

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES, TECHNOLOGIES ET
GEOSCIENCES (CRFD/STG)

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION PHYSIQUE ET
APPLICATION

E-mail : enquiries@uylecoledoc.com

Site web : www.uylresarchstg.cm



Faculté des Sciences

REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCES, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES
(CRFD/STG)

DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR
PHYSICS AND APPLICATIONS

E-mail : enquiries@uylecoledoc.com

Site web : www.uylresarchstg.cm

LABORATOIRE D'ENERGIE, DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES
ENERGY LABORATORY, ELECTRICALS AND ELECTRONICS SYSTEMS

ETUDE EXERGETIQUE D'UNE AMBIANCE CHAUDE EN CLIMAT TROPICAL

Mémoire corrigé et soutenu en vue de l'obtention du diplôme de Master of Science en Physique

Spécialité : Energie des Systèmes Électriques et Électron

Option : Energie et Environnement

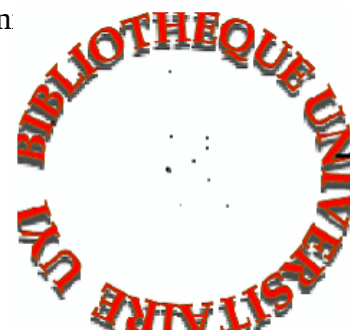
Par :

BATOUANEN BEKOAKEN

Matricule : 14Y058

Licencié en Physique

Composition du jury



SIMO ELIE

Professeur, UYI

Président

NGOHE-EKAM Paul Salomon

Maitre de Conférences, UY1

Rapporteur

NJANDJOCK NOUCK Philippe

Professeur, UYI

Examineur

Année 2024



ETUDE EXEGETIQUE D'UNE AMBIANCE CHAUDE EN CLIMAT TROPICAL.



*Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du **Diplôme de MASTER II***

Présenté par :

BATOUANEN BEKOAKEN

Matricule : 14Y058

Licencié en physique

Sous la Direction:

Paul Salomon NGOHE-EKAM, Maître de Conférence.

Université de Yaoundé 1 / Polytechnique de Yaoundé

Laboratoire d'Energie et Environnement

Laboratory for simulation and molecular physics

Année Académique : 2023-2024

[illegible]

Remerciements

En achevant ce mémoire, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers toutes les personnes qui ont été présentes à mes côtés durant ce parcours passionnant. Leur soutien, leurs encouragements et leurs précieux conseils ont été indispensables à la réalisation de ce travail de recherche. À travers ces quelques lignes de remerciements, je tiens à leur témoigner toute ma gratitude et ma reconnaissance sincère. Je pense ainsi particulièrement :

- ✱ Au **Dieu Tout-Puissant**, à qui je rends grâce pour le souffle de vie, l'intelligence, la santé, la force et le courage qu'il de m'accorder au quotidien ;
- ✱ Au Professeur **Jean Marie Bienvenue NDJAKA** Chef de département de Physique ;
- ✱ Au Professeur **Elie SIMO**, Chef du laboratoire d'Energie et Environnement pour avoir permis que je mène à bien mes recherches dans le laboratoire ;
- ✱ Au Professeur **Paul Salomon NGOHE-EKAM**, mon Directeur de mémoire, pour avoir accepté de diriger ce travail, de m'avoir guidé et soutenu avec patience et indulgence, pour ces lectures enrichissantes et pour les précieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer ;
- ✱ À tous les **Membres du JURY**, Pour avoir accepté d'examiner ce travail ;
- ✱ À tous les enseignants du département de physique de l'Université de Yaoundé, pour la qualité de leurs enseignements dispensés tout au long de cette formation ;
- ✱ A **TIENDJOU TIOMBOU Michael**, pour son suivi permanent pendant la durée de ce travail, son soutien et ses multiples conseils tout au long de ce travail
- ✱ À ma famille pour le soutien morale et financier qu'ils ont eu à prodiguer pour ma réussite. Je pense ainsi particulièrement à ma mère **Suzanne ONGBESSAK**, mes frères **BATAM**, **KENDECK**, **Grâce ONGBESSAK** et **BATOUANEN** ;
- ✱ À ma petite amie **Laetitia Leslie NGUEYA** pour son soutien moral, ses conseils et sa présence tout au long de cette formation ;
- ✱ À tous mes camarades de promotion pour l'esprit d'équipe et aux experts constitués de **Dorcas NTCHATCHOU**, **Paul Jordan AFANE** et **Michael NDASSI** en particulier ;
- ✱ À la famille **ZARD** de la 56^e promotion ENS Yaoundé ;
- ✱ **Divine FOFACK**, **Ariane Murielle NGNIHEU** et **Alain Germain NDJAPOUM** pour leurs contributions dans la rédaction de ce travail ;

Table des matières

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
TABLE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	viii
RÉSUMÉ.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE	4
Introduction	4
1. Généralités sur l'énergie.....	4
1.1. Définition	4
1.2. Les sources d'énergie	6
1.3. Les défis énergétiques	7
2. Les lois de la thermodynamique.....	7
2.1. Premier principe de la thermodynamique	7
2.2. Deuxième principe de la thermodynamique.....	8
2.3. Troisième principe de la thermodynamique.....	9
3. L'analyse exergetique	9
3.1. Généralités.....	9
3.2. Définition	10
3.3. Les différentes formes d'énergie	11
3.3.1. L'exergie associée à la matière	11
3.3.1.1. Exergie physique	13
3.3.1.2. Exergie chimique	13
3.3.1.3. Exergie de mélange	14
3.3.1.4. Exergie cinétique	15
3.3.1.5. Exergie potentielle.....	16
3.3.2. Exergie associée à un travail mécanique	16
3.3.3. Exergie associée à une quantité de chaleur	17

3.4.	Etat de référence	18
3.4.1.	Définition	18
3.4.2.	Choix de la température de référence.....	19
3.5.	Calcul de l'exergie	20
3.6.	Métrie pour l'analyse exergétique	21
Conclusion.....		24
CHAPITRE 2 : MODÉLISATION.....		25
Introduction		25
1.	Modèle physique	25
1.1.	Caractéristiques du bâtiment	25
1.2.	Propriétés des matériaux	27
1.3.	Paramètre environnementaux	28
2.	Modèle mathématiques	29
2.1.	Analyse exergétique pour le sous-système « mur plat »	30
2.2.	Analyse exergétique pour le sous-système « fenêtre ».....	33
2.3.	Analyse exergétique pour le sous-système « sol »	35
2.3.1.	La température de la surface supérieure du sol est plus élevée.....	35
2.3.2.	La température de la surface inférieure du sol est plus élevée.....	37
2.4.	Analyse exergétique du système de Climatisation	38
3.	Matériels et méthode	41
3.1.	Matériels.....	41
3.2.	Méthode.....	42
Conclusion.....		43
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		44
Introduction		44
1.	Résultats	44
1.1.	Donnés météorologiques	44
1.2.	Profil de température	46
1.3.	Choix de la température de référence.....	47
1.4.	Analyse exegétique	50
1.4.1.	Analyse exergie mensuelle pour chaque sous-système.....	50
1.4.1.1.	Calcul pour le mois de février 2020	50
1.4.2.	Calcul pour le mois d'août 2020	55
1.4.3.	Destruction exertique globale.....	60

2. Discussion	63
Conclusion.....	67
CONCLUSION GÉNÉRALE	68
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71

Table des figures

Figure 1-1 : Les composantes de l'énergie. [11]	10
Figure 1-2 : Schéma explicatif donnant l'exergie d'un flux de matière [13]	11
Figure 1-3 : Modification de la composition d'un flux de matière au cours du passage de l'état actuel vers l'état de référence[13]modifiée pour mettre en évidence les états de la matière..	12
Figure 1-4 : Flux d'énergie et d'exergie entrant dans un système de conversion d'énergie.....	21
Figure 2-1 : Modélisation physique du bâtiment.	26
Figure 2-2 : Modélisation physique du bâtiment, vue de gauche.	27
Figure 2-3 : Carte de classification climatique de Köppen-Geiger pour le Cameroun (1980-2016) [28]	29
Figure 2-4 : Section transversale du mur en parpaing.....	31
Figure 2-5 : Section transversale de la fenêtre	33
Figure 2-6 : Analyse du sol pour $T1 > T2$	35
Figure 2-7 : Analyse du sol pour $T1 < T2$	37
Figure 2-8 : Schéma de principe du bâtiment en tant que système ouvert.	39
Figure 3-1 : Variation de l'irradiance verticale et horizontale pour février 2020.....	45
Figure 3-2 : Variation de l'irradiance verticale et horizontale pour Août 2020	45
Figure 3-3 : Profil de température pour le mois de Février 2020.....	46
Figure 3-4 : Profil de température pour le mois d'août 2020.....	46
Figure 3-5 : Destruction exergetique du mois de Février 2020 pour tous les choix de température	49
Figure 3-6 : Destruction exergetique du mois d'Août 2020 pour tous les choix de température .	50
Figure 3-7: Destruction exergetique journalière (en J) pour chaque sous-système pour Février 2024.....	55
Figure 3-8 : Destruction exergetique journalière (en J) pour chaque sous-système pour Août 2024.....	60
Figure 3-9 : Destruction exergetique globale en joule pour le mois de Février 2020.....	61
Figure 3-10 : Destruction exergetique globale en joule pour le mois d'Août 2020	62
Figure 3-11 : Destruction exergetique totale mensuelle.....	62

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Caractéristiques des matériaux utilisés	41
Tableau 2-2 : Paramètres météorologiques pour les mois de février et août 2020.	42
Tableau 3-1 : Paramètre thermodynamique des surface interne et externe des différentes parois pour le mois le plus chaud (Février) et le mois le plus froid (Août) de l'année 2020.	47
Tableau 3-2 : Valeurs journalières de la destruction exergetique en Mégajoule (MJ) pour chaque choix de température de référence	48
Tableau 3-3 : Exergie détruite en joule (J) pour chaque sous système pour le mois de Février 2020.....	54
Tableau 3-4 :Exergie détruite en Mégajoule(MJ) pour chaque sous système pour le mois de Août 2020.....	59
Tableau 3-5 : Destruction exergetique mensuelle pour chaque sous-système	61

Liste de abréviations

- ✱ **GIEC** : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ;
- ✱ **TLV** : Trouble Less Valve ;
- ✱ **NIST** : National Institute of Standard and Technology ;
- ✱ **SSD** : Solide State Drive
- ✱ **RAM** : Random Acces Memory
- ✱ **MS** : Microsoft

Résumé

L'efficacité énergétique représente un défi majeur à l'échelle mondiale, faisant de la recherche de solutions durables une priorité pour combler le déficit d'accès à l'électricité tout en minimisant les pertes énergétiques au sein des infrastructures existantes. Dans ce contexte, notre étude se concentre sur l'analyse exergetique d'un bâtiment en milieu tropical situé dans la ville de Yaoundé et plus précisément dans le quartier Melen. L'objectif est d'évaluer l'efficacité énergétique du bâtiment en examinant les flux d'exergie afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie. Nous avons développé un modèle physique divisé en plusieurs sous-systèmes : sous-système « climatisation », sous-système « sol », sous-système « mur plat » et sous-système « fenêtre ». Le modèle mathématique utilisé dérivé de cette approche repose sur le transfert thermique à travers chaque composant, permettant ainsi de déterminer la destruction exergetique journalière. Cette méthodologie nous a permis d'évaluer la destruction exergetique de chaque sous-système durant les mois les plus chauds (février) et les plus froids (août) de l'année 2020. Une étude exergetique a été menée pour déterminer la température de référence, en comparant trois choix : la température de confort (24°C), la température maximale mensuelle et la température moyenne journalière. Les résultats indiquent que la température moyenne journalière est le choix optimal pour une analyse en milieu tropical. L'analyse exergetique du bâtiment a révélé que le système de climatisation est responsable de pertes exergetiques significatives. En outre, il a été démontré que le béton utilisé pour les murs et le sol entraîne des pertes énergétiques plus importantes que le verre à double vitrage utilisé pour les fenêtres et les portes d'où la nécessité d'utiliser des matériaux comme les matériaux à changement de phase ou les isolants avancés, pour améliorer l'efficacité exergetique des enveloppes du bâtiment. Enfin, une évaluation saisonnière montre que le bâtiment détruit davantage d'énergie lorsque les températures sont basses (août 2020). Ces résultats soulignent l'importance du choix des matériaux et des équipements dans la conception des bâtiments pour améliorer leur efficacité énergétique.

Mots clés : *Exergie ; Destruction exergetique ; Efficacité énergétique ; Température de référence.*

Abstract

Energy efficiency represents a major global challenge, making the search for sustainable solutions a priority to address the electricity access deficit while minimizing energy losses in existing infrastructures. In this context, our study focuses on the exergy analysis of a building in a tropical environment, specifically located in the Melen neighborhood of Yaoundé. The objective is to evaluate the building's energy efficiency by examining exergy flows to optimize energy use. We developed a physical model divided into several subsystems: the "air conditioning" subsystem, the "ground" subsystem, the "flat wall" subsystem, and the "window" subsystem. The mathematical model derived from this approach is based on thermal transfer through each component, thus determining the daily exergy destruction. This methodology allowed us to evaluate the exergy destruction of each subsystem during the hottest months (February) and the coldest months (August) of the year 2020. An exergy study was conducted to determine the reference temperature, comparing three choices: the comfort temperature (24°C), the monthly maximum temperature, and the daily average temperature. The results indicate that the daily average temperature is the optimal choice for analysis in a tropical environment. The exergy analysis of the building revealed that the air conditioning system is responsible for significant exergy losses. Additionally, it was demonstrated that the concrete used for walls and the ground leads to greater energy losses than the double-glazed glass used for windows and doors. This underscores the need to use materials such as phase change materials or advanced insulations to improve the exergy efficiency of building envelopes. Finally, a seasonal evaluation shows that the building destroys more energy when temperatures are low (August 2020). These results highlight the importance of material and equipment selection in building design to enhance energy efficiency.

Keywords: Exergy; Exergy destruction; Energy efficiency; Reference temperature.

Introduction générale

Aujourd'hui, 50 % de la population mondiale vit dans des villes et passe près de 90 % de son temps à l'intérieur [1]. Les bâtiments deviennent de véritables machines thermiques dont l'objectif est le maintien des conditions climatiques favorables à l'être humain. Le bâtiment est donc l'une des structures les plus énergivores, étant non seulement à l'origine de plus de 50 % de la demande mondiale en électricité, mais également de 32 % de la demande en énergie [2]. Selon le dernier rapport du GIEC, le secteur serait responsable de l'émission de 9,18 GtCO₂ de gaz à effet de serre [2].

Les problèmes environnementaux liés à une utilisation accrue de l'énergie, tels que le réchauffement climatique, ont suscité une préoccupation croissante, mettant en évidence à la fois l'importance de toutes sortes de mesures dites « d'économie d'énergie » et la nécessité d'une efficacité accrue dans toutes les formes d'utilisation de l'énergie. En général, la consommation d'énergie peut être examinée à travers quatre principaux secteurs : l'industrie, le bâtiment (résidentiel), les transports et l'agriculture.

Cependant, l'Afrique connaît un processus d'urbanisation rapide qui devrait se prolonger durant les prochaines décennies, alimenté par une croissance élevée [3]. Sa population devrait atteindre 2,4 milliards d'ici 2050, avec plus de 55 % vivant en zones urbaines, représentant ainsi plus d'un quart des 100 villes connaissant une croissance urbaine élevée et devant compter trois mégapoles d'ici 2025 [3]. Par conséquent, la consommation d'énergie dans les bâtiments est assez élevée et doit être mûrement réfléchie. La construction de bâtiments écologiques où règne un environnement sain et confortable devient donc une priorité.

Une étape très importante de toute analyse ou conception éco énergétique est l'estimation des besoins énergétiques du bâtiment pour la planification d'un confort thermique optimal. La quantité d'énergie requise par ces équipements de refroidissement et de chauffage joue un rôle crucial dans la quantité globale d'énergie consommée. Par conséquent, un mauvais choix entraînerait un gaspillage d'énergie considérable et une charge croissante pour l'utilisateur. Ainsi, le développement d'un système approprié de chauffage et de refroidissement, ainsi que d'un système de climatisation, revêtent une grande importance.

Les méthodes actuelles d'analyse et d'optimisation ne distinguent pas entre les différentes qualités des flux d'énergie lors de l'analyse. Dans l'étude des bâtiments dans plusieurs pays, ce problème a été résolu en transformant tous les flux énergétiques en demande d'énergie primaire. Pour estimer la quantité d'énergie nécessaire, un équilibre énergétique doit être établi. La demande est calculée en cumulant les pertes d'énergie telles que les pertes de chaleur par transmission et ventilation de l'enveloppe du bâtiment. Ces pertes peuvent être entièrement ou partiellement compensées par les gains énergétiques. Différentes sources de gains d'énergie peuvent être utilisées. Les gains d'énergie internes, provenant des appareils et des utilisateurs, ainsi que les gains d'énergie solaire par les ouvertures, réduisent la quantité d'énergie de chauffage nécessaire. Les facteurs énergétiques primaires nécessaires au calcul sont issus de données statistiques et de discussions politiques, et ne reposent pas sur des analyses de processus thermodynamiques. Toutes les étapes de conversion d'énergie, de l'extraction des sources d'énergie (par exemple, les combustibles) aux demandes finales, sont évaluées dans la méthode de l'énergie primaire ; cependant, aucune information sur la qualité de l'énergie fournie et sa relation avec les besoins énergétiques requis ne peut être obtenue grâce à cette évaluation.

La quantité d'énergie est déterminée par la première loi de la thermodynamique et est calculée à partir des bilans énergétiques d'un système. Les systèmes énergétiques actuels dans les bâtiments sont conçus et améliorés en se basant sur cette loi. Cela signifie, bien sûr, que la quantité d'énergie fournie correspond à la quantité d'énergie requise. La qualité de l'énergie est, quant à elle, déterminée par une analyse combinée de la première et de la deuxième loi de la thermodynamique. À partir de ces analyses combinées, le concept thermodynamique d'exergie est dérivé. L'exergie représente la partie d'un flux d'énergie qui peut être complètement transformée en toute autre forme d'énergie, illustrant ainsi le potentiel d'une quantité d'énergie donnée pour effectuer un travail ou, en d'autres termes, sa qualité.

Dans notre approche, nous nous focalisons sur l'optimisation de la performance énergétique des bâtiments. Par conséquent, l'intégration de l'occupant dans la phase de conception devient cruciale pour atteindre un équilibre optimal entre confort et consommation énergétique. Le confort thermique se définit comme l'état de satisfaction d'un individu vis-à-vis de son environnement thermique. Pour atteindre cet état de satisfaction, les individus utilisent soit des systèmes de climatisation active (climatiseurs muraux, climatiseurs à éléments séparés, armoires de

climatisation, centrales de traitement d'air), soit des stratégies de bio-climatisation ou de climatisation passive (orientation des bâtiments, rapport volume/surface, isolation et inertie des matériaux, surfaces sélectives, ventilation des combles). La bio-climatisation prend en compte la qualité des matériaux utilisés lors de la construction, en privilégiant ceux offrant les meilleures propriétés isolantes. Ainsi, notre principale préoccupation sera la contribution à l'étude exergétique d'un environnement chaud en climat tropical.

Dans les régions tropicales, les conditions climatiques se caractérisent par des températures élevées et une humidité relative souvent importante. Ces paramètres influent significativement sur le confort thermique des occupants et sur la consommation énergétique des bâtiments. Face aux défis posés par le changement climatique et à la nécessité de réduire l'empreinte carbone, il est impératif d'optimiser l'efficacité énergétique des systèmes de climatisation et de ventilation. Dans ce contexte, l'analyse exergétique des bâtiments émerge comme une solution prometteuse pour améliorer l'efficacité énergétique tout en maintenant un niveau de confort thermique adéquat pour les occupants. Cependant, la mise en œuvre de cette analyse exergétique représente un défi majeur, nécessitant une compréhension approfondie des mécanismes thermodynamiques impliqués et des divers paramètres intervenants. Notre travail de recherche s'inscrit dans cette démarche en visant à déterminer l'état de référence qui minimise la destruction exergétique, et en réalisant une analyse exergétique détaillée d'un bureau situé à Yaoundé dans le quartier Melen. Les éléments de notre bâtiment d'intérêt particulier, tant pour notre équipe que pour de nombreux chercheurs, incluent les murs, les fenêtres, le sol et le système de climatisation. Ces composants sont cruciaux pour représenter fidèlement le système global et permettre une analyse exergétique approfondie.

Afin d'atteindre notre objectif, ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente une revue de la littérature, fournissant une compréhension des travaux antérieurs, du concept d'exergie, ainsi que des théories physiques pertinentes. Le deuxième chapitre détaille le matériel et les méthodes utilisés dans cette étude, incluant des informations exhaustives sur les équipements, les données météorologiques collectées et l'approche méthodologique adoptée. Le troisième chapitre expose les résultats obtenus et propose des discussions approfondies pour analyser et interpréter ces résultats.

REVUE DE LITTÉRATURE

Introduction

Dans le contexte contemporain des préoccupations environnementales et du développement durable, l'efficacité énergétique dans les bâtiments occupe une place centrale dans les efforts visant à réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Les bâtiments représentent une part significative de la consommation d'énergie mondiale et jouent un rôle crucial dans la transition vers un avenir énergétique plus durable. L'énergie est au cœur du fonctionnement des bâtiments, qu'ils soient résidentiels, commerciaux ou industriels. Elle est utilisée pour l'éclairage, le chauffage, la climatisation, l'eau chaude sanitaire, les appareils électriques, et bien plus encore. Cependant, une grande partie de cette énergie est gaspillée en raison de pratiques inefficaces et de conceptions peu performantes. Face à la raréfaction des ressources énergétiques, de nombreuses réglementations et normes ont été mises en place pour encourager l'adoption de pratiques énergétiques plus durables dans la construction et la gestion des bâtiments. L'évaluation de la qualité de l'énergie dans les bâtiments est devenue un concept essentiel pour limiter les déperditions d'énergie dans le bâtiment. Dans cette section, nous explorerons en détail les lois de la thermodynamique, les généralités sur le concept d'exergie et le concept clé de l'analyse exergétique, dont l'état de référence.

1. Généralités sur l'énergie

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail ou à provoquer un changement. Cette notion, essentielle en physique, régit les phénomènes naturels et les activités humaines depuis des millénaires. Son utilisation et sa compréhension ont façonné l'histoire du monde.

1.1. Définition

L'énergie est une grandeur fondamentale en physique qui mesure la capacité d'un système à accomplir un travail ou à produire un effet. C'est une propriété abstraite associée à divers phénomènes et processus qui se produisent dans l'univers. L'énergie existe sous différentes formes et peut être convertie d'une forme à une autre, mais elle ne peut ni être créée, ni détruite,

conformément au principe de conservation de l'énergie. Les unités de mesure couramment utilisées pour l'énergie sont le joule (J) dans le système international d'unités (SI), ainsi que d'autres unités comme la calorie (cal) et le kilowattheure (kWh).

En physique, l'énergie est une grandeur qui mesure la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur. Dans le Système international d'unités (SI), l'énergie s'exprime en joules et est de dimension ML^2T^{-2} [2]. L'énergie peut être présente sous plusieurs formes principales, notamment :

- ✧ **Énergie cinétique** : C'est l'énergie associée au mouvement d'un objet. Plus un objet se déplace rapidement, plus son énergie cinétique est élevée.
- ✧ **Énergie potentielle** : C'est l'énergie stockée en raison de la position ou de la configuration d'un objet. Par exemple, un objet en hauteur possède de l'énergie potentielle en raison de sa position par rapport à la Terre.
- ✧ **Énergie thermique** : C'est l'énergie associée à la chaleur et aux différences de température. Elle est liée à l'agitation moléculaire et au transfert de chaleur entre les systèmes.
- ✧ **Énergie électromagnétique** : C'est l'énergie associée aux phénomènes électriques et magnétiques, y compris la lumière et d'autres formes de rayonnement électromagnétique.
- ✧ **Énergie chimique** : C'est l'énergie stockée dans les liaisons chimiques entre les atomes et les molécules. Les réactions chimiques impliquent souvent la conversion d'énergie chimique.
- ✧ **Énergie nucléaire** : C'est l'énergie contenue dans les noyaux des atomes. Les réactions nucléaires, comme la fusion et la fission, libèrent de l'énergie nucléaire.

En somme, l'énergie est une notion fondamentale qui sous-tend les processus physiques, chimiques et biologiques de notre univers. Elle est au cœur de nombreux domaines de la science et de la technologie et joue un rôle crucial dans notre compréhension de la nature et dans notre vie quotidienne.

L'énergie joue un rôle essentiel dans tous les processus naturels et technologiques. Dans le cadre de la thermodynamique, l'étude des transferts et des transformations d'énergie est fondamentale pour comprendre les lois qui régissent les systèmes physiques.

1.2. Les sources d'énergie

Les sources d'énergie sont variées et jouent un rôle crucial dans le fonctionnement de notre société moderne. Elles se divisent généralement en trois catégories principales : les énergies fossiles, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire [4].

Les énergies fossiles, comprenant le pétrole, le gaz naturel et le charbon, ont été le principal moteur de l'ère industrielle. Leur utilisation massive a permis des avancées technologiques majeures, mais elle pose aujourd'hui des défis environnementaux considérables. Leur combustion libère des gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique, et leur extraction peut causer des dommages environnementaux significatifs.

Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse, offrent des alternatives prometteuses et respectueuses de l'environnement. L'énergie solaire, provenant du rayonnement du soleil, peut être convertie en électricité grâce aux panneaux solaires. L'énergie éolienne, issue du mouvement de l'air, est captée par des éoliennes pour produire de l'électricité [5]. L'énergie hydraulique, exploitant la force de l'eau, est générée par les barrages et les turbines. Ces sources sont inépuisables à l'échelle humaine et présentent un faible impact environnemental en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

L'énergie nucléaire provient de la fission des atomes dans des réacteurs nucléaires. Elle offre une grande quantité d'énergie sans émissions de gaz à effet de serre. Cependant, elle soulève des préoccupations en matière de sécurité, de gestion des déchets radioactifs et de non-prolifération nucléaire.

La transition vers des sources d'énergie plus durables est devenue une priorité majeure dans de nombreux pays. Les investissements dans les énergies renouvelables ont augmenté, encouragés par des politiques visant à réduire les émissions de carbone et à promouvoir la durabilité. L'innovation dans le stockage de l'énergie et dans les réseaux électriques intelligents (smart grids) est également cruciale pour rendre les énergies renouvelables plus fiables et accessibles [6]. La transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement est confrontée à divers défis majeurs.

1.3. Les défis énergétiques

Les défis énergétiques majeurs auxquelles sont confrontée l'humanité sont :

- ✱ Dépendance aux Énergies Fossiles
- ✱ Intermittence et Stockage des Énergies Renouvelables
- ✱ Obsolescence des Infrastructures : De nombreuses infrastructures énergétiques sont anciennes et conçues pour les énergies fossiles. Leur modernisation pour intégrer les énergies renouvelables et mettre en place des réseaux intelligents demande des investissements considérables et des efforts de planification à long terme.
- ✱ Accès à l'Énergie : Des millions de personnes n'ont pas accès à l'électricité, ce qui limite leurs opportunités économiques et leur qualité de vie.
- ✱ Recherche et Innovation : l'innovation dans les domaines du stockage d'énergie, de la production d'énergie à faible émission de carbone, et des réseaux intelligents est cruciale pour transformer notre système énergétique.

La résolution de ces défis exige une collaboration internationale, des politiques énergétiques cohérentes et une volonté collective de transition vers des sources d'énergie plus propres et durables.

2. Les lois de la thermodynamique.

Toute étude sur le domaine de l'énergie fait appel aux principes fondamentaux de la thermodynamique, qui est, en effet, la branche de la science qui se focalise surtout sur l'étude des flux énergétiques et l'utilité des composants de stocks. Ainsi, dans tout problème de l'univers de l'énergie, les concepts fondamentaux explicités par les principes de la thermodynamique ne sont pas à négliger car ces derniers, d'une façon générale, reflètent la base de l'énergétique.

2.1. Premier principe de la thermodynamique

Le premier principe de la thermodynamique traduit la conservation de l'énergie. L'énergie ne peut être détruite ou créée, mais seulement transformée en une autre forme.

D'après cette loi, l'égalité des diverses formes d'énergie (chimique, calorifique, électrique, mécanique,) est bien fondée. Ceci montre, en effet, l'importance de l'analyse des flux d'énergie

auxquels sont soumis les divers systèmes pour en tirer un bilan qui peut traduire la conservation d'énergie correspondante [7].

La formule mathématique pour un système fermé quelconque qui traduit cette loi est donnée par :

$$\Delta E = Q + W \quad 1.1$$

Avec ΔE : énergie échangée

Q : flux d'énergie sous forme de chaleur

W : travail fourni par le système vers le milieu extérieur d'où le signe (-) qui précède ce terme

2.2. Deuxième principe de la thermodynamique

Le deuxième principe, aussi appelé principe de Carnot [8], traduit le concept de la qualité de l'énergie et fait intervenir la notion du désordre qui est mesuré par une fonction d'état qui est l'entropie S .

Selon cette loi, « toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie globale incluant l'entropie du système et du milieu extérieur. On dit alors qu'il y a création d'entropie ».

Ainsi, les systèmes évoluent d'une manière globale d'un état plus ou moins ordonné vers un autre état probable désordonné, selon l'état de transformation du système.

Pour une transformation réversible, on a :

$$\Delta S_{syst} = S_{éch} = \frac{Q_{rev}}{T} \quad 1.2$$

Pour une transformation irréversible, on a :

$$\Delta S_{syst} = S_{éch} + S_{créée} = \frac{Q_{irrev}}{T} + S_{créée} \quad 1.3$$

Ainsi,

$$\Delta S_{syst} > \frac{Q_{irrev}}{T} \quad 1.4$$

Où ΔS représente la variation d'entropie, Q la chaleur et T la température.

2.3. Troisième principe de la thermodynamique

Le troisième principe de la thermodynamique énonce que : "À une température de zéro absolu, le mouvement thermique des particules cesse et l'entropie d'un système parfait cristallin pur est égale à zéro." [9]

Ce principe établit une référence absolue pour l'entropie d'un système, définissant la base théorique à partir de laquelle on peut mesurer et évaluer l'entropie des systèmes à des températures supérieures au zéro absolu. Il établit une limite fondamentale à laquelle la température ne peut pas descendre, introduit une notion cruciale dans notre compréhension de la physique des systèmes à très basses températures. Cette déclaration sur le comportement de la matière à une température de zéro absolu (où le mouvement thermique cesse) a des implications profondes en physique, en particulier dans le domaine de la thermodynamique et de la physique de la matière condensée. Il s'avère essentiel pour la compréhension de phénomènes tels que la formation des cristaux, les transitions de phase, et il est fondamental dans l'étude des propriétés des matériaux à des températures très basses.

En résumé, ce principe pose une limite théorique à la température, tout en offrant des insights précieux sur le comportement de la matière à des températures extrêmement froides, permettant ainsi des avancées significatives dans de nombreux domaines scientifiques.

3. L'analyse exergétique

3.1. Généralités

L'énergie est conservée dans chaque unité ou chaque processus. Selon le premier principe de la thermodynamique, la conservation de l'énergie est exprimée par le fait qu'elle ne peut être ni détruite, ni produite. Cependant, dans tout processus, des phénomènes d'irréversibilité surviennent, entraînant la dégradation de la qualité de l'énergie. Cette dégradation d'énergie, non évidente selon le premier principe, est mise en évidence par le second principe. En effet, le second principe de la thermodynamique exprime la dégradation de l'énergie en termes d'entropie, se traduisant par une augmentation de l'entropie du système. En termes d'exergie, cette dégradation de l'énergie se manifeste par une destruction d'exergie. Dans la suite, nous allons rappeler les notions de base de l'exergie et ensuite détailler l'application du bilan exergétique aux systèmes industriels.

3.2. Définition

Dans la littérature scientifique, on trouve plusieurs définitions de l'exergie d'un système quelconque. Nous retiendrons la suivante (Benelmir et al., 2002) : « l'exergie d'une certaine quantité de matière contenue dans un système est une mesure du potentiel de production (ou de réception) d'un travail maximal (ou minimal) par le super système (constitué du système et de son milieu ambiant), qui permettra à cette quantité de matière d'être ramenée de son état initial à un état d'équilibre inerte avec le milieu ambiant ». Rivero-Rodriguez énonce cinq propriétés de l'exergie qui se résument ainsi (Rivero Rodriguez, 1993) [10] :

- ✱ L'exergie d'un système est l'énergie nette (utile) qui peut être obtenue de l'ensemble système- environnement en portant cet ensemble à l'équilibre.
- ✱ L'exergie d'un système est la portion de l'énergie qui, dans un environnement donné, peut être transformée en d'autres formes d'énergies nobles.
- ✱ L'exergie d'un système est la capacité du système à produire un changement.
- ✱ L'exergie d'un système est la mesure de la qualité de l'énergie contenue dans le système.
- ✱ L'exergie est le potentiel de travail maximum du système relatif à son entourage.

De façon plus simple, l'exergie est une mesure de la quantité d'énergie disponible dans un système pour effectuer un travail utile lorsqu'il atteint l'équilibre avec son environnement. Elle représente la partie de l'énergie totale d'un système qui peut être convertie en travail mécanique ou en une autre forme d'énergie utile.



Figure 1-1 : Les composantes de l'énergie. [11]

3.3. Les différentes formes d'énergie

Il existe trois formes d'exergie à savoir :

- * L'exergie associée à la matière ;
- * L'exergie associée à un travail mécanique ;
- * L'exergie associée à une quantité de chaleur.

3.3.1. L'exergie associée à la matière

Les exergies physique, chimique et de mélange sont directement liées aux propriétés physicochimiques du flux de matière. Pour le calcul de ces trois formes d'exergie, on fait appel à la méthode proposée par Hinderink et al., 1996 [12] (Figure 1.1) :

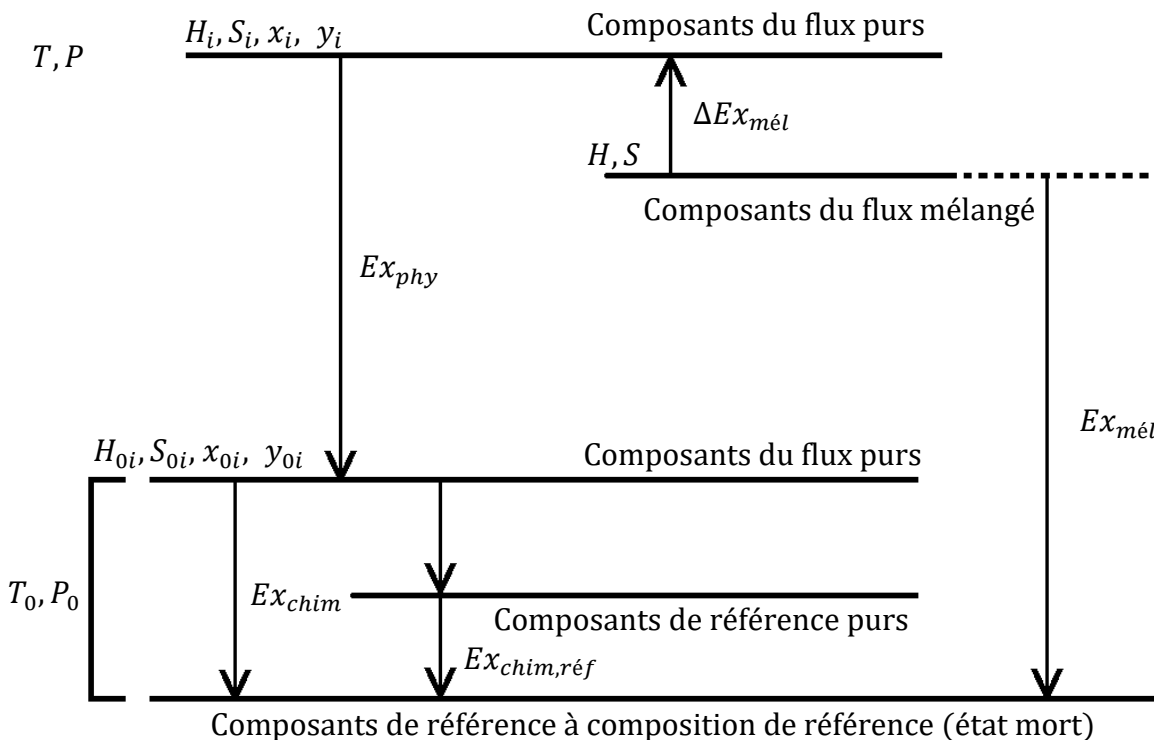


Figure 1-2 : Schéma explicatif donnant l'exergie d'un flux de matière [13]

En absence d'interactions électromagnétiques, nucléaires, ou de tension superficielle, l'exergie associée à la matière (ExM) peut être décomposée en quatre termes (Hinderink et al., 1996 ; Kotas, 1995) :

$$Ex_M = Ex_{phy} + Ex_{chim} + Ex_{mél} + Ex_{cin} + Ex_{pot} + Ex_{the} \quad 1.5$$

- Avec :
- * Ex_{phy} : Exergie physique.
 - * Ex_{chim} : Exergie chimique.
 - * $Ex_{mél}$: Exergie de mélange.
 - * Ex_{cin} : Exergie cinétique.
 - * Ex_{pot} : Exergie potentielle.
 - * Ex_{the} : Exergie thermique

Cette méthode considère que tous les mélanges sont des mélanges réels et tient compte de la non idéalité de tout type de mélange et des transitions de phase au cours du passage d'un état thermodynamique à un autre. Ainsi aucune hypothèse simplificatrice n'étant considérée. Les termes de variations d'enthalpie et d'entropie de mélange seront pris en considération. A titre d'exemple, comme on peut le constater sur la figure 1.2, pour un flux de matière gazeux contenant de la vapeur d'eau, le passage de son état actuel (à T et P) vers un état de référence (à T_0 et P_0) provoque la condensation d'une fraction de l'eau. Par conséquent, cette condensation engendre une modification de la composition du flux dont on doit tenir compte lors du calcul des exergies physique et chimique.

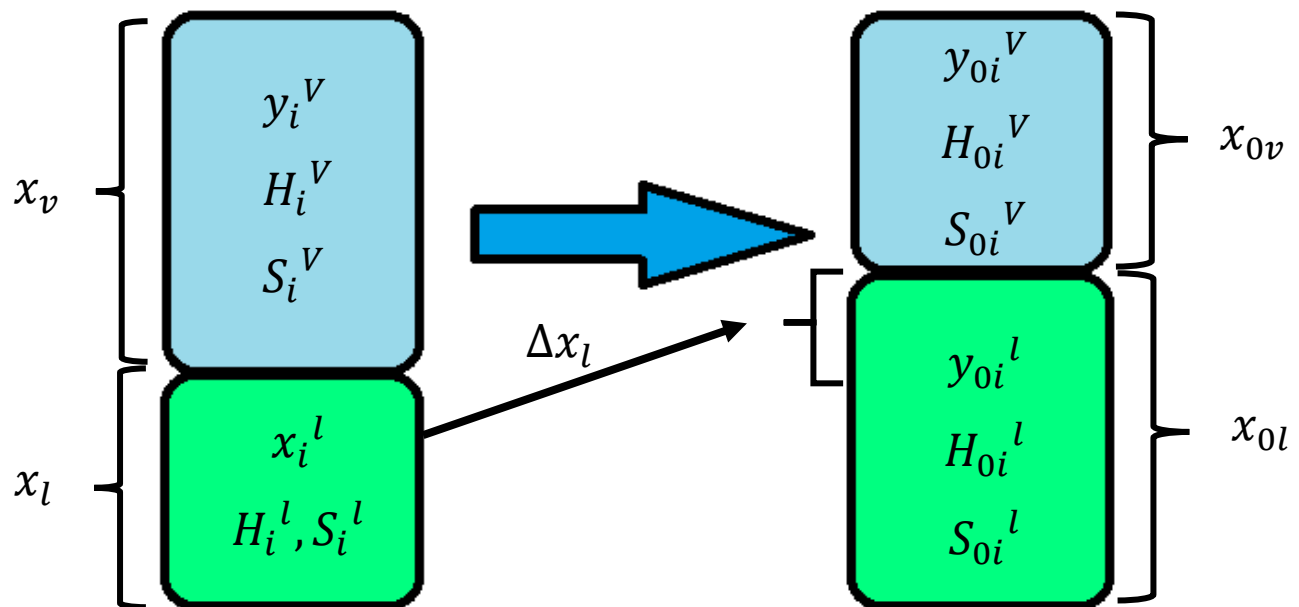


Figure 1-3 : Modification de la composition d'un flux de matière au cours du passage de l'état actuel vers l'état de référence[13]modifiée pour mettre en évidence les états de la matière.

Avec :

- * x_l et x_v sont les fractions molaire du liquide et de la vapeur du flux de matière respectivement.
- * x_i et y_i présentent la fraction molaire de l'espèce « i » dans la phase liquide et vapeur respectivement.
- * H_i et S_i sont l'enthalpie molaire et l'entropie molaire de l'espèce « i » pure.
- * Les exposants l et v font référence aux phases liquide et vapeur.
- * L'indice 0 désigne l'état de référence.

3.3.1.1. Exergie physique

L'exergie physique (Ex_{phy}) peut être définie comme étant la quantité maximale de travail pouvant être récupérée lorsqu'un flux de matière est porté de son état initial défini par (T, P) à l'état de l'environnement défini par (T_0 , P_0) par un processus ne faisant intervenir qu'une interaction thermique avec l'environnement (Kotas, 1995 ; Szargut et al., 1988). Cette composante est donnée par l'Eq 10 (Hinderink et al., 1996).

$$Ex_{phy} = \Delta_{act \rightarrow réf} D \left(x_l \left(\sum_{i=1}^n x_i H_i^l - T_0 \sum_{i=1}^n x_i S_i^l \right) + x_v \left(\sum_{i=1}^n x_i H_i^v - T_0 \sum_{i=1}^n x_i S_i^v \right) \right) \quad 1.6$$

Avec : D est le débit de flux de matière

3.3.1.2. Exergie chimique

L'exergie chimique, également connue sous le nom d'exergie de réaction ou potentiel chimique, est un concept important en thermodynamique qui mesure le travail maximal pouvant être obtenu lorsqu'une réaction chimique se produit spontanément. C'est le travail maximal qui peut être récupéré lorsqu'un flux de matière est porté de l'état de l'environnement (T_0 , P_0) à l'état 'mort' par un processus faisant intervenir uniquement un échange de matière et un transfert thermique avec l'environnement (Kotas, 1995 ; Szargut et al., 1988)

Pour mieux comprendre le concept, examinons la définition de l'exergie chimique dans le cadre d'une réaction chimique réversible se produisant à une température et une pression constantes. Elle est donnée par la formule :

$$\Delta G^0 = \Delta G_r^0 + RT \sum v_i \ln x_i \quad 1.7$$

Où : * ΔG^0 est l'exercice chimique du mélange réactionnel.

* ΔG_r^0 est la variation d'énergie libre standard de la réaction.

* R est la constante des gaz parfaits (8.314 J/(mol·K)).

* T est la température absolue en kelvins.

* v_i est le coefficient stœchiométrique de l'espèce chimique i dans la réaction. Il représente le nombre de moles de l'espèce i impliquées dans la réaction chimique exprimé en moles.

* x_i est l'activité chimique de l'espèce i dans le mélange réactionnel. L'activité chimique est une mesure relative de la concentration de l'espèce, tenant compte de l'effet de la pression partielle pour les gaz et de la fugacité pour les espèces en phase gazeuse. Les activités chimiques sont sans unité.

Lorsqu'une réaction chimique se produit spontanément, elle libère de l'énergie sous forme de chaleur et/ou de travail. L'exergie chimique mesure la partie de cette énergie qui peut être effectivement transformée en travail. Si la réaction est réversible, l'exergie chimique atteindra son maximum. L'exergie chimique est un outil essentiel pour analyser les transformations chimiques et est un concept fondamental en thermodynamique et en ingénierie des procédés appliqués.

3.3.1.3. Exergie de mélange

L'exergie de mélange, également appelée exergie de mélange irréversible, est une composante importante de l'exergie totale d'un système qui prend en compte les pertes d'exergie dues à des gradients de concentration, de température ou de pression dans un mélange de fluides. Contrairement à l'exergie chimique et à l'exergie physique, l'exergie de mélange est liée aux irréversibilités dues aux différences de propriétés entre les différents flux de fluides dans un système[13].

Lorsque deux fluides de compositions différentes sont mélangés, des gradients de concentration, de température et/ou de pression peuvent se former, entraînant des pertes d'exergie. Ces gradients conduisent à des phénomènes dissipatifs qui réduisent la quantité d'énergie utilisable dans le système. La formule générale de l'exergie de mélange entre deux fluides est :

$$\Delta Ex_m = \Delta H_m - T_0 \Delta S_m \quad 1.8$$

Où :

- * ΔH_m est l'enthalpie spécifique de mélange, c'est-à-dire la différence d'enthalpie entre le mélange et les fluides d'origine.
- * ΔS_m est l'entropie spécifique de mélange, c'est-à-dire la différence d'entropie entre le mélange et les fluides d'origine.
- * T_0 est la température de référence, généralement la température ambiante.

L'exergie de mélange est une mesure de l'irréversibilité associée au processus de mélange et représente la perte d'énergie utilisable due aux différences de propriétés dans le mélange. Pour minimiser les pertes d'exergie de mélange dans un système, on peut utiliser des dispositifs de mélange appropriés ou des échangeurs de chaleur efficaces pour réduire les gradients de température et de concentration entre les fluides.

L'exergie de mélange est un concept essentiel en thermodynamique appliquée, en génie chimique et en génie des procédés pour optimiser l'efficacité énergétique des systèmes impliquant des mélanges de fluides.

3.3.1.4. Exergie cinétique

L'exergie cinétique, également appelée énergie cinétique utilisable, est la partie de l'énergie cinétique d'un système qui peut être transformée en travail mécanique utile. L'énergie cinétique représente l'énergie associée au mouvement d'un objet ou d'un système, tandis que l'exergie cinétique est une mesure de la part de cette énergie qui peut être utilisée pour effectuer un travail. La formule de l'exergie cinétique est donnée par :

$$Ex_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad 1.9$$

Où :

- * Ex_{cin} est l'exergie cinétique du système, exprimée en joules (J) ou dans d'autres unités d'énergie.
- * m est la masse du système en kilogrammes (kg).
- * v est la vitesse du système par rapport à une référence spécifique en mètres par seconde.

L'exergie cinétique est utile dans le contexte de l'analyse énergétique des systèmes en mouvement, tels que les machines, les véhicules, les turbines, etc. Elle permet de quantifier

l'énergie mécanique disponible pour effectuer un travail utile. Dans certaines applications, comme l'étude de la performance des éoliennes ou des hydroliennes, l'exergie cinétique est prise en compte pour évaluer le potentiel de conversion de l'énergie cinétique en travail mécanique ou en électricité[13].

3.3.1.5. Exergie potentielle

L'exergie potentielle, également connue sous le nom d'énergie potentielle utilisable, est la partie de l'énergie potentielle d'un système qui peut être transformée en travail mécanique utile. L'énergie potentielle est l'énergie associée à la position d'un objet ou d'un système par rapport à une référence spécifique. L'exergie potentielle mesure la part de cette énergie qui peut être utilisée pour effectuer un travail. La formule de l'exergie potentielle dépend du type de système et du champ de force impliqué, mais pour un système soumis à la gravité (par exemple, un objet élevé dans un champ gravitationnel), la formule est la suivante :

$$Ex_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad 1.10$$

Où :

- * Ex_{pot} est l'exergie potentielle du système, exprimée en joules (J) ou dans d'autres unités d'énergie.
- * m est la masse du système en kilogrammes (kg).
- * g est l'accélération due à la gravité en mètres par seconde carré.
- * h est la hauteur du système par rapport à une référence spécifique en mètres (m).

L'exergie potentielle est liée à la hauteur du système par rapport à une référence spécifique. Plus un objet est élevé, plus son exergie potentielle est élevée, car il possède un potentiel plus élevé pour effectuer un travail en retombant.

L'exergie potentielle est largement utilisée dans l'analyse énergétique et la modélisation de systèmes impliquant des variations de position. Elle est utile pour évaluer le potentiel de conversion de l'énergie potentielle en travail mécanique ou en d'autres formes d'énergie.

3.3.2. Exergie associée à un travail mécanique

L'exergie associée à un travail mécanique est la partie de l'énergie totale d'un système qui est utilisable pour effectuer un travail mécanique utile. C'est une mesure de l'énergie qui est

convertie en travail mécanique sans pertes significatives. Lorsqu'un système effectue un travail mécanique, il utilise une partie de son énergie totale. Cette énergie utilisable est appelée exergie associée au travail mécanique. La formule générale est la suivante :

$$Ex_W = W \quad 1.11$$

L'exergie est exprimée en joules (J) ou dans d'autres unités d'énergie. Le travail mécanique est également exprimé en joules (J) et est généralement calculé comme le produit de la force appliquée sur le système et la distance sur laquelle cette force agit.

Il est important de noter que pour que le travail mécanique soit totalement utilisable et contribue entièrement à l'exergie, il doit être réalisé sans pertes d'énergie, de chaleur ou de frottements importants. En pratique, il peut y avoir des pertes d'exergie associées aux rendements et aux inefficiences des machines, aux résistances de l'air, aux frottements, etc.

L'exergie associée à un travail mécanique est un concept essentiel en thermodynamique appliquée et en ingénierie des procédés. Elle est utilisée pour évaluer l'efficacité énergétique des machines et des systèmes, ainsi que pour concevoir et optimiser les processus afin de minimiser les pertes d'énergie et d'améliorer les rendements énergétiques.

3.3.3. Exergie associée à une quantité de chaleur

L'exergie associée à une quantité de chaleur est la partie de l'énergie thermique reçue par un système qui est utilisable pour effectuer un travail mécanique utile. C'est une mesure de l'énergie thermique qui peut être convertie en travail mécanique sans pertes significatives.

Lorsqu'un système reçoit une quantité de chaleur (par exemple, par transfert thermique à partir d'une source chaude), une partie de cette énergie peut être convertie en travail mécanique, tandis que le reste est généralement dissipé sous forme de chaleur rejetée à une source froide. L'exergie associée à la quantité de chaleur représente donc la part de l'énergie thermique qui peut être utilisée pour effectuer un travail mécanique. La formule générale pour calculer l'exergie associée à une quantité de chaleur est la suivante :

$$Ex_Q = Q \left(1 - \frac{T_{source\ froide}}{T_{source\ chaude}} \right) \quad 1.12$$

* Ex_Q L'exergie est exprimée en joules (J) ;

* Q la quantité de chaleur est exprimée en joules (J) ou en calories (cal) ;

- * $T_{source\ froide}$ est la température absolue de la source froide, mesurée en kelvins (K) ;
- * $T_{source\ chaude}$ est la température absolue de la source chaude, mesurée en kelvins (K).

Le "coefficient de disponibilité thermique" est un paramètre qui prend en compte la température absolue du système et la température absolue de la source chaude. Il est souvent noté T_0 et permet de mesurer le potentiel de conversion de l'énergie thermique en travail mécanique. Le coefficient de disponibilité thermique varie entre 0 et 1, où 0 signifie que toute l'énergie thermique est totalement indisponible pour effectuer un travail (par exemple, lorsque les températures sont égales) et 1 signifie que toute l'énergie thermique est totalement disponible pour effectuer un travail (par exemple, lorsque la source chaude est à une température infiniment élevée)[13].

En pratique, l'exergie associée à une quantité de chaleur est un concept important pour évaluer l'efficacité des processus thermodynamiques, en particulier dans les machines thermiques et les cycles de puissance, où la conversion de la chaleur en travail est un objectif clé pour obtenir des rendements élevés. L'analyse exergetique est utilisée pour optimiser la conception et le fonctionnement de ces systèmes afin de minimiser les pertes d'énergie et d'améliorer les rendements énergétiques.

3.4. Etat de référence

3.4.1. Définition

L'état de mort (aussi appelé état mort ou état de référence) est un concept important en thermodynamique, en particulier dans le contexte de l'analyse exergetique. Cet état est utilisé comme référence pour déterminer la valeur de l'exergie (ou énergie utile) contenue dans une substance ou un système.

Dans l'analyse exergetique, l'objectif est de quantifier la quantité d'énergie utile (exergie) contenue dans un système et de différencier cette énergie utilisable de l'énergie totale, qui peut contenir également des parties inutilisables (anergie ou énergie non utile).

L'état mort est un état théorique idéal, où une substance se trouve dans un état d'équilibre absolu avec son environnement, sans mouvement, sans gradients de température, de pression ou de composition chimique, et sans aucune possibilité de transfert d'énergie utile (travail mécanique) ou de transfert thermique. En d'autres termes, c'est un état d'équilibre thermodynamique absolu avec l'environnement, où l'exergie est nulle [14].

L'utilisation de l'état de mort comme référence est particulièrement utile pour comparer différentes situations ou systèmes. En comparant la quantité d'exergie contenue dans un système par rapport à l'état de mort, on peut déterminer combien d'énergie est utilisable pour effectuer un travail mécanique utile. L'exergie est alors positive si le système a plus d'énergie utilisable que l'état de mort (c'est-à-dire, il a un potentiel pour effectuer un travail mécanique), et elle est négative s'il a moins d'énergie utilisable. Il est également utilisé pour définir les potentiels chimiques standards (par exemple, en thermodynamique chimique) et pour normaliser les propriétés thermodynamiques de référence pour les gaz parfaits, les substances en phase condensée, etc [15]

En résumé, l'état de mort est un concept fondamental en thermodynamique qui permet d'évaluer la qualité de l'énergie contenue dans un système en comparant son exergie par rapport à un état d'équilibre thermodynamique absolu sans énergie utilisable. C'est un outil essentiel pour l'analyse exergétique et pour évaluer l'efficacité énergétique des systèmes.

3.4.2. Choix de la température de référence

Lorsqu'il s'agit de l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments, l'exergie chimique et la variation de pression ne sont pas prises en compte, le problème fondamental est donc la définition de la température à l'état mort. Certains auteurs considèrent l'univers comme environnement de référence, l'environnement extérieur est donc presque universellement reconnu comme l'état mort dans les analyses exergétiques. En effet, l'air entourant un bâtiment est le puits ultime des processus énergétiques qui se produisent dans ce bâtiment, et le volume d'air autour du bâtiment est supposé suffisamment grand pour qu'aucun changement de sa température, de sa pression ou de sa composition chimique ne se produise en conséquence des interactions avec le bâtiment[16].

Cependant, il reste un problème à résoudre : la température de l'air extérieur étant variable dans le temps, faut-il tenir compte de cette variation lors de la définition de l'état mort ? Certains auteurs affirment qu'il n'est pas correct de considérer une température de référence variable, car cela introduirait une série de contradictions thermodynamiques. Ainsi, une température de référence constante est préférable. En ce qui concerne le choix d'une telle valeur constante, là encore il n'y a pas d'accord entre les auteurs : de nombreux auteurs définissent arbitrairement une valeur de référence, correspondant généralement à $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ou $T_0 = 25^\circ\text{C}$ [17], alors que d'autres auteurs suggèrent d'utiliser une valeur plus élevée ($T_0 = 32^\circ\text{C}$) lorsqu'il s'agit de systèmes

de Climatisation en été[18]. En revanche, Pons [19] et Evola et al. [20] font référence à la température extérieure minimale enregistrée pendant la période analysée ; certains auteurs se réfèrent également à la température extérieure de conception en hiver [15]. Généralement, pour le choix de la température de référence (T_0), nous avons recours aux trois possibilités suivantes (Le Goff et al., 2000) :

- ✱ Elle peut correspondre à la température moyenne annuelle de l'atmosphère au lieu considéré ;
- ✱ Elle peut correspondre aussi à une valeur choisie par l'utilisateur en vue de simplifier les procédures de calcul comme par exemple la température la plus basse du procédé ;
- ✱ Il est possible de prendre comme température de référence une valeur fixe d'usage universel, soit $T_0 = 298,15\text{K}$.

Dans tous les cas, le message principal qu'il faut retenir est que le choix de la température d'état mort a un impact non négligeable sur le calcul de l'exergie ; ceci est particulièrement vrai lorsque T est proche de T_0 , comme c'est le cas pour les flux d'énergie dans les bâtiments. Puisqu'il n'est pas possible d'identifier de manière universelle et univoque la température de l'état mort, les analyses d'exergie doivent être complétées par une analyse de sensibilité à la température de l'état mort.

3.5. Calcul de l'exergie

Un premier problème émergeant de la littérature est que deux formulations différentes doivent être utilisées pour calculer l'exergie associée aux processus de transfert de chaleur par convection et par rayonnement d'une surface à l'environnement. En particulier, l'exergie d'un flux de chaleur convectif Q rendu disponible à la température T et transféré à l'environnement (à T_0) est calculé comme suit :

$$E = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad 1.13$$

Ici, le terme entre parenthèses est le Facteur de Carnot. Dans la littérature, il est également le Facteur de qualité, et correspond à l'exergie associée à un flux de chaleur unitaire[14].

Cependant, lorsque le transfert de chaleur se produit par rayonnement, l'équation précédente ne convient pas[21]. Dans son travail [22], Candau a présenté la dérivation du travail maximal pouvant être obtenu à partir d'un flux d'énergie rayonnante thermique émis à une température T et transféré à un environnement de référence avec une température T_0 , lequel est :

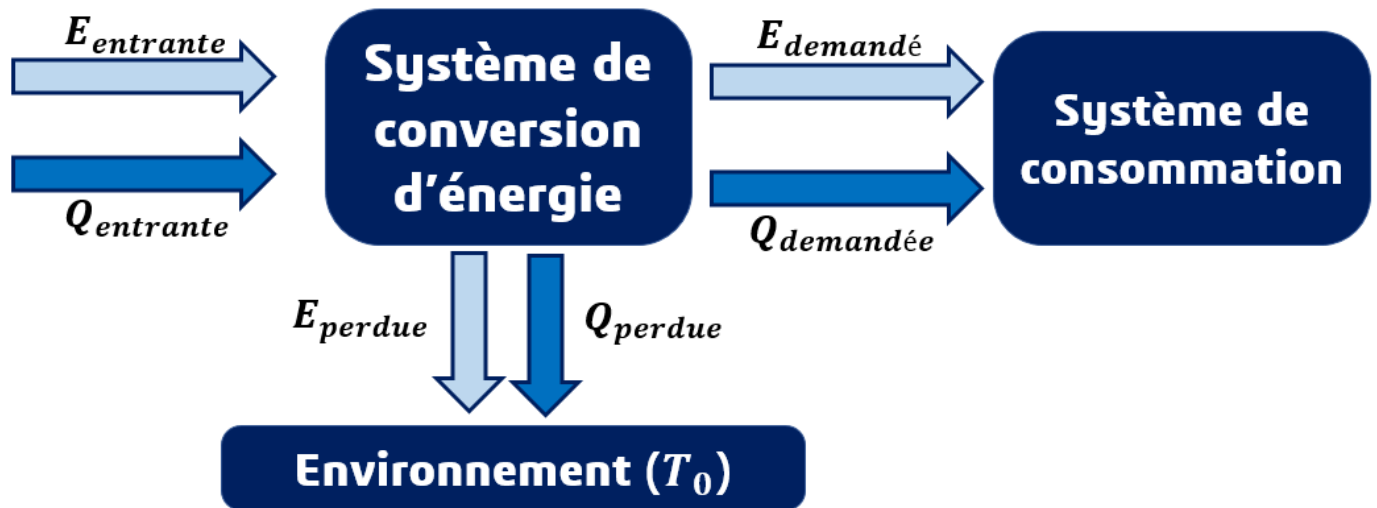
$$E = Q \left(1 - \frac{4}{3} T_0 \frac{(T^3 - T_0^3)}{(T^4 - T_0^4)} \right) \quad \text{Avec} \quad Q = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad 1.14$$

Ici, ε est l'émittance thermique de la surface, et A sa surface.

Enfin, si de la chaleur est dégagée par un débit massique $\dot{m}$ de fluide subissant une baisse de température (de T à T_0) la formulation suivante doit être adoptée, à savoir :

$$E = Q \left(1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right) \quad \text{Avec} \quad Q = \dot{m} C_p (T - T_0) \quad 1.15$$

3.6. Métrique pour l'analyse exergetique



$E_{entrante}$: Exergie entrante

$E_{demandée}$: Exergie demandée

E_{perdue} : Exergie perdue

$Q_{entrante}$: Énergie entrante

$Q_{demandée}$: Énergie demandée

Q_{perdue} : Énergie perdue

Figure 1-4 : Flux d'énergie et d'exergie entrant dans un système de conversion d'énergie

La figure 1.4 montre un schéma simplifié des flux d'énergie et d'exergie entrant et sortant d'un système de conversion d'énergie. En ce qui concerne les pertes d'énergie dans l'environnement (Q_{perdue}), tous les efforts techniques sont généralement faits pour les minimiser : cela signifie qu'une grande partie de l'énergie fournie au système ($Q_{entrant}$) est effectivement livré au système de consommation afin de satisfaire sa demande d'énergie (Q_{dem}) [23].

D'autre part, même si le système présente de faibles pertes d'énergie, les pertes exergétiques peuvent encore être très élevées. Ils peuvent être mesurés par la différence entre l'entrée exergétique et la sortie exergétique utile ($E_{perdue} = E_{Entrante} - E_{demandée}$), et sont essentiellement dus aux irréversibilités internes aux pertes dans l'environnement et à la dégradation de la qualité du flux thermique transmis à l'utilisateur [23].

Pour évaluer la performance des systèmes énergétiques sous l'angle de la première et de la deuxième loi [9], plusieurs métriques sont proposées dans la littérature. En fait, la performance énergétique est universellement dépeinte à travers l'efficacité énergétique, qui peut être défini comme le rapport du flux d'énergie utile fourni à l'utilisateur au flux d'énergie fourni au système de conversion [24] :

$$n_E = \frac{E_{demandée}}{E_{entrante}} = 1 - \frac{E_{perdue}}{E_{entrante}} = 1 - \beta \quad 1.16$$

Où β est le taux de destruction d'exergie, c'est-à-dire la quantité d'exergie par unité de temps détruite dans un système lors d'un processus de conversion d'énergie.

D'autre part, la performance exergétique peut être évaluée sous plusieurs points de vue différents. Un premier paramètre fréquemment utilisé dans ce cadre est le facteur de qualité, défini comme le contenu exergétique par unité de flux de chaleur [24] :

$$\eta_Q = \frac{Q_{demandée}}{Q_{Entrante}} \quad 1.17$$

Le facteur de qualité permet de décrire la qualité d'un flux d'énergie donné, c'est-à-dire sa convertibilité en travail mécanique. De nombreux travaux de la littérature font également référence au taux de destruction d'exergie, c'est-à-dire la quantité d'exergie par unité de temps détruite dans un système lors d'un processus de conversion d'énergie [24] :

$$\Omega_E = \frac{E_{perdue}}{E_{entrante}} \quad 1.18$$

Le taux de destruction d'exergie permet d'identifier, dans un système complexe composé de plusieurs composants, les composants principalement responsables de la dégradation de la qualité de l'énergie. Une autre façon courante de mesurer la performance exergetique d'un système de conversion d'énergie consiste à l'efficacité exergetique, qui est défini comme le rapport de la sortie d'exergie utile à l'entrée d'exergie [24] :

$$\eta_E = \frac{E_{demandée}}{E_{entrante}} = 1 - \frac{E_{perdue}}{E_{entrant}} = 1 - \Omega_E \quad 1.19$$

Le rendement exergetique est complémentaire du taux de destruction exergetique, et permet de comprendre à quel point le système est éloigné de la rationalité thermodynamique. Il convient ici de rappeler qu'un processus de conversion d'énergie peut idéalement obtenir $\eta_Q = 1$ si les pertes de chaleur sont nulles ($Q_{perdue} = 0$), même si cela est techniquement très exigeant. Au contraire, il est physiquement impossible d'obtenir $\eta_E = 1$, puisque le simple fait que l'utilisateur final ait une température inférieure à la source d'énergie, ce qui est nécessaire pour obtenir un transfert de chaleur, implique une dégradation de la qualité de l'énergie, d'où $E_{perdue} > 0$.

Enfin, certains auteurs introduisent le chiffre de dépense exergetique [16], qui est calculé comme le rapport de l'entrée d'exergie au système à la sortie d'énergie (demande d'énergie) :

$$\varepsilon = \frac{E_{entrante}}{Q_{demandée}} = \frac{\Psi_{entrant}}{\eta_Q} \quad 1.20$$

Le chiffre de la dépense d'exergie est un moyen de montrer clairement la relation entre l'exergie nécessaire pour répondre à une demande d'énergie donnée et la demande d'énergie elle-même. En effet, comparer le chiffre de la dépense exergetique au facteur de qualité de la demande renseigne sur l'adéquation entre les niveaux de qualité de l'énergie fournie et demandée. Dans ce but, on peut également observer que :

$$\eta_E = \frac{\Psi_{dem}}{\Psi_{entrant}} * \frac{Q_{dem}}{Q_{entrant}} = \frac{\Psi_{dem}}{\Psi_{entrant}} * \eta_Q = \frac{\Psi_{dem}}{\varepsilon} \quad 1.21$$

Conclusion

En conclusion, dans ce chapitre sur les généralités de l'analyse exergétique, nous avons exploré les principes fondamentaux de cette approche essentielle en thermodynamique appliquée. L'analyse exergétique offre un cadre puissant pour évaluer l'efficacité énergétique des systèmes en mettant l'accent sur la qualité de l'énergie directement capable de réaliser un travail utile. Nous avons souligné l'importance de l'exergie, qui représente la partie de l'énergie qui peut être transformée en travail mécanique, par opposition à l'anergie qui correspond à l'énergie non utilisable. Comprendre l'exergie est essentiel pour optimiser la conception des bâtiments, afin de minimiser les pertes d'énergie et d'améliorer l'efficacité globale. Dans ce chapitre, nous avons abordé les concepts clés de l'exergie, en mettant en évidence ses implications dans différents contextes thermodynamiques. Nous avons également examiné l'importance de l'état de référence, un concept théorique qui sert de point de comparaison pour quantifier l'exergie d'un système. L'état de mort nous permet de différencier l'énergie utile de l'énergie totale, facilitant ainsi l'évaluation des performances énergétiques réelles. Enfin, nous avons noté que l'analyse exergétique est une approche polyvalente et évolutive, utilisée dans divers domaines et est également au cœur des efforts mondiaux visant à promouvoir le développement durable et l'utilisation optimale de l'énergie. Ce chapitre nous fournit une base solide pour explorer plus en profondeur les applications pratiques de l'analyse exergétique dans les chapitres suivants, où nous étudierons un cas concret pour un bâtiment résidentiel et des exemples illustrant son utilité dans le contexte énergétique moderne.

MODÉLISATION

Introduction

L'analyse exergétique des bâtiments requiert des outils conceptuels et pratiques pour appréhender leur complexité. Dans ce chapitre, nous nous plongerons dans la modélisation, un puissant moyen de représenter et d'analyser les phénomènes réels en créant des abstractions structurées. Nous explorerons en profondeur deux facettes interconnectées de la modélisation appliquée à l'analyse énergétique d'un bâtiment. Ce chapitre est divisé en deux parties, chacune jouant un rôle clé dans notre quête d'une compréhension plus profonde et plus raffinée des implications énergétiques du bâtiment. Dans la première partie, nous décrirons en détail le modèle physique du bâtiment en parpaing, en mettant l'accent sur les spécificités architecturales, les propriétés thermiques des matériaux et les paramètres environnementaux cruciaux pour notre analyse. Ce modèle physique servira de fondement concret à notre exploration ultérieure. La deuxième partie de ce chapitre plongera dans le domaine de la thermodynamique exergétique et de ses concepts clés, en se concentrant particulièrement sur le concept d'état mort ou état de référence. À travers notre modèle physique, nous déterminerons la température de référence qui permet d'obtenir la destruction exergétique la plus basse. Cette section mettra en lumière l'importance de l'état mort en tant que référence essentielle pour mesurer l'exergie et pour comprendre les performances énergétiques réelles. Pour cela, nous développerons le modèle mathématique du transfert de chaleur à travers le bâtiment en parpaing. Cette modélisation mathématique nous permettra d'explorer le comportement thermique du bâtiment, tout en nous fournissant une base solide pour notre analyse exergétique.

1. Modèle physique

1.1. Caractéristiques du bâtiment

Le bâtiment virtuel qui fait l'objet de notre étude occupe une position centrale dans notre exploration de l'analyse exergétique dans un contexte tropical. Sa représentation précise et détaillée

est essentielle pour une modélisation réaliste et une analyse pertinente de ses performances énergétiques. Cette sous-section se penche sur les caractéristiques essentielles de ce bâtiment, fournissant ainsi la base concrète nécessaire à nos investigations.

Le bâtiment situé dans la ville de Yaoundé, au cœur du Cameroun et baigné par un climat tropical vivifiant, se dresse avec élégance. C'est un édifice d'un seul niveau, conçu avec soin en utilisant des parpaings aggloméré creux qui confèrent une stabilité rassurante à sa structure. S'étendant gracieusement sur une superficie de 60 mètres carrés, il occupe un espace de 12 mètres de long sur 5 mètres de large, témoignant ainsi d'une conception efficace et fonctionnelle. Sa hauteur de 3 mètres lui permet de respirer et de s'intégrer harmonieusement dans son environnement. Les murs, crépis avec une couche de ciment, offrent une texture propre et homogène qui sait résister aux éléments tout en offrant un aspect soigné.



Figure 2-1 :Modélisation physique du bâtiment.

À l'intérieur, le sol est un véritable chef-d'œuvre, revêtu essentiellement de béton. Le plafond, recouvert de contreplaqué, ajoute une touche chaleureuse à l'intérieur tout en maintenant une sensation d'espace aéré. Les multiples pentes de la toiture, au nombre de quatre, offrent une

protection solide contre les caprices de la météo tropicale, tout en conférant une silhouette distinctive au bâtiment.

Du côté des ouvertures, la façade présente deux visages différents. Une porte en bois accueille chaleureusement les visiteurs, offrant une transition fluide entre l'extérieur et l'intérieur. À côté de cette porte, une fenêtre en verre apporte une luminosité naturelle à l'intérieur et permet des vues pittoresques sur les alentours. Ce bâtiment à Yaoundé incarne l'alliance entre la fonctionnalité contemporaine et l'inspiration traditionnelle, tout en s'intégrant parfaitement à son contexte tropical. Une véritable œuvre architecturale où l'esthétique et la praticité se rencontrent pour créer un espace à la fois accueillant et fonctionnel. La figure 2.1 nous donne une modélisation du bâtiment présenté.



***Figure 2-2 :** Modélisation physique du bâtiment, vue de gauche.*

1.2. Propriétés des matériaux

Les matériaux qui composent notre bâtiment virtuel jouent un rôle fondamental dans sa réponse thermique et énergétique. Dans cette sous-section, nous explorerons en détail les propriétés thermiques et physiques des parpaings utilisés dans la construction du bâtiment. Ces

caractéristiques clés influencent la manière dont le bâtiment interagit avec son environnement thermique.

Les enquêtes réalisées auprès des ménages au Cameroun (ECAM) par l'Institut National de Statistique[25] [26], montrent la tendance générale des matériaux utilisés pour l'enveloppe du bâtiment, le toit et le sol des logements dans les différentes régions du Cameroun.

Les matériaux utilisés en majorité pour le toit sont généralement les matériaux définitifs (tôle ou tuile), sauf dans les régions du Nord et de l'Extrême-Nord où les matériaux non définitifs sont encore majoritaires (nattes, chaumes). En ce qui concerne les matériaux du sol, 42,56 % de sol sont en matériaux définitifs (ciment et carreaux) et le reste en matériaux non définitifs (bois, terre et autre). On constate aussi que dans l'ensemble, seuls 17,2 % de ménages vivent dans les logements avec l'enveloppe en matériaux définitifs (béton /parpaings, pierre de taille) et la majorité vit dans les logements avec l'enveloppe en matériaux non définitifs (briques de terre, planches, carabots, pisé de terre, nattes). [27]

1.3. Paramètre environnementaux

Le Cameroun s'étire en longueur du 2^{ème} au 13^{ème} degré de latitude Nord, et s'étale en largeur du 9^{ème} au 16^{ème} degré de longitude Est (Fig. 2.2). Il couvre une superficie de 475 442 Km² et présente diverses nuances climatiques qui, avec son relief varié, résume les grands ensembles biogéographiques du continent Africain.

Cette diversité se trouve de fait simplifiée par la répartition des différentes nuances climatiques sur deux zones de part et d'autre du 6^{ème} parallèle : Au Nord du 6^{ème} parallèle, on a le climat tropical sec ; Et au Sud, le climat équatorial devenant de plus en plus humide au fur et à mesure que l'on se rapproche du Littoral et du Mont Cameroun. Du fait de sa situation en latitude, le Cameroun est entièrement situé dans la zone chaude. Les températures sont en général assez élevées et augmentent progressivement dans le sens Sud-Nord. Cette situation géographique particulière est à l'origine d'une grande diversité climatique.

Le climat du Cameroun varie selon le terrain, de tropical le long de la côte à semi-aride et chaud dans le nord. Excessivement chaude et humide, la ceinture côtière comprend certains des endroits les plus humides de la planète. Par exemple, Debundscha, au pied du mont Cameroun, a

une pluviométrie annuelle moyenne de 10 300 millimètres. On distingue deux principaux climat au Cameroun à savoir : le climat équatorial et le climat tropical [28].

Le domaine tropical se distingue par des températures élevées et des pluies peu abondantes, de type soit soudanien (une saison pluvieuse de mai à octobre, une saison sèche de novembre à avril), soit sahélien, marqué par des pluies très irrégulières, mais absentes de décembre à mars. Les températures les plus basses sont de 17 à 18 °C et les plus élevées de 30 à 32 °C[28].

Le bâtiment virtuel faisant l'objet de notre étude est situé dans la ville de Yaoundé, dans le quartier Melen et est soumis à un climat tropical savanien.

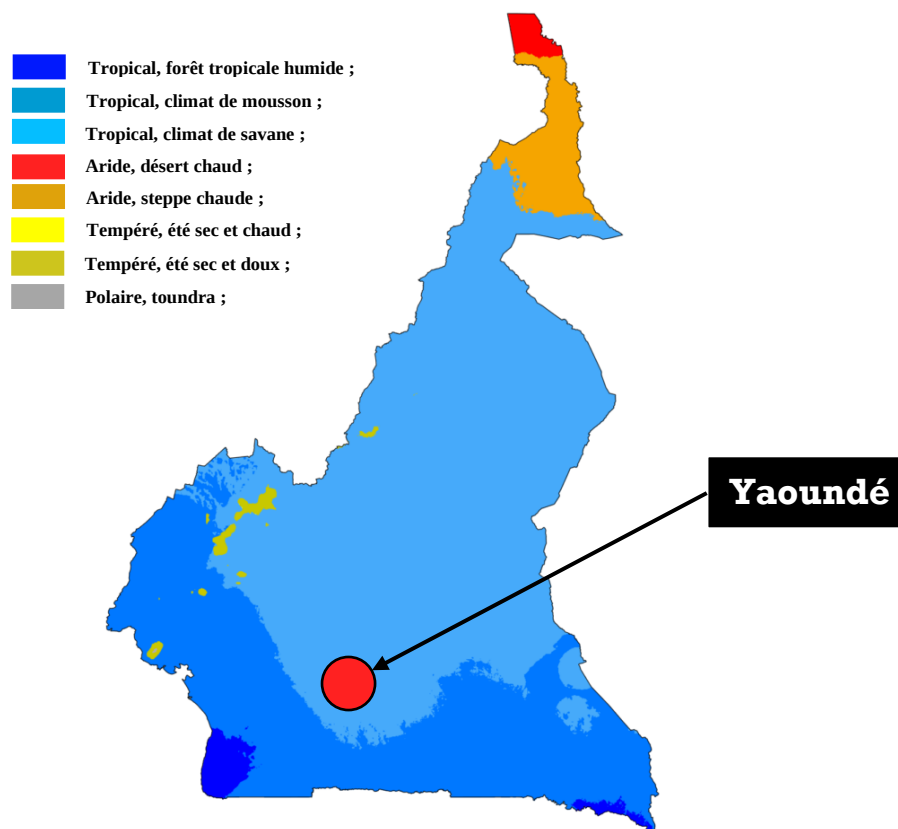


Figure 2-3 : Carte de classification climatique de Köppen-Geiger pour le Cameroun (1980-2016) [28]

2. Modèle mathématiques

Afin de calculer la demande énergétique annuelle, un modèle de transfert de chaleur dynamique pour les éléments thermiques du bureau a été formulé. Ce modèle est basé sur la méthode de la capacité localisée, où les parois sont supposées avoir des températures uniformes dans tous leurs volumes. Le modèle prend en compte les termes suivants :

- ✱ La conduction à travers les fenêtres et les murs,
- ✱ La convection due au mouvement de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment,
- ✱ La ventilation,
- ✱ Le rayonnement solaire à travers les fenêtres,
- ✱ L'absorption du rayonnement solaire dans les murs extérieurs et le toit,
- ✱ Les gains de chaleur internes
- ✱ La capacité de stockage de chaleur des murs.

Dans le modèle proposé, la température de l'air ambiant est supposée constante (21°C en hiver et 24°C en été), ce qui signifie que la capacité de stockage de chaleur de la pièce est négligée dans notre étude.

Pour l'étude de notre bâtiment, le système sera divisé en sous-système. Chacun des sous-système est un lieu où l'exergie est consommée en conséquence du transfert d'énergie ou de la conversion d'énergie. Ensuite, la consommation d'énergie, d'entropie et d'exergie sera analysée et des équations pour chaque sous-système sont en cours d'élaboration.

Dans cette étude, l'ensemble du système est divisé en sous-système « mur plat », sous-système « fenêtre », sous-système "surface du sol" et sous-système « air ambiant (Climatisation) ». Par conséquent, il y a un total de 4 sous-systèmes dans cette étude. Pour simplifier l'analyse, les hypothèses suivantes pour le système général de notre modèle de pièce ont été faites :

- ✱ Le plan de travail à l'intérieur de l'espace de la pièce est éclairé à la fois par la lumière du jour à travers la fenêtre et par la lumière émise par les lampes fluorescentes.
- ✱ Le rayonnement solaire, qui est transmis à travers la vitre, n'affecte pas le sous-système du sol en béton.

Dans la suite de notre étude, nous allons évaluer au cas par cas les équations énergétique et exergetique pour chaque sous-système étudié.

2.1. Analyse exergetique pour le sous-système « mur plat »

En Considérant la conduction unidimensionnelle de transfert de chaleur stable à travers les murs en parpaing d'une pièce typique pendant une journée normale dans la ville de Yaoundé. Le mur est l'un des composants d'un bâtiment dont l'énergie peut entrer ou sortir par transfert de chaleur. La chaleur circule en permanence à l'intérieur de la pièce à travers le mur. Sachant que le

transfert de chaleur est la seule interaction impliquée dans ce cas et qu'il n'y a pas de génération de chaleur et donc d'énergie, le bilan énergétique du mur peut être exprimé comme suit :

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{ext} = \frac{dE_{mur}}{dt} \quad 2.1$$

Aucun changement de la température du mur avec le temps n'est observé car nous sommes en fonctionnement stable. On a donc :

$$\frac{dE_{mur}}{dt} = 0 \quad 2.2$$

Par conséquent, le taux de transfert de chaleur dans le mur doit être égal au taux de transfert de chaleur hors de celui-ci. En d'autres termes, le taux de transfert de chaleur à travers le mur doit être constant, On a :

$$\dot{Q}_{cond,mur} = \text{Constante} \quad 2.3$$

La section complète du mur pour l'analyse du transfert de chaleur est présentée dans Figure 2-4.

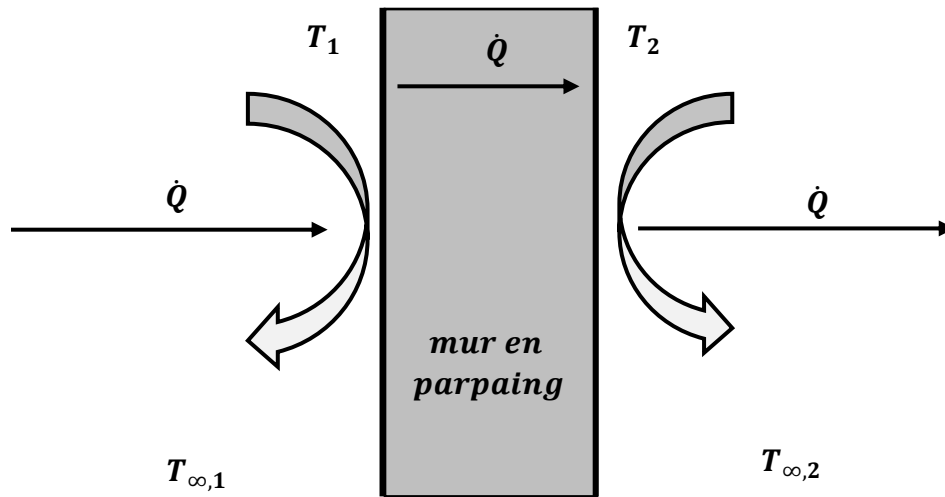


Figure 2-4 : Section transversale du mur en parpaing

Considérons le sous-système ci-dessous en conditions stable. On a :

$$\dot{Q}_{conv,1} = \dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv,2} = \dot{Q}_m \quad 2.4$$

$$\dot{Q}_m = h_1 A_m (T_{\infty,1} - T_1) = k_m A_m \frac{T_2 - T_1}{L_m} = h_2 A_m (T_2 - T_{\infty,2}) \quad 2.5$$

$$\dot{Q}_m = \frac{T_{\infty,1} - T_1}{1/h_1 A_m} = \frac{T_2 - T_1}{L_m/k_m A_m} = \frac{T_2 - T_{\infty,2}}{1/h_2 A_m} \quad 2.6$$

$$\dot{Q}_m = \frac{T_{\infty,1} - T_1}{(R_{conv,1})_m} = \frac{T_2 - T_1}{(R_{cond})_m} = \frac{T_2 - T_{\infty,2}}{(R_{conv,2})_m} \quad 2.7$$

$$\dot{Q}_m = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{(R_T)_m} \quad 2.8$$

Avec : $(R_T)_m = (R_{conv,1})_m + (R_{cond})_m + (R_{conv,2})_m \quad 2.9$

$$(R_T)_m = \frac{1}{h_1 A_m} + \frac{L_m}{k_m A_m} + \frac{1}{h_2 A_m} \quad 2.10$$

En appliquant la forme de bilan exergétique sous forme de taux à la paroi, on obtient :

$$(\dot{X}_{in})_m - (\dot{X}_{ext})_m - (\dot{X}_{détruit})_m = (\Delta \dot{X}_{système})_m \quad 2.11$$

L'exergie est obtenue en multipliant l'énergie du système considéré par le facteur de Carnot. Ainsi, on a donc :

$$(\dot{X}_{in})_m = \dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad 2.12$$

$$(\dot{X}_{ext})_m = \dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad 2.13$$

D'où on a :

$$\dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - (\dot{X}_{détruit})_m = (\Delta \dot{X}_{système})_m \quad 2.14$$

Or :

$$(\Delta \dot{X}_{système})_m = 0 \quad 2.15$$

$$\dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - (\dot{X}_{détruit})_m = 0 \quad 2.16$$

$$(\dot{X}_{détruit})_m = \dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad 2.17$$

$$(\dot{X}_{détruit})_m = \dot{Q}_m \left(\frac{T_0}{T_2} - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad 2.18$$

On sait que :

$$(\dot{X}_{détruit})_m = \frac{(\Delta X_{détruit})_m}{\Delta t} = \frac{(X_{détruit})_m - 0}{\Delta t} \quad 2.19$$

$$(X_{détruit})_m = (\dot{X}_{détruit})_m \Delta t \quad 2.20$$

$$\Delta t = n \frac{T_0 - T_{\infty,2}}{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}} \quad 2.21$$

Δt représente les heures équivalentes de fonctionnement en charge et $(X_{détruit})_m$ l'exergie consommée à travers le mur.

2.2. Analyse exergetique pour le sous-système « fenêtre »

Pour l'analyse exergetique de la fenêtre, la figure 2-5 présente une coupe transversale de la fenêtre. En considérant le système présenté, l'analyse exergetique est similaire à celle du mur plan. Ainsi, on peut utiliser les équations de l'analyse précédente.

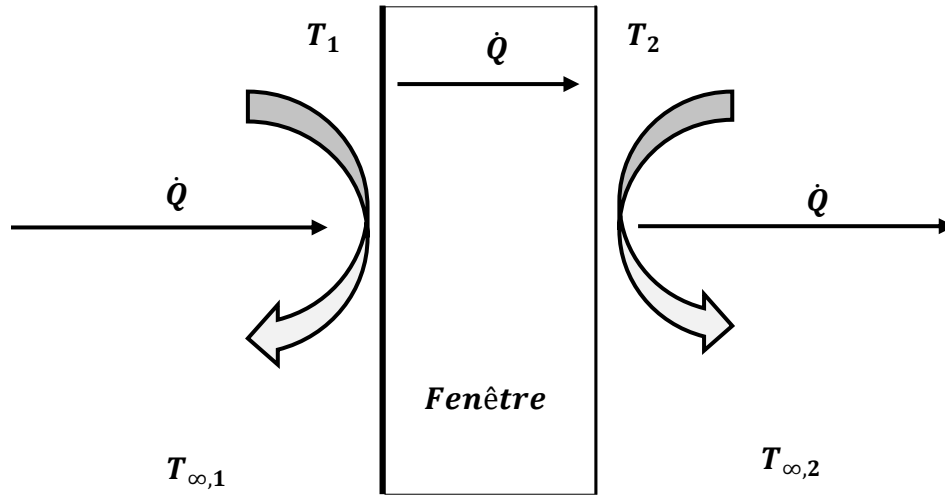


Figure 2-5 : Section transversale de la fenêtre

Pour une fenêtre à simple vitrage, on a :

$$\dot{Q}_f = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{(R_T)_f} \quad 2.22$$

$$(R_T)_f = (R_{conv,1})_f + (R_{cond})_f + (R_{conv,2})_f \quad 2.23$$

$$(R_T)_f = \frac{1}{h_1 A_f} + \frac{L_f}{k_f A_f} + \frac{1}{h_2 A_f} \quad 2.24$$

En appliquant la forme de bilan exergétique sous forme de taux à la fenêtre, on obtient :

$$(\dot{X}_{in})_f - (\dot{X}_{ext})_f - (\dot{X}_{détruit})_f = (\Delta\dot{X}_{système})_f \quad 2.25$$

L'exergie est obtenue en multipliant l'énergie du système considéré par le facteur de Carnot. Ainsi, on a donc :

$$(\dot{X}_{in})_f = \dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad 2.26$$

$$(\dot{X}_{ext})_f = \dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad 2.27$$

D'où on a :

$$\dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - (\dot{X}_{détruit})_f = (\Delta\dot{X}_{système})_f \quad 2.28$$

Or :

$$(\Delta\dot{X}_{système})_f = 0 \quad 2.29$$

$$\dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - (\dot{X}_{détruit})_f = 0 \quad 2.30$$

$$(\dot{X}_{détruit})_f = \dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_f \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad 2.31$$

$$(\dot{X}_{détruit})_f = \dot{Q}_f \left(\frac{T_0}{T_2} - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad 2.32$$

On sait que :

$$(\dot{X}_{détruit})_f = \frac{(\Delta X_{détruit})_f}{\Delta t} = \frac{(X_{détruit})_f - 0}{\Delta t} \quad 2.33$$

$$(X_{détruit})_f = (\dot{X}_{détruit})_f \Delta t \quad 2.34$$

$$\Delta t = n \frac{T_0 - T_{\infty,2}}{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}} \quad 2.35$$

Δt représente les heures équivalentes de fonctionnement en charge et $(X_{détruit})_m$ l'exergie consommée à travers le mur.

2.3. Analyse exergetique pour le sous-système « sol »

Deux principaux cas seront examinés pour l'analyse exergetique du sol à savoir :

- * 1^{er} cas : $T_1 > T_2$. La température de la surface supérieure du sol est plus élevée. La figure 2-6 présente une coupe transversale du sol dans ce cas.
- * 2^{er} cas : $T_1 < T_2$. La température de la surface inférieure du sol est plus élevée. La figure 2-7 présente une coupe transversale du sol dans ce cas.

2.3.1. La température de la surface supérieure du sol est plus élevée

Lorsque la température de la surface supérieure du sol est plus élevée, le transfert de chaleur se produit de la surface supérieure vers la surface inférieure. La figure suivante présente une modélisation de la situation :

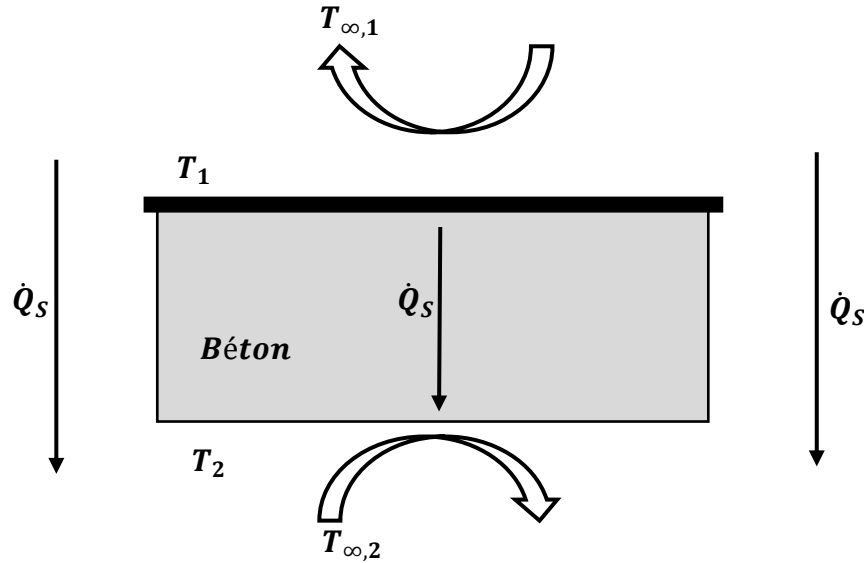


Figure 2-6 : Analyse du sol pour $T_1 > T_2$

$$\dot{Q}_{conv,1} = \dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv,2} = \dot{Q}_S \quad 2.36$$

$$\dot{Q}_S = h_1 A_S (T_{\infty,1} - T_1) = k_S A_S \frac{T_2 - T_1}{L_S} = h_2 A_S (T_2 - T_{\infty,2}) \quad 2.37$$

$$\dot{Q}_S = \frac{T_{\infty,1} - T_1}{1/h_1 A_S} = \frac{T_2 - T_1}{L_S/k_S A_S} = \frac{T_2 - T_{\infty,2}}{1/h_2 A_S} \quad 2.38$$

$$\dot{Q}_S = \frac{T_{\infty,1} - T_1}{(R_{conv,1})_S} = \frac{T_2 - T_1}{(R_{cond})_S} = \frac{T_2 - T_{\infty,2}}{(R_{conv,2})_S} \quad 2.39$$

$$\dot{Q}_S = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{(R_T)_S} \quad 2.40$$

Avec :

$$(R_T)_S = (R_{conv,1})_S + (R_{cond})_S + (R_{conv,2})_S \quad 2.41$$

$$(R_T)_S = \frac{1}{h_1 A_S} + \frac{L_S}{k_S A_S} + \frac{1}{h_2 A_S} \quad 2.42$$

En appliquant la forme de bilan exergétique sous forme de taux à la paroi du sol, on obtient :

$$(\dot{X}_{in})_S - (\dot{X}_{ext})_S - (\dot{X}_{détruit})_S = (\Delta\dot{X}_{système})_S \quad 2.43$$

L'exergie est obtenue en multipliant l'énergie du système considéré par le facteur de Carnot. Ainsi, on a donc :

$$(\dot{X}_{in})_S = \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad 2.44$$

$$(\dot{X}_{ext})_S = \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad 2.45$$

D'où on a :

$$\dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - (\dot{X}_{détruit})_S = (\Delta\dot{X}_{système})_S \quad 2.46$$

Or :

$$(\Delta\dot{X}_{système})_S = 0 \quad 2.47$$

$$\dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - (\dot{X}_{détruit})_S = 0 \quad 2.48$$

$$(\dot{X}_{détruit})_S = \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad 2.49$$

$$(\dot{X}_{détruit})_S = \dot{Q}_S \left(\frac{T_0}{T_2} - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad 2.50$$

2.3.2. La température de la surface inférieure du sol est plus élevée

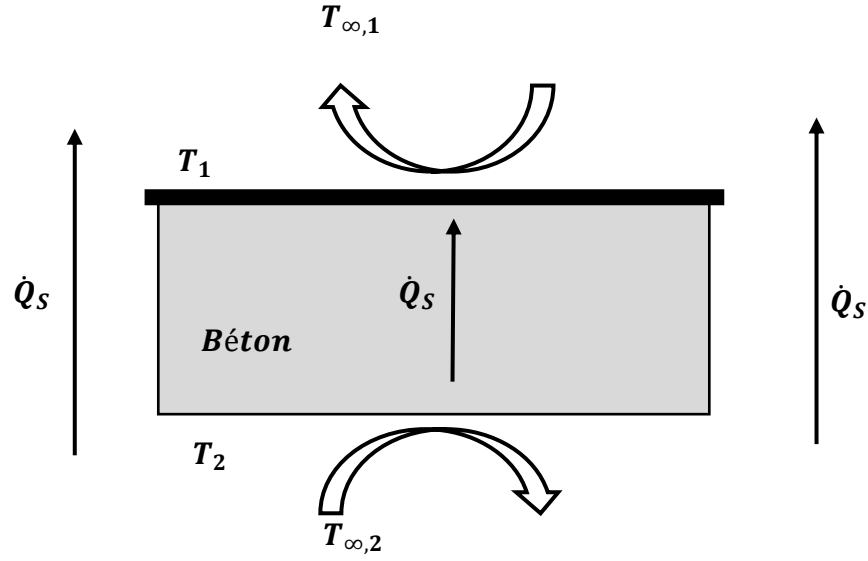


Figure 2-7 : Analyse du sol pour $T_1 < T_2$

Lorsque la température de la surface inférieure du sol est plus élevée, le transfert de chaleur se produit de la surface inférieure vers la surface supérieure. La figure précédente présente une modélisation de la situation.

$$\dot{Q}_{conv,1} = \dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv,2} = \dot{Q}_s \quad 2.51$$

$$\dot{Q}_s = h_1 A_s (T_{\infty,1} - T_1) = k_s A_s \frac{T_2 - T_1}{L_s} = h_2 A_s (T_2 - T_{\infty,2}) \quad 2.52$$

$$\dot{Q}_s = \frac{T_{\infty,1} - T_1}{1/h_1 A_s} = \frac{T_2 - T_1}{L_s/k_s A_s} = \frac{T_2 - T_{\infty,2}}{1/h_2 A_s} \quad 2.53$$

$$\dot{Q}_s = \frac{T_{\infty,1} - T_1}{(R_{conv,1})_s} = \frac{T_2 - T_1}{(R_{cond})_s} = \frac{T_2 - T_{\infty,2}}{(R_{conv,2})_s} \quad 2.54$$

$$\dot{Q}_s = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{(R_T)_s} \quad 2.55$$

Avec :

$$(R_T)_s = (R_{conv,1})_s + (R_{cond})_s + (R_{conv,2})_s \quad 2.56$$

$$(R_T)_s = \frac{1}{h_1 A_s} + \frac{L_s}{k_s A_s} + \frac{1}{h_2 A_s} \quad 2.57$$

En appliquant la forme de bilan exergétique sous forme de taux à la paroi du sol, on obtient :

$$(\dot{X}_{in})_S - (\dot{X}_{ext})_S - (\dot{X}_{détruit})_S = (\Delta\dot{X}_{système})_S \quad 2.58$$

L'exergie est obtenue en multipliant l'énergie du système considéré par le facteur de Carnot. Ainsi, on a donc :

$$(\dot{X}_{in})_S = \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad 2.59$$

$$(\dot{X}_{ext})_S = \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad 2.60$$

D'où on a :

$$\dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - (\dot{X}_{détruit})_S = (\Delta\dot{X}_{système})_S \quad 2.61$$

Or :

$$(\Delta\dot{X}_{système})_S = 0 \quad 2.62$$

$$\dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - (\dot{X}_{détruit})_S = 0 \quad 2.63$$

$$(\dot{X}_{détruit})_S = \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) - \dot{Q}_S \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad 2.64$$

$$(\dot{X}_{détruit})_S = \dot{Q}_S \left(\frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2}\right) \quad 2.65$$

Dans les deux cas de figure précédent, on a :

$$(\dot{X}_{détruit})_S = \frac{(\Delta X_{détruit})_S}{\Delta t} = \frac{(X_{détruit})_S - 0}{\Delta t} \quad 2.66$$

$$(X_{détruit})_S = (\dot{X}_{détruit})_S \Delta t \quad 2.67$$

$$\Delta t = n \frac{T_0 - T_{\infty,2}}{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}} \quad 2.68$$

Δt représente les heures équivalentes de fonctionnement en charge et $(X_{détruit})_S$ l'exergie consommée à travers le sol.

2.4. Analyse exergetique du système de Climatisation

Pour ce sous-système, on suppose qu'il s'agit d'un système ouvert. L'analyse exergetique pour le système de Climatisation du modèle de pièce est effectuée là où l'air humide entre à la condition d'entrée et traverse le mur en arrivant à la condition de sortie. L'exergie à la condition

d'entrée est nulle puisqu'elle est identique à la condition de référence. L'analyse exergétique du système de Climatisation est calculée sur la base du schéma de Figure 2-8.

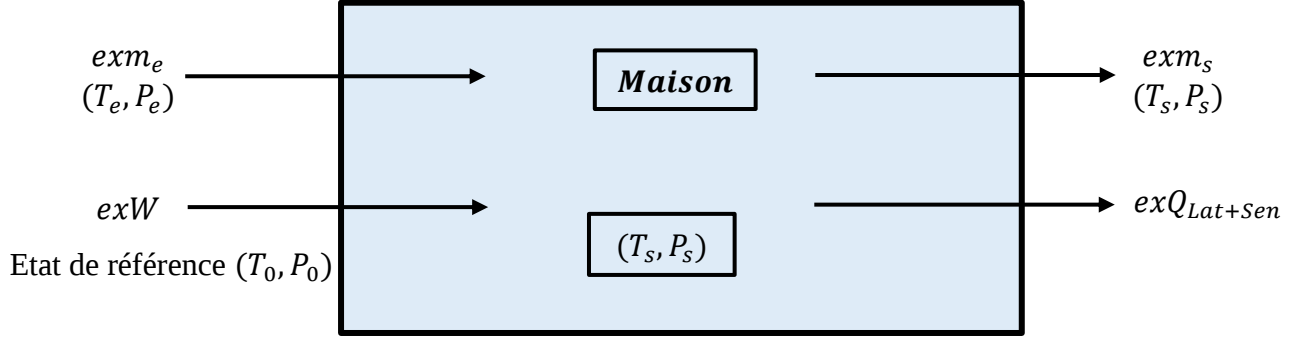


Figure 2-8 : Schéma de principe du bâtiment en tant que système ouvert.

Le bilan exergétique est donné par :

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = exW + exm_e - exm_s - exQ_{Lat+Sen} \quad 2.69$$

$$exW + exm_e = exm_s + exQ_{Lat+Sen} + T_0 \Delta \dot{S}_{gen} \quad 2.70$$

Avec :

$exm_e = 0$, puisque le système est en équilibre avec l'environnement.

$exW = ex_{elect}$, nécessaire au système de Climatisation.

$ex_{elect} = W_{elect} \times 2,1$, où 2,1 provient de l'exergie du combustible due aux rendements de production et de transmission [20].

$$exm_s = m_{air} \times ex_{tot,a}. \quad 2.71$$

$ex_{tot,a}$ est l'exergie totale de l'air humide aux conditions intérieures du bâtiment et est donné par :

$$ex_{tot,a} = (c_{p,a} + w \cdot c_{p,v}) T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + (1 + \Phi) R_a T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad 2.72$$

$$+ R_a T_0 \left[(1 + \Phi) \ln \frac{1 + \Phi_0}{1 + \Phi} + \Phi \ln \frac{\Phi}{\Phi_0} \right]$$

* $c_{p,a}$ Capacité thermique à pression constante pour l'air sec exprimée en $J.kg^{-1}.K^{-1}$;

* $c_{p,v}$ Capacité thermique à pression constante pour l'air humide exprimée en $J.kg^{-1}.K^{-1}$

* w est le taux d'humidité ;

* R_a est la constante spécifique de l'air sec exprimée en $J..mol^{-1}.K^{-1}$

* P_0 est la pression de référence exprimée en kPa ;

- ✱ T_0 est la température de référence exprimée en K ;
- ✱ T est la température ambiante actuelle exprimée en K ;
- ✱ Φ est l'humidité relative ;
- ✱ Φ_0 est l'humidité relative à la température de référence ;

L'exergie thermique sensible est une composante de l'énergie totale utile contenue dans le système. Elle est associée à la température d'un matériau ou d'une substance. Elle est appelée "sensible" parce qu'elle est perceptible ou détectable par les sens, en particulier par la sensation de chaleur ou de froid. Elle est donnée par :

$$exQ_{sen} = Q_{sen} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad 2.73$$

Q_{sen} étant la chaleur thermique sensible.

L'énergie thermique latente est une composante de l'énergie totale contenue dans un système, et elle est associée aux changements d'état de la matière, tels que la fusion (passage de solide à liquide) et la vaporisation (passage de liquide à gaz). Contrairement à l'énergie thermique sensible, qui est liée à la température, l'énergie thermique latente est liée au changement de phase d'une substance, et elle est souvent invisible. Elle est donnée par :

$$exQ_{Lat} = \dot{m}_w \times ex_{tot,w} \quad 2.74$$

$ex_{tot,w}$ qui est l'exergie totale de l'air humide transformée à l'état intérieur du bâtiment est donnée par :

$$ex_{tot,w} = h_f(T) - h_g(T_0) - T_0 s_f(T) + T_0 s_g(T_0) + [P - P_{sat}(T)] v_f(T) - R_v T_0 \ln \varphi_0 \quad 2.75$$

- $ex_{tot,w}$ exprimée en $J.kg^{-1}$;
- h l'enthalpie spécifique de l'air humide exprimée en $J.kg^{-1}$;
- s est l'entropie spécifique de l'air humide en $J.kg^{-1}.K^{-1}$;
- P est la pression à laquelle l'air humide est soumis exprimée en kPa ;
- $P_{sat}(T)$ est la pression des vapeurs saturantes à la température T exprimée en kPa ;
- $v_f(T)$ est le volume massique de l'air humide à la température. Il est exprimé en l ;
- R_v est la constante spécifique de l'air humide exprimée en $J.mol^{-1}.K^{-1}$;
- T_0 est la température de référence en K ;
- φ_0 est l'humidité relative à la température de référence.

Ainsi, l'exergie consommée dans ce sous-système sera égale à l'entropie générée, qui est présentée ci-dessous :

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = exW + exm_e - exm_s - exQ_{Lat+Sen} \quad 2.76$$

Dans cette analyse, les propriétés thermodynamiques de l'air humide dans les conditions ambiantes et intérieures peuvent être traitées comme celles d'un mélange de deux gaz parfaits : l'air sec (a) et la vapeur d'eau (v). L'objectif principal d'un procédé de climatisation est de prélever le mélange d'air intérieur (a+v) à des conditions différentes de celles ambiantes.

La modélisation mathématique nous a permis d'obtenir la destruction exergetique pour chacun des quatre sous-systèmes étudiés. L'évaluation de l'efficacité énergétique de ces sous-systèmes thermiques, et le choix de la température de référence est un facteur déterminant dans cette analyse. La section suivante nous présente une méthode détaillée pour orienter le choix de la température de référence.

3. Matériels et méthode

3.1. Matériels

Les constructions des bâtiments dans la ville de Yaoundé sont généralement réalisées avec des matériaux locaux comme les blocs de béton, les fenêtre en verre, le sol en béton. Les propriétés de ces matériaux utilisés pour nos sous-systèmes sont présentées dans le tableau 2-2.

Tableau 2-1 : Caractéristiques des matériaux utilisés

Matériau	Epaisseur (mm)	Résistance thermique (K/W)	Densité (Kg/m^3)	Conductivité thermique (W/m.K)	Capacité thermique à P = Constante $J/(Kg.K)^{-1}$
Parpaing	150	0,21	2300	1,8	880
Verre	4	0,65	2210	1,4	730
béton	100	0,21	1500	0,3	800

Pour effectuer nos différents travaux, nous avons utilisé outils à savoir :

- ✱ Un ordinateur de marque DELL de processeur Intel core i7, de RAM de 12Go et un disque dur interne SSD de 128Go pour nos différentes simulations ;
- ✱ Le logiciel MS Excel pour faciliter les calculs et le tracé des différents graphiques ;
- ✱ Le serveur en ligne TLV pour les données thermodynamiques ;
- ✱ Le serveur en ligne NIST WebBook de Chimie pour d'autres données thermodynamiques.

Tableau 2-2 : Paramètres météorologiques pour les mois de février et août 2020.

Jours	Février 2020					Août 2020				
	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	T (°C)	$q_{rad,h}$ (J/m ²)	$q_{rad,t}$ (J/m ²)	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	T (°C)	$q_{rad,h}$ (J/m ²)	$q_{rad,t}$ (J/m ²)
1	20	32	24,6	5,773	3,999	21	25	22,8	3,152	2,560
2	21	32	25,6	5,534	3,963	21	28	23,4	4,176	2,692
3	21	31	25,3	5,283	3,911	21	25	22,2	3,163	2,574
4	21	30	24,6	5,017	3,840	20	23	21,3	2,744	2,389
5	22	30	25,1	4,736	3,746	20	26	22,3	3,887	2,737
6	19	27	22,8	4,742	3,742	19	26	22,1	4,207	2,737
7	15	33	24,3	7,121	3,691	19	26	22,1	4,214	2,748
8	21	31	25,1	5,314	3,870	20	25	22,2	3,568	2,722
9	21	32	25,6	5,579	3,892	20	26	22,4	3,916	2,778
10	20	32	25,4	5,834	3,889	20	27	22,8	4,238	2,783
11	20	33	25,9	6,079	3,863	20	28	22,9	4,538	2,747
12	22	31	25,8	5,063	3,785	20	28	23,2	4,547	2,760
13	20	32	24,9	5,853	3,847	21	28	24	4,261	2,819
14	20	32	26	5,859	3,833	20	29	24,1	4,840	2,706
15	21	34	26,8	6,104	3,796	20	29	24,2	4,849	2,722
16	22	33	26,7	5,620	3,808	21	29	24,1	4,579	2,816
17	22	31	25,7	5,089	3,744	21	29	24,4	4,588	2,830
18	22	32	26,2	5,369	3,770	21	27	23,9	3,980	2,874
19	22	33	26,6	5,636	3,768	22	29	24,3	4,306	2,893
20	22	34	27,4	5,892	3,739	20	25	21,9	3,646	2,831
21	24	32	26,8	4,815	3,650	20	25	22	3,652	2,841
22	23	34	27,6	5,650	3,726	20	29	23,1	4,908	2,834
23	23	35	27	5,906	3,689	21	27	23,1	4,014	2,928
24	23	34	27,4	5,658	3,696	20	24	21,9	3,283	2,732
25	23	33	26,9	5,399	3,686	20	28	22,7	4,650	2,946
26	22	32	26,2	5,402	3,673	21	27	23,6	4,033	2,961
27	20	33	26,8	6,163	3,565	21	28	23,7	4,363	2,995
28	22	33	26,3	5,673	3,634	20	28	22,6	4,671	2,989
29						19	28	22,8	4,962	2,950
30						20	27	23,1	4,382	3,034
31						20	29	22,9	4,976	2,983

3.2. Méthode

L'analyse exergétique est une approche essentielle dans l'évaluation de l'efficacité énergétique des systèmes thermiques. Elle permet de quantifier l'énergie utile d'un système et de mettre en évidence les pertes énergétiques. L'un des facteurs cruciaux dans cette analyse est le choix de la température de référence. Dans cette partie, nous explorerons dans un premier temps la

méthodologie pour faire le bon choix de température de référence spécifiques dans le contexte d'une analyse exergétique d'un bâtiment en milieux tropical et dans un deuxième temps, nous ferons une analyse exergétique avec la température de référence la plus optimale. Pour cela, nous allons effectuer l'analyse avec trois choix de température de référence et nous retiendrons celui qui entraîne la plus faible destruction exergétique. Nous prendrons ainsi :

- ✱ La température de confort $T_0 = T_c = 24^{\circ}\text{C}$;
- ✱ La température la plus élevée du mois considéré $T_0 = T_H$
- ✱ La température environnementale moyenne pour chaque jour du mois considéré ;

Le choix de la température de référence dans une analyse exergétique est une décision critique. En évaluant les trois scénarios mentionnés, nous pouvons déterminer la température de référence qui minimise la destruction exergétique pour chacun des sous-systèmes étudiés, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique des systèmes thermiques. Cette méthodologie permet une prise de décision éclairée pour optimiser les performances énergétiques des bâtiments et des systèmes. Une réduction de la destruction exergétique signifie un système plus efficace et une utilisation plus rationnelle de l'énergie.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation physique et mathématique du bâtiment étudié, en mettant en lumière la méthode utilisée pour effectuer une analyse exergétique. Nous avons débuté par l'évaluation de la température de référence générant la plus faible destruction exergétique, une étape cruciale pour notre analyse. Par la suite, nous avons réalisé une étude exergétique de chaque sous-système composant notre bâtiment. Cette démarche méthodologique nous a permis d'appréhender de manière précise les flux énergétiques et les pertes exergétiques au sein de notre système, ouvrant ainsi la voie à des recommandations stratégiques en vue d'une optimisation énergétique efficace dans un contexte tropical. À travers cette modélisation et cette analyse exergétique, nous nous engageons à contribuer activement à la réflexion et à l'action en faveur d'une gestion énergétique durable et adaptée aux spécificités climatiques des milieux tropicaux. Dans le prochain chapitre, nous présenterons les résultats obtenus et nous discuterons pour chacun d'eux.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Introduction

L'analyse exergétique offre une perspective approfondie de la performance énergétique du bâtiment, en mettant en évidence les flux et les pertes d'exergie à travers ses systèmes. Ce chapitre constitue une étape cruciale dans notre analyse approfondie de la performance énergétique d'un bâtiment implanté dans un environnement tropical, en particulier dans la ville de Yaoundé en 2020. Nous nous penchons dans un premier temps sur les résultats obtenus à travers diverses investigations et en suite sur la discussion de ceux-ci. Comme principaux résultats, nous aurons le profil de température de la ville pour les mois de février et d'août. Ces deux périodes offrent une représentation contrastée des conditions climatiques extrêmes qui caractérisent l'année dans cette région. En analysant ces données, nous pouvons mieux appréhender les variations thermiques auxquelles le bâtiment est soumis tout au long de l'année, offrant ainsi une base solide pour l'évaluation de son efficacité énergétique. Par la suite, nous nous attardons sur le choix de la température de référence optimale pour garantir un confort thermique optimal dans cet environnement tropical. En parallèle, nous examinons de près la destruction exergétique de chaque sous-système du bâtiment pour les mois considérés. Cette analyse détaillée met en lumière les pertes d'exergie et les inefficacités énergétiques, fournissant ainsi des connaissances précieuses pour l'optimisation des performances du bâtiment. Enfin, nous nous penchons sur l'analyse exergétique spécifique du bureau pour les mois les plus chauds (février) et les plus froids (août) de l'année 2020. Cette comparaison saisonnière permet d'identifier les variations de performance du bâtiment en fonction des conditions climatiques changeantes, ouvrant ainsi la voie à des recommandations stratégiques pour améliorer son efficacité énergétique et son confort thermique dans un contexte tropical fluctuant.

1. Résultats

1.1. Données météorologiques

Les courbes d'irradiance verticale et horizontale représentent des données cruciales pour comprendre le flux d'énergie solaire reçu dans une région donnée à différents moments de l'année.

Dans notre étude, nous avons analysé ces courbes pour le Cameroun, en particulier pour le mois le plus chaud et le mois le plus froid de l'année 2020. Les figures 3-1 et 3-2 fournissent des informations essentielles pour la conception et l'optimisation des systèmes énergétiques solaires dans la région, permettant aux chercheurs et aux professionnels de mieux comprendre la variabilité saisonnière de l'irradiance solaire et d'adapter en conséquence les stratégies de gestion de l'énergie.

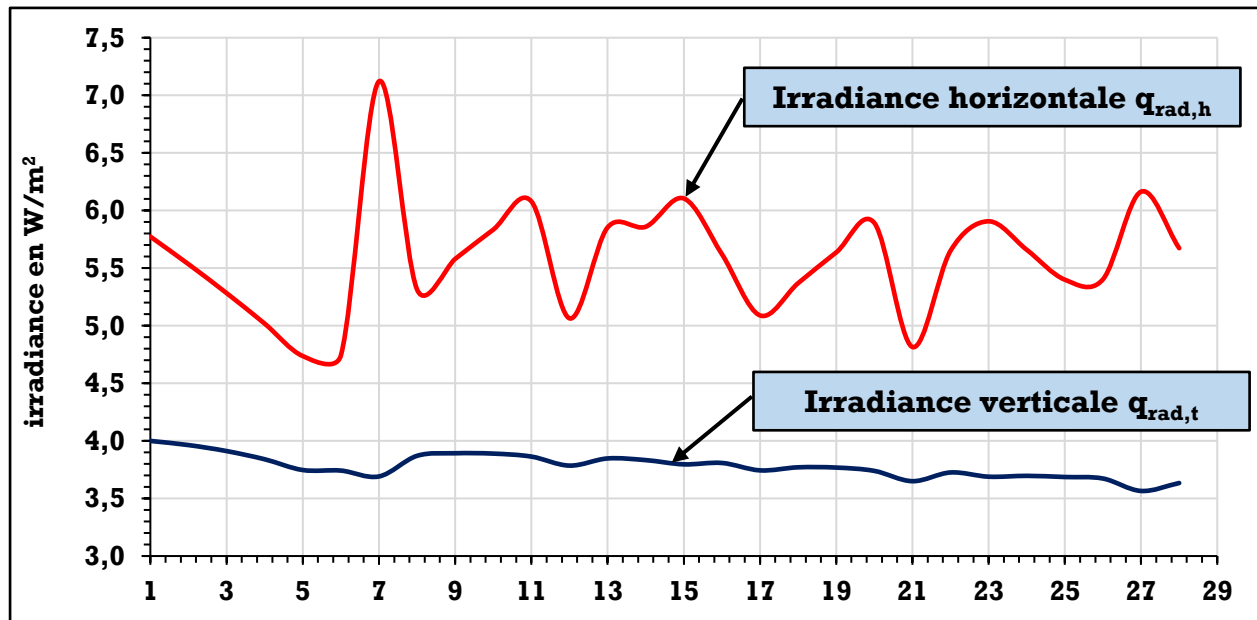


Figure 3-1 : Variation de l'irradiance verticale et horizontale pour février 2020.

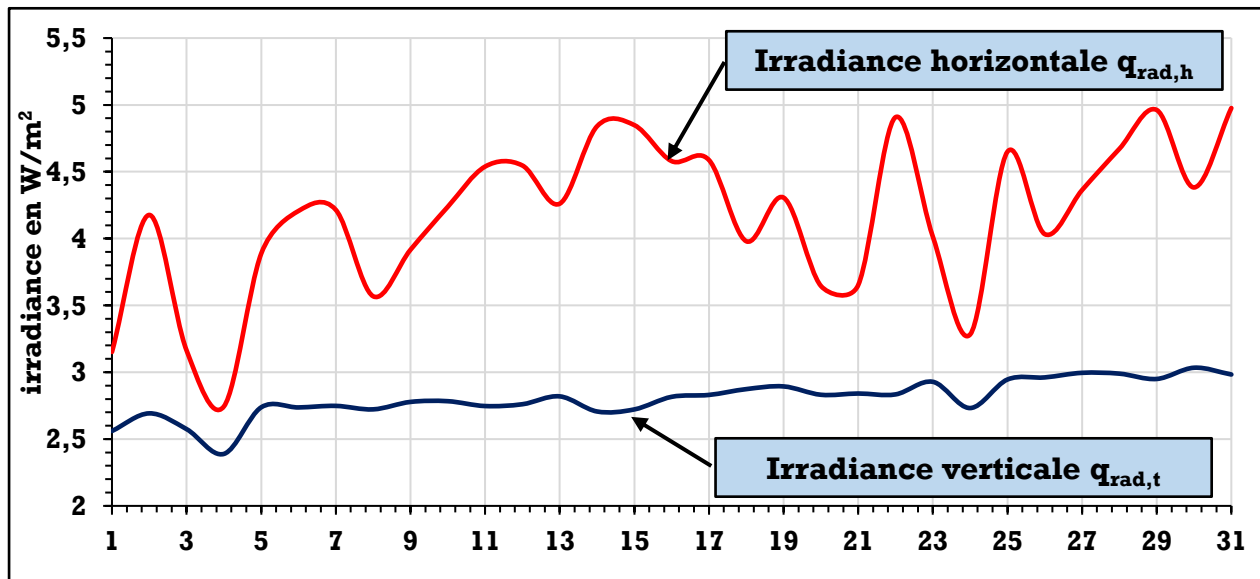


Figure 3-2 : Variation de l'irradiance verticale et horizontale pour Août 2020

L'irradiance solaire joue un rôle significatif dans le chauffage de l'air et des surfaces, ce qui influence directement les conditions thermiques ambiantes. Ainsi, la compréhension du comportement de l'irradiance solaire nous permettra d'appréhender plus précisément les variations saisonnières et diurnes (tout au long d'une journée) de la température, ce que nous explorerons maintenant à travers les profils de température.

1.2. Profil de température

Les températures pour les mois considérés sont données par les graphes suivants :

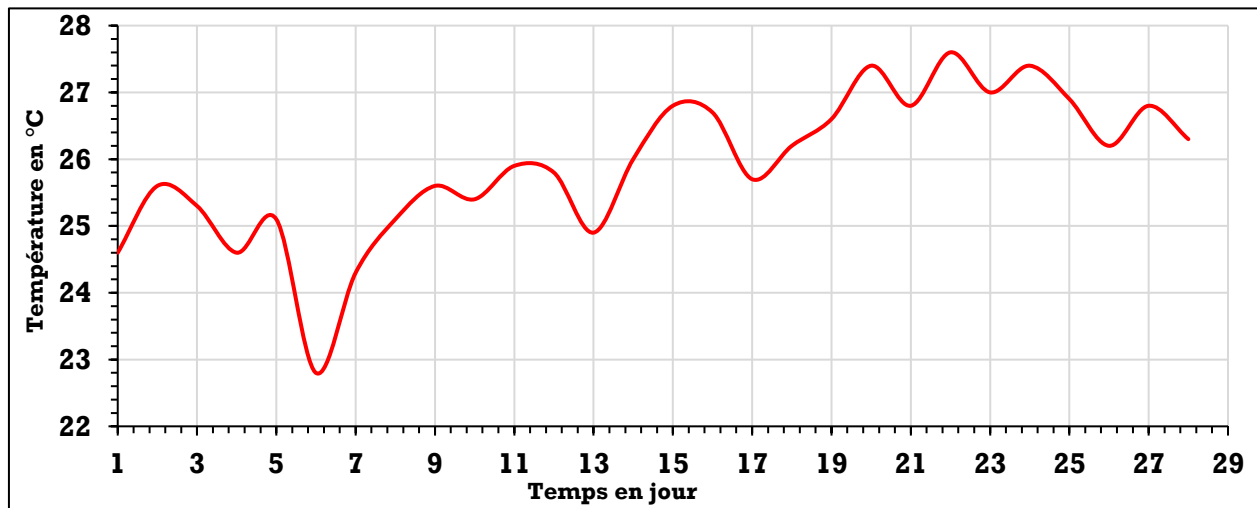


Figure 3-3 : Profil de température pour le mois de Février 2020

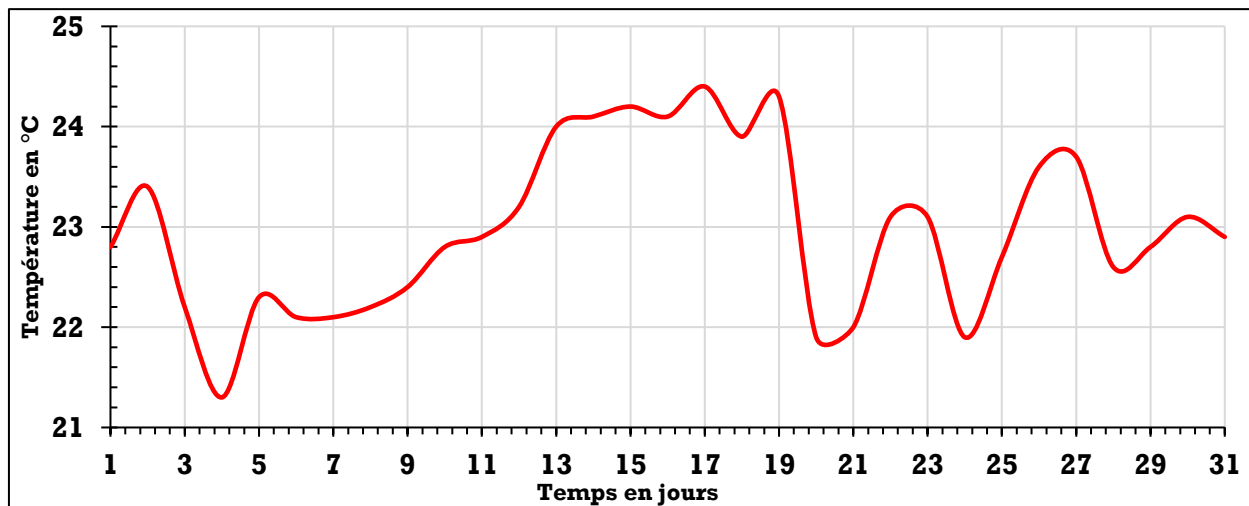


Figure 3-4 : Profil de température pour le mois d'août 2020

Les figure 3-3 et 3-4 précédentes fournissent une représentation graphique essentielle des variations de température dans la ville de Yaoundé sur une période de février et août 2020. Dans cette analyse, nous examinons les profils de température pour le mois le plus chaud et le mois le plus froid de l'année. Ces courbes permettent de visualiser les changements saisonniers et diurnes de la température, offrant ainsi un aperçu précieux des conditions thermiques dans cette région.

Maintenant que nous avons examiné le profil de température pour la ville de Yaoundé et identifié les mois présentant des températures extrêmes, nous passons à la détermination de la température de référence qui implique une meilleure analyse exergétique.

1.3. Choix de la température de référence

Tableau 3-1 : Paramètre thermodynamique des surface interne et externe des différentes parois pour le mois le plus chaud (Février) et le mois le plus froid (Août) de l'année 2020.

Jour	Février 2020						Août 2020					
	Mur		Fenêtre		Sol		Mur		Fenêtre		Sol	
	T_{1m} (°C)	T_{2m} (°C)	T_{1f} (°C)	T_{2f} (°C)	T_{1s} (°C)	T_{2s} (°C)	T_{1m} (°C)	T_{2m} (°C)	T_{1f} (°C)	T_{2f} (°C)	T_{1s} (°C)	T_{2s} (°C)
1	295,32	291,47	297,79	298,54	298,52	283,95	293,35	289,06	295,99	296,74	296,71	281,33
2	296,42	292,62	298,79	299,54	299,52	285,36	294,01	289,80	296,59	297,34	297,31	282,20
3	296,09	292,25	298,49	299,24	299,22	284,93	292,69	288,34	295,39	296,14	296,10	280,48
4	295,32	291,40	297,79	298,54	298,52	283,93	291,71	287,24	294,49	295,24	295,20	279,19
5	295,87	291,97	298,29	299,04	299,02	284,63	292,80	288,47	295,49	296,24	296,20	280,64
6	293,35	289,23	295,99	296,74	296,71	281,37	292,58	288,23	295,29	296,04	296,00	280,36
7	294,99	291,03	297,49	298,24	298,21	283,55	292,58	288,23	295,29	296,04	296,00	280,36
8	295,87	291,95	298,29	299,04	299,02	284,64	292,69	288,34	295,39	296,14	296,10	280,49
9	296,42	292,54	298,79	299,54	299,52	285,36	292,91	288,59	295,59	296,34	296,30	280,78
10	296,20	292,30	298,59	299,34	299,32	285,08	293,35	289,08	295,99	296,74	296,71	281,35
11	296,75	292,90	299,09	299,84	299,82	285,80	293,46	289,20	296,09	296,84	296,81	281,50
12	296,64	292,76	298,99	299,74	299,72	285,63	293,79	289,56	296,39	297,14	297,11	281,93
13	295,65	291,68	298,09	298,84	298,82	284,378	294,66	290,53	297,19	297,94	297,91	283,06
14	296,86	293,01	299,19	299,94	299,92	285,94	294,77	290,66	297,29	298,04	298,01	283,21
15	297,73	293,97	299,99	300,74	300,73	287,08	294,88	290,78	297,39	298,14	298,11	283,35
16	297,62	293,84	299,89	300,64	300,63	286,93	294,77	290,65	297,29	298,04	298,01	283,21
17	296,53	292,62	298,89	299,64	299,62	285,49	295,10	291,02	297,59	298,34	298,31	283,63
18	297,07	293,23	299,39	300,14	300,12	286,21	294,55	290,40	297,09	297,84	297,81	282,91
19	297,51	293,72	299,79	300,54	300,53	286,79	294,99	290,89	297,49	298,24	298,21	283,48
20	298,39	294,69	300,59	301,34	301,33	287,93	292,37	287,98	295,09	295,84	295,80	280,07
21	298,61	294,92	300,79	301,54	301,53	288,21	292,48	288,10	295,19	295,94	295,90	280,21
22	297,95	294,20	300,19	300,94	300,93	287,36	293,68	289,45	296,29	297,04	297,01	281,80
23	298,39	294,68	300,59	301,34	301,33	287,93	293,68	289,44	296,29	297,04	297,01	281,77
24	297,84	294,07	300,09	300,84	300,83	287,21	292,37	287,9	295,09	295,84	295,80	280,06
25	297,07	293,22	299,39	300,14	300,12	286,21	293,24	288,96	295,89	296,64	296,61	281,22
26	297,73	293,96	299,99	300,74	300,73	287,09	294,23	290,04	296,79	297,54	297,51	282,48
27	297,18	293,34	299,49	300,24	300,22	286,36	294,33	290,17	296,89	297,64	297,61	282,63
28	298,83	295,16	300,99	301,74	301,73	288,50	293,13	288,84	295,79	296,54	296,51	281,08
29							293,35	289,08	295,99	296,74	296,71	281,37
30							293,68	289,44	296,29	297,04	297,01	281,78
31							293,46	289,21	296,09	296,84	296,81	281,51

Pour effectuer le choix optimal de la température de référence dans notre étude, nous avons évalué trois scénarios. Le tableau 3-1 présente les valeurs des températures des différentes parois de notre système. A l'aide de ces températures, nous avons déterminé l'état de référence idéal qui minimise la destruction exergetique pour chacun des sous-systèmes étudiés, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique des systèmes thermiques.

Le tableau 3-2 présente les valeurs journalières des destructions exergetiques obtenue pour chaque choix indépendant des températures de références.

Tableau 3-2 : Valeurs journalières de la destruction exergetique en MégaJoule (MJ) pour chaque choix de température de référence

Jour	Février 2020			Août 2020		
	$T_0 = 24^{\circ}\text{C}$	$T_0 = 35^{\circ}\text{C}$	$T_0 = T_e$	$T_0 = 24^{\circ}\text{C}$	$T_0 = 29^{\circ}\text{C}$	$T_0 = T_e$
1	1,5703838	1,67147758	1,57654429	1,60926679	1,65561912	1,59817901
2	1,55341321	1,6538666	1,5687186	1,59657389	1,64270811	1,59213176
3	1,55954133	1,66022512	1,5703254	1,61972611	1,66625078	1,6019573
4	1,57168644	1,67282845	1,57784956	1,6366306	1,68343622	1,60996979
5	1,56414583	1,66500247	1,5736196	1,61724519	1,66372862	1,60017372
6	1,60433775	1,70670928	1,59326987	1,621092	1,66763919	1,60263135
7	1,57689691	1,67823572	1,57851017	1,62108794	1,66763506	1,60262731
8	1,5643003	1,66516266	1,57377464	1,61947608	1,66599655	1,60170879
9	1,55451624	1,65501196	1,56982779	1,6152085	1,66165819	1,60136615
10	1,55839264	1,65903272	1,56983498	1,6085909	1,65493185	1,59750584
11	1,54862968	1,64890252	1,56589201	1,60638264	1,6526873	1,59598638
12	1,55125112	1,65162216	1,56530344	1,60035283	1,64655444	1,59200837
13	1,57002707	1,67110388	1,57818827	1,58621235	1,63216225	1,58582012
14	1,54857927	1,64884911	1,56650215	1,58385231	1,62976095	1,5841309
15	1,53465816	1,63440372	1,56024473	1,58186064	1,62773423	1,58280873
16	1,53689334	1,63672275	1,56184314	1,58402302	1,62993452	1,58430166
17	1,5534197	1,65387217	1,56938763	1,57806119	1,62386784	1,58289754
18	1,54518191	1,64532372	1,56440144	1,58838221	1,63437019	1,58731765
19	1,53892543	1,63883117	1,56323518	1,58022502	1,62606958	1,58184164
20	1,52335997	1,62268077	1,55275978	1,62549531	1,67211614	1,6056363
21	1,74353886	1,85100816	1,77109673	1,62348687	1,67007392	1,60432655
22	1,35930001	1,45255191	1,39046318	1,60213444	1,64836821	1,59310971
23	1,63637143	1,73987572	1,66430077	1,60270896	1,64895239	1,59368249
24	1,38947309	1,48384304	1,41733805	1,62572317	1,67234784	1,60586255
25	1,33840749	1,43089485	1,36273179	1,61035576	1,65672567	1,59858247
26	1,70792812	1,81408785	1,72835458	1,59434295	1,64043613	1,59125361
27	1,39608843	1,49070992	1,42036667	1,59214113	1,63819559	1,58972824
28	1,93420403	2,04872929	1,95709891	1,61236181	1,65876479	1,59989803
29				1,60814156	1,65447495	1,59705832
30				1,60248301	1,64872264	1,59345722
31				1,60612193	1,65242221	1,59572664

Pour mieux visualiser les valeurs obtenues, les figures 3-5 et 3-6 présentent les courbes des destructions exergétiques mensuelles pour les différentes températures de référence et pour les deux périodes considérées. Ces courbes offrent une représentation graphique détaillée permettant de comparer l'impacts des choix de température de référence sur la destruction exergétique, facilitant ainsi l'interprétation des données et la prise de décisions éclairées. Elles illustrent les destructions exergétiques mensuelles pour nos trois choix de température de référence. La figure 3-5 se concentre sur le mois de février, tandis que la figure 3-6 couvre le mois d'août. Chaque courbe représente une température de référence distincte, permettant d'analyser comment le choix de l'état de référence influence notre étude.

Le choix de la température de référence est crucial pour l'évaluation précise de la destruction exergétique. Une température de référence inappropriée peut conduire à des sous-estimations ou des surestimations de la consommation énergétique et exergétique du système. En choisissant judicieusement les températures de référence et en mettant en œuvre des stratégies d'optimisation appropriées, il est possible de réduire significativement la destruction exergétique et de promouvoir une utilisation plus durable de l'énergie.

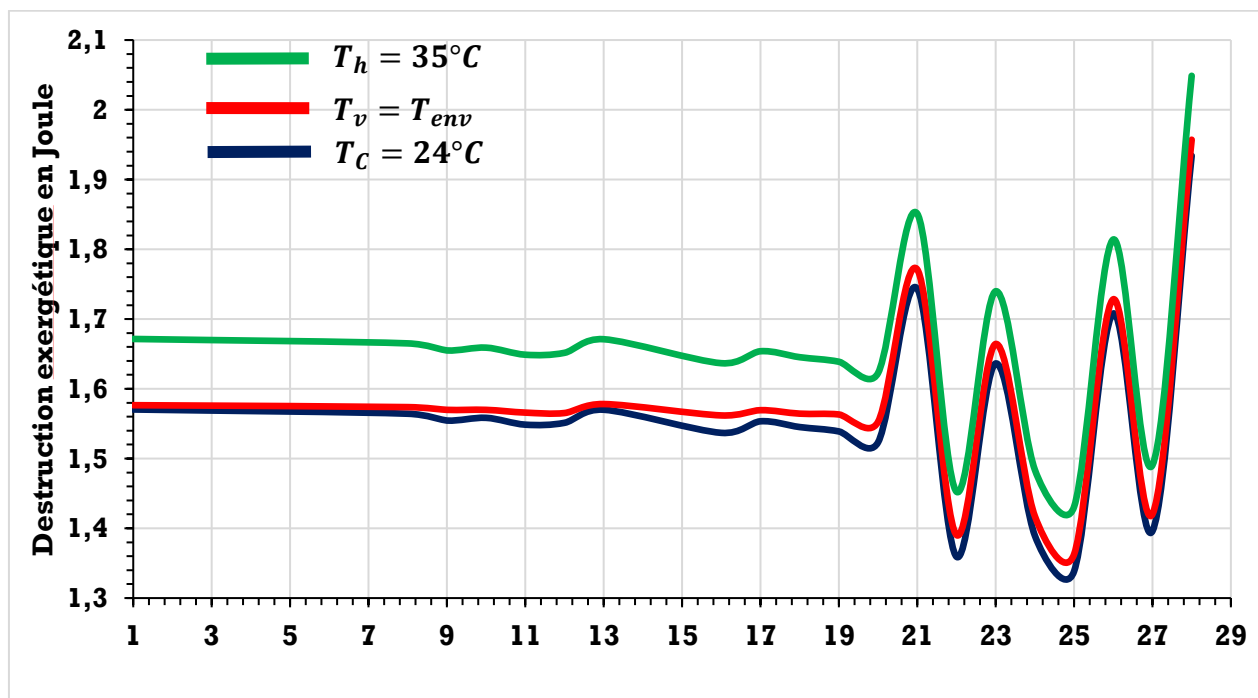


Figure 3-5 : Destruction exergétique du mois de Février 2020 pour tous les choix de température

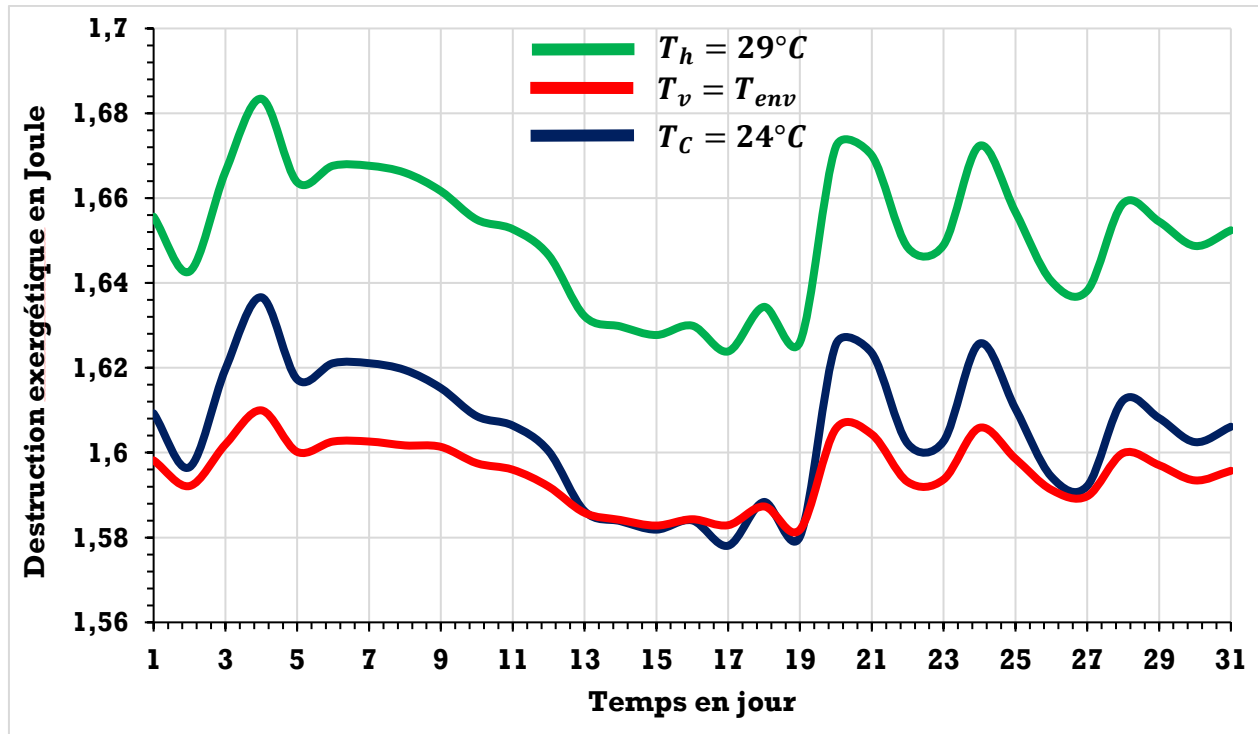


Figure 3-6 : Destruction exergétique du mois d'Août 2020 pour tous les choix de température

1.4. Analyse exergétique

1.4.1. Analyse exergie mensuelle pour chaque sous-système

Cette analyse exergétique a été réalisée pour chaque sous-système au cours de chaque jour des mois aux températures extrêmes (le mois le plus chaud et le mois le plus froid). Nous présenterons ensuite, de manière détaillée, les différentes étapes du calcul menant à la destruction exergétique de chaque sous-système. Le calcul présenté est effectué pour le premier jour de chaque mois.

1.4.1.1. Calcul pour le mois de février 2020

Pour calculer la destruction exergétique pour cette journée, nous avons tout d'abord déterminé le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement et ensuite la destruction exergétique des différents sous-systèmes.

* **Heures équivalentes de fonctionnement**

Les heures équivalentes de fonctionnement d'un système dans une analyse exergétique permettent de normaliser les performances du système, facilitant ainsi la comparaison de son efficacité énergétique et de ses pertes exergétiques dans différentes conditions de fonctionnement.

$$\Delta t = n \frac{T_0 - T_{\infty,2}}{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}} = 10h \times \frac{297,75 - 298,70}{297,75 - 298,70} = 10h \quad 3.1$$

Pour cette température de référence, le nombre d'heure équivalent de fonctionnement est de **10h** par jour.

✱ **Pour le sous-système « mur plat »**

Le sous-système à une résistance thermique $(R_T)_m = 0,21K/W$. Nous avons donc :

$$\dot{Q}_m = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{(R_T)_m} \quad 3.2$$

$$\dot{Q}_m = \frac{298,7 - 297,75}{0,21} = 4,52W \quad 3.3$$

$$\dot{X}_m = 4,52 \left(\frac{297,75}{295,33} - \frac{297,75}{291,47} \right) = 0,06W \quad 3.4$$

$$X_m = 0,6J \quad 3.5$$

La destruction exergetique du sous-système « mur plat » pour le 01/02/2020 est de **0,6J**

✱ **Pour le sous-système « fenêtre »**

Le sous-système à une résistance thermique $(R_T)_f = 0,65K/W$. Nous avons donc :

$$\dot{Q}_f = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{(R_T)_f} \quad 3.6$$

$$\dot{Q}_f = \frac{298,7 - 297,75}{0,65} = 1,46W \quad 3.7$$

$$\dot{X}_f = 1,46 \times \left(\frac{297,75}{298,55} - \frac{297,75}{297,79} \right) = 0,00369W \quad 3.8$$

$$X_f = 0,0369J \quad 3.9$$

La destruction exergetique du sous-système « fenêtre » pour le 01/02/2020 est de **0,0369J**.

✱ **Pour le sous-système « sol »**

Le sous-système à une résistance thermique $(R_T)_s = 0,21K/W$. Nous avons donc :

$$\dot{Q}_s = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{(R_T)_s} \quad 3.10$$

$$\dot{Q}_s = \frac{298,7 - 297,75}{0,21} = 4,52W \quad 3.11$$

$$\dot{X}_s = 4,52 \times \left(\frac{297,75}{283,95} - \frac{297,75}{298,52} \right) = 0,23W \quad 3.12$$

$$X_s = 2,3J \quad 3.13$$

La destruction exergetique du sous-système « sol » pour le 01/02/2020 est de **2,3J**.

✱ **Pour le sous-système « Climatisation »**

La destruction exergetique ($T_0 \Delta \dot{S}_{gen}$) pour ce sous-système est donnée par la formule :

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = exW + exm_e - exm_s - exQ_{Lat+Sen} \quad 3.14$$

$exm_e = 0$, puisque le système est en équilibre avec l'environnement.

$$ex_{elect} = W_{elect} \times 2,1, \quad 3.15$$

$$\text{Or } W_{elect} = 1,05kW \quad 3.16$$

$$\text{D'où } ex_{elect} = 1,05 \times 2,1 = 2,21kW \quad 3.17$$

$$exm_s = m_{air} \times ex_{tot,a}. \quad 3.18$$

$$ex_{tot,a} = (c_{p,a} + w \cdot c_{p,v})T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + (1 + \Phi)R_a T_0 \ln \frac{P}{P_0} \\ + R_a T_0 \left[(1 + \Phi) \ln \frac{1 + \Phi_0}{1 + \Phi} + \Phi \ln \frac{\Phi}{\Phi_0} \right] \quad 3.19$$

A l'état de référence, on a : $T_0 = 297,75K$; $P_0 = 1atm$; $w_0 = 0,6$

$$\text{On a } P_{sat}(T_0) = P_0 \cdot \exp \left(13,7 - \frac{5120}{T_0} \right) \quad 3.20$$

$$P_{sat}(T_0) = P_0 \cdot \exp \left(13,7 - \frac{5120}{297,75} \right) = 0,03atm \quad 3.21$$

$$P_{sat}(T_0) = 0,03atm \quad 3.22$$

L'humidité relative à la température de référence est donnée par :

$$\Phi_0 = \frac{M_a}{M_v} \times \frac{0,622}{(P_0/w_0 \times P_{sat}(T_0)) - 1} = \frac{28,97}{18,015} \times \frac{0,622}{(1/0,6 \times 0,03) - 1} = 0,0185 \quad 3.23$$

A partir de la table des vapeurs saturée, on obtient les valeurs de l'enthalpie suivante :

- Enthalpie spécifique de la vapeur saturée : $h_g(298,70) = 2547,54kJ/Kg$
- Enthalpie spécifique de l'eau saturée : $h_f(297,75) = 103,16kJ/Kg$

L'humidité relative est donnée par :

$$w = \frac{C_{p,a}(T_0 - T)}{h_g(T) - h_f(T_0)} \quad 3.24$$

$$\Phi_0 = \frac{28,97}{18,015} \times \frac{0,622}{(1/0,6 \times 0,03) - 1} = 0,0185 \quad 3.25$$

$$\Phi = \frac{M_a}{M_v} \times w = \frac{28,97}{18,015} \times 0,00039 = 0,00063 \quad 3.26$$

$$ex_{tot,a} = (1,003 + 0,00039 \times 1,872) \times 297,75 \times \left(\frac{298,70}{297,75} - 1 - \ln \frac{298,70}{297,75} \right) + 0,287 \times 297,75 \quad 3.27$$

$$\times \left[(1 + 0,00063) \times \ln \frac{1 + 0,0185}{1 + 0,00063} + 0,00063 \times \ln \frac{0,00063}{0,0185} \right] \\ ex_{tot,a} = 1,34 \text{ kJ/kg} \quad 3.28$$

L'exergie sensible est donnée par :

$$exQ_{sen} = Q_{sen} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) = 2700 \left(1 - \frac{297,75}{298,70} \right) = 8,57 \text{ kJ} \quad 3.39$$

$$exQ_{sen} = 8,57 \text{ kJ} \quad 3.40$$

L'exergie latente est donnée par :

$$exQ_{Lat} = \dot{m}_w \times ex_{tot,w} \quad 3.41$$

Avec :

$$ex_{tot,w} = h_f(T) - h_g(T_0) - T_0 s_f(T) + T_0 s_g(T_0) + [P - P_{sat}(T)] v_f(T) - R_v T_0 \ln \varphi_0 \quad 3.42$$

$$ex_{tot,w} = h_f(298,70) - h_g(297,75) - 297,75 \times s_f(298,70) + 297,75 \times s_g(297,75) + [P - P_{sat}(298,70)] v_f(T) - R_v \times 297,75 \times \ln \varphi_0 \quad 3.43$$

$$ex_{tot,w} = 103,165 - 2547,54 + 297,75 \times 6,5777 + 297,75 \times 154,21 + (1 - 0,03) 0,018 - 0,461 \times 297,75 \times \ln 0,6 \quad 3.44$$

$$\text{D'où} \quad ex_{tot,w} = 41583,28 \text{ kJ/kg} \quad 3.45$$

L'exergie du système de climatisation est donc :

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = exW + exm_e - exm_s - exQ_{Lat+Sen} \quad 3.46$$

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = 2,21 \times 10^3 + 0 - 0,05 \times 1,34 \times 10^3 - 8,57 \times 10^3 - 0,022 \times 41583,28 \quad 3.47$$

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = 1281,53J \quad 3.48$$

La destruction exergétique du sous-système « climatisation » pour le 01/02/2020 est de **1281,53J**.

Le calcul est ainsi réalisé pour chaque jour du mois et les différents résultats sont consignés dans le tableau 3-7.

Tableau 3-3 : Exergie détruite en joule (J) pour chaque sous système pour le mois de Février 2020

Jour	X_m en Joule	X_f en Joule	X_s en Joule	$T_0 \Delta \dot{S}_{gen}$ en Joule
1	0,60226	0,03695	2,31	1281,53
2	0,59093	0,03682	2,23	1282,471
3	0,5986	0,03686	2,26	1280,89
4	0,61216	0,03695	2,31	1281,53
5	0,60728	0,03689	2,28	1281,545
6	0,64977	0,03717	2,45	1279,054
7	0,62004	0,03698	2,33	1279,962
8	0,61122	0,03689	2,27	1281,545
9	0,60262	0,03682	2,23	1282,431
10	0,60699	0,03685	2,25	1280,562
11	0,59785	0,03679	2,21	1281,49
12	0,60247	0,0368	2,22	1279,252
13	0,61908	0,03691	2,29	1283,85
14	0,59747	0,03678	2,20	1282,819
15	0,58186	0,03668	2,14	1284,37
16	0,58495	0,03669	2,15	1284,695
17	0,60679	0,03681	2,23	1282,144
18	0,59638	0,03675	2,19	1282,166
19	0,58802	0,0367	2,16	1285,02
20	0,5716	0,03661	2,09	1282,42
21	1,04473	0,06727	3,83	1277,272
22	0,21341	0,01349	0,78	1289,552
23	0,81297	0,05198	2,98	1280,169
24	0,27626	0,01736	1,01	1286,866
25	0,157	0,00964	5,74	1288,629
26	0,95197	0,05977	3,49	1278,479
27	0,28223	0,0174	1,03	1287,171
28	1,4524	0,09392	5,31	1271,835

Pour mieux visualiser ces données, nous avons tracé les courbes des destructions exergétiques pour chaque sous-système sur une période de 28 jours. Chaque courbe représente l'évolution des pertes d'énergie utile quotidiennes

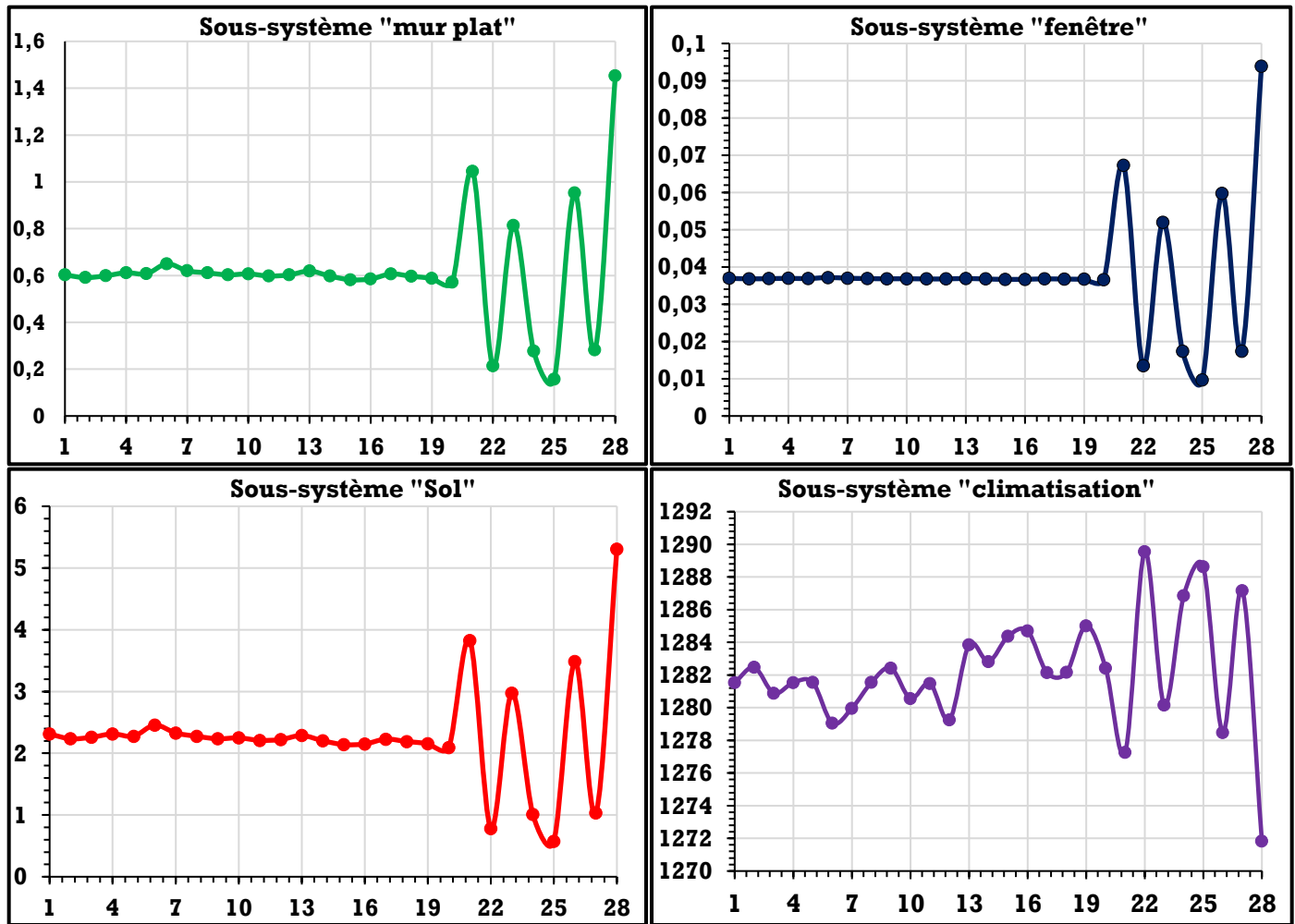


Figure 3-7: Destruction exergétique journalière (en J) pour chaque sous-système pour Février 2024

1.4.2. Calcul pour le mois d'août 2020

Cette analyse a été effectuée pour tous les sous-système durant chaque jour des mois aux températures extrêmes

Pour calculer la destruction exergétique pour cette journée, nous avons tout d'abord déterminé le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement et ensuite la destruction exergétique des différents sous-systèmes.

✱ Heures équivalentes de fonctionnement

Les heures équivalentes de fonctionnement d'un système dans une analyse exergétique permettent de normaliser les performances du système, facilitant ainsi la comparaison de son efficacité énergétique et de ses pertes exergétiques dans différentes conditions de fonctionnement.

$$\Delta t = n \frac{T_0 - T_{\infty,2}}{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}} = 10h \times \frac{295,95 - 296,90}{295,95 - 296,90} = 10h \quad 3.49$$

Pour cette température de référence, le nombre d'heure équivalent de fonctionnement est de **10h** par jour.

✱ **Pour le sous-système « mur plat »**

Le sous-système à une résistance thermique $(R_T)_T = 0,21K/W$. Nous avons donc :

$$\dot{Q}_m = \frac{296,90 - 295,95}{0,21} = 4,51W \quad 3.50$$

$$\dot{X}_m = 4,51 \left(\frac{295,95}{293,35} - \frac{295,95}{289,07} \right) = 0,068W \quad 3.51$$

$$X_m = 0,68J \quad 3.52$$

La destruction exergetique du sous-système « mur plat » pour le 01/08/2020 est de **0,68J**

✱ **Pour le sous-système « fenêtre »**

Le sous-système à une résistance thermique $(R_T)_f = 0,65K/W$. Nous avons donc :

$$\dot{Q}_f = \frac{296,90 - 295,95}{0,65} = 1,46W \quad 3.53$$

$$\dot{X}_f = 1,46 \times \left(\frac{295,95}{296,75} - \frac{295,95}{295,99} \right) = 0,00372W \quad 3.54$$

$$X_f = 0,0372J \quad 3.55$$

La destruction exergetique du sous-système « fenêtre » pour le 01/08/2020 est de **0,0372J**.

✱ **Pour le sous-système « sol »**

Le sous-système à une résistance thermique $(R_T)_s = 0,21K/W$. Nous avons donc :

$$\dot{Q}_s = \frac{296,90 - 295,95}{0,21} = 4,51W \quad 3.56$$

$$\dot{X}_s = 4,51 \times \left(\frac{295,95}{281,33} - \frac{295,95}{296,71} \right) = 0,25W \quad 3.57$$

$$X_s = 2,5J \quad 3.58$$

La destruction exergetique du sous-système « sol » pour le 01/08/2020 est de **2,5J**.

✱ **Pour le sous-système « Climatisation »**

La destruction exergetique ($T_0 \Delta \dot{S}_{gen}$) pour ce sous-système est donnée par la formule :

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = exW + exm_e - exm_s - exQ_{Lat+Sen} \quad 3.59$$

$$exm_e = 0, \text{ puisque le système est en équilibre avec l'environnement.} \quad 3.60$$

$$ex_{elect} = W_{elect} \times 2,1, \quad 3.61$$

$$\text{Or } W_{elect} = 1,05kW \quad 3.62$$

$$\text{D'où } ex_{elect} = 1,05 \times 2,1 = 2,21kW \quad 3.63$$

$$exm_s = m_{air} \times ex_{tot,a}. \quad 3.64$$

$$ex_{tot,a} = (c_{p,a} + w \cdot c_{p,v})T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + (1 + \Phi)R_a T_0 \ln \frac{P}{P_0} \\ + R_a T_0 \left[(1 + \Phi) \ln \frac{1 + \Phi_0}{1 + \Phi} + \Phi \ln \frac{\Phi}{\Phi_0} \right] \quad 3.65$$

$$\text{A l'état de référence, on a : } T_0 = 295,95K; P_0 = 1atm; w_0 = 0,6 \quad 3.66$$

$$\text{On a} \quad P_{sat}(T_0) = P_0 \cdot \exp \left(13,7 - \frac{5120}{T_0} \right) \quad 3.67$$

$$P_{sat}(T_0) = \exp \left(13,7 - \frac{5120}{295,95} \right) = 0,027atm \quad 3.68$$

$$P_{sat}(T_0) = 0,027atm \quad 3.69$$

L'humidité relative à la température de référence est donnée par :

$$\Phi_0 = \frac{M_a}{M_v} \times \frac{0,622}{(P_0/w_0 \times P_{sat}(T_0)) - 1} = \frac{28,97}{18,015} \times \frac{0,622}{(1/0,6 \times 0,027) - 1} = 0,0167 \quad 3.70$$

$$\Phi_0 = \frac{28,97}{18,015} \times \frac{0,622}{(1/0,6 \times 0,027) - 1} \quad 3.71$$

$$\Phi_0 = 0,0167 \quad 3.72$$

A partir de la table des vapeurs saturée, on obtient les valeurs de l'enthalpie suivante :

- Enthalpie spécifique de la vapeur saturée : $h_g(296,90) = 2544,28kJ/Kg$
- Enthalpie spécifique de l'eau saturée : $h_f(295,95) = 95,64kJ/Kg$

L'humidité relative est donnée par :

$$w = \frac{C_{p,a}(T_0 - T)}{h_g(T) - h_f(T_0)} = \frac{1,003 \times (296,90 - 295,95)}{2544,28 - 95,64} = 0,00039 \quad 3.73$$

$$\Phi = \frac{M_a}{M_v} \times w = \frac{28,97}{18,015} \times 0,00039 = 0,00062 \quad 3.74$$

$$ex_{tot,a} = (1,003 + 0,00039 \times 1,872) \times 295,95 \times \left(\frac{296,90}{295,95} - 1 - \ln \frac{296,90}{295,95} \right) + 0,287 \times 295,95 \quad 3.75$$

$$\times \left[(1 + 0,00062) \times \ln \frac{1 + 0,0167}{1 + 0,00062} + 0,00062 \times \ln \frac{0,00062}{0,0167} \right] \\ ex_{tot,a} = 1,18 \text{ kJ/kg} \quad 3.76$$

L'exergie sensible est donnée par :

$$exQ_{sen} = Q_{sen} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) = 2700 \left(1 - \frac{295,95}{296,90} \right) = 8,62 \text{ kJ} \quad 3.77$$

$$exQ_{sen} = 8,62 \text{ kJ} \quad 3.78$$

L'exergie latente est donnée par :

$$exQ_{Lat} = \dot{m}_w \times ex_{tot,w} \quad 3.79$$

Avec :

$$ex_{tot,w} = h_f(T) - h_g(T_0) - T_0 s_f(T) + T_0 s_g(T_0) + [P - P_{sat}(T)] v_f(T) - R_v T_0 \ln \varphi_0 \quad 3.80$$

$$ex_{tot,w} = h_f(296,90) - h_g(295,95) - 295,95 \times s_f(296,90) + 295,95 \times s_g(295,95) + [P - P_{sat}(296,90)] v_f(T) - R_v \times 295,95 \times \ln \varphi_0 \quad 3.81$$

$$ex_{tot,w} = 95,64 - 2544,28 + 297,75 \times 6,3245 + 297,75 \times 154,99 + (1 - 0,027) 0,018 - 0,461 \times 297,75 \times \ln 0,6 \quad 3.82$$

$$\text{D'où} \quad ex_{tot,w} = 41618,62 \text{ kJ/kg} \quad 3.83$$

L'exergie du système de Climatisation est donc :

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = exW + exm_e - exm_s - exQ_{Lat+sen} \quad 3.84$$

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = 2,21 \times 10^3 + 0 - 0,05 \times 1,18 \times 10^3 - 8,62 \times 10^3 - 0,022 \times 41618,62 \quad 3.85$$

$$T_0 \Delta \dot{S}_{gen} = 1280,71 \text{ J} \quad 3.86$$

La destruction exergetique du sous-système « Climatisation » pour le 01/08/2020 est de **1280,71J**.

Le calcul est ainsi réalisé pour chaque jour du mois et les différents résultats sont consignés dans le tableau 3-8.

Tableau 3-4 : Exergie détruite en joule(J) pour chaque sous système pour le mois de Août 2020

Jour	X_m en Joule	X_f en Joule	X_s en Joule	$T_o \Delta \dot{S}_{gen}$ en Joule
1	0,67	0,037	2,46	1280,709
2	0,66	0,037	2,41	1281,271
3	0,69	0,037	2,51	1278,506
4	0,71	0,037	2,58	1277,248
5	0,68	0,037	2,50	1278,174
6	0,69	0,037	2,51	1278,837
7	0,69	0,037	2,51	1278,837
8	0,69	0,037	2,51	1278,506
9	0,68	0,037	2,49	1280,378
10	0,67	0,037	2,46	1280,709
11	0,67	0,037	2,45	1280,379
12	0,66	0,037	2,42	1279,388
13	0,65	0,037	2,36	1280,949
14	0,64	0,037	2,35	1280,621
15	0,64	0,037	2,34	1280,292
16	0,64	0,037	2,35	1280,62
17	0,64	0,037	2,33	1282,186
18	0,65	0,037	2,37	1281,278
19	0,64	0,037	2,34	1279,962
20	0,69	0,037	2,53	1279,477
21	0,69	0,037	2,52	1279,169
22	0,67	0,037	2,43	1279,718
23	0,67	0,037	2,44	1279,718
24	0,69	0,037	2,53	1279,477
25	0,67	0,037	2,46	1281,039
26	0,66	0,037	2,40	1282,265
27	0,65	0,037	2,39	1281,936
28	0,68	0,037	2,47	1281,369
29	0,67	0,037	2,45	1280,709
30	0,67	0,037	2,43	1279,718
31	0,67	0,037	2,45	1280,379

Pour mieux visualiser ces données, nous avons tracé les courbes des destructions exergétiques pour chaque sous-système sur une période de 31 jours. Chaque courbe représente l'évolution des pertes d'énergie utile quotidiennes.

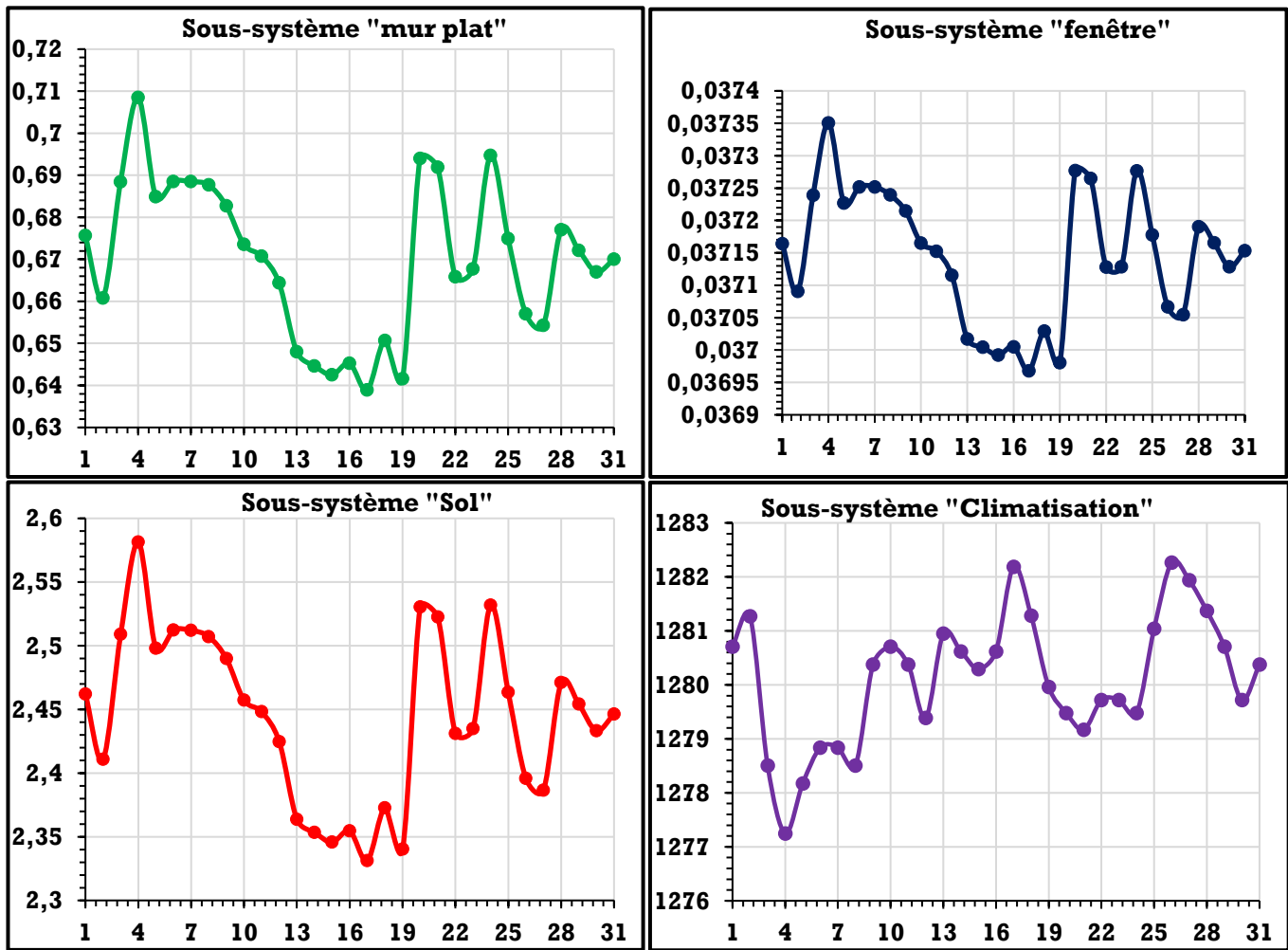


Figure 3-8 : Destruction exergétique journalière (en J) pour chaque sous-système pour Août 2024

Après avoir déterminé l'exergie journalière des différents sous-systèmes pour les mois aux températures extrêmes, nous pouvons maintenant approfondir notre analyse en nous concentrant sur la destruction exergetique globale. En examinant les destructions exergetiques mensuelle de chaque sous-système, nous obtenons une vision claire des inefficacités énergétiques spécifiques et de leur impact sur la performance globale du bâtiment.

1.4.3. Destruction exergetique globale

Pour chaque sous-système, nous avons cumulé les destructions exergetiques journalières pour obtenir une destruction exergetique mensuelle. Cette analyse globale nous permet de comparer les sous-systèmes entre eux et de quantifier leur contribution respective aux pertes énergétiques totales. En visualisant ces données, nous pouvons identifier les principaux leviers

d'amélioration et élaborer des stratégies ciblées pour optimiser l'efficacité énergétique du bâtiment. Le tableau 3-3 présente la destruction exergétique mensuelle pour chaque sous-système.

Tableau 3-5 : Destruction exergétique mensuelle pour chaque sous-système

Sous-système	Mur plat	Fenêtre	Sol	Climatisation	Total
Février	17,24J	1,07J	63,81J	35899,72J	35981,84J
Août	20,78J	1,15J	75,77J	39683,82J	39781,52J

Pour mieux visualiser et interpréter ces données, nous avons réalisé les histogrammes présentés par les figures 3-11 et 3-12. Ceux-ci présentent la destruction exergétique mensuelle pour chaque sous-système pour le mois le plus chaud et le mois le plus froid de l'année 2020. Chaque graphe représente l'évolution des pertes d'énergie utile mensuelle.

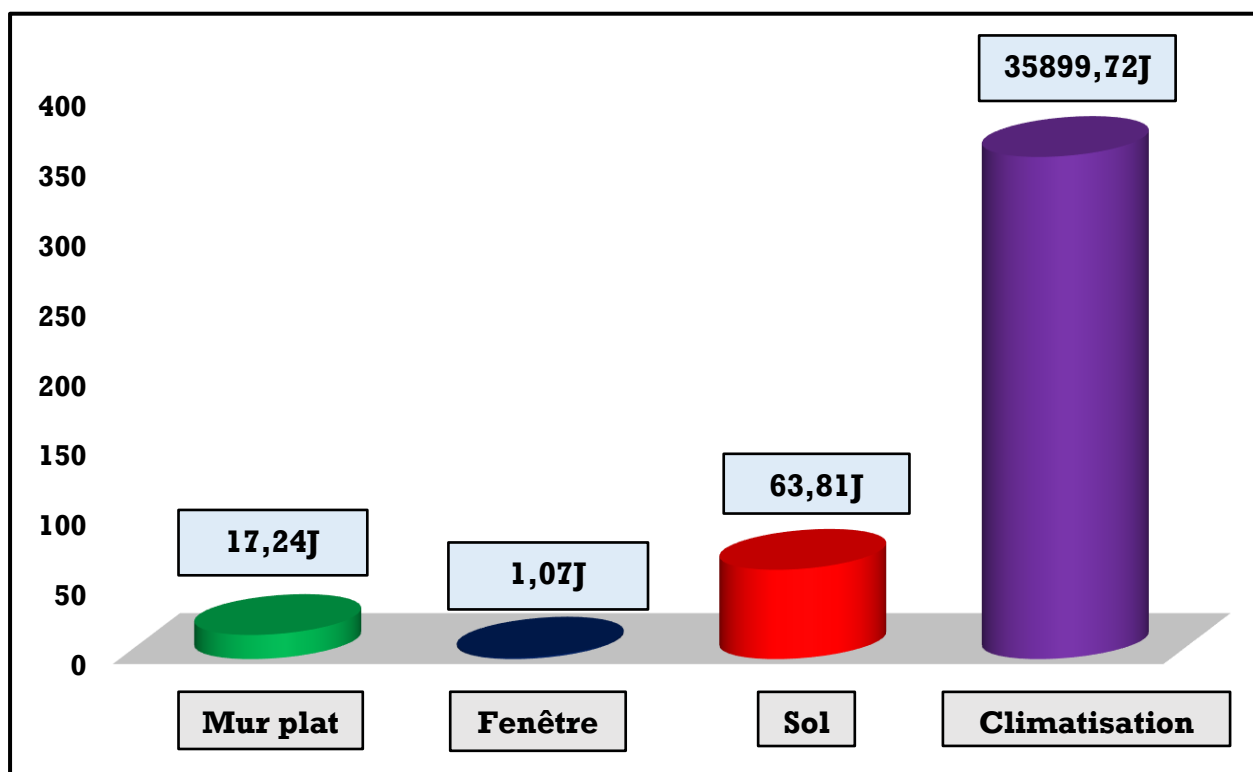


Figure 3-9 : Destruction exergétique globale en joule pour le mois de Février 2020

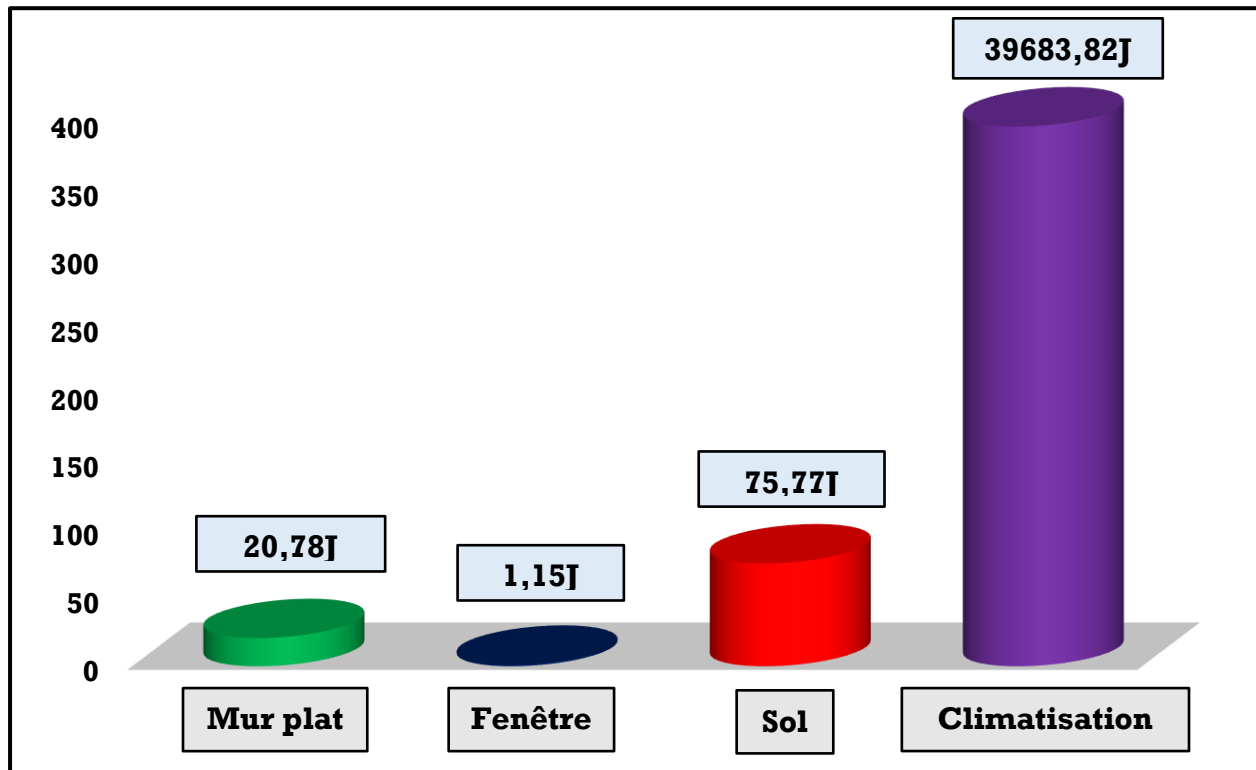


Figure 3-10 : Destruction exergétique globale en joule pour le mois d'Août 2020

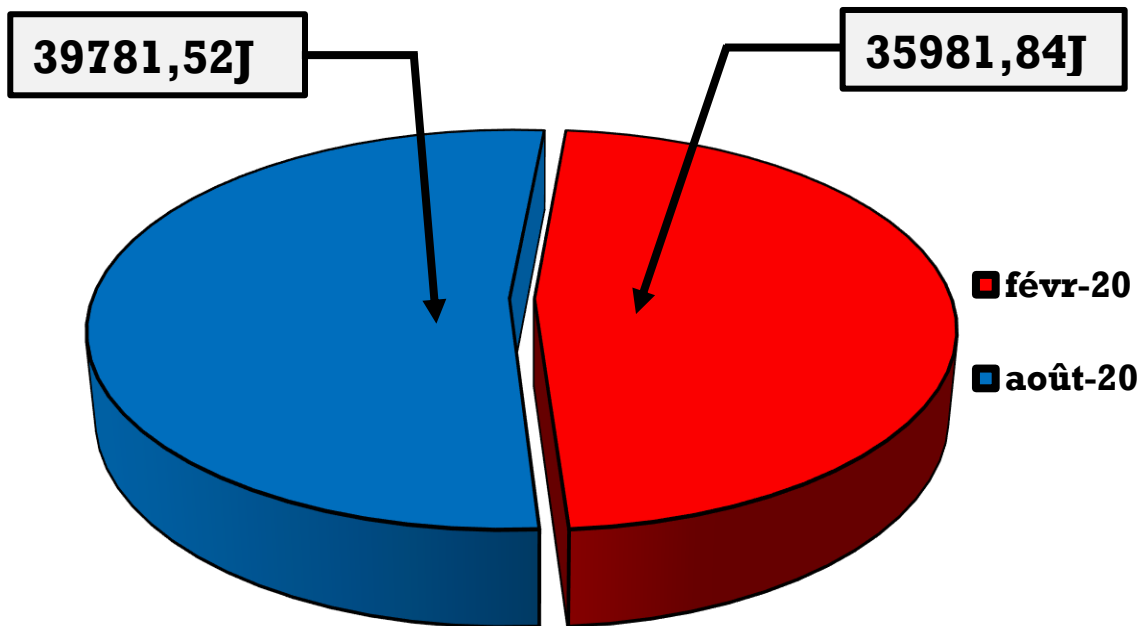


Figure 3-11 : Destruction exergétique totale mensuelle

Le diagramme circulaire de la figure 3-13 présente la destruction exergétique totale de notre système pour les deux mois aux températures les plus extrêmes de l'année. La destruction

exergétique est calculée en effectuant la somme algébrique des destructions exergétiques de chaque sous-système constituant notre bâtiment. Ce diagramme met en évidence la destruction exergétique totale. Il offre une vue d'ensemble claire et concise de la destruction exergétique de notre bâtiment pendant les mois aux températures extrêmes. Cette analyse est cruciale pour orienter les efforts de réduction de consommation d'énergie et d'optimisation de la performance énergétique globale du système.

Après avoir présenté en détail les résultats de la destruction exergétique du système pour les deux mois aux températures extrêmes, il est essentiel d'analyser ces données pour en tirer des conclusions pertinentes et proposer des pistes d'amélioration. Dans la section suivante, nous allons discuter des implications de ces résultats, identifier les principaux facteurs contribuant à la destruction exergétique, et explorer des stratégies potentielles pour améliorer l'efficacité énergétique de chaque sous-système.

2. Discussion

L'analyse des profils d'irradiance solaire (figures 3-1 et 3-2) et de température ambiante (figures 3-3 et 3-4) pour l'année 2020 met en évidence des variations thermiques significatives entre les mois de février et d'août, choisis pour représenter les périodes de l'année aux températures extrêmes. Février se distingue comme le mois le plus chaud de l'année, avec une température maximale de 35°C enregistrée le 23^e jour et une température minimale de 15°C observée le 7^e jour. La température journalière maximale moyenne pour ce mois est de 27,6°C. Cette période de chaleur intense entraîne une augmentation considérable des gains thermiques dans le bâtiment, nécessitant un usage intensifié des systèmes de refroidissement pour maintenir des conditions de confort intérieur. En revanche, août est identifié comme le mois le plus froid, avec des températures maximales atteignant 29°C à plusieurs reprises au cours du mois et une température minimale de 19°C. La température journalière maximale moyenne s'élève à 24,4°C. Durant cette période, le bâtiment subit des pertes thermiques importantes, obligeant les systèmes de chauffage à fonctionner à pleine capacité pour compenser le déficit thermique et assurer un environnement intérieur confortable. Les mois de février et d'août ont été spécifiquement sélectionnés pour cette analyse en raison des écarts thermiques prononcés qu'ils présentent, lesquels engendrent une demande énergétique maximale. Cette demande est due à l'effort supplémentaire requis pour équilibrer les fluctuations de température intérieure face aux conditions climatiques extrêmes. En

conséquence, la destruction exergétique du bâtiment augmente significativement, reflétant l'inefficacité accrue des systèmes énergétiques sous des charges thermiques intenses.

L'impact de ces températures extrêmes sur la destruction exergétique est crucial pour comprendre les pertes exergétiques du bâtiment. Après avoir examiné en détail les profils de température et d'irradiance, il est essentiel d'aborder un aspect fondamental de notre étude : le choix de la température de référence. Cette température joue un rôle crucial dans l'analyse exergétique des différents sous-systèmes.

La figure 3-5 présente trois courbes représentant les destructions exergétiques pour différentes températures de référence. Ces courbes offrent une représentation graphique détaillée permettant d'observer l'impact des choix de température de référence sur notre étude. On observe que les trois courbes ont un profil similaire, mais avec des valeurs de destruction exergétique différentes. Elles montrent une allure constante durant les 20 premiers jours du mois, suivie d'une variation quasi sinusoïdale jusqu'au 29^e jour. Pour les températures de confort ($T_c = 24^\circ C$) et environnantes (T_{env}) choisies comme températures de référence, les courbes (bleue et rouge) sont presque superposables et indiquent une destruction exergétique plus faible. Ces deux choix sont judicieux car ils minimisent les pertes d'énergie dans le bâtiment. En revanche, la courbe verte correspondant à la température la plus élevée du mois ($T_H = 35^\circ C$), bien qu'ayant une allure similaire, présente des valeurs de destruction exergétique plus importantes. Par conséquent, cette température de référence est éliminée en raison de l'augmentation significative des pertes énergétiques qu'elle engendre. Pour conforter nos résultats, une deuxième étude a été menée sur le mois le plus froid de l'année, en utilisant les mêmes critères d'analyse.

La figure 3-6 présente, de manière analogue à la précédente, trois courbes distinctes. Chacune d'elles illustre la destruction exergétique pour une température de référence déterminée. On observe que les trois courbes exhibent des profils similaires, tout en présentant des valeurs de destruction exergétique différentes, comme dans la figure précédente. La courbe verte, correspondant à la température la plus élevée du mois ($T_H = 29^\circ C$), bien que similaire en forme, révèle des valeurs de destruction exergétique accrues. Ce résultat valide notre décision d'exclure cette température de référence. L'analyse comparative des deux courbes restantes indique que le choix optimal de la température de référence est représenté par la courbe rouge. Ainsi, cette étude démontre que la température de référence qui minimise la destruction exergétique est la

température ambiante (T_{env}). Dans la suite de nos travaux, la température de référence utilisée sera la température environnante journalière. Cet état de référence variable dans le temps nous permettra de faire une analyse exergétique optimale de notre bâtiment.

L'analyse exergétique de notre bâtiment, subdivisé en quatre sous-systèmes distincts, a permis de générer des courbes de performance que nous allons interpréter de manière approfondie. Cette analyse a été réalisée sur deux périodes spécifiques de l'année, afin de caractériser et de comparer le comportement saisonnier de notre système. En examinant ces données, nous visons à identifier les variations d'efficacité énergétique et les opportunités d'optimisation pour chaque sous-système en fonction des conditions climatiques variables.

La première étude, réalisée pour février 2020, a permis d'obtenir les courbes présentées dans la figure 3-7. Chacune d'elles illustre la variation mensuelle de la destruction exergétique pour chaque sous-système de notre bureau. Les courbes bleue, rouge et verte affichent une tendance similaire, mais avec des proportions de destruction exergétique distinctes. La quatrième courbe, en violet, indique que le sous-système de climatisation présente une destruction exergétique atypique. En effet, la destruction exergétique du climatiseur tend à diminuer lorsque celle des autres sous-systèmes augmente, et vice-versa. Lorsque la destruction exergétique des autres sous-systèmes atteint son minimum, celle du système de climatisation atteint son maximum, et réciproquement. Cela s'explique par le fait que le climatiseur ajuste les flux d'exergie en fonction de la température ambiante du bureau. Ainsi, l'exergie associée au transfert de chaleur est dans la même direction que le transfert de chaleur lorsque $T > T_0$, et dans la direction opposée lorsque $T < T_0$.

La seconde étude, menée pour le mois le plus froid de l'année (août 2020), et dont les résultats sont illustrés dans la figure 3-8, a corroboré les observations de la première étude. Les sous-systèmes affichent le même comportement, bien que les courbes diffèrent de celles de février. Cette analyse démontre que chaque sous-système étudié engendre effectivement une destruction exergétique, mais selon des modalités variées. Les sous-systèmes « mur plat », « fenêtre » et « sol » présentent un profil de destruction similaire, tandis que le sous-système « climatisation » module la destruction exergétique en fonction de la température interne, en ajustant régulièrement les apports et extractions d'exergie pour maintenir une température de confort optimale pour les occupants.

Il est crucial, par la suite, de quantifier l'exergie consommée par chaque sous-système afin de développer des stratégies d'optimisation appropriées.

La quantité d'exergie consommée par chaque sous-système mensuellement est obtenue en sommant les destructions exergetiques journalières. L'histogramme de la figure 3-9 présente la quantité d'exergie détruite par les différents sous-systèmes durant le mois de février. Il montre que le système de climatisation est de loin celui qui engendre la plus grande perte d'exergie dans le système, avec un taux de **35 899,72 J**. Les trois autres sous-systèmes affichent des taux de déperdition d'exergie beaucoup plus faibles. Cependant, le sous-système « sol » (**63,81 J**) engendre les pertes les plus importantes, suivi du sous-système « mur plat » (**17,24 J**) et du sous-système « fenêtre » (**1,07 J**).

L'histogramme de la figure 3-10 présente la destruction exergetique mensuelle durant le mois d'août. Les résultats corroborent ceux trouvés précédemment, car le sous-système de climatisation est toujours celui qui engendre les plus grandes pertes d'exergie, avec un taux de **39 683,82 J**. Les trois autres sous-systèmes continuent de montrer des taux de déperdition d'exergie plus faibles, avec le sous-système « sol » (**75,77 J**) étant celui qui engendre les plus grandes pertes, suivi du sous-système « mur plat » (**20,78 J**) et du sous-système « fenêtre » (**1,15 J**).

Cette étude comparative souligne que le choix des matériaux est crucial pour minimiser les pertes d'énergie. Les murs et le sol de notre bâtiment sont construits en béton, ce qui constitue la principale cause de ces pertes d'exergie dans le système. Pour optimiser ce système, il est recommandé de choisir des matériaux moins énergivores et plus écologiques, tels que les blocs fabriqués à base de la terre et des fibres végétales pour les murs à la place du parpaing en béton, et le bois pour le plancher du sol. On peut aussi conseiller l'utilisation de matériaux alternatifs avec de meilleures propriétés thermiques, comme les matériaux à changement de phase ou les isolants avancés.

Après avoir observé le comportement des différents sous-systèmes, il est nécessaire pour une bonne analyse d'observer le comportement global de tout le système en fonction de la saison. A cet effet, nous allons dans la suite présenter les pertes d'énergie utile du bâtiment durant le mois de février et d'août 2020. Le diagramme de la figure 3-11 présente la destruction exergetique mensuelle du système pour les deux périodes considérés. On constate que pendant le mois le plus froid, le système détruit **39 781,52J** d'énergie utile par contre, pendant le mois le plus chaud la

destruction exergétique est de **35 981,84J**. Le système détruit donc beaucoup plus d'exergie lorsque les températures sont plus basses. L'exergie dépend de la différence entre la température intérieure du bâtiment et la température ambiante. Lorsque la température ambiante est basse, cette différence augmente, ce qui signifie que plus d'exergie est nécessaire pour maintenir une température confortable à l'intérieur du bâtiment. Cette grande différence de température entraîne une augmentation des pertes d'exergie dues à la conduction, à la convection et au rayonnement à travers les parois du bâtiment. Les systèmes de chauffage sont moins efficaces à des températures ambiantes plus basses. Les pompes à chaleur, qui sont couramment utilisées pour chauffer les bâtiments, voient leur performance diminuer à mesure que la température extérieure baisse, nécessitant plus d'énergie (et donc d'exergie) pour fournir la même quantité de chaleur. À des températures ambiantes basses, les pertes de chaleur par les murs, les fenêtres, et le sol augmentent. Ces pertes doivent être compensées par un apport énergétique supplémentaire, ce qui augmente la destruction d'exergie. Selon les lois de la thermodynamique, maintenir une température constante dans un environnement où la température extérieure est basse implique un flux continu d'énergie pour compenser les pertes. Cela implique une destruction continue de l'exergie, car l'efficacité des processus de conversion d'énergie en chaleur est limitée par les lois de la thermodynamique.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté de manière détaillée les résultats de notre recherche, fournissant des analyses approfondies et des discussions critiques sur chaque aspect étudié. Nous avons mis en évidence les tendances majeures, les corrélations significatives et les anomalies remarquables observées au cours de notre étude. L'analyse des données a permis de confirmer que la température de référence joue un rôle crucial dans l'analyse exergétique d'un bâtiment. Nous avons ainsi démontré que la température idéale pour une analyse optimale est la température moyenne journalière. L'analyse exergétique a également révélé que le béton engendre des pertes significatives d'exergie dans le système. En examinant le système pendant les périodes de haute et de basse température, il en ressort qu'à une température ambiante plus basse, le bâtiment doit compenser une plus grande différence de température, les systèmes de chauffage sont souvent moins efficaces, les pertes de chaleur augmentent, et les processus thermodynamiques impliqués entraînent une plus grande destruction d'exergie. En somme, ce chapitre a non seulement fourni une compréhension exhaustive des résultats obtenus, mais a également posé les bases pour des études ultérieures qui pourront élargir et enrichir notre compréhension du sujet.

Conclusion générale

Notre travail, intitulé "Étude exergetique d'une ambiance chaude en climat tropical", vise à développer une compréhension approfondie des méthodes d'analyse exergetiques dans un environnement tropical. L'objectif principal de cette recherche était de réaliser une analyse exergetique détaillée d'un bureau situé dans la ville de Yaoundé, Cameroun, plus précisément dans le quartier Melen. Cette étude s'est focalisée sur plusieurs objectifs spécifiques, incluant la détermination de la température de référence idéale pour l'analyse et l'évaluation de la destruction exergetique des quatre sous-systèmes du bâtiment : la climatisation, le sol, les murs, et les fenêtres.

L'analyse comparative a porté sur trois températures de référence proposées : la température de confort, la température maximale mensuelle et la température journalière moyenne. L'objectif était d'identifier la température la plus appropriée pour une analyse exergetique précise. Les résultats ont démontré que la température moyenne journalière est la meilleure option parmi les choix étudiés. Cette température de référence a permis d'obtenir les valeurs optimales de destruction exergetique pour chacun des mois considérés et a servi de base solide pour les analyses subséquentes. L'étude s'est concentrée sur les mois de février et août 2020, identifiés comme le mois le plus chaud et le mois le plus froid, respectivement. Cette sélection a permis d'examiner les variations saisonnières et leur impact sur les pertes exergetiques dans le bâtiment. Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé des méthodes d'analyse exergetique avancées qui permettent de quantifier les pertes d'exergie et d'identifier les sources principales de destruction d'exergie.

Les résultats ont révélé que la climatisation est la principale source de pertes exergetiques dans le bâtiment. Bien que les systèmes de climatisation soient essentiels pour le confort thermique dans les climats tropicaux, ils consomment une quantité significative d'énergie et entraînent des pertes d'exergie élevées. Ces pertes s'expliquent par le fait que le climatiseur ajuste les flux d'exergie en fonction de la température ambiante du bureau à chaque instant de la journée. De plus, les systèmes de climatisation actuels utilisent souvent des cycles de réfrigération qui ne sont pas optimisés pour minimiser les pertes exergetiques.

L'analyse des sous-systèmes, comprenant le sol, les murs, et les fenêtres, a mis en évidence que les murs et le sol, construits principalement en béton, sont responsables de destructions

d'exergie plus importantes comparées aux fenêtres. Le béton, bien qu'un matériau couramment utilisé pour sa robustesse et sa durabilité, possède des propriétés thermiques qui le rendent moins efficace dans la conservation de l'exergie. Par conséquent, l'amélioration de ces éléments constructifs est cruciale pour réduire les pertes exergétiques globales du bâtiment. Les murs, en particulier, représentent une part importante des pertes exergétiques en raison de leur grande surface exposée aux variations de température. Les fenêtres, bien que moins impactantes que les murs et le sol, contribuent également aux pertes exergétiques en permettant des échanges thermiques non contrôlés avec l'extérieur.

Dans cette étude, nous avons observé que les matériaux à haute capacité thermique, comme le béton, entraînent des pertes exergétiques élevées. Face à ces constats, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées. Pour les systèmes de climatisation, des technologies plus avancées et des méthodes de gestion intelligente de l'énergie peuvent être explorées pour minimiser les pertes. Par exemple, l'utilisation de systèmes de climatisation à haut rendement énergétique et de dispositifs de contrôle intelligents pourrait significativement améliorer l'efficacité exergétique. Les climatiseurs à inversion et les systèmes de gestion de l'énergie basés sur l'Internet des Objets offrent des solutions prometteuses pour optimiser la consommation d'énergie et réduire les pertes exergétiques. En ce qui concerne les éléments constructifs, l'utilisation de matériaux alternatifs avec de meilleures propriétés thermiques, comme les matériaux à changement de phase ou les isolants avancés, pourrait considérablement améliorer l'efficacité exergétique des murs et du sol. De plus, la conception architecturale du bâtiment pourrait être optimisée pour favoriser une meilleure circulation de l'air et une réduction des charges thermiques. L'intégration de technologies de toiture froide et de façades ventilées peut également contribuer à réduire les pertes exergétiques et à améliorer le confort thermique intérieur.

La conception bioclimatique, qui prend en compte les conditions climatiques locales pour maximiser le confort thermique et minimiser les besoins en énergie, constitue une approche complémentaire pour améliorer l'efficacité exergétique des bâtiments. En optimisant l'orientation du bâtiment, l'utilisation de l'ombrage naturel et la ventilation naturelle, il est possible de réduire les charges thermiques et d'améliorer l'efficacité énergétique globale.

La poursuite de cette recherche ouvre des avenues prometteuses. Une perspective clé est la réalisation d'une analyse exergo-économique sur un bâtiment résidentiel en milieu tropical. Une

telle étude permettrait de combiner les approches exergétiques et économiques pour évaluer non seulement les performances énergétiques, mais aussi la viabilité économique des améliorations proposées. Cette approche holistique offrirait une vision plus complète et pragmatique des solutions d'efficacité énergétique, en intégrant les coûts initiaux et les économies à long terme. Cette étude approfondie sur une année dans un bâtiment résidentiel promet de fournir des solutions encore plus intégrées et efficaces, répondant aux exigences croissantes de durabilité et d'efficacité énergétique. Cette étude permettra aussi d'avoir des précisions sur le choix idéal de température de référence pour une analyse exergétique de qualité. En intégrant des facteurs économiques, cette approche permettrait d'identifier les investissements les plus rentables pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

En définitive, cette étude a permis de mettre en lumière les défis et les opportunités associés à la gestion thermique des bâtiments en climat tropical. En déterminant la température de référence la plus appropriée et en réalisant une analyse détaillée des sous-systèmes, nous avons identifié les principales sources de pertes exergétiques et les éléments constructifs à améliorer. Les résultats obtenus fournissent des indications précieuses pour l'amélioration des performances énergétiques et du confort thermique des bâtiments dans les régions tropicales. Ainsi, cette recherche non seulement contribue à la compréhension théorique des dynamiques exergétiques dans les climats tropicaux, mais offre également des solutions pratiques pour améliorer la conception et la gestion des bâtiments dans ces régions, favorisant un avenir plus durable et économe en énergie.

Références bibliographiques

- [1] F. Thellier, J. Bedrune, et F. Monchoux, « Le Confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant ! », *La Revue 3 E. I.*, 2012.
- [2] « Énergie (physique) », *Wikipédia*. 12 juin 2023. Consulté le: 17 août 2023. [En ligne]. Disponible sur :
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89nergie_\(physique\)&oldid=205124248](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89nergie_(physique)&oldid=205124248)
- [3] Y. Ibata, « Le bâtiment durable en Afrique : enjeux, défis et réalités ».
- [4] C. M. Cipolla, « Sources d'énergie et histoire de l'humanité », in *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, Cambridge University Press, 1961, p. 521-534.
- [5] V. Sebestyén, « Renewable and Sustainable Energy Reviews: Environmental impact networks of renewable energy power plants », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, p. 111-626, 2021.
- [6] G. Christen et P. Hamman, *Transition énergétique et inégalités environnementales*. Strasbourg (Presses universitaires), 2015.
- [7] S. Himri, « Etude thermodynamique des dégradations d'énergie dans un procédé de l'industrie Agro-alimentaire », PhD Thesis, Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, 2014.
- [8] F. Michaud, « La dégradation de l'énergie et le Principe de carnot », *Revue de Métaphysique et de Morale*, vol. 26, n° 2, p. 199-210, 1919.
- [9] J. W. Ward, P. D. Kleinschmidt, et R. G. Haire, « The vapour pressure and thermodynamics of Cf-249 metal », *Le Journal de Physique Colloques*, vol. 40, n° C4, p. C4-233, 1979.
- [10] R. R. Rodriguez, « L'analyse d'exergie : application à la distillation diabatique et aux pompes à chaleur à absorption », PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1993.
- [11] « Energie | Exergie | Anergie | Energiespartipps ». Consulté le : 4 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur : <http://energie-strom.com/energie.html>
- [12] A. P. Hinderink, F. Kerkhof, A. B. K. Lie, J. D. S. Arons, et H. J. Van Der Kooi, « Exergy analysis with a flowsheeting simulator—I. Theory ; calculating exergies of material streams », *Chemical Engineering Science*, vol. 51, n° 20, p. 4693-4700, 1996.

- [13] I. Meriche, A. Chemoul, et T. E. Boukelia, « Analyse 4E (énergétique–exergétique–économique–environnementale) d’une centrale thermique à vapeur », *Revue roumaine des sciences techniques—série électrotechnique et énergétique*, vol. 67, n° 2, p. 199-205, 2022.
- [14] D. Schmidt et H. Torio, « ECBCS Annex 49 », *Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities*, vol. 182, 2011.
- [15] L. Tronchin et K. Fabbri, « Analysis of buildings energy consumption by means of exergy method », *International Journal of Exergy*, vol. 5, n° 5-6, p. 605-625, 2008.
- [16] H. Torio, A. Angelotti, et D. Schmidt, « Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view », *Energy and Buildings*, vol. 41, n° 3, p. 248-271, 2009.
- [17] R. Sangi et D. Müller, « Exergy-based approaches for performance evaluation of building energy systems », *Sustainable Cities and Society*, vol. 25, p. 25-32, 2016.
- [18] L. Marletta, « Air conditioning systems from a 2nd law perspective », *Entropy*, vol. 12, n° 4, p. 859-877, 2010.
- [19] P. Michel, « On the reference state for exergy when ambient temperature fluctuates », *International Journal of Thermodynamics*, vol. 12, n° 3, p. 113-121, 2009.
- [20] G. Evola et L. Marletta, « Exergy and thermoeconomic optimization of a water-cooled glazed hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector », *Solar Energy*, vol. 107, p. 12-25, 2014.
- [21] M. Shukuya, « Exergy concept and its application to the built environment », *Building and Environment*, vol. 44, n° 7, p. 1545-1550, 2009.
- [22] Y. Candau, « On the exergy of radiation », *Solar Energy*, vol. 75, n° 3, p. 241-247, sept. 2003, doi: 10.1016/j.solener.2003.07.012.
- [23] L. Marletta, G. Evola, L. Tronchin, et K. Fabbri, « Exergy analysis of energy systems in buildings », in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, IEEE, 2018, p. 1-6.
- [24] G. Evola, V. Costanzo, et L. Marletta, « Exergy analysis of energy systems in buildings », *Buildings*, vol. 8, n° 12, p. 180, 2018.
- [25] I. I. Ecam, « Deuxieme Enquête Camerounaise auprès des Ménages (ECAM II): pauvreté et genre au Cameroun », *NIS, Yaounde, Cameroon*, 2001.

- [26] I. N. S, (National S. Office), « Troisième Enquête Camerounaise auprès des Ménages (ECAM3) : Tendances, Profil et Déterminants de la Pauvreté au Cameroun entre 2001–2007 ». National Institute of Statistics Yaoundé, 2008.
- [27] A. Kemajou et L. Mba, « Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude Application au cas des régions climatiques camerounaises », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 14, n° 2, p. 239-248, 2011.
- [28] « Carte climatique du Cameroun », Gifex. Consulté le : 23 août 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://gifex.com/fr/fichier/carte-climatique-du-cameroun/>