

Travail de Fin d'Etudes : Analyse et modélisation des données d'un bâtiment pour l'évaluation de son comportement thermique

Auteur : Taing, Kimnengh

Promoteur(s) : Leclercq, Pierre; Andre, Philippe

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9097>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des Sciences Appliquées

Analyse et modélisation des données d'un bâtiment pour l'évaluation de son comportement thermique

Projet de fin d'études réalisé par **Kimnenh TAING**
en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil Architecte

Sous la direction des promoteurs **Pierre LECLERCQ** et **Philippe ANDRE**

Année Académique 2019-2020



Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Analyse et modélisation des données d'un bâtiment pour l'évaluation de son comportement thermique

Kimnenh TAING

Projet de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master Ingénieur Civil Architecte

Année Académique 2019-2020

Composition du jury :

Pierre LECLERCQ, Philippe ANDRE, Gaëlle BAUDOUX, Sigrid REITER

RESUME

Le confort thermique est l'un des facteurs les plus difficiles à atteindre lors de la conception d'un bâtiment. Puisqu'il dépend de l'aspect environnemental et des préférences personnelles, le confort thermique standard peut être différent d'une région à l'autre. Comme la région tropicale a un climat chaud et humide, il y a souvent une surchauffe à l'intérieur du bâtiment, surtout pendant l'été. Afin d'obtenir un confort thermique dans le bâtiment, une grande ventilation mécanique, comme un climatiseur ou un autre système de refroidissement, a été utilisée. Étant donné que ces ventilations mécaniques peuvent nuire à l'environnement, le concept durable devrait être la réponse du concepteur pour obtenir l'environnement de confort dans le bâtiment. Par conséquent, pour pouvoir trouver la conception appropriée pour le bâtiment dans certaine région en termes de confort thermique, nous devons d'abord connaître les performances thermiques du bâtiment dans cette région.

L'objectif de notre travail est d'évaluer la performance thermique d'un bâtiment situé dans une région tropicale avec un temps chaud et humide. Nous voulons voir la présence de surchauffe dans ce bâtiment et analyser les facteurs conduisant à un environnement inconfortable dans le bâtiment. Dans ce but, la mesure de deux paramètres environnementaux sur le confort thermique, dont la température de l'air et l'humidité relative d'un bâtiment éducatif à Phnom Penh, a été réalisée pendant la saison sèche. Les paramètres liés aux occupants tels que l'habillement et le taux métabolique sont également pris en compte dans les analyses. Une enquête en ligne a été mise en place pour obtenir la satisfaction et la sensation thermique des occupants de ce bâtiment. Enfin, une modélisation et simulation utilisant le logiciel TRNSYS a été utilisée pour analyser les deux paramètres environnementaux que nous mesurons.

Tous les résultats que nous obtenons sont comparables au confort standard de l'ASHRAE 55. Le résultat de la mesure, l'enquête et la simulation montre que le bâtiment a une température de l'air très élevée par rapport au confort standard pendant toute l'année. Les surchauffes sont surtout présentes à midi et durant l'après-midi. Cependant, le soir, la température de l'air dans le bâtiment est considérée acceptable. Il a été constaté que l'environnement chaud, l'orientation du bâtiment et le matériau d'enveloppe non adapté sont à l'origine de cette surchauffe. Par conséquent, certains concepts durables efficaces pour la conception de bâtiments dans les régions tropicales répondant à la réduction de la température de l'air afin d'améliorer les performances thermiques du bâtiment et d'en réduire la consommation d'énergie sont proposés.

ABSTRACT

Thermal comfort is one of the most challenging factor to achieve in designing a building. Since it depend on the environment aspect and personal preference, the standard thermal comfort can be different from one region to another. As tropical region has a hot and humid climate, there are always overheating present inside the building especially during the summer. In order to get thermal comfort in the building, a lot of mechanical ventilation such as air conditioner or other cooling system has been used. Since these mechanical ventilations can cause harm to the environment, sustainable concept should be answer for designer to get the comfort environment in the building. Therefore, to be able to find the suitable design for the building in certain climate region in term of thermal comfort, we should first know about the thermal performance of building in that region.

The aim of our thesis is to evaluate a thermal performance of building located in tropical region with hot and humid weather. We want to see the present of overheating in the building and to analyze the important factor that lead to any discomfort environment in the building. To that aim, the measurement of two environmental parameter effect on thermal comfort include air temperature and humidity relative of an educational building in Phnom Penh has been conducted during the dry season. The personal parameter such as clothing insulation and metabolic rate are also take into account in the analyzes. A survey online was put to obtain the satisfaction and thermal sensation of occupants in the building. Finally, a modeling and simulation using software TRNSYS has been use to analyses on two environmental parameters that we measure.

All the result that we obtain are compare to the standard comfort of ASHRAE 55. The result from our three-phase methods show that the building has very high air temperature compare to the standard comfort all year round. The overheating are mostly present during noon and after noon. However, in the evening, the air temperature in the building is consider acceptable. It was notice that the hot environment, the orientation of the building and the non-suitable envelope material are the source of this overheating. Hence, some effective durable concept for building design in tropical region that respond to the reduction of air temperature in order to enhance thermal performance of the building and reduce energy consumption are proposed.

REMERCIEMENTS

Avant d'entrer dans cette thèse, je voudrais exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont aidé à réussir ce travail. Je voudrais tout d'abord remercier Monsieur Pierre LECLECRQ, mon promoteur pour ses conseils, son temps et son soutien tout au long de ce travail ainsi que les deux années de mes études à ULiège. Merci à mon co-promoteur Monsieur Philippe ANDRE, pour son accompagnement et les supports matériel nécessaires à la réalisation de mes simulations.

Je tiens à remercier également Madame Gaëlle BAUDOUX, pour ses conseils avisés, ses encouragements, son implication et ses nombreuses recommandations pour mener à bien cette thèse. Je remercie également Madame Pauline ABRAHAMS pour son temps et ses réponses à de nombreuses questions lors du processus d'expérimentation.

Je remercie également les membres du jury pour leur intérêt, leur attention et leur lecture de ce travail.

Enfin et surtout, je tiens à remercier ma chère famille, mes parents, ma sœur et ma grand-mère pour tout leur soutien émotionnel à me garder motivé depuis le début et jusqu'à la fin de ce travail.

Table des Matières

Résumé.....	2
Abstract	3
Chapitre 1 : Introduction	12
Chapitre 2 : Etat de l’art.....	15
1. Confort thermique	15
2. Confort thermique en région tropicale.....	24
3. Climat et situation du lieu de cas d’étude.....	25
4. Logiciel Trnsys.....	29
Chapitre 3 : Problématique.....	33
Chapitre 4 : Méthodologie	35
1. Information générale du bâtiment de cas d’étude.....	35
2. La mesure	37
3. Enquête en ligne sur la perception et la satisfaction des utilisateurs	38
4. Simulation Trnsys.....	39
Chapitre 5 : Résultats	43
1. La mesure	43
2. L’enquête.....	48
3. Simulation TRNSYS	52
Chapitre 6 : Discussion	59
1. Evaluation du confort thermique du bâtiment	59
2. Source de l’inconfort thermique dans un bâtiment.....	73
3. Approche de conception pour le confort thermique	80
Chapitre 7 : Conclusion.....	96
1. Synthèse.....	96
2. Limites.....	97

3. Perspective.....	98
Bibliographie.....	100
Annexe 1 : Plan du Bâtiment	105
annexe 2 : Enquête en ligne	106
Annexe 3 : Composition des zones	107
Annexe 4 : Composition des parois	110
Annexe 5 : Résultats de simulation TRNSYS.....	112

Liste des figures

Figure 1 : Facteur d'influence sur le confort thermique.....	17
Figure 2: Insatisfaction des occupants sur base de l'asymétrie rayonnante (ASHRAE-55, 2017).....	19
Figure 3: ASHARE et ISO standard pour le taux métabolique.....	22
Figure 4 : Moyenne température et précipitation du Cambodge (Meteoblue)	26
Figure 5 : Moyenne température et la précipitation de Phnom Penh (Meteoblue)	27
Figure 6 : Moyenne température et précipitation de Kandal (Meteoblue)	27
Figure 7: Vitesse moyen du vents par an a Phnom Penh (Meteoblue).....	28
Figure 8 : Humidité relative moyenne par an à Phnom Penh (Weather & Climate).....	28
Figure 9 : Maison traditionnel du Cambodge.....	29
Figure 10 : La relation des 4 composants TRNSYS	32
Figure 11 : Bâtiment du cas d'étude : bâtiment F de l'ITC, Phnom Penh (Google map)...	36
Figure 12 : Orientation du bâtiment d'étude (Google map)	36
Figure 13 : Plage de mesure et précision de l'instrumentation (ASHRAE-55, 2017)	38
Figure 14 : Emplacement des 5 salles ou ont été prise les mesures	38
Figure 15 : Modélisation des zones thermiques dans TRNsys3d.....	40
Figure 16 : Schéma fonctionel de la simulation	41
Figure 17 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 105F	44
Figure 18 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 208F	45
Figure 19 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 307F	46
Figure 20 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 307F cuisine.....	47

Figure 21 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 309F	48
Figure 22 : La satisfaction globale des occupants	50
Figure 23 : La sensation thermique globale des occupants	50
Figure 24 : Les périodes où l'insatisfaction survient le plus	50
Figure 25 : La satisfaction des occupants de rez-de-chaussée, premier, deuxième et troisième étage	51
Figure 26 : La sensation thermique des occupants de rez-de-chaussée, premier, deuxième et troisième étage.....	51
Figure 27 : La satisfaction des occupants qui se déplacent dans les 4 étage.....	52
Figure 28 : La sensation thermique des occupants dans les 4 étage.....	52
Figure 29 : La température de l'air dans les 9 zones thermique	53
Figure 30: La température de l'air dans les 3 zones dans l'aile droite du bâtiment	54
Figure 31 : La température de l'air dans les 4 zones au milieu du bâtiment	54
Figure 32 : La température de l'air dans les 2 zones de la grand salle	55
Figure 33 : Le température de l'air dans les 3 zones dans l'aile droite du bâtiment de 07 à 14 novembre	56
Figure 34 : La température de l'air dans les 4 zones au milieu du bâtiment de 07 à 14 novembre	56
Figure 35 : La température de l'air dans les 2 zones de grand salle de 07 à 14 novembre..	57
Figure 36 : L'incident total du rayonnement solaire par an.....	58
Figure 37: Les vêtements que les occupants portent normalement.....	60
Figure 38 : Applicabilité des méthodes de détermination des environnements thermiques acceptables dans les espaces occupés (ASHRAE-55, 2017)	60
Figure 39 : Température standard pour le confort thermique dans bâtiments F	61
Figure 40 : Température de fonctionnement dans les 9 zones du bâtiment étudié par simulation TRNSYS.....	70

Figure 41 : Plages de températures de fonctionnement acceptables pour les espaces naturellement conditionnés.....	70
Figure 42 : La satisfaction des occupants globale.....	71
Figure 43 : La sensation thermal des occupants globale	72
Figure 44 : Les satisfaction des occupants par rapport à l'étage	72
Figure 45 : Les satisfaction des occupants s'assissent près de fenêtre ou mur	73
Figure 46 : : Les satisfaction des occupants s'assissent au centre de pièce	73
Figure 47 : Les source de l'inconfort thermique selon les occupants	74
Figure 48: Le rayonnement solaire sur les façade nord, est et ouest.....	75
Figure 49 : Direction de vente sur le bâtiment d'étude.....	76
Figure 50 : La protection solaire sur la façade est illustrée par une modélisation sketchup en mars à 10h00	77
Figure 51 : Habillement représentative en fonction de la température de l'air extérieur à 06h00 (ASHRAE-55, 2017)	79
Figure 52 : Valeurs I_{cl} de l'habillement pour les ensembles typiques (ASHRAE-55, 2017)	80
Figure 53 : Solutions utilisées par les occupants.....	81
Figure 54 : Période où les solutions sont le plus utilisées	81
Figure 55 : Pourcentage de satisfaction obtenir après les occupants utilisent des solutions	81
Figure 56: Siamese Ratchakru, Thailand, 2014 Figure 57 : Verdant Home, Vietnam....	83
Figure 58 : Institute of technical education Singapore, Singapore.....	83
Figure 59 : Comparaison de la température intérieure et extérieure en utilisant la façade verte: T_{in} = Température intérieur , T_o = Température extérieur (Widiastuti, Zaini, & Caesarendra, 2020)	84
Figure 60: Comparaison de l'humidité relative intérieure et extérieure en utilisant la façade verte: HR_{in} = Humidité relative intérieur , HR_o = Humidité relative extérieur (Widiastuti, Zaini, & Caesarendra, 2020)	85

Figure 61 : Résultat de température de l'air entre extérieure, la salle avec façade verte et la salle sans façade verte (Sunakorn & Yimprayoon, 2011)	86
Figure 62 : Résultat de vitesse de l'air entre la salle avec façade verte et la salle sans façade verte (Sunakorn & Yimprayoon, 2011).....	87
Figure 63 : Coupe d'une les mécanismes de transfert de chaleur et de circulation d'air de façade double peaux, (Barbosa, Ip, & Southall, 2015)	88
Figure 64 : Type de façade double peaux (Zhang , Yang , Tan, & Zhang , 2016).....	89
Figure 65 : Paramètres et variables définis pour les simulations ((Barbosa, Ip, & Southall, 2015).....	90
Figure 66: Effet des paramètres de conception sur le confort thermique annuel (Barbosa, Ip, & Southall, 2015)	91
Figure 67 : Model avec différente profondeur de cavité (Lim & Ismail, 2019).....	92
Figure 68 : Model avec différent type de verre (Lim & Ismail, 2019).....	92
Figure 69 : Model avec différent type de dispositif d'ombrage (Lim & Ismail, 2019)	92
Figure 70 : Énergie économisée en utilisant une façade à double peau avec une profondeur de cavité différente (Lim & Ismail, 2019)	93
Figure 71: Type de système de protection solaire (MUNSHI, 2015)	94

Liste des tableaux

Table 1 : Confort thermique acceptable par les occupants par rapport au mode de ventilation (Perez, Prieto, & Rojas, 2019).....	25
Table 2 : Donne des caractéristique des zones thermiques	42
Table 3 : Comparaison de temperature entre Phnom Penh et Kampot	62
Table 4: Comparaison de température de mesure et de simulation de la zone Front_GF ...	62
Table 5 : Comparaison de température de mesure et de simulation de la zone Front_F1 ...	63
Table 6: Comparaison de température de mesure et de simulation de la zone Front_F2....	63
Table 7 : Comparaison de température de mesure et de simulation de la zone Right_F2 ..	64
Table 8 : Coefficient de corrélation entre le résultat de mesure et de simulation	64
Table 9 : La température de l'air et l'humidité relative entre la mesure, la simulation TRNSYS et le standard confort du bâtiment étudié.....	66
Table 10: La température de l'air entre novembre dans bâtiments F avec le standard du confort	67
Table 11: Le pourcentage de surchauffe dans bâtiment pendant la durée de mesure et en novembre	68
Table 12 : : La température de l'air pendent 17h00 à 20h00 entre février et novembre dans bâtiments F avec le standard du confort	69
Table 13 : Propriétés thermiques des matériaux de construction	78

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Lors de la conception d'un bâtiment, les architectes se concentrent non seulement sur la fonctionnalité du bâtiment mais également sur sa capacité à créer un environnement confortable pour les occupants. Le confort dans le bâtiment comprend le confort visuel, le confort acoustique, le confort thermique, la qualité de l'air intérieur et l'ergonomie. Ces facteurs doivent être inclus lors du processus de conception pour obtenir un bâtiment offrant les meilleures performances possibles aux occupants. Le confort thermique est connu pour être l'un des aspects les plus difficiles à garantir. En effet, ce facteur peut être affecté par différents paramètres, incluant les conditions climatiques de l'emplacement du bâtiment et l'aspect personnel des occupants. La stratégie utilisée pour atteindre le confort thermique dans une région froide peut être différente de celle employée dans une région tropicale. De plus, les critères personnels des individus vivant dans ces régions peuvent également être différents en termes de satisfaction. Ils se sont en effet adaptés leur environnement climatique. Par conséquent, le confort thermique peut être un facteur très difficile à garantir pour l'architecte dans le processus de conception.

Beaucoup de chercheurs ont étudié la façon d'améliorer l'environnement d'un bâtiment pour assurer à la satisfaction des occupants (Alwetaishi, 2016). Certains chercheurs ont travaillé sur la collecte de données sur l'aspect personnel des occupants par interview ou sondage en ligne. D'autres ont travaillé sur la compréhension des paramètres physiques qui affectent le confort thermique et ont élaboré des normes pour les valeurs des paramètres. Etant donné que les logiques de conception pour atteindre le confort thermique sont spécifiques aux conditions climatiques des différentes régions du monde, l'objectif de ce travail de fin d'étude est d'analyser les performances thermiques d'un bâtiment situé dans une région tropicale dans l'espoir de trouver une approche de conception efficace pour atteindre un confort thermique dans le bâtiment.

À partir du XIX^e siècle, le développement de la science et de la technologie s'accroît considérablement pour aider à faciliter la vie quotidienne de l'homme. Bien que ce développement apporte une aide économique et physique, il génère également de nombreux problèmes environnementaux tels que la pollution de l'air, la pollution de l'eau, la pollution des sols, le réchauffement climatique... Le réchauffement climatique ou le changement climatique est l'un des principaux problèmes environnementaux que chaque scientifique essaie de solutionner. Les changements climatiques entraînent une modification des conditions météorologiques saisonnières telles que les précipitations, l'augmentation de la température sur la planète, la création de catastrophes naturelles, l'augmentation du niveau de la mer et des effets sur la vie de

l'écosystème.... Cela a rendu les climats chauds en région tropicale encore plus chauds. C'est la raison pour laquelle certaines normes de conception des bâtiments qui offraient un environnement confortable aux occupants ne fonctionnent plus aussi bien qu'avant. Beaucoup de technologies sont été produites pour aider à assurer une meilleure performance et à fournir un environnement confortable aux occupants. Le climatiseur et le ventilateur de plafond ont été utilisés pour aider à réduire la température et ainsi améliorer l'environnement intérieur du bâtiment. Cependant, l'utilisation du climatiseur augmente la pollution de l'environnement en libérant des gaz à effet de serre (chlorofluorocarbures et hydro-chlorofluorocarbures) dans l'environnement. De plus, l'utilisation de toutes ces technologies telles que le climatiseur et le ventilateur de plafond peut également nécessiter une consommation d'énergie plus élevée.

Au cours de la dernière décennie, la croissance de la consommation mondiale d'énergie a été remarquable. Le développement des pays en région tropicale dans l'économie, l'industrie, l'urbanisation, le niveau de vie de la population et le changement climatique sont souvent considérés comme la cause de cette croissance. Alors que la consommation annuelle d'énergie a augmenté de 3,15% de 2005 à 2011, l'Energy Information Administration (EIA) a mentionné que la consommation mondiale d'énergie était passée à 56% de 2014 à 2020 (Perez, Prieto, & Rojas, 2019). Cette déclaration conclut donc que l'économie d'énergie devrait être le point focal dans tous les secteurs possibles, en particulier pour le secteur le plus demandé. En effet, beaucoup de pays en région tropicale avec un climat de mousson tels que le Laos, le Cambodge, le Vietnam, la Malaisie et la Thaïlande sont des pays en développement. Ainsi, le secteur de la construction a une croissance remarquable dans ces pays en raison de l'augmentation de la population. Ainsi, la demande d'énergie consommatrice dans ce secteur est très élevée.

Pour toutes les raisons ci-dessus, nous pouvons souligner que le développement de chaque pays ne doit pas se concentrer uniquement sur l'économie mais également respecter sur les paramètres essentiels qui affectent l'environnement écologique. Pour le secteur de la construction, l'architecte doit trouver un moyen de concevoir son bâtiment en respectant le développement durable. Le terme développement durable a été introduit en 1980 dans la « Stratégie mondiale de la conservation » publiée par l'Union internationale pour la conservation de la nature et des ressources naturelles - UICN (1980). Il a ensuite été utilisé par de nombreux concepteurs selon le rapport Brundtland (Commission mondiale de l'environnement et du développement, 1987), communément appelé rapport « Notre avenir à tous ». Pour simplifier, le terme développement durable représente un développement ayant pour but de maintenir la capacité du système naturel en ce qui concerne l'environnement et de ne pas impacter négativement la prochaine génération de

l'espèce humaine (Nguyen, 2013). Pour l'architecte et le designer, cela signifie que l'utilisation d'une approche de qui n'affecte pas l'environnement, avec l'utilisation de matériaux naturels ou réutilisables, d'énergie réutilisable, de ventilation naturelle...

Cependant, concevoir de manière durable un bâtiment tout en garantissant un environnement confortable pour les occupants, impose de connaître la situation actuelle de ce bâtiment afin de déterminer quelles stratégies de conception peuvent être utilisées pour aider à améliorer les performances de ce bâtiment. En conséquence, le but de cette thèse est 'd'évaluer les performances thermiques d'un bâtiment de l'enseignement supérieur et le type d'approche de conception durable qui est suffisante pour utiliser pour ce type de bâtiment dans la région tropicale'.

Pour répondre à la question ci-dessus, cette thèse vous présentera d'abord une revue de la littérature pour vous donner une idée des différents paramètres qui affectent le confort thermique, de différentes normes qui doivent être suivies pour atteindre le confort thermique dans la région tropicale et la méthode utilisée pour estimer la satisfaction des occupants ainsi que sur le programme TRNSYS que nous utiliserons pour la simulation du bâtiment. Nous vous présenterons ensuite la méthode utilisée pour répondre à notre question de recherche. Elle comportera 3 phases élaborées sur base des travaux de différents chercheurs lors de recherches similaires. La première phase commence par la mesure des paramètres environnementaux qui affectent le confort thermique dans le climat réel du bâtiment. La deuxième phase consiste en une enquête en ligne pour collecter la satisfaction des occupants sur le confort thermique dans ce bâtiment. Enfin, la troisième phase est la simulation du bâtiment à l'aide du programme TRNSYS. Finalement, nous présenterons nos résultats et nous analyserons les données collectées dans but de répondre à la question que nous avons posée ci-dessus.

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART

1. Confort thermique

L'un des facteurs qui ont un impact sur la conception d'un espace pour le concepteur est de fournir un certain confort aux utilisateurs. Aussi difficile que cela puisse paraître, le confort thermique est l'un des facteurs les plus complexes dans la conception du bâtiment et il joue un rôle important dans l'amélioration des performances du bâtiment. Comme ce paramètre est différent pour chaque personne, le confort thermique est généralement un terme utilisé pour décrire l'état et la satisfaction des personnes, c'est pourquoi chaque personne a une préférence différente en terme de confort. La définition la plus courante est par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) et définit le confort thermique comme « l'état d'esprit dans lequel la satisfaction s'exprime avec l'environnement thermique ». Il existe également une autre définition mentionnée par Djongyang et al (2010) comme « un état dans lequel il n'y a pas d'impulsion motrice pour corriger l'environnement par le comportement ». Sur la base de la définition ci-dessus, le confort n'est pas une condition d'état mais un état d'esprit. La définition du confort thermique peut être énoncée comme étant une condition d'esprit ou de satisfaction qui précise le jugement de confort par l'individu (Lin, Z. and S. Deng., 2008). Deux personnes assises côte à côte dans la même pièce à la même température pourraient avoir un état de satisfaction du confort thermique différent l'un de l'autre (Alwetaishi, 2016).

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

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

Ce sont les trois normes généralement utilisées pour calculer et déterminer le confort thermique des occupants sur base de 6 facteurs d'influence. Ils incluent des facteurs environnementaux tels que la température de l'air, la température radiante, l'humidité et la vitesse de l'air et des facteurs personnels tels que le taux métabolique ou l'activité et l'habillement (ASHRAE-55, 2017).

1.1 Facteurs influençant le confort thermique

Le confort thermique peut être différent d'une personne à une autre même si elles sont dans la même pièce, ont le même sexe ou font la même activité. c'est pourquoi il existe de nombreux facteurs différents qui influencent le confort thermique dans un bâtiment et qui ont un impact sur la satisfaction et l'insatisfaction de l'occupant en termes d'aspect environnemental et personnel (Alwetaishi, 2016).

Les paramètres influençant le confort thermique en termes d'environnement sont (cours de méthodologie du projet architecturale 2) :

- Température de l'air
- Température rayonnante
- Humidité relative
- Vitesse de l'air

Les paramètres influençant le confort thermique en termes de l'aspect personnel sont (cours de méthodologie du projet architecturale 2) :

- Taux métabolique ou activité
- Habillement

Généralement, la température de l'air, le rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air, également connus sous le nom d'aspect environnemental, se sont révélés plus efficaces sur le confort thermique que le taux métabolique, les vêtements et les activités des occupants, également appelés facteurs personnels (Alwetaishi, 2016)

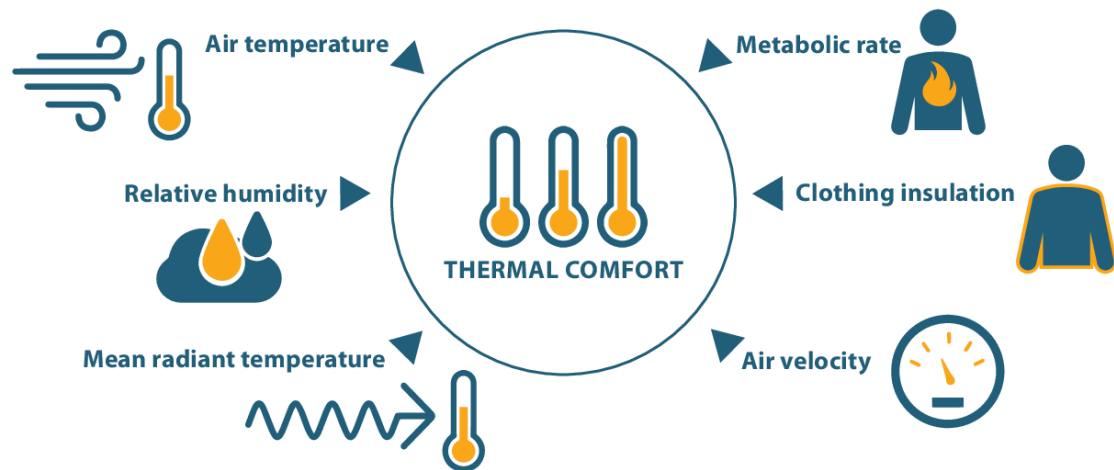


Figure 1 : Facteur d'influence sur le confort thermique

1.1.1. Température de l'air

L'agence gouvernementale du Royaume-Uni : Health and Safety Executive (HSE) mentionne que la température de l'air est la température entourant le corps qui est exprimée en degrés Celsius ou Fahrenheit. Ce facteur est l'aspect affectant le plus le confort thermique car le corps humain est très sensible à la température (Wang , et al., 2006). Par exemple, pendant une conférence ou une réunion, les gens aimeraient toujours une courte pause et la première question qui vient à l'esprit en termes de temps est la « température ». De plus Parsons (2002) mentionne que si la température dans une salle de classe est supérieure à 30 ° C, cela affectera la capacité des élèves à étudier et leur réussite pendant le cours. C'est la raison pour laquelle la température de l'air est l'aspect ayant le plus d'influence sur le confort thermique.

Une température intérieure optimale pour le confort du corps humain devrait être de 25,6 ° C dans la zone de température du Nord (Alwetaishi, 2016). D'autres études qui ont été menées montre d'une température similaire nécessaire pour le confort. La température moyenne de l'air était de 23 ° C dans un amphithéâtre équipé de l'air conditionnée. Il est recommandé d'élever la température de confort à 25,84 ° C (Cheong et al., 2003). Une autre étude sur le terrain en Thaïlande a recommandé 26 ° C, 50-60% HR et 0,2 m / s de vitesse de l'air comme norme de confort thermique pour la conception AC (Air conditionner) avec un habillement de 0,5 clo (clo : unité de l'habillement qui sera développée dans la partie suivante). De plus, selon une étude réalisée par Cui (2013) sur 36 performances des étudiants chinois, les étudiants ont montré que la température de confort pour obtenir la meilleure performance dans leur travail est de 26 ° C. Les personnes qui travaillent sous une température comprise entre 29 et 32 degrés donnent des performances inférieures à celles pour qui la température est comprise entre 22 et 26 degrés. C'est ainsi que les

gens ont tendance à être plus performants dans un environnement frais que dans un environnement chaud. Cela peut-être parce que l'environnement frais amène les gens à se sentir plus lucide tandis que l'environnement chaud les rend somnolents. Cependant, en fonction du facteur humain, la température optimale recommandée dans un logement était 27 ° C avec 80% d'humidité relative et une vitesse de l'air de 0,4 m / sec (Jang, C.D, & I.S, 2007). Notons qu'en tenant compte de la variation de l'humidité et de la vitesse de l'air, une température intérieure plus chaude peut tout de même amener un confort thermique similaire. Ces deux facteurs jouent un rôle important dans la détermination de la température intérieure.

De plus, Wang et al (2010) mentionnent que les gens peuvent accepter une large gamme de température en fonction de leur adaptation, ce qui peut amener la température de confort moyenne à un niveau supérieur. Comme le révèle le résultat de leur étude sur l'évaluation du niveau de confort de l'occupant de Harbin, avec une température de 23,7 ° C et un habillement de 0,54 clo, 80% des occupants acceptent la plage de température de l'air entre 21,5 et 31 ° C. Comme la moyenne de la norme internationale se situe entre 24 ° C et 28 ° C, les limites de température acceptées par les occupants de Harbin sont inférieures pour la limite basse et supérieures pour la limite haute par rapport aux valeurs de la norme internationale (Wang , Zhang, Zhao, & He, 2010).

1.1.2. Température Rayonnante

La température rayonnante est la chaleur rayonnée par un objet thermique existant dans l'environnement tel que le soleil, le feu, un four, un séchoir, un ordinateur... (HSE, 2020). Ce facteur est sérieusement pris en compte lorsque l'enveloppe du bâtiment est exposée au rayonnement solaire. Tout comme notre corps est protégé par la peau, l'enveloppe du bâtiment protège l'intérieur du bâtiment contre l'environnement extérieur afin d'assurer le confort de l'occupant. Même si la température entourant un corps est confortable, une personne peut avoir froid si le mur est froid. De même, un mur chaud peut faire en sorte qu'une personne ait plus chaud pour la même température ambiante (Atmaca, Kaynakli, & Yigit, 2007).

Selon l'ASHRAE, les personnes sont généralement plus sensibles à un rayonnement causé par un plafond chaud plutôt que par un mur chaud ou froid (ASHRAE-55, 2017). La figure ci-dessous montre une insatisfaction causée par l'asymétrie rayonnante pour le cas d'un élément de l'enveloppe du bâtiment. Quand le plafond est chaud et le mur est froid, l'insatisfaction est plus élevée que quand le plafond est froid et le mur est chaud. Cependant, une étude menée par Atmaca (2007) dans une région chaude montre qu'un mur non isolé entraîne une augmentation rapide de la température intérieure et est vraiment affecté par le rayonnement solaire. L'isolation a été utilisée

pour empêcher le problème de surchauffe et de perte de chaleur du bâtiment pour s'adapter au climat local du bâtiment (Atmaca, Kaynakli, & Yigit, 2007)

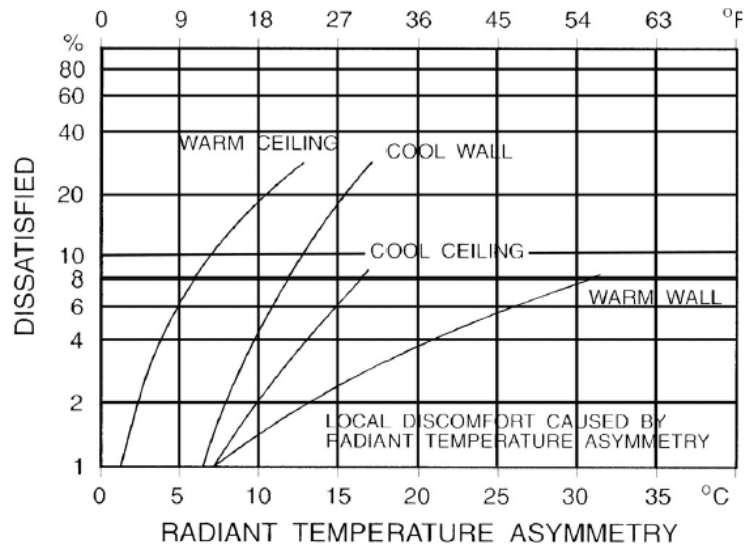


Figure 2: Insatisfaction des occupants sur base de l'asymétrie rayonnante (ASHRAE-55, 2017)

1.1.3. Humidité

L'humidité est une mesure de la quantité de vapeur d'eau dans l'air et d'autres gaz. Par exemple, l'eau bouillante s'évaporant dans l'atmosphère environnante augmentera le pourcentage d'humidité dans l'air. Elle peut être exprimée en plusieurs variables telles que la température du point de rosée, la pression de vapeur, le rapport d'humidité et une humidité relative (Djamila, Chi, & Kumaresan, 2014). L'humidité relative est le rapport entre les quantités présentes de vapeur d'eau et la quantité d'eau que l'air peut contenir à une température donnée. C'est la seule variable d'humidité qui affecte le confort humain et les autres êtres vivants. En effet, il influence la perte de chaleur par évaporation d'une personne. La température de l'air peut modifier l'humidité relative. Ces deux paramètres ont une relation inverse lorsque la température augmente la diminution de l'humidité relative (Ozdamar & Umarogullari, 2018).

Ces auteurs mentionnent également que d'autres paramètres affectent l'humidité relative intérieure comme le nombre d'utilisateurs, le type d'activité, les caractéristiques de l'espace, le facteur personnel et la température, etc. Par exemple, la vapeur d'eau produite par la respiration et la transpiration des personnes dans l'environnement ont un effet sur l'humidité relative.

Pour la productivité et la santé humaine, l'humidité relative devrait se situer entre 40 et 60% (Ozdamar & Umarogullari, 2018). De même, ces facteurs ont également mentionné que l'humidité

relative comprise entre 40% à 70% est considéré comme un état confortable pour l'homme. Cependant, l'ASHRAE souligne qu'une humidité inférieure ou supérieure à ce nombre ne peut pas définir un état d'inconfort de l'occupant car d'autres aspects doivent également être pris en compte. Il n'y a aucun ensemble standard pour définir un niveau d'humidité maximum ou minimum pour le confort. Un facteur comme le dessèchement de la peau, la sécheresse des yeux et la production d'électricité statique peut limiter le confort dans un environnement à très faible humidité (ASHRAE-55, 2017). De plus, le graphique de confort d'ASHARE 55 depuis 1981 montre que l'humidité commence à affecter le confort thermique significativement lorsque la température est supérieure à 27 ° C, contrairement à une température inférieure à 21 ° C, l'humidité améliore le confort thermique (Djamila, Chi, & Kumaresan, 2014). ISO 7730 présente également une plage d'humidité acceptable selon laquelle, avec une température de 26 ° C et plus et une activité modérée (environ 2 met), l'occupant peut ressentir une gêne si l'humidité est élevée ou modérée (ISO-7730, 2005).

Dans une région où l'environnement est chaud, une humidité élevée peut causer un problème car la transpiration cutanée est empêchée et le refroidissement de la peau ne peut se faire. Lorsque la température du corps humain augmente, la sueur est en effet le moyen le plus efficace du corps pour refroidir la peau pendant l'évaporation (Parsons, 2002).

1.1.4. Vitesse de l'Air

La vitesse de l'air est la quantité de l'air dans un espace dans une certaine direction dans une période de temps exprimée en m / s. Yang, Yan et Lam, (2014) définissent la vitesse de l'air comme « La vitesse de l'air se déplaçant à travers les occupants ce qui peut aider à les refroidir si l'air est plus frais que l'environnement ». Il a souligné que la vitesse de l'air est un facteur important pour les personnes sensibles (Alwetaishi, 2016). La vitesse de l'air dépend de divers paramètres tels que l'orientation de l'espace, l'emplacement, la taille des fenêtres, les propriétés climatiques, le type d'activité, le nombre d'occupants et l'environnement environnant, notamment l'humidité relative, la température et la quantité de ventilation (Ozdamar & Umarogullari, 2018).

Tandis que les faibles mouvements d'air dans l'espace entraînent un inconfort, les mouvements d'air élevés peuvent donner une sensation de courant d'air et entraîner un inconfort pour l'occupant. D'autres paramètres influencent ainsi, une vitesse de l'air plus élevée peut-être bénéfique pour l'été mais inversement pour l'hiver. Le confort défini par la vitesse de l'air diffère également d'une personne à l'autre en fonction de l'âge, du sexe, de l'adaptation à l'environnement, de l'activité, etc. (Ozdamar & Umarogullari, 2018). Une norme de vitesse de l'air tenant compte de

toutes les préférences personnelles n'a pas encore été fixée. Cependant, l'ASHRAE a tout de même établi une vitesse de l'air intérieur acceptable avec une température acceptable dans certaines conditions (Alwetaishi, 2016). Ainsi, selon l'ASHRAE, pour les conditions de confort, la vitesse de l'air doit être de 0,15 m / s. Ce nombre peut changer selon la saison d'été ou d'hiver. À 0,1 m / s, l'occupant ne sera pas en courant d'air de même que 0,2 m / s de vitesse de l'air peut aussi satisfaire les gens. En revanche, entre 0,35 et 0,5 m / s, cela rendra l'environnement inconfortable pour l'occupant (ASHRAE-55, 2017). Néanmoins, comme différents paramètres influencent la vitesse de l'air de confort, il n'y a pas de nombre fixe pour la vitesse de l'air minimale acceptable (ISO-7730, 2005).

1.1.5. Taux métabolique/ Niveau d'activité

Le taux métabolique est l'un des principaux facteurs qui influent sur le confort thermique. Avec les mêmes conditions environnementales dans un espace donné, ce facteur est celui qui définit la satisfaction en terme de confort des utilisateurs. Le taux métabolique est exprimé en met (1 met = 58,2 W / m²) et cette valeur change en fonction de l'activité (Ozdamar & Umarogullari, 2018). Des personnes différentes, ayant donc un type et un niveau d'activité différents, présentent des taux métabolique, production de chaleur corporelle, également différent. Par exemple, dans un même restaurant, un client peut avoir un taux métabolique de 1,0 met tandis que le serveur peut avoir un taux métabolique d'environ 2,0 met. Néanmoins, avec un écart de 0,1 met, les activités peuvent être considérées comme étant similaires (ASHRAE-55, 2017). Comme chaque bâtiment a une fonction et un but différents, l'étudiant à l'université a une activité différente du travailleur dans le bureau ou un site industriel, cela donnera des sensations du confort thermique différentes. Le taux métabolique étant définie comme «la chaleur que nous produisons à l'intérieur de notre corps pendant que nous exerçons une activité physique» (Mustapa , Zaki, Rijal, Hagishima, & Mohamed, 2016). Au plus vous êtes actif, au plus vous produisez de la chaleur. En conséquence, notre corps a besoin de perdre de la chaleur ou d'avoir en environnement frais pour se sentir à l'aise.

Selon l'ASHRAE une différence de 0,1 met est négligeable, les conditions thermiques peuvent être considérer comme sensiblement identiques. Cependant, la norme ISO 7730 (2005) a montré qu'une différence de 0,1 met peut entraîner une différence de 1 ° C dans la température de l'air. Ainsi, une différence de 0,3 à 0,4 met pourrait conduire à un changement de 2,5 à 3 ° C dans la température de l'air. Cela montre clairement que différentes activités peuvent entraîner des sensations de chaleur ou de froid dans l'environnement pour l'occupant (Alwetaishi, 2016). A titre d'exemple, une étude de Rowe (2001) a également révélé que, pour une même température d'air et

une température rayonnante moyenne de (24 ° C) avec une même vitesse de l'air de (0,14 m / s), une humidité relative identique de 43% et un habillement est de 0,7 clo, une personne avec un taux d'activité de PMV a une sensation neutre dans la limite de confort thermique de l'ISO tandis qu'une personne avec 1,6 met peut ressentir un inconfort en dehors de la limite de l'ISO.

La figure ci-dessous montre les différents taux métaboliques dans la norme ISO et ASHRAE relatives à certaines activités courantes de la vie quotidienne. Comme nous pouvons le voir, la chaleur produite à l'intérieur de notre corps augmente en raison de notre activité, du sommeil à la marche en passant par la position assise. Ces deux normes ne montrent pas beaucoup de différences en position couchée et assise, car cette activité est simple à déterminer. Par contre, l'activité debout, car il existe différents types d'activité dans cette catégorie qui peuvent entraîner différents intensité production de chaleur (ASHRAE-55, 2017 et ISO-7730, 2005).

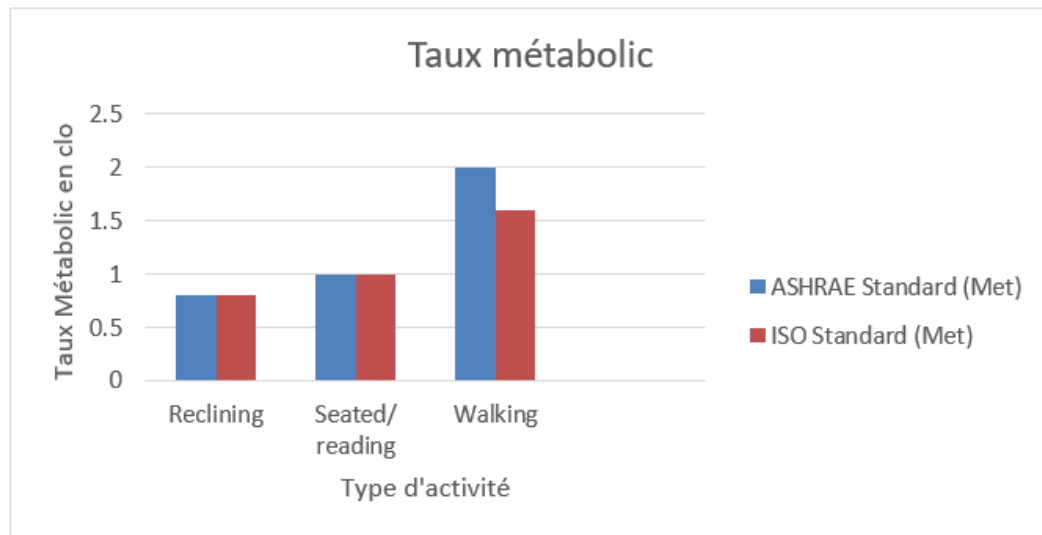


Figure 3: ASHARE et ISO standard pour le taux métabolique

1.1.6. Habillement

La peau et le tissu sont considérés comme une isolation naturelle pour protéger le corps de l'environnement. Un vêtement peut protéger le corps de la chaleur perdue et protéger l'équilibre en humidité du corps. Différents tissages, fibres, fils, couleurs donnent une isolation thermique différente au corps. De plus, il assure une résistance thermique entre le corps et l'environnement pour équilibrer les conditions climatiques. Par exemple: en été, les gens portent un débardeur et un short pour équilibrer leur température corporelle avec le temps chaud tandis qu'en hiver, ils portent un pull et une veste pour préserver le corps contre le froid (Ozdamar & Umarogullari, 2018). Par

conséquent, les vêtements sont utilisés subjectivement comme une adaptation pour garantir le confort thermique.

La valeur d'habillement est exprimée en clo. Comme les conditions vestimentaires diffèrent selon les conditions météorologiques et l'activité et les conditions de confort thermique, 0,5 clo sera suffisant pour l'été tandis 1 clo est nécessaire pour l'hiver (Ozdamar & Umarogullari, 2018). Quelques facteurs peuvent influencer sur la façon dont les gens s'habillent en dehors de l'objectif de confort, comme la mode, la culture, la religion, le type d'activité et le genre. Dans certains pays, les femmes sont obligées de porter un tissu qui couvre tout leur corps en raison de leur religion (Alwetaishi, 2016). L'étude de Parsons (2002) montre en outre que les femmes ont tendance à avoir plus froid que les hommes. Avec tous ces paramètres concernant le code vestimentaire, il n'y a pas de solution standard pour l'habillement pour obtenir un confort thermique.

Habituellement, l'habillement est utilisé en combinaison avec le taux métabolique pour identifier la sensation thermique des personnes. Cependant, selon ASHRAE, l'habillement comprise entre 0,5 et 1,0 clo sont portés lorsque l'environnement extérieur est chaud. Avec un taux métabolique compris entre 1,0 et 1,3 met, l'habillement de 0,5 à 0,7 clo ce qui réduit le risque d'inconfort local.

1.2 Approche d'estimation du confort thermique

Le « vote moyen » prédit connu sous le nom de PMV et le « pourcentage d'insatisfaction prédit » connu sous le nom de PPD sont les deux principales méthodes utilisées pour évaluer le confort thermique. Ils ont été mentionnés comme les méthodes les plus courantes et les plus acceptables pour prédire l'état de confort des utilisateurs (Alwetaishi, 2016). Ces deux approches reposent sur six aspects principaux incluant l'élément environnemental et l'aspect personnel. En général, l'aspect environnemental telles que la température de l'air, la température du rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air ont tendance à affecter davantage l'état de confort thermique de la personne que l'aspect personnel qui comprend l'activité et les vêtements. Notons que, la température de l'air reste le facteur le plus prépondérant (Alwetaishi, 2016).

Le «PMV est un indice qui prédit la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique à 7 points» (ISO-7730, 2005) organisées sur une échelle de -3 à +3 où -3 est froid, -2 est frais, -1 est légèrement froid, 0 est neutre, +1 est légèrement chaud, +2 est chaud et +3 est trop chaud. Il peut également être défini en utilisant le mot acceptable ou satisfaisant pour faciliter le calcul de l'état de confort thermique des utilisateurs (ASHRAE-55,

2017). L'autre méthode, PPD a été définie comme suit «Le PPD prédit la valeur moyenne du thermique d'une grande peuple» (ISO-7730, 2005). Il utilise la gamme d'expression insatisfaisant /inacceptable et satisfaisant/ acceptable pour déterminer le pourcentage de personnes ressentant un confort (ASHRAE-55, 2017).

2. Confort thermique en région tropicale

Les tropiques sont la région qui entoure l'équateur de la terre. Lorsque l'on parle de cette région, la première chose qui nous vient à l'esprit est son climat chaud et humide toute l'année. Il existe 3 types de climat dans la région tropicale tels que:

- forêt tropicale humide ou équatoriale: généralement trouvée à des latitudes à moins de 15 degrés au nord et au sud de l'équateur, y compris des pays comme l'Amérique du Sud, l'Afrique centrale, l'Asie du Sud-Est et l'Océanie

- mousson tropicale: trouvée le long des régions côtières du sud-ouest de l'Inde, du Sri Lanka, du Bangladesh, du Myanmar, du sud-ouest de l'Afrique, de la Guyane française et du nord-est et du sud-est du Brésil.

- tropical humide et sec ou savane: communément trouvé en Afrique, en Asie et en Amérique du Sud

Dans ce climat chaud, la plupart des bâtiments utilisent la climatisation pour améliorer l'environnement intérieur. Et comme la température est chaude toute l'année, le climatiseur est utilisé en toute saison. Même s'il existe une norme globale sur l'influence des paramètres sur le confort thermique, comme le climat est différent d'un endroit à l'autre dans le monde, une légère différence entre le standard du confort thermique de ces régions a été trouvé. Une étude de Lu et al (2015) sur la sensation thermique humaine dans un espace de ventilation semi-ouvert situé dans une île tropicale en Chine montre que la température de confort thermique est de 25 ° C et la limite supérieure acceptable par les occupants est de 30,6 ° C avec une vitesse du vent de 1,19 m/s. Une autre étude de Pérez, L. et al (2019) sur le confort thermique d'un bâtiment éducatif au Mexique montre que par rapport à ce mode de ventilation, le confort standard acceptable par les occupants est différent aussi comme montre sur le tableau ci dessous (table 1).

Mode de ventilation	Température de l'air (° C)	Humidité relative (%)	Vitesse de vente (m/s)
Ventilation naturelle	26,9 ± 1,6	52,1 ± 5,2	0,14 ± 0,03
Ventilation de climatiseur	24,7 ± 1,6	52,1 ± 5,2	0,14 ± 0,05

Table 1 : Confort thermique acceptable par les occupants par rapport au mode de ventilation (Perez, Prieto, & Rojas, 2019)

Une autre étude sur un immeuble de bureaux à Bangkok, en Thaïlande, montre que dans un environnement naturel ventilé, les occupants se sentent satisfaits avec une température de 28,5° C et 24,5 ° C pour un environnement de climatisation. Par ailleurs , les femmes préféraient une température 0,8 plus élevée que leurs collègues masculins (Busch, 1990). Cependant, une étude ultérieure réalisée par De Dear et al (1992) sur un immeuble de bureaux en Thaïlande montre que l'occupant peut accepter une température de confort jusqu'à 31,5° C ce qui est beaucoup plus élevé que la norme de confort conventionnelle. Par conséquent, comme nous pouvons le voir sur la même région tropicale, une condition climatique légèrement différente peut également rendre la satisfaction différente d'une personne à l'autres. Cela montre que les gens qui vivent sous le climat tropical peuvent accepter une température de confort plus élevée car ils ont un comportement adaptatifs et une tolérance élevée à la température chaude (Kwong, Nor, & Sahari, 2013).

3. Climat et situation du lieu de cas d'étude

Quant à cette thèse, nous souhaitons concentrer notre étude sur le Cambodge, un pays situé dans la région de la mousson tropicale. Le Cambodge est un pays d'Asie du sud-est situé entre les latitudes 10° et 15° Nord et les longitudes 102° et 108° Est à la frontière avec la Thaïlande, le Vietnam, le Laos et le golfe de Thaïlande. L'influence de ce pays par le climat tropical de mousson également connu sous le nom de climat chaud et humide induit 2 saisons qui sont la saison sèche et la saison des pluies. La saison sèche commence de novembre à avril, avec un vent de mousson du nord-est. La saison des pluies commence de mai à octobre. Le vent souffle entre le sud et l'ouest ce qui amenée l'humidité du vent du golfe de Thaïlande et de l'océan Indien. Généralement, la température au Cambodge se situe entre 21 et 35 ° C. Cependant, en raison de l'effet du changement climatique, la température minimale peut chuter à 22 ° C avec une humidité élevée pendant la

saison des pluies tandis qu'en saison sèche, la température maximale peut monter jusqu'à 40 ° C. Au cours des deux dernières années, la température s'est maintenant à 30 ° C et au-delà, et ceci presque toute l'année ce qui a rendu le pays encore plus chaud pendant la saison sèche. Les mois les plus chauds se situent entre mars et mai. Cependant, la période la plus sèche de ce pays est de janvier à février et connaît la précipitation la plus lourde de septembre à octobre en temps normal. Avec son paysage au centre bas et entouré de montagnes, ce pays est rarement confronté à une catastrophe naturelle telle qu'une inondation, une tempête ou un tremblement de terre.

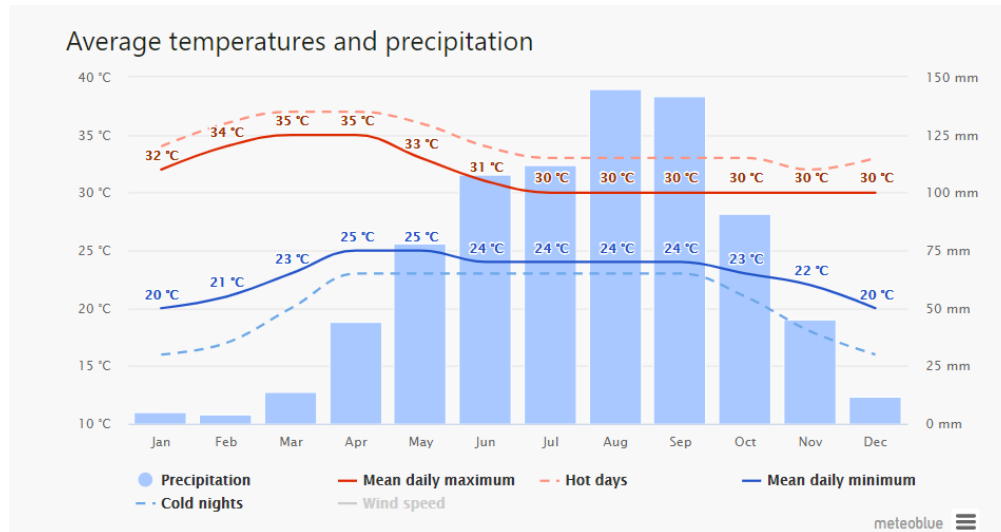


Figure 4 : Moyenne température et précipitation du Cambodge (Meteoblue)

Phnom Penh est la capitale du Cambodge située dans la région centre sud. En tant que capitale économique, industrielle, culturelle et éducative, la population de la ville croît au cours de l'année et de manière remarquable. En tant que pays en développement, de nombreux immeubles de grande hauteur tels que des bâtiments éducatifs, des bureaux, des logements ont été construits pour répondre à la demande croissante. Cependant, alors que le bâtiment continue de s'élever, les espaces verts qui devraient être aménagés de la même manière afin d'équilibrer l'environnement semblent aller dans une direction différente. En conséquence, combinées à toute la pollution de l'air provenant de l'industrie et des transports, les températures à Phnom Penh (figure 5) sont normalement légèrement élevées par rapport à la région entourée du Cambodge et même la province de Kandal (figure 6) une province qui entourait Phnom Penh. Le climat dans la ville est chaud toute l'année et il y a une légère variation entre les saisons.

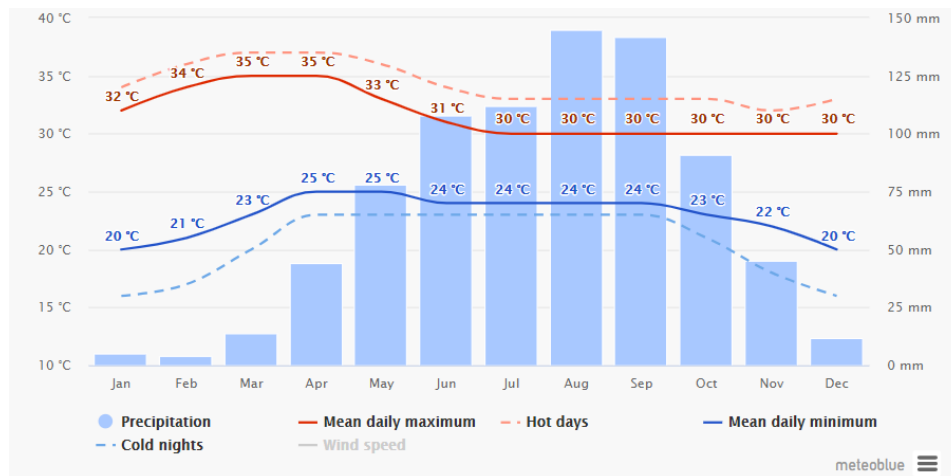


Figure 5 : Moyenne température et la précipitation de Phnom Penh (Meteoblue)

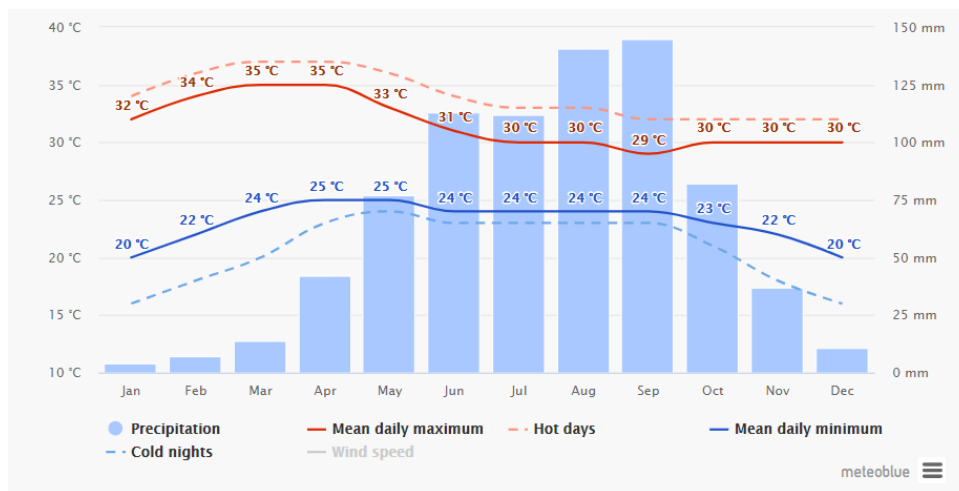


Figure 6 : Moyenne température et précipitation de Kandal (Meteoblue)

L'influence de la direction du vent sur Phnom Penh est la même que dans d'autres régions du Cambodge avec un peu plus de vitesse du vent car Phnom Penh est situé dans la région du sud et à côté d'un grand fleuve (Mékong). L'humidité dans cette région semble être plus élevée en saison des pluies (plus de 80%) qu'en saison sèche (plus ou moins 70%).

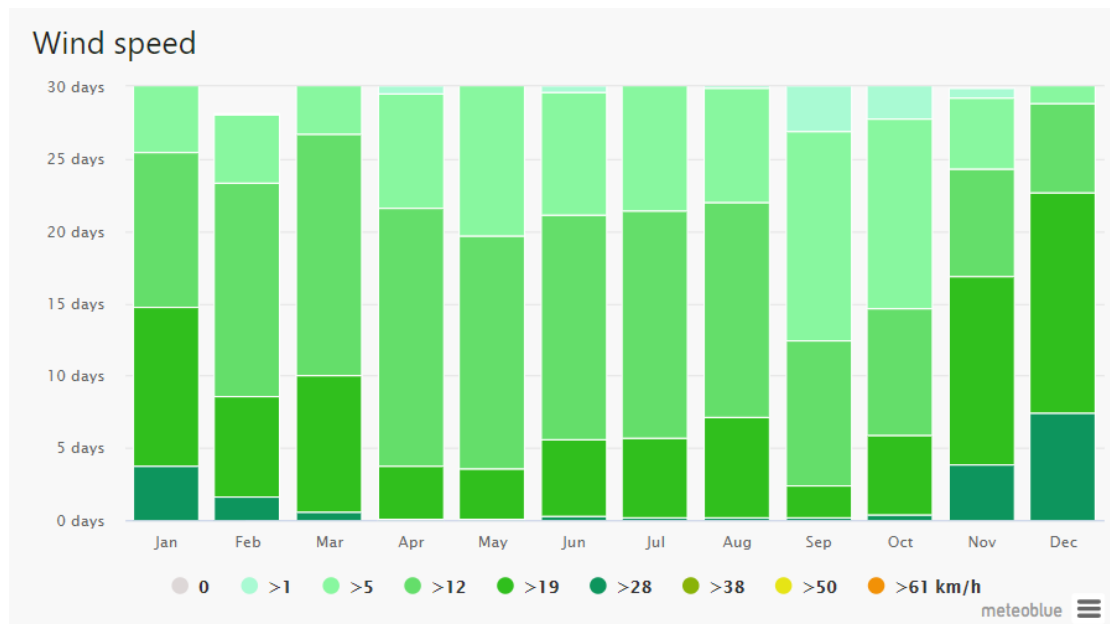


Figure 7: Vitesse moyen du vents par an a Phnom Penh (Meteoblue)

Average humidity over the year

This is the mean monthly relative humidity

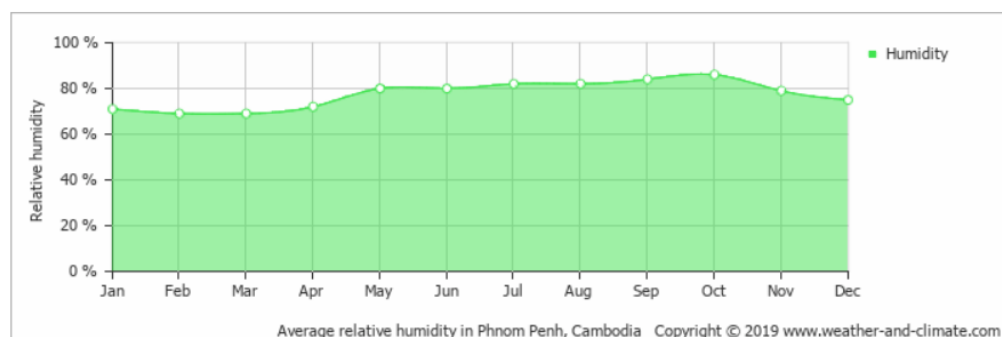


Figure 8 : Humidité relative moyenne par an à Phnom Penh (Weather & Climate)

Chaque pays a toujours sa propre culture, tradition, architecture qui s'adapte à son environnement. Quant au Cambodge, les maisons traditionnelles sont conçues pour s'adapter à l'influence du climat tropical sur le pays. La maison traditionnelle cambodgienne (figure 9) est normalement en bois pour la colonne, le mur et le sol. Les tuiles sont en terre cuite ou en les feuilles de palmier et utilisées pour la toiture. Avec la colonisation par la France de 1860 à 1953, l'architecture moderne a été introduite dans le domaine de la construction du Cambodge. Depuis lors, la plupart des maisons et autres constructions sont construites en béton, briques en terre cuite, zinc, verre ... sans aucune isolation. En raison du changement climatique et de l'augmentation de la

température, la plupart des bâtiments au Cambodge sont équipés d'un ventilateur électrique ou d'un climatiseur pour aider à abaisser la température et à mettre l'occupant à l'aise dans la pièce.



Figure 9 : Maison traditionnelle du Cambodge

4. Logiciel Trnsys

Afin d'analyser avec précision les performances d'un bâtiment comme pour une nouvelle conception ou en cours de rénovation, l'utilisation d'un logiciel de simulation énergétique du bâtiment a été un outil clé. Il existe de nombreux logiciels de simulation de l'énergie qui ont été développés et utilisés par les chercheurs et les concepteurs en fonction de l'état du bâtiment ou du paramètre qu'ils souhaitent connaître et du but de leur application (Mazzeo, et al., 2020). Le test de performance de simulation énergétique du bâtiment (BESTEST) est une méthode qui permet d'identifier si un logiciel de simulation énergétique est assez bon. Pour obtenir cette méthode BESTEST, ils utilisent un programme de référence tel que Energy Plus, TRNSYS, BLAST, DOE2., ect. pour obtenir un résultat de différents paramètres d'énergie avec appliquer sur différents cas de bâtiment (Neymark, et al., 2002). Aujourd'hui, tous les logiciels qui ont été comparés pour faire le BESTEST, tels que Energy plus, Trnsys,... sont les logiciels énergétiques populaires qui ont été utilisés pour analyser les performances des bâtiments par de nombreux chercheurs et concepteurs.

TRaNsient SYstem Simulation, principalement connu sous le nom de Trnsys, est « un environnement logiciel graphique extrêmement flexible utilisé pour simuler le comportement des

systèmes transitoires ». Le logiciel TRNSYS est un logiciel conçu et développé par l'Université du Wisconsin à partir de la fin des années 1970. Il est majoritairement utilisé pour faire la simulation qui se concentre sur l'évaluation des performances du système d'énergie thermique et électrique. En plus, il peut également être utilisé pour modéliser d'autres systèmes dynamiques tels que les flux de trafic ou les processus biologiques (Trnsys, 2020).

Ce logiciel a été largement utilisé par les chercheurs, designers, étudiants, architectes, ingénieurs, consultants... Il a été utilisé activement dans des applications telles que:

- Modélisation centrale des installations
- Simulation de bâtiment (y compris modélisation énergétique LEED)
- Processus solaires thermiques
- Transfert de chaleur couplé au sol
- Applications solaires à haute température
- Systèmes de pompe à chaleur géothermique
- Modélisation thermique / flux d'air multizone couplée
- Optimisation
- Recherche sur le système énergétique
- Évaluation des technologies émergentes
- Centrales électriques (biomasse, cogénération)
- Systèmes de piles à combustible à hydrogène
- Systèmes éoliens et photovoltaïques
- Calibration des données et simulation

Trnsys se compose de deux parties:

- Le moteur qui peut être appelé en tant que noyau lit et traite le fichier d'entrée, résout le système détermine la convergence et trace les variables système. Il détermine également les

propriétés thermo physiques, inverse les matrices, effectue des régressions linéaires et interpole les fichiers de données externes.

- La deuxième partie est une vaste bibliothèque de composants, chacun modélisant les performances d'une partie du système. La bibliothèque standard comprend environ 150 modèles allant des pompes aux bâtiments multizones, des éoliennes aux électrolyseurs, des processeurs de données météorologiques aux routines économiques, et des équipements HVAC de base aux technologies émergentes de pointe.

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

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

- Trnsys3d: utilisé pour modéliser l'énergie du bâtiment / données 3D (sont normalement utilisés pour les grands bâtiments qui ont beaucoup de zones thermiques ou de formes complexes pour profiter du temps de modélisation de la zone thermique)

- TRNSYS Studio: interface pour entrer des environnements du bâtiment tel que les données météo, orienté du bâtiment... et également utilisé pour exécuter la simulation évaluer les performances du bâtiment

- TRNBuild: interface pour entrer la définition du bâtiment telle que la couche du mur, le matériau d'utilisation dans le bâtiment, le nombre d'occupants, l'habillement, le système HVAC...

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

La relation entre ces 4 composants est illustrée dans la figure ci-dessous.

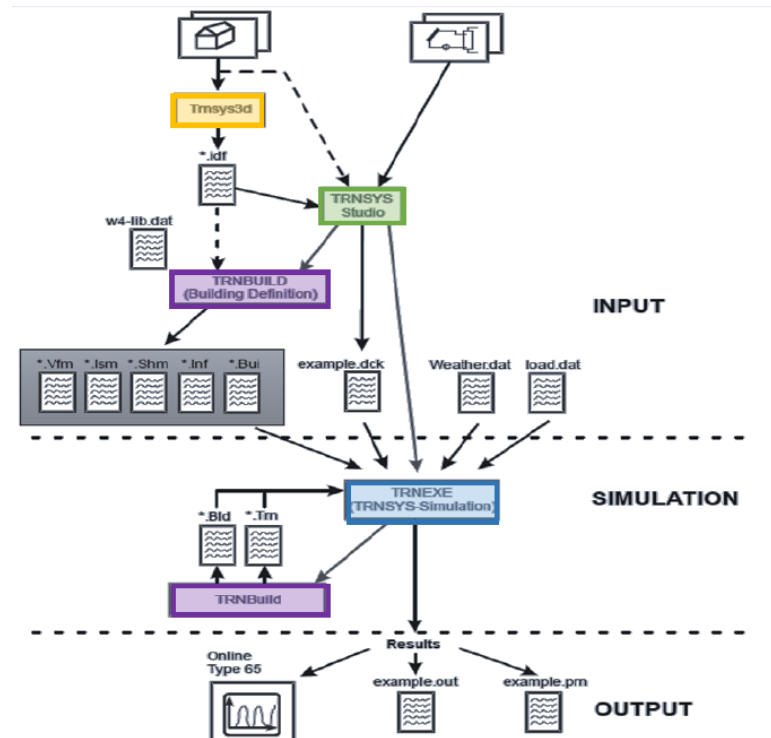


Figure 10 : La relation des 4 composants TRNSYS

Une étude pour comparer différents logiciels de construction de simulation réalisée montre que TRNSYS peut être considéré comme le plus acceptable dans la modélisation d'un bâtiment qui a accès et influence de la direction du rayonnement solaire à travers la fenêtre dans le bâtiment car il prend en compte les propriétés optiques variables avec l'angle d'incidence (Mazzeo, et al., 2020). De plus, le logiciel TRNSYS est aussi utilisé dans les travaux pratiques sur l'analyse de radiation solaire et température de l'aire dans un bâtiment dans le cours de Physique du Bâtiment du professeur Phillippe ANDRE à l'Université de Liège pour les étudiants en Master Ingénieur Architecte.

CHAPITRE 3 : PROBLEMATIQUE

Comme nous le savons tous, fournir un environnement confortable à l'occupant d'un bâtiment est un facteur très important dans la phase de conception architecturale. Le bâtiment de l'enseignement supérieur est un contexte dans lequel il est difficile d'atteindre ces critères. En effet, les étudiants pour se concentrer sur leur étude, sont particulièrement sensibles à certains facteurs tels que la pollution sonore ou le confort visuel. En plus de cela, la température est l'un des premiers paramètres du confort thermique, spécialement pour la région à climat tropical car cette zone a déjà une température extérieure élevée. Dans ce travail, nous analysons les performances d'un bâtiment en termes de confort thermique dans une région tropicale. Le but de ce travail est de comprendre comment un bâtiment, situé dans une région à tropicale, utilisant principalement la brique, le béton et le verre comme matériau de construction, peut garantir un environnement confortable aux occupants avec un système de ventilation naturelle sans l'aide de climatiseur ou autre système de refroidissement. Par conséquent, la question à laquelle nous essayons de répondre à travers ce travail est « évaluer la performance thermique d'un bâtiment de l'enseignement supérieur dans la région tropicale : le climat intérieur présent-il une surchauffe? les occupants de l'immeuble sont-ils satisfaits en termes de confort thermique? Quelle peut être la cause de cet environnement inconfortable et que pouvons-nous faire pour améliorer les performances du bâtiment et résoudre ce problème ? » Nous espérons ainsi sensibiliser les architectes de la prochaine génération à prendre en compte ces éléments dans leur conception.

La plupart des bâtiments situés à Phnom Penh utilisent un climatiseur pour aider à améliorer l'environnement à l'intérieur du bâtiment. Comme l'air chaud produit par le climatiseur pollue l'environnement et consomme beaucoup d'énergie, l'utilisation du climatiseur n'est pas une réponse adéquate. De manière générale, les architectes, ici, n'ont pas vraiment pris en compte le fait qu'un bâtiment peut également offrir un environnement confortable sans l'aide d'un climatiseur. Cependant, récemment, beaucoup de concepts de construction durable sont apparus pour aider à résoudre les problèmes d'environnement et réduire la demande énergétique. Le bâtiment utilisant un système de ventilation de climatiseur nécessite deux fois plus d'énergie que le bâtiment utilisant un système de ventilation naturelle (Nicol & Humphreys, 2002). Une conception durable peut être obtenue en utilisant un certain type de façade comme la façade verte ou la façade naturelle ventilée pour aider à améliorer les performances thermiques sans nuire à l'environnement. En dehors de cela, certains aspects tels que l'utilisation de matériaux spécifiques, ou encore l'utilisation de l'énergie solaire sont également pris en compte pour aider à résoudre ce problème. Néanmoins,

certaines paramètres de conception sont plus efficaces que d'autres selon les conditions météorologiques et l'environnement de la région concerné.

La méthode que nous utilisons dans ce travail nous aidera à comprendre le point de vue des occupants sur le confort thermique dans le bâtiment étudié et à pouvoir comparer l'aspect personnel et l'aspect environnemental. Tout au long de ce travail, nous serons en mesure de connaître les performances d'un bâtiment d'enseignement supérieur à Phnom Penh, au Cambodge. Nous pourrions comprendre le type de méthode et les paramètres à prendre en compte pour analyser la performance thermique du bâtiment. Nous serons également en mesure d'analyser différentes approches de conception durable qui peuvent améliorer la performance thermique d'un bâtiment situé dans une région tropicale ayant un climat similaire au Cambodge.

En outre, l'objectif de ce travail est également d'introduire le durable dans la conception. De plus, les architectes du Cambodge seront en mesure d'avoir une idée de ce qu'ils peuvent faire pour parvenir à une approche de conception durable pour leur prochain projet en utilisant moins le climatiseur et en le remplaçant par un système de ventilation naturelle. Ainsi, l'objectif de nos recherches n'est pas seulement d'aider à résoudre les problèmes environnementaux mais aussi de contribuer aux économies d'énergie qui se traduisent par économie pour les occupants.

CHAPITRE 4 : METHODOLOGIE

Différentes méthodes sont utilisées pour répondre à notre question de recherche. Une étude de cas sur un bâtiment éducatif situé à Phnom Penh, au Cambodge est appliquée. Pour évaluer le confort d'un bâtiment existant, par rapport à ASHRAE (ASHRAE-55, 2017) il y a 3 méthodes :

- Enquête auprès des occupants
- Mesure de l'environnement sur les paramètres qui affectent le confort
- Utilisation de certain logiciel pour analyser la performance du bâtiment

Tous les chercheurs ont utilisé ces trois méthodes pour évaluer le confort du bâtiment. Pour choisir la méthode d'utilisation, cela dépend du chercheur lui-même ou du sujet de son travail. Pour notre étude pour analyser les performances de notre bâtiment de cas d'étude, nous avons décidé de suivre la méthodologie en trois phases différentes:

- Phase 1: mesure de l'influence des paramètres sur le confort thermique du bâtiment
- Phase 2: Enquête en ligne auprès d'étudiants et de professeurs qui utilisent actuellement le bâtiment pour recueillir leurs sensations en termes de confort thermique
- Phase 3: Simulation sur la performance du bâtiment à l'aide du programme TRNsys

Les paramètres que nous avons choisi d'étudier sont tous les paramètres d'influence sur le confort thermique mentionnés au chapitre précédent, soit la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air. Mais aussi les paramètres personnels, comme le type d'activité et l'habillement.

1. Information générale du bâtiment de cas d'étude

Nous choisissons pour cas d'étude, un bâtiment d'enseignement supérieur à Phnom Penh, au Cambodge. Ce bâtiment est situé dans l'Institut de Technologie du Cambodge qui se situe le long de la route asiatique numéro 11, Sangkat Bangkok, Khan Toul Kok, Phnom Penh. Le bâtiment se trouve à 11° de latitude Nord et 104° de longitude Est. Il est orienté face à l'ouest. Ce bâtiment a été construit en 2008 et fonctionne actuellement comme un bâtiment d'enseignement comprenant des salles de classe, des bureaux pour les professeurs et chercheurs et des laboratoires de recherche pour le département des technologies de l'information. Le bâtiment en forme de U, présentes 4 niveaux. Les matériaux principaux utilisés pour la construction de ce bâtiment sont le béton en structure, la brique pour les murs et le verre pour les baies. Il dispose de 19 salles de classe, 3 bureaux pour professeurs, 2 laboratoires pour chercheurs, 2 locaux pour l'organisation étudiante et

1 cafétéria. Tous les bureaux des professeurs, laboratoires, cafétéria et salles de classe équipés d'ordinateurs utilisent un climatiseur, à côté des salles de classe normales sont équipées d'un ventilateur au plafond et d'une ventilation naturelle. Les plans du bâtiment sont en **annexe 1**. Il y a des arbres autour du bâtiment pour apporter de l'ombre au bâtiment aider à sa ventilation et diminuer la pollution sonore, le bâtiment ayant été construit le long de la route.



Figure 11 : Bâtiment du cas d'étude : bâtiment F de l'ITC, Phnom Penh (Google map)



Figure 12 : Orientation du bâtiment d'étude (Google map)

2. La mesure

Les deux paramètres les plus importants qui influencent le confort thermique, à savoir la température de l'air et l'humidité relative, sont mesurés dans 5 pièces du bâtiment (figure 14). Elles sont situées à différents étages et à différentes parties du bâtiment. Chaque pièce a une fonction différente et a également des systèmes de ventilation différents. Les deux grandes salles au milieu du bâtiment sont aussi d'intérêts, mais à cause de la situation dans la salle, il est impossible de mettre la capture pour la mesure. Les 5 pièces qui ont été choisies sont:

- Salle 105F: située au rez-de-chaussée, orientée face à l'ouest, accueillant un bureau pour le conseil étudiant de l'ITC, équipée d'un ventilateur de plafond, occupée par 5 à 10 étudiants
- Salle 207F: située au 1er étage, orientée vers l'ouest, accueillant un laboratoire pour chercheurs et équipée des ordinateurs et d'un climatiseur, occupée par environ 15 chercheurs
- Salle 307F: située au 2ème étage, orientée vers l'ouest, accueillant un bureau pour les professeurs et équipés des ordinateurs et d'un climatiseur, occupée par 18 professeurs
- Cuisine de salle 307F: située au 2ème étage, orientée ouest, accueillant une cuisine pour professeurs équipée d'un ventilateur de plafond
- Salle 309F: située au 2ème étage, dont les baies sont orientées vers le nord, accueillant une salle de classe informatique équipée des ordinateurs et de climatiseur, occupée par 25 à 30 étudiants

Comme nous pouvons le voir, les pièces choisies sont principalement situées dans différentes parties du bâtiment, ceci pour analyser comment l'orientation du bâtiment peut affecter la température car la vitesse de l'air et le rayonnement solaire sur la pièce sont différents d'une direction à l'autre. La mesure de la pièce à différents niveaux consiste à savoir si le niveau de l'effet du bâtiment sur la température et l'humidité de la pièce ainsi que l'angle de rayonnement solaire sont également différents en fonction du niveau du bâtiment. Enfin et surtout, le choix de la pièce qui a une utilisation différente du système de ventilation. Comme cela dans le but de comprendre la température de satisfaction des occupants entre celle qui utilise le système de ventilation du climatiseur et le système de ventilation naturelle à l'aide d'un ventilateur de plafond. Aussi pour savoir quand l'occupant a tendance à utiliser le climatiseur et comparer le résultat sur son opinion de l'enquête qui est dans la deuxième phase d'expérimentation.

La prise de mesures a eu lieu en saison sèche pendant une période de 7 semaines, du 4 février 2020 à 00h00 jusqu'au 24 mars 2020 à 9h00. Selon ASHRAE (2017), pour la mesure des paramètres physiques, l'instrumentation de mesure doit respecter la plage de mesure et la précision indiquées dans la figure ci-dessous.

Table 7.3.4 Instrumentation Measurement Range and Accuracy

Quantity	Measurement Range	Accuracy
Air temperature	10°C to 40°C (50°F to 104°F)	±0.2°C (0.4°F)
Mean radiant temperature	10°C to 40°C (50°F to 104°F)	±1°C (2°F)
Plane radiant temperature	0°C to 50°C (32°F to 122°F)	±0.5°C (1°F)
Surface temperature	0°C to 50°C (32°F to 122°F)	±1°C (2°F)
Humidity, relative	25% to 95% rh	±5% rh
Air speed	0.05 to 2 m/s (10 to 400 fpm)	±0.05 m/s (±10 fpm)
Directional radiation	-35 W/m ² to +35 W/m ² (-11 Btu/h·ft ² to +11 Btu/h·ft ²)	±5 W/m ² (±1.6 Btu/h·ft ²)

Figure 13 : Plage de mesure et précision de l'instrumentation (ASHRAE-55, 2017)

Les 5 capteurs ont été placés dans chacune des pièces à environ 1,5 m au-dessus du sol et loin du rayonnement solaire direct. Chaque capteur a été programmé pour mesurer la température de l'air, l'humidité relative et le point de rosée.



Figure 14 : Emplacement des 5 salles où ont été prise les mesures

3. Enquête en ligne sur la perception et la satisfaction des utilisateurs

La température de l'air est le paramètre principal pris en compte pour cette étude de cas. Cependant, la sensation de confort thermique ressentie par les occupants est aussi importante que tous les paramètres physiques mesurés. En conséquence, une enquête en ligne a été mise en place

afin d'analyser la performance du bâtiment en fonction de l'avis de ses occupants et de leur satisfaction. L'aspect personnels comme l'activité métabolique et l'habillement est ainsi inclus dans l'évaluation des performances à travers de sondage en ligne auprès des occupants.

Cette enquête interroge les occupants, soit des étudiants en génie ayant étudié dans ce bâtiment pendant au moins 2 semestres mais aussi des professeurs et des chercheurs travaillant dans ce bâtiment à temps plein depuis au moins 2 ans.

Les questions utilisées pour recueillir la satisfaction des occupants sont basées sur le formulaire d'enquête de confort thermique ASHRAE (ASHRAE-55, 2017) avec quelques questions supplémentaires tenant compte des conditions climatiques dans lesquelles cette enquête a lieu. Les questions sont divisées en 3 parties:

- Informations générales sur le participant telles que la période où l'occupant reste dans le bâtiment normalement, où il se trouve normalement, les vêtements qu'il porte normalement...

- Leur satisfaction sur le confort thermique dans le bâtiment en utilisant l'échelle de -3 à +3 (-3 pour très satisfait et +3 pour très insatisfait) ainsi que leur sentiment pour savoir si le bâtiment est trop chaud ou trop froid et à quel moment de la journée

- Les moyens utilisés pour pallier à leur inconfort et leur avis sur les causes potentielles de cet inconfort

Toutes les questions pour l'enquête en ligne sont précisées dans l'**annexe 2**.

4. Simulation Trnsys

Afin d'avoir une meilleure analyse des performances du bâtiment en termes de confort thermique, et des résultats plus précis, une simulation est utilisée. TRNSYS est connu pour faire de la simulation de bâtiment pour analyser le confort thermique car nous pouvons trouver les données de température de l'air, d'humidité relative et tous les paramètres importants à prendre en compte pour les analyses de confort thermique.

Nous décidons de faire la simulation sur 9 zones thermiques différentes. Toutes ces zones sont situées à différents étages. Ces zones sont:

- 3 zones sur l'aile droite du bâtiment du rez-de-chaussée au deuxième étage qui incluent la salle 309F (Right_GF, Right_F1, Right_F2)

- 4 zones au milieu du bâtiment face à l'ouest s'étendant du rez-de-chaussée au troisième étage en incluant les salles 105F, 208F, 307F et 307F cuisine (Font_GF, Front_F1, Front_F2, Front_F3)

- 2 zones au milieu, dans la grande salle d'étude (Salle1 et Salle2) qui sont situées au 1er étage et au 3e étage. Ces deux salles sont couvertes d'un grand espace en verre et apportent la lumière du soleil dans la pièce. Elles sont toutes deux équipées de climatiseur et habituellement, beaucoup d'étudiants se plaignent qu'ils ont très chauds.

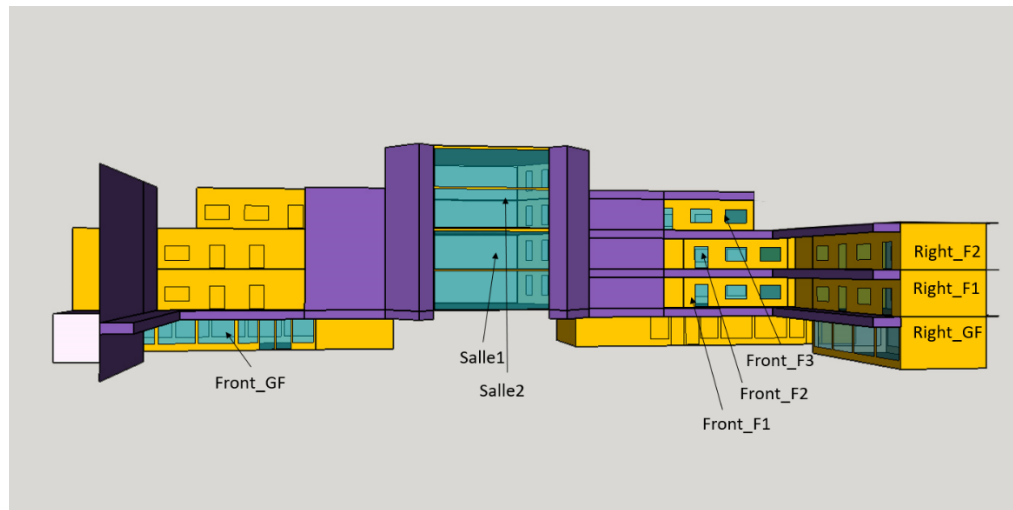


Figure 15 : Modélisation des zones thermiques dans TRNSys3d

On retrouve les zones thermiques étudiées présentées en jaune avec les vitrages bleus, et les blocs en jaune avec les vitrages en jaunes ce sont les blocs non-étude mais qui ont influence sur les zones voisines étudié. Finalement, les formes en violet ce sont le shading group qui aussi ont influence sur notre zone thermique. Notons que le logiciel Trnsys n'accepte pas les zones thermiques de forme circulaire, les salle1 et salle 2 sont transformées en hexagone en gardant la même surface de salle et surface vitrées qu'à l'origine.

Pour réaliser la simulation, nous commençons par modéliser le bâtiment en incluant toute la zone thermique d'étude et la zone thermique qui se connectent à la zone d'intérêt. Comme le bâtiment est de grande dimension et qu'il y a beaucoup de zones à étudier, nous modélisons toutes les zones thermiques sur Sktechup à l'aide du plug in Trnsys 3d. Le modèle dans Trnsys 3d peut nous aider à gagner du temps et aussi à obtenir une dimension plus précise de la zone et de son espace vitré. Après cela, le modèle de zone thermique est importé dans Trnsys Studio pour compléter certaines données sur l'environnement du bâtiment telles que l'orientation du bâtiment,

les données météorologiques, etc. Ce fichier sera ensuite importé dans Trnbuild pour ajouter les informations manquantes comme le matériau utilisé dans le bâtiment, le système de ventilation, le système de refroidissement et de chauffage... Finalement, le bâtiment est ramené dans Trnsys Studio pour la simulation finale afin d'obtenir le résultat sur les paramètres principaux, à savoir la température de l'air et rayonnement solaire.

4.1 Encodage

Dans le logiciel TRNSYS, nous créons différents blocs pour les différents composants de la simulation comme les données météo, les informations bâtiment, les type de résultats attendus, etc... Nous relierons ensuite tous les éléments (structure, météo, ...) ensemble pour construire la structure de la simulation. Dans notre cas, car nous ne faisons qu'une simple simulation pour trouver la température de l'air et le rayonnement solaire. La simulation peut être schématisée comme à la figure ci-dessous.

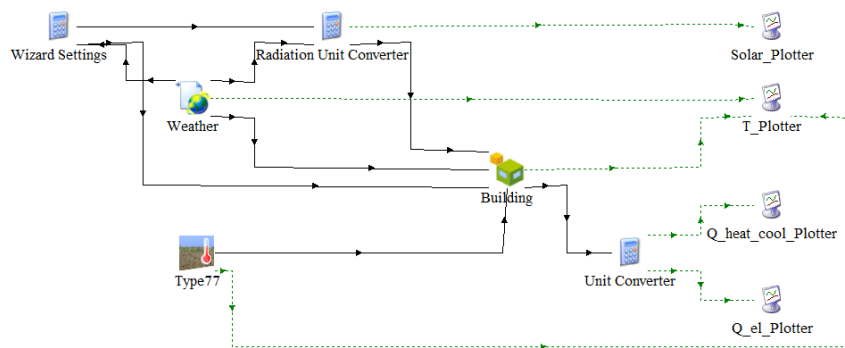


Figure 16 : Schéma fonctionnel de la simulation

Dans ce schéma nous pouvons retrouver:

- Type 15-6 (weather) : les composants de météorologiques, selon la location du bâtiment donnée par le logiciel. Comme il n'y a pas pour données météorologiques de l'emplacement exact du bâtiment d'étude, nous utilisons la météo de la station de Kampot qui est KH-Kampot-489850 pour la simulation, car Kampot est très proche de Phnom Penh et présente des conditions météorologiques similaires.
- Type 56 (Building) : le composant qui représente le bâtiment. Il définit le modèle de construction multizone, il est utilisé pour décrire le comportement thermique des différentes zones qui composent le bâtiment. Les caractéristiques géométriques de

chaque mur dans chaque zone thermique sont importées de la modélisation 3D dans Trnsys 3d comme mentionné ci-dessus. Le codage de l'aire, de la hauteur et de l'aire de vitrage est indiqué dans le tableau ci-dessous. La composition des zones est en **annexe 3** et les caractéristiques physiques du mur telles que la composition des parois, elles sont indiquées en **annexe 4**.

- Type 65-d (Solar_Plotter, T_Plotter, Q_heat_cool_Plotter, Q_el_Plotter) : le composant représente le résultat de simulation

Zone	Superficie (m ²)	Hauteur (m)	Espace vitrée (m ²)
Right GF	134.475	4.6	109.12
Right F1	134.475	4.2	28.8
Right F2	134.475	4.2	28.8
Front GF	191.478	4.2	108.82
Front F1	115.555	4.2	21.6
Front F2	115.555	4.2	21.6
Front F3	115.555	4.2	21.6
Salle 1	334.544	8.4	204.9
Salle 2	334.544	8.4	204.9

Table 2 : Donne des caractéristique des zones thermiques

CHAPITRE 5 : RESULTATS

Comme mentionné dans le chapitre ci-dessus, nous utilisons 3 étapes pour collecter nos données. Nous vous présenterons ces données qui pourront ensuite nous permettre de répondre à notre question de recherche.

1. La mesure

L'objectif de cette méthode est de connaître la température et l'humidité relatives réelles dans les 5 pièces différentes et de voir si elles correspondent au standard de confort thermique tel que mentionné au chapitre « état de l'art ». Cela nous a également permis de déterminer comment différents facteurs du bâtiment tels que l'orientation, le niveau de la pièce, peuvent affecter ces 2 paramètres importants et donc affecter le confort thermique. Pour rappel, les 5 pièces sont situées dans différentes parties du bâtiment et certaines utilisent un ventilateur de plafond et d'autres utilisent un climatiseur. Voici le résultat que nous avons obtenu pour ces cinq salles:

1.1 Salle 105F

Cette salle est située au rez-de-chaussée du bâtiment et à côté se trouvent des sanitaires. Elle possède un système de ventilation naturelle avec aide de ventilation au plafond. Le graphique montre en rouge la température à l'intérieur de cette pièce et en bleu l'humidité relative. Il montre que:

- La température maximale est de 36 °C avec un minimum à 24,5 °C et la température moyenne est de 31,39 °C. La température est élevée pendant le midi et l'après-midi et la plus basse pendant l'aube.
- L'humidité relative maximum est 69% avec un minimum à 38.5 % et la moyenne est de 54.93%. L'humidité relative est maximale pendant la période du matin peu avant le lever du soleil et a tendance à diminuer tout au long de la journée jusqu'au soir.

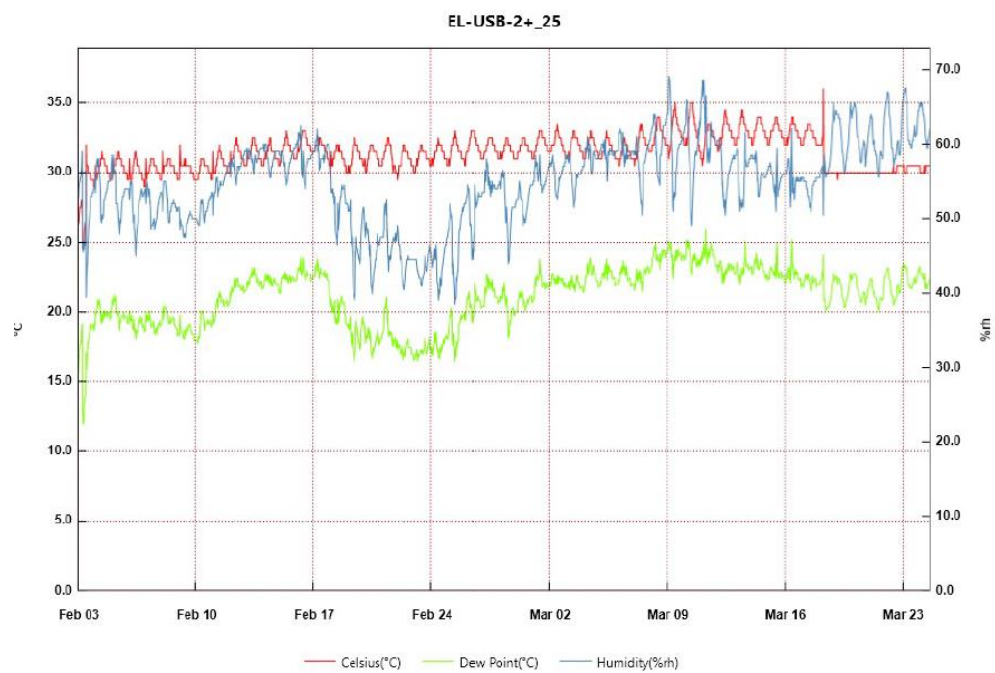


Figure 17 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 105F

1.2 Salle 208F

Cette salle est située au premier étage du bâtiment, à côté d'une salle de cours, et elle est possède un système de ventilation avec climatiseur. Le graphique de mesure de cette salle montre que:

- La température maximale est de 33 °C avec un minimum à 24,5 °C et la température moyenne est de 31,39 °C. Nous voyons que la température dans cette pièce est en quelque sorte constante tout au long de la journée.
- L'humidité relative maximum est 68% avec un minimum de 36 % et la moyenne est de 50.61%.

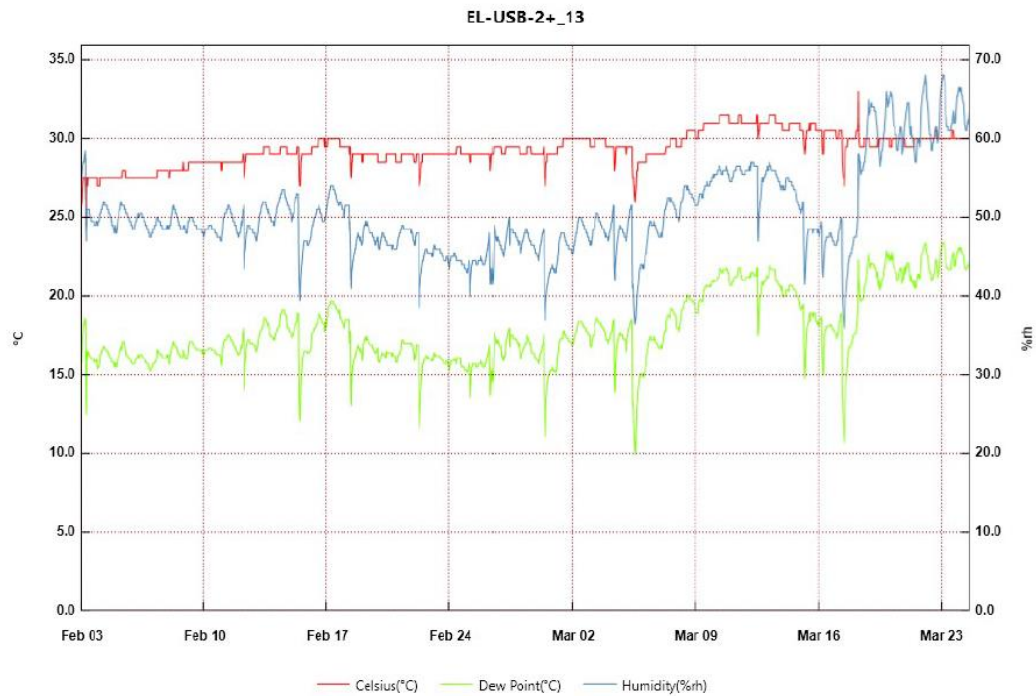


Figure 18 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 208F

1.3 Salle 307F

Cette salle est située au deuxième étage du bâtiment, à côté d'une salle de cours, et elle utilise un climatiseur. Le graphique de mesure de cette salle montre que:

- La température maximale est à 33.5 °C avec un minimum de 25 °C et la température moyenne est de 29.73 °C. La température est entre 27,5 et 29,5 °C pendant la durée d'utilisation du climatiseur. La température monte jusqu'à 30 - 31 °C pendant la soirée lorsque la salle revient à utiliser une ventilation naturelle.
- L'humidité relative maximum est 69.5 % avec un minimum de 37 % et la moyenne est de 49.57 %.

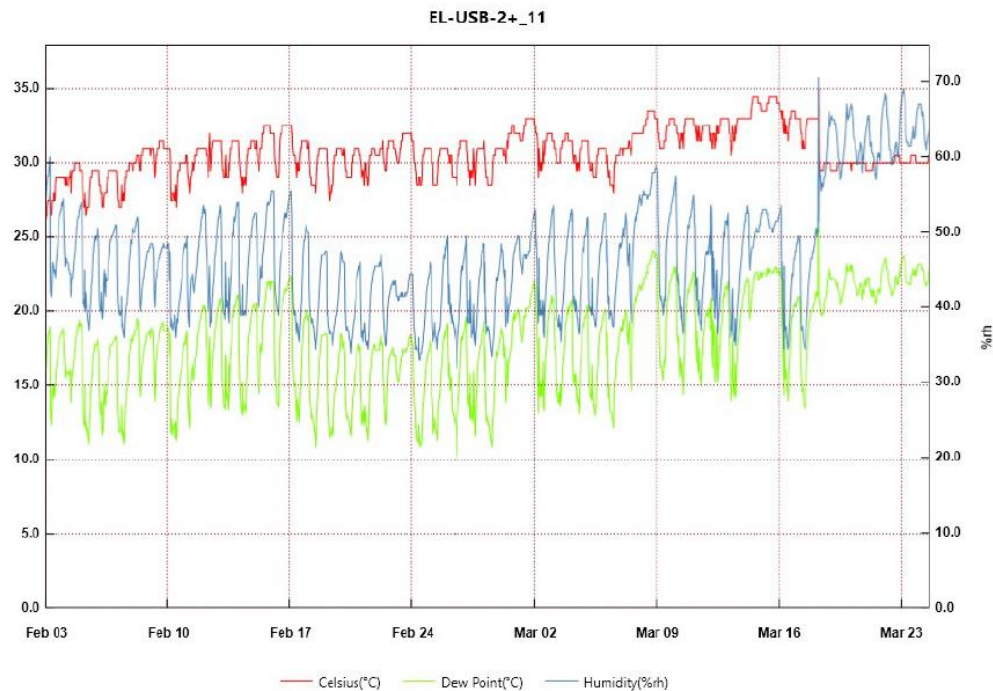


Figure 19 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 307F

1.4 Salle 307F cuisine

Cette salle est située au deuxième étage du bâtiment, à côté d'un bureau et elle utilise un système de ventilation naturelle. Le graphique de mesure de cette salle montre que:

- La température maximale est de 35 °C avec un minimum à 26 °C et la température moyenne est de 30.78 °C. La température est généralement constante tout au long de la journée et a normalement la température la plus basse pendant tôt le matin. Comparé à la salle 307F qui se trouve à côté de cette pièce, la température moyenne dans cette pièce est un peu plus basse car elle utilise une ventilation naturelle.
- L'humidité relative maximum est 70.5 % , minimum de 32 % et la moyenne est de 47.04 %.

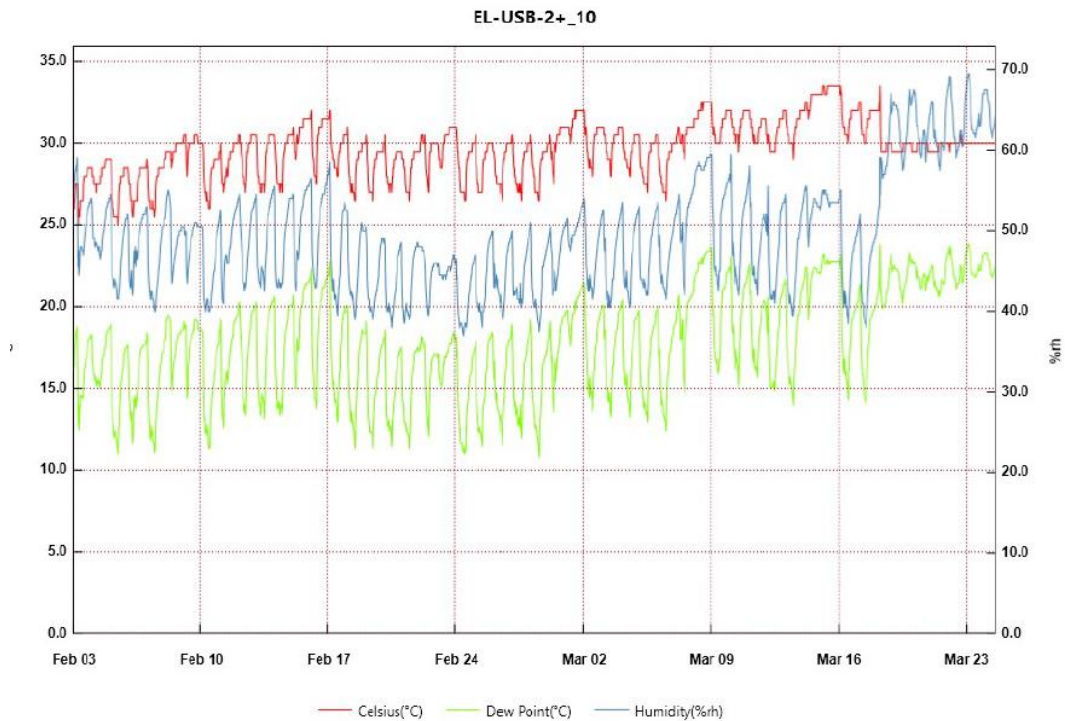


Figure 20 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 307F cuisine

1.5 Salle 309F

Cette salle est située au deuxième étage du bâtiment, à côté d'un bureau et elle utilise un système de ventilation naturelle. Le graphique de mesure de cette salle montre que:

- La température maximale est de 35.5 °C avec un minimum à 25 °C et la température moyenne est de 32.52 °C. La température est généralement constante tout au long de la journée. Cette salle semble avoir la température la plus élevée par rapport aux autres car elle est située au dernier étage.
- L'humidité relative maximum est 65 %, le minimum de 41.5 % et la moyenne est de 53.57 %.

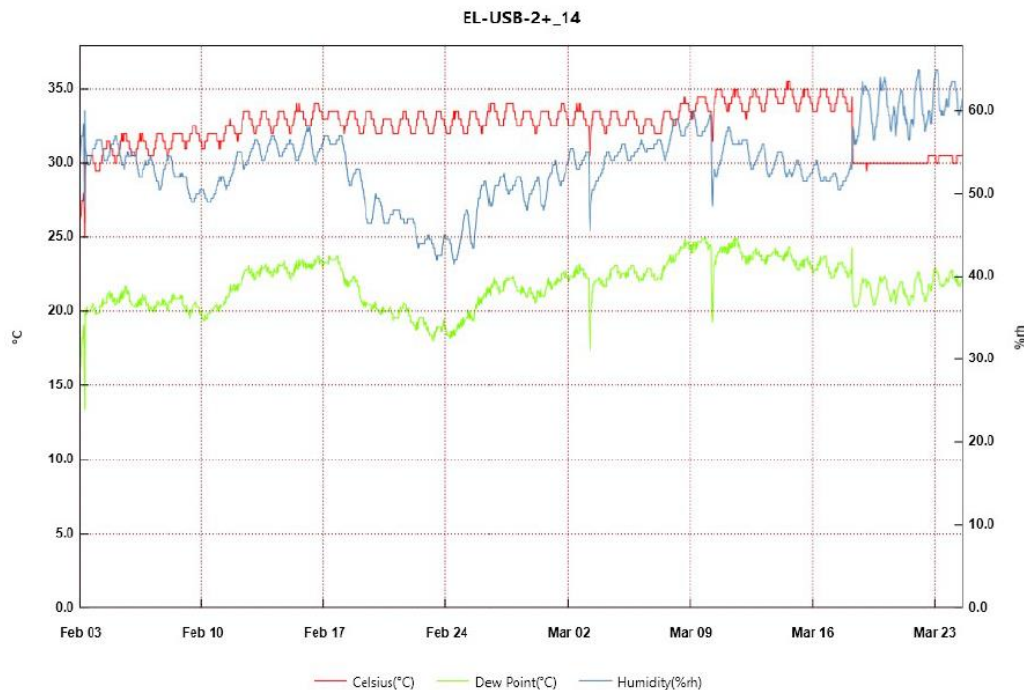


Figure 21 : Résultat de la mesure de la température et l'humidité relative dans la salle 309F

2. L'enquête

Dans cette partie, nous vous présenterons les résultats que nous avons obtenu suite à notre questionnaire en ligne. L'objectif de cette partie est d'analyser l'aspect personnel des occupants sur les performances thermiques du bâtiment. Selon ASHRAE (ASHRAE-55, 2017) pour un bâtiment qui a plus de 45 occupants, le taux de réponse des occupants doit dépasser 35%. Cependant, après

3 semaines de mise en ligne des questions nous avons reçu au total 85 réponses, ce qui représente environ 25% du total des occupants. En tant que bâtiment éducatif, les occupants changent toujours de place entre le bâtiment de l'établissement et certains occupants passent probablement 2 heures dans ce bâtiment. Bien que nous n'ayons reçu que 25% du nombre total d'occupants, les 90% des réponses que nous avons reçues restent dans l'immeuble à temps plein, soit 4 heures le matin et 4 heures l'après-midi. Dans les 85 réponses reçues, 9 répondants sont des professeurs et chercheurs âgés de 30 ans et 76 sont des étudiants âgés d'environ 20 ans. Les professeurs et les chercheurs passent normalement en 8 heures par jour au bureau pendant que les étudiants doivent changer la salle de cours toutes les deux heures. Les 85 réponses de chaque occupant s'afficheront en **annexe 2**.

Nous divisons les réponses globales en fonction de l'étage où se trouvent les occupants. Dans les 85 réponses, nous avons reçu:

- rez-de-chaussée: 12 réponses
- premier étage: 29 réponses
- deuxième étage: 8 réponses
- troisième étage: 16 réponses
- plusieurs localisation: 20 réponses

2.1 **Résultat global**

Dans la première partie, nous interrogeons l'occupant sur sa satisfaction en utilisant l'exemple de question de l'AHSRAE (ASHRAE-55, 2017). La question de la satisfaction thermique comprend une échelle à sept points se terminant par les choix «très satisfait» et «très insatisfait ». Pour la sensation thermique de l'occupant, la question comprend l'échelle de sensation thermique à sept points ASHRAE subdivisée comme suit: froid, frais, légèrement frais, neutre, légèrement chaud, chaud, très chaud.

Le résultat des 85 réponses que nous avons reçues sur la satisfaction et la sensation thermique des occupants, est indiqué dans le graphique ci-dessous:

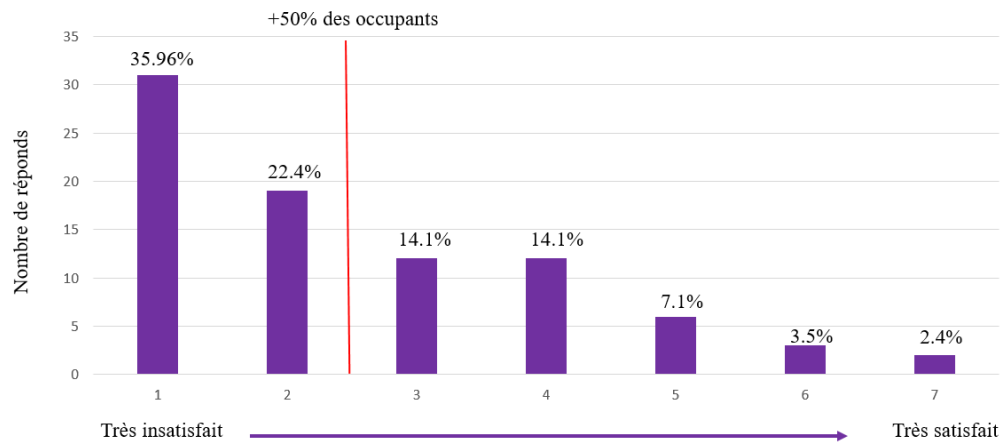


Figure 22 : La satisfaction globale des occupants

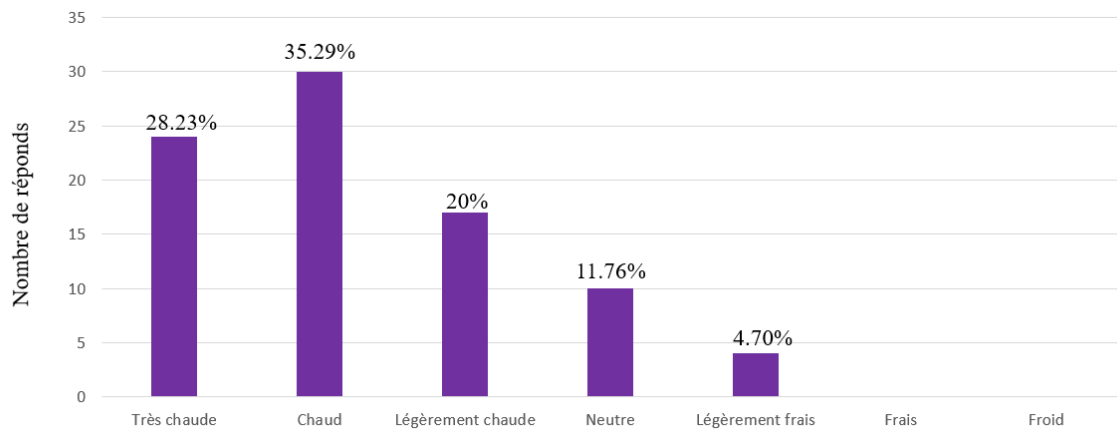


Figure 23 : La sensation thermique globale des occupants

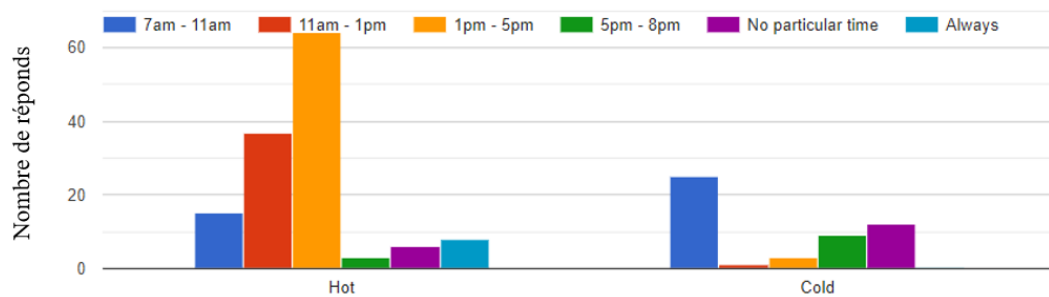


Figure 24 : Les périodes où l'insatisfaction survient le plus

2.2 Résultat en fonction des étages

Afin de savoir si les différents niveaux des zones thermiques affectent la satisfaction des occupants, nous divisons le résultat que nous avons reçu des occupants en fonction de l'étage où ils se situent normalement. Le résultat montre les chiffres ci-dessous:

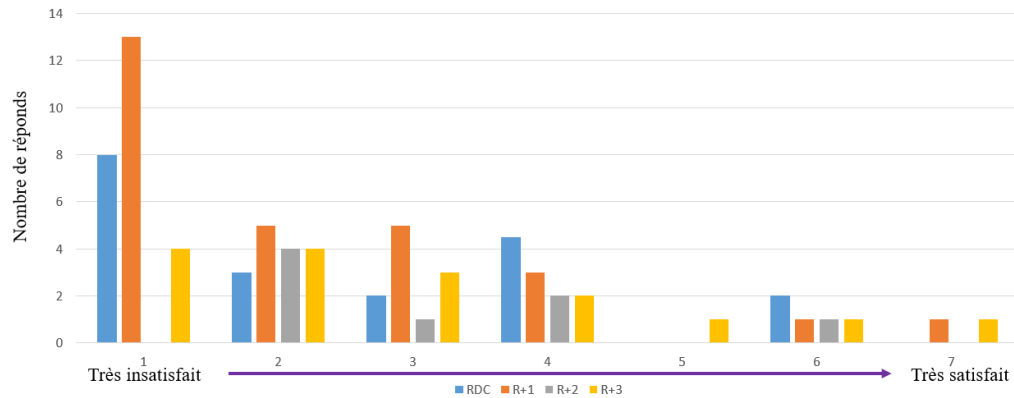


Figure 25 : La satisfaction des occupants de rez-de-chaussée, premier, deuxième et troisième étage

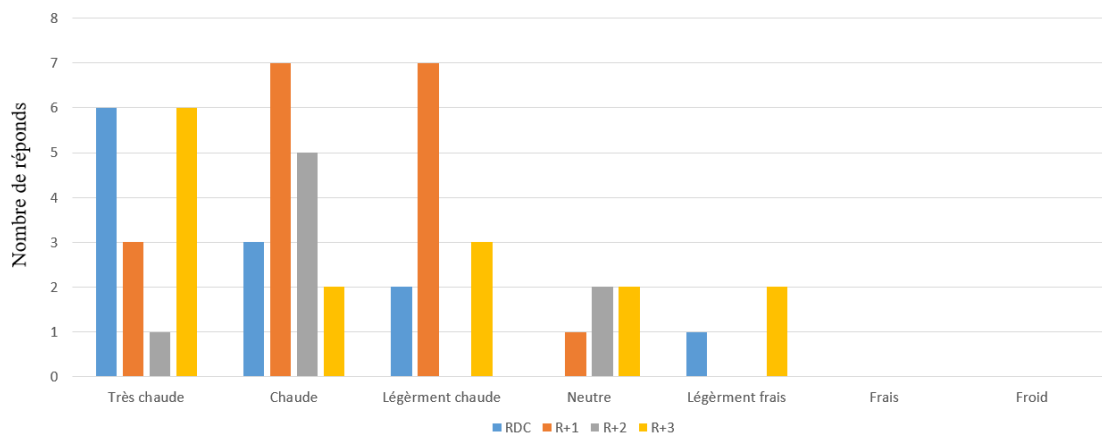


Figure 26 : La sensation thermique des occupants de rez-de-chaussée, premier, deuxième et troisième étage

- se déplacer entre ces 4 étages

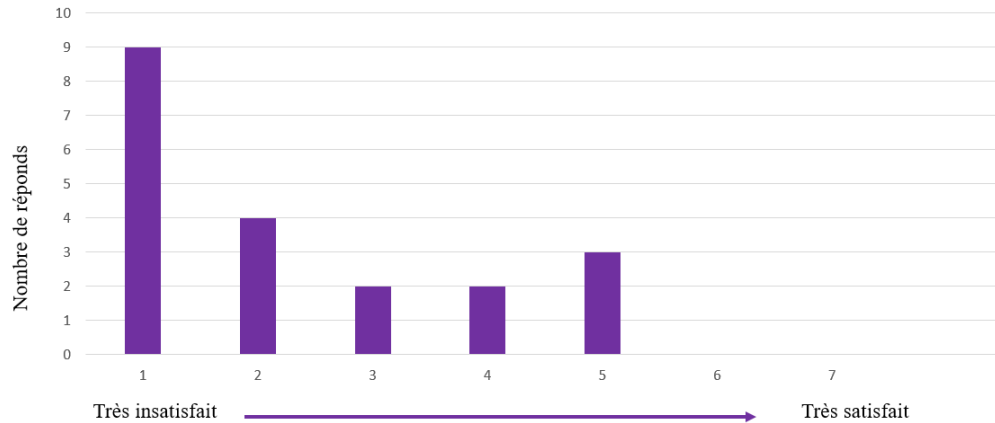


Figure 27 : La satisfaction des occupants qui se déplacent dans les 4 étage

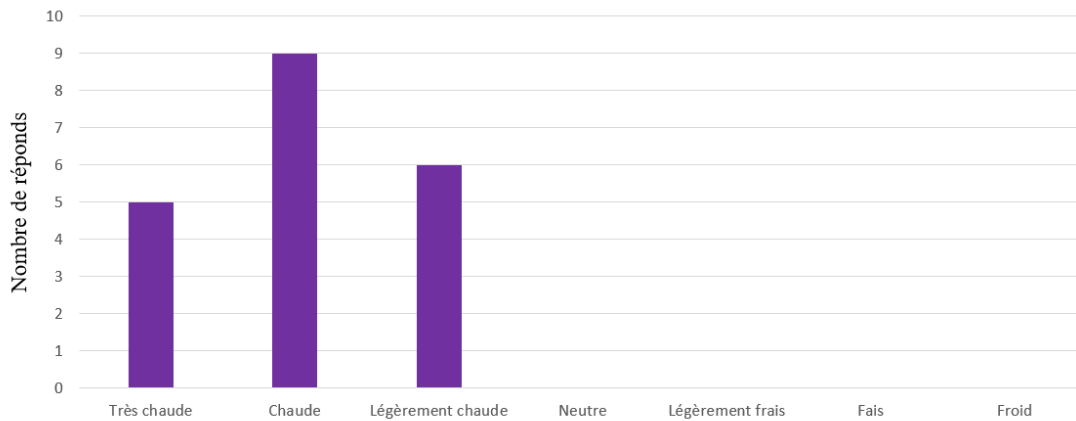


Figure 28 : La sensation thermique des occupants dans les 4 étage

3. Simulation TRNSYS

Dans cette partie, nous présenterons les résultats liés à la dernière phase méthodologique. La simulation des zones thermiques sur le logiciel TRNSYS. Il y a, au total, dix zones thermiques et la simulation donne la température de l'air pour chaque zone thermique. Voici tout d'abord le résultat global des 9 zones (figure 29). Ensuite, pour mieux comparer les zones dans différentes orientations du bâtiment, nous obtenons le résultat sur les 3 zones dans l'aile droite du bâtiment, les 4 zones au milieu du bâtiment face à l'ouest et les 2 zones des grandes salles de cours (figure 30, 31, 32).

La simulation est faite heure par heure, dans la même période que pour la mesure de la température et de l'humidité effectuée dans la phase 1 de la méthodologie, soit du 4 février 2020 à 00h00 jusqu'au le 23 mars 2020 à 9h00.

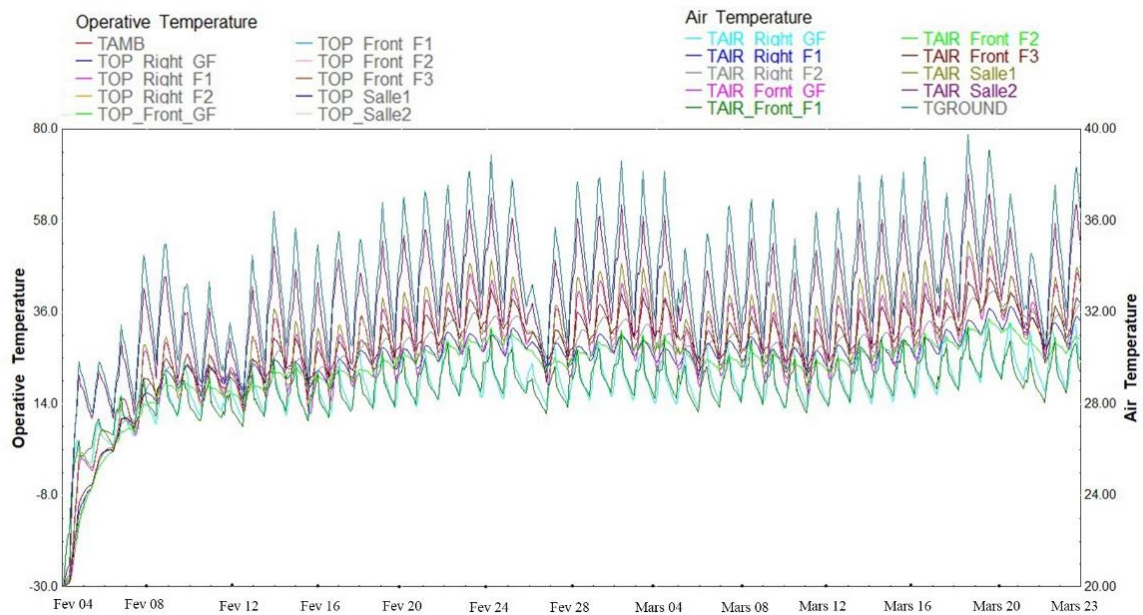


Figure 29 : La température de l'air dans les 9 zones thermique

La température de l'air des trois salles (figure 30) se situant dans l'aile droite du bâtiment est montrée dans la figure ci - dessous. Le Right_GF se situe au rez-de-chaussée, le Right_F1 se situe au premier étage, le Right_F2 se situe au deuxième étage qui est le dernier étage du bâtiment. La température de l'air de Right_F2 est la plus élevée parmi des trois avec une moyenne de 30.4 °C. Le Right_F1 a une température de l'air moyenne de 29.7 °C. Enfin la température de l'air du Right_GF est la plus basse avec une moyenne de 28.7 °C.

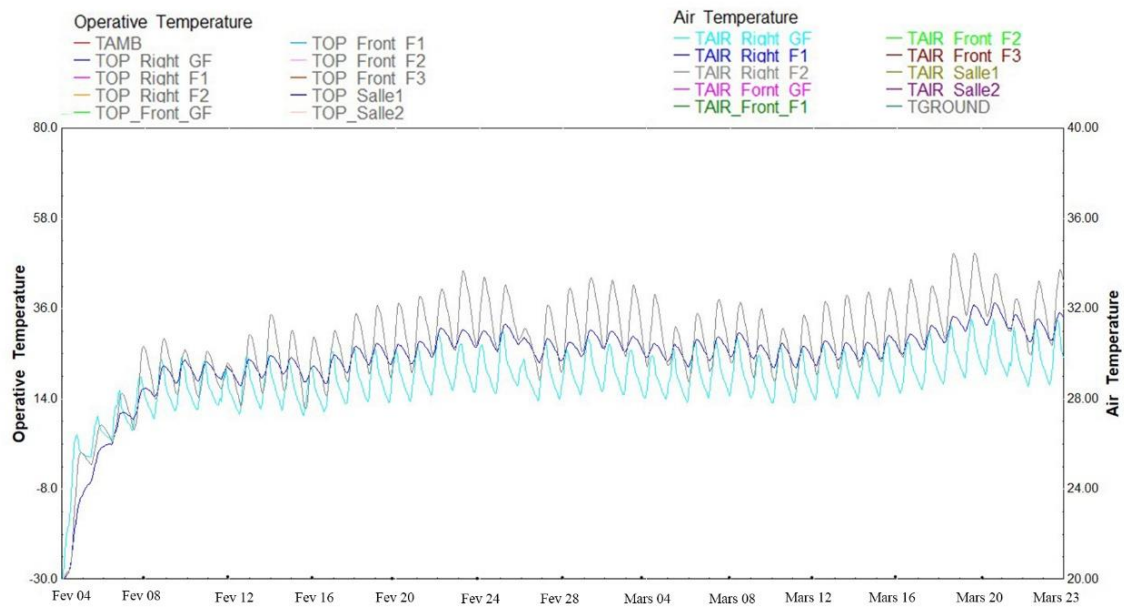


Figure 30: La température de l'air dans les 3 zones dans l'aile droite du bâtiment

On peut voir sur la figure 31 que la température est élevée par rapport à l'étage. Le zone Front_F3 se situe en dernier étage est le plus élevée comme elle a 3 murs exposés à l'environnement extérieur et le zone Front_GF se situe au rez-de-chaussée est le plus basse.

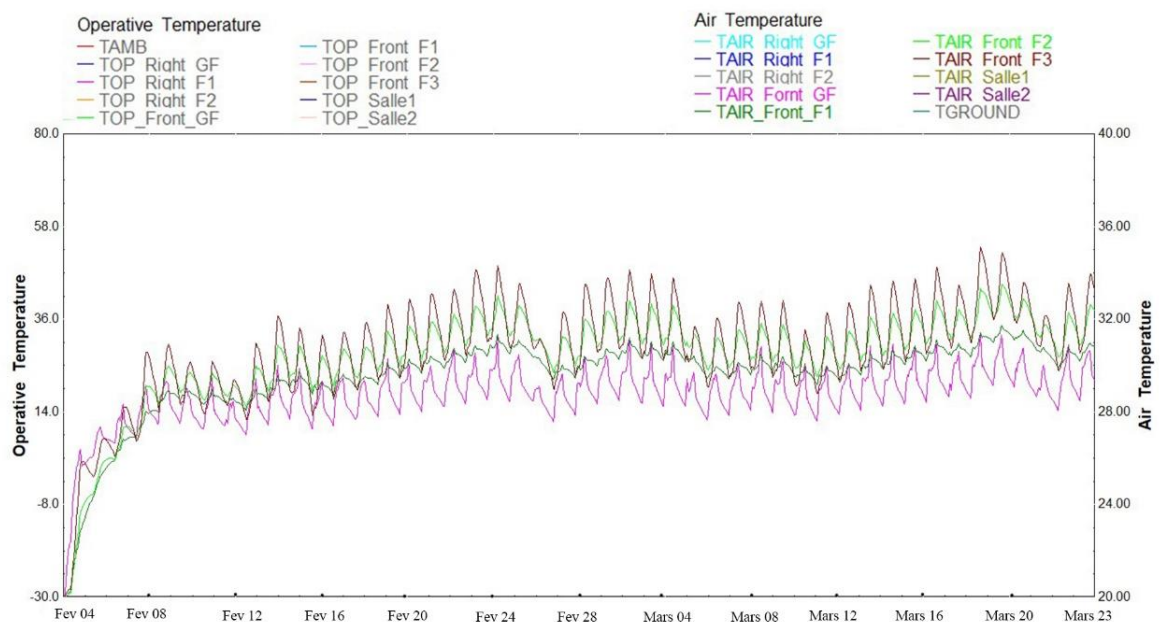


Figure 31 : La température de l'air dans les 4 zones au milieu du bâtiment

Nous montrons ici la température dans les deux grandes salles au milieu du bâtiment. Ces salles sont entourées par des espace vitrage de 204.9m². On peut voir que la zone de la salle1 et salle2 a une température plus élevé que les autres zones, avec une température moyenne d'environ 33 °C. Et la zone salle2 est un peu élevée que la salle1 comme elle reçoit directement le rayonnement solaire de la toiture.

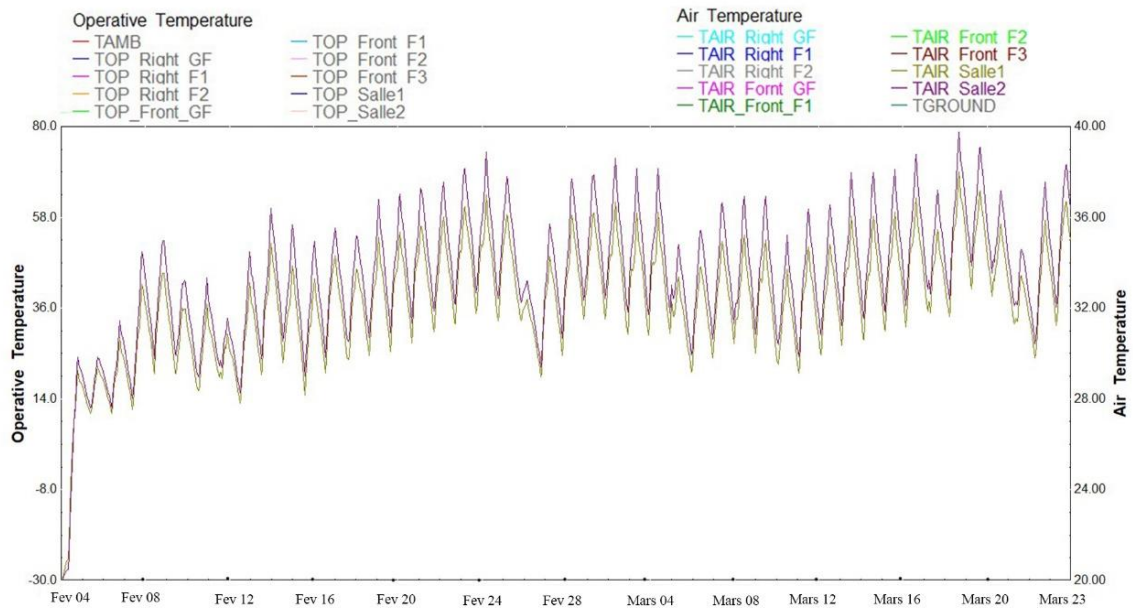


Figure 32 : La température de l'air dans les 2 zones de la grand salle

Dans la première phase méthodologique, nous ne pouvons prendre des mesures que pendant 7 semaines, en choisissant l'une des périodes les plus chaudes en raison de la limite de temps de ce travail. Cependant le confort thermique doit être garanti toute de l'année. En plus de cela, la simulation TRNSYS peut donner le résultat pour une année entière, nous ferons ensuite la simulation en novembre pendant une semaine de 07 novembre à 14 novembre car ce mois-ci a la température la plus basse de l'année. Avec ce résultat, nous pouvons ensuite analyser les performances thermiques pendant la température plus basse et plus élevée.

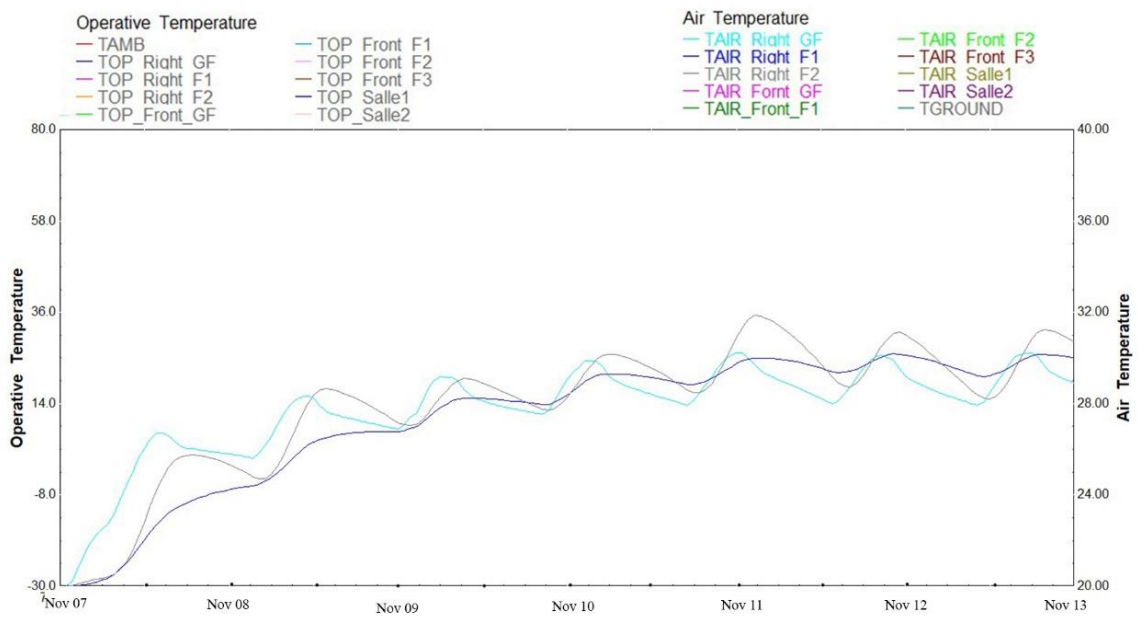


Figure 33 : La température de l'air dans les 3 zones dans l'aile droite du bâtiment de 07 à 14 novembre

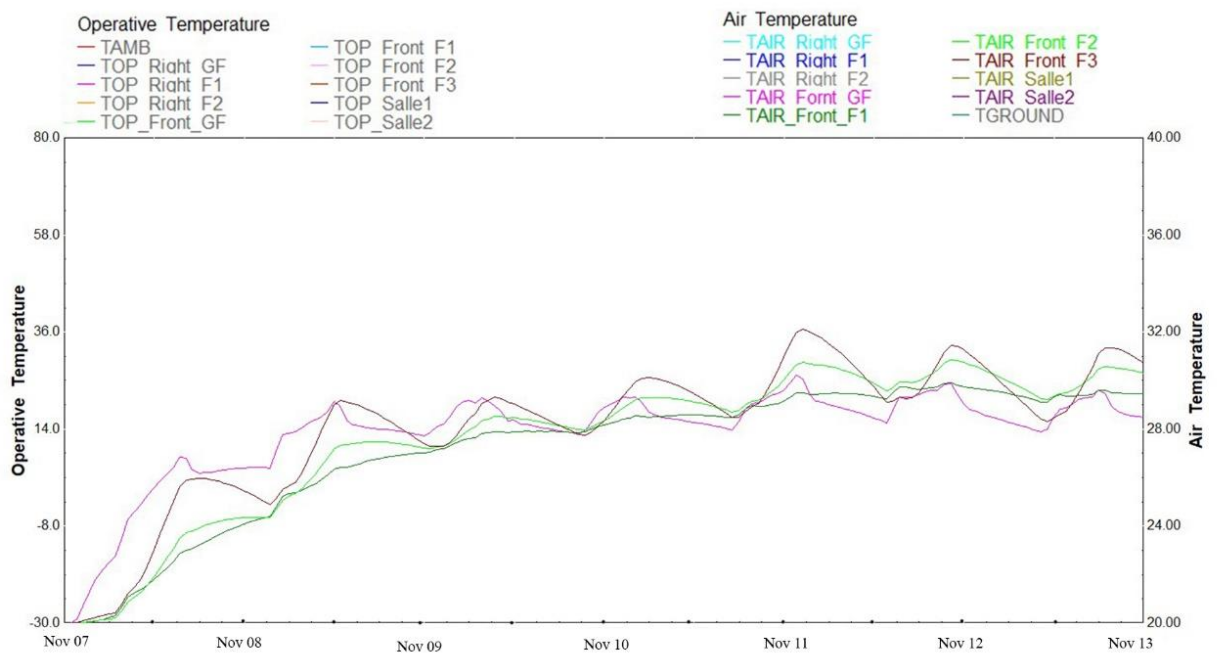


Figure 34 : La température de l'air dans les 4 zones au milieu du bâtiment de 07 à 14 novembre

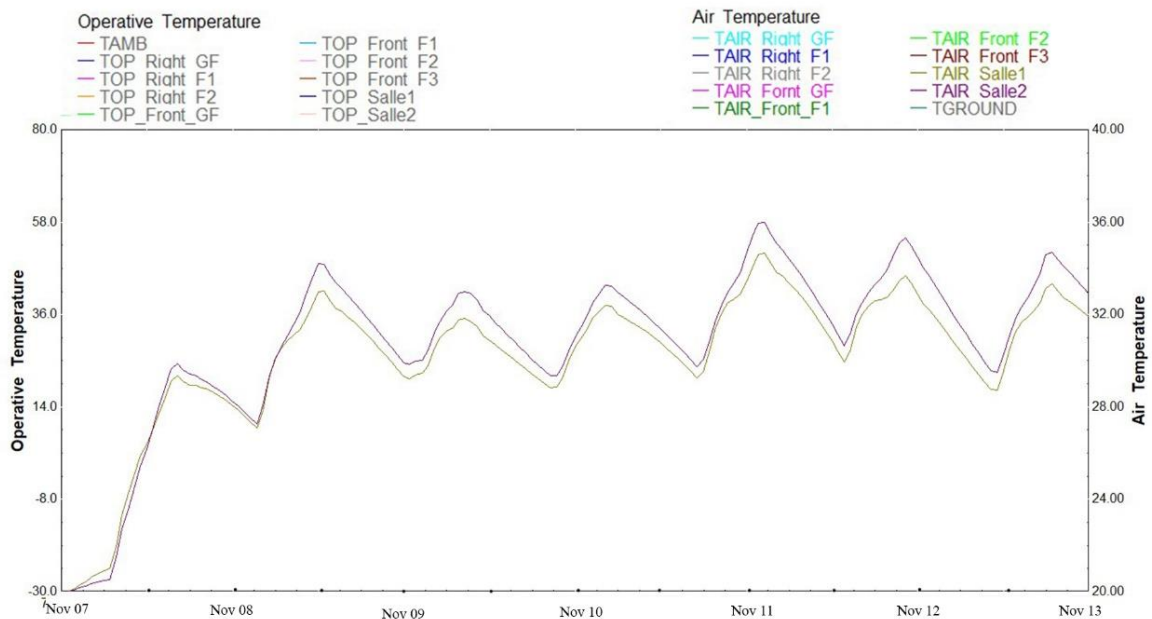


Figure 35 : La température de l'air dans les 2 zones de grand salle de 07 à 14 novembre

Même si nos questions de recherche ne portaient pas sur l'énergie solaire, notre objectif est de pouvoir aider à réduire la consommation d'énergie dans le bâtiment. Par conséquent, l'utilisation de l'énergie solaire devrait être une des considérations. Comme la simulation TRNSYS donne également le résultat du rayonnement solaire incident total sur le toit du bâtiment, nous l'incluons ici pour donner une idée de la quantité d'énergie que nous pourrions gagner en utilisant l'énergie solaire.

Comme indiqué sur la figure 36, le rayonnement solaire total que nous pouvons obtenir dans la toiture de ce bâtiment en un an est 1680kWh/m². Cependant, selon PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, à la production d'énergie du panneau solaire, il y a une perte d'énergie de 25,62%. Donc, l'énergie solaire totale que nous pouvons obtenir est de 1250kWh/m². La surface disponible dans la toiture pour accueillant les panneaux solaires est de 1100m². Donc, en utilisant l'énergie solaire par les panneaux photovoltaïques, nous pouvons gagner 137500kWh de l'énergie par an.

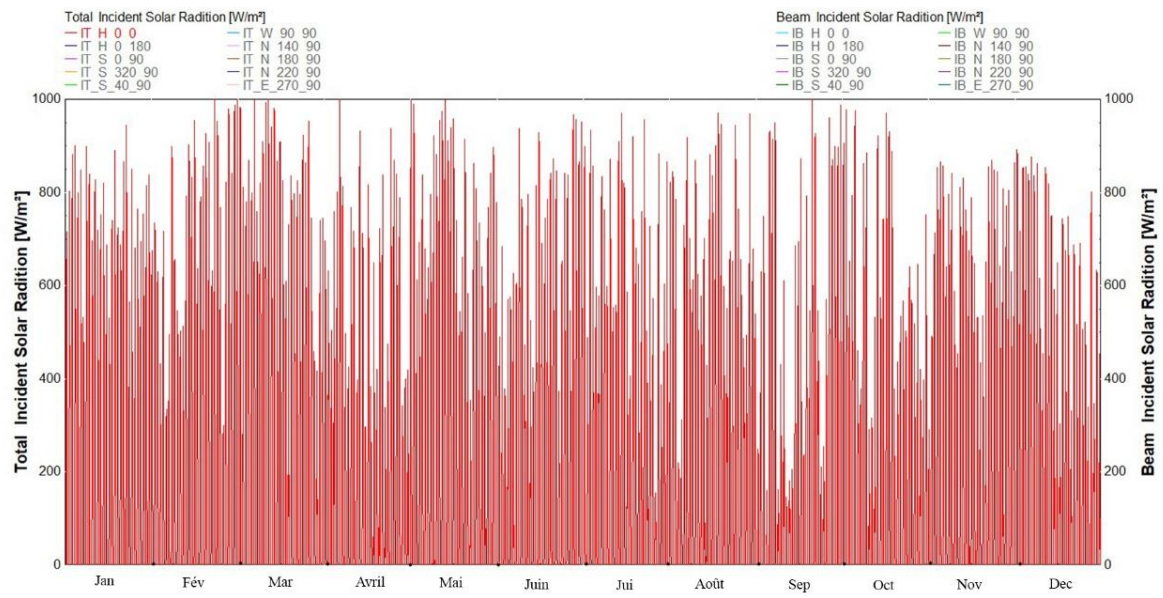


Figure 36 : L'incident total du rayonnement solaire par an

CHAPITRE 6 : DISCUSSION

Dans cette partie nous discuterons les résultats que nous avons obtenus et répondons à notre question de recherche. Pour bien répondre à nos différentes questions de recherche, nous divisons ce chapitre en 3 parties qui consistent tout :

- Evaluation générale du confort thermique du bâtiment soit la réponse à la première partie de notre question de recherche, afin de savoir si le bâtiment est trop chaud ou trop froid par rapport à la norme ASHRAE et à la satisfaction des occupants
- Source de l'inconfort dans un bâtiment soit les paramètres qui amènent l'inconfort thermique dans un bâtiment, afin de trouver les solutions pertinentes
- Le développement durable comme moyen d'assurer le confort thermique soit différentes conceptions durables pouvant résoudre le problème de confort thermique avec quelques cas d'étude dans des régions au climat similaire

1. Evaluation du confort thermique du bâtiment

Dans cette partie, nous évaluerons le confort thermique dans notre bâtiment d'étude en analysant les résultats que nous avons obtenus dans les sections Mesure, Simulation et Enquête en ligne et nous les comparerons au standard de confort thermique déterminé par l'ASHRAE. Nous analysons 6 paramètres affectant le confort thermique qui sont la température de l'air, l'humidité relative, la température rayonnante, la vitesse de l'air, le taux métabolique et l'habillement.

Nous allons d'abord analyser les paramètres environnementaux. Parmi les 4 paramètres environnementaux, nous avons mesuré seulement 2 paramètres qui sont la température de l'air et l'humidité relative. Nous discuterons donc sur ces 2 paramètres et sur les relations des 2 autres paramètres sur ces deux-ci. Pour pouvoir comparer notre résultat à la norme de confort équivalente à nos conditions, nous devons déterminer la valeur de celle-ci pour notre espace spécifique. Selon ASHRAE (2017), il existe 3 méthodes différentes qui peuvent être utilisées pour déterminer l'environnement thermique acceptable dans un espace occupé. Elles incluent la vitesse moyenne de l'air, l'humidité relative, l'activité métabolique (met) et l'habillement (clo).

Comme notre bâtiment est un bâtiment éducatif, l'activité des occupants consiste principalement à s'asseoir, à lire, à écrire ou à taper pour un taux métabolique compris entre 1,0 et 1,3 met. Pour l'habillement comme le résultat de notre enquête (figure 37), les occupants portent

normalement une chemise, un t-shirt, un jean ou un pantalon, ce qui donne une valeur d'habillement entre 0,5 et 1,0 clo.

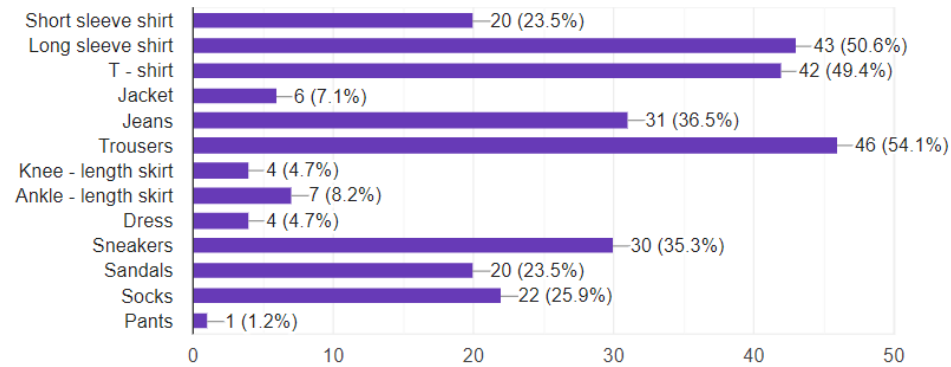


Figure 37: Les vêtements que les occupants portent normalement

Puisqu'il n'y a pas une vitesse d'air élevée, nous supposons que la vitesse de l'air est $<0,2 \text{ m/s}$ (Afroz, Urmee, Shafiullah, & Higgins, 2019). Par conséquent, nous pouvons utiliser la méthode de la zone de confort graphique pour montrer l'environnement de confort (figure 38).

Average Air Speed, m/s (fpm)	Humidity Ratio	Met	Clo	Comfort Zone Method
<0.20 (40)	$<0.012 \text{ kg-H}_2\text{O/kg dry air}$	1.0 to 1.3	0.5 to 1.0	Section 5.3.1, "Graphic Comfort Zone Method"
<0.20 (40)	All	1.0 to 2.0	0 to 1.5	Section 5.3.2, "Analytical Comfort Zone Method"
>0.20 (40)	All	1.0 to 2.0	0 to 1.5	Section 5.3.3, "Elevated Air Speed Comfort Zone Method"

Figure 38 : Applicabilité des méthodes de détermination des environnements thermiques acceptables dans les espaces occupés (ASHRAE-55, 2017)

La figure 39 présente l'environnement de confort acceptable par la méthode graphique de la zone de confort. Il montre deux zones de conditions confortables. Une pour l'été avec l'habillement de 0,5 clo et l'hiver avec 1,0 clo. D'après nos résultats de mesure, la moyenne d'humidité relative dans le bâtiment est d'environ 60%. Par conséquent, selon le graphique, la température de fonctionnement acceptable pour le confort thermique est comprise entre 23,5 et 25,2 °C (figure 39). Selon ESTNO (2020) avec une vitesse de l'air $<0,2 \text{ m/s}$ et une différence entre température de l'air et température de surface ne dépassant pas 10 °C, la température de fonctionnement peut être considéré équivalent à la température de l'air. Par conséquent, la température de l'air de confort dans le bâtiment d'étude de cas se situe entre 23,5 et 25,2 °C.

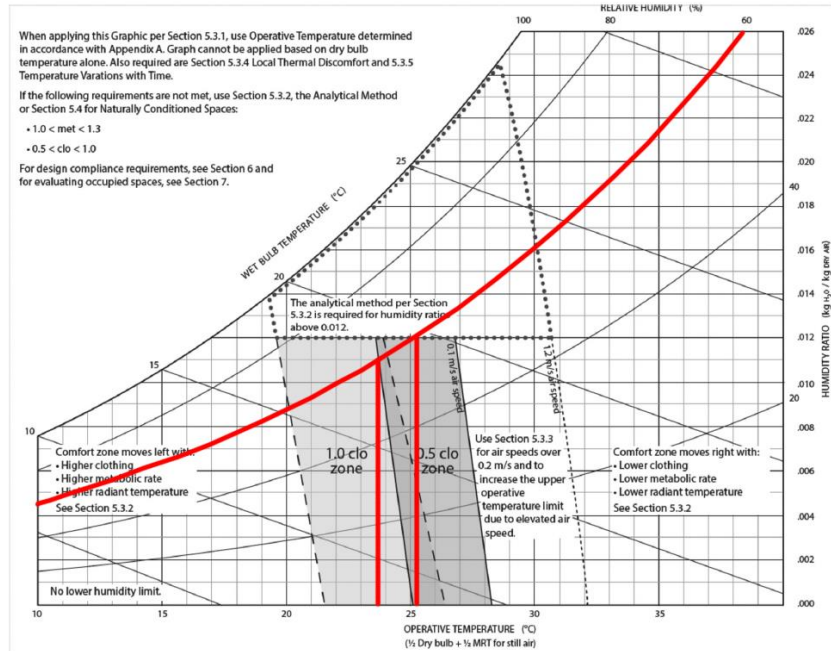


Figure 39 : Température standard pour le confort thermique dans bâtiments F

Comme nous avons fait la mesure seulement sur 5 zones, les évaluations des autres zones doivent dépendre du résultat de la simulation TRNSYS. Afin de voir si le résultat de la simulation TRNSYS est suffisamment précis, nous comparerons ensuite le résultat de la mesure dans la zone Front_GF (salle 105F), Front_F1 (salle 208F), Front_F2 (salle 307F) et Right_R2 (salle 309F) avec celui de la simulation TRNSYS. Nous comparons les résultats de la température maximale et minimale pendant 5 jours, soit le 10 février 2020, le 21 février 2020, le 28 février 2020, le 06 mars 2020 et le 16 mars 2020. Comme les données météorologiques que nous utilisons pour la simulation sont la province de Kampot, nous comparerons ensuite le maximum et la température minimale sur ces 5 jours entre Phnom Penh et Kampot enregistrée par AccuWeather.

Date	Max Temp à Phnom Penh (°C)	Max Temp à Kampot (°C)	Min Temp à Phnom Penh (°C)	Min Temp à Kampot (°C)
10 th Février, 2020	32	31	24	26
21 th Février, 2020	34	34	24	26

28 th Février, 2020	34	33	25	27
06 th Mars, 2020	33	32	24	26
16 th Mars, 2020	36	35	27	27

Table 3 : Comparaison de température entre Phnom Penh et Kampot

Les données du tableau ci-dessus montrent que la température à Phnom Penh est supérieure à Kampot de 1 à 2 (°C). Maintenant, nous comparerons le résultat à la même date dans la zone 4 que nous mentionnons ci-dessus.

Date	Max Temp de mesure (°C)	Max Temp de simulation (°C)	Min Temp de mesure (°C)	Min Temp simulation (°C)
10 th Février, 2020	31.0	29.5	29.5	27.3
21 th Février, 2020	32.5	30.8	30.5	28.3
28 th Février, 2020	32.5	30.5	31.0	27.9
06 th Mars, 2020	32.5	30.1	30.5	27.9
16 th Mars, 2020	34.0	31.0	32.0	28.7

Table 4: Comparaison de température de mesure et de simulation de la zone Front_GF

Date	Max Temp de mesure (°C)	Max Temp de simulation (°C)	Min Temp de mesure (°C)	Min Temp simulation (°C)
10 th Février, 2020	29.5	28.5	29.3	28.5
21 th Février, 2020	29.0	31.3	28.5	30.1

28 th Février, 2020	29.5	30.9	29.0	29.7
06 th Mars, 2020	29.5	30.7	30.5	29.7
16 th Mars, 2020	30.5	30.0	32.0	30.0

Table 5 : Comparaison de température de mesure et de simulation de la zone Front_F1

Date	Max Temp de mesure (°C)	Max Temp de simulation (°C)	Min Temp de mesure (°C)	Min Temp simulation (°C)
10 th Février, 2020	31.0	30.0	29.5	28.4
21 th Février, 2020	31.0	32.2	28.5	30.6
28 th Février, 2020	31.5	32.0	28.5	30.0
06 th Mars, 2020	31.5	30.1	29.0	29.9
16 th Mars, 2020	34.0	32.9	31.5	31.1

Table 6: Comparaison de température de mesure et de simulation de la zone Front_F2

Date	Max Temp de mesure (°C)	Max Temp de simulation (°C)	Min Temp de mesure (°C)	Min Temp simulation (°C)
10 th Février, 2020	32.0	29.5	31.0	28.9
21 th Février, 2020	33.5	32.9	32.0	30.0
28 th Février, 2020	34.0	32.9	32.5	29.2
06 th Mars, 2020	33.0	32.4	32.0	29.2

16 th Mars, 2020	35.0	33.3	33.5	30.4
-----------------------------	------	------	------	------

Table 7 : Comparaison de température de mesure et de simulation de la zone Right_F2

Les 4 tableau ci-dessus montre que la température maximale et minimale entre la mesure et la simulation dans chaque zone est supérieure de 1 à 3 °C, ce qui correspond à la différence de température entre Phnom Penh et Kampot (tableau 3). Cependant, si nous regardons en comparaison heure par heure le résultat de la mesure et de la simulation en **annexe 5**, nous pouvons voir que la température maximale se produisant dans la mesure n'est pas en même temps que la simulation. Il est normal de considérer que les données météorologiques entrées pour la simulation soient différentes des données météorologiques pendant la mesure. De plus, le rayonnement solaire et la couverture nuageuse qui est une erreur inévitable ont également un impact sur les deux résultats. Pour certaines zones telles que la zone Right_F2, la température est plus élevée que les autres zones (en comparant entre simulation et mesure) car cette zone est équipée de nombreux ordinateurs pour les étudiants. Par conséquent, la chaleur de l'ordinateur peut augmenter la température de cette pièce, car dans la simulation, la chaleur des équipements de bureau tels que l'ordinateur n'est pas prise en compte. De plus, certaines zones (zone Front_F1) utilisent également un climatiseur pendant la journée, ce qui peut affecter les résultats de mesure.

Même si les deux résultats ont une petite différence par rapport à l'autre et différents facteurs qui pourraient affecter le résultat prennent également en compte, mais pour voir la fiabilité de notre modèle, nous calculerons le coefficient de corrélation (R) et le 'mean square error' (MSE) entre le résultat de la mesure et la simulation dans les 4 zones pendant la période de mesure.

	Front_GF	Front_F1	Front_F2	Right_F2
Coefficient de corrélation (R)	0.52	0.66	0.55	0.51
MSE	4.89	1.92	4.05	5.14

Table 8 : Coefficient de corrélation entre le résultat de mesure et de simulation

La valeur du coefficient de corrélation des deux résultats dans le tableau 8 montre que la relation entre les deux données est encore faible. Cependant, le nombre est supérieur à 0,5, ce qui signifie que la fiabilité de notre modèle est supérieure de 50%. De plus, le mean square error montre également que la différence de température est comprise entre 2 et 5 °C. Néanmoins, pour avoir un

résultat plus précis de la simulation, un modèle d'étalonnage doit être fait. En raison de la limite de temps, nous ne pouvons pas faire l'étalonnage du modèle. Cependant, dans notre discussion pour évaluer les performances du bâtiment, nous prendrons en compte que notre modèle n'est pas calibré.

Voici la comparaison entre le résultat que nous avons obtenu lors de la mesure et de la simulation et la valeur standard qu'on a obtenue (figure 39) pour les deux paramètres étudiés la température de l'air et l'humidité relative.

<i>Zone Paramètre</i>	Mesure	Simulation	Température de l'air pour un confort Standard (°C)
Right_GF			
<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	-	28.8	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	-	-	50 - 60
Right_F1			
<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	-	29.7	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	-	-	50-60
Right_F2			
<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	32.52	30.4	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	53.57	-	50-60
Front_GF			
<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	31.39	28.8	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	54.93	-	50-60
Front_F1			
<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	29.33	29.5	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	50.61	-	50-60
Front_F2			

<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	30.78	30.6	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	47.04	-	50-60
Front_F3			
<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	-	30.7	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	-	-	50-60
Salle1			
<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	-	32.3	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	-	-	50-60
Salle2			
<i>Température Moyenne de l'air (°C)</i>	-	34.6	23.5 - 25.2
<i>Humidité relative moyenne (%)</i>	-	-	50-60

Table 9 : La température de l'air et l'humidité relative entre la mesure, la simulation TRNSYS et le standard confort du bâtiment étudié

Les résultats de mesure et de simulation que nous obtenons montrent une très haute température de l'air par rapport à la norme définie, avec une hausse de 3 – 9 °C qui se produit principalement pendant le midi et l'après-midi.

Comme prévu, la zone salle1 et salle2 qui sont le grand hall présentent la température la plus élevée par rapport aux autres zones. Elles sont en effet recouvertes d'une surface vitrée et orientées à l'ouest. La zone Right_F2 et Front_F3 montrent une température de l'air élevée par rapport à la zone située en dessous. Cela semble logique car ces zones se situent au sommet du bâtiment. Le gain de chaleur dans ces zones est plus élevé que dans les autres zones car le toit reçoit un rayonnement solaire direct. Cependant, même les zones situées à l'étage inférieur et orientées vers le nord - (Right_GF, Right_F1 et Right_F2) ont toujours une température de l'air trop élevée. En revanche, l'humidité relative dans chaque zone est de l'ordre du confort standard.

Comme mentionné, la mesure a eu lieu en février, qui est une période de températures élevée pendant la saison sèche. Par conséquent, pour avoir une meilleure évaluation des performances de ce bâtiment en différent temps de l'année, nous comparerons les résultats de la simulation TRNSYS d'un autre mois à basse température. La figure 5 du chapitre état de l'art montre que Phnom Penh

a une température plus basse en novembre. Vous trouverez ci-dessous le tableau de comparaison de la température de l'air moyen de TRNSYS au confort standard au cours de novembre.

Zone	Température de l'air en Novembre (°C)	Température de l'air pour un confort Standard (°C)
Right_GF	28.6	23.5 - 25.2
Right_F1	29.1	23.5 - 25.2
Right_F2	29.2	23.5 - 25.2
Front_GF	28.8	23.5 - 25.2
Front_F1	28.7	23.5 - 25.2
Front_F2	29.1	23.5 - 25.2
Front_F3	29.2	23.5 - 25.2
Salle1	30.6	23.5 - 25.2
Salle2	31.0	23.5 - 25.2

Table 10: La température de l'air entre novembre dans bâtiments F avec le standard du confort

Comme nous pouvons le voir dans ce tableau, même pendant le mois à basse température, le bâtiment a toujours une température trop élevée par rapport au confort standard avec une hausse moyenne de 3 - 5 (°C). Pendant ce mois, l'humidité est encore plus élevée que pour le mois de février ce qui peut amener les occupants à se sentir encore moins bien.

En complément, pour évaluer précisément la performance thermique de ce bâtiment, nous calculerons le pourcentage de surchauffe survenant pendant la période de mesure et en novembre. La température de confort que nous avons trouvée dans la figure 39 maximum est de 25,2 °C. Cependant, comme mentionné dans la **section 2.2**, les personnes vivant dans une région à climat chaud peuvent s'adapter à la température jusqu'à 28.5 °C (Busch, 1990). Le tableau ci-dessous présente le risque de surchauffe en pourcentage lorsque la température de l'air dans la pièce dépasse 28.5 °C. On constate que le pourcentage de risque de surchauffe est très élevé même lorsque la limite de température est 3 °C supérieure au standard de confort pendant le temps de mesure.

	Mois de mesure (%)	Novembre (%)
Right_GF	61.64	37.82
Right_F1	90.34	52.70
Right_F2	88.13	48.36
Front_GF	65.19	28.69
Front_F1	87.51	34.10
Front_F2	86.97	49.95
Front_F3	88.75	47.65
Salle1	94.77	55.71
Salle2	95.30	54.73

Table 11: Le pourcentage de surchauffe dans bâtiment pendant la durée de mesure et en novembre

L'ensemble de ces résultats montre que la température de l'air est trop élevée pendant la journée mais pas tellement pendant la soirée lorsque la température extérieure baisse et comme montre dans le tableau 11, le bâtiment n'est pas 100% du temps en surchauffe, donc le pourcentage de non surchauffe peut se produire pendant cette période de la journée. Et en tant que bâtiment éducatif, ce bâtiment est également occupé pendant la soirée de 17h00 à 20h00. Par conséquent, nous comparerons également le résultat de la température d'une semaine de février et d'une semaine de novembre dans la période de 17h00 à 20h00. Le tableau de comparaison suivant montre que les températures moyenne pendant cette période aussi ne sont pas dans l'intervalle de valeurs standard de confort. Dans 7 zones (sauf la zone salle1 et salle 2), la température est supérieure à norme de seulement 1 ou 2 °C. On peut dire qu'il est sensiblement acceptable.

Zone	Température de l'air en Février (°C)	Température de l'air en Novembre (°C)	Température de l'air en Standard (°C)
Right_GF	28.6	27	23.5 - 25.2
Right_F1	28.8	27.4	23.5 - 25.2
Right_F2	29.6	28.7	23.5 - 25.2
Front_GF	29.8	27.6	23.5 - 25.2
Front_F1	29.1	27.5	23.5 - 25.2
Front_F2	29.2	28	23.5 - 25.2
Front_F3	29.6	28.8	23.5 - 25.2
Salle1	31.8	30.1	23.5 - 25.2
Salle2	33.9	31	23.5 - 25.2

Table 12 : : La température de l'air pendant 17h00 à 20h00 entre février et novembre dans bâtiments F avec le standard du confort

Les résultats et la discussion ci-dessus montrent que le bâtiment souffre d'inconfort thermique (température chaude) pendant la journée et qu'il présente un confort thermique acceptable pendant la soirée. ASHRAE a créé un tableau pour identifier une température de fonctionnement intérieure admissible en fonction de la température extérieure. Avec une température extérieure moyenne de 30 ° C en février et une acceptabilité de 80%, la température opérationnelle intérieure autorisée est de 31 ° C (figure 40 et 41). Le résultat de la température de fonctionnement de la simulation Trnsys montre que 7 des 9 zones étudiées, à l'exception des zones salle1 et salle2 ont une température de fonctionnement moyenne de 31.5 °C qui est sensiblement

acceptable. La température de fonctionnement dans la zone salle1 et salle2 est quant à elle inacceptable.

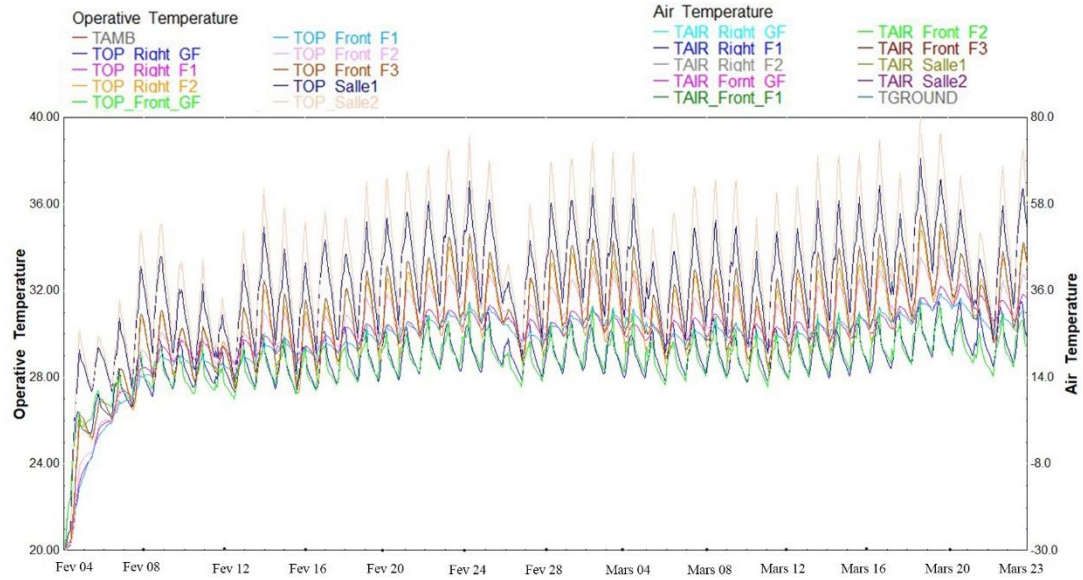


Figure 40 : Température de fonctionnement dans les 9 zones du bâtiment étudié par simulation TRNSYS

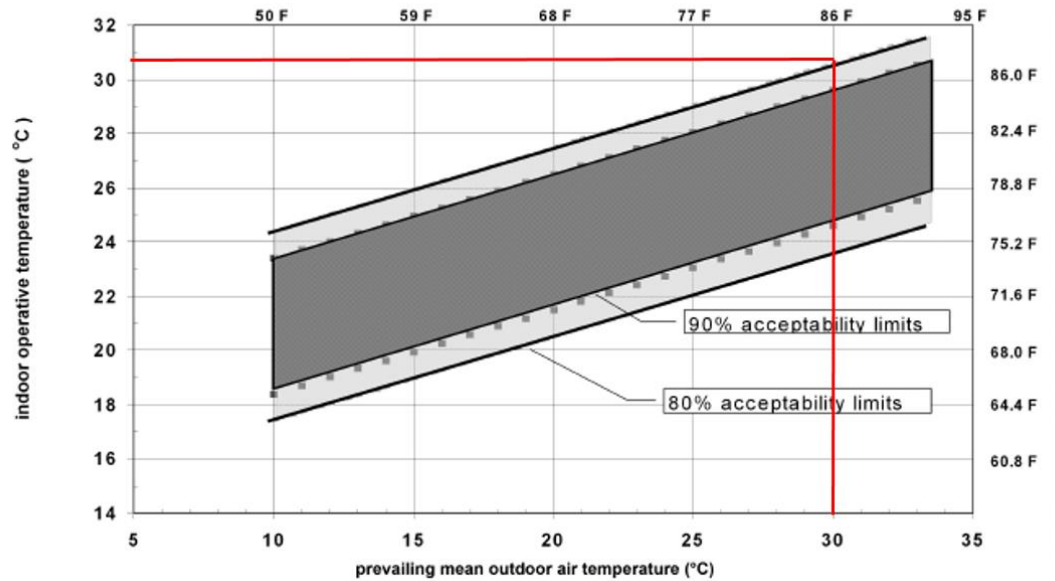


Figure 41 : Plages de températures de fonctionnement acceptables pour les espaces naturellement conditionnés.

Les analyses sur les deux paramètres environnementaux montrent que le bâtiment est inconfortable pendant la journée et inconfortable mais acceptable pendant la soirée dans lors que

la température extérieure est maximum et minimum. Cependant, comme les occupants s'adaptent au climat chaud depuis leur naissance, leur tolérance permet une température un peu plus élevée que la norme de confort prescrite (Cateno, Kalz, Lomardo, & Rosa, 2017). Pour tenir compte de ce facteur, nous analysons ensuite les résultats de satisfaction que nous avons reçus de notre enquête. D'après les résultats de notre enquête, nous constatons que 72,46% des occupants sont insatisfaits, 14,1% sont neutres et 13,1% sont satisfaits de l'environnement thermique de ce bâtiment (figure 42). Dans cet état d'insatisfaction 38.7% disent que le bâtiment est trop chaud.

Nous constatons que le pourcentage de satisfaction des occupants restant normalement dans le bâtiment en soirée et des occupants se trouvant au dernier étage est de 55%. Nous tirons ce chiffre de mesure et de la simulation. Cependant, le résultat de la simulation TRNSYS montre que la température de la zone du dernier étage est plus élevée que celle du rez-de-chaussée et du premier étage, ce qui contraste avec le résultat de la satisfaction des occupants (figure 44). Comme le paramètre physique que nous analysons ne concerne que la température de l'air et l'humidité relative, nous pouvons supposer que cette satisfaction provient probablement de l'effet de la vitesse de l'air. Comme la zone est localisée plus haut, l'accès du flux d'air dans le bâtiment est plus facile et plus fort. Néanmoins, la mesure de ce paramètre doit être effectuée afin de valider l'hypothèse que nous mentionnons.

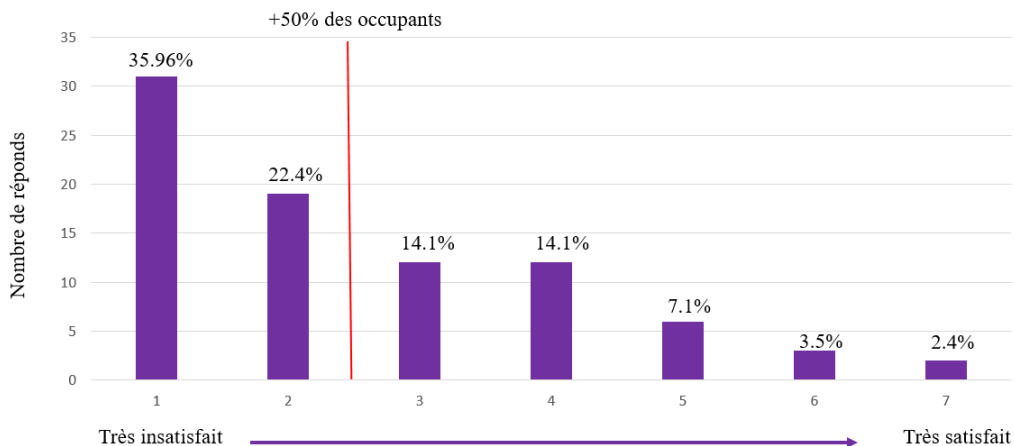


Figure 42 : La satisfaction des occupants globale

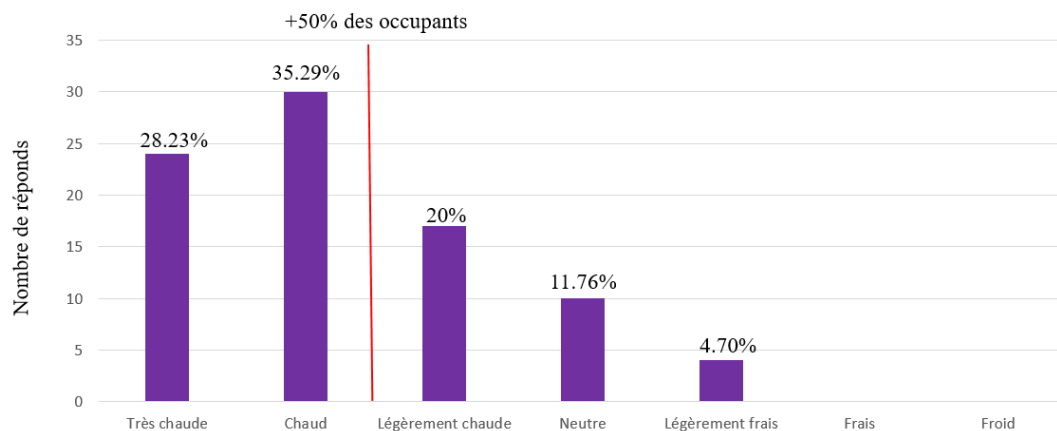


Figure 43 : La sensation thermal des occupants globale

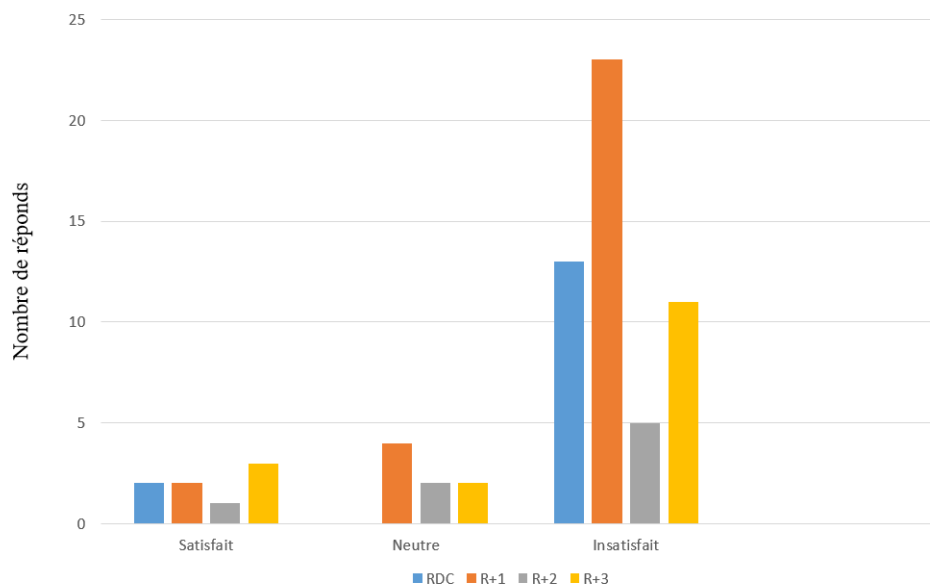


Figure 44 : Les satisfaction des occupants par rapport à l'étage

Nous discutons maintenant sur le dernier paramètre environnemental qui affecte le confort thermique. Le résultat de l'enquête en ligne montre que sur 43 occupants assis près de cette fenêtre 31 d'entre eux sont insatisfaits 6 d'entre eux sont neutres et 5 d'entre eux sont satisfaits (figure 45). Pour 41 occupants assis au milieu de la pièce 29 d'entre eux sont mécontents, 6 d'entre eux sont neutres et 6 se sentent satisfaits (figure 46). Comme mentionné dans la section **3.1.2**, normalement, la personne assise près du mur ou de la fenêtre peut avoir plus chaud ou plus froid que les personnes assises au milieu de la pièce en fonction de la température plus basse ou plus élevée du mur ou de la fenêtre. Dans notre cas, comme montre sur le résultat (figure 45 et 46), l'occupant assis près de la

fenêtre ou du mur a la même satisfaction et la même sensation thermique que les autres. Cela peut conclure que le rayonnement thermique de notre zone d'étude n'a pas d'effet majeur sur la sensation thermique de l'occupant. Nous pouvons supposer que le rayonnement de température dans cette zone est aussi élevé que la température de l'air et n'appartient pas non plus à la norme de confort. Néanmoins, tout comme la vitesse de l'air, ce paramètre doit être mesuré afin de déterminer avec précision si les hypothèses que nous mentionnons sont correctes.

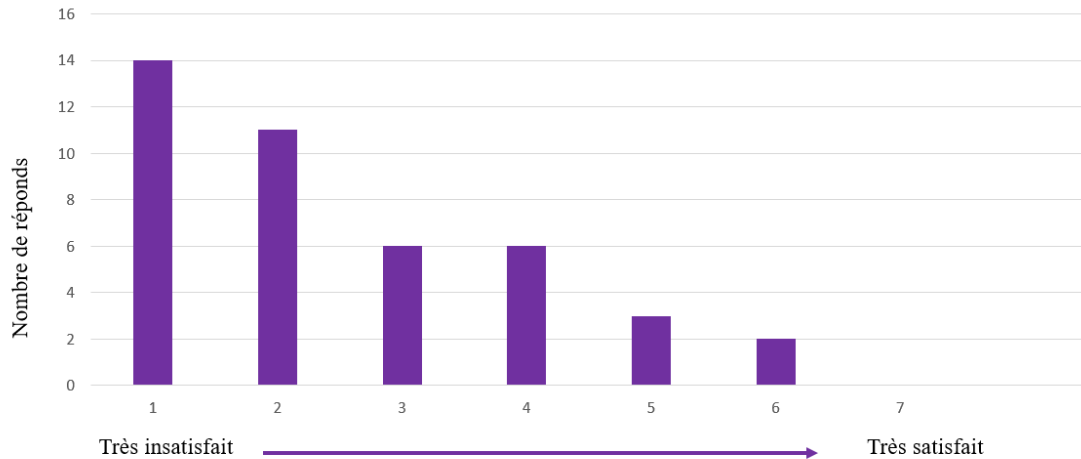


Figure 45 : Les satisfaction des occupants s'assissent près de fenêtre ou mur

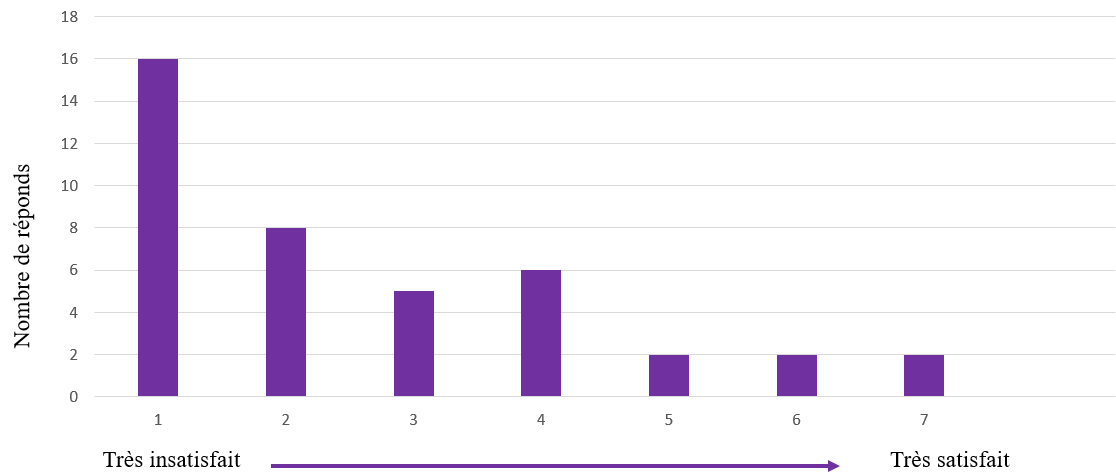


Figure 46 : Les satisfaction des occupants s'assissent au centre de pièce

2. Source de l'inconfort thermique dans un bâtiment

Pour commencer, nous voulons présenter une hypothèse tirée de nos résultats d'enquête. Nous proposons 9 sources d'inconfort aux répondants: humidité, circulation de l'air, soleil entrant,

chaleur générer par l'équipement de bureau, politique vestimentaire, système de chauffage / refroidissement ne répondant pas assez rapidement, surfaces environnantes chaudes / froides (sol, plafond, murs ou fenêtres), fenêtre déficiente (non utilisable), environnement extérieur. En plus de ces propositions, certains ont également mentionnés d'autres sources, comme la technique de construction. Le résultat est affiché comme dans le graphique ci-dessous. Nous discuterons plus tard des sources se rapportant au problème de la conception architecturale comme le rayonnement solaire, le mouvement de l'air, la technique de construction et la politique vestimentaire.

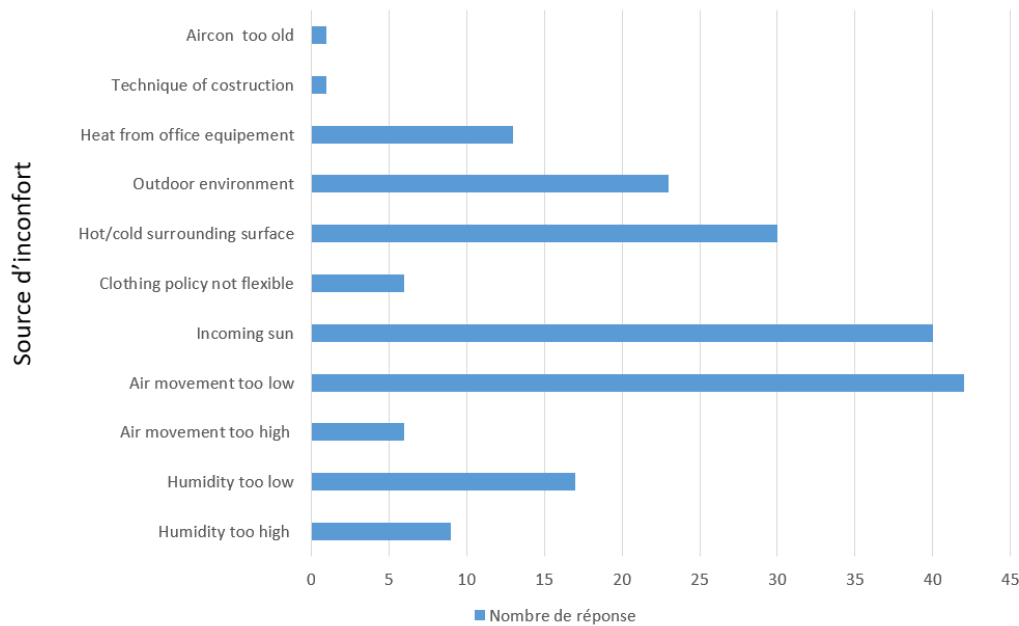


Figure 47 : Les sources de l'inconfort thermique selon les occupants

D'après l'avis des occupants, l'environnement extérieur joue un rôle important comme source d'inconfort. Bien sûr, l'environnement extérieur affecte le confort thermique à l'intérieur du bâtiment. Surtout pour les pays tropicaux, presque tous les bâtiments devraient être chaud car ils sont affectés par le temps chaud et humide. Cependant, à côté du facteur de l'environnement extérieur que nous ne pouvons pas changer, il existe d'autres facteurs qui provoquent cet inconfort pouvant être modifié par le concepteur, comme l'orientation du bâtiment, la hauteur des espaces, la surface de vitrage, le choix des matériaux...

2.1 Orientation du bâtiment

Il existe différents éléments de conception qui peuvent affecter le confort thermique à l'intérieur du bâtiment tels que l'orientation du bâtiment, le type d'enveloppe du bâtiment, la position ou la conception des fenêtres, la hauteur de l'espace, ... Pour notre bâtiment d'étude, les deux ailes

sont orientées entre le sud et le nord et la partie centrale est orientée vers ouest. Nous pouvons clairement voir que le bâtiment est situé le long de la trajectoire du soleil, ce qui signifie qu'une grande partie de la façade reçoit directement le rayonnement solaire depuis le lever du soleil jusqu'au coucher du soleil. Comme montre sur la (figure 48) la façade de l'est et l'ouest ont un rayonnement solaire beaucoup plus élevé que celle du nord.

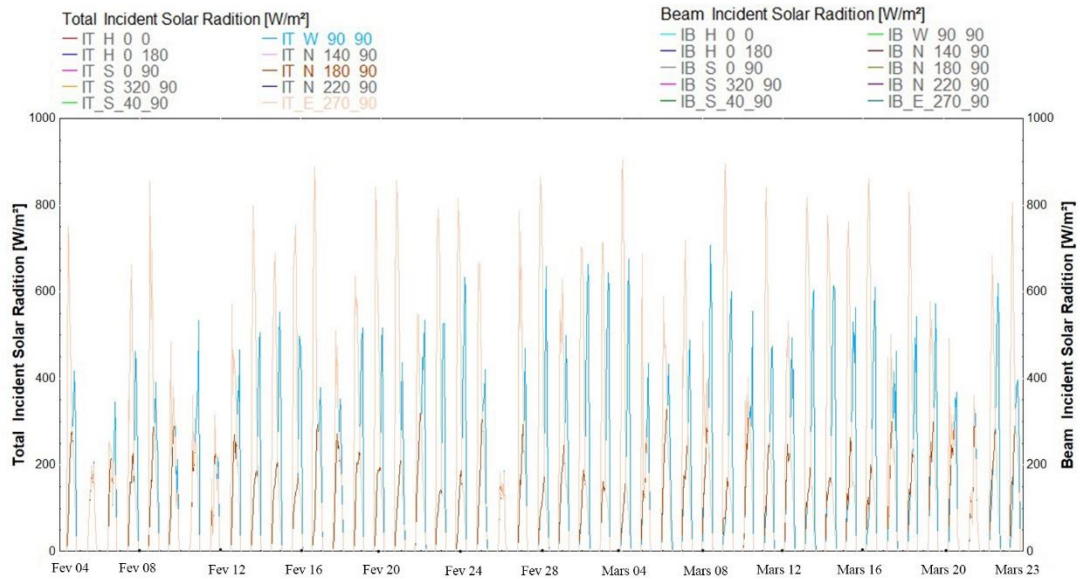


Figure 48: Le rayonnement solaire sur les façade nord, est et ouest

D'après le résultat (tableau 8 ,9 et 10, page 63 à 67), nous pouvons voir que les zones situées sur l'aile droite du bâtiment (Right_GF, Right_F1 et Right_F2) ont toujours une température légèrement plus basse que les zones situées au milieu. De plus, la grande partie du bâtiment est également située contraire de la direction du vent, qui est sud et nord-est, ce qui permet à un très faible pourcentage de ventilation naturelle de pénétrer dans le bâtiment, comme le montre dans la figure 49.



Figure 49 : Direction de vente sur le bâtiment d'étude

Les fenêtres peuvent apporter un flux d'air dans le bâtiment mais c'est également un point faible dans l'enveloppe permettant au rayonnement solaire de chauffer l'espace. C'est pourquoi la conception de la fenêtre (la taille de la fenêtre, sa position et le matériau utilisé) est très importante. Dans notre cas d'étude, la construction de toutes les fenêtres sont remplis de vitrage de 6 mm et d'un cadre en aluminium. Toutes les fenêtres du 1er étage au 3ème étage sont des fenêtres latérales roulantes de même dimension de 2,4 m x 1,5 m et positionnées à 0,9 m du sol. Les fenêtres du rez-de-chaussée utilisent également du vitrage et se positionnent à 3 m de haut et à 0,75 m du sol, mais le vitrage ne peut être ouvert qu'à 3 m de haut. Comme l'ouverture de la fenêtre se situe si haut du sol, nous pouvons supposer que les occupants assis dans la pièce ne peuvent pas sentir le flux d'air dans le bâtiment. De plus, la fenêtre ne peut ouvrir que sur la moitié de sa surface totale, ce qui signifie qu'elle peut recevoir tout le rayonnement solaire dans la pièce, mais seulement 50% de la fenêtre peut servir à ventiler la pièce. Comme nous mentionnons que l'orientation laisse seulement une petite quantité de vent entrer dans la pièce, ce type de fenêtre le rend la ventilation encore moins efficace. Tout le surplomb et le couloir servant de dispositif de protection solaire pour le protéger du soleil et de la pluie. Cependant, le haut du porte-à-faux de la fenêtre ne fonctionne pas efficacement en tant que dispositif d'ombrage pour les espace vitrage comme illustrer par une modélisation sketchup à la figure 50.

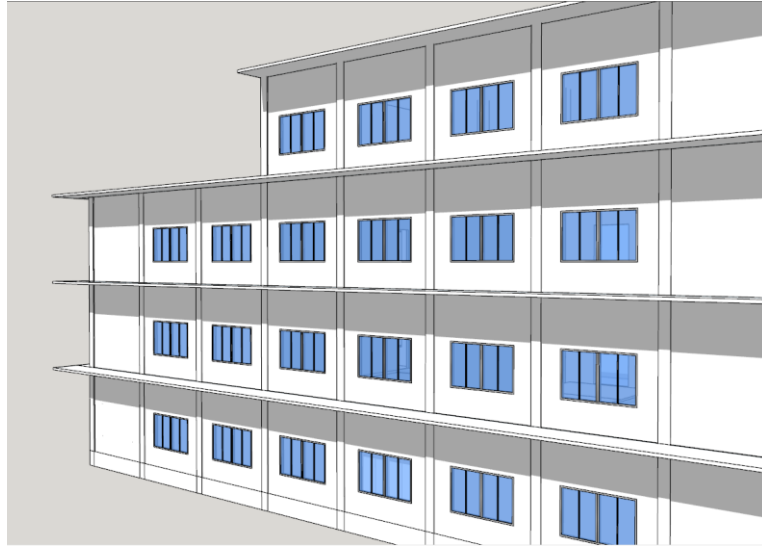


Figure 50 : La protection solaire sur la façade est illustrée par une modélisation sketchup en mars à 10h00

2.2 Choix de matériau pour le bâtiment

Outre la conception du bâtiment, le choix du matériau utilisé, spécialement pour l'enveloppe, est un facteur très important pour le confort thermique car il impact le flux de chaleur, d'humidité et d'air à l'intérieur du bâtiment (Felix & Elsamahy, 2017). Étant donné que les matériaux utilisés dans l'enveloppe et dans la structure du bâtiment ont des propriétés différentes en termes de la couleur, d'épaisseur, de conductivité thermique, de transmission de chaleur, de réflectivité optique et d'inertie thermique, le choix de matériau peut affecter le transfert de chaleur à travers le bâtiment. Le choix est, donc la clé de la conception pour atteindre le confort thermique. Les bâtiments dans les pays froids utilisent principalement des matériaux en bois car ils ont une meilleure résistance thermique qui peut conserver la chaleur dans le bâtiment. Au contraire, la pierre et la brique sont largement utilisées pour la construction dans les régions chaudes car elles ont une forte inertie thermique qui permet garder le bâtiment froid pendant une plus longue période (Stouhi, 2019).

Les matériaux utilisés pour l'enveloppe de notre bâtiment d'étude sont principalement la brique avec enduit et le vitrage. Le toit du bâtiment est un toit plat en béton. Les deux façades orientées à l'ouest et à l'est dans la partie centrale du bâtiment (la grande salle d'étude) sont recouvertes de vitrage. Le choix d'utiliser le vitrage pour l'enveloppe est posé pour gagner autant de lumière naturelle, que possible dans le bâtiment, parce que le confort visuel est également très important pour l'étudiant et aussi pour l'esthétique du bâtiment.

Un facteur important à prendre en compte dans le choix du matériau pour le confort thermique sont ses propriétés thermiques. Elles comprennent:

- La capacité thermique: quantité de chaleur nécessaire pour modifier la température du matériau d'un degré
- La conductivité thermique: vitesse à laquelle la chaleur peut être transférée à travers le matériau

Voici les propriétés thermiques des matériaux utilisés dans notre bâtiment d'étude de cas

Matériau	capacité thermique (kJ/kg K)	conductivité thermique (kJ/hmK)
Bloc de terre cuite creux	1	0.72
Beton armé	1	9
Mortier de ciment	1	3.6
Vitrage	0.84	0.3

Table 13 : Propriétés thermiques des matériaux de construction

Comme nous pouvons le voir dans le tableau ci-dessus, le vitrage a la plus faible capacité thermique. De plus, le vitrage ne laisse pas passer les infrarouges et empêchant le rayonnement solaire de s'échapper de la pièce, ce qui fait monter la température (Lohner, 2017). En conséquence, il semble logique que la zone de simulation TRNSYS 'salle1 et salle2' ait la température la plus élevée de toutes les zones puisque la façade de cette zone est recouverte à 95% de vitrage. Comme cette zone est déjà deux grandes façades vers l'est et l'ouest, elle peut recevoir le rayonnement solaire toute la journée, utiliser du verre pour cette façade n'est pas dès lors du tout un bon choix.

De plus, comme la température du sol n'est que de 27 °C, ces zones situées au rez-de-chaussée devraient avoir une température inférieure à l'étage supérieur, mais comme elles ont plus de surface vitrée que la zone ci-dessus, le résultat montre que les zones situées au rez-de-chaussée ont une température de l'air légèrement plus élevée que la zone supérieure (table 12).

2.3 Politique vestimentaire

L'habillement est l'un des nombreux paramètres influençant sur le confort thermique. Dans un immeuble résidentiel, les occupants peuvent s'habiller librement pour obtenir le confort thermique. Cependant, ce n'est pas le cas pour les bâtiments d'enseignement ou de bureaux. Les occupants doivent en effet s'habiller conformément aux politiques d'uniformes de leur établissement de travail

ou d'études. Au Cambodge, les étudiants doivent s'habiller conformément à l'uniforme scolaire qui leur est fourni par leur politique universitaire. Pour l'Institut de technologie du Cambodge, les étudiants masculins doivent porter un pantalon avec une chemise et les étudiantes doivent porter une jupe en dessous du genou et une chemise. Selon ASHRAE 55, pour une température extérieure au-dessus de 30 ° C des 6h du matin, l'isolation des vêtements doit être à 4,5 clo afin de se sentir en confort. Cependant, la politique vestimentaire autorisée par l'université est comprise entre 0,54 et 0,7 clo, ce qui est supérieur de 1 à 2,5 clo supérieur à la plage acceptable de confort. En plus de cela, le résultat de l'enquête montre que 90% des occupants portant des vêtements respectant la politique de l'université sont insatisfaits. On peut alors conclure qu'à côté de la technique de conception et de construction du bâtiment, la politique vestimentaire est également une source potentielle d'inconfort pour ce bâtiment.

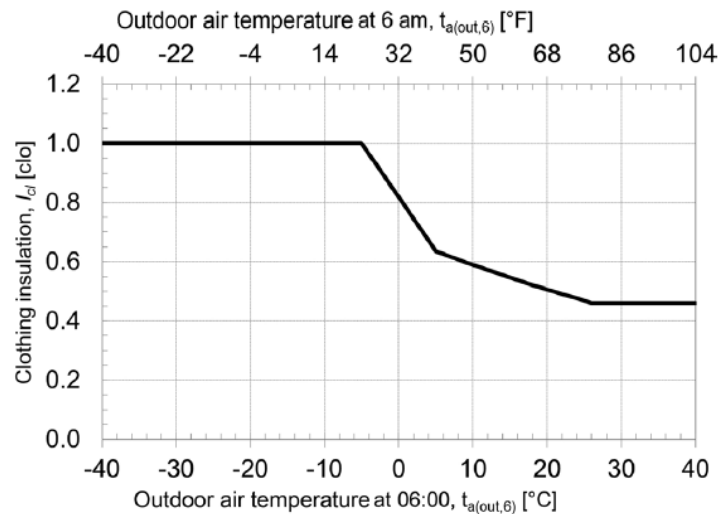


Figure 51 : Habillement représentative en fonction de la température de l'air extérieur à 06h00 (ASHRAE-55, 2017)

Clothing Description	Garments Included ^a	I_{cl} , clo
Trousers	(1) Trousers, short-sleeve shirt	0.57
	(2) Trousers, long-sleeve shirt	0.61
	(3) #2 plus suit jacket	0.96
	(4) #2 plus suit jacket, vest, t-shirt	1.14
	(5) #2 plus long-sleeve sweater, t-shirt	1.01
	(6) #5 plus suit jacket, long underwear bottoms	1.30
Skirts/dresses	(7) Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	0.54
	(8) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	0.67
	(9) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	1.10
	(10) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, suit jacket	1.04
	(11) Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	1.10
Shorts	(12) Walking shorts, short-sleeve shirt	0.36
Overalls/coveralls	(13) Long-sleeve coveralls, t-shirt	0.72
	(14) Overalls, long-sleeve shirt, t-shirt	0.89
	(15) Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	1.37
Athletic	(16) Sweat pants, long-sleeve sweatshirt	0.74
Sleepwear	(17) Long-sleeve pajama tops, long pajama trousers, short 3/4 length robe (slippers, no socks)	0.96

a. All clothing ensembles, except where otherwise indicated in parentheses, include shoes, socks, and briefs or panties. All skirt/dress clothing ensembles include pantyhose and no additional socks.

Figure 52 : Valeurs I_{cl} de l'habillement pour les ensembles typiques (ASHRAE-55, 2017)

3. Approche de conception pour le confort thermique

Dans cette partie, nous discutons des différentes approches de conception qui peuvent aider à résoudre les problèmes de confort thermique. Dans notre enquête, nous interrogeons les occupants sur la solution qu'ils utilisent eux-mêmes pour aider à améliorer l'environnement du bâtiment, ainsi que sur la période pendant laquelle ils l'utilisent principalement et dans quelle mesure ces solutions peuvent les aider à obtenir un état de confort. Le résultat montre que les occupants utilisent des fonctionnalités différentes se combinant comme un ventilateur de plafond avec l'ouverture de la porte et de la fenêtre ou l'utilisation du rideau. La solution la plus utilisée par les occupants est le climatiseur avec près de 60% de réponse (figure 53). Ces fonctionnalités sont le plus souvent utilisées l'après-midi entre 13 et 17 heures (figure 54), c'est-à-dire à l'heure où le bâtiment reçoit le plus de lumière directe du soleil au travers des fenêtres, puisque le bâtiment est orienté vers l'ouest. Cependant, comme notre objectif est de trouver une solution qui puisse réduire la consommation d'énergie et aider l'environnement, la solution la plus utilisée par les occupants (climatiseur) n'est pas une réponse à notre objectif. De plus, ces solutions ne garantissaient tout de même pas un confort total aux occupants (figure 55).

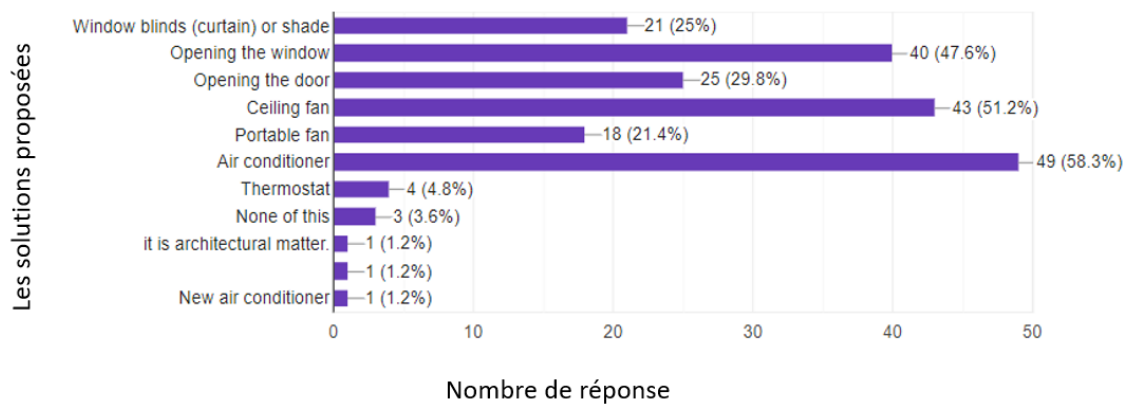


Figure 53 : Solutions utilisées par les occupants

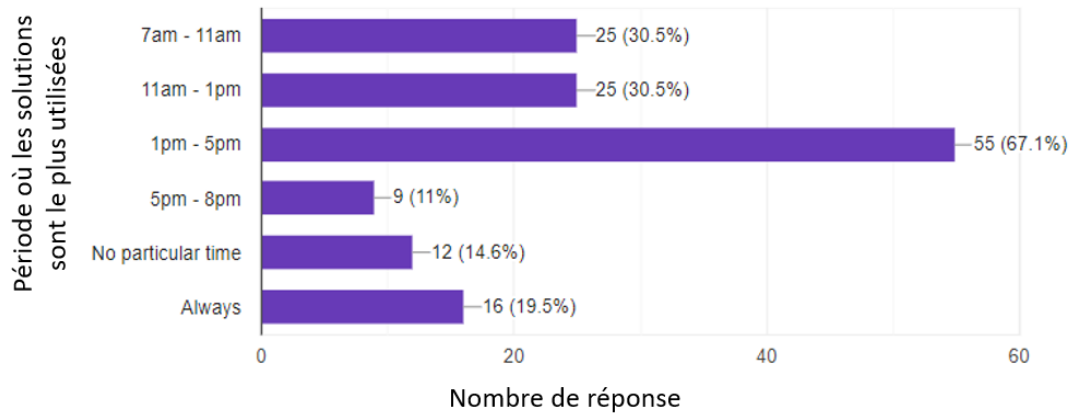


Figure 54 : Période où les solutions sont le plus utilisées

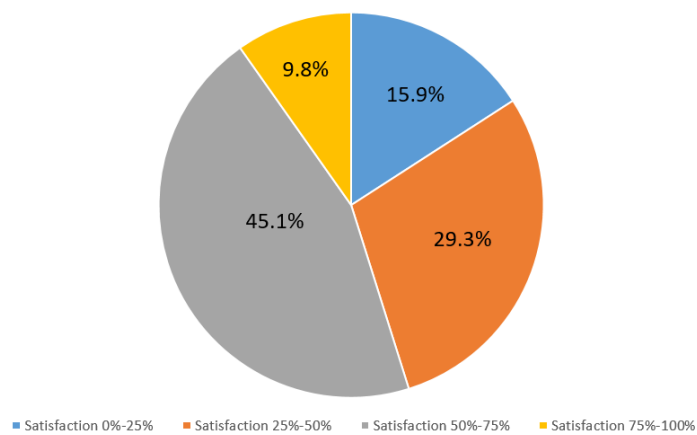


Figure 55 : Pourcentage de satisfaction obtenir après les occupants utilisent des solutions

Diverses études recommandent de nombreuses stratégies de conception pour aider améliorer les performances d'un bâtiment. Dans nos travaux, nous présenterons certaines de ces stratégies qui permettraient d'atteindre notre objectif. Comme l'enveloppe du bâtiment a un impact majeur sur la consommation d'énergie du bâtiment et l'environnement intérieur du bâtiment (Zhang, et al., 2019), notre travail veut se concentrer donc sur la conception de la façade, nous décidons de choisir 3 stratégies couramment utilisées pour le climat de la région tropicale qui sont la façade double peau, façade verte, et le dispositif de protection solaire.

3.1 La façade verte

Dans la section **6.1**, nous avons montré que la température élevée de l'air était l'une des principales raisons de l'inconfort. Par conséquent, une solution pouvant réduire la température tout en améliorant la qualité de l'air à l'intérieur de la pièce est nécessaire. La façade verte est l'une des utilisations les plus courantes dans la conception durable de nos jours. C'est l'une des conceptions les plus efficaces pour réduire le transfert de chaleur afin d'améliorer le confort thermique dans le bâtiment et également de réaliser des économies d'énergie (Zhang, et al., 2019). Selon Growing Green Guide, la façade verdure est une façade "créé en faisant pousser des plantes grimpantes vers le haut et à travers la façade d'un bâtiment, soit à partir de plantes cultivées dans des parterres de jardin à sa base, soit par la plantation de conteneurs installés à différents niveaux dans le bâtiment" (Guide, 2014).

Les plantes peuvent se fixer directement à la surface du bâtiment ou alors sur une structure indépendante du bâtiment. De nombreux types de plantes peuvent être utilisés pour la façade verte comme la vigne trompette bleue, la courge de lierre, la liane mexicaine... Le système connu pour être capable d'améliorer les performances thermiques du bâtiment en réfléchissant et en ne transmettant qu'une petite quantité de rayonnement solaire direct dans le bâtiment. La verdure agit directement comme un dispositif d'ombrage pour protéger le bâtiment contre le rayonnement solaire. Comme les feuilles peuvent absorber une grande partie du rayonnement solaire, elles peuvent donc réduire le gain de chaleur à travers le bâtiment (Sunakorn & Yimprayoon, 2011). En plus que cela, la verdure de la façade peut apporter aux occupants une sensation de détente vue que car les espaces verts sont de moins en moins nombreux en ville ces jours-ci (Castro, 2018).

Voici quelques projets en climat tropical utilisant ce type de façade pour obtenir un meilleur confort thermique et réduire la consommation d'énergie (figure 56, 57 et 58).



Figure 56: Siamese Ratchakru, Thailand, 2014



Figure 57 : Verdant Home, Vietnam



Figure 58 : Institute of technical education Singapore, Singapore

Différentes études ont été menées pour découvrir comment une façade verte peut améliorer efficacement les performances thermiques d'un bâtiment. Une collecte de données dans un bâtiment indonésien utilisant une façade verte montre que l'utilisation de ce système diminue la température intérieure pour rester dans la zone de confort (Widiastuti, Zaini, & Caesarendra, 2020). Cette étude a été réalisée durant 3 jours ensoleillés en décembre, en mesurant la température intérieure du bâtiment à la température extérieure et la différence d'humidité relative entre intérieur et extérieur. Ils utilisent 3 densités de recouvrement de la façade par les plantes, expérience 1 présent couverture de 0%, l'expérience 2 de 50% et l'expérience 3 de 90%. Les données collectées mentionnées ci-dessus sont présentées dans le tableau suivant.

Time	10/12/2013 (experiment 1)		13/12/2013 (experiment 2)		16/12/2013 (experiment 3)	
	T_{in}°	T_o°	T_{in}°	T_o°	T_{in}°	T_o°
6:00	26.5	29.5	24.5	25.0	25.1	23.0
7:00	26.6	29.8	24.7	27.0	24.2	24.0
8:00	26.4	30.5	24.8	30.0	24.3	24.0
9:00	26.4	30.0	25.2	30.0	24.3	24.0
10:00	26.4	29.9	25.6	30.0	24.3	23.0
11:00	26.2	30.5	26.0	30.0	24.3	23.0
12:00	26.2	31.4	26.0	26.0	24.3	24.0
13:00	26.5	32.0	26.0	26.0	24.4	23.0
14:00	26.5	32.8	26.0	26.0	24.7	24.0
15:00	26.5	32.9	26.0	26.0	24.8	24.0
16:00	27.0	33.3	25.8	26.0	24.8	24.0
17:00	26.5	33.3	25.8	26.0	24.8	24.0
18:00	26.5	33.3	25.6	25.0	24.8	24.0
19:00	26.5	33.7	25.6	25.0	24.8	26.0
20:00	27.0	32.8	25.3	25.0	24.8	27.0
21:00	26.5	33.0	25.3	25.0	24.8	27.0
22:00	26.5	32.7	25.3	25.0	24.8	26.0
23:00	26.0	32.4	25.2	23.0	24.8	28.0
00:00	26.0	31.9	25.1	23.5	24.7	28.0
1:00	26.0	31.9	25.1	24.0	24.7	27.0
2:00	26.0	31.4	25.1	23.5	24.8	26.0
3:00	26.0	31.3	24.8	23.0	24.8	26.0
4:00	26.0	30.7	24.8	23.0	24.7	26.0
5:00	26.0	30.3	24.6	24.0	24.7	26.0

Figure 59 : Comparaison de la température intérieure et extérieure en utilisant la façade verte: T_{in} = Température intérieure, T_o = Température extérieure (Widiastuti, Zaini, & Caesarendra, 2020)

Nous pouvons voir qu'à une température extérieure de 33,7 °C, qui est approximativement la température moyenne à Phnom Penh, la température intérieure à l'intérieur du bâtiment utilisant une façade verte reste à 26,5 °C, ce qui est considéré comme une température acceptable pour le confort thermique. De plus, nous pouvons voir que la température intérieure reste constamment dans la plage de la zone de confort, même lorsque la température extérieure varie dans la journée. Alors que la température diminue vers le soir jusqu'à 23 °C, la température intérieure reste à 24-25 °C, ce qui est également l'intérieur de la plage de confort (Widiastuti, Zaini, & Caesarendra, 2020). Cela signifie que la façade verte peut maintenir la température dans le bâtiment pour rester dans le confort (pas trop froid pour le confort standard) même lorsque la température extérieure baisse.

D'autre part comme montre la (figure 60), l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment se situe entre 50 et 70%, avec une valeur supérieure d'environ 5 à 10% à l'humidité relative extérieure. Cela est attendu, car la température de l'air contraste avec l'humidité relative, lorsque la température intérieure diminue l'augmentation relative de l'humidité car l'air plus froid ne nécessite pas

beaucoup de vapeur. Cependant, même lorsque l'humidité relative continue d'augmenter, elle reste entre 50 et 60% soit dans la zone de confort (Widiastuti, Zaini, & Caesarendra, 2020).

Time	10/12/2013 (experiment 1)		13/12/2013 (experiment 2)		16/12/2013 (experiment 3)	
	HR _{in}	HR _o	HR _{in}	HR _o	HR _{in}	HR _o
6:00	65	60	70	62	75	70
7:00	66	63	68	65	70	65
8:00	65	60	68	65	70	65
9:00	67	60	65	65	68	65
10:00	62	57	65	63	68	65
11:00	60	55	63	60	65	64
12:00	60	50	63	60	65	63
13:00	60	50	63	65	65	65
14:00	58	54	63	65	65	66
15:00	58	55	63	65	65	70
16:00	60	60	65	70	70	70
17:00	60	65	65	70	70	72
18:00	65	70	70	73	73	73
19:00	65	65	70	75	75	75
20:00	65	70	73	75	75	75
21:00	70	70	75	75	75	75
22:00	70	70	75	75	80	75
23:00	70	70	75	75	80	75
00:00	73	70	78	72	80	75
1:00	73	70	78	72	80	75
2:00	75	70	78	73	78	75
3:00	75	65	80	75	78	75
4:00	75	65	75	70	75	75
5:00	70	65	75	70	75	70

Figure 60: Comparaison de l'humidité relative intérieure et extérieure en utilisant la façade verte: HR_{in} = Humidité relative intérieur, HR_o = Humidité relative extérieur (Widiastuti, Zaini, & Caesarendra, 2020)

Une autre étude réalisée par Sunakorn et Yimprayoon (2011) pour un modèle de bâtiment en Thaïlande montre également que l'utilisation d'une façade verte peut améliorer les performances thermiques du bâtiment. Cette étude utilise 3 types de plantes (vigne trompette bleue, courge de lierre, liane mexicaine) pour couvrir la façade orientée ouest. Dans la densité de recouvrement de la façade était de près de 90% et il y avait un maximum de 4 à 5 couches de feuillage. Les paramètres pris en compte pour cette étude sont la vitesse et la température de l'air. L'expérience a été réalisée au début de l'été en février et mars 2008. Elle est divisée en deux périodes de 9h00 à 20h30 et de 21h00 à 8h30. Le résultat de leur expérience avec la ventilation naturelle est traduit dans le graphique ci-dessous:

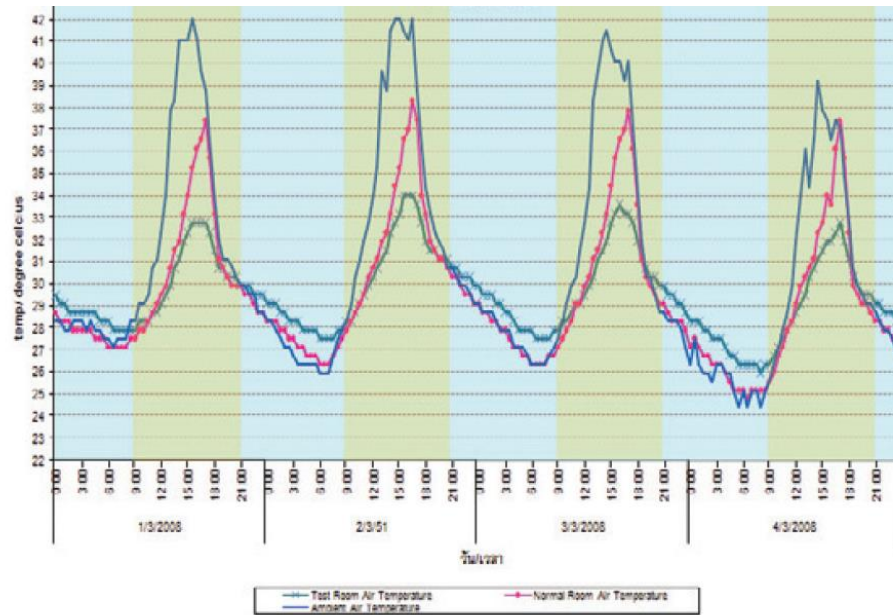


Figure 61 : Résultat de température de l'air entre extérieure, la salle avec façade verte et la salle sans façade verte (Sunakorn & Yimprayoon, 2011)

Le résultat montre qu'avec une ventilation naturelle, la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur a une différence maximale de 9,93 °C et une moyenne de 3,63 °C tandis que la température de l'air entre une pièce à façade verte et une pièce sans façade verte a une différence de maximum 4,71 °C et moyenne de 0,89 °C. Pendant la journée, comme la température dans les deux pièces baisse et monte en fonction de la température extérieure, la pièce à façade verte reste inférieure à la pièce normale. La différence entre la salle d'expérience et la salle normale est faible tôt le matin, mais elle montre une différence significative lorsque la température extérieure commence à augmenter entre 16h00 et 19h00. En revanche, pendant la nuit, lorsque la température extérieure baisse, la température de l'air dans une pièce à façade verte est plus élevée que dans une pièce sans façade verte. L'obstruction de la diffusion de la chaleur par les feuilles peut être une raison qui conduit au contraire entre le jour et la nuit (Sunakorn & Yimprayoon, 2011). Cependant, il a été démontré que la température de l'air reste toujours dans la zone de confort. De plus, pour l'éducation et l'immeuble de bureaux, le contraire entre le jour et la nuit ne serait pas un problème, car le bâtiment était occupé principalement pendant la journée.

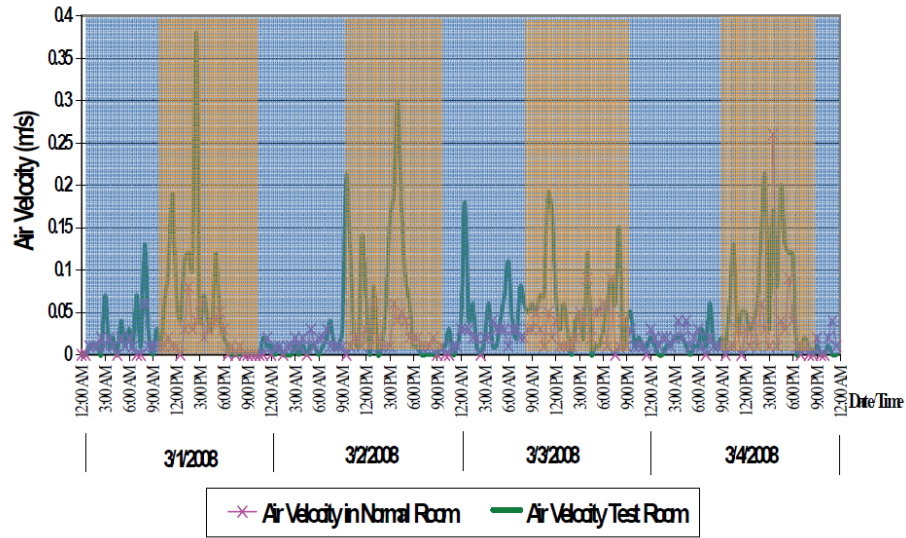


Figure 62 : Résultat de vitesse de l'air entre la salle avec façade verte et la salle sans façade verte (Sunakorn & Yimprayoon, 2011)

Pour la vitesse de l'air, pendant la journée (figure 62), la pièce avec une façade verte montre une valeur supérieure de 0,05 à 0,35 m / s tandis que dans la pièce sans la façade verte, la vitesse de l'air est inférieure à 0,05 m / s, ce qui est en dehors de la plage de confort thermique standard. Pendant la nuit, les deux pièces ont une très faible vitesse de l'air. Il a été montré qu'à une vitesse de 0,5 m / s, un vent fort peut rendre les feuilles non obstruées à la circulation de l'air.

Avec les deux cas d'étude mentionnés ci-dessus, nous pouvons constater que l'utilisation d'une façade verte peut certainement aider un bâtiment à atteindre un certain confort thermique à l'intérieur. Cette façade permet d'améliorer la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment, augmenter la vitesse de l'air, diminuer la température intérieure tout en maintenant l'humidité relative pour rester dans la zone de confort des régions tropicales. Pour les bâtiments éducatifs, comme les étudiants ont besoin de concentration, c'est un point positif car cela offre aussi un sentiment paisible grâce à la verdure. Néanmoins, cette conception nécessite l'intervention d'un expert pour choisir le type de plante et la technique de construction mise en place afin d'éviter d'attirer des insectes indésirables ou d'avoir autres effets sur la structure porteuse du bâtiment.

3.2 La façade double peau

Dans l'architecture moderne, le verre est fort utilisé comme matériau de la façade. En particulier dans les gratte-ciels pour l'esthétique, la vue sur la ville et la lumière naturelle dans le bâtiment. Cependant, comme nous le discutons dans la section 5.2.2, l'une des principales raisons pour lesquelles le bâtiment étudié ici à une température très élevée est l'utilisation de ce matériau.

L'utilisation du verre comme façade peut en effet augmenter le gain de chaleur à l'intérieur du bâtiment, ce qui est un impact du rayonnement solaire. Pour les régions tropicales qui ont déjà un climat chaud et humide, l'utilisation d'un type de façade pouvant réduire la température ou le gain de chaleur dans le bâtiment doit être envisagée. La façade à double peau est un type de façade composé de plusieurs couches comprenant une peau externe, un espace de cavité et une peau interne (figure 63). La façade double peaux peut être à vitrage simple ou à double vitrage en verre flotté ou en verre de sécurité. Il y a normalement un dispositif d'ombrage installé dans l'espace de la cavité pour le contrôle thermique (Wong, Prasad, & Behnia, 2008). Le point pratique de ce type de façade est qu'on peut utiliser avec une ventilation naturelle, mécanique, ou le mélange des deux. Ce type de façade peut être classé en 4 catégories : 'box window façade, shaft box façade, corridor façade and multi story façade' (Oesterle, Lieb, Lutz, & Husler, 2001) comme montre à la (figure 64).

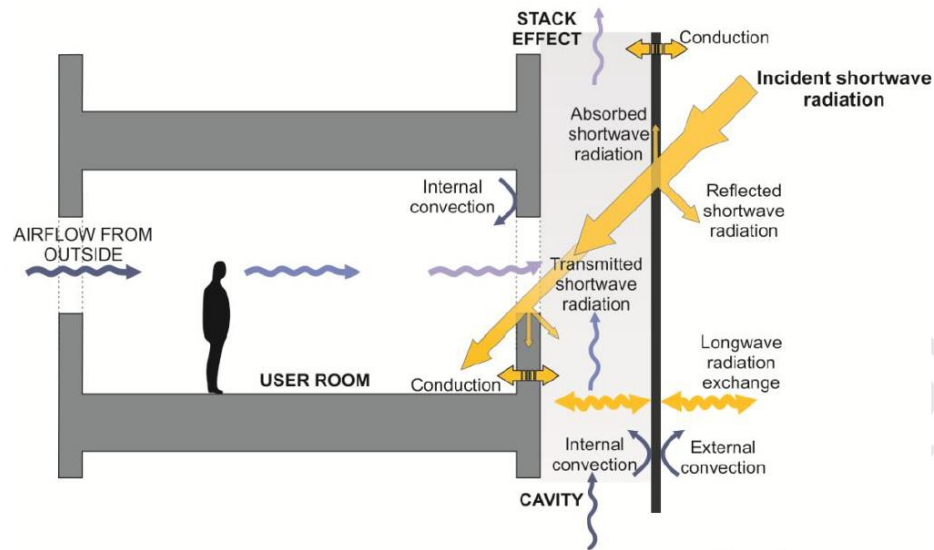


Figure 63 : Coupe d'une les mécanismes de transfert de chaleur et de circulation d'air de façade double peaux, (Barbosa, Ip, & Southall, 2015)

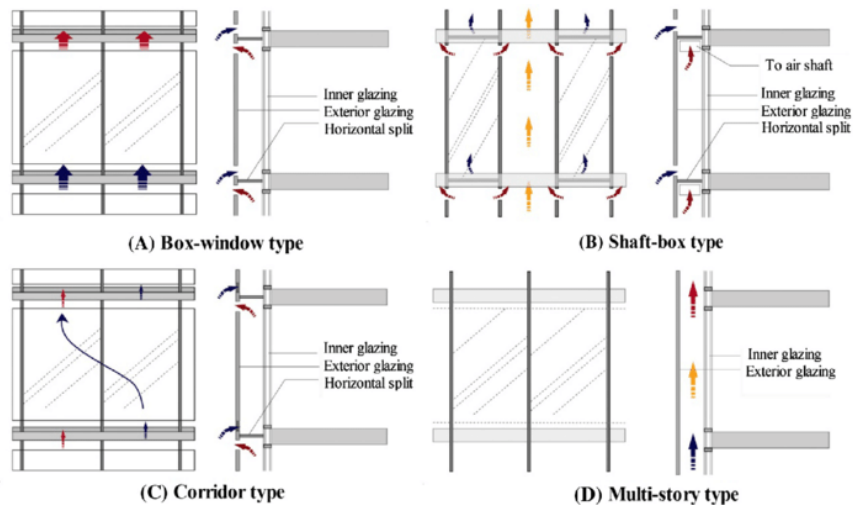


Figure 64 : Type de façade double peaux (Zhang , Yang , Tan , & Zhang , 2016)

Ce dispositif a été largement utilisé en architecture, en particulier pour les gratte-ciels en Europe. C'est également une solution notable pour la construction dans les régions tropicales, car il peut par exemple améliorer, le contrôle du gain de chaleur solaire, la réduction de la consommation d'énergie et l'esthétique (Qahtan, 2019). On constate qu'il peut économiser jusqu'à 50% d'énergie pour la construction dans un climat tempéré et 16% pour la région subtropicale (Khoshbakht, Guo, Dupre, & Atlan2, 2017).

Certaines études mentionnent que l'utilisation d'une façade à double peau convient mieux à l'Europe et aux pays du Nord et que le risque de surchauffe peut être élevé pour le climat tropical. Cependant, il existe également des études qui affirment que la façade à double peau peut également améliorer les performances thermiques pour la construction dans les régions tropicales (Zulkifli, 2018). En fonction du type de vitrage, de la largeur de la cavité et du dispositif de protection solaire, la façade à double peau peut donner des performances différentes dans le refroidissement ou le chauffage du bâtiment (Qahtan, 2019). En ce qui concerne le climat tropical, une largeur de la cavité de 1000 mm peut améliorer les performances de la façade à double peau en réduisant le gain de chaleur solaire. En revanche, si la largeur de la cavité est supérieure à 1000 mm, les performances de la double peau ne sont pas aussi efficaces (Rahmani & Kandar, 2012).

Une étude de Barbosa, Ip et Southall (2015) sur un bâtiment de bureaux à ventilation naturelle à Rio de Janeiro, au Brésil, montre que l'utilisation d'une façade à double peau peut augmenter la satisfaction sur le confort thermique du bâtiment. Le logiciel IESVE a été utilisé pour

simuler le modèle avec différents paramètres de conception de la façade à double peau, comme indiqué dans la figure 65, afin de les comparer au bâtiment existant (base case).

	Case	Design parameter	Scenario	Variables
Group A	A1	Cavity width	A1.1	• 25 cm
			*A1.2	• 50 cm
			A1.3	• 100 cm
	A2	Cavity bottom opening	*A2.1	• Bottom open
			A2.2	• Bottom closed
	A3	Windows positions	*A3.1	• North and south walls in the middle of the wall
A3.2			• South window on the bottom, north windows on the top of the wall	
Group B	B1	Shading devices	*B1.1	• No shading device
			B1.2	• Concrete
			B1.3	• Metal
	B2	Inner skin material	*B2.1	• Masonry (white wall)
			B2.2	• Low emissivity reflective double glazing
Group C	C1	Cavity extension above roof	*C1.1	• Cavity height = building height
			C1.2	• 1.75m above roof
			C1.3	• 3.5m above roof
			C1.4	• 5.25m above roof
	C2	Upper windows closed	*C2.1	• All windows open
			C2.2	• Window of 10 th floor closed
		C2.3	• Windows of 9 th and 10 th floors closed	
Group D	D1	Tapered cavity	*D1.1	• Equal cavity width over the floors
			D1.2	• Inclined outer skin (base = 100cm; top = 20cm)
			D1.3	• Inclined inner skin (base = 100cm; top = 20cm)
	D2	Windows sizes	*D2.1	• Equal windows size over the floors
			D2.2	• Calculated window sizes
*Base case				

Figure 65 : Paramètres et variables définis pour les simulations ((Barbosa, Ip, & Southall, 2015)

Le résultat de la figure 66 montre que l'augmentation de la largeur de la cavité et l'ajout d'un dispositif de protection solaire (A1 et B1) peuvent améliorer pourcentage l'acceptable du confort thermique annuellement à 9%. D'autres paramètres tels que la fermeture du bas et la position de la fenêtre (A2 et A3) peuvent améliorer pourcentage de l'acceptable du confort thermique annuellement de 4%. L'ajout de paramètres différents en inclinant la peau extérieure et en ajustant

la résistance à l'écoulement de la taille de la fenêtre en fonction de sa position peut fournir environ 65% du confort thermique acceptable annuellement pendant les heures occupées.

Design parameter	Scenario	Variable	Annual thermal comfort acceptance (%)										
			1 st floor	2 nd floor	3 rd floor	4 th floor	5 th floor	6 th floor	7 th floor	8 th floor	9 th floor	10 th floor	Mean Overall
	Base case	Refer to Table 3	70.2	67.8	65.8	64.1	63.0	61.7	61.1	60.2	58.5	43.9	61.6
Cavity width	A1.1	25 cm	67.4	64.3	62.0	60.7	59.8	59.3	58.7	57.9	56.9	44.8	59.2
	A1.3	100 cm	72.0	70.8	68.8	67.3	66.0	65.1	64.1	62.9	59.4	42.2	63.9
Bottom closed	A2.2	Bottom cavity closed	74.7	67.8	65.0	63.5	62.0	61.3	60.8	60.0	58.2	43.8	61.7
Windows position	A3.2	Up north, bottom south	70.7	66.7	63.8	62.0	60.7	60.2	59.2	58.0	55.3	43.0	60.0
Shading device	B1.2	Concrete	73.6	72.5	70.7	68.8	67.4	66.4	65.6	64.7	62.9	47.0	65.9
	B1.3	Aluminium	74.1	74.0	73.2	72.4	71.9	71.4	70.9	70.4	69.4	58.6	70.6
Inner skin material	B2.2	Reflective glazing	69.1	65.9	64.3	61.9	61.0	59.9	59.2	58.0	55.5	40.5	59.5
Cavity extension	C1.2	1.75 m	69.9	67.3	65.3	63.8	62.3	61.3	60.6	59.8	58.1	43.8	61.2
	C1.3	3.50 m	69.9	67.3	65.3	63.8	62.3	61.3	60.6	59.9	58.6	47.8	61.7
	C1.4	5.25 m	69.9	67.3	65.3	63.8	62.3	61.3	60.6	60.0	59.3	52.8	62.2
Windows closed	C2.3	9 th and 10 th	70.4	68.0	65.9	64.4	63.2	61.5	58.6	41.3	-	-	61.6
Tapered cavity	D1.2	Inclined inner skin	67.8	66.7	66.1	65.7	65.6	65.5	65.5	65.1	63.0	44.8	63.6
	D1.3	Inclined outer skin	68.6	67.5	66.7	65.9	65.6	65.4	65.3	64.8	62.6	44.7	63.7
Calculated windows size	D2.2	Calculated WWR	64.5	63.9	63.9	63.9	63.9	63.8	63.8	63.4	62.8	54.8	62.9

Figure 66: Effet des paramètres de conception sur le confort thermique annuel (Barbosa, Ip, & Southall, 2015)

L'étude de Lim & Ismail (2019) sur un bâtiment de bureaux de 10 étages à Phnom Penh montre également que l'utilisation de la façade à double peau peut certainement réduire la consommation d'énergie de refroidissement et d'énergie de end-use. Différentes profondeurs de cavité de 500 mm à 1500 mm (figure 67), différents matériaux de vitrage (figure 68) et différents dispositifs de protection solaire (figure 69) ont été ajoutés au modèle de base afin d'analyser les performances de la façade à double peau sur le bâtiment. Le logiciel EnergyPlus version 8.6.0 a été utilisée pour effectuer des simulations sur différents modèles de cas. Les chercheurs ont testé tout d'abord la profondeur de cavité entre le vitrage extérieur et intérieur. Ensuite, ils ont pris la profondeur de cavité la plus efficace et tester avec différent type de verre. Finalement, les chercheurs ont pris la profondeur de cavité et le type de verre le plus efficace et ont testé les différents types de dispositif de protection solaire.

Category	C-1	C-2	C-3
DSFs configuration	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF
Ventilation type	Natural ventilation	Natural ventilation	Natural ventilation
Cavity depth	500 mm	1000 mm	1500 mm
Internal glass	Bronze laminated glass	Bronze laminated glass	Bronze laminated glass
External glass	Clear e-glazing	Clear e-glazing	Clear e-glazing
Shading device	No shading device	No shading device	No shading device

Figure 67 : Model avec différente profondeur de cavité (Lim & Ismail, 2019)

Category	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
DSF configuration	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF
Ventilation type	Natural ventilation	Natural ventilation	Natural ventilation	Natural ventilation	Natural ventilation
Cavity depth	500 mm	500 mm	500 mm	500 mm	500 mm
Internal glass	Clear e-glazing	Clear double glazing	Clear e-glazing	Clear double glazing	Bronze laminated glass
External glass	Clear double glazing	Clear e-glazing	Clear e-glazing	Clear double glazing	Bronze laminated glass
Shading device	No shading device	No shading device	No shading device	No shading device	No shading device

Figure 68 : Model avec différent type de verre (Lim & Ismail, 2019)

Category	S-1	S-2	S-3	S-4
DSF configuration	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF	Multiple-storey DSF
Ventilation type	Natural ventilation	Natural ventilation	Natural ventilation	Natural ventilation
Cavity depth	500 mm	500 mm	500 mm	500 mm
Internal glass	Bronze laminated glass	Bronze laminated glass	Bronze laminated glass	Bronze laminated glass
External glass	Bronze laminated glass	Bronze laminated glass	Bronze laminated glass	Bronze laminated glass
Shading device	No shading device	Internal shade rolling blind	Internal blind louvre	External blind louvre

Figure 69 : Model avec différent type de dispositif d'ombrage (Lim & Ismail, 2019)

Le résultat de la figure 70 montre que la façade double peau avec une cavité de 500 mm peut réduire la consommation d'énergie à 17%, ce qui est le meilleur parmi les 3 profondeurs possible de cavité. Le résultat sur le type de vitrage montre également qu'avec une profondeur de cavité de 500 mm, l'utilisation de verre laminé en bronze (verre en bronze à deux couches ou multicouches et maintenu ensemble par une couche intermédiaire telle que le butyle de polyvinyle) pour la peau extérieure et intérieure peut économiser annuellement jusqu'à 29% l'énergie de refroidissement, tandis que les autres types de verre tels que le vitrage électronique transparent et le double vitrage

transparent entraînent augmentation de la consommation d'énergie. Le dernier résultat montre que l'utilisation des deux paramètres mentionnés précédemment et l'ajout de la persienne extérieure aveugle comme dispositif de protection solaire peuvent améliorer les performances de la façade à double peau pour économiser jusqu'à 43% de la consommation annuelle d'énergie de refroidissement.

Category	Base case	C-1	C-2	C-3
Annual end-use energy [kWh]	425580	368698	371796	374406
Annual cooling energy [kWh]	227972	189014	191119	192920
Annual saved energy (End-use)	[kWh]	56882	53784	51174
	[%]	13.37	12.64	12.02
Annual saved energy (Cooling)	[kWh]	38958	36853	35052
	[%]	17.09	16.17	15.38

Figure 70 : Énergie économisée en utilisant une façade à double peau avec une profondeur de cavité différente (Lim & Ismail, 2019)

Grâce à les deux études, mentionnée ci-dessus, nous pouvons voir que l'utilisation d'une façade à double peau peut certainement améliorer les performances thermiques des bâtiments en climat tropical en augmentant le confort thermique acceptable et en réduisant la consommation d'énergie de refroidissement chaque année. Cependant, pour la construction en climat tropical, afin d'avoir les bénéficier de ce type de façade toute l'année, la conception de la profondeur de la cavité, le choix du matériau de vitrage et du dispositif de protection solaire doivent être très précis et réfléchis.

3.3 Le dispositif de protection solaire

Comme mentionné dans la section 6.3, la façade est l'un des facteurs les plus importants pouvant affecter l'environnement intérieur d'un bâtiment. L'architecture moderne, en utilisant le vitrage, peut augmenter le gain de chaleur solaire dans l'espace intérieur comme mentionné dans la section 6.2.2. Le système de protection solaire est l'un des composants bioclimatiques les plus importants pour les composants de façade de bâtiment, car c'est le moyen le plus efficace de protéger l'enveloppe du bâtiment du rayonnement direct du soleil, en particulier pour la construction dans une région tropicale. Le système de protection solaire peut influencer considérablement le visuel intérieur ainsi que le confort thermique (Al-Masrani, Al-Obaidi, Zalin, & Isma, 2018). Par conséquent, cela affecte également la consommation d'énergie du bâtiment. Le système de protection solaire peut être fixe ou mobile. Le terme de mobile ici signifie que la protection solaire peut être contrôlé directement par les utilisateurs en s'adaptant à leurs préférences ou s'ajuste automatiquement pour répondre aux conditions intérieures ou extérieures. Il existe de

nombreux types de dispositif d'ombrage (figure 71) qui ont été largement utilisés dans diverses architectures pour s'adapter aux conditions climatiques et environnementales (Al-Masrani, Al-Obaidi, Zalin, & Isma, 2018).













	3-D View	Section/Plan	Ideal orientation	View restriction
Horizontal single blade			South	★★★★
Outrigger system			South	★★★★
Horizontal multiple blades			South	★★★★
Vertical fin			East West	★★★★
Slanted Vertical fin			East West	★★★★
Eggcrate			East West	★★★★

Figure 71: Type de système de protection solaire (MUNSHI, 2015)

Chaque système de protection solaire utilisé est adapté aux conditions climatiques, à l'orientation de la façade et à l'esthétique du bâtiment. De nombreuses études ont été réalisées pour voir l'impact de chaque type de façade sur l'environnement intérieur en fonction du climat extérieur et de son efficacité pour réduire la demande d'énergie. Une étude montre que les dispositifs d'ombrage fixes tels que les porte-à-faux, les ailerons verticaux sont toujours populaires parmi les nouvelles tendances en raison de leur rentabilité, de leur installation facile, de leur conception minimale, de leur faible entretien et de leur emploi passif (Al-Masrani, Al-Obaidi, Zalin, & Isma, 2018).

Une étude sur un immeuble de bureaux à Penang, qui est l'une des régions les plus chaudes de Malaisie, montre que les ailerons verticaux et les porte-à-faux changent très légèrement la température intérieure par rapport à sans dispositif de protection solaire (AL-Tamimi & Fadzil, 2011). Cependant, le dispositif de protection solaire de la caisse à œufs peut réduire la température intérieure maximale de 5,1 °C pour une pièce non ventilée et de 1,4 °C pour une pièce ventilée. Cela peut sembler légèrement différent, mais cette petite différence montre que le dispositif

d'ombrage de la caisse à œufs peut augmenter nombre d'heures avec une température inférieure à 28,6 °C de 1821 à 3947 heures par an, ce qui représente une amélioration de 117%. Ce système a les meilleures performances car c'est la combinaison d'ailettes horizontales et verticales qui peut arrêter les rayons du soleil venant presque de toutes les directions. Néanmoins, le confort visuel peut également être affecté par ce type d'appareil.

CHAPITRE 7: CONCLUSION

1. Synthèse

Dans le cadre de ce travail, nous souhaitons mieux comprendre les performances thermiques des bâtiments situés en région tropicale à climat chaud et humide. Comme le confort thermique est un facteur très difficile à évaluer dans la conception des bâtiments car il dépend de l'environnement extérieure et de la préférence personnelle, il est très difficile pour le concepteur de choisir une approche de conception appropriée pour répondre à cette question.

Notre objectif est d'évaluer les performances thermiques d'un bâtiment situé à Phnom Penh, et d'analyser si le bâtiment offre un environnement thermique confortable aux occupants. Trois phases de méthodologiques ont été appliquées afin de répondre à notre objectif. La première phase consiste à mesurer les paramètres environnementaux dans un bâtiment éducatif de l'Institut de technologie de Phnom Penh. La température de l'air et l'humidité relative, qui sont des paramètres important dans le confort thermique, ont été prises en compte pour cette mesure. La deuxième phase, comprend une enquête en ligne sur la satisfaction et la sensation thermique des occupants. La dernière phase de la méthodologie se concentre sur la modélisation du bâtiment et la simulation thermique du bâtiment à l'aide du logiciel TRNSYS.

Le résultat de la mesure et simulation TRNSYS montre que le bâtiment a une surchauffe toute l'année. Pendant la journée, le bâtiment a une température de l'air supérieure de 3 à 9 °C par rapport au confort standard, ce qui est très inacceptable. Cependant, pendant la nuit, la température de l'air à l'intérieur du bâtiment n'est que de 2 à 3 °C supérieure au confort standard qui peut être considéré comme un environnement thermique acceptable. L'enquête en ligne montre également que 74% des occupants se sentent insatisfaits spécialement pendant le midi et l'après-midi.

Etant donné que bâtiment situé dans une région tropicale, il est normal qu'il y aura une surchauffe présente dans le bâtiment. Cependant, 3 - 9 °C de plus très élevé, d'autant que le climat extérieur est déjà chaud. Il est à noter que des matériaux pour l'enveloppe du bâtiment n'est pas adapté aux conditions climatiques. Salle1 et salle2 sont les pièces qui ont la plus grande surface vitrée et sans dispositif de protection solaire a la température de l'air la plus élevée que les autres pièces du bâtiment et offrent un environnement inacceptable de jour comme de nuit. La grande partie du bâtiment est également orientée vers l'ouest, ce qui entraîne une forte surchauffe dans le bâtiment pendant l'après-midi.

Une approche de conception durable est proposée afin de répondre au problème de surchauffe. Selon certaines études dans un pays voisin avec le même climat et au Cambodge, la façade verte, la façade à double peau et le dispositif de protection solaire en caisse d'œuf sont des conceptions efficaces pour les enveloppes. Elles sont en mesure de fournir un meilleur environnement thermique dans le bâtiment et de réduire consommation annuelle d'énergie. Cependant, un expert sur ce type de façade sera nécessaire lors de la phase de conception pour qu'il ait une performance efficace.

2. Limites

Tout au long du travail, nous avons rencontré diverses limites.

Tout d'abord, les données ont été difficiles à récolter puisque notre cas étude a été choisie à Phnom Penh, au Cambodge. Premièrement, nous avons trouvé une très peu d'articles qui parlant au confort thermique au Cambodge. Il n'y a pas de document officiel ni de norme traitant du confort thermique pour Phnom Penh ou le Cambodge. Les données de base sont également très faibles. Par exemple, il n'y a pas de données météorologiques pour Phnom Penh dans TRNSYS.

Le deuxième obstacle concerne le relevé de la température à Phnom Penh. La distance entre Phnom Penh et Liège étant très éloignée, il est difficile de collecter les données de mesure de la température. La plupart des salles du bâtiment étant utilisées par les étudiants 15 heures par jour, et ce n'est pas non plus un lieu approprié pour installer un capteur. Ainsi, nous n'avons pu prendre mesures que dans 5 pièces, et sans pouvoir avoir les salle1 et salle2 qui sont pourrais la zone la plus intéressante. Nos résultats sont donc moins représentatifs de l'ensemble du bâtiment. De plus, la mesure ne peut être effectuée que pendant la saison sèche, ce qui nous amène, si nous voulons étudier l'ensemble de l'année à faire la discussion uniquement sur le résultat de la simulation.

Pour ce qui l'enquête en ligne, nous avons constaté qu'il y a eu une certaine confusion à propose des questions posées. Le premier sondage n'était en effet pas assez clair au vu des réponses reçues été renvoyé avec beaucoup d'incertitude pour y répondre, mais après l'explication et la modification de certains mots, nous avons reçu des réponses acceptables. Cependant, certaine question de l'enquête a montré un taux de réponse particulièrement bas et n'ont donc pas pu être exploitées. De plus, le nombre total de répondants est légèrement inférieur à la norme ASHRAE qui préconise un taux de réponse de 35% des occupants du bâtiment étudié. De plus, l'enquête a également eu lieu dans un mois différent de la mesure, ce qui peut entraîner une légère imprécision car l'enquête a eu lieu en avril avec une température extérieure plus élevée.

Comme mentionné ci-dessus, il y a un certain manque de données pour faire la simulation, ce qui entraîne une légère différence pour le résultat que nous obtenons de la mesure. Nous contrerons également avec certaines erreurs lors de la simulation qui provoquent par un mauvais fonctionnement de la modélisation du bâtiment et des données d'entrée. Le type 65 que nous utilisons qui peut afficher le graphique de résultat de seulement 10 variables pour chaque axe, ce qui signifie que dans le cas où la zone d'intérêt est supérieure à 10, deux fichiers différents seront nécessaires.

Dans la dernière partie du travail, l'analyse des résultats, nous observons que la portée de l'enquête est beaucoup plus faible que celle des deux autres phases. En effet, certains répondants ne sont pas sûrs d'être exactement dans la zone de mesure et de simulation. De plus, le résultat de mesure et de simulation n'est pas calibré aussi.

Pour les causes et solutions de l'inconfort thermique, en raison du délai nous ne sommes pas à la simulation ou à l'expérimentation pour valider nos hypothèses. Nous basons donc notre déclaration sur un l'analyse de projets faits par des chercheurs auparavant. Cependant, il y a très peu de projet et cas d'étude sur ce sujet à Phnom Penh pour faire la comparaison, ce qui limite nos analyses.

Néanmoins, pour une étude future, je pense que certaines des limites mentionnées ci-dessus peuvent être surmontées telles que le manque d'informations et de données, la difficulté de mesure ou d'enquête en ligne. Dans l'ensemble, les limites sont principalement dues à l'éloignement entre le chercheur et le lieu du cas d'étude. Par conséquent, la méthodologie doit être vraiment prise en compte lors du processus de choix du bâtiment d'étude de cas. A côté, il existe différentes méthodologies que nous pouvons développer pour répondre à ce type de question de recherche.

3. Perspective

Après avoir travaillé sur ce sujet, nous aimerions montrer notre point de vue à ce sujet. Nous avons découvert que l'étude relative à ce domaine est encore limitée et qu'il faudrait faire davantage pour ouvrir l'idée de conception pour l'architecte au Cambodge. Il existe différentes applications qui peuvent être obtenues dans le domaine de l'architecture à partir du résultat de cette étude. Il montre la norme de confort thermique requise pour les occupants d'un bâtiment dans une condition climatique spécifique et la source de l'inconfort qui peut se produire pour la construction dans des conditions chaudes et humides. Cela peut conduire le concepteur à avoir un choix multiple pour le concept de conception afin de fournir un confort thermique aux utilisateurs et certains paramètres

qu'ils devraient prendre en considération pendant le processus de conception. Ce travail aide non seulement le concepteur à comprendre les performances thermiques d'un bâtiment, mais aussi comment nous pouvons offrir un confort thermique avec une ventilation naturelle.

Comme il y a une limite dans notre travail, nous ne pouvons que proposer une méthode de conception durable pour atteindre le confort thermique sur la base d'autres études dans le pays voisin avec le même climat. Dans la prochaine recherche, la simulation avec différents programmes énergétiques tels que TRNSYS ou Energy plus devrait être effectuée afin de connaître l'impact de la conception de la proposition sur le confort thermique avec une approche pour obtenir moins de consommation d'énergie. L'étude devrait également se concentrer sur d'autres types de bâtiments tels que les bâtiments résidentiels ou les hôpitaux, car certains paramètres tels que le taux métabolique et l'habillement sont différents selon la fonction du bâtiment. Les limites que nous rencontrons apportent également au prochain chercheur voulant travailler sur le sujet des idées de méthodologie recherche améliorables ou des informations sur différents obstacles évitables.

BIBLIOGRAPHIE

- Afroz, Z., Urme, T., Shafiullah, G., & Higgins, G. (2019). Tuning approach of dynamic control strategy of temperature set-point for existing commercial building. doi:10.1088/1757-899X/609/6/062029
- Al-Masrani, S., Al-Obaidi, K., Zalin, N. A., & Isma, M. A. (2018). Design optimisation of solar shading systems for tropical office building challenges and future trends. *Solar Energy*, 849-872.
- AL-Tamimi, N., & Fadzil, S. F. (2011). The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential building in tropics. *Procedia Engineering*, 273-282.
- Alwetaishi, M. S. (2016). Impact of Building Function on Thermal Comfort: A Review. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 940, 941.
- ASHRAE-55. (2017). *Thermal environment conditions for human occupancy*. ASHRAE.
- Atmaca, I., Kaynakli, O., & Yigit, A. (2007). Effects of radiant temperature on thermal comfort. *Building and Environment*, 42, 3210-3220.
- Barbosa, S., Ip, K., & Southall, R. (2015). Thermal comfort in naturally ventilated buildings with double skin facade under tropical climate conditions : The influence of key design parameters. *Energy and Building*, 397-406.
- Busch, J. (1990). Thermal Responses to the Thai Office Environment, ASHRAE Transaction. *Energy and Building*, 859-872.
- Castro, F. (2018). *Siamese Ratchakru / Creative Crews*. Retrieved from Archdaily: https://www.archdaily.com/888023/siamese-ratchakru-creative-crews?ad_source=search&ad_medium=search_result_all
- Cateno, D., Kalz, D., Lomardo, L., & Rosa, L. (2017). Evaluation of thermal comfort and occupant satisfaction in office buildings in hot and humid climate regions by means of field surveys. *Energy Procedia*, 183-194.
- Djamila, H., Chi, m., & Kumaresan, S. (2014). Filiz. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 109-117.

- Felix, M., & Elsamahy, E. (2017). The Efficiency of Using Different Outer Wall Construction materials to achieve thermal comfort in various climatic zones. *Energy Procedia* , 321-331.
- Guide, G. G. (2014, February 14). *Green facade*. Retrieved from Growing Green Guide: <https://www.growinggreenguide.org/?s=green+facade>
- HSE. (2020). Health and Safety Executive. Unied Kingdom.
- ISO-7730. (2005). *Ergonomics of the thermal environment- analytical dertermination and interpretation of thermal comfortsing calculation of teh PMV and PPD indices adn local thermal comfort criteria*.
- Jang, M., C.D, k., & I.S, M. (2007, January). Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels. *Building and environment*, 42(1), 55-61. doi:10.1016/j.buildenv.2005.07.025
- Khoshbakht, O., Guo, Z., Dupre, K., & Atlan2, H. (2017). Thermal environments of an office building with double skin facade. *Green Build*, 3-22.
- Kwong, Q., Nor, M., & Sahari, A. B. (2013). Title: Thermal Comfort Assessment and Potential for Energy Effeiciency Enhancement in Modern Tropical : A review. *Energy and Building*.
- Lim , Y., & Ismail, M. R. (2019). Efficacy of Double Skin Facade on Energy Consumption in Office Buildings in Phnom Penh city. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*.
- Lin, Z. and S. Deng,. (2008). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics - Measuring the total insulation values for the bedding system commonly used in subtropics. 950-916.
- Lohner, S. (2017, June 01). *Heating with the Greenhouse Effect*. Retrieved from Scientific American : <https://www.scientificamerican.com/article/heating-with-the-greenhouse-effect/>
- Lu, S., Fang, K., Qi, Y., & Wei, S. (2015). Influence of Natural Ventilation on Thermal Comfort in Semi-open Building under Early summer Climate in the Area of Tropical Island. *Procedia Engineering*, 944-951.
- Markov, D. (2016). *STANDARDS IN THERMAL COMFORT*.

- Mazzeo, D., Matera, N., Cornaro, C., Oliveti, G., Romagnoni, P., & Santoli, L. D. (2020). EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module. *Energy and Building*.
- MUNSHI, S. (2015, October 20). *SHADING DEVICES AND ITS UTILIZATION*. Retrieved from Curator Hall: <https://curatorhall.wordpress.com/2015/10/20/shading-devices-and-its-utilization/>
- Mustapa, M. S., Zaki, S. A., Rijal, B. H., Hagishima, A., & Mohamed, M. S. (2016). Thermal comfort and occupant adaptive behaviour in Japanese university buildings with free running and cooling mode offices during summer. *Building and Environment*, 105, 332-342. doi:10.1016/j.buildenv.2016.06.014
- Neymark, J., Judkoff, R., Knabe, G., Le, H., Durig, M., Glass, A., & Zweifel, G. (2002). Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 917-931.
- Nguyen, A. (2013). SUSTAINABLE HOUSING IN VIETNAM: climate responsive design strategie to optimize thermal comfort.
- Nicol, J., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Building*, 563-572.
- Oesterle, E., Lieb, R., Lutz, M., & Husler, W. (2001). *Double-Skin Facades—Integrated Planning*. Prestel Verlag: Prestel.
- Ozdamar, M., & Umarogullari, F. (2018). Thermal comfort and indoor air quality. *International journal of scientific research and innovative technology*, 5(3), 90-109.
- Parsons, K. C. (2002). The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort. *Energy and building*, 593-599.
- Perez, L., Prieto, F., & Rojas, R. (2019). Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. *Building and Environment*, 181-194.

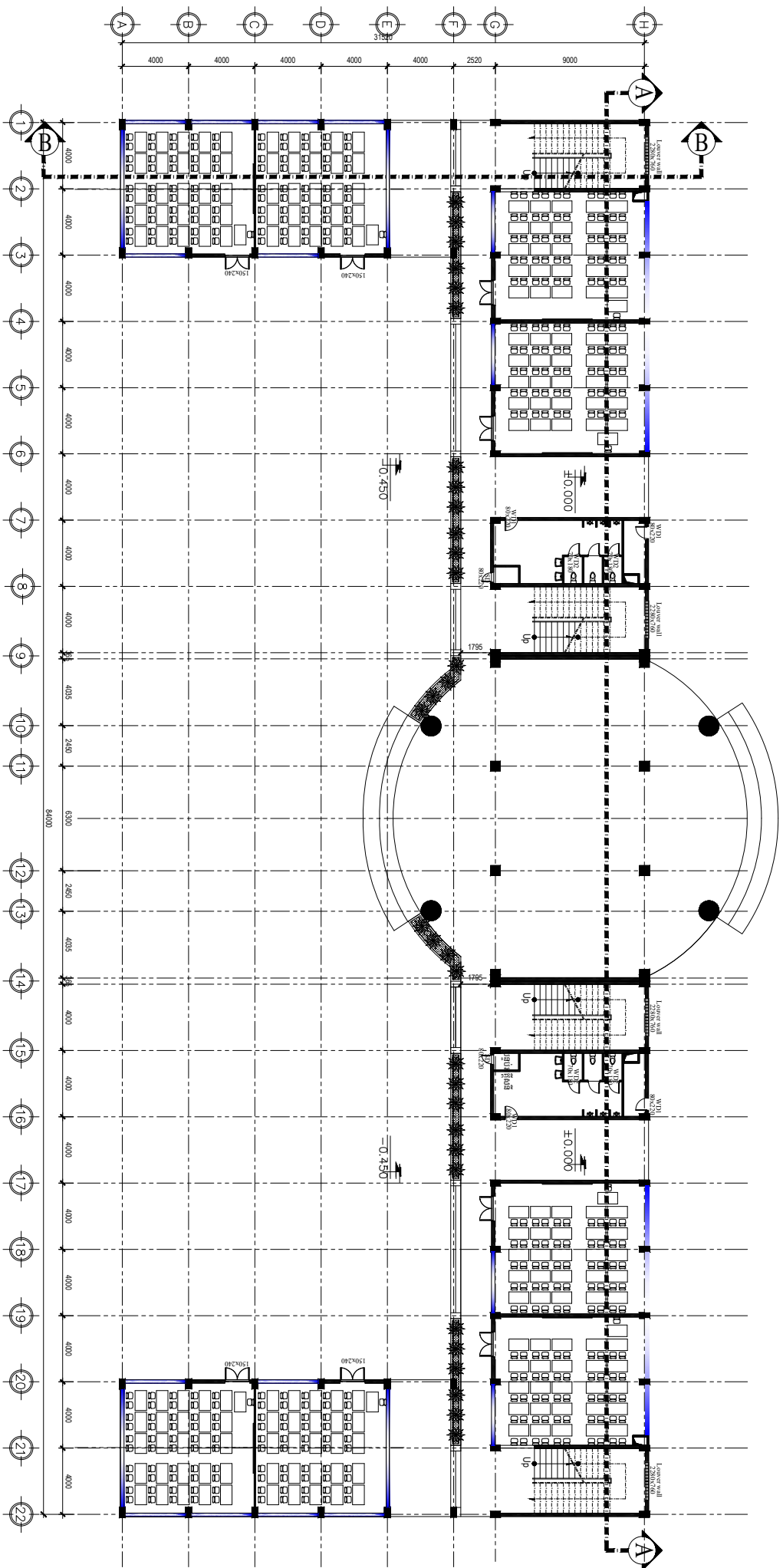
- Qahtan, A. (2019). Thermal performance of a double-skin façade exposed to direct solar radiation in the tropical climate of Malaysia: A case study. *Case Studies in Thermal Engineering* .
- R.J. de Dear, K. G. Leow, & S. C. Foo . (1991). Thermal comfort in the humid tropics : feild experiment in air conditioning and naturally ventilated buildings in Singapore. *International Journal of Biometeorology*, 259-265.
- Rahmani, B., & Kandar, M. (2012). How Double Skin Façade's Air-Gap Sizes Effect on Lowering Solar Heat Gain in Tropical climate? *World Applied Sciences Journal*, 774-778. doi:10.5829/idosi.wasj.2012.18.06.3184
- Stouhi, D. (2019). *How to Design for Optimal Thermal Comfort (And Why it Matters)*. Retrieved from Archdaily: <https://www.archdaily.com/908320/how-to-design-for-optimal-thermal-comfort-and-why-it-matters>
- Sunakorn , P., & Yimprayoon, C. (2011). Thermal performance of biofacade with natural ventilation in the tropical cliamte . *Procedia Engineering*, 34-41.
- Wang , H., Haung, C., Liu, Z., Tang, G., Liu, Y., & Wang , Z. (2006). Dynamic evaluation of thermal comfort environment of air conditioned building. *Building and environment*, 1522-1529.
- Wang , Z., Zhang, L., Zhao, J., & He, Y. (2010). Thermal comfort for naturally ventilated residential buildings in Harbin. *Energy and building*, 42(12), 2406-2415.
- Widiastuti, R., Zaini, J., & Caesarendra, W. (2020). Data on records of temperature and relative humidity in a building model with green facade system . *Data in brief*.
- Wong, P., Prasad , D., & Behnia, M. (2008). A new type of double-skin facade configuraton for hot and humid climate. *Energy and building*, 1941-1945.
- Zhang , T., Yang , H., Tan, Y., & Zhang , X. (2016). The application of air layers in building envelopes: A review. *Applied Engery*, 707-734.
- Zhang, L., Deng, Z., Liang, L., Zhang, Y., Meng, Q., Wang, J., & Santamouris, M. (2019). Thermal behavior of a vertical green facade and its impact on the indoor and outdoor thermal environment. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109502

Zulkifli, M. A. (2018, January 14). *Shading Device as Strategies Achieving Thermal Comfort for Office Building in Tropic*. Retrieved from Issu:
https://issuu.com/amirasyraafzulkifli/docs/design_journal_180114

ANNEXE 1 : PLAN DU BATIMENT

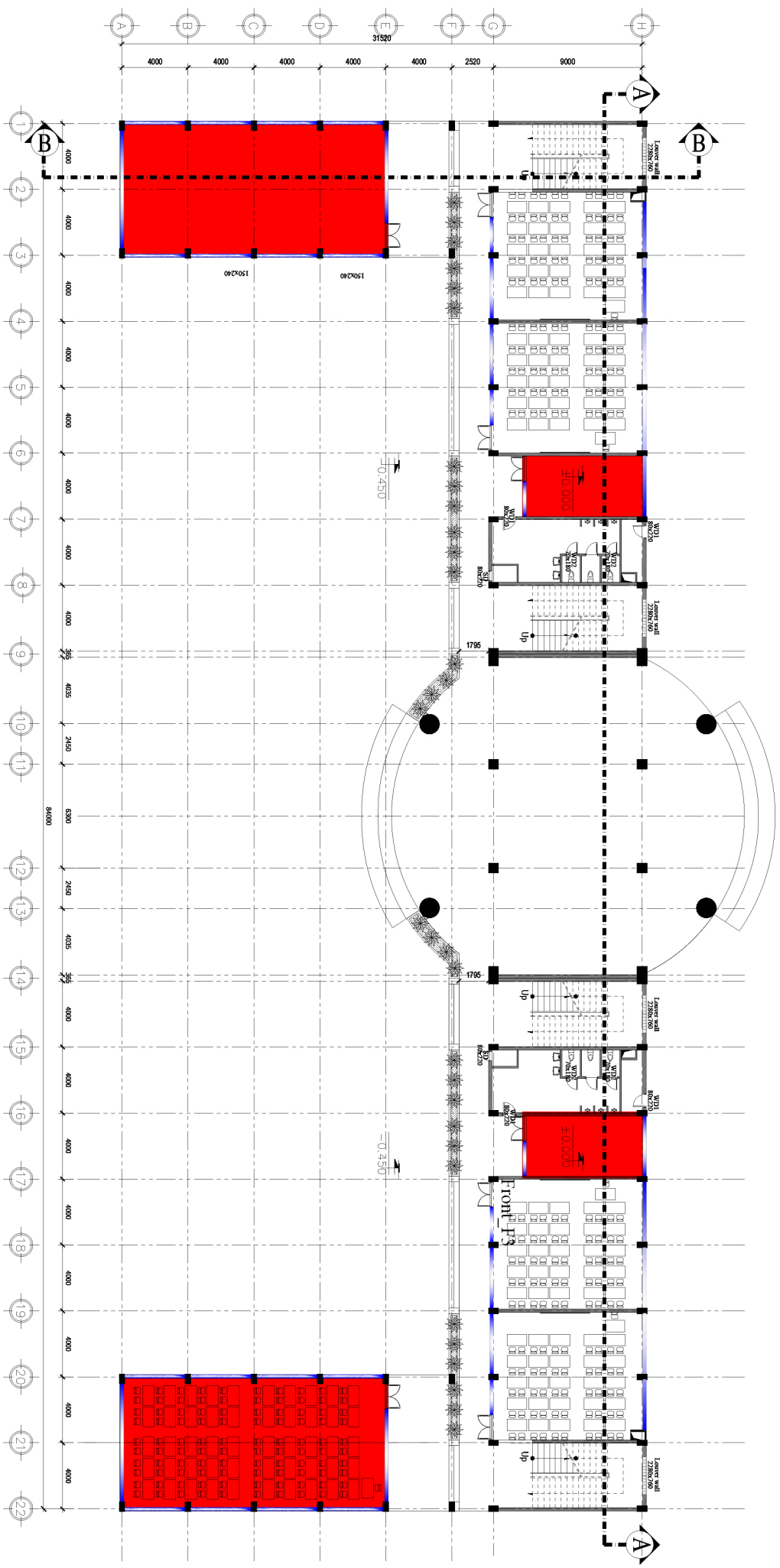
Cette annexe présente les plans du bâtiment de Rez-de-chaussée au R+3 dessiner par Monsieur Rada CHREA. Il y a eu quelques modifications entre le bâtiment réel et le plan.

- En rouge nous retrouvons les zones où des murs ont été modifiés ou rajoutés
- En bleu nous retrouvons les zones n'existant pas dans le bâtiment réel.

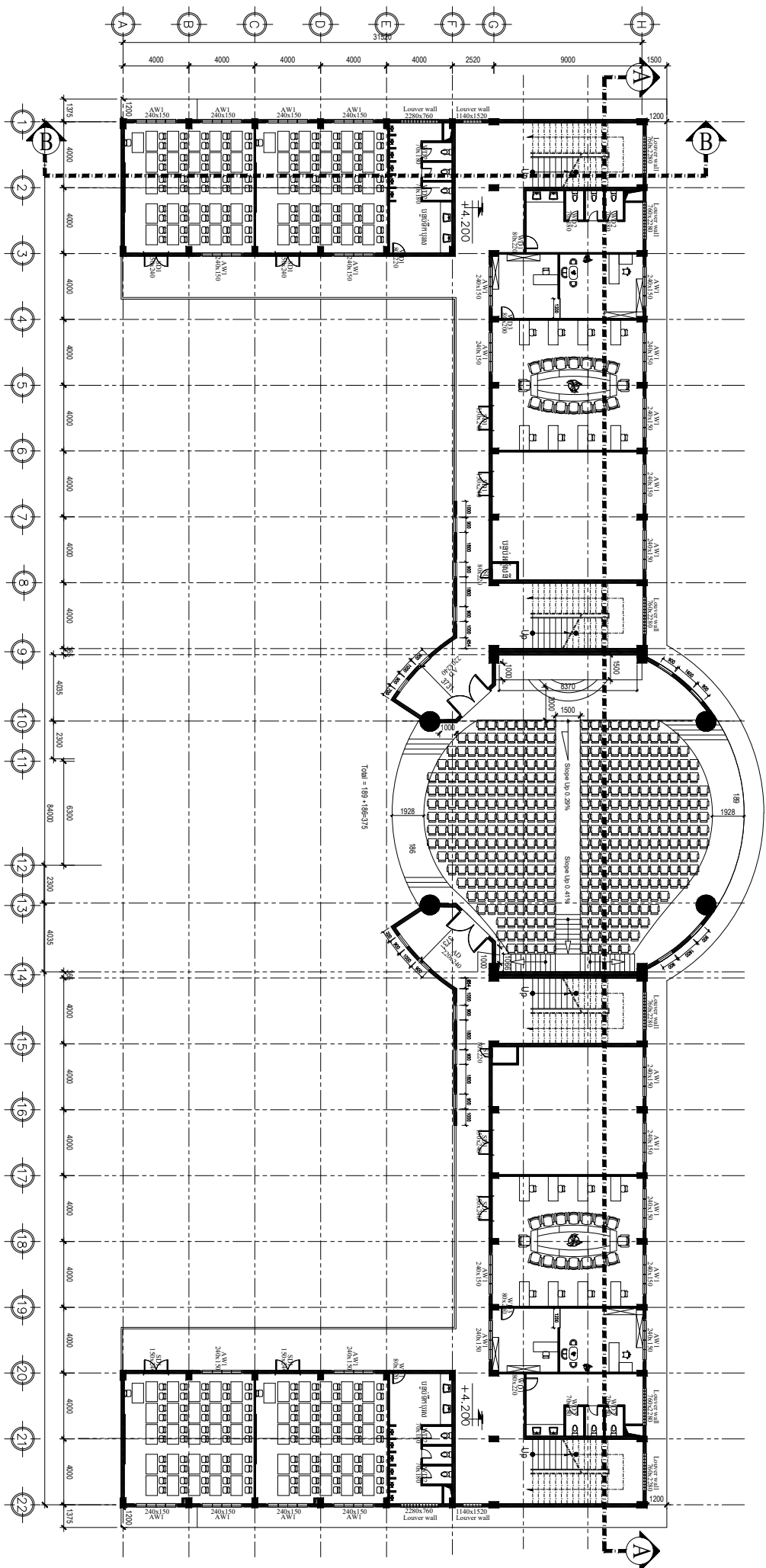


Rez-de-chaussé (Origine)

Echelle : 1/350

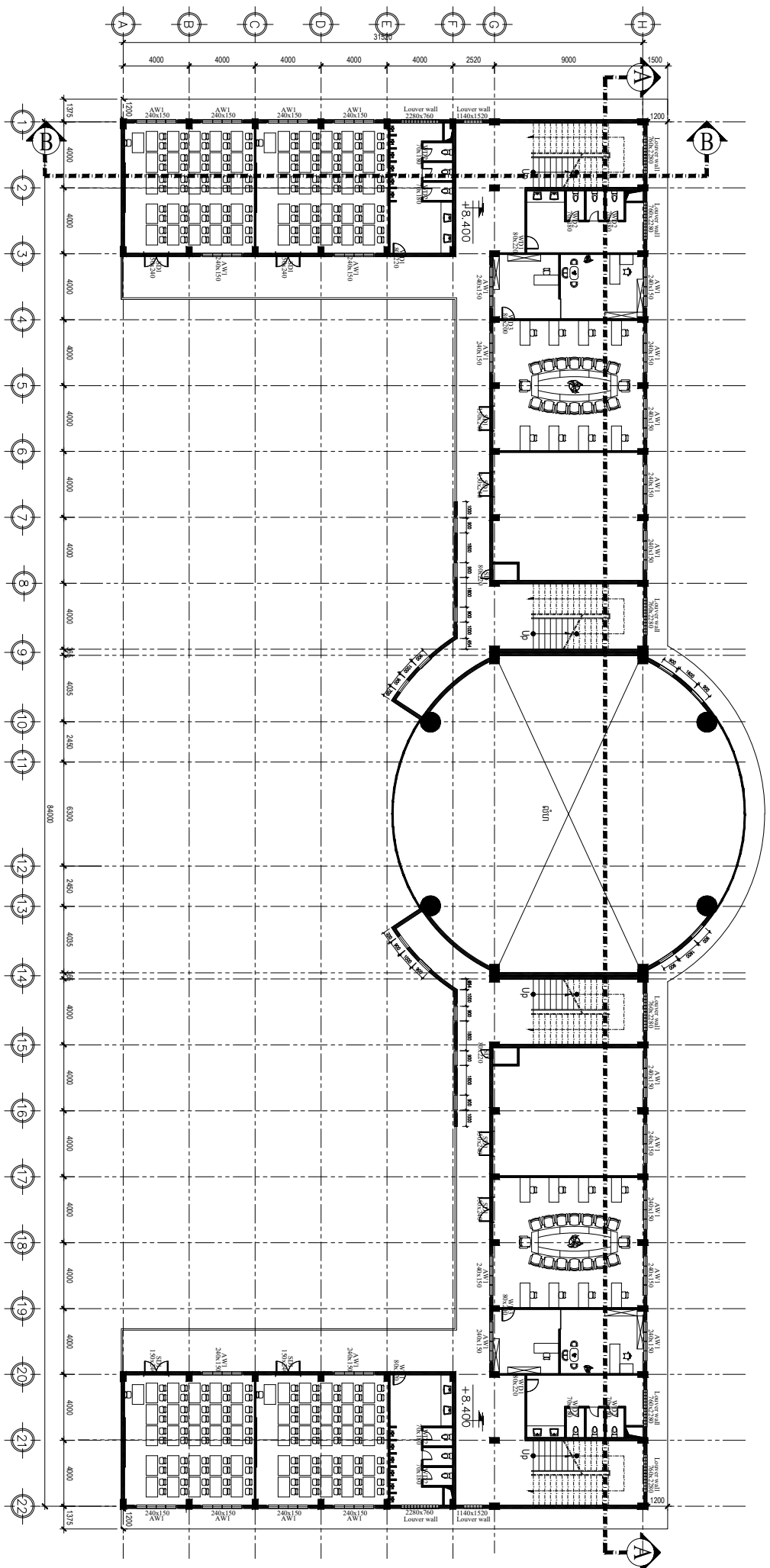


Rez-de-chassé
Echelle : 1/350



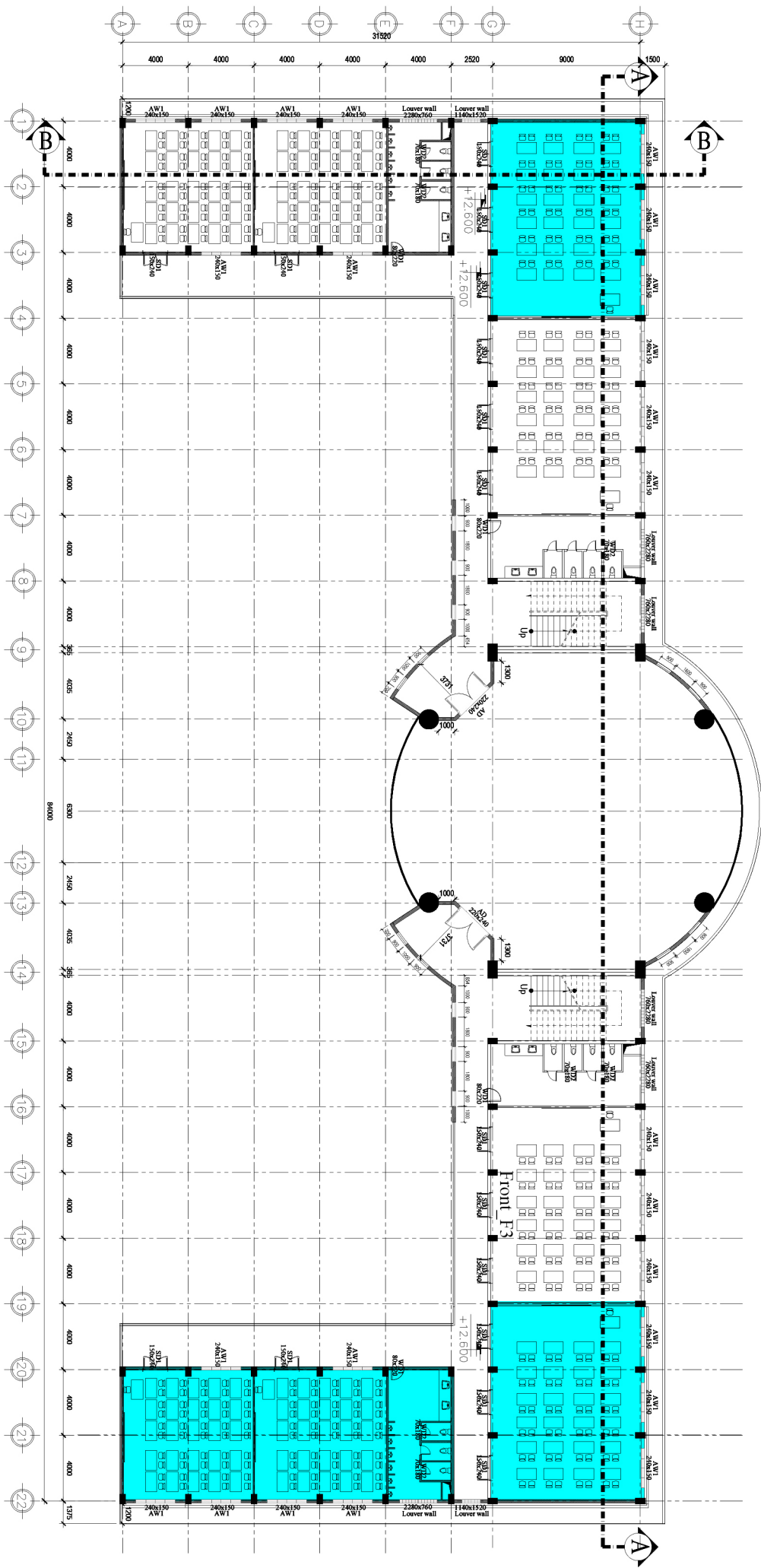
R+1

Echelle : 1/350



R+2

Echelle : 1/350



R+3

Echelle : 1/350

ANNEXE 2 : ENQUÊTE EN LIGNE

Cette annexe présente le questionnaire utilisé lors de l'enquête en ligne ainsi que le codage des données issues de questionnaire.

Questioning on thermal comfort of classroom or office in Building F of ITC

This survey will help me to identify your satisfactions of thermal comfort in the classroom or office in Building F of ITC that will be put in my thesis research for Master Degree in Architectural Engineering. Please don't hesitate to contact me if there is any question that you're not cleared about.

Facebook : Kimninh Taing

1. 1. Who are you?

Mark only one oval.

- ☐ Student
- ☐ Professor or staff

2. 2. If you are a professor or staff who mostly stay in office, please specific your office number? For example : 203F

3. 3. Which periods do you mostly stay in the room?

Check all that apply.

- ☐ 7am - 11am
- ☐ 11am - 1pm
- ☐ 1pm - 5pm
- ☐ 5pm - 8pm

Other: ☐

4. 4. On which floor of the building do you normally locate?

Check all that apply.

- ☐ Ground floor
- ☐ First floor
- ☐ Second floor
- ☐ Third floor

5. 5. Where do you normally locate in the room?

Mark only one oval.

- ☐ Near the window
- ☐ Near the wall
- ☐ In the middle of the room

6. 6. What kind of clothes you normally dress in the room? Please choose a type of top, bottom and shoes.

Check all that apply.

- ☐ Short sleeve shirt
- ☐ Long sleeve shirt
- ☐ T - shirt
- ☐ Jacket
- ☐ Jeans
- ☐ Trousers
- ☐ Knee - length skirt
- ☐ Ankle - length skirt
- ☐ Dress
- ☐ Sneakers
- ☐ Sandals
- ☐ Socks

Other: ☐ _____

7. 7. How satisfied are you with the temperature in the room without air-conditioner or fan?

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	
Very dissatisfied	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Very satisfied

8. 8. If you are dissatisfied, which of the following contributes to your rating?

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	
Hot	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Cold

9. 9. Which period(s) does this problem often occur?

Check all that apply.

	7am - 11am	11am - 1pm	1pm - 5pm	5pm - 8pm	No particular time	Always
Hot	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cold	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10. 10. To solve the problem of temperature, which of the following solution(s) do you use?

Check all that apply.

- ☐ Window blinds (curtain) or shade
- ☐ Opening the window
- ☐ Opening the door
- ☐ Ceiling fan
- ☐ Portable fan
- ☐ Air conditioner
- ☐ Thermostat
- ☐ None of this

Other: ☐ _____

11. 11. Which period(s) do you mostly use this/these solution(s)?

Check all that apply.

- ☐ 7am - 11am
- ☐ 11am - 1pm
- ☐ 1pm - 5pm
- ☐ 5pm - 8pm
- ☐ No particular time
- ☐ Always

12. 12. How many percentage does this solution help you to satisfy with the temperature?

Mark only one oval.

- ☐ 0% - 25%
- ☐ 25% - 50%
- ☐ 50% - 75%
- ☐ 75% - 100%

13. 13. How would you best describe the source of this discomfort that you feel?

Check all that apply.

- ☐ Humidity too high
- ☐ Humidity too low
- ☐ Air movement too high
- ☐ Air movement too low
- ☐ Incoming sun
- ☐ Heat from office/study equipment
- ☐ Clothing policy is not flexible
- ☐ Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat
- ☐ Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)
- ☐ Deficient window (not operable)
- ☐ The outdoor environment

Other: ☐ _____

14. Comments

Thank you so much for your time to answer these questions. I really appreciate all your answers.

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

1	Q.1	Q.2	Q.3	Q.4	Q.5	Q.6	Q.7
2	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Jeans, Trousers, Sandals	2
3	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	Near the window	Long sleeve shirt	1
4		F307	5pm - 8pm	Second floor	Near the wall	Short sleeve shirt, Trousers, Sandals	6
5	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Third floor	Near the window	T - shirt, Jeans, Trousers, Sneakers	2
6	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Third floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, T - shirt, Jacket, Jeans, Trousers, Sneakers	1
7	Student		5pm - 8pm	Third floor	In the middle of the room	T - shirt, Trousers, Sneakers, Socks	6
8	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Third floor	Near the window	Short sleeve shirt, Long sleeve shirt, Trousers, Sneakers, Socks	5
9	Student		7am - 11am	Third floor	Near the window	Short sleeve shirt, Long sleeve shirt, T - shirt, Trousers	1
10	Student	404F	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	Third floor	In the middle of the room	T - shirt, Trousers	1
11	Professor or staff		7am - 11am, 1pm - 5pm	Ground floor	In the middle of the room	T - shirt	5
12	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Ground floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Trousers, Sneakers	2
13	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Third floor	Near the window	Long sleeve shirt, T - shirt	2
14	Student		1pm - 5pm	Second floor	In the middle of the room	Short sleeve shirt, Long sleeve shirt, Trousers, Sneakers, Socks	4
15	Student		1pm - 5pm	Third floor	Near the wall	Short sleeve shirt, Jeans, Sandals	3
16	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Second floor	In the middle of the room	T - shirt, Jeans	3
17	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	T - shirt, Jeans, Trousers, Sneakers	3
18	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm		In the middle of the room	Long sleeve shirt, Jeans, Sneakers	4
19	Student		11am - 1pm, 1pm - 5pm	Ground floor	Near the window	Short sleeve shirt, Knee - length skirt	1
20	Student	207f	7am - 11am	First floor	Near the window	Long sleeve shirt, T - shirt, Jeans, Trousers	1
21	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm	First floor		Long sleeve shirt, T - shirt, Jacket, Jeans, Knee - length skirt, Socks	1
22	Student		1pm - 5pm	Third floor	Near the window	Short sleeve shirt, Long sleeve shirt, T - shirt, Sneakers, Sandals, Socks	2
23	Student	None	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	First floor	Near the window	Trousers, Sandals	1
24	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Ground floor	Near the window	Long sleeve shirt	2
25	Student		1pm - 5pm, 5pm - 8pm	First floor	Near the window	T - shirt, Trousers, Sandals	2
26	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Ankle - length skirt, Sandals	4
27	Student	404F	1pm - 5pm	Third floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Trousers, Sandals	2
28	Professor or staff		3 7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	Near the wall	Long sleeve shirt, Jeans, Sandals	3
29	Student		5pm - 8pm	Third floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Trousers, Sandals	7
30	Professor or staff	307F	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	Second floor	Near the window	Long sleeve shirt, Trousers, Sneakers	2

	Q.1	Q.2	Q.3	Q.4	Q.5	Q.6	Q.7
31	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	Short sleeve shirt, Long sleeve shirt, T - shirt, Jeans, Trousers, Sneakers	7
32	Student		7am - 11am, 11am - 1pm	First floor, Third floor	In the middle of the room	Short sleeve shirt, Long sleeve shirt, T - shirt, Trousers, Sneakers, Socks	1
33	Student	105E	7-5 if I can.	Ground floor, First floor, Second floor, Third floor	Near the window	T - shirt, Jacket, Trousers, Socks	5
34	Student	105E	5pm - 8pm	Ground floor, First floor, Second floor, Third floor	Near the window	T - shirt, Jacket, Trousers, Socks	5
35	Student		7am - 11am	First floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Jacket, Jeans,, Ankle - length skirt, Sneakers, Socks	1
36	Student			Third floor	Near the window	Short sleeve shirt, Dress, Sandals	4
37	Professor or staff			Third floor	Near the window	T - shirt, Sandals	3
38	Student		8am-5pm	First floor	In the middle of the room	Short sleeve shirt, Trousers, Socks	1
39	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm	Third floor	In the middle of the room	T - shirt, Jeans	4
40	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Ground floor, First floor	Near the wall	T - shirt, Jeans, Sneakers	1
41	Student		7am - 11am, 11am - 1pm	Second floor	Near the wall	Long sleeve shirt, Trousers	3
42	Student		1pm - 5pm	First floor	Near the window	T - shirt	2
43	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor, Second floor, Third floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, T - shirt, Jeans	1
44	Student	206F	7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Trousers, Sandals	3
45	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	Dress, Sneakers, Socks	2
46	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Third floor	In the middle of the room	T - shirt, Jeans	1
47	Student	404F , 306F	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	Second floor, Third floor	In the middle of the room	Short sleeve shirt, T - shirt, Jeans, Sneakers, Socks, Pants	1
48	Student		11am - 1pm, 5pm - 8pm	Ground floor	In the middle of the room	Short sleeve shirt, T - shirt, Jeans	5
49	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Jeans, Socks	1
50	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Second floor, Third floor	Near the window	T - shirt, Jacket, Jeans, Ankle - length skirt, Sneakers, Sandals, Socks	2
51	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	T - shirt, Trousers, Sneakers	2
52	Student		5pm - 8pm	First floor	Near the window	Short sleeve shirt, Long sleeve shirt, Knee - length skirt,	1
53	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	T - shirt, Jeans	4
54	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor, Third floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Trousers, Sandals	1
55	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Ground floor	Near the wall	Long sleeve shirt, Jeans, Sandals	1
56	Student	F106	1pm - 5pm	Ground floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, T - shirt, Jeans, Sneakers, Socks	3
57	Student						
58	Student						
59	Student						
60	Student						

	Q. 1	Q.2	Q.3	Q.4	Q.5	Q.6	Q.7
61	Student		1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Trousers, Sneakers	2
62	Student	SF 1	1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	Short sleeve shirt	1
63	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	Ground floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, T - shirt, Jeans, Trousers	1
64	Student		7am - 11am	Second floor	Near the window	Trousers	4
65	Student	B112	Full day	Ground floor	Near the wall	Long sleeve shirt, Jeans, Trousers	3
66	Professor or staff		11am - 1pm	Ground floor	In the middle of the room	Jeans	3
67	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	Near the window	T - shirt	4
68	Student	102F	7am - 11am	Ground floor	Near the window	Trousers, Ankle - length skirt, Dress	1
69	Professor or staff	Laboratory	5pm - 8pm	Ground floor, First floor, Third floor	Near the window	Long sleeve shirt, Trousers, Socks	5
70	Student		1pm - 5pm	First floor	Near the window	Short sleeve shirt	2
71	Student	103F	7am - 11am	Ground floor	In the middle of the room	T - shirt, Jeans, Socks	1
72	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	First floor	Near the wall	Trousers, Dress, Sandals, Socks	6
73	Professor or staff	206A	7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor, Second floor	Near the wall	Short sleeve shirt, Trousers, Sneakers	1
74	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	In the middle of the room	T - shirt, Trousers	1
75	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm		In the middle of the room	Short sleeve shirt, T - shirt, Jeans, Trousers, Sneakers	4
76	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm	Ground floor, Second floor	Near the window	Long sleeve shirt, Trousers, Sneakers	2
77	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	Second floor	In the middle of the room	Short sleeve shirt, T - shirt, Knee - length skirt	1
78	Student	203F	7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor	Near the window	Long sleeve shirt, Ankle - length skirt, Sneakers	3
79	Student	402F	7am - 11am	Third floor	Near the window	T - shirt	3
80	Professor or staff		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor, Second floor	Near the window	Long sleeve shirt, Trousers, Sneakers	3
81	Student	307F	1pm - 5pm	Second floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, Trousers, Sneakers	2
82	Professor or staff	201F	7am - 11am, 1pm - 5pm	Ground floor, First floor	Near the window	T - shirt, Jeans, Sneakers	2
83	Student		7am - 11am	Ground floor	Near the wall	Long sleeve shirt, T - shirt, Jeans, Trousers	1
84	Student		7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	Ground floor, First floor, Third floor	Near the window	Short sleeve shirt, Long sleeve shirt, T - shirt, Trousers, Sneakers	4
85	Student		11am - 1pm, 5pm - 8pm	First floor	Near the window	Long sleeve shirt, Trousers, Sandals	1
86	Student		7am - 11am, 1pm - 5pm	First floor, Second floor, Third floor	In the middle of the room	Long sleeve shirt, T - shirt, Trousers, Socks	1
87	Student						
88	Student						

	Q.8	Q.9 (Chnade)	Q.9 (Froid)	Q.10	Q.11	Q.12
1						
2	1	1pm - 5pm		Air conditioner	11am - 1pm, 1pm - 5pm	50% - 75%
3	1		7am - 11am, 1pm - 5pm	Opening the door, Air conditioner	7am - 11am, 1pm - 5pm	0% - 25%
4				Air conditioner		
5	2	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Window blinds (curtain) or shade, Opening the window, Ceiling fan, Air conditioner	11am - 1pm, 1pm - 5pm	50% - 75%
6	1	7am - 11am, 1pm - 5pm		Ceiling fan, Portable fan, Air conditioner	7am - 11am, 1pm - 5pm	0% - 25%
7	5	1pm - 5pm	7am - 11am	Air conditioner	No particular time	75% - 100%
8		11am - 1pm, 1pm - 5pm	7am - 11am	Window blinds (curtain) or shade, Air conditioner	1pm - 5pm	50% - 75%
9	2	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm		Air conditioner	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	50% - 75%
10	1	Always				
11	3	7am - 11am, 1pm - 5pm		Opening the window, Opening the door, Ceiling fan	7am - 11am, 1pm - 5pm	50% - 75%
12	2	1pm - 5pm	No particular time	Opening the window, Ceiling fan	Always	0% - 25%
13	1	7am - 11am, 1pm - 5pm		Air conditioner	7am - 11am, 1pm - 5pm	50% - 75%
14	2	11am - 1pm	7am - 11am	Ceiling fan, Air conditioner	No particular time	50% - 75%
15	3	1pm - 5pm		None of this	No particular time	0% - 25%
16	4	11am - 1pm	7am - 11am	Opening the window, Opening the door, Ceiling fan, Air conditioner	1pm - 5pm	50% - 75%
17	3	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Air conditioner	11am - 1pm, 1pm - 5pm	75% - 100%
18	4	11am - 1pm, 1pm - 5pm	7am - 11am	Window blinds (curtain) or shade, Opening the window, Ceiling fan, Air conditioner	1pm - 5pm, No particular time	25% - 50%
19	1	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Window blinds (curtain) or shade, Ceiling fan	11am - 1pm, 1pm - 5pm	25% - 50%
20	4	No particular time		Window blinds (curtain) or shade, Air conditioner	No particular time	50% - 75%
21	1	Always		Window blinds (curtain) or shade, Opening the window, Ceiling fan, Portable fan	Always	0% - 25%
22	3	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Opening the window, Opening the door, Portable fan	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	25% - 50%
23	1	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Opening the window, Opening the door, Ceiling fan, Air conditioner	No particular time	75% - 100%
24	2	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm		Opening the door, Ceiling fan	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	50% - 75%
25	2	1pm - 5pm		Opening the window, Opening the door, Ceiling fan, Portable fan	1pm - 5pm, 5pm - 8pm	50% - 75%
26	2	1pm - 5pm		Window blinds (curtain) or shade, Opening the window, Ceiling fan, Air conditioner	No particular time	50% - 75%
27	1	Always		Ceiling fan, Air conditioner	Always	25% - 50%
28	4	11am - 1pm	7am - 11am, 1pm - 5pm	Air conditioner	7am - 11am, 1pm - 5pm	25% - 50%
29	1	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm		Air conditioner	Always	50% - 75%
30	2	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Opening the window, Ceiling fan, Portable fan, Air conditioner	11am - 1pm, 1pm - 5pm	50% - 75%

		Q.8	Q.9 (Chuaed)	Q.9 (Froid)	Q.10	Q.11	Q.12
31							
32	4	11am - 1pm, 1pm - 5pm	7am - 11am, 5pm - 8pm	Window blinds (curtain) or shade, Opening the window, Ceiling fan, Air conditioner, Thermostat	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	50% - 75%	
33	1	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	5pm - 8pm	Air conditioner	7am - 11am, 1pm - 5pm	75% - 100%	
34	3	11am - 1pm, 1pm - 5pm	7am - 11am, 5pm - 8pm	Opening the window, Opening the door, Ceiling fan, Portable fan	am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm	50% - 75%	
35	3	11am - 1pm, 1pm - 5pm	7am - 11am, 5pm - 8pm	Opening the window, Opening the door, Ceiling fan, Portable fan	am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm	50% - 75%	
36	2	11am - 1pm, 1pm - 5pm	No particular time	Window blinds (curtain) or shade, Opening the window, Ceiling fan, Portable fan	1pm - 5pm	25% - 50%	
37	4	7am - 11am, 1pm - 5pm		Window blinds (curtain) or shade, Opening the window	7am - 11am, 1pm - 5pm	50% - 75%	
38	3	11am - 1pm		Window blinds (curtain) or shade, Opening the window, Air conditioner	11am - 1pm, 1pm - 5pm	50% - 75%	
39	2	11am - 1pm, 1pm - 5pm, No particular time, Always	7am - 11am, 5pm - 8pm	Ceiling fan, Portable fan, Air conditioner	11am - 1pm, 1pm - 5pm	75% - 100%	
40	5	1pm - 5pm		Opening the window			
41	1	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm		Opening the window, Ceiling fan	7am - 11am, 1pm - 5pm	25% - 50%	
42	3	11am - 1pm	7am - 11am	Opening the window, Opening the door, Ceiling fan, Air conditioner	11am - 1pm	25% - 50%	
43	2	1pm - 5pm		Portable fan, Air conditioner	1pm - 5pm	50% - 75%	
44	1	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm		Air conditioner	Always	50% - 75%	
45	3	1pm - 5pm	7am - 11am	Opening the window, Opening the door	1pm - 5pm	25% - 50%	
46	2	Always		Air conditioner	Always	50% - 75%	
47	4	1pm - 5pm		Air conditioner	11am - 1pm	50% - 75%	
48	2	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Ceiling fan, Portable fan, Air conditioner, New air conditioner	m - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, Always	75% - 100%	
49	6	7am - 11am, 1pm - 5pm	No particular time	Opening the door, Ceiling fan, Portable fan	7am - 11am, 1pm - 5pm	25% - 50%	
50	3	11am - 1pm, 1pm - 5pm	7am - 11am	Opening the window, Ceiling fan	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	25% - 50%	
51	2	1pm - 5pm		Opening the window, Opening the door, Ceiling fan	Always	0% - 25%	
52	2	11am - 1pm, 1pm - 5pm	7am - 11am	Window blinds (curtain) or shade, Opening the door, Ceiling fan, Air conditioner, Thermostat	11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm, No	50% - 75%	
53	3	11am - 1pm, 1pm - 5pm, No particular time	7am - 11am, No particular time	Opening the window, Ceiling fan, Air conditioner	- 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm -	50% - 75%	
54	3	No particular time	No particular time	None of this	5pm - 8pm	50% - 75%	
55	1	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Window blinds (curtain) or shade, Air conditioner	1pm - 5pm	50% - 75%	
56	4	1pm - 5pm	7am - 11am	Air conditioner	1pm - 5pm	50% - 75%	
57	2	7am - 11am, 1pm - 5pm		Window blinds (curtain) or shade, Portable fan, Air conditioner	7am - 11am, 1pm - 5pm	25% - 50%	
58	1	Always		Opening the window, Opening the door	Always	0% - 25%	
59	1	1pm - 5pm	No particular time	Opening the window, Ceiling fan, Air conditioner	1pm - 5pm	25% - 50%	
60	2	1pm - 5pm	5pm - 8pm	Window blinds (curtain) or shade, Air conditioner	1pm - 5pm	25% - 50%	

	Q.8	Q.9 (Chua de)	Q.9 (Froid)	Q.10	Q.11	Q.12
61						
62	3	11am - 1pm, 1pm - 5pm		Window blinds (curtain) or shade, Air conditioner, it is architectural matter.	11am - 1pm, 1pm - 5pm	25% - 50%
63	2	1pm - 5pm		Air conditioner	Always	50% - 75%
64	1	1pm - 5pm	7am - 11am	Opening the window, Ceiling fan, Portable fan	11am - 1pm, 1pm - 5pm	25% - 50%
65	4	1pm - 5pm		Opening the window, Opening the door, Ceiling fan, Portable fan, Air conditioner	1pm - 5pm	50% - 75%
66	4	1pm - 5pm		Opening the window, Opening the door, Ceiling fan, Air conditioner	Always	75% - 100%
67	2	11am - 1pm	No particular time	Opening the window, Ceiling fan	11am - 1pm	25% - 50%
68	3	11am - 1pm	7am - 11am	Portable fan	1pm - 5pm, 5pm - 8pm	50% - 75%
69	1	11am - 1pm, 1pm - 5pm	5pm - 8pm	Ceiling fan, Air conditioner	Always	25% - 50%
70	2	11am - 1pm	7am - 11am	Opening the window, Opening the door, Ceiling fan	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	50% - 75%
71	2	11am - 1pm	5pm - 8pm	Air conditioner	1pm - 5pm	25% - 50%
72	1	7am - 11am, 1pm - 5pm		Opening the window, Ceiling fan	Always	0% - 25%
73		No particular time	No particular time	Opening the window, Opening the door	No particular time	0% - 25%
74	2	1pm - 5pm		None of this	No particular time	0% - 25%
75	2	Always		Opening the window, Ceiling fan	7am - 11am, 1pm - 5pm	50% - 75%
76	3	No particular time	No particular time	Opening the window, Ceiling fan	7am - 11am, 1pm - 5pm	25% - 50%
77	2	1pm - 5pm	7am - 11am, 5pm - 8pm	Window blinds (curtain) or shade, Opening the window, Ceiling fan	1pm - 5pm	0% - 25%
78	2	1pm - 5pm	7am - 11am	Window blinds (curtain) or shade, Air conditioner	1pm - 5pm	50% - 75%
79	1	1pm - 5pm	No particular time	Window blinds (curtain) or shade, Air conditioner	5pm - 8pm	0% - 25%
80	5	1pm - 5pm		Air conditioner, Thermostat	1pm - 5pm	50% - 75%
81	3	1pm - 5pm	7am - 11am	Opening the window, Opening the door, Portable fan	Always	25% - 50%
82	2	1pm - 5pm	No particular time	Air conditioner	No particular time	25% - 50%
83	2	1pm - 5pm, Always		Opening the window, Opening the door, Ceiling fan	11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm	50% - 75%
84	3	1pm - 5pm	7am - 11am	Window blinds (curtain) or shade, Ceiling fan	1pm - 5pm	25% - 50%
85	1	11am - 1pm, 1pm - 5pm, 5pm - 8pm	11am - 1pm, 1pm - 5pm	Window blinds (curtain) or shade, Air conditioner, Thermostat	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm	25% - 50%
86	2	7am - 11am, 11am - 1pm, 1pm - 5pm		Air conditioner	7am - 11am, 1pm - 5pm, No particular time	0% - 25%
87	2	1pm - 5pm	7am - 11am	Opening the window, Opening the door, Ceiling fan		
88	2	7am - 11am, 1pm - 5pm		Ceiling fan, Portable fan		

1		Q.13
2	Incoming sun	
3	Incoming sun	
4		
5	Humidity too high, Air movement too low, Incoming sun	
6	Humidity too high, Air movement too low	
7	The outdoor environment	
8	Air movement too low, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat	
9	Humidity too low, Air movement too low, Incoming sun, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat	
10		
11	The outdoor environment	
12	Air movement too low, Incoming sun, Clothing policy is not flexible, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment	
13	Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)	
14	Humidity too high, Air movement too low, Heat from office equipment	
15	Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat	
16		
17	Humidity too low, Air movement too low, Heat from office equipment,	
18	Air movement too low, Incoming sun	
19	Air movement too low, The outdoor environment	
20	Humidity too low	
21	Incoming sun, Heat from office equipment, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), Deficient window (not operable)	
22	Air movement too high, Air movement too low, The outdoor environment	
23	Air movement too low	
24	Humidity too low, Air movement too high, Air movement too low, Incoming sun, Heat from office equipment, Clothing policy is not flexible,	
25	Humidity too high, Air movement too low, Incoming sun	
26	Air movement too low, Incoming sun, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat	
27	Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment	
28	Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)	
29	Air movement too high, Incoming sun, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat,	
30	Humidity too high, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)	

Q.13

31	
32	Humidity too low, Air movement too low, Incoming sun, Heat from office equipment,
33	Incoming sun, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)
34	Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)
35	Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)
36	Humidity too low, Incoming sun, Clothing policy is not flexible, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)
37	Humidity too low, Air movement too low
38	Humidity too low, Air movement too low
39	Incoming sun, Heat from office equipment, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat
40	
41	Humidity too low, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), Deficient window (not operable)
42	Air movement too low, Incoming sun, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat
43	Air movement too low
44	Air movement too low, Incoming sun, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment
45	Air movement too low
46	Air movement too low, Incoming sun, Deficient window (not operable)
47	Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)
48	Heat from office equipment, Clothing policy is not flexible, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, The outdoor environment, Aircons are too old .
49	Air movement too low
50	Humidity too high, Air movement too high, Incoming sun, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment
51	Air movement too low, Heat from office equipment, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, The outdoor environment
52	Humidity too low, Air movement too low, Incoming sun, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), Deficient window (not operable), The outdoor environment
53	Humidity too low, Air movement too low, Incoming sun, Clothing policy is not flexible, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment
54	The outdoor environment
55	Incoming sun, Heat from office equipment, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment
56	Air movement too low
57	Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment
58	Humidity too low, Air movement too low, Incoming sun, Heat from office equipment, , Deficient window (not operable)
59	Humidity too low, Air movement too low, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat
60	Humidity too low Air movement too low Incoming sun Heat from office equipment

Q.13

61	
62	Air movement too low, Incoming sun, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat
63	Incoming sun
64	Air movement too low, Incoming sun
65	Humidity too low
66	Humidity too high, Air movement too high, Air movement too low
67	Incoming sun
68	Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)
69	Air movement too low, Incoming sun, The outdoor environment
70	The outdoor environment
71	Incoming sun
72	Humidity too low, Air movement too low, Incoming sun, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat
73	Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), Deficient window (not operable)
74	Air movement too low, Incoming sun
75	Air movement too low, Clothing policy is not flexible
76	Air movement too low, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat
77	Air movement too low, Incoming sun
78	Air movement too low, Incoming sun, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)
79	Incoming sun, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment
80	Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat
81	Deficient window (not operable), Technique of construction.
82	Incoming sun, Heat from office equipment, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment
83	Air movement too low, Incoming sun
84	Air movement too high
85	Humidity too high, Incoming sun, Heat from office equipment, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat,
86	Humidity too high, Incoming sun
87	Humidity too low, Air movement too low, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows), The outdoor environment
88	Incoming sun, Heating/cooling system does not respond quickly enough to the thermostat, Hot/cold surrounding surfaces (floor, ceiling, walls or windows)

ANNEXE 3 : COMPOSITION DES ZONES

Zone	Parois	Emplacement	Surface (m ²)
Right_GF	plancher	ground_floor	134.47
	mur sud	ext_wall	75.80
	mur nord	ext_wall	75.80
	mur est	ext_wall	38.86
	mur ouest	ext_wall	38.86
	plafond	adj_ceiling	134,47
	fenêtre et porte	ext_window1	109.12
Right_F1	plancher	bnd_floor	134.47
	mur sud	ext_wall	68.46
	mur nord	ext_wall	68.46
	mur est	ext_wall	34.65
	mur ouest	adj_wall	34.65
	plafond	adj_ceiling	134.47
	fenêtre et porte	ext_window1	28.8
Right_F2	plancher	bnd_floor	134.47
	mur sud	ext_wall	68.46
	mur nord	ext_wall	68.46
	mur est	ext_wall	34.65
	mur ouest	adj_wall	34.65

	toiture	ext_roof	134.47
	fenêtre et porte	ext_window1	28.8
Front_GF	plancher	ground_floor	191.48
	mur sud	adj_wall	40.11
	mur nord	adj_wall	40.11
	mur est	ext_wall	84.21
	mur ouest	ext_wall	84.21
	plafond	ajd_ceiling	191.58
	fenêtre et porte	ext_window1	108.82
Front_F1	plancher	bnd_floor	115.56
Front_F2	mur sud	adj_wall	40.11
	mur nord	adj_wall	40.11
	mur est	ext_wall	50.82
	mur ouest	ext_wall	50.82
	plafond	ajd_ceiling	115.56
	fenêtre et porte	ext_window1	21.6
Front_F3	plancher	bnd_floor	115.56
	mur sud	adj_wall	40.11
	mur nord	ext_wall	40.11
	mur est	ext_wall	50.82
	mur ouest	ext_wall	50.82

	toiture	ext_roof	115.56
	fenêtre et porte	ext_window1	21.6
Salle1	plancher	ext_floor	334.54
	mur sud	adj_wall	80.22
	mur nord	adj_wall	80.22
	mur est	ext_wall	201.85
	mur ouest	ext_wall	201.85
	plafond	ajd_ceiling	334.54
	fenêtre et porte	ext_window1	204.9
Salle2	plancher	bnd_floor	334.54
	mur sud	adj_wall	80.22
	mur nord	adj_wall	80.22
	mur est	ext_wall	201.85
	mur ouest	ext_wall	201.85
	toiture	ext_roof	334.54
	fenêtre et porte	ext_window1	204.9

ANNEXE 4 : COMPOSITION DES PAROIS

Parois	Couche (intérieure – extérieure)	Epaisseur (m)	Densité (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/ kg K)	Conductivité (kJ/ h m K)
ground_floor	carrelage	0.01	2400	0.792	5.328
	mortier de ciment	0.01	1700	1	3.6
	dalle béton	0.15	2400	1	9
ext_floor	carrelage	0.01	2400	0.792	5.328
	mortier de ciment	0.01	1700	1	3.6
	dalle béton	0.15	2400	1	9
bnd_floor	carrelage	0.01	2400	0.792	5.328
	mortier de ciment	0.01	1700	1	3.6
	dalle béton	0.15	2400	1	9
ext_wall	mortier de ciment	0.01	1700	1	3.6
	bloc de terre cuite creux	0.20	650	1	0.72
	mortier de ciment	0.01	1700	1	3.6
adj_wall	mortier ciment	0.01	1700	1	3.6
	bloc de terre cuite creux	0.10	650	1	0.72
	mortier de ciment	0.01	1700	1	3.6
adj_ceiling	dalle béton	0.15	2400	1	9
	mortier de ciment	0.01	1700	1	3.6

	carrelage	0.01	2400	0.792	5.328
ext-roof	dalle béton	0.15	2400	1	9

ANNEXE 5 : RESULTATS DE SIMULATION TRNSYS

Heure	10 th Fevrier 2020		21 th Fevrier 2020		27 th Fevrier 2020		06 th Mars 2020		16 th Mars 2020	
	Mesure	TRNSYS	Mesure	TRNSYS	Mesure	TRNSYS	Mesure	TRNSYS	Mesure	TRNSYS
	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)
00:00	30.0	27.7	31.5	29.3	32.0	28.8	31.5	29.3	32.5	30.2
01:00	30.0	27.7	31.0	29.0	31.5	28.7	31.5	29.0	32.5	29.5
02:00	30.0	27.6	31.0	28.9	31.5	28.6	31.0	28.9	32.5	29.5
03:00	30.0	27.6	30.5	28.8	31.5	28.5	31.0	28.8	32.5	29.3
04:00	29.5	27.6	30.5	28.8	31.0	28.4	31.0	28.7	32.0	29.2
05:00	29.5	27.6	30.5	28.7	31.0	28.4	31.0	28.6	32.0	29.1
06:00	29.5	27.7	30.5	28.7	31.0	28.3	31.0	28.5	32.0	29.0
07:00	29.5	27.6	30.5	28.6	31.0	28.3	30.5	28.4	32.0	29.0
08:00	29.5	27.6	30.5	28.6	31.0	28.2	30.5	28.3	32.5	29.0
09:00	29.5	27.6	31.0	28.5	31.5	28.1	30.5	28.2	32.5	28.9
10:00	29.5	28.1	31.5	28.4	31.5	28.1	31.0	28.1	32.5	28.7
11:00	30.0	28.2	31.5	28.4	31.5	28.0	31.0	28.8	32.5	28.6
12:00	30.0	28.2	31.5	28.3	32.0	28.0	31.5	29.1	33.0	29.5

13:00	30.5	28.4	32.0	28.3	32.5	28.5	32.0	29.0	33.5	29.9
14:00	31.0	28.6	32.0	28.7	32.5	29.2	32.0	29.2	33.5	30.1
15:00	31.0	28.8	32.0	29.2	32.5	29.3	32.0	29.4	33.0	30.0
16:00	31.0	29.0	32.5	29.4	32.5	29.3	32.5	29.6	34.0	29.0
17:00	31.0	29.5	32.5	29.6	32.5	29.1	32.5	29.7	33.5	30.0
18:00	30.0	28.8	32.0	29.9	32.5	29.2	32.0	29.7	33.5	30.2
19:00	30.0	28.1	32.0	30.0	32.5	29.4	32.0	29.9	33.5	30.4
20:00	30.0	28.1	32.0	30.0	32.0	29.4	32.0	30.6	33.0	30.4
21:00	30.0	27.9	31.5	30.2	32.0	29.8	31.5	30.9	33.0	30.7
22:00	30.0	27.9	31.0	30.4	32.0	30.5	31.5	29.9	32.5	31.0
23:00	29.5	27.9	30.5	30.1	31.5	29.6	31.5	29.9	32.5	31.4

Table A. 1 : Température de l'air entre mesure et simulation TRNSYS pendant les 3 dates dans zone Front_GF

Heure	10 th Fevrier 2020		21 th Fevrier 2020		27 ^h Fevrier 2020		06 th Mars 2020		16 th Mars 2020	
	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)
00:00	28.5	27.7	29.0	29.3	29.5	28.8	28.5	30.0	31.0	30.9
01:00	28.5	27.7	29.0	29.0	29.5	28.7	28.5	30.0	30.5	30.7
02:00	28.5	27.6	29.0	28.9	29.5	28.6	28.5	29.9	30.5	30.7
03:00	28.5	27.6	29.0	28.8	29.5	28.5	28.5	29.9	30.5	30.7
04:00	28.5	27.5	29.0	28.8	29.5	28.4	28.5	29.9	30.5	30.7
05:00	28.5	27.4	28.5	28.7	29.0	28.4	29.0	29.8	30.5	30.6
06:00	28.5	27.4	28.5	28.7	29.0	28.3	29.0	29.8	30.5	30.6
07:00	28.5	27.3	28.5	28.6	29.0	28.3	29.0	29.8	30.5	30.6
08:00	28.5	27.3	28.5	28.6	29.0	28.2	29.0	29.7	30.5	30.5
09:00	28.5	27.4	28.5	28.5	29.0	28.1	29.0	29.6	30.5	30.5
10:00	28.5	27.7	28.5	28.4	29.5	28.1	29.0	29.6	30.0	30.4
11:00	28.5	28.1	28.5	28.4	29.5	28.0	29.0	29.8	29.5	30.4
12:00	28.5	28.2	28.5	28.3	29.5	27.9	29.0	29.9	30.0	30.3
13:00	28.0	28.2	29.0	28.3	29.5	28.5	29.0	29.9	30.5	30.4
14:00	28.5	28.4	29.0	28.7	29.5	29.3	29.0	29.8	30.5	30.7

15:00	28.5	28.6	29.0	29.2	29.5	29.3	29.0	29.9	30.5	30.8
16:00	28.5	28.8	29.0	29.4	29.5	29.1	29.0	29.9	30.5	30.9
17:00	28.5	29.0	29.0	29.6	29.5	29.2	29.0	30.0	30.5	30.9
18:00	28.5	29.5	29.0	30.0	29.5	29.4	29.0	30.0	30.5	31.1
19:00	28.5	28.8	29.0	30.2	29.5	29.4	29.0	30.0	30.5	31.3
20:00	28.5	28.1	29.0	30.4	29.5	29.8	29.0	30.2	30.5	31.4
21:00	28.5	28.1	29.0	30.8	29.5	30.5	29.0	30.5	30.5	31.3
22:00	28.5	27.9	29.0	30.1	29.5	30.4	29.0	30.6	30.5	31.3
23:00	28.5	27.8	29.0	30.1	29.5	29.6	29.0	30.3	30.5	31.4

Table A. 2 : Température de l'air entre mesure et simulation TRNSYS pendant les 3 dates dans zone Front_F1

Heure	10 th Février 2020		21 th Février 2020		27 th Février 2020		06 th Mars 2020		16 th Mars 2020	
	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)	Mesure (° C)	TRNSYS (° C)
00:00	31.5	29.3	31.0	31.9	31.5	31.2	31.0	31.2	34.5	32.4
01:00	31.0	29.3	31.0	31.8	31.5	31.2	31.0	31.1	34.5	32.3
02:00	31.0	29.2	31.0	31.8	31.5	31.2	31.0	31.1	34.0	32.6
03:00	31.0	29.1	31.0	31.7	31.5	31.1	31.0	31.0	34.0	32.6
04:00	31.0	29.0	31.0	31.6	31.5	31.0	31.0	30.9	34.0	32.5
05:00	31.0	28.9	31.0	31.5	31.5	30.9	31.0	30.8	34.0	32.4
06:00	31.0	28.8	30.5	31.4	31.5	30.8	31.0	30.7	33.5	32.3
07:00	31.0	28.7	30.5	31.3	31.5	30.7	30.5	30.6	33.5	32.2
08:00	31.0	28.6	30.0	31.2	31.0	30.6	30.0	30.5	33.5	32.1
09:00	31.0	28.5	29.5	31.1	30.5	30.4	30.0	30.4	33.5	31.9
10:00	30.0	28.6	29.5	31.0	30.0	30.3	30.0	30.2	33.0	31.8
11:00	28.0	28.7	29.5	30.8	29.5	30.2	29.5	30.1	32.5	31.6
12:00	28.0	28.8	28.5	30.7	29.0	30.0	29.5	29.9	32.5	31.5
13:00	28.0	28.9	28.5	30.6	29.0	30.1	29.0	30.0	32.0	31.4
14:00	28.0	29.0	29.5	30.7	29.0	30.3	30.0	30.0	32.5	31.4

15:00	28.0	29.2	29.0	30.8	29.0	30.4	28.5	30.1	32.0	31.3
16:00	27.5	29.4	29.0	30.9	29.0	30.4	28.5	30.2	32.5	31.2
17:00	28.5	29.7	29.0	31.1	30.5	30.4	28.5	30.3	32.0	31.3
18:00	27.0	29.6	28.5	31.3	30.5	30.6	28.5	30.5	32.0	31.3
19:00	28.5	29.6	29.5	31.5	29.0	30.8	29.5	30.6	32.0	31.5
20:00	29.0	29.6	30.0	31.7	29.0	31.0	30.0	30.9	32.5	31.6
21:00	29.5	29.5	30.5	32.0	30.5	31.4	30.5	31.2	33.0	31.8
22:00	30.0	29.5	30.5	32.2	31.0	31.9	30.5	31.5	33.0	32.1
23:00	30.0	29.4	30.5	32.2	31.0	32.0	30.5	31.6	33.5	32.2

Table A. 3 : Température de l'air entre mesure et simulation TRNSYS pendant les 3 dates dans zone Front_F2

Heure	10 th Février 2020		21 th Février 2020		27 th Février 2020		06 th Mars 2020		16 th Mars 2020	
	Mesure	TRNSYS	Mesure	TRNSYS	Mesure	TRNSYS	Mesure	TRNSYS	Mesure	TRNSYS
	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)	(° C)
00:00	32.0	29.5	33.0	32.6	34.0	32.2	33.0	32.4	34.5	33.1
01:00	32.0	29.4	33.0	32.5	33.5	32.1	33.0	32.3	34.5	33.0
02:00	32.0	29.2	33.0	32.4	33.5	32.0	33.0	32.2	34.5	32.9
03:00	32.0	29.0	33.0	32.2	33.5	31.8	33.0	32.0	34.0	32.7
04:00	31.5	28.7	32.5	32.0	33.0	31.6	32.5	31.8	34.0	32.6
05:00	31.5	28.9	32.5	31.8	33.0	31.4	32.5	31.3	34.0	32.4
06:00	31.5	28.9	32.5	31.6	33.0	31.2	32.0	31.1	33.5	32.2
07:00	31.0	28.9	32.0	31.4	32.5	30.9	32.0	30.9	33.5	32.0
08:00	31.0	28.9	32.0	31.2	32.5	30.7	32.0	30.6	33.5	31.8
09:00	31.0	28.9	32.0	31.0	32.5	30.4	32.0	30.4	33.5	31.6
10:00	31.0	28.9	32.0	30.7	32.5	30.2	32.0	30.1	33.5	31.4
11:00	31.0	28.5	32.0	30.5	32.5	29.9	32.0	29.9	33.5	31.1
12:00	31.5	28.7	32.0	30.3	32.5	29.6	32.0	29.7	33.5	30.9
13:00	31.5	29.0	32.0	30.1	33.0	29.4	32.0	29.6	34.0	30.8
14:00	31.5	29.3	32.5	30.0	33.0	29.2	32.5	29.7	34.0	30.7

15:00	32.0	29.6	32.5	30.0	33.5	29.2	32.5	29.8	34.5	30.7
16:00	32.0	29.8	33.0	30.3	34.0	29.4	33.0	30.1	34.5	31.0
17:00	32.0	30.1	33.0	30.6	34.0	29.7	33.0	30.4	35.0	31.4
18:00	32.0	30.1	33.0	31.0	34.0	30.2	33.0	30.8	35.0	32.0
19:00	32.0	30.1	33.0	31.5	34.0	30.8	33.0	31.2	35.0	32.6
20:00	31.5	30.1	33.5	31.9	34.0	31.4	33.0	31.7	35.0	33.2
21:00	31.5	30.0	33.5	32.2	34.0	32.0	33.0	32.0	35.0	33.7
22:00	31.5	29.9	33.0	32.6	34.0	32.5	33.0	32.2	35.0	34.2
23:00	31.5	29.7	33.0	32.8	34.0	32.9	33.0	32.3	35.0	32.5

Table A. 4 : Température de l'air entre mesure et simulation TRNSYS pendant les 3 dates dans zone Right_F2

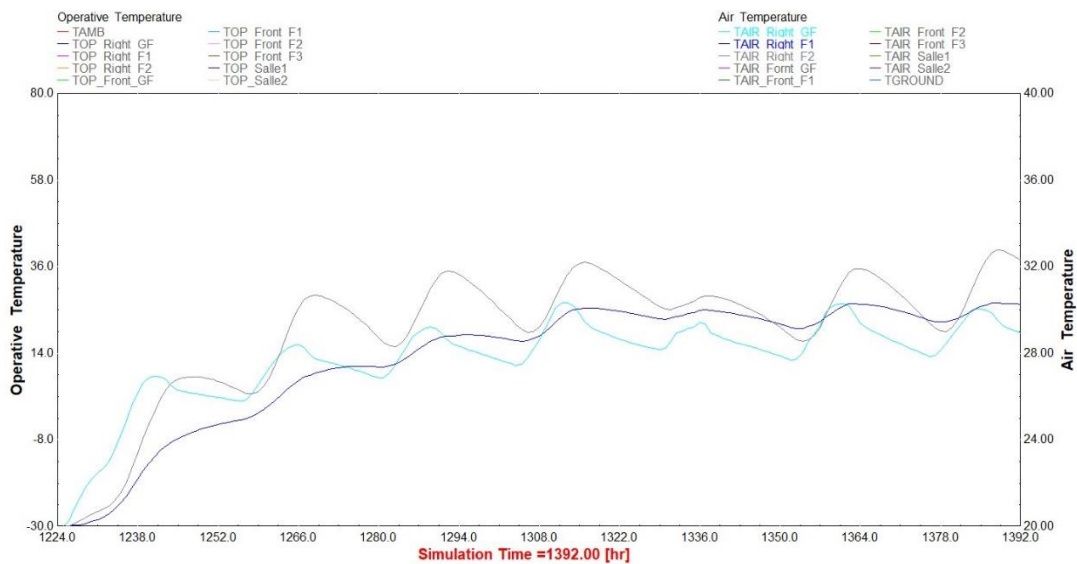


Figure A. 1 : La température de l'air des 3 zones à l'aile droite de 21 février à 28 février

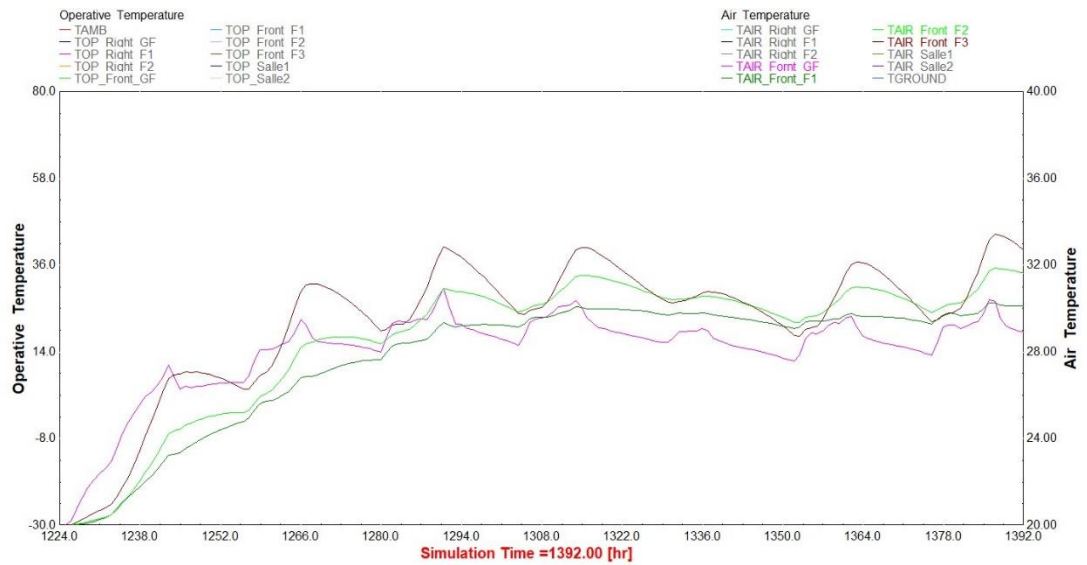


Figure A. 2 : La température de l'air des 4 zones au milieu de 21 février à 28 février

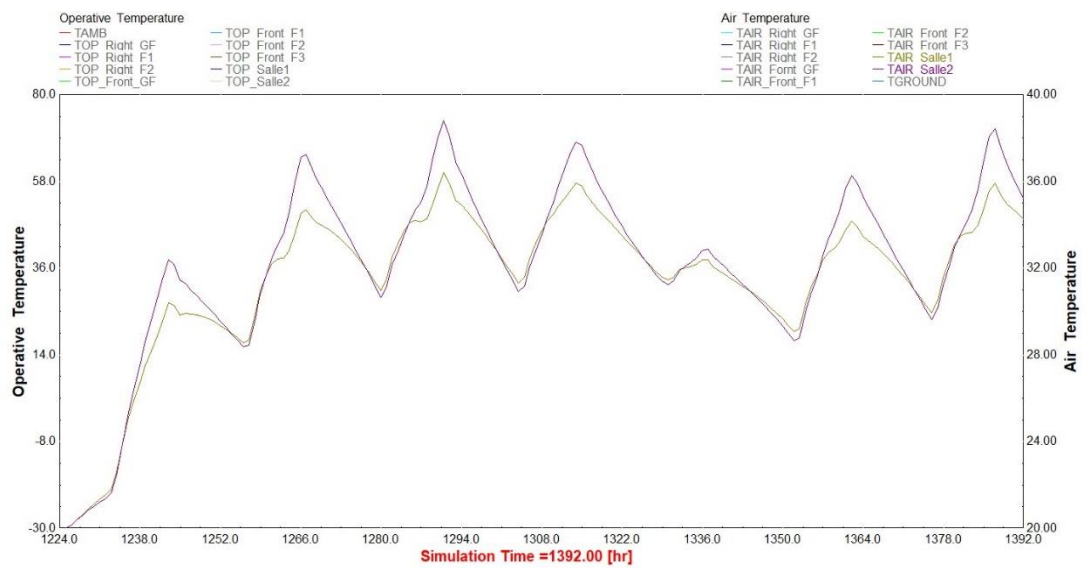


Figure A. 3 : La température de l'air des 2 salle de 21 février à 28 février

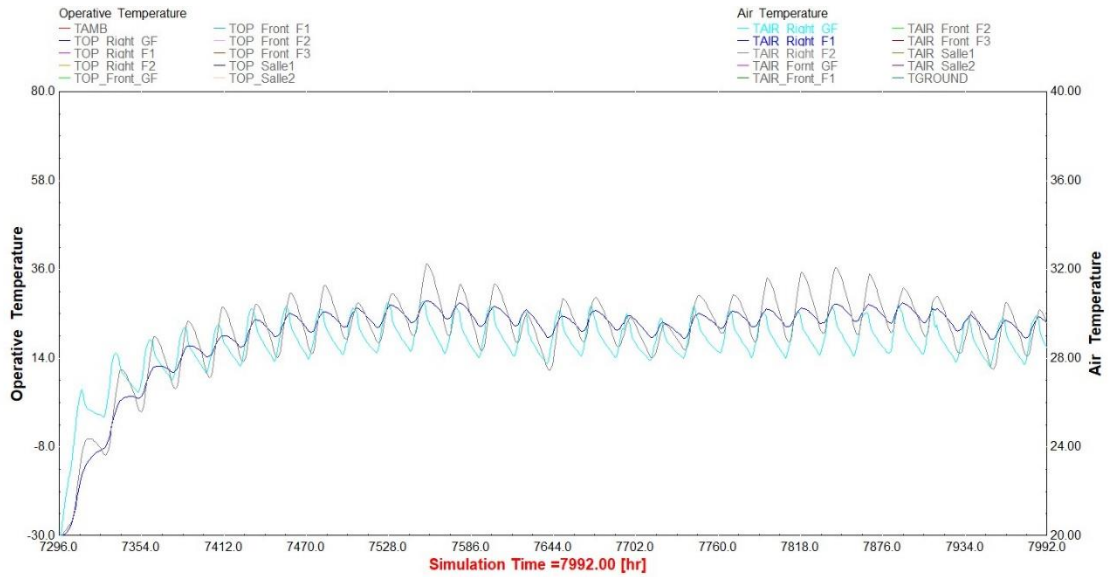


Figure A. 4 : La température de l'air des 3 zones à l'aile droite de novembre

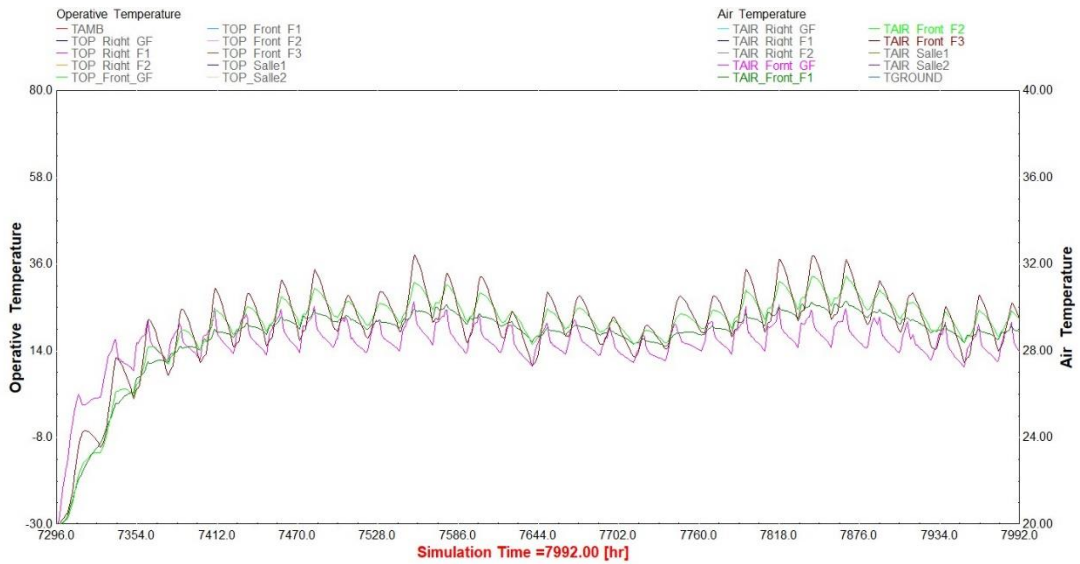


Figure A. 5 : La température de l'air des 4 zones au milieu de novembre

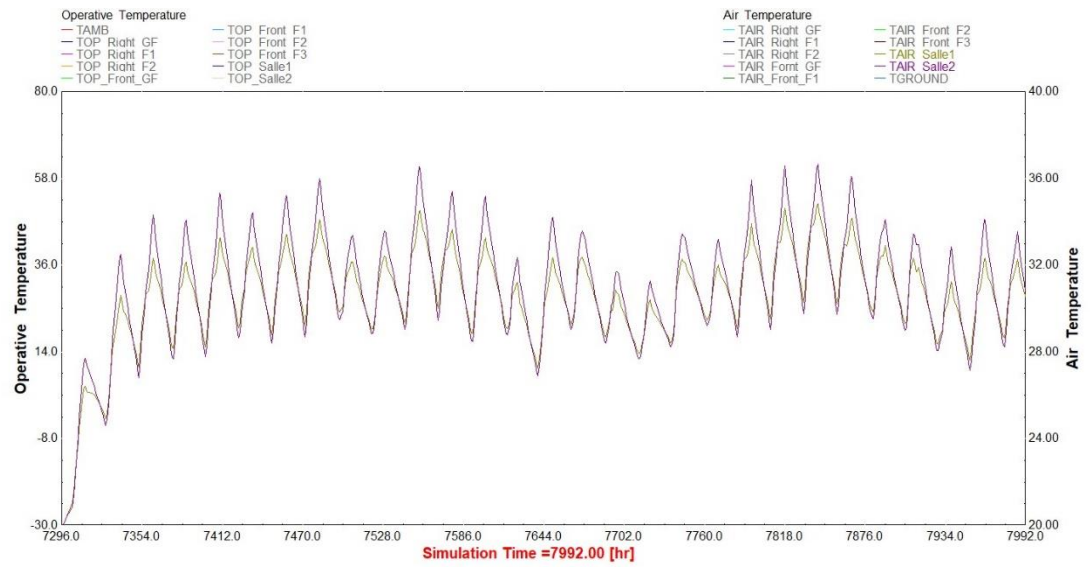


Figure A. 6 : La température de l'air des 2 salles à l'aile droite de novembre