient de gains solaires directs en fonction de θ ;
- E_d : Rayonnement diffus (W/m²) ;
- E_R : Rayonnement réfléchis (W/m²) ;
- $SHGC_d$: Coefficient de gains solaires diffus

Les valeurs de $SHGC(\theta)$ et $SHGC_d$ (**Annexe 2**), dépendent non seulement de l'angle d'incidence θ , mais aussi du type de vitrage. Ces types de vitrages sont standardisés et sont identifiés par des codes simples qui correspondent à l'épaisseur et au nombre de plaques de verre, à l'épaisseur de l'intercalaire, au type de gaz de remplissage, ainsi que l'émissivité des surfaces et la teinte des vitres.

▪ Rayonnement direct E_D :

Le rayonnement direct est calculé selon la relation géométrique suivante :

$$E_D = E_{DN} \times \cos\theta \quad (23)$$

Cette relation est valide uniquement lorsque $\cos\theta > 0$. Dans le cas contraire, $E_D = 0$ et nous avons :

- E_{DN} : rayonnement direct sur un plan normal aux rayons du soleil (W/m²) ;
- θ : Angle d'incidence du rayonnement solaire direct par rapport à la normal de la surface extérieure de la fenêtre [°] ;
- $\cos\theta$ est déterminé par l'équation suivante :

$$\cos\theta = \cos(h_s) \sin(\beta) \cos(A_{Z_s} - A_Z) + \sin(h_s) \cos(\beta) \quad (24)$$

Où :

- h_s : hauteur du soleil ;
- A_{Z_s} : azimuth du soleil ;
- β : inclinaison de la paroi ;
- A_Z : azimuth de la paroi.

▪ Rayonnement diffus (E_d) :

Le rayonnement diffus (E_d) est selon la méthode proposée par Stephenson (1965) et Threlkeld (1963) [7], largement acceptée dans le domaine de l'énergie solaire. Cette méthode est décrite par les équations suivantes :

- Si $\beta \leq 90$:

$$E_d = E_{d'}[Y \times \sin(\beta) + \cos(\beta)] \quad (24)$$

- Si $\beta > 90$:

$$E_d = E_{d'}[Y \times \sin(\beta)] \quad (25)$$

Ces équations permettent d'estimer le rayonnement diffus sur les surfaces inclinées en fonction de leur inclinaison β , en prenant en compte les travaux de Stephenson et Threlkeld dans ce domaine. Dans ces équations nous avons :

- $E_{d'}$: rayonnement diffus sur un plan horizontal (W/m^2) ;
- Y est déterminé par l'équation suivante :

$$Y = \max[0,45; 0,55 + 0,437 \cos(\theta) + 0,313 \cos^2(\theta)] \quad (25)$$

▪ Rayonnement réfléchis (E_R) :

Le rayonnement réfléchi pour les surfaces de toutes orientations est donné par :

$$E_R = [E_{DN} \times \sin(h_s) + E_{d'}]\rho_g \frac{1 + \cos(h_s)}{2} \quad (26)$$

Où ρ_g représente la réflectance du sol, souvent prise à 0,2

• Apport de chaleur par conduction et rayonnement solaire à travers les parois (murs, toiture, portes, plafond, plancher et vitrage) :

L'apport de chaleur périodique par rayonnement solaire induit un régime transitoire lors du calcul des apports thermiques à travers les murs, la toiture et les portes. En régime périodique, un décalage temporel s'observe entre l'instant d'apport d'énergie sur la surface externe des parois et celui de sa réception sur la surface interne. Ce phénomène est connu sous le nom de déphasage et ce dernier peut varier de 1 à 3 heures, en fonction de la composition paroi.

De manière similaire, l'amplitude de la chaleur subit un amortissement qui dépend des propriétés des matériaux de constituant la paroi, la toiture ou la porte.

Dans le cadre de notre projet, pour simplifier les calculs nous considérerons le flux de chaleur constant à travers les parois. Le flux de chaleur par conduction et rayonnement solaire est donné par la formule suivante :

$$Q = H \times S \times \Delta T \quad (29)$$

Avec :

- H est le coefficient d'échange global ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) :

$$H = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i}} \quad (30)$$

- Dans le cas d'un comble non ventilé, le coefficient d'échange global est la somme du coefficient d'échange globale du plafond et de la toiture.
- S : surface de la paroi (m^2)
- e_i : épaisseur d'une couche (m)
- λ_i : conductivité thermique d'une paroi ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)
- h_i : coefficient d'échange thermique par convection de la surface interne ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Sa valeur est prise à $9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [9].
- h_e est le coefficient d'échange thermique par convection de la surface externe et il est déterminé par le modèle empirique de McAdams [13] :

$$h_e = 5,678 \left[m + n \left(\frac{V}{0,3048} \right)^p \right] \quad (31)$$

- V est la vitesse du vent (m/s), cette dernière est contenue dans les fichiers Excel
- Les paramètres m , n et p sont fonction de la vitesse du vent et le type de surface comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 6: Paramètres du modèle de McAdams [13]

Type de surface	$V < 4,88 \text{ m/s}$			$4,88 \text{ m/s} < V < 30,48 \text{ m/s}$		
	m	n	p	m	n	p
Lisse	0,99	0,21	1	0	0,5	0,78
Rugueuse	1,09	0,23	1	0	0,53	0,78

- ΔT : c'est la différence de température entre les deux faces de la paroi considérée (Tableau 7). Cependant, dans le cas d'une paroi exposée au rayonnement solaire nous utiliserons un écart de température fictif ΔT_f dû à l'ensoleillement. Cet écart de température est applicable aussi bien pour une paroi vertical que pour un toit ou tout autre paroi ensoleillée. L'écart fictif dépend de l'inertie du mur considéré [14], donc la

valeur calculée devrait être fonction de la masse surfacique des murs. Il s'exprime par la formule suivante :

$$\Delta T_f = a \frac{G}{h_e} F \quad (31)$$

Il est à noter que les effets des températures internes et externes ne sont pas inclus dans cette formule.

- a coefficient d'absorption. Ce dernier dépend de la couleur et de la nature de la paroi :
 - a = 0,2 pour les métaux polis brillants ;
 - a = 0,6 pour les murs en maçonnerie de couleur claire ;
 - a = 0,8 pour toutes les maçonneries et murs de couleur sombre.

- G exprimé en W/m², est le rayonnement global tombant sur les parois ensoleillées.

Il est la somme du rayonnement direct E_D et du rayonnement diffus E_d . Soit :

$$G = E_D + E_d \quad (32)$$

- Les valeurs du coefficient F sont les suivantes :
 - F = 1 pour une structure légère (masse des structures porteuses par unité de surface inférieure à 150 kg/m²) ;
 - F = 0,9 pour une structure moyenne (masse des structures porteuses par unité de surface comprise entre 150 et 350 kg/m²) ;
 - F = 0,8 pour une structure lourde (masse des structures porteuses par unité de surface comprise entre 350 et 700 kg/m²).

Tableau 7: Différence de température entre les différentes faces des parois [9]

Type de parois	ΔT [°C]
Murs extérieurs ensoleillés	$\Delta T = T_e - T_i$
Murs en contact avec les locaux non conditionnés	$\Delta T = T_e - T_i - 3$
Plafond sous comble ventilé	$\Delta T = T_e - T_i + 3$
Plafond sous comble non ventilé	$\Delta T = T_e - T_i + 12$
Plancher sur terre pleine	$\Delta T = +20 - T_i$
Mur en contact avec la cuisine	$\Delta T = T_e - T_i + 18$

Avec :

- T_e : Température extérieure (°C) ;
- T_i : Température intérieure du local à climatisé (°C).

IV.2 Conception de l'architecture logiciel

Dans cette section, nous allons examiner comment notre logiciel de bilan thermique des bâtiments est conçu et structuré. Pour cela, il est essentiel de comprendre ce qu'on entend par architecture logicielle. L'architecture logicielle est l'ensemble des décisions importantes concernant l'organisation d'un système logiciel. Sa conception est une étape cruciale car elle détermine comment les différentes parties du logiciel interagissent entre elles et assurent son bon fonctionnement global du système.

IV.2.1 Architecture générale

L'architecture générale d'un logiciel se réfère à la structure globale du système. Cela inclut la manière dont les différents composants (unité modulaire et autonome du logiciel qui encapsule une partie de sa fonctionnalité) du logiciel sont organisés, comment ils interagissent entre eux et comment les données circulent à travers le système. Une bonne architecture permet de créer un logiciel modulaire, facile à comprendre, à maintenir et à faire évoluer.

Il existe plusieurs types d'architectures logicielles, chacune ayant ses propres caractéristiques et avantages. Parmi celles-ci, nous avons :

- L'architecture monolithique : Toutes les fonctionnalités sont regroupées en un bloc ou module.
- L'architecture modulaire : Le logiciel est divisé en modules distincts, chacun ayant une responsabilité spécifique.
- L'architecture orientée services (SOA) : Le logiciel est organisé en une collection de services indépendants qui communiquent entre eux.

Dans notre projet, afin de garantir flexibilité et évolutivité, nous utilisons une architecture modulaire.

IV.2.2 Architecture modulaire

L'architecture modulaire est un type d'architecture logicielle où le système est divisé en modules distincts, chacun ayant une responsabilité spécifique. Ces modules peuvent fonctionner de manière indépendante mais collaborent pour atteindre un objectif commun. Cela rend le logiciel plus facile à gérer car chaque module peut être développé, testé et mis à jour séparément sans affecter les autres parties du système.

Le logiciel actuel de bilan thermique des bâtiments est structuré en utilisant une architecture modulaire basée sur la programmation orientée objet (POO). Il est composé de trois classes (**Figure 4**) principales, chacune ayant des responsabilités distinctes :

- **DonneesTMY** : Cette classe regroupe toutes les méthodes nécessaires pour effectuer les calculs de bilan thermique en utilisant des données météorologiques spécifiques (données TMY). Elle lit les données à partir d'un fichier Excel et réalise des calculs sur le gain de chaleur par conduction et rayonnement à travers les parois, fenêtres, portes, plafond, toit, etc.
- **Electrical** : Cette classe contient les méthodes pour calculer le gain de chaleur généré par les équipements électriques présents dans le bâtiment. Elle prend en compte les caractéristiques des différents appareils électriques pour estimer leur impact thermique.
- **Results** : Cette classe est responsable de l'affichage des résultats des calculs effectués par les classes DonneesTMY et Electrical. Elle présente ces résultats de manière structurée et lisible pour l'utilisateur final.

Model::Collaboration1::Interaction1::SequenceDiagram

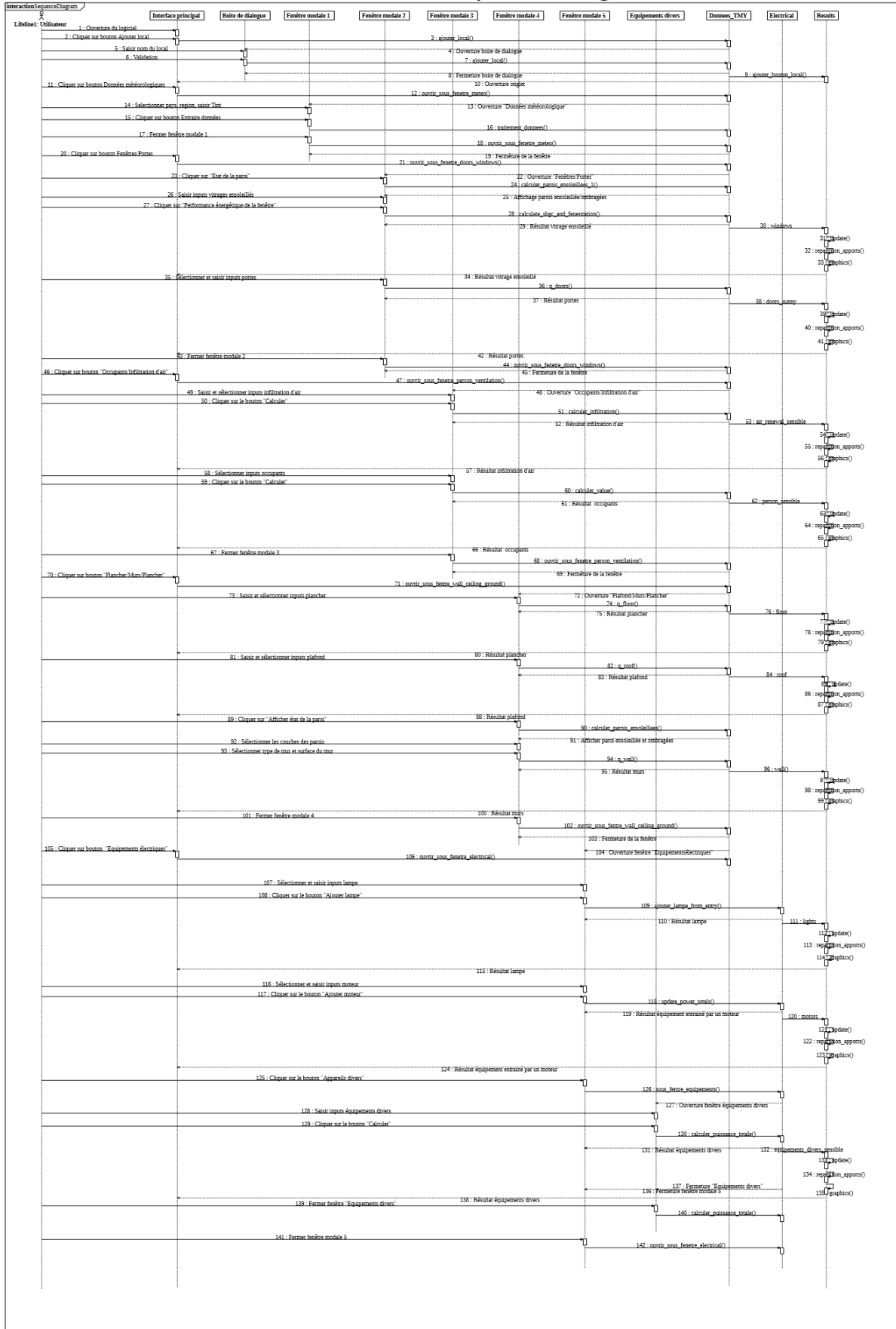


Figure 4: Diagramme de séquence

IV.2.3 Logigramme du logiciel

Un logigramme est un outil d'analyse qui permet de représenter de manière structurée et séquentielle toutes les tâches ou événements nécessaires à la réalisation d'une activité spécifique. Il se compose de divers symboles connectés par des flèches. L'algorithme proposé de notre projet est présenté sur les **Figure 5, Figure 6, Figure 7, Figure 8, Figure 9, Figure 10 et Figure 11.**

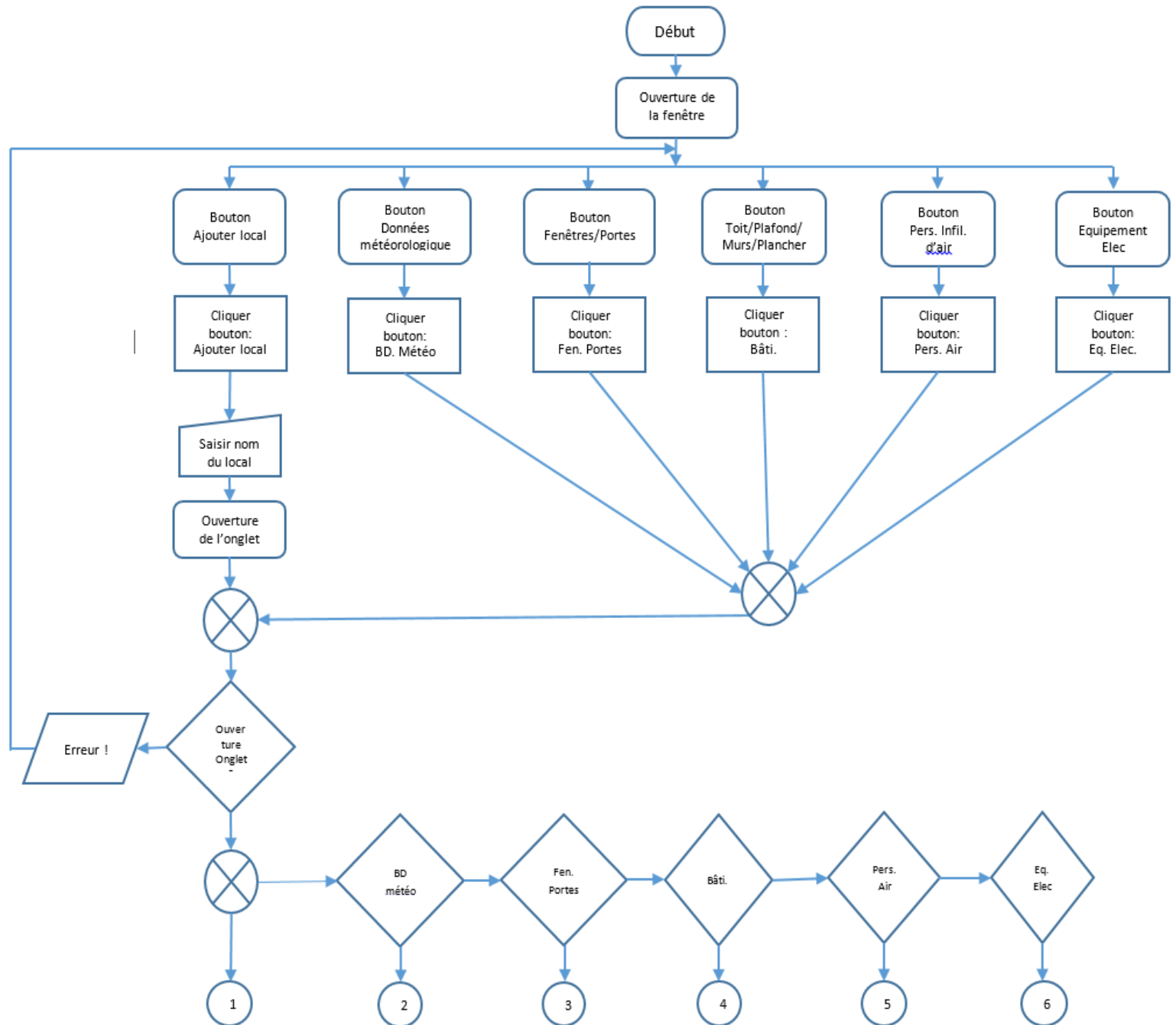


Figure 5: Logigramme - Interface graphique et gestion des évènements

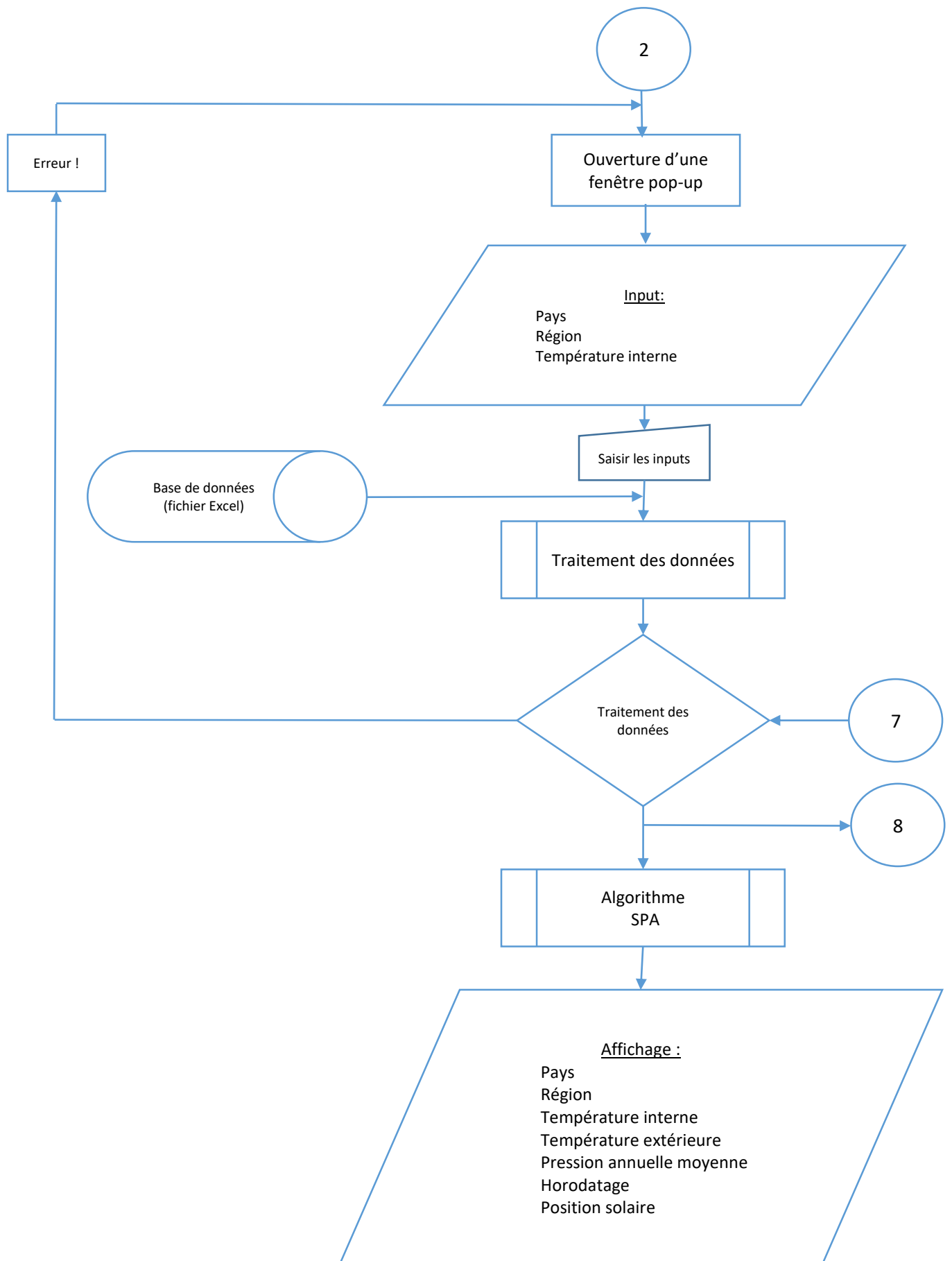


Figure 6: Logigramme - Traitement et extraction des données météorologiques

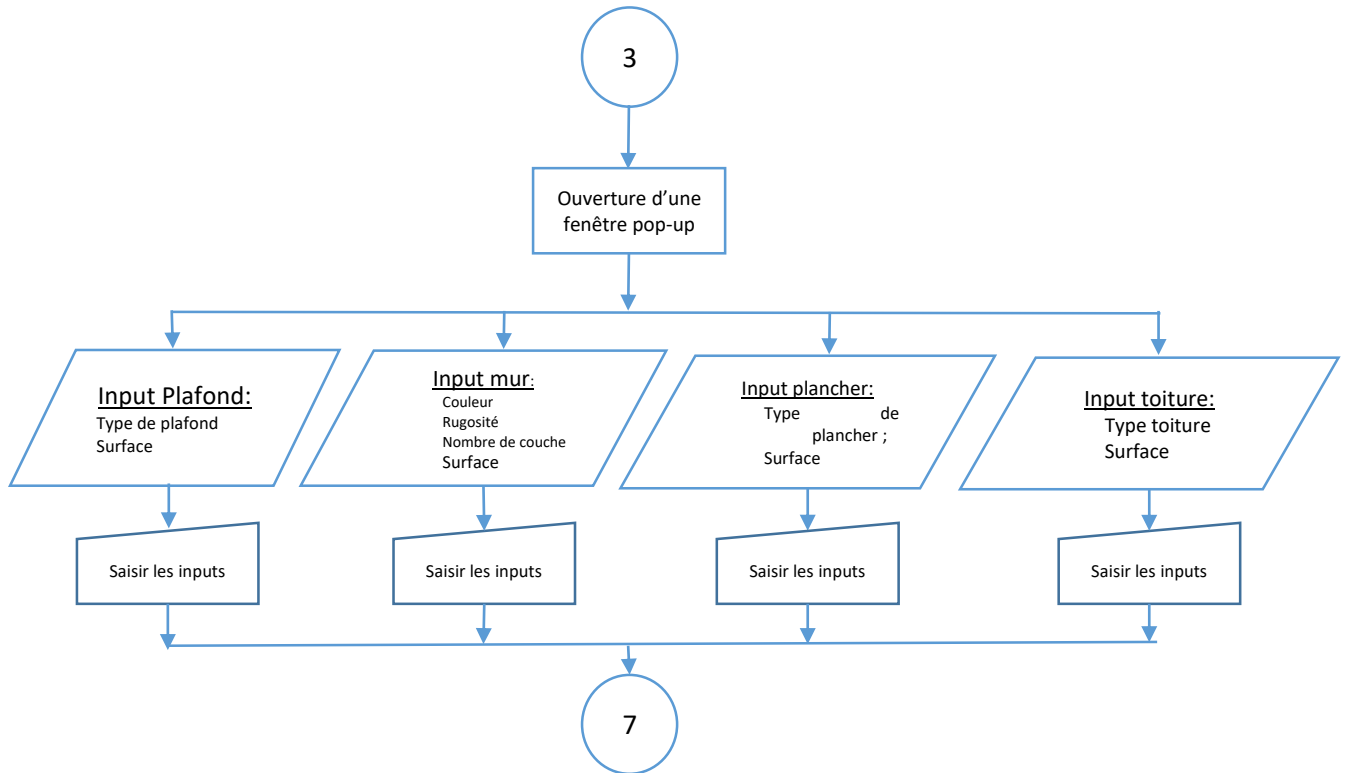


Figure 7: Logigramme - Interface de saisie des données pour les éléments structuraux

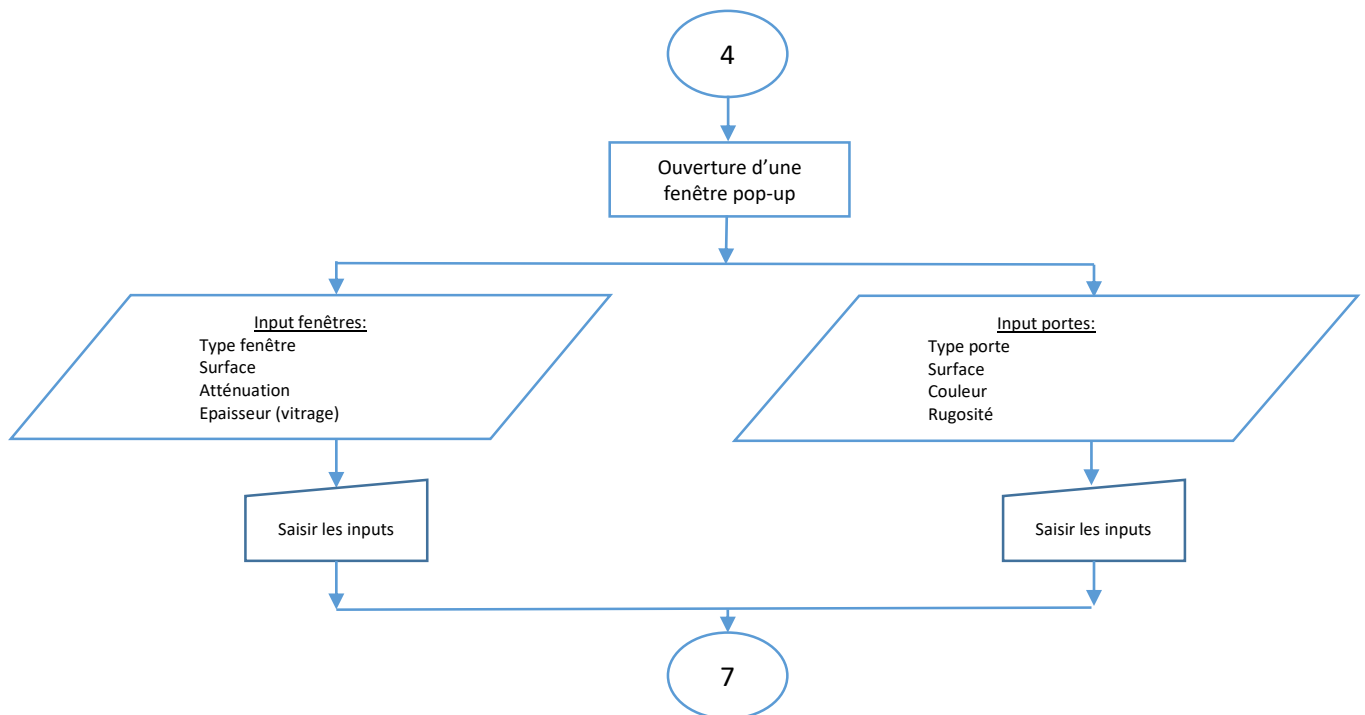


Figure 8: Logigramme - Interface de saisie de données pour les ouvertures

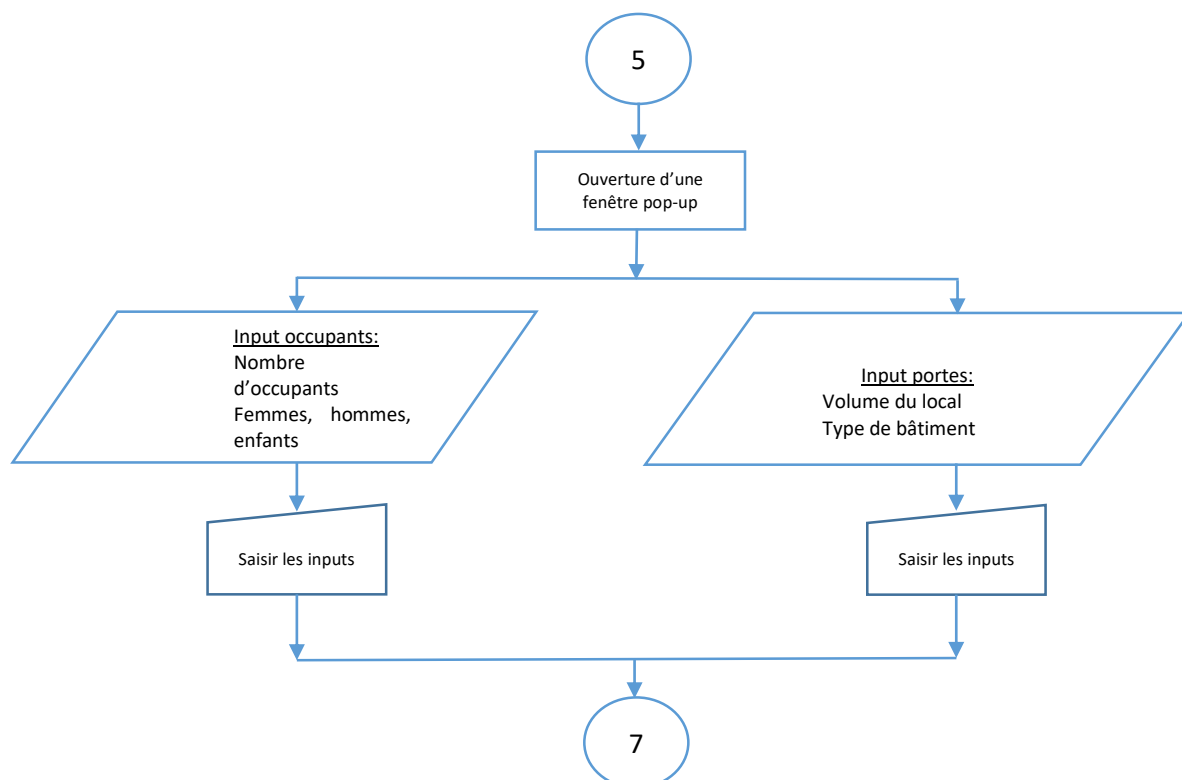


Figure 9: Logigramme - Saisie des données pour les Occupants/Infiltration d'air

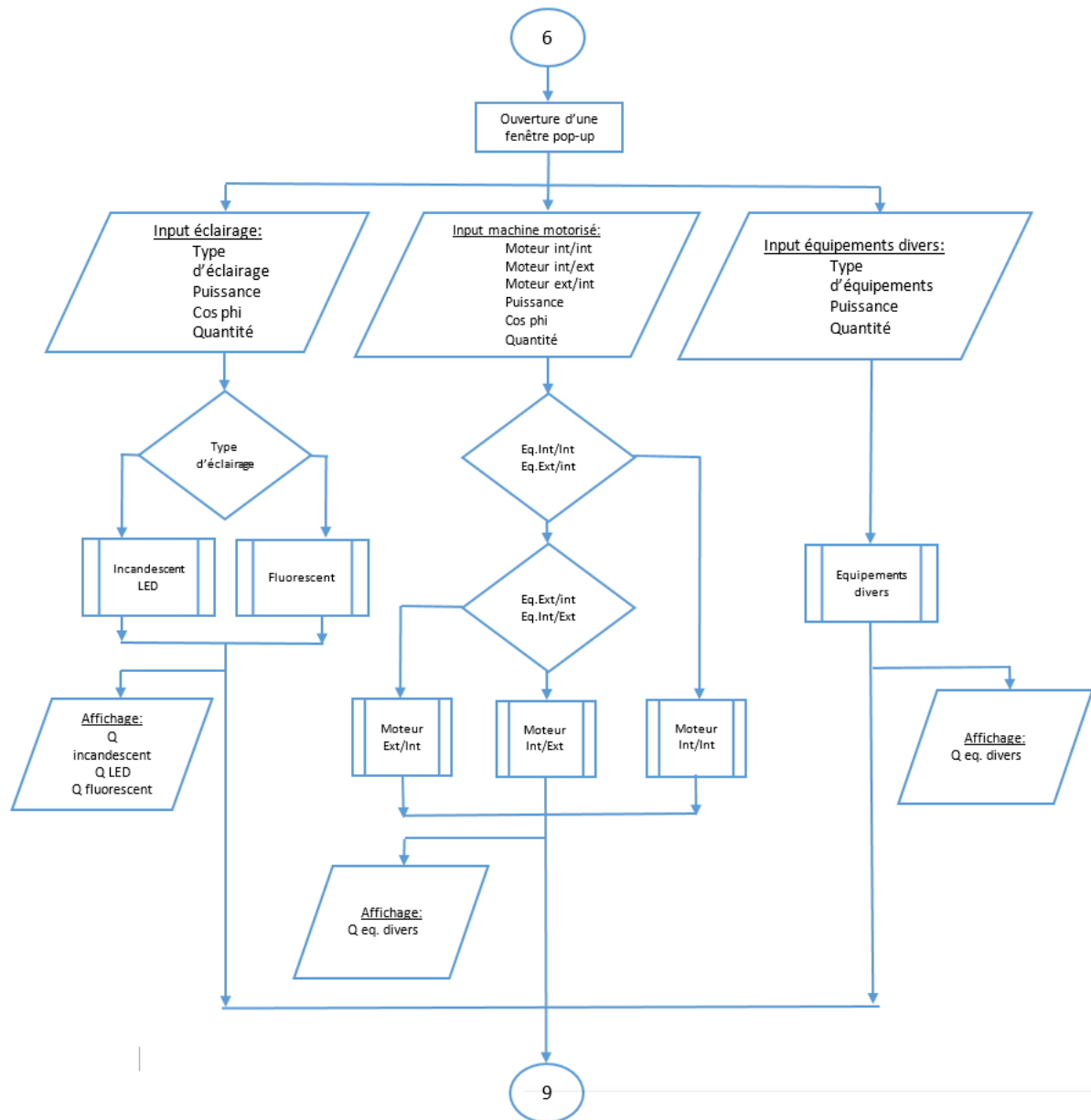


Figure 10: Logigramme - Interface de saisie de données des équipements électriques

Développement d'un logiciel de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

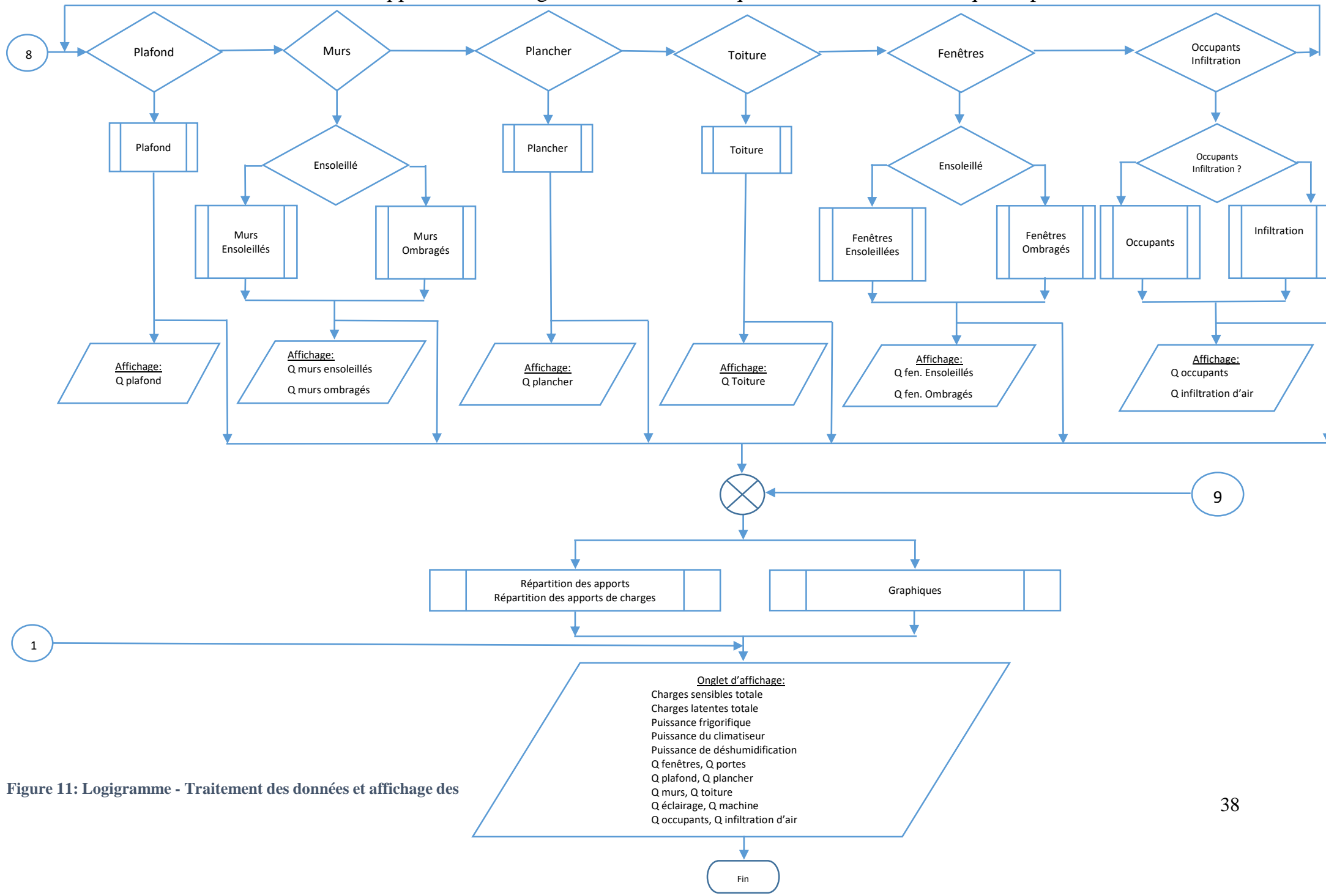


Figure 11: Logigramme - Traitement des données et affichage des

IV.3 Présentation et interface du logiciel

Dans cette section, nous décrivons comment le logiciel de bilan thermique des bâtiments fonctionne et comment l'utilisateur interagit avec lui. Nous décrivons les étapes principales du processus de calcul des charges thermiques et présenterons l'interface utilisateur, conçue pour être intuitive et faciliter la saisie des données nécessaires. L'objectif est de permettre une utilisation efficace du logiciel, de la sélection des données météorologiques à l'affichage des résultats des calculs.

IV.3.1 Fonctionnalité du logiciel

Bien que la fonctionnalité clé soit le calcul des charges thermiques, le logiciel actuel permet de réaliser cette tâche de manière structurée en suivant plusieurs étapes séquentielles.

Les principales étapes du fonctionnement incluent :

- **Accès aux données météorologiques TMY** : Le logiciel permet de sélectionner et d'importer automatiquement des fichiers Excel contenant des données météorologiques spécifiques à une région.
- **Gestion des pièces** : L'utilisateur peut ajouter et nommer chaque pièce à analyser, permettant une analyse structurée et séquentielle.
- **Calcul des gains de chaleur des équipements électriques** : Le logiciel calcule les gains de chaleur dus aux équipements électriques en fonction des données saisies par l'utilisateur.
- **Calcul des gains de chaleur à travers les structures du bâtiment** : Le logiciel effectue des calculs pour les gains de chaleur à travers le plafond, le plancher, les murs, les fenêtres et les portes.
- **Détection des parois ensoleillées** : Le logiciel identifie quelles parois du bâtiment sont ensoleillées en fonction des données météorologiques importées, ce qui est crucial pour les calculs de gains thermiques.
- **Affichage graphique des résultats** : Les résultats des calculs sont affichés de manière structurée et graphique dans l'interface utilisateur, permettant une visualisation claire et intuitive.
- **Interface utilisateur interactive** : Une interface graphique développée avec 'Tkinter', permettant une saisie de données facile et une navigation intuitive entre les différentes sections du logiciel.

IV.3.2 Interface utilisateur et fonctionnalités interactives

L'interface utilisateur de notre logiciel de bilan thermique des bâtiments a été développée en utilisant la bibliothèque 'Tkinter'. 'Tkinter' est la bibliothèque standard de Python pour la création d'interfaces graphiques. Elle permet de construire des interfaces utilisateur interactives de manière simple et efficace.

Pour signaler d'éventuelles erreurs ou informer l'utilisateur, nous avons intégré des 'messageboxes'. Les 'messageboxes' sont des boîtes de dialogue fournies par 'Tkinter', utilisées pour afficher des messages d'erreur, des alertes ou des informations à l'utilisateur. Elles permettent de gérer les interactions et de guider l'utilisateur tout au long de l'utilisation du logiciel.

- Fenêtre principale :

Après avoir exécuté le logiciel en cliquant sur l'icône du logiciel, la fenêtre principale illustrée en **Figure 12** apparaît.

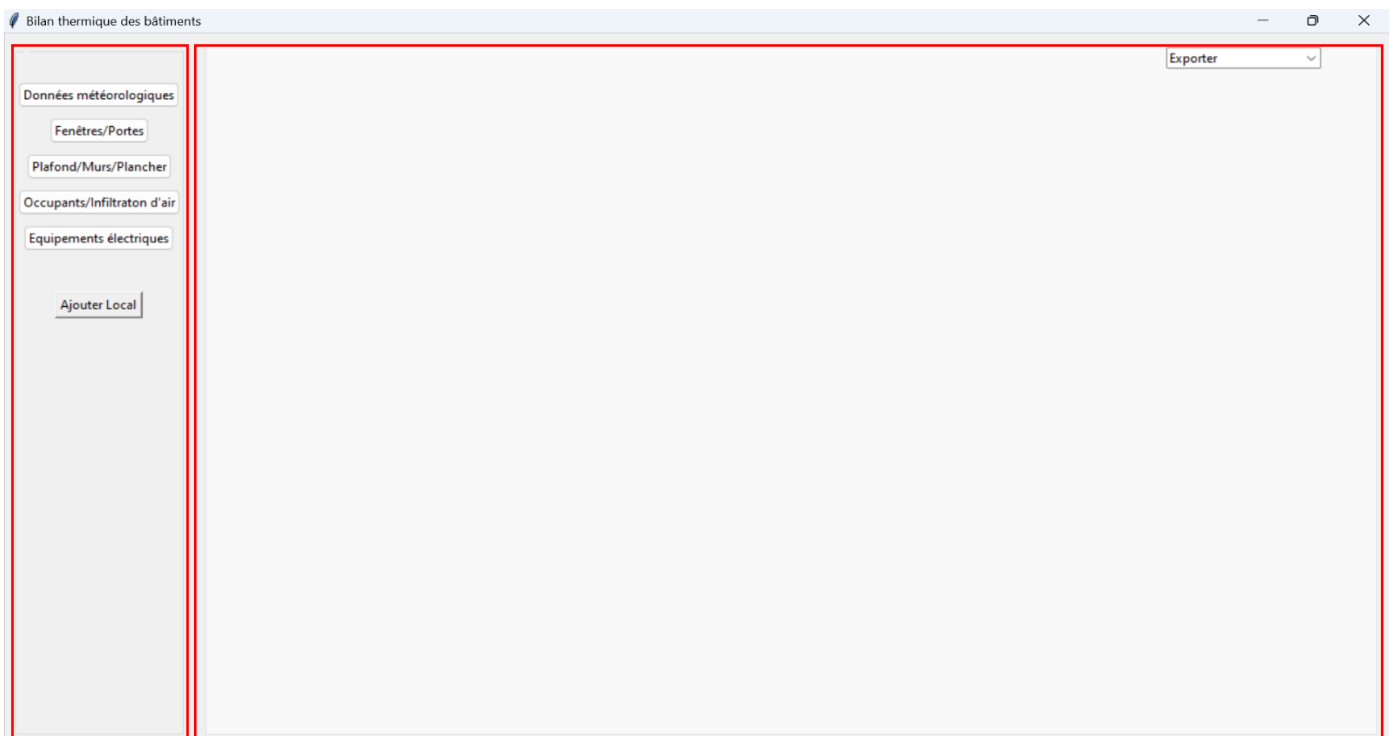


Figure 12: Interface principale du logiciel actuel

La fenêtre principale possède deux frames (cadres ou sections) dont un à gauche et l'autre à droite. Le frame de gauche contient des boutons (**Données météorologique**, **Fenêtres/Portes**, **Plafond/Murs/Plancher**, **Occupants/Infiltration d'air**, **Equipements électrique** et **Ajouter local**). Les premiers boutons permettent d'accéder

à des fenêtres de saisie pour entrer ou sélectionner les inputs nécessaires au calcul des charges thermiques associés, tandis que le dernier bouton **Ajouter local**, ouvre dans le frame de droite des champs de saisie pour visualiser le résultat du bilan thermique ainsi qu'une répartition graphique (graphique en bâton et en camembert) du résultat global.

Pour effectuer un bilan thermique correct avec notre logiciel, il est nécessaire que l'utilisateur suive les étapes séquentielles décrites dans le logigramme :

1. Cliquer sur le bouton : **Ajouter local** ;
2. Cliquer sur le bouton : **Données météorologiques** ;
3. Choisir parmi les boutons : **Fenêtres/Portes** ou **Plafond/Murs/Plancher** ou **Occupants/Infiltration d'air** (ici l'ordre importe peu) ;
4. Cliquer sur le bouton : **Equipements électriques**

Il est important de noter qu'après avoir cliqué sur le bouton **Ajouter local**, l'utilisateur peut ensuite cliquer sur le bouton **Equipements électriques**. Cependant, à l'étape suivante, il doit obligatoirement commencer par cliquer sur le bouton **Données météorologiques**, car le calcul des charges thermiques des autres éléments dépend des données météorologiques.

Dans cette section, nous présenterons les interfaces générées par les deux boutons principaux. Les interfaces et leur fonctionnement pour les autres boutons sont détaillés en (**Annexe 5**, **Annexe 6**, **Annexe 7** et **Annexe 8**).

- **Ajouter local :**
Pour commencer, il est nécessaire de créer un projet pour chaque pièce d'un bâtiment en saisissant son nom. Pour cela, il suffit de cliquer sur le bouton **Ajouter local**. Une boîte de dialogue (**Figure 13**), permettant ainsi à l'utilisateur de saisir le nom du local. Ensuite, dans le frame de droite de la fenêtre principale, des champs de saisie apparaîtront comme le montre la **Figure 13**. A ce stade le frame contenant les graphiques n'apparaît pas car aucun calcul n'a encore été effectué par l'utilisateur.

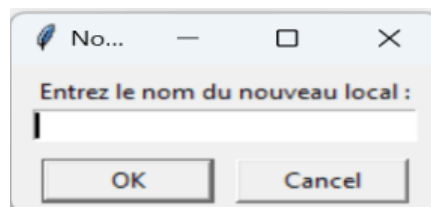


Figure 13: Boîte de dialogue de saisie du nom de la pièce à climatiser

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

Bilan thermique des bâtiments

Données météorologiques

Fenêtres/Portes

Plafond/Murs/Plancher

Occupants/Infiltration d'air

Equipements électriques

Ajouter Local

Salon

Exemple de nom d'onglet représentant le local à climatiser saisi dans la boîte de

REPARTITION DES APPORTS DE CHALEUR SENSIBLE

	(W)	(%)
1. Fenêtres ensoleillées		
2. Fenêtres non ensoleillées		
3. Murs extérieurs ensoleillés		
4. Murs extérieurs non ensoleillés		
5. Murs en contact avec un local climatisé		
6. Murs en contact avec un local non climatisé		
7. Murs en contact avec la cuisine		
8. Toiture		
9. Plafond sous comble		
10. Plafond sous local non climatisé		
11. Portes ensoleillées		
12. Portes non ensoleillées		
13. Renouvellement d'air		
14. Occupants		
15. Eclairage		
16. Moteurs électrique		
17. Equipements électriques divers		
18. Plancher sous local non climatisé		

REPARTITION DES APPORTS

1. Chaleur sensible totale		W
2. Chaleur latente totale		W
3. Facteur de chaleur sensible		
4. Puissance frigorifique		kW
		BTU
5. Puissance du climatiseur		(Cv)
6. Puissance de déshumidification		(L/h)

Exporter

Figure 14: Interface graphique principale après saisie du nom de la pièce

- **Données météorologiques :**

Après l'ouverture du projet, il est nécessaire de (Figure 15) :

1. Sélectionner le pays et la région d'étude via des listes déroulantes.
2. Saisir la température intérieure du local à climatiser.
3. Extraire les données météorologiques de la base de données.

Une fois ces étapes accomplies, l'utilisateur peut procéder au bilan thermique des fenêtres, portes, murs, plancher, toiture, occupants et infiltration d'air. Les résultats calculés seront affichés dans les champs de saisies dans les fenêtres correspondantes ainsi que dans la fenêtre principale.

Données météorologiques

1. Sélectionnez dans les listes déroulantes le « Pays » puis la « Ville »

Zone géographique

Pays:

Ville:

Latitude (DD):

Longitude (DD):

Altitude (m):

Période

Année (en cours):

Mois:

Jour:

Heure:

2. Sélectionnez la température intérieure de conditionnement du local dans la liste déroulante

Paramètres météorologiques

Température intérieur (°C):

Température (°C):

Pression (bar):

Humidité relative (%):

Position solaire

Azimut (degrés):

Hauteur (degrés):

3. Cliquez sur le bouton « Extraction des Données » pour extraire de la base de données les données météorologiques de la ville correspondante et afficher les résultats dans les champs de saisie des cadres « Zone géographique », « Paramètres météorologiques », « Période », « Position solaire »

Extraction des Données

Figure 15: Fenêtre modale du bouton "Données météorologiques".

V. Validation du logiciel et discussion des résultats

La validation de notre logiciel de bilan thermique est une étape cruciale pour assurer la fiabilité des simulations. Pour ce faire, nous comparons ses résultats avec ceux de "HAP Carrier", un logiciel de référence reconnu pour sa précision.

Nous présenterons les résultats de la simulation thermique d'un même bâtiment avec les deux logiciels, en décrivant les caractéristiques du bâtiment et les paramètres de simulation utilisés. Nous comparerons ensuite les résultats, en mettant en évidence les similitudes et les divergences, afin d'évaluer la performance de notre logiciel et d'identifier les améliorations nécessaires.

V.1 Validation

Dans cette sous-section, nous détaillons le processus de validation en comparant le logiciel développé au logiciel HAP 4.90. Nous décrirons le bâtiment modélisé, les paramètres de simulation utilisés, et analyserons les résultats obtenus pour confirmer la fiabilité de notre logiciel et identifier les améliorations nécessaires.

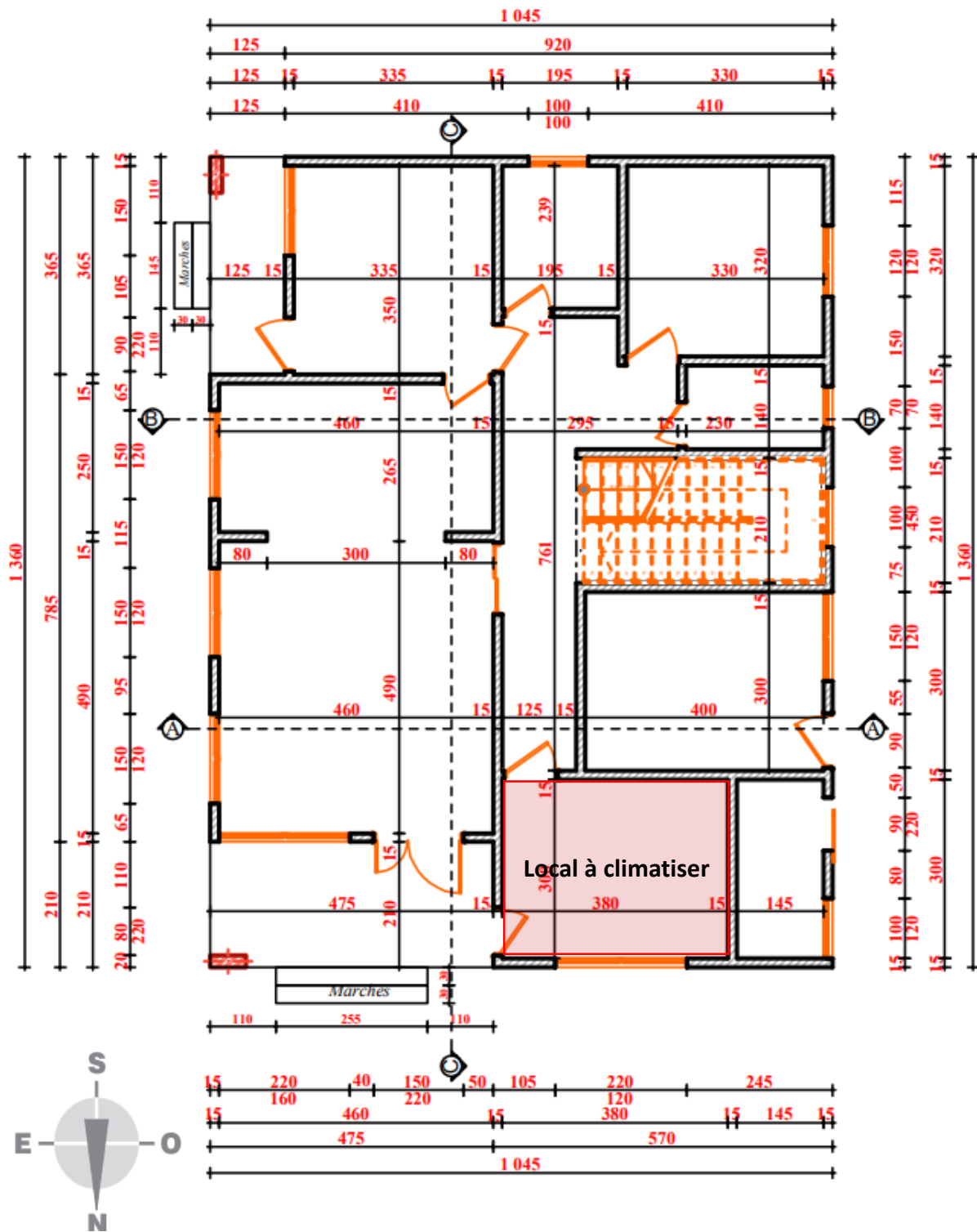
V.1.1.1 Présentation du bâtiment de référence

Le bâtiment étudié est un immeuble résidentiel R+1 situé à Ouagadougou, avec une entrée principale orientée plein est. Notre étude porte spécifiquement sur un bureau situé au rez-de-chaussée (RDC). Les différentes pièces du bâtiment sont répertoriées dans le **Tableau 8**.

Tableau 8: Pièces du bâtiment

RDC		R+1	
Quantité	Pièces	Quantité	Pièces
1	Terrasse	1	Salle Séjour
1	Salle de séjour	1	Chambre principale
1	Salle à manger	1	Toilette chambre principale
1	Cuisine	1	Chambre visiteur
1	Bureau	1	Chambre enfant
1	Débarras (Stockage des batteries solaires)	1	Salle de sport ou mini bar
1	Chambre visiteur	1	Toilette enfant
1	Chambre 1		
1	Toilette		
1	Magasin		

Les dimensions du local à climatiser, des portes et fenêtres sont répertoriées dans le **Tableau 9** et **Tableau 10** conformément au plan de cotation (**Figure 16**) et la vue de de coupe B-B (**Annexe 9**). Pour les portes métalliques vitrées nous émettrons l’hypothèse que la partie vitrée représente 70 % de la surface totale de la porte.



N° 6 : VUE EN PLAN RDC

Figure 16: Plan de cotation

Tableau 9: Dimension du local à climatiser

Façade	Etat du mur mitoyen	Longueur (m)	Hauteur (m)	Surface brute mur (m ²)	Surface porte (m ²)	Surface fenêtre (m ²)	Surface nette mur (m ²)	Surface plafond (m ²)	Surface plancher (m ²)
Nord	Extérieur/Ensoleillé	3,8				2,64	8,76		
Sud	Non climatisé/ Ombragé		3	11,4	1,98		9,42		
Est	Extérieur/ Ombragé	3		9	1,76		7,24		
Ouest	Non climatisé/ Ombragé						9		

- **Hypothèse :** Le plafond est une dalle de béton de 20 cm et nous avons supposé le local situé au-dessus de ce dernier est climatisé.

Tableau 10: Dimension des portes et de la fenêtre du local à climatiser

Locaux	Façade	Surface fenêtre (m ²)	Surface porte (m ²)	Type de fenêtre	Type de porte
Bureau	Nord	2,64		Fenêtre métallique vitrée	
	Est		1,76		Porte métallique vitrée
	Sud		1,98		Porte isoplane en bois

V.1.1.2 Paramètres de simulation

Pour valider notre projet et mener une analyse cohérente et pertinente, nous utiliserons les mêmes hypothèses de calcul dans notre logiciel et dans le logiciel HAP Carrier. Cette approche assurera la comparabilité et la précision des résultats obtenus.

Conditions environnementales

Nous désignons par condition environnementales à la fois les conditions climatiques extérieures et les conditions de confort intérieur. Le bilan thermique des locaux sera fait à avec les conditions environnementales du **Tableau 11**.

Tableau 11: Conditions environnementales

Conditions climatiques extérieures		Conditions de confort intérieur	
Température sèche (°C)	41	Température intérieur (°C)	24
Humidité relative (%)	16	Humidité relative (%)	50
Pression moyenne annuelle (bar)	97.530		

- Pour la ville de Ouagadougou, situé une latitude 12,37 degré décimal, une longitude de -1,533 degré décimal et une altitude de 299 m, la position du soleil le 20 avril à 15h est la suivante :
 - Orientation du soleil : Nord-Ouest
 - Azimut : 274, 1 degré décimal
 - Hauteur du soleil : 47,2 degré décimal



Caractéristiques des charges internes

Nous désignons par charges internes les gains de chaleur dus aux personnes et aux équipements électriques. Ces charges sont illustrées dans le **Tableau 12**.

Tableau 12: Equipements électriques du local à climatiser

Charge interne				
Local	Type d'équipement	Quantité	Puissance nominale unitaire (W)	Nombre de personne
Bureau	Lampe LED 1,2 m	1	18	
	Ordinateur de bureau	1	400	
	Ordinateur portable	1	75	3
	Imprimante à jet d'ancre	1	52	
	Chauffe-eau	1	146	



Caractéristiques structurelles du bâtiment

Les caractéristiques structurelles du bâtiment font référence aux matériaux de construction utilisés pour les murs, des planchers, des plafonds et de la toiture. Les caractéristiques sont détaillées dans le **Tableau 13**.

Tableau 13: Revêtement du local à climatiser

Locaux	Orientation	Matériaux	Revêtement		Plancher	Plafond
			Extérieur	Intérieur		
Bureau	Nord	Parpaing	Peinture	Peinture	Carreaux	Faux
	Sud	creux 15	Marmorex /	acrylique /	grès	plafond
	Est	cm	Crépissage	Crépissage	cérame	en staff
	Ouest		2,5 mm	2,5 mm	vittrifié premier choix	

V.1.1.3 Simulation avec le logiciel développé

Cette section présente une simulation pour évaluer l'efficacité de notre logiciel en fournissant des estimations des charges thermiques. Le **Tableau 14** présente les résultats du bilan thermique du local de notre bâtiment de référence, tandis que la **Figure 17** offre une illustration graphique des résultats obtenus par notre logiciel. Les résultats obtenus par notre logiciel figurent en **Annexe 11**.

Tableau 14: Résultats de la simulation avec le logiciel actuel

Répartitions des charges sensibles			Répartition des apports	
Charges	[W]	[%]		
Fenêtres ensoleillées	776,5	27,52	Chaleur sensible totale	2822 W
Fenêtre ombragées	121	4,29	Chaleur latente totale	295,29 W
Murs ensoleillées	394,6	13,98	FCS	0,911
Murs ombragés	260,3	9,22		3,12 kW
Murs en contacts avec des locaux non conditionnés	545,2	19,32	Puissance frigorifique	1036,65 BTU
Portes ombragées	101,8	3,61	Puissance du climatiseur	1,41 Cv
Infiltration d'air	95,7	3,39	Puissance de déshumidification	0,43 L/h
Occupants	104,7	3,71		
Eclairage	16,2	0,72	R	273,44 W/m²
Equipements électriques	406	18,01		

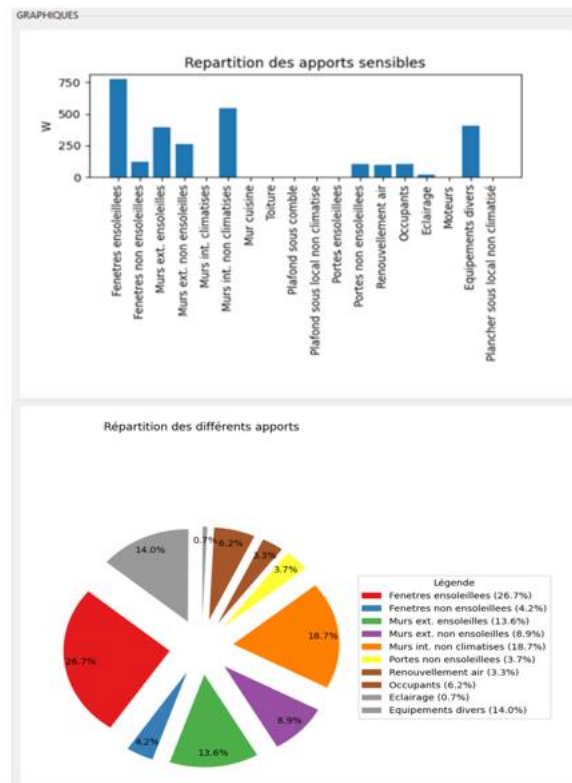


Figure 17: Graphiques des résultats obtenus avec la simulation du logiciel actuel

V.1.1.4 Simulation avec HAP Carrier

Dans cette partie, nous présentons un tableau récapitulatif (**Tableau 15**) ainsi que deux graphiques (**Figure 18** et **Figure 19**) des résultats obtenus avec le logiciel HAP.4.90, tandis que les résultats détaillés sont disponibles en **Annexe 11**.

Tableau 15: Résultats obtenus avec la simulation du logiciel HAP 4.90

Répartitions des charges sensibles			Répartition des apports	
Charges	[W]	[%]		
Fenêtre ensoleillée	344	12	Chaleur sensible totale	2841 W
Portes	0	0	Chaleur latente totale	407 W
Plafond	125		FCS	0,87
Mur ensoleillée	368	13		
Murs en contacts avec des locaux non conditionnés	1124	40	R	284,91 W/m ²
Eclairage	16	1	Puissance du climatiseur	1,47 Cv
Plafond	125	4		
Équipements électriques	611	21	Puissance de déshumidification	0,58 L/h
Occupants	160	6		3,25 kW

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

Plancher	0	0	Puissance frigorifique	11082,64 BTU
Infiltration	92	3		

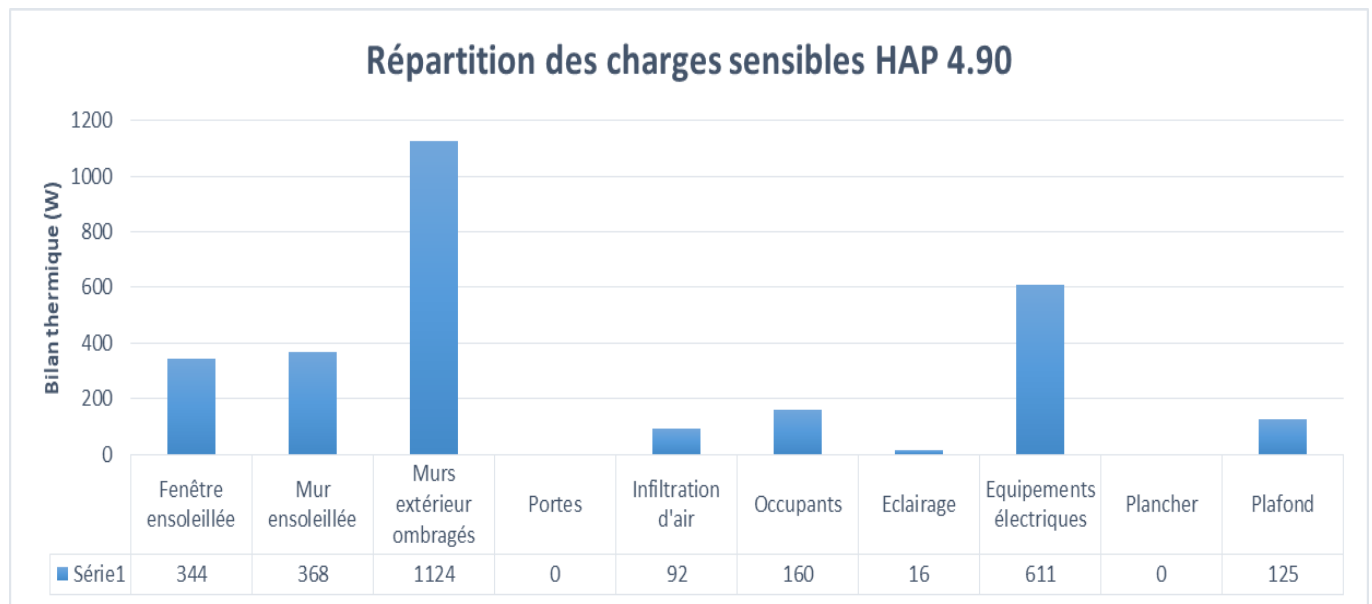


Figure 18: Histogramme - Répartition des charges sensibles HAP 4.90

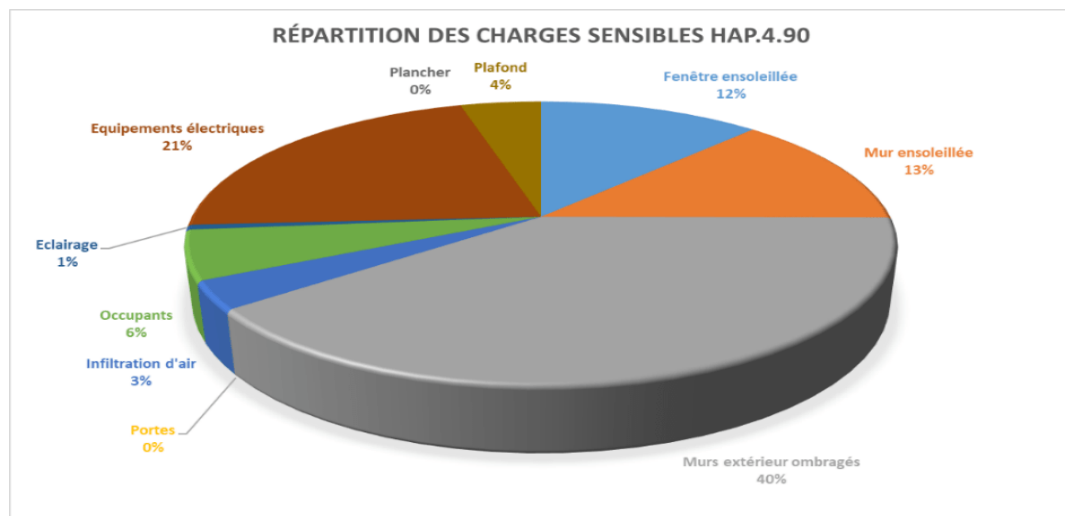


Figure 19: Graphique en secteur - Répartition des charges sensibles - HAP 4.90

V.2 Discussion

Dans cette partie nous présentons une analyse des résultats obtenus à partir des simulations réalisées avec notre logiciel et le logiciel HAP 4.90. Premièrement, nous comparons les résultats obtenus avec les deux outils, en soulignant les similitudes, les différences et leurs causes. Enfin, nous discutons des limites de notre outil et proposons des améliorations pour l'avenir.

V.2.1 Analyse des résultats obtenus

Pour mener notre analyse, nous comparons les charges identiques afin d'évaluer la précision et la fiabilité de notre logiciel. Les résultats obtenus par les deux logiciels sont illustrés dans les figures ci-dessous.

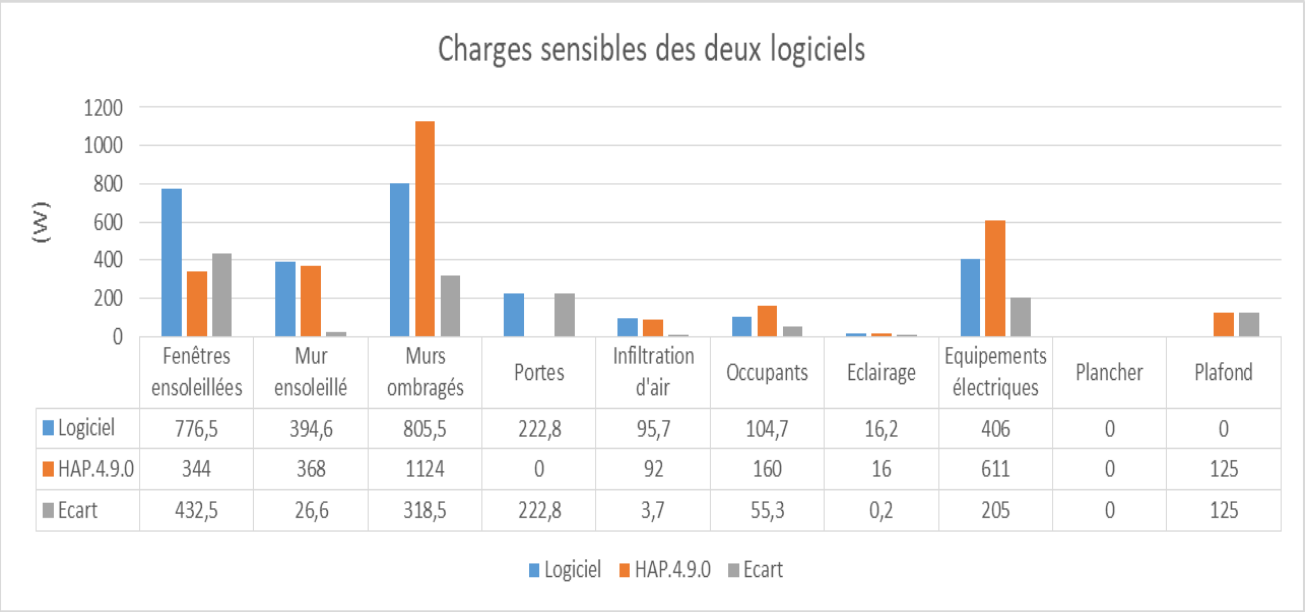


Figure 20: Récapitulatif des résultats des deux logiciels

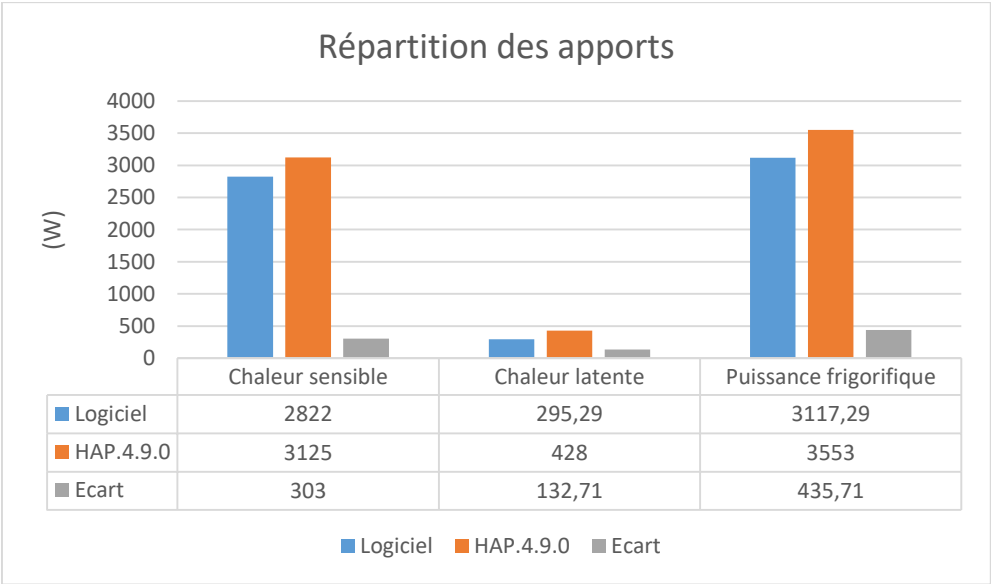


Figure 21: Récapitulatif des charges et des puissances frigorifiques des deux logiciels

⚡ Charges sensibles :

La différence observée dans les charges internes (éclairage, équipements électriques et occupants) (**Figure 20**) des deux logiciels peuvent être attribués à la planification de

l'utilisation des équipements électriques et de l'espace à climatisé. Le logiciel HAP 4.90 se distingue par sa capacité à intégrer les variations horaires des sources de chaleur, ce qui permet des ajustements plus précis en fonction de l'utilisation réelle. Cette approche dynamique assure une grande cohérence entre calcul, reflétant fidèlement les conditions réelles et amélioration ainsi la précision des résultats.

Pour la fenêtre, les résultats obtenus indiquent que la fenêtre ensoleillée nécessite une charge de 776,5 W selon le logiciel, tandis que le logiciel HAP 4.90 estime cette charge à 344 W, ce qui représente une différence de 432,5 W soit 55,7 % (**Figure 20**). Cet écart peut, entre autres s'expliquer par l'absence de fenêtres simples vitrages dans le logiciel HAP 4.90, ce qui influence significativement les calculs.

Concernant le mur ensoleillé, le logiciel a obtenu une charge de 394,6 W contre 368 W pour le logiciel HAP 4.90, ce qui représente un écart de 6,74 % (**Figure 20**). Cette différence s'explique par le fait notre logiciel utilise une différence de température fictive. Bien que cette approche prenne en compte l'inertie du bâtiment, elle ne considère pas le déphasage thermique, contrairement au logiciel HAP 4.90 qui intègre ce paramètre.

Quant aux murs ombragés, le logiciel estime la charge thermique à 805,5 W, tandis que le logiciel HAP 4.90 donne une estimation de 1124 W, soit une différence de 318,5 W (28,33%) (**Figure 20**). Cette variation s'explique par le fait que HAP 4.90 ne distingue pas les cloisons des murs ombragés. Il traite tous les murs comme étant soit ensoleillés, soit des cloisons, ce qui peut conduire à une surestimation des charges thermiques, surtout pour les murs ombragés où une partie peut être en contact avec des locaux non climatisés.

En ce qui concerne le plafond, la différence des résultats obtenus (125 W pour le logiciel HAP 4.90 et nul pour le logiciel (**Figure 20**) est dû au fait que dans notre hypothèse, le local adjacent est climatisé et maintenu à une température constante de 24°C, identique à celle de notre local. En revanche, le logiciel HAP 4.90 ne prend pas en charge la configuration d'un bâtiment à plusieurs niveaux, et considère donc à la place un plafond et une toiture.

Pour ce qui du plancher nous obtenons des résultats identiques (**Figure 20**) pour les deux logiciels, une valeur de zéro. Le transfert de chaleur sur dalle est négligeable, en raison de l'isolation et les matériaux utilisés, assurant ainsi une résistance thermique efficace.

Enfin, en raison de la configuration de notre local, les portes sont placées l'une sur une façade ombragée et l'autre sur une façade mitoyenne à un autre local. HAP 4.90 ne prend pas en compte ces portes, ce qui explique la différence de charge.

Les totaux des charges sensibles s'élèvent à 2822 W pour le logiciel et 3125 W pour HAP 4.90, ce qui représente un écart de 5,09 % (**Figure 2I**) qui met en évidence les différences significatives dans l'évaluation des charges thermiques entre les deux logiciels.

Charges latentes :

Les résultats obtenus par le logiciel et le logiciel HAP 4.90 sont respectivement 295,29 W et 428 W, avec un écart de 132,71 W (18,34%) (**Figure 2I**). La différence entre les charges latentes des deux logiciels, tout comme celle des charges internes, s'explique par la capacité de HAP 4.90 à planifier l'utilisation des différents équipements électriques et à gérer les heures d'occupation du local conditionné.

V.2.2 Bilan :

L'analyse menée précédemment met en évidence des différences significatives entre les résultats des deux logiciels, souvent dues aux méthodes de calcul et aux paramètres pris en compte. Le logiciel a produit une puissance frigorifique de 3,12 kW, soit une puissance du climatiseur de 1,41 Cv, tandis que le logiciel HAP 4.90 a généré une puissance frigorifique de 3,25 kW, soit une puissance du climatiseur de 1,47 Cv, avec une différence de puissance frigorifique significative de 12,26 %. Cette variation peut avoir des implications importantes en termes de dimensionnement des systèmes de climatisation et de gestion de charges thermiques. Dans ce contexte, l'approche plus dynamique de HAP 4.90 à traiter des configurations complexes peut effectivement conduire à des estimations plus précises des charges thermiques. Cela souligne l'importance pour les utilisateurs de choisir le logiciel le mieux adapté à leurs besoins spécifiques en matière de modélisation thermique et de climatisation des bâtiments.

V.2.3 Limitations du logiciel

Cette partie met en évidence les limitations actuelles du logiciel d'un point de vue analytique en s'appuyant sur la comparaison faite avec le logiciel HAP 4.90, ainsi que les limitations fonctionnelles.

Limitations analytiques :

L'analyse comparative avec le logiciel HAP 4.90 a révélé des différences significatives dans les résultats obtenus, notamment en ce qui concerne les charges thermiques internes et latentes. Ces différences s'expliquent par les limites du logiciel en matière de :

- Planification de l'utilisation des équipements électriques et de l'espace à conditionné ;
- Simulation du régime transitoire de la chaleur à travers des parois multicouches.

Limitations fonctionnelles :

Les limitations fonctionnelles du logiciel concernent les fonctionnalités qu'il offre à l'utilisateur. Ces limitations peuvent restreindre la flexibilité d'utilisation du logiciel et la portée de ses analyses. On peut citer parmi ces limitations :

- **Gestion des données et rapports :** capacité à gérer et manipuler les données de manière efficace, incluant le stockage, la récupération et la modification des informations.
- **Documentation :** fournir une documentation claire et complète sur l'utilisation du logiciel, ses fonctionnalités ;
- **Simulation énergétique :** permettre à l'utilisateur de modéliser avec précision la consommation énergétique des bâtiments en tenant compte des divers facteurs tels que les conditions climatiques, les caractéristiques des matériaux, les systèmes de ventilation et de climatisation ; ainsi que les habitudes d'occupation.
- **Optimisation énergétique :** fournir une fonctionnalité avancée pour optimiser les consommations énergétiques en fonction des scénarios d'utilisation.

Ces limitations soulignent la nécessité d'améliorations futures pour renforcer la précision, la fiabilité et la fonctionnalité du logiciel.

VI. Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé une première étape vers l'informatisation des calculs de bilan thermique des bâtiments en zone tropicale, en développant une approche méthodologique technique adaptée aux spécificités climatiques de ces régions.

Premièrement, nous avons effectué une synthèse bibliographique sur les logiciels de bilan thermiques des bâtiments. A travers cette synthèse, nous avons présenté les différentes catégories de logiciels disponibles sur le marché.

Deuxièmement, nous avons décrit la mise en place d'une base de données climatique et le choix du langage de programmation pour le développement du logiciel. La fiabilité et l'accessibilité des données nous a permis de privilégier l'application web PVGIS pour ses données météorologiques types (TMY) afin de constituer la base de données climatique du logiciel. De plus, la polyvalence, la facilité d'apprentissage et la richesse de la bibliothèque de Python nous a conduit à le choisir comme langage de programmation.

Troisièmement, nous avons présenté les méthodes de calculs pour le bilan thermique des bâtiments ainsi que la conception du logiciel. Diverses méthodes de calcul, notamment celles proposées par ASHRAE fundamentals, le manuel Carrier, et la méthode simplifiée élaboré par l'IEPF dans le tome 1 de l'efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale, ont été combinées pour constituer le moteur de calcul implémenté dans le code source du logiciel. Pour assurer la flexibilité et la maintenabilité du logiciel, une architecture modulaire a été préférée aux architectures monolithique et orientées service. L'interface graphique du logiciel a également été présentée.

Quatrièmement, un bâtiment test a été sélectionné afin de déterminer la fiabilité de la simulation du logiciel développé. Nous avons comparé les résultats de cette simulation aux résultats du logiciel HAP 4.90 dans les mêmes conditions environnementales. Il en ressort un écart significatif de 12,26 % entre le logiciel développé et le logiciel HAP 4.90. Ce résultat met en perspective les améliorations à apporter pour perfectionner le logiciel développé.

Pour conclure, bien que des différences notables aient été observées, les bases posées dans ce travail ouvrent la voie à des avancées significatives dans l'informatisation des calculs de bilan thermique pour les bâtiments en zone tropicale. Des travaux futurs pourraient se concentrer sur les améliorations de la précision des algorithmes, de l'optimisation de l'interface

utilisateur ainsi que sur de nouvelles fonctionnalités pour répondre aux besoins spécifiques des professionnels du secteur.

VII. Perspectives

Les travaux réalisés durant ce stage permettent d'envisager de nouvelles perspectives. Il s'agit de :

- Faire des simulations avec une version plus récente du logiciel HAP pour obtenir des comparaisons plus précises et valider plus efficacement les résultats obtenus ;
- Faire des simulations avec d'autres logiciels de bilan thermiques afin de comparer les résultats et valider la fiabilité du logiciel actuel ;
- Faire des simulations avec plusieurs configurations de bâtiments pour tester la robustesse et la flexibilité du logiciel actuel ;
- Intégrer l'option de planification de l'utilisation des équipements électriques et de l'occupation de l'espace à climatiser afin d'obtenir une meilleure estimation des charges des équipements électriques et de l'infiltration de l'air ;
- Intégrer une fonctionnalité pour la gestion des données pour améliorer la manipulation, le stockage, la récupération et la modification des informations ;
- Intégrer une documentation claire et complète pour faciliter l'utilisation du logiciel et ses fonctionnalités ;
- Intégrer des fonctionnalités telles que : la simulation énergétique et l'optimisation énergétiques pour fournir des analyses plus approfondies et des recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Bibliographie

- [1] M. Trčka et J. L. M. Hensen, « Overview of HVAC system simulation », *Autom. Constr.*, vol. 19, n° 2, p. 93-99, mars 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.11.019.
- [2] « CARRIER® eDESIGN SUITE NEWS Volume 7, Issue 3 », Carrier Corporation, 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://www.shreddocs.com/hvac/docs/1001/Public/03/EXHANGE_7_3.pdf
- [3] LG Air Conditioning Technologies, « LATS HVAC User's Manual », LG Electronics U.S.A., Inc., 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://lghvac.com/mylg-hvac/>
- [4] N. Fumo, P. Mago, et R. Luck, « Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models », *Energy Build.*, vol. 42, n° 12, p. 2331-2337, déc. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.07.027.
- [5] « DesignBuilder Dynamic Simulation Model (DSM) User Manual v7.2.0 », DesignBuilder Software Ltd, juill. 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://designbuilder.co.uk/download/documents>
- [6] M. Kaboré, « Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne. », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2015.
- [7] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), *ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*, SI Edition. Atlanta, GA: ASHRAE, 2017.
- [8] T. Huld, E. Paietta, P. Zangheri, et I. Pinedo Pascua, « Assembling Typical Meteorological Year Data Sets for Building Energy Performance Using Reanalysis and Satellite-Based Data », *Atmosphere*, vol. 9, n° 2, p. 53, févr. 2018, doi: 10.3390/atmos9020053.
- [9] Claessens J., COULIBALY Y., Djako T., Gnamke M., Kamognen A., Kemajou A., Koné J. M., N'Diaté A., Sako Koita, M., Stamoukos D, et Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, « EFFICACITE ENERGETIQUE DE LA CLIMATISATION EN REGION TROPICALE ». 2003.
- [10] Chris A. Ibe, Emmanuel E. Anyanwu, *Principles of Tropical Air Conditioning*. 2003.
- [11] Roger Cardiergues, « PROPRIETES DE L'AIR », [En ligne]. Disponible sur: https://media.xpair.com/auxidev/nF01a_PropAir.pdf
- [12] I. SALOU NOUHOUN, « Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation des performances thermiques des Eco-bâtiments en Afrique Subsaharienne. », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 2020.
- [13] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, et J. L. M. Hensen, « Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 56, n° 1-2, p. 134-151, juill. 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003.
- [14] K. Aristide Bopahbé, « Contribution à l'amélioration des outils de calcul des charges de climatisation en région tropicale », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 2015. [En ligne]. Disponible sur: http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=18818

Sites internet

- [1] Laboratoire Energies Renouvelables & Efficacite Energetique (labEREE) – Le site officiel | 2iE, «<https://www.2ie-edu.org/recherche/laboratoires-laberee/>» [En ligne].
- [2] ÉnergiePlus. [En ligne]. Available: https://energyplus.net/weather-region/africa_wmo_region_1.
- [3] T. -. S. officiel. [En ligne]. Available: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/>.
- [4] «TRNSYS - Site officiel,» [En ligne]. Available: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/>.
- [5] «TRNSYS - Site officiel,» [En ligne]. Available: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/weather/weather.htm>.
- [6] «Bibliothèque de composants TESS - Bibliothèques TESS | TRNSYS : Outil de simulation de systèmes transitoires,» [En ligne]. Available: <https://www.trnsys.com/tess-libraries/>.
- [7] «Welcome | TRNSYS : Transient System Simulation Tool,» [En ligne]. Available: <https://www.trnsys.com/>.
- [8] «PVGIS typical meteorological year (TMY) generator - European Commission,» [En ligne]. Available: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-tools/pvgis-typical-meteorological-year-tmy-generator_en.

ANNEXES

Annexe 1: Liste non exhaustive des équipements divers [2].	II
Annexe 2: Coefficient de gains solaire pour un angle incident et le coefficient de gain diffus	II
Annexe 3: IAC rideaux	V
Annexe 4: IAC stores	VI
Annexe 5: Fenêtre modale du bouton "Fenêtres/Portes"	VII
Annexe 6: Fenêtre modale du bouton "Occupants/Infiltration d'air"	VIII
Annexe 7: Fenêtre modale du bouton "Plafond/Murs/Plancher"	IX
Annexe 8: Fenêtre modale du bouton "Equipements électriques"	X
Annexe 9: Coupe B - B	XI
Annexe 10: Résultats détaillés du logiciel actuel	XI
Annexe 11: Résultats détaillés du logiciel HAP 4.90	XII

Annexe 1: Liste non exhaustive des équipements divers [2].

Types d'appareils	Puissance nominales [W]	Gain à admettre [W]	
		Chaleur sensible	Chaleur latente
Friteuse 5 L d'huile	2575	464	696
Friteuse 10 L d'huile	6954	1102	1653
Chauffe pain	435	319	29
Chauffe-eau	146	116	29
Cuisine électrique et machine à laver	3000	1450	1550
Aspirateur	200	50	
Essoreuse	100	15	
Congélateur 200 L	175	500	
Fers à repasser	500	230	270
Chaîne stéréophonique	40	40	0
Téléviseur	175	175	0
Séchoir cheveux	500/1000	175/350	75/250
Plaque de cuisson	500/1000	120/250	130/250
Ordinateur	400	250	0
Cafetière	500/3000	750	300
Photocopieuse		750	
Imprimante à jet d'encre		52	
Imprimante laser		15	
fax		62	

Annexe 2: Coefficient de gains solaire pour un angle incident et le coefficient de gain diffus

ID	Type de vitrage	e	SHGC0	SHGC40	SHGC50	SHGC60	SHGC70	SHGC80	SHGCD
1a	Simple vitrage CLR	3	0.86	0.84	0.82	0.78	0.67	0.42	0.78
1b	Simple vitrage CLR	6	0.81	0.8	0.78	0.73	0.62	0.39	0.73
1c	Simple vitrage BRZ	3	0.73	0.71	0.68	0.64	0.55	0.34	0.65
1d	Simple vitrage BRZ	6	0.62	0.59	0.57	0.53	0.45	0.29	0.54
1e	Simple vitrage GRN	3	0.7	0.68	0.66	0.62	0.53	0.33	0.63
1f	Simple vitrage GRN	6	0.6	0.58	0.56	0.52	0.45	0.29	0.54
1g	Simple vitrage GRY	3	0.7	0.68	0.66	0.61	0.53	0.33	0.63
1h	Simple vitrage GRY	6	0.59	0.57	0.55	0.51	0.44	0.28	0.52
1i	Simple vitrage BLUGRN	6	0.62	0.59	0.57	0.54	0.46	0.3	0.55
1j	Simple vitrage réfléchissant SS on CLR 14%	6	0.19	0.19	0.19	0.18	0.16	0.1	0.18
1k	Simple vitrage réfléchissant SS on CLR 8%	6	0.25	0.25	0.24	0.23	0.2	0.13	0.23
1l	Simple vitrage réfléchissant SS on CLR 20%	6	0.31	0.3	0.3	0.28	0.24	0.16	0.28
1m	Simple vitrage réfléchissant SS on CLR 14%	6	0.25	0.25	0.24	0.23	0.21	0.14	0.23
1n	Simple vitrage réfléchissant SS on CLR 20%	6	0.29	0.29	0.28	0.27	0.23	0.15	0.27
1o	Simple vitrage réfléchissant SS on CLR 30%	6	0.39	0.38	0.37	0.35	0.3	0.2	0.35
5a	Double vitrage - CLR CLR	3	0.76	0.74	0.71	0.64	0.5	0.26	0.66
5b	Double vitrage - CLR CLR	6	0.7	0.67	0.64	0.58	0.45	0.23	0.6
5c	Double vitrage - BRZ CLR	3	0.62	0.6	0.57	0.51	0.39	0.2	0.53
5d	Double vitrage - BRZ CLR	6	0.49	0.46	0.44	0.39	0.31	0.17	0.41
5e	Double vitrage - GRN CLR	3	0.6	0.57	0.54	0.49	0.38	0.2	0.51
5f	Double vitrage - GRN CLR	6	0.49	0.46	0.44	0.39	0.31	0.17	0.41

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

5g	Double vitrage - GRY CLR	3	0.6	0.57	0.54	0.48	0.37	0.2	0.51
5h	Double vitrage - GRY CLR	6	0.47	0.44	0.42	0.37	0.29	0.16	0.39
5i	Double vitrage - BLUGRN CLR	6	0.5	0.47	0.45	0.4	0.32	0.17	0.43
5j	Double vitrage - HI -PGRN CLR	6	0.39	0.37	0.35	0.31	0.25	0.14	0.33
5k	Double vitrage réfléchissant SS on CLR 8%, CLR	6	0.13	0.12	0.12	0.11	0.1	0.06	0.11
5l	Double vitrage réfléchissant SS on CLR 14%, CLR	6	0.17	0.17	0.16	0.15	0.13	0.08	0.16
5m	Double vitrage réfléchissant SS on CLR 20%, CLR	6	0.22	0.21	0.21	0.19	0.16	0.09	0.2
5n	Double vitrage réfléchissant SS on CLR 14%, CLR	6	0.16	0.16	0.15	0.14	0.12	0.08	0.14
5o	Double vitrage réfléchissant SS on CLR 20%, CLR	6	0.21	0.2	0.19	0.18	0.15	0.09	0.18
5p	Double vitrage réfléchissant SS on CLR 30%, CLR	6	0.29	0.28	0.27	0.25	0.2	0.12	0.25
17a	Double vitrage - e = 0.2 LE CLR	3	0.65	0.54	0.61	0.56	0.43	0.23	0.57
17b	Double vitrage - e = 0.2 LE CLR	6	0.6	0.59	0.57	0.51	0.4	0.21	0.53
17c	Double vitrage - e = 0.2 CLR LE	3	0.7	0.68	0.65	0.59	0.46	0.24	0.61
17d	Double vitrage - e = 0.2 CLR LE	6	0.65	0.63	0.6	0.54	0.42	0.21	0.56
17e	Double vitrage - e = 0.2 BRZ LE	3	0.57	0.54	0.51	0.46	0.35	0.18	0.48
17f	Double vitrage - e = 0.2 BRZ LE	6	0.45	0.42	0.4	0.35	0.27	0.14	0.38
17g	Double vitrage - e = 0.2 GRN LE	3	0.55	0.52	0.5	0.44	0.34	0.17	0.46
17h	Double vitrage - e = 0.2 GRN LE	6	0.41	0.39	0.36	0.32	0.25	0.13	0.34
17i	Double vitrage - e = 0.2 GRY LE	3	0.54	0.51	0.49	0.44	0.33	0.17	0.46
17j	Double vitrage - e = 0.2 GRY LE	6	0.39	0.37	0.35	0.31	0.24	0.13	0.33
17k	Double vitrage - e = 0.2 BLUGRN LE	6	0.45	0.42	0.4	0.35	0.27	0.14	0.37
17l	Double vitrage - e = 0.2 HI-P GRN LE	6	0.34	0.31	0.3	0.26	0.2	0.11	0.28
21a	Double vitrage - e = 0.1 LE CLR	3	0.65	0.64	0.62	0.56	0.43	0.23	0.57
21b	Double vitrage - e = 0.1 LE CLR	6	0.6	0.59	0.57	0.51	0.4	0.21	0.53
21c	Double vitrage - e = 0.1 CLR LE	3	0.6	0.58	0.56	0.51	0.4	0.22	0.52
21d	Double vitrage - e = 0.1 CLR LE	6	0.56	0.55	0.52	0.48	0.38	0.2	0.49
21e	Double vitrage - e = 0.1 BRZ LE	3	0.48	0.46	0.44	0.4	0.31	0.17	0.42
21f	Double vitrage - e = 0.1 BRZ LE	6	0.39	0.37	0.35	0.31	0.24	0.13	0.33
21g	Double vitrage - e = 0.1 GRN LE	3	0.46	0.44	0.42	0.38	0.3	0.16	0.4
21h	Double vitrage - e = 0.1 GRN LE	6	0.36	0.33	0.31	0.28	0.22	0.12	0.3
21i	Double vitrage - e = 0.1 CLR LE	3	0.46	0.44	0.42	0.38	0.3	0.16	0.39
21j	Double vitrage - e = 0.1 GRY LE	6	0.34	0.32	0.3	0.27	0.21	0.12	0.28
21k	Double vitrage - e = 0.1 GRY LE	6	0.39	0.37	0.34	0.31	0.24	0.13	0.33

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

21l	Double vitrage - e = 0.1 HI-P GRN W/LE CLR	6	0.31	0.3	0.29	0.26	0.21	0.12	0.27
25a	Double vitrage - e = 0.05 - LE CLR	3	0.41	0.4	0.38	0.34	0.27	0.14	0.36
25b	Double vitrage - e = 0.05 - LE CLR	6	0.37	0.36	0.34	0.31	0.24	0.13	0.32
25c	Double vitrage - e = 0.05 - BRZ W/LE CLR	6	0.26	0.25	0.24	0.22	0.18	0.1	0.23
25d	Double vitrage - e = 0.05 - GRN W/LE CLR	6	0.31	0.3	0.28	0.26	0.21	0.12	0.27
25e	Double vitrage - e = 0.05 - GRY W/LE CLR	6	0.24	0.23	0.22	0.2	0.16	0.09	0.21
25f	Double vitrage - e = 0.05 - BLUE W/LE CLR	6	0.27	0.26	0.25	0.23	0.18	0.11	0.24
25g	Double vitrage - e = 0.05 - HI-P GRN W/LE CLR	6	0.27	0.26	0.25	0.23	0.18	0.11	0.23
29a	Triple vitrage CLR CLR CLR	3	0.68	0.65	0.62	0.54	0.39	0.18	0.57
29b	Triple vitrage CLR CLR CLR	6	0.61	0.58	0.55	0.48	0.35	0.16	0.51
29c	Triple vitrage HI-P GRN CLR CLR	6	0.32	0.29	0.27	0.24	0.18	0.1	0.26
32a	Triple vitrage - e = 0.2 LE CLR CLR	3	0.6	0.58	0.55	0.48	0.35	0.17	0.51
32b	Triple vitrage - e = 0.2 LE CLR CLR	6	0.53	0.5	0.47	0.41	0.29	0.14	0.44
32c	Triple vitrage - e = 0.2 CLR CLR LE	3	0.62	0.6	0.57	0.49	0.36	0.16	0.44
32d	Triple vitrage e = 0.2 CLR CLR LE	6	0.56	0.53	0.5	0.44	0.32	0.15	0.47
40a	Triple vitrage - e = 0.1 LE CLR LE	3	0.41	0.39	0.37	0.32	0.24	0.12	0.34
40b	Triple vitrage- e = 0.1 LE CLR LE	6	0.36	0.34	0.32	0.28	0.21	0.1	0.3
49	Triple vitrage - e = 0.05 LE LE CLR	3	0.27	0.25	0.24	0.21	0.16	0.08	0.23
50	Triple vitrage - e = 0.05 LE LE CLR	6	0.26	0.25	0.23	0.21	0.16	0.08	0.22

Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

Annexe 3: IAC rideaux

ID	Opaque ferme	Moyennement sombre ferme	Leger ferme	Fonce semi-ouvert	Moyen semi-ouvert	Leger semi-ouvert	Fonce ouvert	Moyen ouvert	Leger ouvert	Transparent
1a	0.71	0.59	0.45	0.75	0.65	0.56	0.8	0.71	0.64	0.73
1b	0.71	0.6	0.46	0.75	0.66	0.57	0.8	0.72	0.65	0.73
1c	0.72	0.62	0.5	0.76	0.68	0.6	0.81	0.73	0.68	0.75
1d	0.74	0.65	0.55	0.78	0.7	0.64	0.82	0.76	0.71	0.77
1e	0.72	0.63	0.51	0.76	0.68	0.61	0.82	0.74	0.68	0.75
1f	0.74	0.66	0.56	0.78	0.71	0.65	0.83	0.76	0.71	0.78
1g	0.72	0.63	0.51	0.76	0.68	0.61	0.82	0.74	0.68	0.75
1h	0.74	0.66	0.56	0.78	0.71	0.65	0.83	0.76	0.72	0.78
1i	0.74	0.65	0.55	0.78	0.7	0.64	0.82	0.76	0.71	0.77
5a	0.81	0.7	0.57	0.84	0.75	0.65	0.88	0.79	0.72	0.78
5b	0.82	0.72	0.6	0.85	0.76	0.68	0.88	0.8	0.74	0.8
5c	0.82	0.72	0.6	0.85	0.76	0.67	0.88	0.8	0.73	0.8
5d	0.83	0.75	0.64	0.86	0.79	0.71	0.89	0.82	0.77	0.82
5e	0.82	0.72	0.6	0.85	0.76	0.68	0.88	0.8	0.74	0.8
5f	0.83	0.75	0.65	0.86	0.79	0.72	0.89	0.82	0.77	0.82
5g	0.82	0.72	0.6	0.85	0.76	0.68	0.88	0.8	0.74	0.8
5h	0.84	0.75	0.65	0.86	0.79	0.72	0.89	0.82	0.77	0.82
5i	0.83	0.75	0.64	0.86	0.79	0.72	0.89	0.82	0.77	0.82
17a	0.85	0.74	0.6	0.88	0.78	0.68	0.9	0.81	0.74	0.8
17b	0.86	0.76	0.64	0.89	0.8	0.71	0.91	0.83	0.76	0.82
17c	0.86	0.76	0.64	0.88	0.8	0.71	0.91	0.83	0.76	0.82
17d	0.87	0.79	0.68	0.89	0.82	0.74	0.91	0.85	0.79	0.84
17e	0.86	0.77	0.66	0.89	0.81	0.72	0.91	0.84	0.77	0.83
17f	0.88	0.8	0.71	0.9	0.83	0.76	0.92	0.86	0.81	0.85
17g	0.87	0.78	0.66	0.89	0.81	0.73	0.91	0.84	0.78	0.83
17h	0.88	0.8	0.71	0.9	0.83	0.77	0.92	0.86	0.81	0.85
17i	0.87	0.78	0.66	0.89	0.81	0.73	0.91	0.84	0.78	0.83
17j	0.88	0.8	0.71	0.9	0.83	0.77	0.92	0.86	0.81	0.85
17k	0.88	0.8	0.71	0.9	0.83	0.76	0.92	0.86	0.81	0.85
21a	0.87	0.77	0.64	0.89	0.8	0.71	0.92	0.83	0.76	0.82
21b	0.88	0.79	0.67	0.9	0.82	0.74	0.92	0.85	0.78	0.83
21c	0.88	0.79	0.68	0.9	0.82	0.74	0.92	0.85	0.79	0.84
21d	0.88	0.81	0.7	0.9	0.83	0.76	0.92	0.86	0.81	0.85
21e	0.88	0.8	0.69	0.9	0.83	0.75	0.92	0.86	0.8	0.85
21f	0.89	0.82	0.73	0.91	0.85	0.78	0.93	0.87	0.82	0.86
21g	0.88	0.8	0.7	0.9	0.83	0.76	0.92	0.86	0.8	0.85
21h	0.89	0.82	0.73	0.91	0.85	0.78	0.93	0.87	0.82	0.86
21i	0.88	0.8	0.7	0.9	0.83	0.76	0.92	0.86	0.8	0.85
21j	0.89	0.82	0.73	0.91	0.85	0.78	0.93	0.87	0.82	0.86
21k	0.89	0.82	0.73	0.91	0.85	0.78	0.93	0.87	0.82	0.86
25a	0.88	0.8	0.68	0.91	0.83	0.75	0.93	0.86	0.79	0.84
25b	0.89	0.82	0.72	0.91	0.85	0.78	0.93	0.87	0.82	0.86
25c	0.9	0.85	0.76	0.92	0.87	0.81	0.94	0.89	0.85	0.88
26d	0.9	0.84	0.76	0.92	0.86	0.81	0.94	0.89	0.84	0.88
25e	0.91	0.85	0.77	0.92	0.87	0.82	0.94	0.89	0.85	0.89
25f	0.9	0.84	0.76	0.92	0.86	0.81	0.94	0.89	0.84	0.88
29a	0.86	0.77	0.65	0.89	0.81	0.72	0.91	0.84	0.77	0.83
29b	0.87	0.8	0.69	0.9	0.83	0.76	0.92	0.85	0.8	0.85
32a	0.89	0.8	0.69	0.91	0.83	0.75	0.93	0.86	0.8	0.84
32b	0.9	0.83	0.73	0.92	0.85	0.79	0.93	0.87	0.83	0.87
32c	0.91	0.82	0.69	0.93	0.84	0.75	0.95	0.87	0.8	0.85
32d	0.92	0.84	0.73	0.94	0.86	0.79	0.95	0.88	0.82	0.87
40a	0.93	0.84	0.73	0.94	0.86	0.78	0.96	0.88	0.82	0.86
40b	0.94	0.87	0.77	0.95	0.89	0.82	0.96	0.9	0.85	0.89
40c	0.9	0.82	0.71	0.92	0.85	0.77	0.94	0.87	0.81	0.86
40d	0.91	0.85	0.76	0.93	0.87	0.8	0.94	0.89	0.84	0.88

Annexe 4: IAC stores

ID	Translucide clair	Blanc opaque	Sombre opaque	Gris clair translucide	Gris sombre translucide	Blanc reflechissant opaque	Blanc reflechissant translucide
1a	0.44	0.34	0.64	0.61	0.71	0.3	0.23
1b	0.45	0.35	0.65	0.62	0.72	0.32	0.25
1c	0.49	0.4	0.67	0.64	0.73	0.38	0.31
1d	0.55	0.47	0.69	0.68	0.76	0.45	0.39
1e	0.51	0.42	0.67	0.65	0.74	0.39	0.33
1f	0.56	0.48	0.7	0.68	0.76	0.46	0.4
1g	0.51	0.42	0.67	0.65	0.74	0.39	0.33
1h	0.57	0.49	0.7	0.69	0.76	0.47	0.41
1i	0.55	0.47	0.69	0.68	0.76	0.45	0.39
5a	0.55	0.48	0.76	0.72	0.81	0.43	0.37
5b	0.58	0.52	0.77	0.74	0.82	0.47	0.42
5c	0.58	0.51	0.77	0.74	0.82	0.46	0.41
5d	0.63	0.57	0.8	0.777	0.84	0.54	0.49
5e	0.58	0.52	0.78	0.74	0.82	0.47	0.42
5f	0.64	0.58	0.8	0.77	0.84	0.55	0.5
5g	0.58	0.52	0.78	0.74	0.82	0.47	0.42
5h	0.64	0.58	0.8	0.77	0.84	0.55	0.5
5i	0.63	0.57	0.8	0.77	0.84	0.54	0.49
17a	0.58	0.52	0.8	0.76	0.84	0.46	0.41
17b	0.62	0.56	0.82	0.78	0.85	0.52	0.47
17c	0.62	0.57	0.82	0.78	0.85	0.52	0.47
17d	0.67	0.61	0.83	0.8	0.86	0.58	0.53
17e	0.64	0.59	0.82	0.78	0.86	0.54	0.49
17f	0.69	0.65	0.84	0.81	0.87	0.61	0.57
17g	0.64	0.59	0.82	0.79	0.86	0.55	0.5
17h	0.7	0.65	0.84	0.82	0.88	0.62	0.58
17i	0.64	0.59	0.82	0.79	0.86	0.55	0.5
17j	0.7	0.65	0.84	0.82	0.88	0.62	0.58
17k	0.7	0.65	0.84	0.81	0.87	0.61	0.57
21a	0.61	0.55	0.82	0.78	0.86	0.5	0.44
21b	0.65	0.6	0.84	0.8	0.87	0.55	0.5
21c	0.66	0.61	0.84	0.8	0.87	0.56	0.51
21d	0.69	0.64	0.85	0.82	0.88	0.6	0.56
21e	0.68	0.63	0.85	0.81	0.88	0.58	0.54
21f	0.72	0.67	0.86	0.83	0.89	0.63	0.6
21g	0.68	0.63	0.85	0.81	0.88	0.59	0.54
21h	0.72	0.67	0.86	0.83	0.89	0.64	0.6
21i	0.68	0.63	0.85	0.81	0.88	0.59	0.54
21j	0.72	0.68	0.86	0.83	0.89	0.64	0.6
21k	0.72	0.67	0.86	0.83	0.89	0.64	0.6
25a	0.66	0.6	0.85	0.81	0.88	0.55	0.5
25b	0.71	0.66	0.86	0.83	0.89	0.61	0.57
25c	0.75	0.71	0.88	0.86	0.9	0.68	0.64
26d	0.75	0.7	0.88	0.85	0.9	0.67	0.62
25e	0.77	0.72	0.88	0.86	0.91	0.69	0.65
25f	0.74	0.7	0.87	0.85	0.9	0.66	0.62
29a	0.64	0.58	0.82	0.78	0.86	0.53	0.48
29b	0.68	0.63	0.84	0.81	0.87	0.59	0.55
32a	0.67	0.62	0.85	0.81	0.88	0.57	0.53
32b	0.72	0.68	0.87	0.84	0.89	0.64	0.61
32c	0.67	0.62	0.87	0.82	0.9	0.57	0.52
32d	0.71	0.67	0.89	0.85	0.91	0.63	0.59
40a	0.7	0.67	0.89	0.85	0.91	0.61	0.58
40b	0.75	0.72	0.91	0.87	0.92	0.68	0.65
40c	0.69	0.65	0.87	0.83	0.89	0.6	0.56
40d	0.74	0.71	0.88	0.85	0.91	0.67	0.64

Annexe 5: Fenêtre modale du bouton "Fenêtres/Portes"

1. Cliquez d'abord sur ce bouton pour faire apparaître les **façades ensoleillées** ou non

2. Affichage de l'orientation de la façade ensoleillée après avoir cliqué sur le bouton « Performance énergétique de la fenêtre »

3. Cliquez sur ce bouton après avoir rempli les champs de saisie du cadre « Ensoleillées » pour afficher le résultat dans « Q fenêtre(s) ensoleillée(s) (W) » ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet

Afficher l'Etat de la paroi

Performance énergétique de la fenêtre

•FENETRES/VITRAGE

1• Ensoleillée(s)

Paroi ensoleillée

Atténuation

Type de vitrage

Epaisseur

Inclinaison de la fenêtre

Surface du vitrage

IAC

SHGC(θ)

SHGCd

DNI*(W/m²)

DHI* (W/m²)

Ir (W/m²)

Q fenêtre(s) ensoleillée(s) (W)

2• Non ensoleillée(s)

Façade	Type de vitre	Châssis	U (W/m².°C)	Surface (m²)	Q fenêtres (W)

Affichage du total des charges de toutes les fenêtres « Non ensoleillées » ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet

Q Totale (W)

5. Affichage des résultats des fenêtres de chaque façades après avoir saisi les informations « Type de vitre », «Châssis » et « Surface m² », cliquez sur la touche « Entrée » de votre clavier dans le champs de saisie « Surface m² »

1. Sélectionnez dans les listes déroulantes la couleur et la rugosité de la porte

2. Affichage de l'orientation de la façade ensoleillée après avoir cliqué sur le bouton « Performance énergétique de la fenêtre »

3. Selon l'orientation, sélectionnez respectivement dans les listes déroulantes le model de porte (Type de porte) et indiquez si le mur est « ensoleillé » ou non

4. Affichage des résultats des fenêtres de chaque façades après avoir saisi les informations « Type de mur », «Type de mur » et « Surface m² », cliquez sur la touche « Entrée » de votre clavier dans le champs de saisie « Surface m² »

•STRUCTURE

•Porte ensoleillée

Couleur

Rugosité

•PORTES

Mur	Etat du mur	Type de porte	Type de mur	Surface (m²)	Q portes (W)
Nord					
Nord-Est					
Nord-Ouest					
Est					
Sud-Est					
Sud					
Sud-Ouest					
Ouest					

Q Totale (W)

Affichage du total des charges de toutes les portes ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet

Annexe 6: Fenêtre modale du bouton "Occupants/Infiltration d'air"

The image shows a software interface for calculating thermal balance, divided into two main sections: 'Infiltration d'air' and 'Occupants'. The 'Infiltration d'air' section includes dropdown menus for 'Type de bâtiment' and 'Température intérieure (°C)' (set to 21), and input fields for 'Humidité relative intérieure (%)' and 'V (m³)'. Below these are fields for 'ACH', 'Q Latent (W)', 'Q Sensible (W)', and 'Q Infiltration (W)', followed by a 'Calculer' button. The 'Occupants' section features a table with columns 'Activité', 'T(°C)', and 'Quantité'. The first row shows 'Assis au repos', '21', and '1'. Below the table are fields for 'Q latent(W)', 'Q sensible(W)', and 'Q occupants(W)', followed by another 'Calculer' button. Numbered instructions in callout boxes guide the user through the process.

1. Sélectionnez dans les listes déroulantes le « **Type de bâtiments** » et la « **Température intérieur** » de conditionnement

2. Saisissez l'« **Humidité relative** » ainsi que le « **volume** » du local à conditionné dans les champs de saisie

1. Sélectionnez dans les listes déroulantes le type d'activité la température intérieur du local à climatiser et saisissez la quantité de personne susceptible d'être dans ce local.

2. Après avoir sélectionné et saisi les inputs, cliquez sur le bouton « **Calculer** » pour afficher les résultats dans les champs de saisie « **Q latent (W)** », « **Q Sensible (W)** » et « **Q Occupants** » ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet.

3. Après avoir sélectionné et saisi les inputs, cliquez sur le bouton « **Calculer** » pour afficher les résultats dans les champs de saisie « **ACH** », « **Q latent (W)** », « **Q Sensible (W)** » et « **Q Infiltration** » ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet.

Activité	T(°C)	Quantité
Assis au repos	21	1

Q latent(W)	Q sensible(W)	Q occupants(W)

Annexe 7: Fenêtre modale du bouton "Plafond/Murs/Plancher"

Sélectionnez dans les listes déroulantes le **Type de plancher, et l'**Etat du plancher**, puis saisissez la **surface du plancher**. Après avoir saisi la surface du plancher, Appuyez sur la touche **Entrée** de votre clavier pour afficher le résultat dans le champ de saisie **Q plancher (W)** ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet.**

Sélectionnez dans les listes déroulantes la **couleur de la toiture, la **rugosité de la toiture**, le **type de plafond** et les **matériaux** constituant le plafond. Ensuite, saisissez la **surface** et cliquez sur les boutons « **Calculer** » pour afficher les résultats dans **Q Toiture (W)** et **Q plafond (W)**, ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet.**

1. Sélectionnez dans les listes déroulantes la **couleur du mur et la **rugosité du mur**, puis cliquez sur le bouton « **Afficher l'Etat de la paroi** » pour faire apparaître les **façades ensoleillées ou non** dans la colonne « **Etat du mur** » du tableau contenu dans le cadre « **Détails des murs** ».**

2. Dans le cadre « **Couches des parois », sélectionnez le type de matériau de chaque couche (Couche 1, Couche 2, etc.) dans les listes déroulantes en fonction du nombre de couches de mur pour une orientation donnée. Ensuite, dans le cadre « **Détails des murs** », sélectionnez dans le tableau le « **Type de mur** » et saisissez la **surface** en fonction de l'orientation du mur, puis appuyez sur la touche « **Entrée** » de votre clavier pour afficher les résultats dans la colonne « **Q murs (W)** ».**

Affichage du total des charges de tous les portes ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet

Plafond / Murs/ Plancher

•STRUCTURE

•PLANCHER

Type de plancher

Etat du plancher

Surface (m²)

Q plancher (W)

•TOITURE/PLAFOND

Couleur/Toiture

Toiture

Rugosité de la toiture

Type de plafond

Matériaux/plafond

Surface (m²)

Q Toiture (W)

Q plafond (W)

Calculer

Calculer

•MURS

•Mur ensoleillé

Couleur du mur

Rugosité du mur

Afficher l'Etat de la paroi

•Couches des parois

	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	Couche 5	Couche 6
Nord	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nord-Est	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nord-Ouest	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Est	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sud-Est	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sud	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sud-Ouest	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Ouest	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

• Détails des murs

Mur	Etat du mur	Type de mur	Surface (m ²)	Q murs (W)
Nord	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nord-Est	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nord-Ouest	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Est	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sud-Est	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sud	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sud-Ouest	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Ouest	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Q Total (W)

Annexe 8: Fenêtre modale du bouton "Equipements électriques"

Choisissez le type d'éclairage dans la liste déroulante, puis saisissez la quantité, la puissance nominale et le facteur de puissance. Ensuite cliquez sur le bouton « **Ajouter Lampe** » pour afficher le selon le type de lampe sélectionné, la valeur de Q fluorescent (W) ou Q incandescent (W) ainsi que dans le champ de saisie de l'onglet.

Choisissez le **Type de Moteur** dans la liste déroulante, puis saisissez la quantité, la puissance nominale, le facteur d'utilisation et le rendement. Après avoir saisi ces informations, cliquez sur « **Ajouter** » pour afficher le résultat dans les champs de saisies prévus à cet effet ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet. Pour modifier une entrée, cliquez sur « **Modifier Moteur** »

1. Dans la section « **Equipements divers** », cliquez sur le bouton « **Appareils divers** », cela ouvrira la fenêtre ci-dessous

2. En fonction de la puissance des équipements souhaitée, saisissez les quantités dans les champs correspondants, puis cliquez sur le bouton « **Calculer** » pour afficher le résultat dans le champ de saisie **Q Latent (W)**, **Q Sensible (W)** ainsi que dans le champ de saisie correspondant dans l'onglet.

Équipements Électriques

Eclairage

Type
Quantité
Pu (W)
cos
Q fluorescent (W)
Q incandescent (W)
Ajouter Lampe

Equipements motorisés

Moteurs
Type de Moteur:
Puissance:
ku
rho
Quantité
Ajouter Moteur
Modifier Moteur

Résultats
Moteur Intérieur/Intérieur :
Moteur Extérieur/Intérieur :
Moteur Extérieur/Extérieur :
Total :

Equipements divers

Q latente (W):
Q sensible (W):
Q Equipement(s) (W):

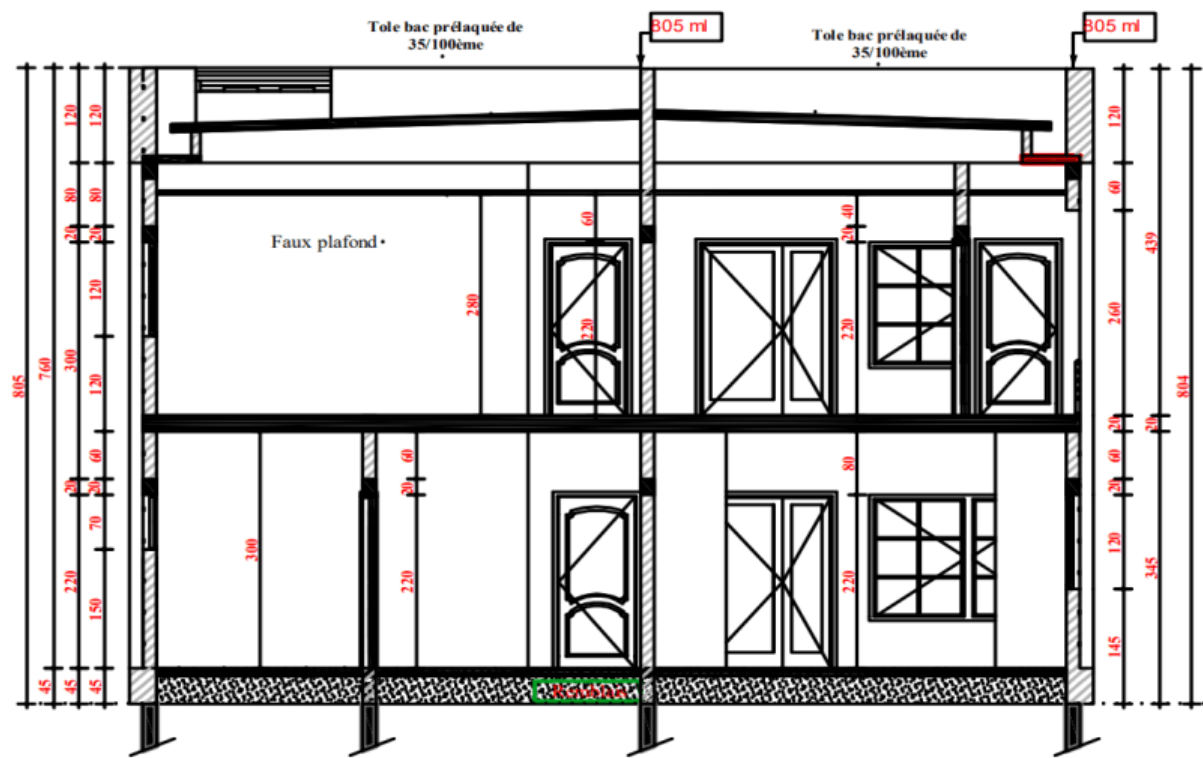
Appareils divers

Sélection des Équipements

Appareils divers	Puissance nominale (W)	Quantité
Friteuse 5L d'huile	2575	
Friteuse 10L d'huile	6954	
Chauffe pains	435	
Moules à gauffrettes 1	2192	
Moules à gauffrettes 2	719	
Percolateur 2L	993	
Chauffe eau	146	

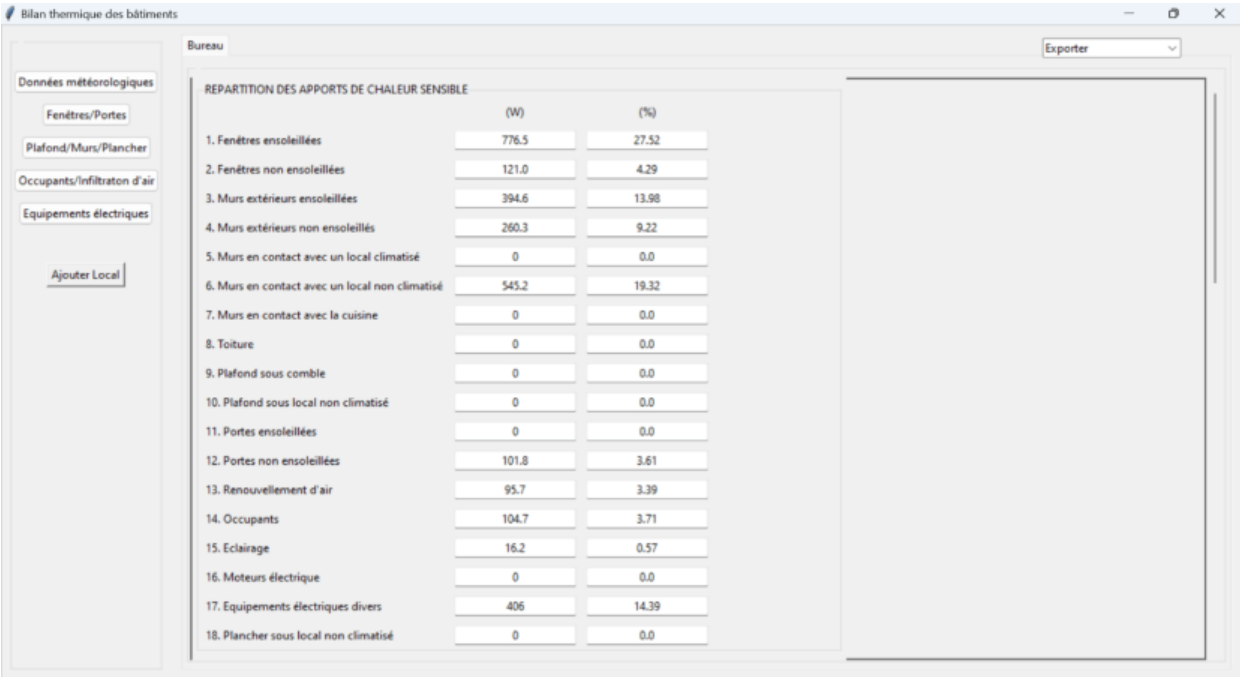
Calculer

Annexe 9: Coupe B - B



N° 9 : COUPE B-B

Annexe 10: Résultats détaillés du logiciel actuel



Conception d'un logiciel de calcul de bilan thermique des bâtiments en Afrique tropicale

REPARTITION DES APPORTS		
1. Chaleur sensible totale	2822.0	W
2. Chaleur latente totale	295.29	W
3. Facteur de chaleur sensible	0.91	
4. Puissance frigorifique	3.12	kW
	10636.65	BTU
5. Puissance du climatiseur	1.41	(Cv)
6. Puissance de déshumidification	0.43	(L/h)

Annexe 11: Résultat détaillés du logiciel HAP 4.90

Air System Design Load Summary for Split system		
Project Name: Mémoire_AXE		06/21/2024
Prepared by: 2iE		11:56

	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Aug 1400			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 40,7 °C / 31,4 °C			HEATING OA DB / WB 16,2 °C / 13,7 °C		
ZONE LOADS	Details	Sensible (W)	Latent (W)	Details	Sensible (W)	Latent (W)
Window & Skylight Solar Loads	3 m²	166	-	3 m²	-	-
Wall Transmission	6 m²	368	-	6 m²	117	-
Roof Transmission	11 m²	125	-	11 m²	40	-
Window Transmission	3 m²	178	-	3 m²	60	-
Skylight Transmission	0 m²	0	-	0 m²	0	-
Door Loads	0 m²	0	-	0 m²	0	-
Floor Transmission	11 m²	0	-	11 m²	0	-
Partitions	26 m²	1124	-	26 m²	769	-
Ceiling	0 m²	0	-	0 m²	0	-
Overhead Lighting	0 W	0	-	0	0	-
Task Lighting	18 W	16	-	0	0	-
Electric Equipment	673 W	611	-	0	0	-
People	3	160	180	0	0	0
Infiltration	-	92	228	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	10% / 5%	284	20	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	3125	428	-	986	0
Zone Conditioning	-	3184	428	-	0	0
Plenum Wall Load	0%	0	-	0	0	-
Plenum Roof Load	0%	0	-	0	0	-
Plenum Lighting Load	0%	0	-	0	0	-
Return Fan Load	330 L/s	0	-	330 L/s	0	-
Ventilation Load	11 L/s	213	524	11 L/s	-23	-119
Supply Fan Load	330 L/s	31	-	330 L/s	-31	-
Space Fan Coil Fans	-	0	-	-	0	-
Duct Heat Gain / Loss	5%	156	-	5%	49	-
>> Total System Loads	-	3584	953	-	-3	-119
Central Cooling Coil	-	4190	953	-	-3592	-119
Central Heating Coil	-	-606	-	-	3599	-
Humidification Load	-	-	0	-	-	0
>> Total Conditioning	-	3584	953	-	7	-119
Key:	Positive values are clg loads Negative values are htg loads			Positive values are htg loads Negative values are clg loads		