



***DIAGNOSTIC DU RESSENTI THERMIQUE ET DE LA
DEPENSE ENERGETIQUE DANS DES LOCAUX MUNIS
D'UN SYSTEME DE REFROIDISSEMENT
ELECTRIQUE : CAS DES LOCAUX DE L'INSTITUT 2IE***

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL : BATIMENTS ET TRAVAUX PUBLICS

Présenté et soutenu publiquement le 30 janvier 2023

BATIONO Gnidougnè Bazomboè (20200124)

Travaux dirigés par :

Directeur de mémoire :

- **Pr Adamah MESSAN, Enseignant chercheur, 2iE**

Encadrant :

- **Dr Césaire HEMA, Enseignant chercheur, 2iE**

Structure d'accueil : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD), 2iE

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Pr Daniel YAMEGUEU NGUEWO

Membres et correcteurs : Dr Seick Omar SORE

M. Iliassou NOUHOUN SALOU

Promotion 2022/2023

CITATION

« Un bâtiment doit avoir trois caractéristiques : un bon emplacement, des fondations sûres et une exécution sans faille. » Johann GOETHE

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- ❖ Ma mère : Feu KANYILI Mamounata
- ❖ Ma grand-mère : Feu Ezomboè Rogina KANZIOMO
- ❖ Mon Père : BATIONO Nébila Léopold
- ❖ Ma seconde mère : KANSSONO Edjou Florence
- ❖ Tous mes frères et sœurs

REMERCIEMENTS

Le Master est une expérience très enrichissante et éprouvante, dont l'achèvement marque une étape importante dans notre vie. Le chemin emprunté peut parfois être semé d'embûches mais il nous permet aussi de faire de belles découvertes humaines et scientifiques, de se découvrir soi-même, d'apprendre à se surpasser et de voler vers de nouveaux horizons pleins de belles promesses.

Cette belle aventure a été possible grâce au responsable du Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMhAD), Pr Adamah MESSAN, qui m'a accepté au sein de leur laboratoire et qui est aussi le Directeur de ce mémoire. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour la confiance qu'il m'a accordée et pour son soutien indéfectible. Cette initiation réussie dans le monde de la recherche n'aurait pu se faire sans lui et ses précieux conseils.

Je remercie sincèrement mon Maître de Stage, Dr HEMA Césaire, pour les échanges scientifiques constructifs que nous avons eus tout au long de ce beau parcours ainsi que pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée dans la rédaction de ce manuscrit. Son dévouement, sa bienveillance et sa rigueur m'ont permis de garder le cap et me motive davantage à continuer dans la recherche.

Un grand merci à tout le personnel du département de Génie Civil de l'Institut 2iE pour l'accueil chaleureux et leur disponibilité pour répondre à mes différentes questions avec une attention particulière à l'endroit de Dr. Arnaud OUEDRAOGO pour la disponibilisation de son outil d'évaluation du confort thermique et du matériel que nous avons utilisé pour les travaux sur le terrain.

Mes remerciements s'adressent également à tous les doctorants du laboratoire et particulièrement à M. Alphonse BOUDA, M. George TCHAMIE et Mme NEBIER B. Amonet pour les conseils très constructifs et leur contribution dans le processus de rédaction de ce document.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers tout le service technique de 2iE avec une attention particulière pour M. ZOMA Constantin et M. KABORE Hamed qui ont su faire preuve d'originalité et de dynamisme dans le branchement de mes compteurs d'évaluation énergétique.

Je dis un grand merci à tous mes enseignants du primaire jusqu'ici. Vous avez contribué, en plus de m'enseigner, à forger en moi l'homme que je suis.

Une partie de cette étude s'est déroulée sur le terrain dans les bureaux de 2iE. J'aimerais aussi exprimer ma profonde reconnaissance à tout le personnel de cet institut, surtout aux différentes personnes qui m'ont accueillies dans leur bureau et qui ont accepté répondre avec sourire à mon questionnaire.

À mes amis, mes promotionnaires et mes proches non cités, je ne vous ai pas oubliés. Je vous ai toujours avec moi comme vous m'avez toujours avec vous. Je ne doute pas que nos projets continueront de grandir et que nous allons faire de bonnes et de merveilleuses choses pour un monde plus humain.

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

Ma profonde et infinie gratitude va à mon Tonton, BATIONO Tielboè Stéphane, qui m'a toujours soutenu et sans qui ne serai pas à niveau. Je reste très reconnaissant et confiant que le meilleur est à venir.

A ma famille, comment vous exprimer ma reconnaissance et ma gratitude ? Je suis infiniment reconnaissant à Dieu de vous avoir, car vous avez toujours surpassé mes attentes. Merci pour tout et puisse Dieu nous bénir toujours.

RESUME

Au Burkina Faso, le secteur du bâtiment s'inspire beaucoup des constructions occidentales. Cependant, ces habitudes de construction conduisent le plus souvent à une inadéquation au climat et à un manque de confort notamment thermique dans les bâtiments. Cet inconfort occasionne donc un recours abusif aux systèmes de climatisation très énergétivores alors que le pays souffre d'un déficit énergétique. La présente étude vise donc à analyser le comportement, l'adaptation et les préférences des occupants des bâtiments disposant d'un système de refroidissement électrique. Pour ce faire, les jugements perceptifs de 97 individus dans les bureaux de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) ont été recueillis et les paramètres environnementaux de ces bureaux ont été simultanément mesurés. La consommation d'énergie liée à l'usage de la climatisation a été également mesurée. Une évaluation de la sensation thermique des individus rassure que les bureaux sont confortables thermiquement. Les occupants sont confortables lorsque les températures oscillent entre 24,4 et 27,9°C. Ils semblent accepter plus facilement des ambiances chaudes par rapport aux Nord-Américains dont leurs jugements ont servi de base à l'établissement des normes ISO 7730 et ASHRAE 55. Cette étude révèle également la grande sensibilité des femmes aux basses températures. En moyenne, la consommation électrique est estimée à 0,58 kWh/m² de bureau pour maintenir les travailleurs en situation de confort thermique pendant la période dite froide de l'année. Cela interpelle l'ensemble des acteurs à un changement de paradigme pour la réalisation des bâtiments bioclimatiques. Cela permettra un véritable développement endogène et durable.

Mots clés :

- 1. Bâtiment**
- 2. Confort thermique**
- 3. Consommation énergétique**
- 4. Dispositifs de refroidissement**
- 5. Economie d'énergie.**

ABSTRACT

In Burkina Faso, the building sector is very much inspired by Western constructions. However, these building habits do not match with our climate and so lead to discomfort, particularly the thermal one. This discomfort results in an abusive resort to highly energy-consuming air conditioning systems whereas the country is subject to important energy deficit. The present study aims at analyzing the behavior, the adaptation and the preferences of the occupants of the buildings having an electric cooling system. To reach our goal, the perceptual judgments of 97 individuals in the offices of the International Institute of Water and Environmental Engineering (2iE) were collected and the environmental parameters of these offices were simultaneously measured. The energy consumption related to the use of air conditioning was also measured. An evaluation of the thermal sensation of individuals reassures that the offices are thermally comfortable. Occupants feel comfortable when temperatures range from 24.4 and 27.9°C. They stand hot environment more easily than North Americans whose judgements were used as the basis for the ISO 7730 and ASHRAE 55 standards. The study also reveals that women are highly sensitive to low temperatures. On average, an office of 12 m² consumes 5.8 kWh/day to maintain the thermal comfort of workers. This situation calls all the actors for a paradigm shift towards the construction of bioclimatic buildings for a true sustainable development.

Key words:

- 1. building,**
- 2. thermal comfort**
- 3. energy consumption**
- 4. cooling devices**
- 5. energy saving**

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

2iE	Institut Internationale d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BTC	Brique de Terre Comprimé
IEA	IEA Agence Internationale de l'Energie « International Energy Agency »
INSD	Institut Nationale de la Statistique et de la démographie
ISO	International Organization for Standardization
kWh	kiloWattheure
LEMhaD	Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable
W	Watt

TABLE DES MATIERES

CITATION	i
DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTES DES FIGURES	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
Introduction	3
I.1. Confort thermique	3
I.1.1. Généralités	3
I.1.2. Définition	3
I.1.3. Facteurs influençant le confort thermique	4
I.1.4. Echange de chaleur entre l'individu et son environnement	7
I.1.5. Méthodes et indices d'évaluation du confort thermique	8
I.2. Consommation énergétique dans les bâtiments en pays chaud et sec	12
I.2.1. Typologie des bâtiments	12
I.2.2. Consommation énergétique des bâtiments administratifs	13
Conclusion	14
CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL	15
Introduction	15
II.1. Présentation des sites de l'étude	15
II.2. Instruments utilisés et méthodologie expérimentale	16
II.2.1. Instruments utilisés	16
II.3. Enquêtes sur le terrain	20
II.3.1. Conception des fiches de l'enquête	20
II.3.2. Mode Opératoire de l'enquête	21
II.3.3 Caractéristique de l'échantillon	22

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

Conclusion.....	22
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS	23
Introduction.....	23
III.1. Nombre de personnes enquêtées.....	23
III.2. Paramètres environnementaux extérieurs.....	24
III.3. Evaluation des facteurs liés aux enquêtés.....	26
III.3.1. L'habillement	26
III.3.2. Le métabolisme	27
III.4. Evaluation du confort thermique dans les bureaux.....	27
III.4.1. Evaluation subjective de confort thermique.....	27
III.4.2. Evaluation objective du confort thermique à l'aide d'indices thermiques	29
III.5. Proposition de plages de paramètres influençant le confort thermique	30
III.5.2. Plage de température de confort thermique en fonction du genre.....	33
III.6. Consommation d'énergie liée à l'usage des dispositifs de refroidissement dans les bâtiments.....	34
Conclusion.....	37
CONCLUSION GENERALE, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	38
1. Conclusion générale	38
2. Perspectives.....	39
3. Recommandations	39
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	40
ANNEXES.....	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 :Taux métabolique pour différents niveaux d'activité courants en milieu professionnel selon la norme ASHRAE-2001 (Source : modifiée à partir de MINANE, 2010)	5
Tableau I-2 : Valeur de l'indice de résistance thermique de l'habillement pour différents ensembles courants en milieu de travail selon (ASHRAE, 2001), exprimées en clo et en résistance thermique (Rth). Source : modifié à partir de (Emmanuel et al., 2016).....	6
Tableau I-3: Valeurs limites de l'indice de stress thermique WBGT selon la norme ISO 7243 (source : Guide d'utilisation de de l'appareil de mesure du confort thermique : HD32.2).....	10
Tableau II-1:: Paramètres climatiques mesurés par l'appareil HD32 de Delta OHM	18
Tableau III-1 : Valeurs caractéristiques des paramètres de l'environnement extérieur	24

LISTES DES FIGURES

Figure I-1 : Echanges thermiques entre l'homme et son environnement (source : https://energieplus-lesite.be).....	8
Figure I-2: Outil d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments à Ouagadougou (A. OUEDRAOGO, 2022)	12
Figure II-1 : Un bloc où a eu lieu l'étude.....	16
Figure II-2 : Appareils de collecte des températures.....	17
Figure II-3: Appareil d'acquisition de paramètres environnementaux	19
Figure II-4 : Appareils de mesure de la consommation d'énergie	20
Figure III-1: Nombre de personnes enquêtées	23
Figure III-2 : Ages des personnes enquêtées.....	23
Figure III-3 : Evolution mensuelle des températures moyennes.....	24
Figure III-4 : Evolution mensuelle des humidités relatives moyennes	25
Figure III-5 : Evolution mensuelle des rayonnements solaires globaux	25
Figure III-6: Evolution du nombre de personnes et de la moyenne de leurs bureaux en fonction de l'Icl	26
Figure III-7 : Sensation de occupants des bureaux vis-à-vis des paramètres environnementaux	27
Figure III-8 : Jugement perceptif des individus vis-à-vis de leur environnement thermique ..	28
Figure III-9: : Différentes valeurs du WBGT dans les bureaux.....	29
Figure III-10 : Outil d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments à Ouagadougou .	30
Figure III-11 : Personnes satisfaites en fonction des températures de confort.....	31
Figure III-12 : Nombre de personnes satisfaites en fonction des températures de confort	33
Figure III-13 : Evolution normale des températures de confort.....	34
Figure III-14 : Evolution des températures et de la consommation d'énergie liée à l'usage de la climatisation d'un bureau	35

INTRODUCTION GENERALE

Les progrès de l'homme sont associés à la disponibilité et l'accès à l'énergie. De nos jours, les ressources énergétiques sont de plus en plus rares imposant leur utilisation optimale. À cette rareté s'ajoutent les changements climatiques des dernières décennies alarmant la communauté scientifique qui appelle à une réduction maximale de la consommation d'énergie d'origine fossile qui est l'un des grands facteurs de la pollution de l'environnement. En effet, l'objectif 11 du développement durable invite à la recherche de solutions pour envisager le progrès et le développement en exploitant de façon rationnelle les ressources naturelles. Au regard donc d'une situation énergétique mondiale marquée par un épuisement inéluctable des ressources fossiles, une aggravation de la pollution environnementale et un coût croissant de l'énergie, une révision des modes de consommation de l'énergie s'avère indispensable. Le secteur du bâtiment est l'un des grands consommateurs d'énergie. Il consomme en moyenne 36% de l'énergie finale mondiale qui est en grande partie d'origine fossile selon un rapport de l'Agence Internationale d'Énergie publié en 2019 (IEA, 2019).

Le Burkina Faso est un pays en voie de développement ayant un climat tropical et sec avec plus de 40% de sa population qui vit en dessous du seuil de la pauvreté selon le rapport de l'Institut Nationale de la Statistique et de la démographie (INSD) publié en 2021 (INSD, 2021). Le contexte socio-économique et les limites technologiques du pays influencent donc les priorités en matière de construction. La recherche d'un habitat à longue durée de vie, qui ne nécessite que peu d'entretiens et qui se démarque esthétiquement relègue au second plan les principes de conception qui concourent à un confort thermique. Cela justifie donc la réalisation de bâtiments inconfortables thermiquement, exigeant un recours à l'usage des systèmes de refroidissement électrique pour offrir un microclimat intérieur acceptable par les occupants. Cet usage presque permanent des dispositifs de refroidissement accroît donc la consommation énergétique des bâtiments qui rend ainsi leur coût d'exploitation très élevé. Il est donc impératif et urgent de trouver des voies et moyens pour diminuer au maximum la consommation énergétique des bâtiments tout en conservant le bien-être thermique des occupants. Cela passera par la connaissance des attentes thermiques des occupants du bâtiment pour mieux en tenir compte dans son processus de conception et de réalisation. Il est aussi très important de mettre en évidence la consommation énergétique des bâtiments actuels pour mieux illustrer le caractère énergivore des dispositifs de refroidissement utilisés pour inciter davantage à une baisse

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

maximale de leur usage voire même leur suppression dans le bâtiment sans impacter le confort souhaité par les occupants. C'est dans ce cadre que ce travail de recherche a été initié.

L'objectif global de ce travail est d'analyser le comportement, l'adaptation et les préférences des occupants des bâtiments disposants d'un système de refroidissement électrique (ventilation, climatisation) pour assurer leur confort thermique.

Pour mieux l'atteindre il est éclaté en trois objectifs spécifiques qui sont :

- Etablir les critères et plages de confort dans les bureaux à Ouagadougou ;
- Evaluer la consommation énergétique des dispositifs de refroidissement en fonction du temps ;
- Evaluer les différences de perception du confort en fonction du genre.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art sur le confort thermique et la consommation énergétique. Ce tour d'horizon permettra de parcourir la notion du confort thermique, en partant de sa définition pour détailler les paramètres qui l'influencent et présenter des méthodes et indices utilisés pour l'évaluer. Il permettra de décrire également la typologie des bâtiments au Burkina Faso et leur exigence énergétique pour un microclimat intérieur agréable avec une attention particulière sur les bâtiments administratifs. Le deuxième chapitre traite de la méthodologie ainsi que des moyens utilisés pour analyser le comportement, l'adaptation et les attentes des occupants vis-à-vis de leur environnement thermique, ainsi que la consommation énergétique des climatiseurs et ventilateurs dans les bureaux de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement (2iE). Le troisième chapitre présente les résultats de l'étude suivis des discussions.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Ce chapitre présente un état de l'art sur le confort thermique et la consommation énergétique dans les bâtiments. D'abord le confort thermique a été défini ainsi que les paramètres qui l'influencent. Ensuite un inventaire d'indices permettant d'évaluer le confort thermique en climat chaud est effectué avec une attention particulière sur des indices thermiques choisis pour la suite de l'étude. Enfin la typologie des bâtiments administratifs ainsi que leur consommation d'énergie sont décrites. L'accent est particulièrement mis sur la consommation d'énergie liée à l'usage des ventilateurs et ou des climatiseurs pour le maintien quasi permanent du confort thermique dans les bâtiments.

I.1. Confort thermique

I.1.1. Généralités

Tout être humain désire un bien-être thermique. L'inconfort thermique dans un local est un problème crucial qui pourra avoir des répercussions graves sur la productivité des travailleurs et la santé des occupants des locaux. Chacun recherche un environnement agréable thermiquement d'où la recherche d'un habitat confortable par tous les moyens. La notion de confort thermique est très subjective car en plus des paramètres environnementaux elle est fonction de l'âge, du sexe, de la provenance, de la culture, de la société, des habitudes, de l'habillement, des aspects physiologiques et psychologiques des occupants d'un local (Corinne Martinet et al, 1999).

I.1.2. Définition

La norme ASHRAE (ASHRAE, 2013) définit le confort thermique comme un état d'esprit dans lequel les occupants sont satisfaits des conditions thermiques de leur environnement. Ainsi, une personne est en situation de confort thermique lorsque cette dernière n'a ni chaud ni froid et ne ressent aucun courant d'air gênant. La sensation du confort thermique est donc fortement liée à la sensation de l'individu. Dans une même ambiance thermique, plusieurs individus peuvent donner plusieurs expressions différentes de leur sensation du confort. Elle est donc une notion très subjective.

I.1.3. Facteurs influençant le confort thermique

Partant de la définition ci-dessus (cf. le point 2 ci-dessus), la notion du confort thermique est complexe car dépendante de plusieurs facteurs. Ceux-ci sont généralement scindés en deux grandes catégories à savoir les facteurs individuels ou subjectifs et les facteurs liés à l'environnement dans lequel l'individu se trouve. Les principales variables environnementales qui influencent le confort thermique sont : la température de l'air, la température radiante moyenne, la vitesse d'air, ainsi que l'humidité de l'air. Les facteurs individuels impactant le confort thermique des usagers comprennent principalement le niveau d'activité métabolique, l'habillement et les phénomènes d'adaptation à son environnement thermique, à savoir l'adaptation physiologique, comportementale et/ou les aspects psychologiques. Tous ces paramètres sont expliqués dans les lignes qui suivent.

a) Facteurs environnementaux

- **La température de l'air (T_a)** : C'est la température qu'indiquera un thermomètre placé à l'abri du vent et du rayonnement solaire direct. Cette température est relativement plus élevée en climat tropical et sec comme celui de Ouagadougou qu'en climat tempéré. La température d'air en situation de confort thermique varie entre 20°C et 27°C dans les zones tropicales selon Claessens (Claessens et al, 1996).
- **La température radiante moyenne (T_{mrt})** : Elle est une température qui permet de globaliser les échanges thermiques par rayonnement entre un individu et son environnement. Elle représente la température moyenne d'un environnement fictif qui produirait les mêmes échanges radiatifs. Etant donné que le rayonnement solaire est très important en zone tropicale, les températures de parois soumises au rayonnement direct sont, pour la plupart du temps, supérieures à la température d'air (Grosdemouge, 2020).
- **La vitesse de l'air (V_a)** : Elle influence les échanges thermiques entre l'air et le corps par convection. En situation de confort thermique dans les bâtiments en climat tropical et sec, la vitesse d'air est généralement comprise entre $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Jannot et Djiako, 1994). Une vitesse d'air supérieure à $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans un local peut provoquer une gêne pour les occupants (Grégoire Pigeon, 2009).

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

- **L'humidité Relative (HR) :** C'est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau pouvant être contenue dans la même température lorsque l'air est saturé. En milieu tropical, il est un facteur très prépondérant pour le confort thermique. En effet, le potentiel de variation de température due à l'évaporation sur le corps est réduit du fait de l'humidité relative élevée. En situation de confort thermique dans une zone tropicale et sèche comme Ouagadougou, l'humidité relative varie entre 30 % et 80 % selon les travaux de Jannot et Djiako (Jannot et Djiako, 1994).

b) Facteurs subjectifs

- **Le métabolisme :** C'est la chaleur interne produite par un individu lorsque celui-ci est en mouvement correspondant à une activité bien particulière permettant de maintenir son corps à une température autour de $36,7\text{ }^\circ\text{C}$. La chaleur générée par une personne dépend de plusieurs facteurs personnels dont son niveau d'activité, sa taille, son âge, son poids, etc. Ces paramètres influencent donc également le confort thermique. L'unité permettant de caractériser le métabolisme est le « met » qui correspond à une puissance de 105 W. Les taux en W sont obtenus en multipliant ceux en W/m^2 par la surface de la peau d'un individu moyen adulte de $1,8\text{ m}^2$ (« taille 1.7 m, poids 69 kg ») (Nicolas Morel et Edgard Gnansounou, 2008). Le tableau I-1 indique les valeurs du métabolisme pour diverses activités couramment effectuées par les travailleurs.

Tableau I-1: Taux métabolique pour différents niveaux d'activité courants en milieu professionnel selon la norme ASHRAE-2001 (Source : modifiée à partir de MINANE, 2010)

Activité	Dégagement de chaleur		
	[Met]	[W/m ²]	[W/personne]
Coucher, inactif, sommeil	0,8	46	83
Assis inactif	1,0	58	104
Activité sédentaire (bureau, lecture, études)	1,2	70	126
Debout, inactif	1,2	70	126
Marche lente	1,7	100	180

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

- **L'habillement** : Les vêtements présentent une résistance thermique pour le corps qui va isoler la peau, et les pertes par convection et rayonnement se feront à partir d'une surface à une température différente de la température de la peau. L'habillement constitue donc une protection pour le corps humain face à l'environnement extérieure. Celui-ci diffère selon les zones climatiques. En effet, dans les régions chaudes on portera peu de vêtements contrairement aux régions froides. La culture est aussi un facteur important qui influence l'habillement d'un peuple peu importe les conditions climatiques de la zone. Des habitants de deux régions ayant les mêmes climats mais de cultures différentes n'auront pas forcément le même type d'habillement. Une autre spécificité des zones tropicales est de se protéger du rayonnement solaire. Ainsi, le recours aux chapeaux, casquettes ou foulards y est fréquent. De plus, l'entrée dans certains lieux comme les écoles et certaines entreprises exige un code vestimentaire obligatoire. Dans l'évaluation du confort thermique, l'habillement est pris en compte grâce à l'indice de résistance thermique de l'habillement I_{cl} défini comme étant le rapport de cette résistance thermique à une valeur standard de $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ et il s'exprime en clo. Ainsi l'unité du clo est : $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$. Quelques valeurs de résistance thermique des vêtements usuelles sont données dans le tableau I-2 en [clo] et en [$\text{m}^2\text{K/W}$].

Tableau I-2 : Valeur de l'indice de résistance thermique de l'habillement pour différents ensembles courants en milieu de travail selon (ASHRAE, 2001), exprimées en clo et en résistance thermique (R_{th}). Source : modifié à partir de (Emmanuel et al., 2016)

Ensemble vestimentaire	[Icl] (clo)	[Rth ($\text{m}^2\text{K/W}$)]
Short + chemise manche courte	0.4	0.06
Pantalon + chemise manche courte	0.6	0.09
Pantalon + chemise manches courtes + veste costume	1.0	0.15
Pantalon + chemise manches longues + pull manches longues	1.0	0.16
Jupe mi-longue + chemisier manches courtes + collants	0,5	0,08
Jupe mi-longue + chemisier manches longues + collants	0,7	0,10
Jupe longue + chemisier manches longues + veste + collants	1,1	0,17

c) . Adaptation de l'individu à son environnement thermique

Elle peut être définie comme étant « une diminution progressive de la réponse d'un organisme à une exposition répétée à un stimulus » (Grosdemouge, 2020). Ainsi, une personne exposée à des milieux très chauds sur une longue période sera moins affectée par la chaleur qu'une personne vivant en milieu tempéré. Les travaux de Nasir et alliés (Nasir et al., 2012) ont mis en évidence qu'en milieu tropical, les personnes étaient en mesure de supporter des conditions environnementales plus chaudes, plus humides ou sèches et avec moins de mouvement d'air que celles vivant en climat tempéré. Cette notion d'adaptation a d'ailleurs conduit au développement de modèles de confort adaptatif pour les études de confort en intérieur (Taleghani et al., 2013). Contrairement à la méthode analytique qui considère l'individu comme une machine thermique, la méthode dite adaptative se fonde sur la capacité dont dispose ce dernier pour ajuster et réhabiliter son confort en fonction de l'ambiance thermique de son milieu. Cette adaptation peut être d'ordre physiologique, comportementale ou psychologique.

- **Adaptation physiologique** : Elle est encore appelée acclimatation et correspond à la thermorégulation du corps pour se rafraîchir ou se réchauffer.
- **Ajustement comportemental** : C'est le fait de changer de vêtements, de s'hydrater, de changer le niveau d'activité, de posture ou encore de position dans l'espace (au soleil, à l'ombre, à l'abri du vent ou exposé au vent), ainsi que la durée de leur exposition (Nikolopoulou et al., 2001 ; Nikolopoulou and Steemers, 2003 ; Lin, 2009 ; Johansson and Yahia, 2011).
- **Adaptation psychologique** : L'adaptation psychologique peut être liée aux conditions thermiques du milieu naturel, aux attentes et exigences des individus, à leur expérience et leur histoire vis-à-vis de leur contexte climatique et au temps d'exposition à ce climat (Nikolopoulou et al., 2001 ; Chen and Ng, 2012 ; Coccolo et al., 2016).

I.1.4. Echange de chaleur entre l'individu et son environnement

Le corps humain inter-échange de la chaleur aussi bien sensible que latente avec son environnement. Les échanges de chaleur sensible se font par conduction, rayonnement et par convection. Les échanges par évaporation de la sudation sont une forme de transfert de chaleur

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

latente de l'organisme vers le milieu environnant. La figure I-1 montre l'inter-échange de chaleur entre l'individu et son environnement.

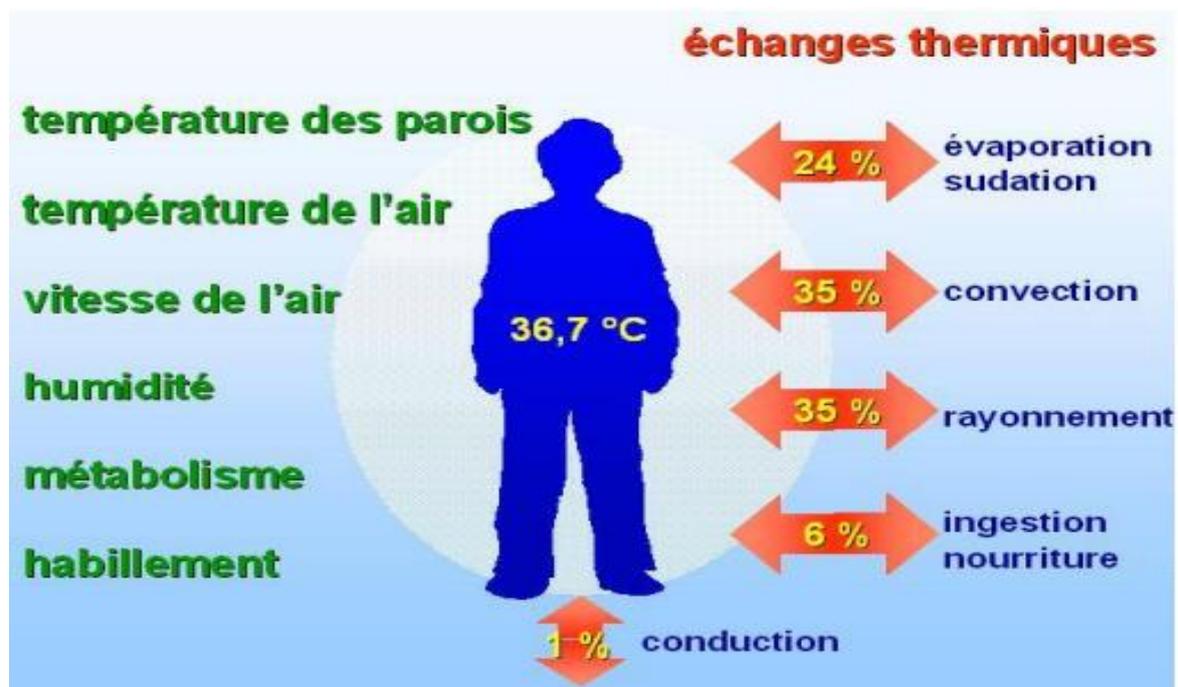


Figure I-1 : Echanges thermiques entre l'homme et son environnement (source : <https://energieplus-lesite.be>).

I.1.5. Méthodes et indices d'évaluation du confort thermique

La notion du confort thermique dans un local est très subjective mais sa présence est capitale pour le bien être des occupants du local et leur rentabilité. Plusieurs approches sont donc développées par les chercheurs dans l'optique de pouvoir mieux quantifier l'environnement thermique. Il y'a essentiellement deux grandes approches qui sont l'approche analytique (méthode de Fanger) et l'approche adaptative. Tous les modèles développés ont pour but de définir des outils permettant d'évaluer l'environnement thermique d'un milieu. Au cours des dernières décennies, des centaines d'indices thermiques différents ont été développées (Blazejczyk et al., 2012). Cela montre la grande importance de l'environnement thermique au sein de la communauté scientifique avec un fort désir d'être en mesure de le quantifier. Un indice d'évaluation de confort thermique peut être défini comme étant une valeur numérique qui permet de mesurer l'effet, sur l'organisme, des apports et pertes de chaleur afin de comparer les différentes ambiances entre elles et évaluer leurs niveaux de confort (Pigeon, 2009). Il existe en principe deux grands types d'indices thermiques. Il y'a les indices de confort thermique utilisés dans les milieux où les conditions thermiques sont relativement modérées et

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

les indices de stress thermique utilisés généralement dans les milieux dont les conditions thermiques sont extrêmes. Néanmoins, bon nombre d'indices incluent à la fois la partie confort et la partie stress thermique.

Un indice thermique est basé au moins sur deux paramètres qui influencent le confort thermique. Sur cette base, nous avons les indices thermiques empiriques ou simples et des indices thermiques rationnels qui considèrent en plus des quatre paramètres climatiques influençant le confort thermique, des variables physiologiques et d'habillement (McIntyre, 1980). Les indices et méthodes sont généralement établis dans un contexte bien précis, avec des moyens de mesures particulières et une méthodologie bien définie. Leur usage doit donc se faire de façon judicieuse pour des résultats pertinents. Un inventaire des indices les plus utilisés en milieu tropical est effectué et se trouve en annexe (annexe 1).

Pour la présente étude, le Wet Bulb Globe Temperature Index (WBGT) et l'Outil d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments à Ouagadougou proposé par Arnaud OUEDRAOGO (A. OUEDRAOGO ,2022) seront utilisés pour évaluer le confort thermique dans les bureaux de 2iE. Ces deux indices seront donc mieux détaillés dans les sous parties qui suivent.

I.1.5.1. Le « Wet Bulb Globe Temperature Index » (WBGT)

L'indice de température au thermomètre-globe humide, WBGT, est un indice empirique de stress thermique utilisé pour estimer les effets combinés de la température d'air, de l'humidité et du rayonnement solaire sur un individu. Il représente la valeur, en rapport à la dépense métabolique liée à une activité professionnelle déterminée, au-delà de laquelle un individu serait en stress thermique. C'est un indice reconnu dans des normes internationales ((ASHRAE, 2001) ; (ISO 7243, 2017)) et très utilisé dans le monde surtout dans les environnements chauds. Il a de nombreuses applications dans des études d'impact sur la santé, notamment dans le monde du travail, que ce soit en milieu intérieur ou extérieur (Emmanuel et al., 2016). Pour un climat tropical sec comme celui de Ouagadougou cet indice serait plus adapté. Sa formule de calcul en milieu intérieur (sans rayonnement solaire) est la suivante :

$$\text{WBGT}_{\text{environnements fermés}} = 0,7 T_w + 0,3 T_g. \quad \text{Eq. I-1}$$

Avec : T_w la température de bulbe humide en ventilation naturelle (en °C), T_g la température de globe noir exposé au soleil (en °C).

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

Le tableau I-3 rapporte les valeurs limites de l'indice de stress thermique WBGT fixées par la norme ISO 7243 :

Tableau I-3: Valeurs limites de l'indice de stress thermique WBGT selon la norme ISO 7243 (source : Guide d'utilisation de de l'appareil de mesure du confort thermique : HD32.2).

CLASSE DE TAUX MÉTABOLIQUE	TAUX MÉTABOLIQUE, M		VALEUR LIMITE DE WBGT			
	RELATIF À UNE AIRE DÉFINIE DE SUPERFICIE DE LA PEAU W/m ²	TOTAL (POUR UNE AIRE MOYENNE DE LA SUPERFICIE DE LA PEAU DE 1,8 m ²) W	PERSONNE ACCLIMATÉE À LA CHALEUR °C		PERSONNE NON ACCLIMATÉE À LA CHALEUR °C	
0 (AU REPOS)	M ≤ 65	M ≤ 117	33		32	
1	65 < M ≤ 130	117 < M ≤ 234	30		29	
2	130 < M ≤ 200	234 < M ≤ 360	28		26	
3	200 < M ≤ 260	360 < M ≤ 468	AIR STAGNANT 25	AIR NON STA-GNANT 26	AIR STAGNANT 22	AIR NON STA-GNANT 23
4	M > 260	M > 468	23	25	18	20

NOTE – LES VALEURS ONT ÉTÉ ÉTABLIES EN PRENANT COMME RÉFÉRENCE UNE TEMPÉRATURE RECTALE MAXIMALE DE 38 °C POUR LES PERSONNES EXAMINÉES.

I.1.5.2. L'outil d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments à Ouagadougou

Il est une combinaison de paramètres climatiques tels que la neutralité thermique (T_n), la température opérative (T_o) et la nouvelle température effective (ET*). L'ensemble de ces paramètres permet de tracer une zone de confort thermique sur le diagramme psychométrique, adapté aux réalités climatiques locales.

- La température de neutralité (T_n) d'une zone est obtenue en exploitant les températures mesurées sur une longue période dans cette zone. Sa formule de calcul est la suivante :

$$T_n = 17,8 + 0,31 * T_m \quad \text{Eq. I-2}$$

Avec T_n : la température de neutralité en °C et T_m : la température moyenne mensuelle en °C.

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

- La température opérative (T_o) peut être définie comme la moyenne des températures dues au rayonnement des parois et d'air ambiant, pondérée par leurs coefficients de transfert de chaleur respectifs (ASHRAE, 2009). Les températures opératives sont sur l'axe des abscisses de l'outil d'évaluation du confort thermique proposé par Arnaud OUEDRAOGO afin de prendre en compte l'effet de la convection et du rayonnement dans le bâtiment. La formule de calcul de la température opérative est la suivante :

$$T_o = \frac{h_r * T_{mrt} + h_c * T_a}{h_r + h_c} \quad \text{Eq. I-3}$$

Dans cette équation :

- ✓ T_o est la température opérative en °C ;
 - ✓ T_{mrt} est la température radiante moyenne en °C ;
 - ✓ T_a est la température de l'air en °C ;
 - ✓ h_r est le coefficient de transfert radiatif en $W \cdot m^{-2} K^{-1}$;
 - ✓ h_c est le coefficient de transfert convectif en $W \cdot m^{-2} K^{-1}$;
- La température effective (ET*) est un indice beaucoup utilisé de nos jours pour la description du confort thermique dans l'habitat. Il peut être définie comme étant la température d'une enceinte uniforme, d'air immobile à 50 % d'humidité relative qui produirait le même échange de chaleur par radiation, convection et évaporation que l'environnement en question. Les hypothèses permettant de la représenter sont les suivantes : Humidité relative HR = 50 % ; Vitesse de l'air $V < 0,2$ m/s ; Résistance de l'habillement (Icl) = 0,6 clo ; Métabolisme Met = 1 (ASHRAE, 2009). Les isothermes ET* sont représentées sous forme de série de droites sur le diagramme psychrométrique. Ces droites matérialisent la même sensation thermique ressentie par un individu. Il est déterminé à l'aide d'une courbe qui présente les lignes d'égale sensation thermique ET*.

L'outil d'évaluation du confort thermique dans l'habitat à Ouagadougou est la figure I-2 :

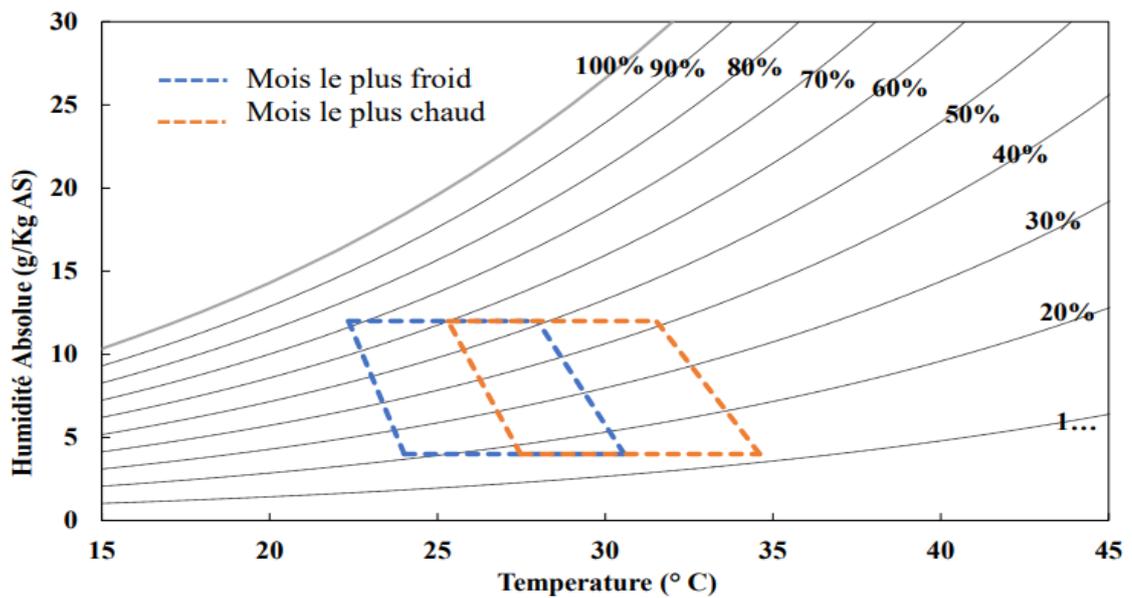


Figure I-2: Outil d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments à Ouagadougou (A. OUEDRAOGO, 2022)

I.2. Consommation énergétique dans les bâtiments en pays chaud et sec

I.2.1. Typologie des bâtiments

Il existe plusieurs classifications des bâtiments. De façon générale il y'a les bâtiments à usage d'habitation, les bâtiments administratifs (écoles, universités, administrations diverses) et les bâtiments destinés aux activités commerciales. L'accent est mis sur les bâtiments administratifs qui sont la cible de la présente étude.

Un bâtiment est conçu pour généralement avoir une longue durée de vie au cours de laquelle il répondrait aux multiples exigences des utilisateurs finaux. Parmi ces exigences, on pourrait citer la qualité de l'environnement intérieur qui peut être défini comme étant un ensemble de confort thermique, visuel, acoustique et la qualité de l'air intérieur (Soares et al., 2017 ; HEMA, 2020). Du point de vue thermique, le bâtiment doit permettre de supprimer, retarder ou favoriser l'impact de plusieurs facteurs déterminants tels que le rayonnement solaire, la température, l'humidité et la vitesse du vent. Il joue donc un rôle de filtre thermique permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures pour le bien être thermique des utilisateurs. Malheureusement, dans la plupart des pays africains, la construction actuelle dans le secteur des bâtiments administratifs s'inspire beaucoup des constructions en occident au détriment des architectures anciennes qui prenaient

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

mieux en compte les contraintes climatiques et valorisaient les ressources locales de construction (Jannot et Djiako, 1994). Ce choix peut se justifier par plusieurs facteurs comme la bonne maîtrise de ces techniques de construction, la recherche de l'esthétique, du prestige social ou la méconnaissance du potentiel des matériaux locaux pour le confort thermique (Y. Coulibaly et al.,1998) et le développement durable. Cependant, ces nouvelles constructions réalisées généralement en parpaing creux de ciment avec une toiture en tôle ondulée ou en dalle de béton et de larges fenêtres vitrées conduisent à une inadéquation des bâtiments au climat. Cela entraîne un accroissement énorme des charges de climatisation dans les bâtiments qui ont ces dispositifs de refroidissement.

I.2.2. Consommation énergétique des bâtiments administratifs

Le Burkina Faso est un pays en voie de développement avec un climat tropical chaud et sec. Le pays ne dispose pas jusqu'à ce jour d'une norme sur la performance énergétique des bâtiments. La conception des bâtiments, leur orientation et le choix des matériaux de construction sont donc généralement basés sur des critères économiques et souvent culturels. Ce qui amène à construire, pour la plupart du temps, des bâtiments dans lesquels l'environnement thermique intérieur est insupportable pour les utilisateurs. Par exemple, les bâtiments en climat tropical chaud et sec comme celui du Burkina font face à d'importants apports thermiques liés aux forts flux de radiations solaires et aux températures extérieures élevées. Une non prise en compte de ces apports dans la conception, entraîne la réalisation des bâtiments avec des températures intérieures ambiantes très élevées jouant sur la santé et rentabilité des occupants. Il s'ensuit d'énormes besoins en refroidissement qui incitent à l'usage presque permanent des ventilateurs et ou des climatiseurs pour les édifices qui en disposent. Cette situation augmente les coûts d'exploitation des bâtiments et la consommation d'énergie dans un pays où l'accès à l'électricité est encore très faible. En effet, environ 16 millions de personnes n'ont pas encore accès à l'électricité au Burkina Faso (IEA,2019). Le taux d'électrification est de 65% en zone urbaine et moins de 5% en zone rurale (IEA,2019). De plus, 60 à 65 % de la consommation électrique des bâtiments publics au Burkina Faso est due à la climatisation et ce pourcentage augmenterait avec une population qui pourrait doubler entre 2010 et 2030 pour atteindre 29,15 millions d'habitants (B.I. OUEDRAOGO et al.,2012). Si la tendance de construction et les habitudes ne changent pas, la demande en énergie s'augmentera sans cesse. Une grande partie de la population vivrait donc dans l'inconfort par manque de

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

moyen et par l'incapacité du pays de satisfaire la demande énergétique. Il est donc important d'exploiter rationnellement les ressources climatiques et environnementales pour garantir un confort thermique dans les bâtiments en minimisant au maximum le recours à la ventilation et à la climatisation électriques. De ce fait, plusieurs chercheurs sont à la tâche pour offrir et promouvoir des bâtiments résilients et mieux intégrés dans leur environnement. De plus en plus, la recherche dans ce secteur est orientée vers des bâtiments dits bâtiments passifs, bâtiments à énergie positive, bâtiments à énergie nulle, bâtiments à basse consommation, bâtiments verts et bâtiments durables. Tous ces concepts ont pour but de diminuer drastiquement la consommation énergétique des bâtiments surtout celle liée à l'usage des dispositifs de refroidissement.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter une bibliographie sur la notion de confort thermique et la typologie des bâtiments au Burkina ainsi que leur demande en énergie pour maintenir les occupants dans des conditions thermiques acceptables. Bien que la situation de confort thermique dépende de chaque personne, de nombreux outils ont été élaborés par les chercheurs pour tenter de l'évaluer chez des individus dans leur environnement thermique. Dans le processus de construction des bâtiments, la non prise en compte des paramètres environnementaux entraîne un recours à la climatisation électrique pour y faire régner un microclimat supportable pour les utilisateurs. Cela a donc des répercussions aussi bien économiques qu'environnementales dans un pays en voie de développement.

CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Introduction

Ce chapitre traite de la méthodologie et du dispositif d'expérimentation utilisés pour la collecte des données environnementales dans les bureaux de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Il consiste à décrire les sites où l'étude a été effectuée et présenter les appareils utilisés ainsi que leurs caractéristiques. Il présente également la préparation et le déroulement des enquêtes.

II.1. Présentation des sites de l'étude

Ce travail a été effectué dans l'enceinte des deux sites de l'institut 2iE avec pour cible principale les bureaux possédant un système de ventilation et ou de climatisation électrique et leurs occupants. Sur le site de Kamboinsé, une localité située à une dizaine de kilomètres de Ouagadougou qui est la capitale administrative du Burkina Faso, un prétest a été effectué dans les bureaux du département de Génie Civil. Il a permis l'amélioration et la validation du questionnaire utilisé pour l'enquête et la vérification de la fonctionnalité du matériel de collecte de données environnementales et énergétiques. Cette étape a permis, de façon générale, de réajuster et valider l'approche méthodologique de cette étude. La grande partie des travaux sur le terrain a été réalisée sur le site de Ouagadougou sis au quartier Zogona, du côté Nord-Ouest de l'Université Joseph KI ZERBO. Les enquêtes suivies de prise de données environnementales ont été effectuées dans tous les blocs. Mais pour des raisons d'incompatibilité du matériel et de l'installation électrique de certains blocs, l'évaluation de la consommation d'énergie n'a pas été possible pour bon nombre d'anciennes constructions. Le travail a été effectué dans des bureaux de tailles différentes mais chacun est équipé d'un nombre de climatiseurs proportionnel à son volume. L'ossature des bureaux est en béton et parpaings de ciment. Les figures a et b (figures II-1) représentent respectivement un bloc dans lequel l'étude a été réalisé et l'intérieur d'un bureau.



a) Complexe scientifique

b) L'intérieur d'un bureau

Figure II-1 : Un bloc où a eu lieu l'étude

II.2. Instruments utilisés et méthodologie expérimentale

II.2.1. Instruments utilisés

Différents types d'instruments ont été utilisés pour la collecte des données. Les données énergétiques ont été collectées à l'aide d'un compteur électrique. L'enregistrement des données des paramètres environnementaux à l'intérieur des bureaux a été effectué à l'aide de deux appareils. Il s'agit des enregistreurs de température miniaturisés programmables appelés des thermopuces dont le fabricant est la société Waranet Solution et un appareil de mesure de paramètres environnementaux nommé HD32.2 venant de la société Delta OHM. Toute cette instrumentation est décrite dans les lignes suivantes. Les données des paramètres environnementaux extérieurs ont été fournies par le service de la météorologie de l'institut 2iE

a) Les thermopuces

Elles sont faites de thermomètre de modèle P650, équipés d'une sonde de température PT100 avec une mémoire interne permettant de stocker des valeurs de température. Elles respectent

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

les exigences des normes EN 13 005 et ISO 17025 et ont une incertitude de 0,36 °C. Un câble USB pour la connexion à un ordinateur des puces pour permettre leur programmation, la lecture et ou l'extraction de leurs données et un logiciel de traçabilité et de traitement appelé Warito II sont fournis par le fabricant. Pour ce travail, les puces sont programmées pour enregistrer les températures horaires afin d'avoir une idée de l'évolution de la température à l'intérieur des bureaux durant la journée de travail. Le nombre de puces varie en fonction du volume du bureau. Une puce, au moins, est placée un peu au centre du bureau de sorte à prendre la température ambiante et l'autre plus proche de la paroi la plus exposée au rayonnement solaire pour prendre l'évolution de la température à la surface intérieure de cette paroi. Les puces sont placées au plus tard la veille du jour dont on veut connaître l'évolution de la température dans le bureau et enlevées au plutôt le lendemain. À l'aide d'un fichier Excel préalablement élaboré, toutes les informations sur les mouvements des puces sont notées (le nom de la puce, la date, le lieu où se trouve la puce) pour faciliter le traitement des données. La figure II-2 présente les thermopuces, le câble USB et l'interface du logiciel Warito II.



Figure II-2 : Appareils de collecte des températures

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

b) Appareil d'acquisition des données environnementales

Il est un instrument de mesure des paramètres environnementaux du confort thermique de Delta OHM de type HD32.3. C'est un appareil muni de trépieds facilitant son déplacement et son positionnement dans le bureau. Il est doté de trois entrées pour sondes avec module SICRAM lui permettant de faire plusieurs mesures en temps réel. L'appareil HD32.3 peut-être programmé directement avant les mesures. Les trois sondes dont il est composé sont :

- Une sonde (TP 3275) de type PT 100 à fil mince, qui permet de mesurer la température ambiante et la température du thermomètre globe. Son exactitude de 1/3 DIN permet d'avoir une plage de mesure de (- 40 °C à 100 °C) ;
- Une sonde (HP 3217) de type PT 100 permet la mesure de l'humidité relative avec une précision de $\pm 2,5$ % et la température à bulbe humide avec une précision de 1/3 DIN. La plage de mesure des humidités relatives est de 5 % à 98 % ;
- Une sonde (AP 3203) de type NTC 10 kOhm qui permet la mesure de la vitesse de l'air avec une exactitude de $\pm 0,05$ m/s. Sa plage de mesure est de 0,05 à 5 m/s.

Il permet également de calculer directement les indices de confort thermique tels que le PMV et le PPD, le WBG_{int} et le WBG_{out} . Dans le cadre de cette étude, il a été utilisé pour évaluer le confort thermique dans les bureaux. Les paramètres environnementaux mesurés sont consignés dans le tableau II-1 :

Tableau 4.: Paramètres climatiques mesurés par l'appareil HD32 de Delta OHM

Symbole	Paramètre environnemental
T_g	T_g la température de globe noir exposé au soleil (en °C)
T_w	Avec T_w la température de bulbe humide en ventilation naturelle (en °C),
T_a	Température d'air
T_{mrt}	Température radiante Moyenne
HR	Humidité relative
V_a	Vitesse de l'air
WBG_{int}	Wet Bulb Globe Temperature intérieur

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

La mesure des paramètres environnementaux a été effectuée de façon ponctuelle au moment où l'enquêteur passe pour administrer le questionnaire. Cette prise de valeurs, dans chaque bureau, s'est effectuée le plus proche possible de l'occupant enquêté pendant que ce dernier répond aux différentes questions dans le questionnaire. La figure II-3 présente l'appareil de collecte des paramètres environnementaux utilisés.

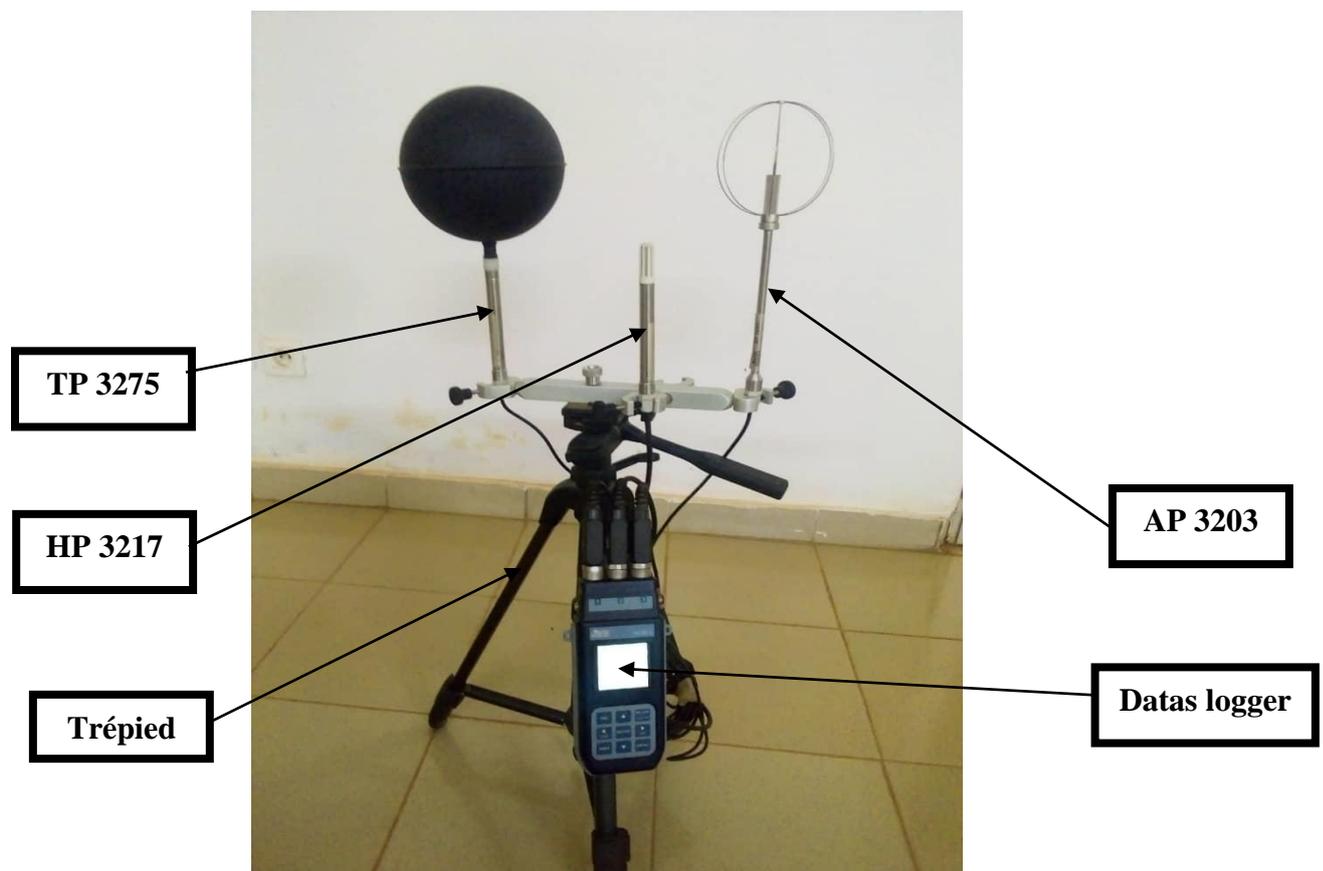


Figure II-3: Appareil d'acquisition de paramètres environnementaux

c) Les compteurs d'énergie

Les compteurs d'énergie électronique monophasé DIM sont utilisés pour l'évaluation de la consommation d'énergie lié à l'usage d'un système électrique de refroidissement dans les bureaux dans le cadre de cette étude. Ce compteur est adapté pour des applications de comptage divisionnaire de l'énergie active (kWh) sur un circuit monophasé. Ils sont conformes aux exigences relatives à la norme internationale IEC62053-21 sur le compteur. Pour la présente étude, chaque compteur est relié à un climatiseur spécifique dans un bureau afin d'évaluer la consommation d'énergie liée à son usage durant la journée de travail. Le

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

compteur est placé au moins la veille du jour dont on veut évaluer la consommation énergétique et il est enlevé le lendemain. La consommation énergétique est prise à chaque heure d'intervalle en commençant par une consommation nulle à 7h et en arrêtant la prise à 16h conformément à la durée de travail règlementaire de 2iE. Les capteurs d'énergie sont dans la figure II-4 :



a) Compteurs d'énergie en activité

b) Un compteur d'énergie non en activité

Figure II-4 : Appareils de mesure de la consommation d'énergie

II.3. Enquêtes sur le terrain

Cette partie concerne les études de terrain avec enquête pour une collecte de données dans le but d'analyser statistiquement les sensations, perceptions et préférences réelles des occupants des bâtiments et leurs attentes du point de vue thermique. Elle permettra d'avoir également une idée sur la consommation d'énergie liée à la recherche d'un microclimat confortable dans les bureaux.

II.3.1. Conception des fiches de l'enquête

Des études ont été menées sur le terrain pour caractériser le confort thermique en Afrique en général et au Burkina Faso en particulier. Plusieurs fiches d'enquêtes ont donc été élaborées. Il existe entre autres les fiches élaborées par LAWSON (Lawson, 1991), MINANE (MINANE, 2010), et Arnaud OUEDRAOGO (Arnaud OUEDRAOGO, 2022) qui leur ont permis d'évaluer la perception du confort thermique et de proposer des plages de confort thermique dans les bâtiments en évolution libre au Burkina Faso. La présente étude a lieu dans des bâtiments possédant un système de refroidissement électrique. Les occupants ont donc la possibilité de contrôler le microclimat à l'intérieur de leur bureau. Dans le cadre de cette étude, la fiche de

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

questionnement proposé qui se trouve en annexe (annexe 2) est en version numérique sous un google form pour faciliter le traitement des données. Elle est subdivisée en plusieurs sections qui sont :

- Une première partie permettant d'avoir des informations d'ordre général sur l'occupant et sur le bâtiment ;
- La deuxième partie est consacrée à la recherche d'informations relatives à la perception et aux attentes de l'enquêté vis-à-vis de l'environnement thermique de son bureau. Elle a pour but également de collecter les données des paramètres subjectifs du confort thermique ;
- La troisième partie renseigne sur la consommation énergétique de l'occupant dans sa quête de confort thermique dans son bureau ;
- La dernière partie renseigne sur les paramètres environnementaux mesurés dans la pièce.

II.3.2. Mode Opérateur de l'enquête

Les enquêtes se sont déroulées sur les deux sites de 2iE, à Ouagadougou et à Kamboinsé, dans les bâtiments administratifs climatisés aux heures et jours de travail. Avant d'aller sur le terrain, un mail a été envoyé à tout le personnel 2iE pour les informer du passage d'un agent enquêteur sur le confort thermique et la consommation énergétique dans leurs bureaux. Cela a permis d'avoir la participation du grand nombre de personnes de la cible de l'étude. Après la préparation du matériel composé essentiellement de l'appareil de mesure du confort thermique de Delta OHM, nous avons procédé aux collectes des données dans les différents bureaux. La première des choses une fois dans le bureau est la demande de permission et du consentement de l'occupant du bureau pour déposer notre appareil de mesure des paramètres environnementaux et répondre aux différentes questions. Une fois l'accord obtenu, l'appareil de mesure est disposé à proximité de l'occupant, à un mètre environ, en prenant le soin de lui expliquer son utilité. La première phase de la collecte consiste à expliquer succinctement l'objet et comment l'enquête doit se dérouler. Ensuite, l'occupant répond aux différentes questions et les paramètres environnementaux sont mesurés soigneusement. À la fin, le remplissage du formulaire est validé et le matériel emballé pour une autre destination.

II.3.3 Caractéristique de l'échantillon

Ce travail a pour cible le personnel de 2iE et toute personne occupant un bureau de 2iE. L'ensemble du personnel occupant au moins un bureau est estimé à environ 95 personnes selon les services de gestion des ressources humaines. IL y'a environ 25 autres personnes occupant des bureaux pouvant faire partir de l'enquête. Il s'agit essentiellement des stagiaires, des doctorants et quelques partenaires. La taille minimale de notre échantillon est donnée par la formule suivante (Rea L.M. et al., 1997) :

$$n = \frac{t_p^2 * P(1-P) * N}{t_p^2 * P(1-P) + N(N-1) * y^2} \quad \text{Eq. II-1}$$

Dans cette formule :

- ✓ n : est la taille de l'échantillon ;
- ✓ N : taille de la population cible. Dans notre cas il représente le nombre d'occupants des bureaux qui est de 120 ;
- ✓ P : proportion attendue d'une réponse de la population ou proportion réelle. Dans notre cas elle est prise égale à 0,5 ;
- ✓ t_p : Il dépend de l'intervalle de confiance d'échantillonnage. Un intervalle de confiance de 95% est généralement conseillé ; donc $t_p = 1,96$;
- ✓ y : C'est la marge d'erreur de l'échantillonnage ; dans notre cas il est de 5%.

Conformément à cette formule la taille minimale de l'échantillon est donc de 92 personnes

Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire les différents bâtiments dans lesquels l'étude est effectuée. Les appareils de mesure et les enquêtes ont été également présentés et les modes opératoires expliqués. Toutes les données récoltées seront minutieusement traitées afin de présenter et comparer les ressentis thermiques des occupants et leur consommation d'énergie.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats des travaux menés sur le terrain. Les données collectées sont minutieusement analysées et interprétées. Les résultats trouvés sont comparés aux résultats des travaux menés par des études antérieures.

III.1. Nombre de personnes enquêtées

Dans le cadre de ce travail, 97 personnes ont été enquêtées soit 43 hommes et 54 femmes comme le présente la figure III-1. Leur âge varie entre 18 et 60 ans (cf. figure III-2). Ce nombre étant au-dessus de la taille minimale de l'échantillon (cf. II.3.3), il est donc représentatif de la population totale.

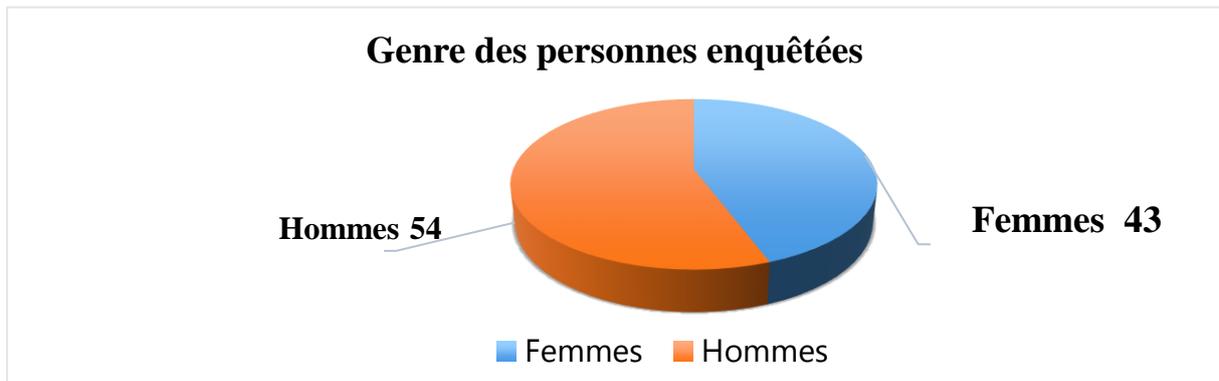


Figure III-1 : Nombre de personnes enquêtées

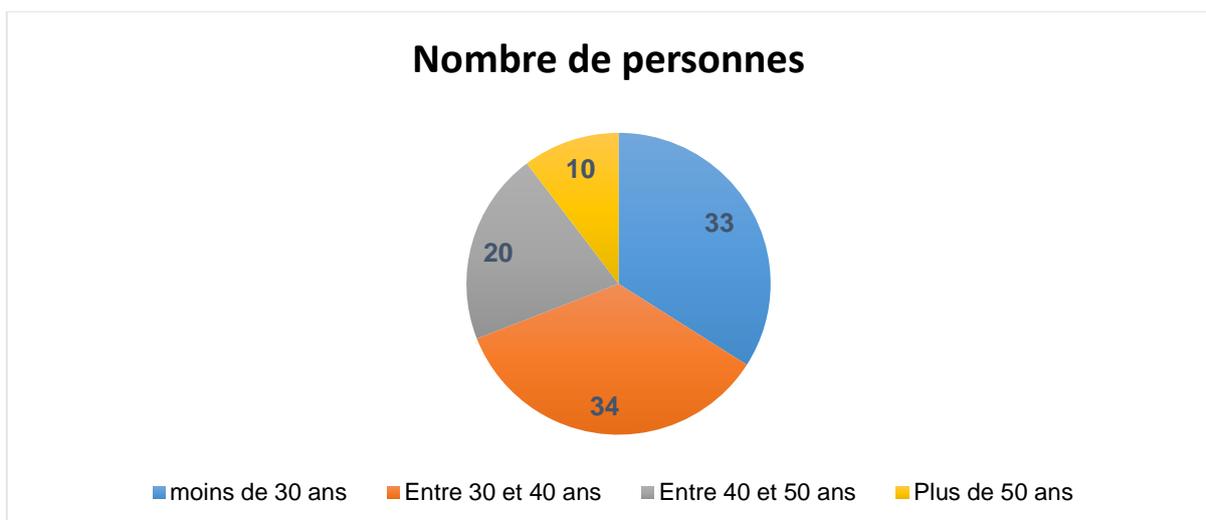


Figure III-2 : Ages des personnes enquêtées

III.2. Paramètres environnementaux extérieurs

La présente étude a eu lieu en période froide. Les travaux de terrain se sont déroulés du 06 Novembre 2022 au 05 décembre 2022. Les différents paramètres de l'environnement extérieur ont été fournis par le service météorologique de 2iE. Leurs valeurs caractéristiques sont dans le tableau III-1 :

Tableau III-1 : Valeurs caractéristiques des paramètres de l'environnement extérieur

	Température (°C)	Humidité Relative (%)	Rayonnement Solaire global (w/m²)
Maximum	37,4	93,4	954,1
Minimum	14,6	14,8	0
Moyenne	25,88	49,06	232,85

Les évolutions moyennes des différents paramètres extérieurs durant la durée de nos travaux sur le terrain sont représentées à l'aide des figures III-3, III-4 et III-5 :

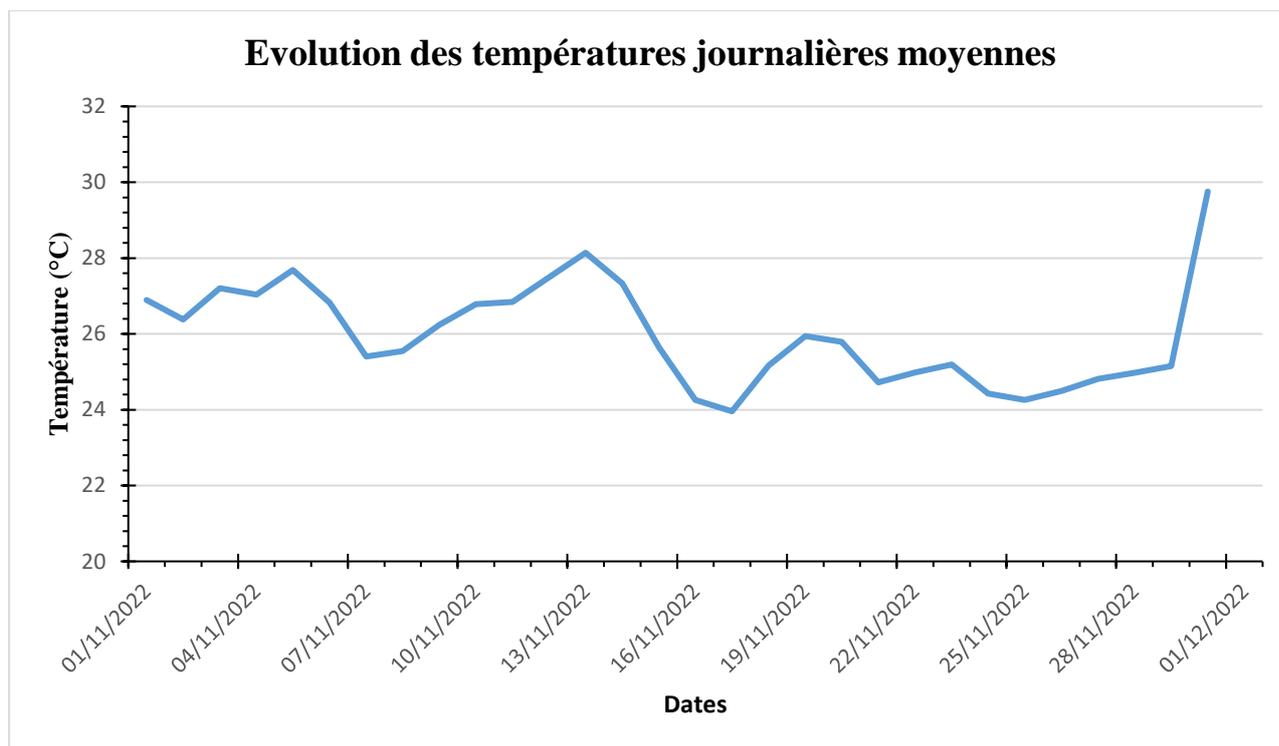


Figure III-3 : Evolution mensuelle des températures moyennes

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

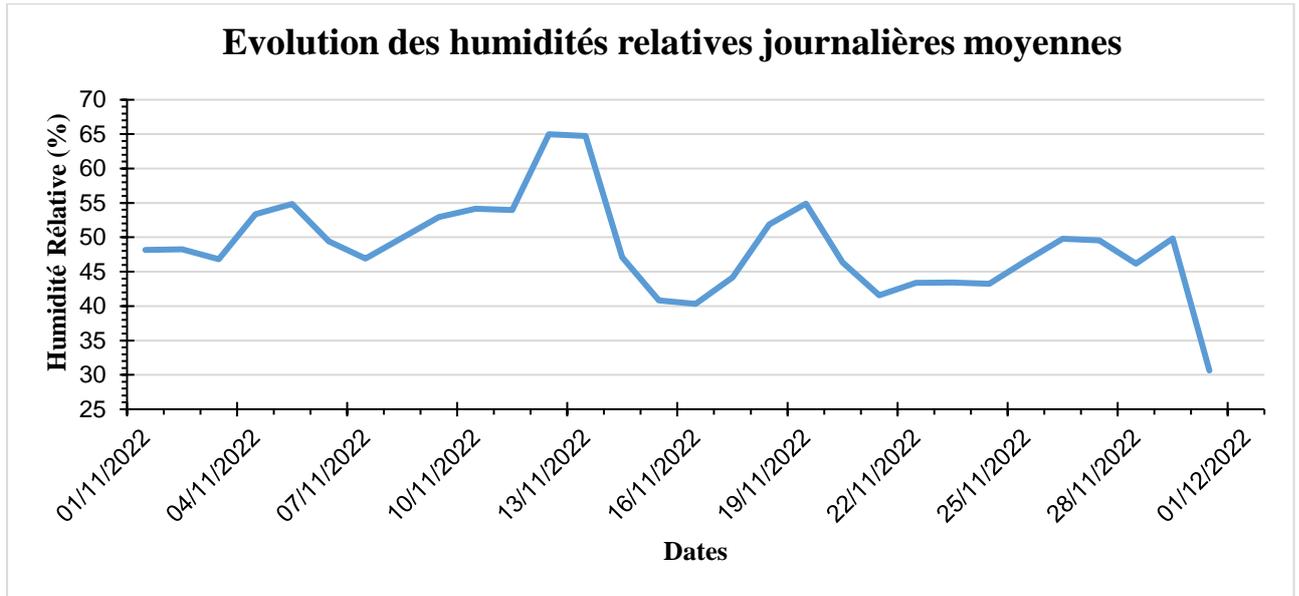


Figure III-4 : Evolution mensuelle des humidités relatives moyennes

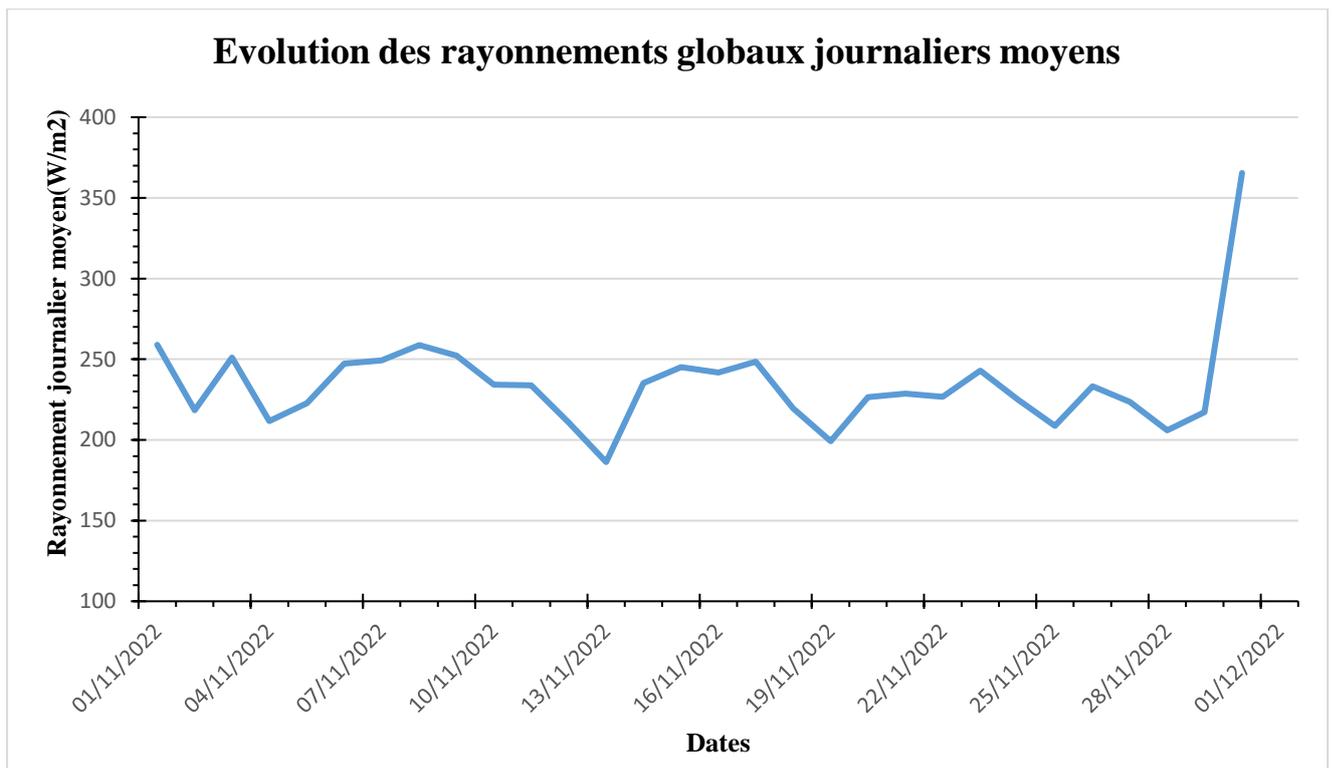


Figure III-5 : Evolution mensuelle des rayonnements solaires globaux

De façon générale, en interprétant les différentes courbes, l'on peut dire que les différents paramètres sont interdépendants. Lorsque le rayonnement solaire s'intensifie, la température extérieure augmente et l'humidité relative diminue.

III.3. Evaluation des facteurs liés aux enquêtés

III.3.1. L'habillement

L'habillement est l'un des facteurs subjectifs qui influence la sensation thermique d'une personne. Le type d'habillement dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels l'on a l'environnement thermique. Cette étude a analysé l'influence de l'environnement thermique sur l'habillement des travailleurs. Les résultats sont consignés dans la figure III-6 :

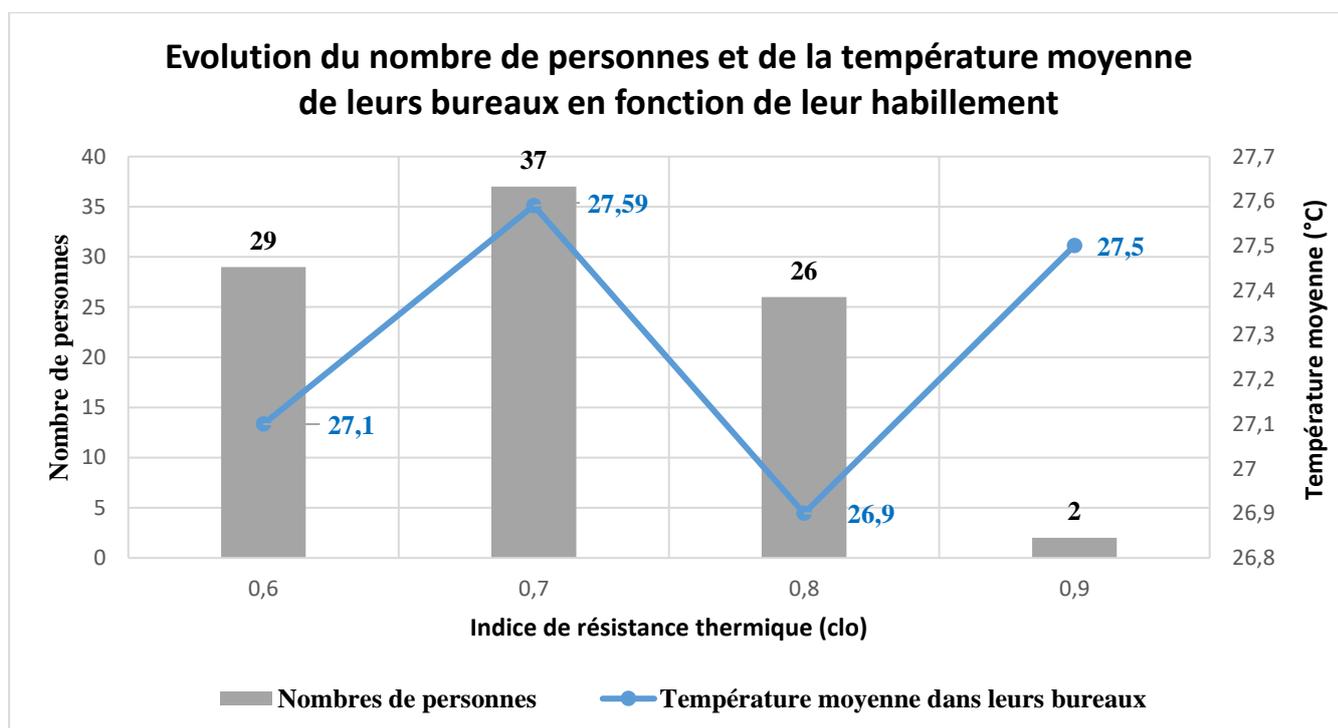


Figure III-6 : Evolution du nombre de personnes et de la moyenne de leurs bureaux en fonction de l'Icl

L'indice de résistance thermique (clo) ne varie pas assez. Cela s'explique par le fait que l'habillement des travailleurs n'est pas très différent les uns des autres du point de vue protection thermique contre l'environnement extérieur.

La température moyenne des bureaux des individus ayant un Icl de 0,6 clo est de 27,1°C tandis qu'elle est de 27,59°C pour ceux dont leur Icl est 0,7 clo. Cette variation semble ne pas suivre la logique car généralement plus l'environnement est frais, plus l'on porte des vêtements lourds (ayant un Icl élevé). Nous pouvons donc dire que le choix de l'habillement des travailleurs ne dépend pas fortement de leur environnement thermique. Ce choix pourrait dépendre d'autres facteurs sociaux non explorés au cours de cette étude.

III.3.2. Le métabolisme

La quasi-totalité des personnes enquêtées étaient au bureau et assis pour travailler. Leur taux métabolique est donc presque constant et équivaut à 70W/m^2 .

III.4. Evaluation du confort thermique dans les bureaux

Le confort thermique a été évalué par les réponses données directement lors de l'enquête et aussi calculé à l'aide de deux indices préalablement définis. Les résultats sont présentés et discutés ci-dessous.

III.4.1. Evaluation subjective de confort thermique

Premièrement la sensation des occupants des bureaux vis-à-vis des paramètres environnementaux qui influencent le confort thermique a été évalué. Les résultats sont consignés dans les figures III-7 :

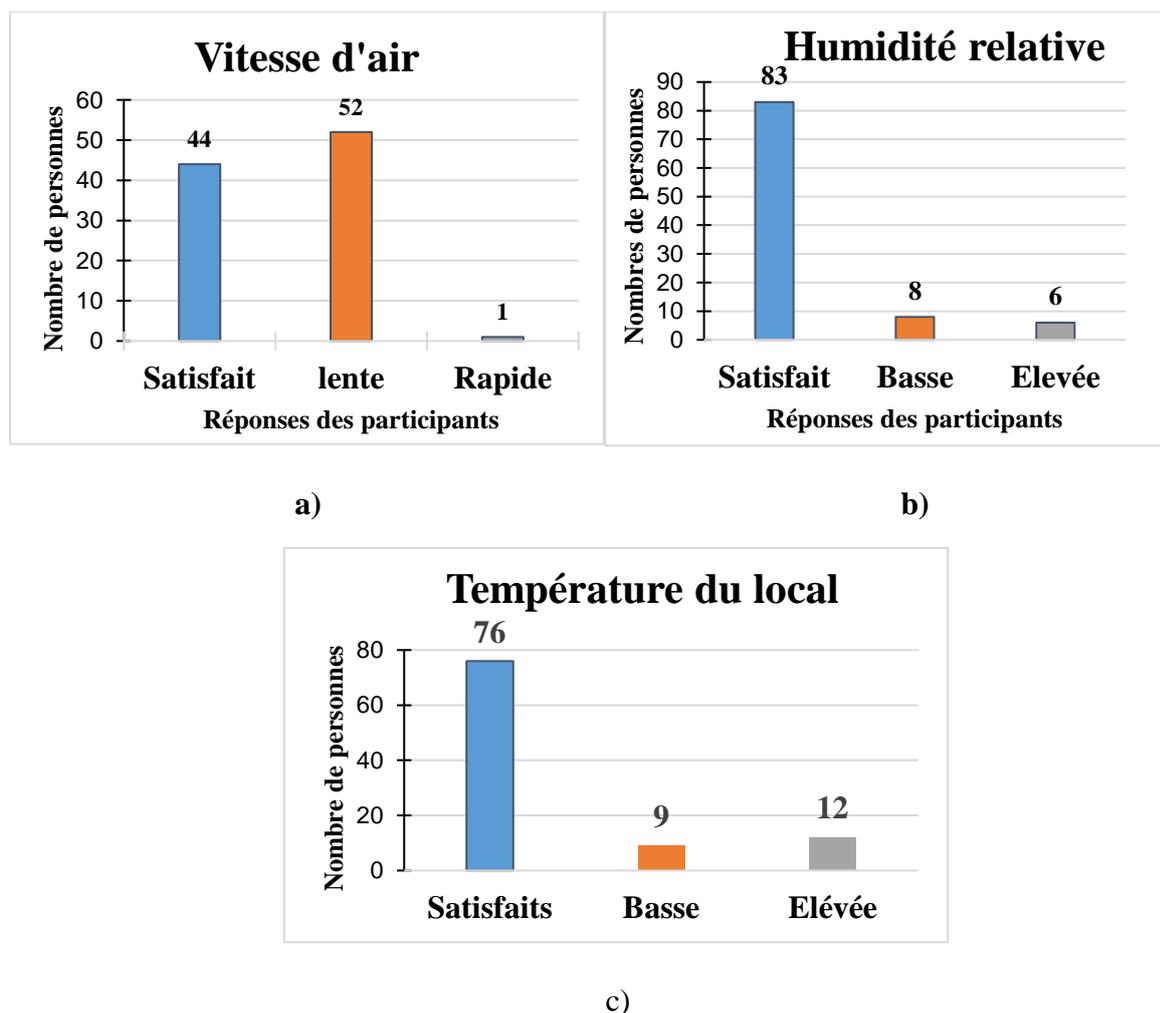


Figure III-7 : Sensation de occupants des bureaux vis-à-vis des paramètres environnementaux

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

De ces résultats nous retenons essentiellement que les occupants des bureaux sont pour la plupart satisfaits de la température et de l'humidité relative dans leurs bureaux. Cependant la circulation d'air est jugée lente. En effet il manque d'ouvertures permettant d'aérer certains bureaux pour favoriser la circulation d'air.

Après une évaluation de la sensation vis-à-vis des différents paramètres, une appréciation globale de l'environnement thermique dans le bureau a été demandée aux participants à l'enquête et les réponses sont synthétisés dans la figure III-8 :

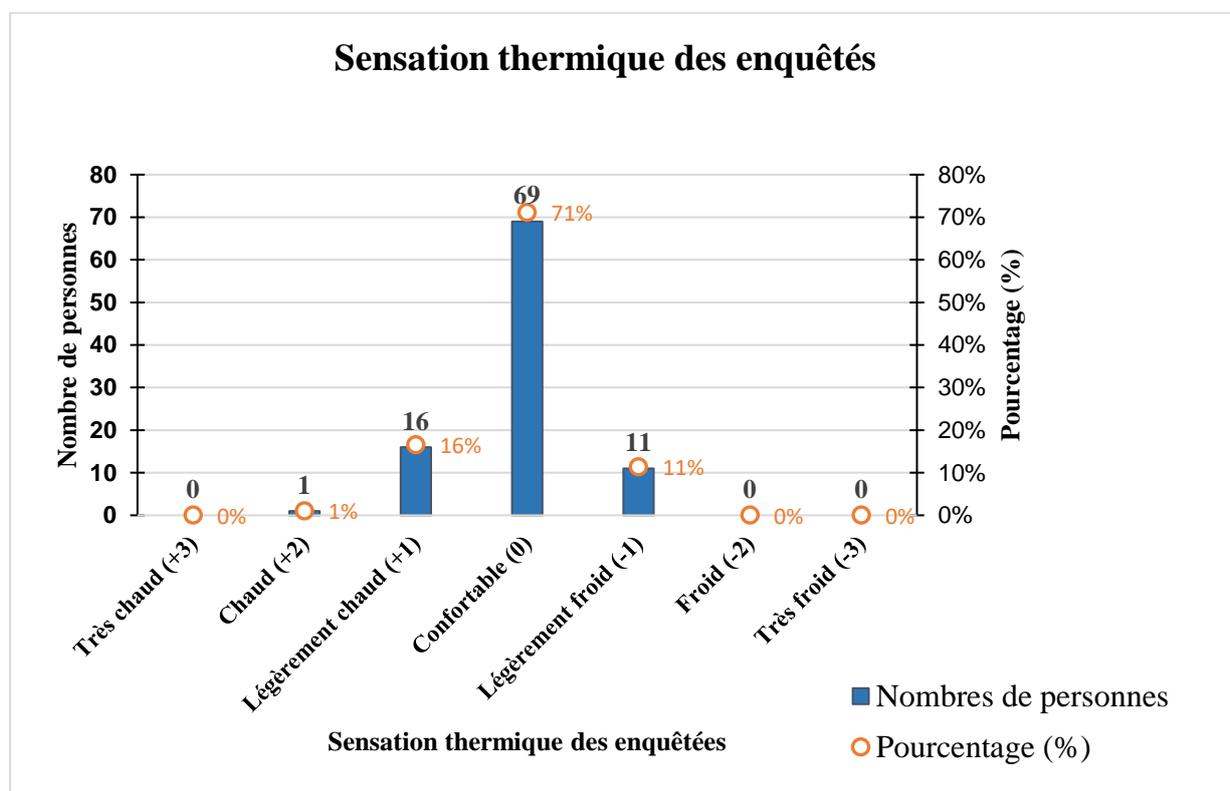


Figure III-8 : Jugement perceptif des individus vis-à-vis de leur environnement thermique

Sur les 97 personnes qui ont répondu aux différentes questions 69 personnes estiment être dans le confort thermique, 11 personnes estiment qu'il fait légèrement froid, 16 personnes estiment qu'il fait légèrement chaud et une personne estime qu'il fait chaud. Conformément à la norme ASRHRAE (ASRAE, 2013) et ISO7730 (ISO7730, 2006), la zone de confort va de la sensation légèrement froide au légèrement chaud. Donc 96 personnes, soit 99% des répondants, sont en situation de confort thermique et seule une personne est en situation d'inconfort thermique. Nous pouvons donc conclure que la plupart des occupants des bureaux sont en situation de confort selon leurs jugements perceptifs. Afin de confirmer ces résultats, une évaluation de l'environnement thermique a été effectuée à l'aide d'indices thermiques.

III.4.2. Evaluation objective du confort thermique à l'aide d'indices thermiques

a) Evaluation du confort thermique à l'aide du WBGT

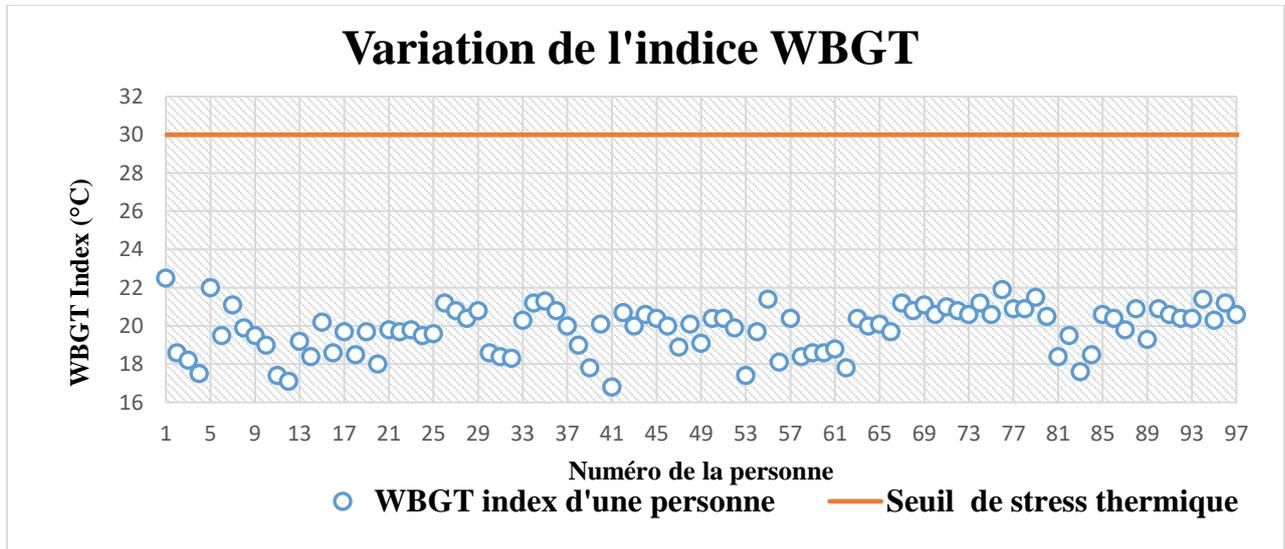


Figure III-9 : Différentes valeurs du WBGT dans les bureaux

Chaque point de la figure III-9 représente la valeur du Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) à proximité de la personne enquêtée. Cette valeur est comprise entre 22,5 et 16,8 avec une moyenne de 17,8 et un écart type de 1,22 comme le présente la figure 16. D'après l'enquête effectuée, presque tous les répondants aux questionnaires sont acclimatés à leur environnement. Etant pour la plupart assis et travaillant au bureau, leur taux métabolique est de classe 1 c'est-à-dire compris entre 65 W/m² et 130 W/ m² (Cf. tableau I-3,). La valeur « seuil » du WTGT à partir de laquelle le stress thermique commence est de 30°C selon la norme ISO7243. Le seuil étant très supérieur aux valeurs mesurées, l'on pourra dire aisément que personne ne se trouve en situation de stress thermique. Cela confirme les réponses des occupants sur leur état thermique.

b) Evaluation de confort thermique à l'aide de l'Outil d'évaluation de confort thermique à Ouagadougou

Les paramètres d'entrée sont l'humidité absolue et la température opérative calculées conformément aux formules déjà présentées (Cf chapitre 1, I-4.2). Les résultats sont sous forme de point dans le diagramme de la figure III-10.

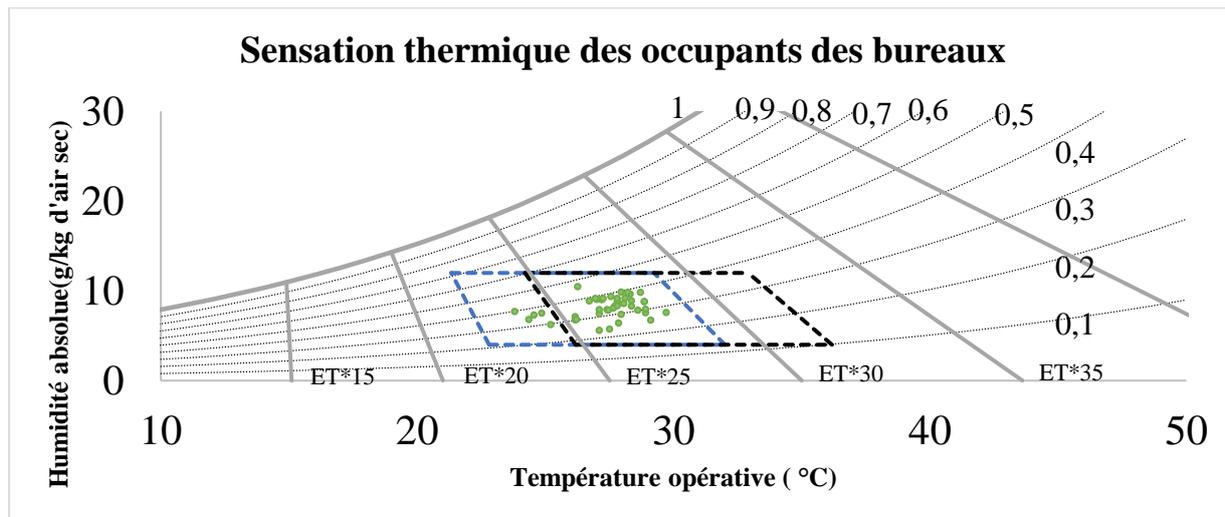


Figure III-10 : Outil d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments à Ouagadougou

Dans le diagramme il y'a deux parallélogrammes donc l'union donne la zone de confort thermique durant l'année. Celui qui est plus à droite (en noir) est la zone de confort thermique du mois le plus chaud de l'année et l'autre est la zone de confort thermique du mois le plus froid. La période à laquelle les travaux se sont déroulés est la période froide. La zone de confort en période froide est donc utilisée pour l'interprétation de nos résultats. Tous les points se situent dans cette zone ; ce qui signifie que l'ensemble des occupants est dans le confort thermique. Cela confirme également les résultats de l'évaluation subjective.

De façon général, la quasi-totalité des occupants des bureaux de 2iE sont dans le confort thermique. Les bâtiments étant équipés de dispositifs de refroidissement à fonctionnement électrique, les résultats de la consommation d'énergie de ces dispositifs nous permettront de mieux comprendre ce qui permet ce confort thermique dans l'ensemble des bureaux. En attendant d'y arriver des plages de paramètres environnementaux en situation de confort thermique dans les bureaux ont été définis.

III.5. Proposition de plages de paramètres influençant le confort thermique

L'objectif de cette partie est de mettre à la disposition des techniciens du génie civil une base de données, lesquelles données permettront un dimensionnement optimal des bâtiments du point de vue thermique et d'aider les décideurs dans leur prise de décision. Cela permettra la conception et la réalisation des bâtiments confortables du point de vue thermique et non énergivores.

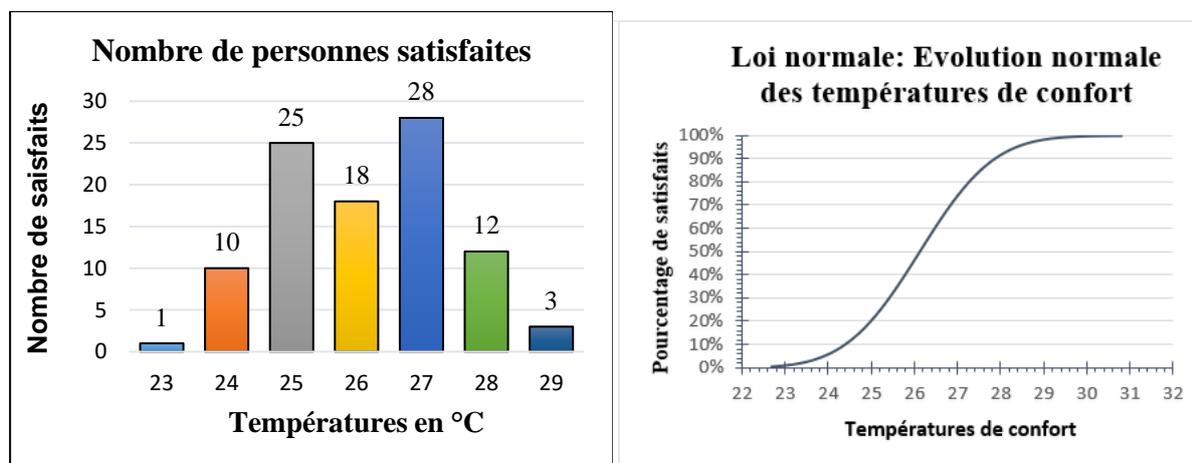
Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

La plupart des paramètres environnementaux sont plus ou moins dépendants. Comme exemple, généralement lorsque la température d'un milieu est élevée, son humidité relative baisse. Les paramètres environnementaux qui influencent le plus le confort thermique sont les températures à savoir la température de l'air et la température moyenne radiante (Y. Janot et T. Djiako,1994). De plus, sur une population de 97 personnes, 52 personnes estiment ne pas connaître la notion de confort thermique avant notre passage et la résumait à une situation pour laquelle l'on est dans une température ambiante agréable. Pour toutes ces raisons, la température opérative (qui prend en compte la température moyenne radiante et celle de l'air) a été le paramètre sur lequel les études ont été focalisées.

III.5.1. Plage de température en situation de confort thermique

a) Proposition de la zone de confort thermique

Les réponses brutes sont présentées à l'aide d'histogrammes. Pour mieux analyser les résultats et respecter les exigences des normes ASHRAE et ISO 7730, nous avons fait recours à la loi de répartition normale pour trouver la plage qui représente exactement la satisfaction de 80% des personnes. La loi normale est une fonction de probabilité qui permet d'avoir la distribution normale d'une variable considérée. Elle est une fonction intégrée dans Excel. Sa formule de calcul est la suivante : $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$; avec : l'écart type de la variable X et m la moyenne de la variable X. Dans notre cas X est la température de confort. Les sont présentés à l'aide de la figure III-12.



a)

b)

Figure III-11 : Personnes satisfaites en fonction des températures de confort

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

Les extrema de température sont 23°C et 29°C avec une moyenne de 26,12°C et un écart type de 1,36. Au regard des résultats et en prenant en compte les exigences de la norme ASHRAE, la zone de confort thermique à 80% est comprise entre **24,4°C** et **27,9°C** et celle à 90% est comprise entre **23,9°C** et **28,4°C**.

b) Confrontation des résultats à ceux de d'autres études

Il y'a quelques travaux déjà menées dans des bâtiments à Ouagadougou pour déterminer une zone de confort thermique. Nous avons les travaux de LAWSON (Lawson, 1991) qui donnent une zone de confort dont les températures sont comprises entre **28°C** et **35°C**. Cette plage très supérieure à la nôtre et contient des températures très élevées. Les travaux de LAWSON se sont déroulés entre avril et mai qui sont des mois de la période chaude au Burkina Faso. De plus, Lawson a établi sa plage grâce à des enquêtes dans des maisons d'habitations qui ne disposent pas de ventilation ou de climatisation électriques et sans préciser le pourcentage de personnes satisfaites considérées. Toutes ces raisons pourraient justifier la différence de plages de températures de confort thermique proposée par la présente étude et celle de LAWSON.

Les travaux de MINANE (Minane, 2010) lui ont permis de déterminer une plage de température en situation de confort thermique comprise entre **26°C** et **29°C** pour les maisons résidentielles à Ouagadougou. Notre plage contient des températures plus basses que la sienne. Cela pourrait se justifier par le fait que MINANE a effectué ses travaux entre le mois de mars et d'avril qui sont des mois de chaleur au Burkina. Lorsque les températures dans lesquelles un individu se trouve sont régulièrement élevées, ce dernier s'acclimate à son environnement et peut tolérer des températures relativement plus élevées que s'il vivait dans un environnement froid. C'est ce que révèle les travaux de Arnaud OUEDRAOGO (A. OUEDRAOGO, 2022). Pour ce dernier, la plage de confort varie en fonction des périodes de l'année.

Dans leurs travaux, Milne et Givoni (Milne et Givoni, 1992 ; Claessens et al., 1996) ont stipulé que la température de confort dans une région tropicale sèche était comprise entre 20 et 27°C. La température minimale de confort est une température basse pour notre cible. Elle n'est donc pas la bonne zone de confort thermique dans les bâtiments à Ouagadougou.

La norme ASHRAE recommande des températures ambiantes comprises entre 23 et 26°C dans les zones tropicales et sèches. A l'intérieur de cette marge, elle prédit que le pourcentage

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

des personnes insatisfaites ne dépassera pas 20%. Les travailleurs semblent supportés des températures supérieures à celles préconisées par la norme ASHRAE 55. Il y'a des températures jugées basses également pour bon nombre d'occupants. Cette plage n'est donc pas en conformité avec les réalités thermiques au Burkina Faso et précisément à Ouagadougou. Cela explique davantage la nécessité de faire des études locales pour la prise en compte des différentes adaptations des individus dans la définition de la zone de confort.

III.5.2. Plage de température de confort thermique en fonction du genre

La sensation de confort thermique est une notion subjective influencée par plusieurs paramètres parmi lesquels l'on pourrait citer le genre de la personne. Nous avons donc fait une étude comparative de la perception de confort thermique en fonction du genre. Les résultats bruts sont présentés à l'aide des histogrammes de la figure III-12. Un usage de la loi normal a permis d'approfondir l'analyse et de définir les zones de confort en fonction du genre en respectant la norme ASHRAE5(Zone pour laquelle au moins 80% de personnes sont satisfaites). Les courbes de distribution normale des températures de confort en fonction du genre sont également présentées à l'aide de la figure III-13 :

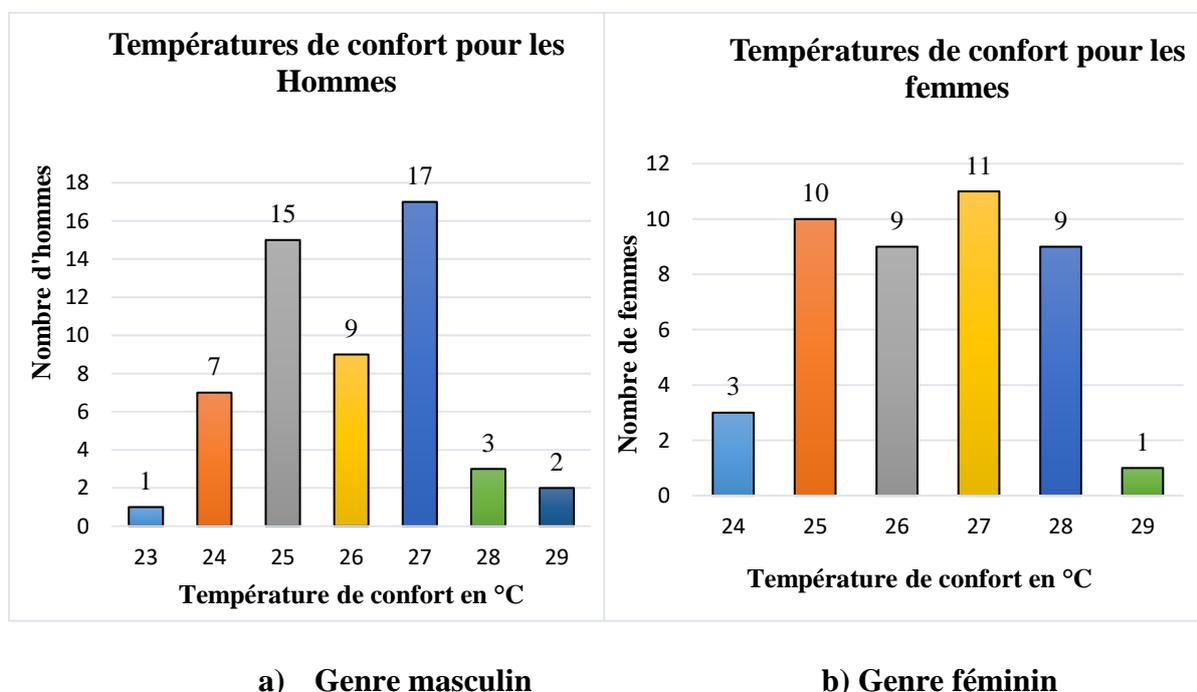


Figure III-12 : Nombre de personnes satisfaites en fonction des températures de confort

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

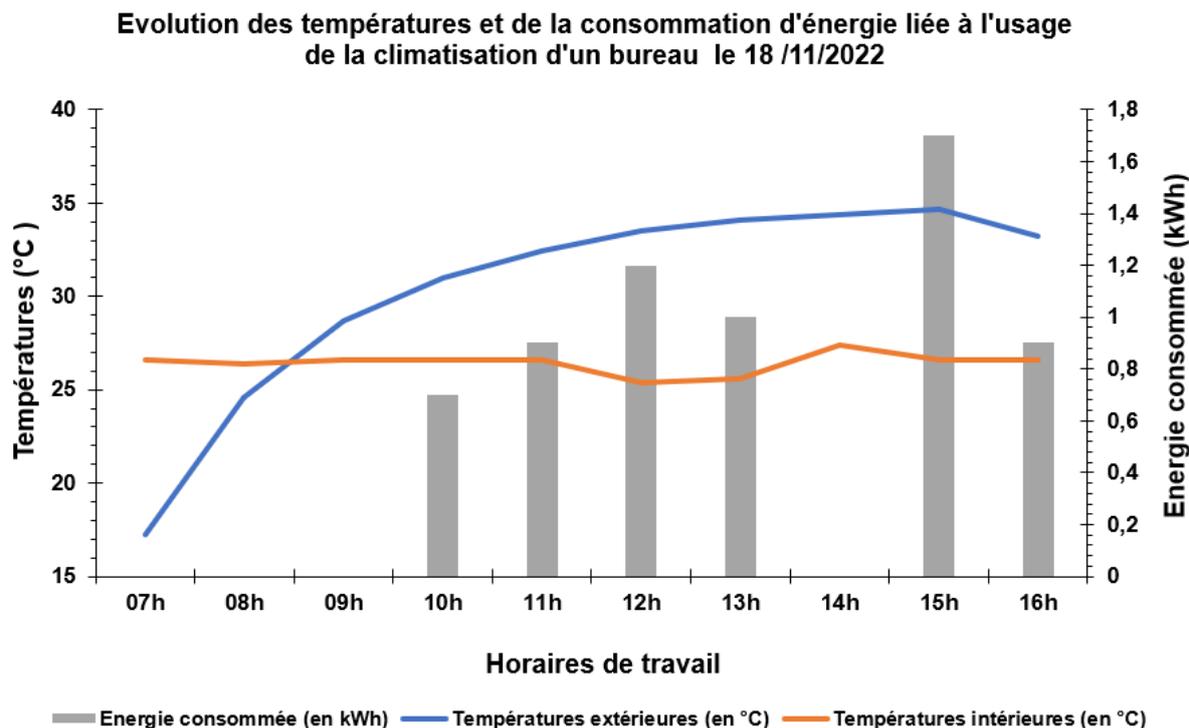


Figure III-14 : Evolution des températures et de la consommation d'énergie liée à l'usage de la climatisation d'un bureau

Les interprétations suivantes peuvent être effectuées à partir de ces résultats :

- La température à l'intérieur du bureau varie très peu. Elle est maintenue presque constante autour de 26°C malgré la hausse de la température extérieure. Cela pourrait se justifier par la capacité du bâtiment à retenir une grande partie de la chaleur à l'extérieure ou le recours de l'occupant à l'usage d'un climatiseur pour le maintien de la température de son local à une valeur agréable tout au long de sa journée de travail. Cette température est bien située dans la zone de confort thermique précédemment établie.
- A partir de 9h, la consommation d'énergie augmente proportionnellement à l'évolution de la température extérieure. Plus la température extérieure est élevée, plus l'on utilise le climatiseur pour maintenir l'occupant dans conditions thermiques agréables. Le climatiseur électrique est donc fortement utilisé pour un maintien du confort thermique dans le local.
- Entre 13h et 14h : l'occupant n'a pas activé la climatisation. Cela pourrait s'expliquer par l'absence de ce dernier dans le bureau pour diverses raisons notamment l'heure de sa pause. Nous constatons rapidement une augmentation

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

progressive de la température intérieure jusqu'à atteindre un pic à 14h. Cela explique d'avantage l'incapacité de l'architecture du bureau et de ces matériaux de construction à maintenir la température intérieure constante et confortable. Nous pouvons donc dire que les matériaux de construction utilisés ont une faible inertie thermique. La conception du bâtiment n'a donc pas priorisé la recherche du confort thermique.

De façon global, nous remarquons que l'architecture ainsi que les matériaux utilisés pour la construction des bureaux ne permettent pas, à eux seuls, de maintenir les occupants dans un confort thermique. Ces derniers font donc recours à l'usage de la climatisation presque permanente pour se sentir à l'aise et être productif au travail. La consommation moyenne d'électricité estimée en cette période, malgré le froid matinal, est d'environ 0,58 kWh/m² de bureau pour maintenir les occupants en confort thermique pour une journée de travail. En faisant une évaluation financière pour un bureau de 10 m², le coût de l'énergie consommée pour son refroidissement est de 803fCFa (hypothèses : Tarif type D1 de la SONABEL) par jour de travail soit environ 1660fCFa par mois de travail. En ramenant ce prix à l'ensemble des bureaux, nous voyons combien il est couteux d'utiliser la climatisation électrique pour maintenir le confort thermique dans les bureaux. A cette cherté s'ajoute l'indisponibilité même de l'électricité surtout en zone rural. Les travailleurs sinon une grande partie de la population sont donc contraints de vivre et travailler dans des bâtiments inconfortables pouvant leur causer d'énormes problèmes sanitaires.

Il est aussi à pointé du doigt le comportement des occupants. En effet, la présente étude a montré que la plage de température pour le confort thermique est **24,4°C** et **27,9°C**. Par conséquent, en faisant abstraction de la radiation solaire (il est peu probable que l'occupant se place de sorte à être en contact direct avec le rayonnement), il ne devrait pas y avoir d'énergie de climatisation, du moins jusqu'à ce que la température intérieure soit au-delà de la limite supérieure de la plage définie. Or, le constat est tout autre (Cf. Fig. III-14). D'autres facteurs socio-comportementaux (par exemple l'habitude d'une mise en marche de la climatisation consécutive à la période chaude) ou physiques secondaires (par exemple la luminescence), ou encore psychologique (par exemple l'anticipation de températures chaudes dans les heures à venir) pourraient aussi influencer la décision de mise en marche de la climatisation. Dans la présente étude, nous n'avons pas exploré ces pistes quand bien même ils pourraient avoir de l'intérêt.

Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de présenter les résultats de l'étude et de faire les différentes discussions. A l'aide des données collectées, les évaluations subjectives et objectives du confort thermique effectuées révèlent que la quasi-totalité des occupants des bureaux sont dans des conditions environnementales supportables. Des zones de confort thermique ont été établies pour des bâtiments public en climat tropical sec. Une étude comparative de la sensation de confort thermique en fonction du genre révèle la grande sensibilité des femmes au froid. L'étude de la consommation d'énergie liée à l'usage des dispositifs de refroidissement présente l'incapacité des bâtiments seuls à maintenir les occupants dans le confort d'où un recours presque permanent à ces dispositifs.

CONCLUSION GENERALE, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

1. Conclusion générale

L'objectif global de ce travail a été d'analyser le comportement, l'adaptation et les préférences des occupants des bâtiments disposant d'un système de refroidissement électrique (ventilation, climatisation) pour assurer leur confort thermique.

L'état de l'art réalisé a permis de faire un tour d'horizon sur la notion du confort thermique et la consommation d'énergie liée à la recherche de ce confort dans les bâtiments avec une attention particulière sur le Burkina Faso. Le confort thermique est influencé par plusieurs paramètres qui sont liés à l'environnement dans lequel l'individu se trouve et à l'individu lui-même. Cela le rend très subjectif et difficile à quantifier. De façon générale, les aspirations de modernités, le climat ainsi que les insuffisances technologiques locales entraînent la construction de bâtiments où le recours à l'énergie pour le refroidissement est indispensable. Ce recours à l'énergie pour refroidir les bâtiments a des conséquences nocives sur l'environnement et rend plus cher le coût d'exploitation des bâtiments.

Dans le même ordre d'idées, le matériel et la méthodologie adoptée pour l'atteinte des objectifs visés par l'étude ont été décrites. Il s'agit essentiellement de la description des sites de l'étude ainsi que du matériel utilisé pour collecter les différentes données. La méthodologie de collecte et de traitement des données ainsi que le déroulement des enquêtes ont été détaillés.

Le troisième chapitre a été consacré à l'analyse et à la discussion des résultats. A l'aide des réponses aux questionnaires une évaluation dite subjective du confort thermique a été effectuée dans les différents bureaux. Elle a été confirmée par l'évaluation objective à l'aide d'indices thermiques qui sont le Wet Bulb Glob Temperature et (WBGT) et l'outil d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments à Ouagadougou proposé par Arnaud OUEDRAOGO. Les évaluations subjectives et objectives ont toutes révélé que les occupants des bureaux sont en situation de confort thermique. Une plage de température dite plage de confort thermique a été proposé pour servir de bases de données thermiques qu'il faudrait prendre en compte dans la réalisation et la réhabilitation des bâtiments dans les climats chauds et secs comme celui du Burkina Faso. Elle est comprise entre **24,4°C** et **27,9°C** conformément aux exigences des

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

normes ASHRAE et ISO7730. Une étude comparative de la sensation de confort thermique en fonction du genre révèle que les femmes sont plus sensibles à la fraîcheur que les hommes. La plage de confort thermique des femmes varie entre **24,9°C** et **28,1°C** celle des hommes varie entre **24,2°C** et **27,7°C**. L'évaluation de la consommation d'énergie a permis de mettre en évidence l'usage de la climatisation presque permanent par les occupants des bureaux pour s'offrir une situation confortable thermiquement. L'usage de ces dispositifs très énergivores contribue à épuiser d'avantages les ressources énergétiques naturelles, polluent l'environnement et accroît énormément le coût d'exploitation du bâtiment. Au regard de cette situation, une forte interpellation est lancée à l'endroit de tous les acteurs de la chaîne de construction des bâtiments pour la mise en œuvre de stratégies économiques assurant un équilibre sain entre l'homme, son environnement et son climat. Il faudrait que l'on se retourne sérieusement sur la construction bioclimatique pour un véritable développement endogène et durable.

2. Perspectives

Cette étude pourra être suivie dans les domaines suivants :

- La mise en œuvre des bâtiments bioclimatiques adaptés au climat de la région tropicale sèche dont le dimensionnement thermique se focalisera sur les résultats de cette étude ;
- Faire un audit complet de la consommation énergétique dans les bâtiments pour connaître la consommation globale d'énergie dans l'optique de proposer des bâtiments à énergie nulle.
- La contribution à la mise au point de normes énergétiques (code de qualité énergétique du bâtiment) et d'une réglementation thermique pour la construction ;

3. Recommandations

- Sensibiliser les occupants des bureaux à une utilisation raisonnée de la climatisation ;
- Aérer d'avantage les bureaux pour permettre une meilleure circulation d'air.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. A. OUEDRAOGO, 2022. Confort thermique et écohabitat utilisant au mieux les ressources locales et adaptées au contexte sahélien, thèse de Doctorat, 2iE.
2. B.I. OUEDRAOGOGO, 2012. Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso. -13p.
3. ASHRAE, 2001. ASHRAE Handbook Fundamental: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
4. ASHRAE, 2009. ASHRAE handbook: fundamentals (I-P and SI ed.). American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Ga.
5. ASHRAE, 2013. ASHRAE Handbook Fundamental: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
6. ASHRAE Standard 55, 2017. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
7. ASHRAE Standard 55, 2013. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
8. Blazejczyk et al., 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices
9. Cheng, V., Ng, E., Chan, C., Givoni, B., 2012. Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong. International journal of biometeorology 56, 43–56.
10. Claessens et al.,1996. Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale. Tome 1 : Conception des nouveaux bâtiments. 186 p.
11. Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.-L., Pearlmutter, D., 2016. Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. Urban Climate 18, 33–57.
12. Corinne Martinet et Jean-Pierre Meyer,1999. Travail à la chaleur et confort thermique. Note Scientifique et Technique. - 61 p.
13. D.K. Serghides and M.C. Katafygiotou, 2014. Thermal comfort of a typical secondary school building in Cyprus, Sustainable Cities Soc. 13 303–312, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2014.03.004>.

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

14. Emmanuel, R., Lin, T.-P., Ng, E., Duarte, D.H.S., Johansson, E., Perera, N., Giridharan, R., Drach, P., Mills, G., 2016. Urban Climate Challenges in the Tropics: Rethinking Planning and design opportunities.
15. Grégoire, Pigeon, 23 juillet 2009. Méthodologie de Calcul d'un indice thermique du corps humain, Subvention ANR N° ANR-08-VULN-013-0x/VURCA, 15 p.
16. so. Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des écoquartiers.
17. HEMA, 2020. Optimisation des propriétés thermiques des parois dans les habitations en briques de terre comprimée au Burkina Faso.
18. (International Energy Agency) IEA, « Africa Energy Outlook: World Energy Outlook Special Report », IEA, Paris, 2017.
19. (International Energy Agency) IEA, « Africa Energy Outlook: World Energy Outlook Special Report », IEA, Paris, 2019.
20. INSD, 2021. Démographie et Santé. Institut national de la statistique et de la démographie, Enquête multisectorielle continue.
21. ISO 7243, 2017. Ergonomie des ambiances thermiques — Estimation de la contrainte thermique basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir).
22. ISO 7730, 2006. Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.
23. Johansson, E., Yahia, M.W., 2011. Subjective thermal comfort in urban spaces in the warm-humid city of Guayaquil, Ecuador. Presented at the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), UCL Presses Universitaires de Louvain, pp. 577–582.
24. Karjalainen, Thermal comfort and gender: a literature review, *Indoor Air* 22 (2012) 96–109, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00747.x>
25. LAWSON, 1991. Evaluation du confort thermique dans l'habitat individuel à Ouagadougou. Mémoire de fin d'étude EIER. 32 P.
26. Lin, T.-P., 2009. Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and Environment* 44, 2017–2026. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.004>.
27. McIntyre, D.A., 1980. *Indoor Climate*. Applied Science.

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

28. Milne et GIVONI, B., 1969. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy Build.* 18, 11–23.
29. . Nasir, R.A., Ahmad, S.S., Ahmed, A.Z., 2012. Psychological Adaptation of Outdoor Thermal Comfort in Shaded Green Spaces in Malaysia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, AicE-Bs 2012 Cairo (Asia Pacific International Conference on Environment-Behaviour Studies), Mercure Le Sphinx Cairo Hotel, Giza, Egypt, 31 October - 2 November 2012 68, 865–878. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.12.273>
30. Nicolas Morel et Edgard Gnansounou.-Énergétique du bâtiment. Septembre 2008- Faculté d'Environnement Naturel, Architectural et Construit. École Polytechnique Fédérale De Lausanne. 223 p.
31. Nikolopoulou, M., Baker, N., Steemers, K., 2001. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the Human parameter. *ResearchGate* 70, 227–235. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00093-1).
32. Nikolopoulou, M., Steemers, K., 2003. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, Special issue on urban research 35, 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1).
33. Rea L.M. et al., 1997. CalCul de la taille d'un échantillon pour une enquête.
34. SOARES, N., BASTOS, J., PEREIRA, L. D., SOARES, A., AMARAL, A. R., ASADI, E., RODRIGUES, E., LAMAS, F. B., MONTEIRO, H., LOPES, M. A. R. et GASPAR, A. R. (2017). A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77:845–860.
35. Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., van den Dobbelen, A., 2013. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.050>.
36. Y. Jannot et T. Djiako, « Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale », *Revue Internationale du Froid*, vol. 17, no 3, p. 166-173, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0140-7007(94)90015-9).
37. Y. Coulibaly, G. Thiombiano, et M. Y. Traoré, « Climat et confort thermique », *Sud Sciences & Technologies*, vol. 2, p. 6, Juillet 1998.

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

ANNEXES

1. Tableau de quelques indices d'évaluation de confort thermique en milieu tropical

(source : Virginie GROSDÉMOUGE, 2020)

Indices-Références	Type d'indice (Unité)	Principe / Modèle	Climat - milieu d'application	Données climatiques / données occupants nécessaires	Calcul -Mesure
PMV (Predicted Mean Vote) – (Fanger, 1970), (McIntyre, 1980) (ASHRAE, 2001)	Vote de sensation thermique (Sans dimension)	Equation du bilan thermique du corps humain	Tout type de climat - Milieu intérieur	Ta, HR, Va, Tmrt/ M, Icl	Mesures des paramètres climatiques et calcul de l'indice.
	Avantages : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un des indices les plus utilisés en milieu intérieur ▪ Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique Limites : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Le calcul en régime permanent atteint ses limites pour la prise en compte des changements rapides en extérieur ▪ Une évaporation totale de la transpiration est prise comme hypothèse ▪ Indice difficile à utiliser en climat chaud et sec car il surestime la perception thermique des individus 				
SET* (Standard Effective Temperature) – (Gagge et al., 1971) (Gagge et al.,	Température équivalente (°C)	Equation du bilan thermique du corps humain - modèle à deux nœuds	Climat tempéré à chaud – Milieu intérieur et extérieur	Ta, HR, Va, Tmrt/ M, Icl	Mesures des paramètres climatiques et calcul de l'indice
	Avantages : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique Limites : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Indice plus efficace pour les climats tempérés 				
PET (Physiological Equivalent Temperature) – (Höppe, 1999)	Température équivalente (°C)	Modèle MEMI (Munich Energy balance Model for Individuals)	Tout type de climat- Milieu intérieur et extérieur	Ta, HR, Va, Tmrt / M, Icl , Age, Sexe, Taille, Poids, Position	- Calibration de l'indice recommandée avec mesure des paramètres climatiques et questionnaires pour les paramètres personnels et le vote

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de

2iE

		- Modèle à deux nœuds			de sensation thermique. - Calcul de l'indice grâce à un code de calcul.
	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluation flexible et pratique avec une échelle thermique qui peut être adaptée au climat ▪ Indice validé dans de nombreuses études pour différents climats, différentes saisons et pour des formes urbaines même complexes ▪ Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique ▪ Modèle défini pour des conditions intérieures avec une activité légère et une valeur constante pour l'habillement et l'activité métabolique <p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcul en régime permanent 				
ET (Effective Temperature) - (Houghton and Yaglou, 1923) (Missenard, 1933)	Température équivalente (°C)	Analyse de régression multiple sur mesures prises en laboratoire	Tout type de climat – Milieu intérieur et extérieur	Ta, HR, Va / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule
	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ L'échelle de perception thermique de l'indice peut être adapté au climat (enquêtes de terrain avec mesures des variables climatiques et questionnaires) <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mesures effectuées en laboratoire ▪ Ne prend pas en compte les variables personnelles ni la mesure de Tmrt qui a une grande influence sur le confort thermique (notamment échelle microclimatique) 				
	Température équivalente (°C)	Modèle empirique	Climat chaud – Milieu intérieur et extérieur	Tw, Tg, Ta / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule
WBGT (Wet Bulb Glob Temperature Index) – (ASHRAE, 2001) (ISO 7243, 2017)	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Indice plus dynamique que l'humidex et l'indice de chaleur ▪ Prend en compte l'ensoleillement et la vitesse de vent indirectement avec la mesure de Tg ▪ Reconnu dans des normes ISO et très utilisé dans le domaine du travail et de l'impact sur la santé <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nécessite une évaluation du niveau d'activité, de l'habillement et d'autres facteurs personnels pour avoir une bonne interprétation. ▪ Nécessite du matériel de mesure spécifique. Des erreurs peuvent apparaître si les instruments de mesure ne sont pas standardisés et si la calibration n'est pas bien réalisée. 				

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de

2iE

HI (Heat Index) - (Rothfus, 1990)	Température équivalente (°C)	Analyse de régression multiple en termes de température et d'humidité	Climat chaud - Milieu extérieur	Ta, HR / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule Utilisé pour les grandes échelles (Ville, Région...)
	Avantages : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Facile d'application, les données requises sont des variables faciles d'accès Limites : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ne prend pas en compte les variables personnelles ni la mesure de Tmrt et de Va qui ont une grande influence sur le confort thermique 				
THI (Temperature Humidity Index) – (Thom, 1959) (Steadman, 1979)	Température équivalente (°C)	Analyse de régression multiple en termes de température et d'humidité	Climat chaud - Milieu extérieur	Ta, HR / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule Utilisé pour les grandes échelles (Ville, Région...)
	Avantages : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Facile d'application, les données requises sont des variables faciles d'accès Limites : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ne prend pas en compte les effets du vent et du rayonnement, qui sont des paramètres influençant considérablement le confort thermique en extérieur 				
Humidex - (Masterson and Richardson, 1979)	Nombre- (Sans dimension)	Modèle empirique	Climat chaud - Milieu extérieur	Ta, HR / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule
	Avantages : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Facile d'application, les données requises sont des variables faciles d'accès ▪ Indice couramment utilisé par les météorologues et les services de santé du travail au Canada Limites : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Indice empirique formulé avec des hypothèses particulières sous des conditions climatiques spécifiques (Canada). ▪ Ne prend pas en compte les flux radiatifs, la vitesse de vent ou les paramètres personnels (M et Icl) 				

Avec Ta= Température d'air, HR= Humidité relative, Va= Vitesse d'air, Tmrt= Température radiante moyenne, Rglo= Rayonnement solaire global, Tw = Température de bulbe humide en ventilation naturelle, Tg= Température de globe noir, M= Métabolisme et Icl=Isolation vestimentaire

2. Fiche de l'enquête

Questionnaire de perception du confort thermique et de la consommation énergétique

Bonjour; Ce questionnaire a pour but essentiel d'évaluer la perception du confort thermique des occupants des bureaux et la consommation énergétique que cela nécessite. Merci de nous aider en répondant à nos questions.

***Obligatoire**

I. Informations générales

1. Code du bureau

2. Date *

_____ *Exemple : 7 janvier 2019*

3. Heure *

_____ *Exemple : 8 h 30*

4. Genre *

Une seule réponse possible.

Masculin

Féminin

5. Age

Une seule réponse possible.

- moins de 30 ans
- entre 30 ans et 40 ans
- entre 40 ans et 50 ans
- plus de 50 ans

6. Poids

Une seule réponse possible.

- Moins de 60 Kg
- entre 60 et 70Kg
- entre 70et 80kg
- entre 80 et 90 kg
- plus de 90kg

7. Quelle est l'orientation des fenêtres de votre bureau? (Vous pouvez cocher *
au maximum 2 réponses)

Plusieurs réponses possibles.

- Est
- Ouest
- Nord
- Sud
- Centre

8. Depuis combien de temps occupez vous ce bureau? *

Une seule réponse possible.

- Moins de 1 an
- Entre 1 et 3ans
- Plus de 3 ans

9. Qu'avez vous fais il y'a de cela environ 30mns avant cette enquête?

10. Combien êtes vous dans votre bureau? *

Une seule réponse possible.

- Je suis seul
- Nous sommes 2
- Nous dépassons 2

II.PERCEPTION DU CONFORT THERMIQUE

11. Connaissez vous ce que l'on appelle confort thermique dans un bâtiment?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

12. Quelle appréciation faites vous de ces facteurs environnementaux dans votre bureau actuellement?

Une seule réponse possible par ligne.

	satisfait	élevée	basse	rapide	lente
La température	<input type="radio"/>				
La circulation d'air	<input type="radio"/>				
L'humidité dans l'air	<input type="radio"/>				

13. Thermiquement ,comment trouvez vous votre bureau actuellement? *

Une seule réponse possible.

- Très froid
- Froid
- légèrement froid
- Confortable
- légèrement chaud
- chaud
- très chaud

14. Valeur de la température qu'il fait dans le local (réservé au propriétaire du questionnaire)

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

15. A quelle température penseriez vous être à l'aise thermiquement dans votre bureau? *

16. Quel est votre habillement ? *

Une seule réponse possible.

- Pantalon léger/Jupe légère + chemise MC +Chaussures fermées
- Pantalon léger/Jupe légère + chemise MC +Chaussures non fermées
- Pantalon léger/Jupe légère + chemise ML +Chaussures fermées
- Pantalon léger/Jupe légère + chemise ML +Chaussures non fermées
- Pantalon lourd/Jupe lourde/Pagne + chemise MC +Chaussures fermées
- Pantalon lourd/Jupe lourde/Pagne + chemise MC +Chaussures non fermées
- Pantalon lourd/Jupe lourde/Pagne + chemise ML +Chaussures fermées
- Pantalon lourd/Jupe lourde/Pagne + chemise ML +Chaussures non fermées
- Pantalon lourd/Jupe lourde/Pagne + Tee-shirt +Chaussures fermées
- Pantalon lourd/Jupe lourde/Pagne + Tee-shirt +Chaussures non fermées
- Pantalon léger/Jupe légère + Tee-shirt +Chaussures fermées
- Pantalon léger/Jupe légère + Tee-shirt +Chaussures non fermées
- Pantalon léger + boubou +Chaussures fermées
- Pantalon léger + boubou +Chaussures non fermées
- Pantalon lourd + boubou +Chaussures fermées
- Pantalon lourd + boubou +Chaussures non fermées
- Robe + chaussures fermées
- Robe + chaussures non fermées

17. Que faites vous quand vous avez chaud ou froid? *

Plusieurs réponses possibles.

- Je change mon habillement
- J'ouvre ou ferme mes fenêtres
- J'allume ou arrête la climatisation ou la ventilation
- Je ne fais rien

III. Consommation énergétique dans le bureau

18. Quel appareil de réajustement mécanique de confort thermique avez vous dans votre bureau? *

Plusieurs réponses possibles.

- Un climatiseur
- Un ventilateur
- Aucun

19. Quel est le nombre d'appareils de réajustement mécanique dans votre bureau?

Une seule réponse possible.

- Un climatiseur
- Un climatiseur et un ventilateur
- Deux climatiseurs
- Deux climatiseurs et un ventilateur
- Deux climatiseurs et deux ventilateurs
- trois climatiseurs
- trois climatiseurs et un ventilateur
- Trois climatiseurs et deux ventilateurs
- Autres

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

20. En cas d'inconfort thermique que faites vous? *

Plusieurs réponses possibles.

- Je mets mon climatiseur en marche
- Je mets mon ventilateur en marche
- Je change mon habillement
- J'ouvre mes fenêtres pour aérer mon bureau
- Je ne fais rien

21. Quel est, en moyenne, votre temps d'utilisation de la ventilation et/ou de la climatisation par jour de travail *

Une seule réponse possible.

- pendant plus de 6h par jour de travail
- entre 3 et 6h par jour de travail
- moins de 3h par jour de travail
- jamais

22. Pensez vous qu'il est nécessaire de diminuer notre consommation d'énergie liée à l'usage des climatiseurs et ventilateurs? *

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

Passer à la section 3 (Merci pour votre disponibilité et votre contribution).

23. Si oui, pourquoi devons nous diminuer notre consommation d'énergie?

Plusieurs réponses possibles.

- Un devoir civique
- raisons économiques
- Protection de l'environnement

Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

24. **Commentaires:** Vous pouvez nous proposer des solutions pour diminuer la consommation d'énergie liée à l'usage de la climatisation et ou de la ventilation dans les bureaux.

Merci pour votre disponibilité et votre contribution

VI. Valeurs des paramètres environnementaux du bureau

(Partie réservée au propriétaire du questionnaire)

25. Température du bulbe humide à ventilation (T_{nw}) *

26. Température de thermomètre globe (T_g)

27. Température ambiante (T_a) *

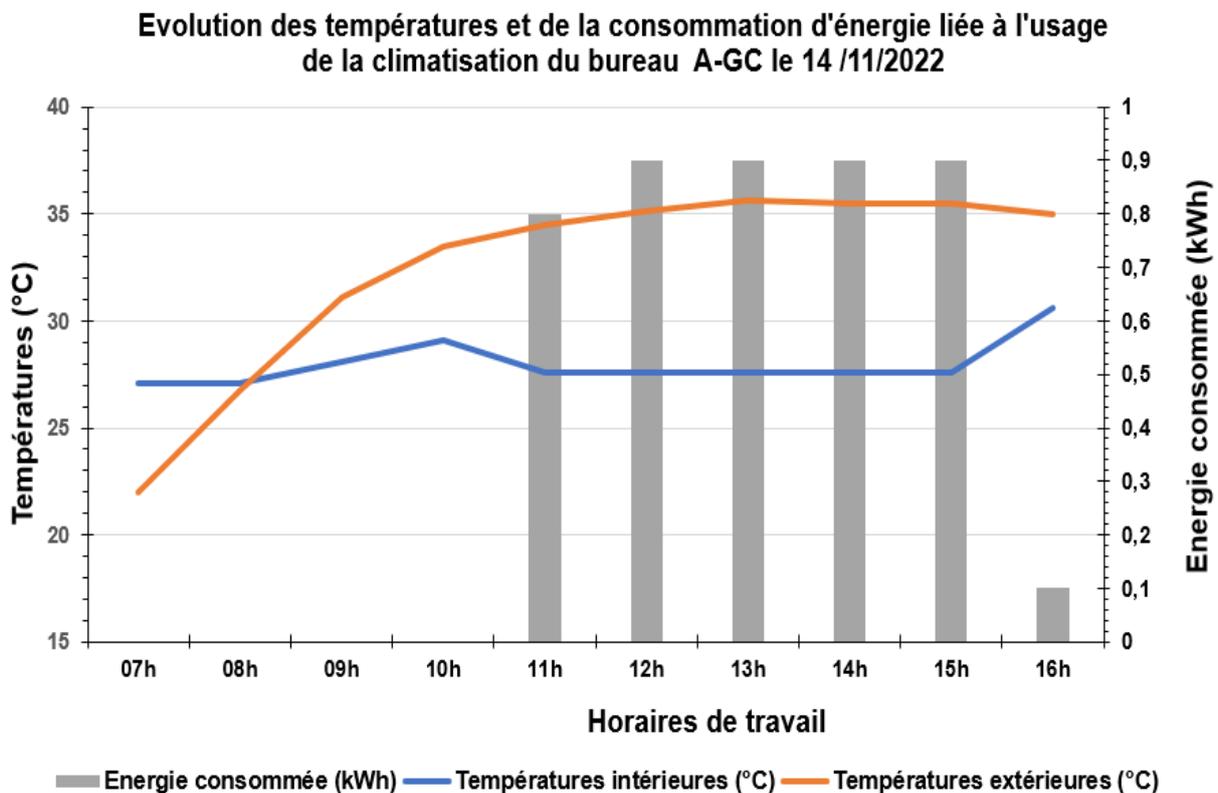
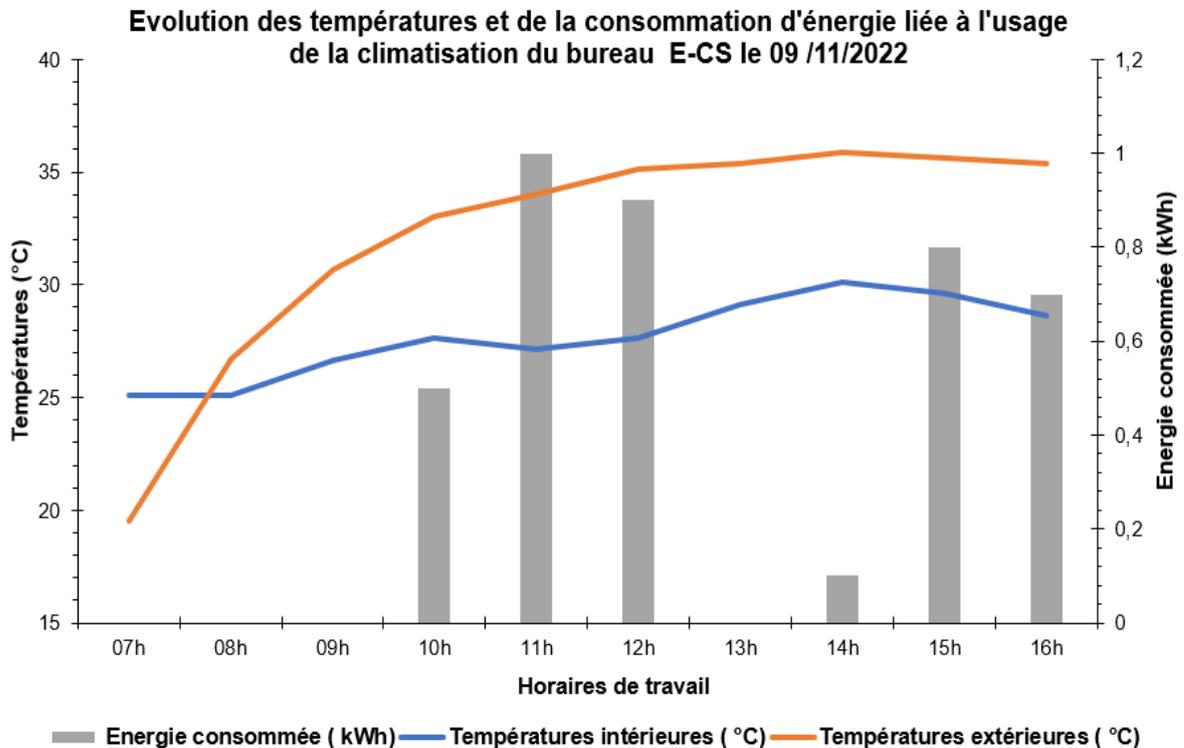
28. WGBT (Int) et (Ext)

29. Vitesse de l'air (V_a)

30. Température radiante (T_r)

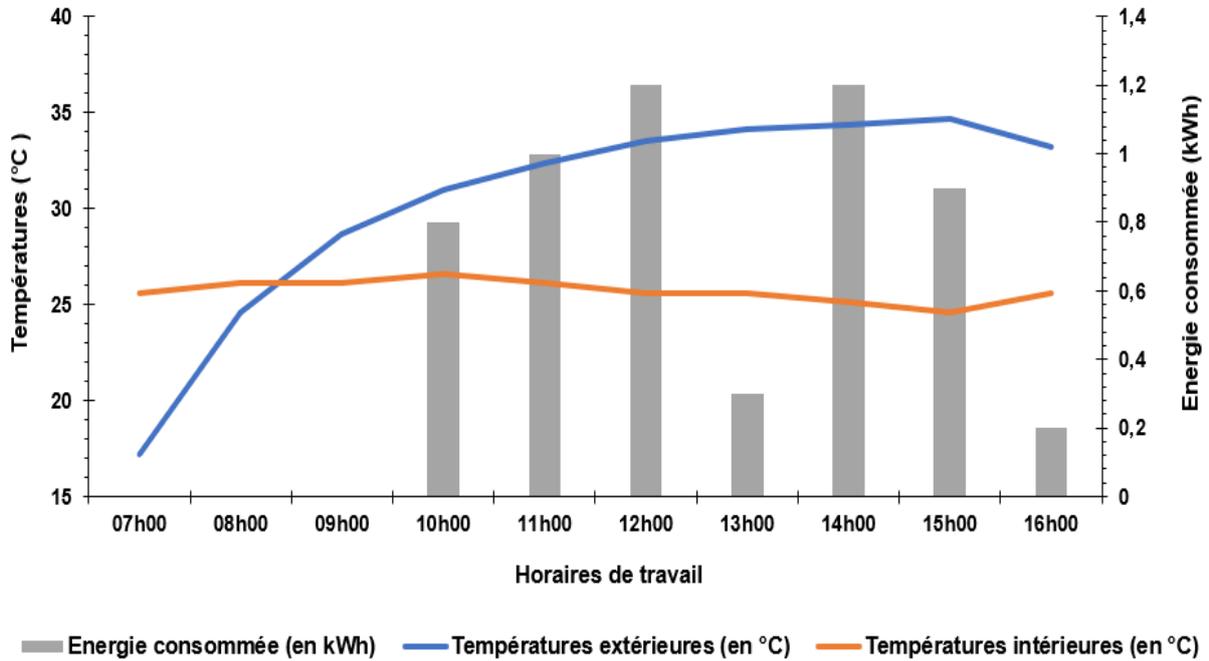
31. Humidité relative (HR)

3. Quelques Courbes de consommation d'énergie liée à l'usage de la climatisation



Diagnostic du ressenti thermique et de la dépense énergétique dans des locaux muni d'un système de refroidissement électrique : cas des locaux de 2iE

Evolution des températures et de la consommation d'énergie liée à l'usage de la climatisation d'un bureau le 18 /11/2022



Evolution des températures et de la consommation d'énergie liée à l'usage de la climatisation du bureau A-CS le 22 /11/2022

