
Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Stratégies bioclimatiques et comportement thermique en climat chaud et humide ǃ Cas d'application au Vietnam : Dreamplex Flexi Office Ngo Quang Huy

Auteur : Soriot, Martin

Promoteur(s) : Leclercq, Pierre; 25542

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24911>

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.

STRATEGIES BIOCLIMATIQUES ET COMPORTEMENT
THERMIQUE EN CLIMAT CHAUD ET HUMIDE.

CAS D'APPLICATION AU VIETNAM : DREAMPLEX FLEXI OFFICE
NGO QUANG HUY.

Etudiant : Martin SORIOT

Promoteur académique : Pierre Leclercq

Faculté : Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

Diplôme : Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master *Ingénieur Civil Architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine*

Année académique : 2024 – 2025

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu durant cette dernière année universitaire.

Je remercie tout d'abord mon promoteur académique, Monsieur Pierre Leclercq, pour avoir accepté de me suivre dans ce projet, pour ses conseils et la pertinence de ses remarques tout au long de mon travail. Mes remerciements vont également à Madame Kimninh Taing, co-promotrice de ce mémoire, pour son suivi dans les premières phases de cette recherche et pour m'avoir aidé à préciser la méthodologie à adopter.

Je tiens à adresser un remerciement particulier à Madame Elisabeth Davin pour son aide précieuse lors de la simulation. Sa disponibilité, ses explications, sa formation ont été décisives dans la progression de ce mémoire. Je remercie aussi Monsieur Philippe André pour m'avoir gracieusement mis à disposition une licence TRNSYS, sans laquelle une partie importante de ce travail n'aurait pu être menée à bien.

Je souhaite également remercier chaleureusement toute l'équipe de l'agence T3 Architects à Hô Chi Minh Ville, qui m'a accueilli avec bienveillance et a grandement facilité la réalisation de cette étude de cas. Leur collaboration et le partage des données ont contribué à la qualité de ce mémoire. Un merci particulier à Monsieur Rafael Lira pour son aide logistique et relationnelle, ainsi qu'à Madame Manon Cochereau pour sa présence, son soutien et sa bienveillance tout au long de cette aventure au Vietnam. Je remercie bien évidemment Monsieur Charles Gallavardin pour sa confiance et de m'avoir permis de vivre cette expérience enrichissante sur place.

Dans un autre cadre, je souhaite remercier mes camarades académiques, qui m'ont toujours encouragé durant ces années d'études. Leur présence m'a été précieuse.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, pour leur soutien constant et pour m'avoir permis de poursuivre mes objectifs avec confiance et sérénité.

Enfin, je remercie tout particulièrement Myriam. Merci pour ton soutien indéfectible, ta patience, ta présence à mes côtés et les nombreuses relectures qui ont contribué à finaliser ce mémoire. Ton appui, tout au long de ces années, a été une force essentielle.

Abstract

Due to its significant environmental impact, the construction sector is frequently criticized in the current context of the global climate crisis. In Southeast Asia, and particularly in Vietnam, a country characterized by a hot and humid climate, rapid urban growth has been accompanied by the widespread emergence of thermally inadequate buildings that rely heavily on air-conditioning. This project examines the potential of bioclimatic strategies to improve the thermal performance of office buildings within this specific climatic context. Its objective is to assess their effectiveness and complementarity in order to provide practical recommendations for similar projects in the region.

The study is based on a literature review of bioclimatic architecture in tropical climates, followed by a case study of the Dreamplex Flexi-Office in Hô Chi Minh City, designed by the architectural firm T3 Architects. After an on-site measurement campaign, a dynamic model was developed and calibrated using TRNSYS software. Several simulation scenarios were then evaluated, encompassing both individual strategies (natural ventilation, greening, solar protection, etc.), and their combination, to analyze their effects on thermal comfort and cooling demand.

The state of the art identified ten key bioclimatic strategies for hot and humid tropical climates. The simulations subsequently demonstrated that certain measures such as natural ventilation, solar shading, and double-skin facades can significantly increase the number of comfort hours while reducing cooling demand. In the cumulative analysis, strategies were ranked according to their thermal impact, feasibility (technical, economic, and architectural), and complementarity potential. This process revealed a threshold beyond which additional strategies provide diminishing returns.

The findings highlight that bioclimatic architecture, although often underutilized in contemporary Vietnamese projects, represents an effective and context-appropriate alternative. It reduces reliance on mechanical systems in office buildings while enhancing occupants' thermal comfort. The study underscores that climate-responsive design, grounded in local climatic data and resource-efficient approaches, can achieve results comparable to costly technological solutions. Nevertheless, the outcomes also emphasize the need for a tailored approach that considers the specific characteristics of each building and its urban environment. Accordingly, this project puts forward recommendations for a more resilient architecture specifically adapted to Vietnam's tropical climate.

Résumé

En raison de sa contribution significative, le secteur de la construction est largement critiqué dans le contexte actuel de crise climatique mondiale. En Asie du Sud-Est, et particulièrement au Vietnam, pays soumis à un climat chaud et humide, la croissance urbaine rapide s'accompagne d'une généralisation de bâtiments inadaptés sur le plan thermique et fortement dépendants de la climatisation. Ce mémoire examine la capacité des stratégies bioclimatiques à améliorer le comportement thermique des bâtiments de bureaux dans ce contexte climatique spécifique. L'objectif est d'évaluer leur efficacité et leur complémentarité, afin de proposer des recommandations pratiques pour des projets similaires dans cette région.

L'étude s'appuie sur une analyse bibliographique portant sur l'architecture bioclimatique en climat tropical, suivie d'une étude de cas menée sur le Dreamplex Flexi-Office à Hô-Chi-Minh Ville, conçu par l'agence T3 Architects. Après une campagne de mesures sur site, un modèle dynamique du bâtiment a été élaboré et calibré à l'aide du logiciel TRNSYS. Plusieurs scénarios de simulation ont ensuite été testés, comprenant des stratégies individuelles (ventilation naturelle, végétalisation, protections solaires, etc.) et des combinaisons, afin d'analyser leurs effets sur le confort thermique et les besoins en refroidissement.

L'état de l'art a permis d'identifier 10 stratégies bioclimatiques principales pour le climat tropical humide. Les simulations ont ensuite montré que certaines d'entre elles, comme la ventilation naturelle, l'ajout de protections solaires ou encore la façade double peau, permettent d'augmenter significativement le nombre d'heures de confort thermique et de réduire les besoins en refroidissement. Pour l'analyse cumulative, un premier classement portant sur l'impact thermique, la faisabilité (technique, économique et architecturale) ainsi que leur potentiel de complémentarité a été réalisé. Cette dernière a finalement permis d'identifier un seuil au-delà duquel l'ajout de nouvelles stratégies n'apporte plus de gains significatifs.

Cette étude souligne que l'architecture bioclimatique, bien que souvent sous-exploitée dans les projets contemporains vietnamiens, représente une alternative efficace et adaptée. Elle permet de réduire la dépendance aux systèmes mécaniques dans les bureaux, tout en améliorant le confort thermique des usagers. Cela met en évidence qu'une conception contextuelle, fondée sur des données climatiques locales et des approches sobres, peut rivaliser en efficacité avec des solutions technologiques coûteuses. Pour autant, les résultats soulignent la nécessité d'une approche sur mesure, tenant compte des spécificités de chaque bâtiment et de son environnement urbain. Ce mémoire propose ainsi des recommandations pour une architecture plus résiliente et spécifiquement adaptée au climat tropical du Vietnam.

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
ABSTRACT	3
RESUME	4
TABLE DES MATIERES	5
LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX	10
1. INTRODUCTION	12
1.1. MOTIVATIONS	12
1.2. CONTEXTE ET ENJEUX	13
1.3. OBJECTIFS	15
2. ETAT DE L'ART	16
2.1. ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE ET ARCHITECTURE VERNACULAIRE	16
2.2. NOTION DE CONFORT THERMIQUE	21
2.3. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DU VIETNAM	25
2.4. CONFORT THERMIQUE AU VIETNAM	29
2.5. ARCHITECTURE AU VIETNAM	32
2.6. NORMES ET REGLEMENTS AU VIETNAM	36
2.7. STRATEGIES BIOCLIMATIQUES EN REGION TROPICALE	37
2.8. ETUDE DE CAS : T3 ARCHITECTS	46
2.9. SYNTHESE DE L'ETAT DE L'ART	50
3. PROBLEMATIQUE ET QUESTION DE RECHERCHE	51

<u>4. METHODOLOGIE</u>	<u>52</u>
METHODOLOGIE GENERALE	52
4.1. CONTEXTE DU CAS D'ETUDE	55
4.2. COLLECTE DES DONNEES	66
4.3. MISE EN PLACE DU MODELE DE SIMULATION	76
4.4. CALIBRATION DU MODELE	81
4.5. MISE EN PLACE DU SCENARIO DE REFERENCE, DES VARIANTES ET DES CRITERES DE COMPARAISON	97
<u>5. RESULTATS</u>	<u>101</u>
5.1. RESULTATS DES MESURES SUR SITE	101
5.2. RESULTATS DE LA SIMULATION	111
<u>6. DISCUSSIONS</u>	<u>129</u>
6.1. ANALYSE DES SCENARIOS INDIVIDUELS	129
6.2. ANALYSE DE SCENARIOS COMBINES	134
6.3. ANALYSE CUMULATIVE	149
6.4. SYNTHESE DE LA DISCUSSION	154
<u>7. CONCLUSIONS</u>	<u>158</u>
7.1. APPORTS	158
7.2. LIMITES	159
7.3. PERSPECTIVES	160
7.4. REFLEXION	161
<u>8. REFERENCES</u>	<u>162</u>
8.1. BIBLIOGRAPHIE	162

Liste des figures

FIGURE 1 : EXEMPLE D'ARCHITECTURE VERNACULAIRE EN INDONESIE – SOURCE : (JHAMARIA, 2020).....	17
FIGURE 2 : ILLUSTRATIONS CONCEPTUELLES DES TECHNIQUES DE REFROIDISSEMENT PASSIF UTILISEES DANS LES MAISONS TRADITIONNELLES MALAISES. (A) JOURNEE ; (B) NUIT - SOURCE : (TOE ET KUBOTA, 2015).....	18
FIGURE 3 : EXEMPLE D'ARCHITECTURE VERNACULAIRE AU VIETNAM – SOURCE : (ABDEL, 2020).....	19
FIGURE 4 : CARTE DU VIETNAM EN 3 REGIONS (VN DECOUVERTE, S. D.).....	25
FIGURE 5 : CARTE DES CLIMATS DE KÖPPEN-GEIGER – PRESENT-DAY MAP (BECK ET AL., 2018).....	26
FIGURE 6 : CARTE DES CLIMATS DE KÖPPEN-GEIGER, ZOOM SUR LE VIETNAM (BECK ET AL., 2018).....	27
FIGURE 7 : TEMPERATURE MOYENNE MAXIMALE ET MINIMALE AU VIETNAM © WEATHERSPARK.COM.....	28
FIGURE 8 : PLUVIOMETRIE MENSUELLE MOYENNE AU VIETNAM © WEATHERSPARK.COM.....	28
FIGURE 9 : VITESSE MOYENNE DU VENT AU VIETNAM © WEATHERSPARK.COM.....	28
FIGURE 10 : MAISONS EN RANGEE A HCM, PHOTO PERSONNELLE.....	33
FIGURE 11 : MAISONS INDIVIDUELLES ET APPARTEMENTS A HCM, PHOTO PERSONNELLE.....	33
FIGURE 12 : BITEXCO FINANCIAL TOWER A HCM, PHOTO PERSONNELLE.....	34
FIGURE 13 : IVOIRE PASTRY SHOP, SAIGON - SOURCE : SITE INTERNET T3 @THAT'S LUMINOUS.....	47
FIGURE 14 : BELGO BREWERY PUB, SAIGON - SOURCE : SITE INTERNET T3 @HERVE GOUBAND.....	48
FIGURE 15 : COUPE TRANSVERSALE THE COCOA PROJECT – SOURCE : T3 ARCHITECTS.....	49
FIGURE 16 : THE COCOA PROJECT, SAIGON – SOURCE : PHOTO PERSONNELLE (GAUCHE) / SITE T3 @HIROYUKI OKI (DROITE).....	49
FIGURE 17 : SCHEMA METHODOLOGIQUE.....	54
FIGURE 18 : TEMPERATURE, PLUVIOMETRIE MENSUELLE ET DIRECTION DU VENT A HCM VILLE @ WEATHERSPARK.COM.....	55
FIGURE 19 : CARTE DE L'EMPLACEMENT DE THAO DIEN @LEPETITJOURNAL.COM.....	56
FIGURE 20 : EMLACEMENT ET ORIENTATION DU DREAMPLEX NGO QUANG HUY @MYMAPS.COM.....	56
FIGURE 21 : DREAMPLEX FLEXI-OFFICE, SAIGON – SOURCE : SITE INTERNET T3 @HIROYUKI OKI.....	57
FIGURE 22 : DREAMPLEX FLEXI-OFFICE, SAIGON – SOURCE : SITE INTERNET T3 @HIROYUKI OKI.....	58
FIGURE 23 : RDC ET ETAGE TYPE DREAMPLEX - SOURCE : SITE INTERNET T3.....	58
FIGURE 24 : COUPE AA – SOURCE : SITE INTERNET T3.....	59
FIGURE 25 : FAÇADE EST, DREAMPLEX, SAIGON – SOURCE : SITE INTERNET T3 @HIROYUKI OKI.....	60
FIGURE 26 : VISUALISATION DU SCENARIO DE REFERENCE S0 – SOURCE : @T3 ARCHITECTS.....	63
FIGURE 27 : VISUALISATION DES SCENARIOS S1-S4 (GAUCHE) ET S5 (DROITE) – SOURCE : @T3 ARCHITECTS.....	64
FIGURE 28 : EMLACEMENTS DES ZONES D'INTERETS - DE GAUCHE A DROITE : RDC, R+1, R+3 - SOURCE : SITE INTERNET T3.....	67
FIGURE 29 : COEFFICIENTS D'ÉCHANGES CONVectifs UTILISES DANS TRNBUILD.....	71
FIGURE 30 : ETANCHEITE A L'AIR – SOURCE : FORMATION PEB.....	74

FIGURE 31 : MODELISATION DES ZONES THERMIQUES DU RDC.....	76
FIGURE 32 : MODELISATION DES ZONES THERMIQUES DU R+1.....	76
FIGURE 33 : MODELISATION DES ZONES THERMIQUES DU R+3.....	77
FIGURE 34 : MODELISATION FINALE TRNSYS 3D.....	77
FIGURE 35 : CARACTERISTIQUES DES VITRAGES DANS TRNBUILD.....	78
FIGURE 36 : GESTION DE LA VENTILATION NATURELLE DANS TRNBUILD.....	78
FIGURE 37 : STRUCTURE DE LA SIMULATION AVEC DONNEES METEOROLOGIQUES REELLES – CAPTURE D’ECRAN TIREE DU LOGICIEL.....	80
FIGURE 38 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR UNE SEMAINE (19/05 - 25/05).....	84
FIGURE 39 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR DEUX SAISONS (TEMPERATURE).....	85
FIGURE 40 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR DEUX SAISONS (HUMIDITE RELATIVE).....	85
FIGURE 41 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR UNE SEMAINE (05/05 - 11/05).....	87
FIGURE 42 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR DEUX SAISONS (TEMPERATURE).....	88
FIGURE 43 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR DEUX SAISONS (HUMIDITE RELATIVE).....	88
FIGURE 44 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR UNE SEMAINE (12/05 - 18/05).....	90
FIGURE 45 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR DEUX SAISONS (TEMPERATURE).....	91
FIGURE 46 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR DEUX SAISONS (HUMIDITE RELATIVE).....	91
FIGURE 47 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR UNE SEMAINE (19/05 - 25/05).....	93
FIGURE 48 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR DEUX SAISONS (TEMPERATURE).....	95
FIGURE 49 : COMPARAISON ENTRE VALEURS MESUREES ET SIMULEES SUR DEUX SAISONS (HUMIDITE RELATIVE).....	95
FIGURE 50 : STRUCTURE DE LA SIMULATION AVEC FICHIER TMY(EPW) – CAPTURE D’ECRAN TIREE DU LOGICIEL.....	98
FIGURE 51 : PARAMETRE DU TYPE CONFORT DANS TRNBUILD – ÉTAGES (GAUCHE) ET RDC (DROITE).....	99
FIGURE 52 : TEMPERATURES DU CAPTEUR 1 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	102
FIGURE 53 : HUMIDITE RELATIVE DU CAPTEUR 1 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	102
FIGURE 54 : TEMPERATURE DU CAPTEUR 2 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	104
FIGURE 55 : HUMIDITE RELATIVE DU CAPTEUR 2 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	104
FIGURE 56 : TEMPERATURE DU CAPTEUR 3 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	106
FIGURE 57 : HUMIDITE RELATIVE DU CAPTEUR 3 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	106
FIGURE 58 : TEMPERATURE DU CAPTEUR 4 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	108
FIGURE 59 : HUMIDITE RELATIVE DU CAPTEUR 4 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	108
FIGURE 60 : TEMPERATURE DU CAPTEUR 5 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	110
FIGURE 61 : HUMIDITE RELATIVE DU CAPTEUR 5 DURANT LA PERIODE D’ETUDE (23/03 – 02/06).....	110
FIGURE 62 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D’HUMIDITE RELATIVE, DE L’INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO S0.....	112
FIGURE 63 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D’HUMIDITE RELATIVE, DE L’INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO S1.....	113

FIGURE 64 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO S2.....	115
FIGURE 65 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO S3.....	117
FIGURE 66 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO S4.....	119
FIGURE 67 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO S5.....	121
FIGURE 68 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO S6.....	123
FIGURE 69 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO S7.....	125
FIGURE 70 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LE SCENARIO BATIMENT ACTUEL.....	127
FIGURE 71 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LA COMBINAISON C1.....	136
FIGURE 72 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LA COMBINAISON C2.....	138
FIGURE 73 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LA COMBINAISON C2	138
FIGURE 74 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LA COMBINAISON C3.....	140
FIGURE 75 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LA COMBINAISON C4.....	142
FIGURE 76 : RESULTATS ANNUELS DE TEMPERATURE, D'HUMIDITE RELATIVE, DE L'INDICE PMV ET DU BESOIN DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE POUR LA COMBINAISON C5.....	145

Liste des tableaux

TABEAU 1 : RECAPITULATIF DES STRATEGIES BIOCLIMATIQUES EN CLIMAT TROPICAL.....	45
TABEAU 2 : RECAPITULATIF DES SCENARIOS DE SIMULATIONS INDIVIDUELS.....	65
TABEAU 3 : CARACTERISTIQUES THERMOPro TP357	67
TABEAU 4 : COEFFICIENT D'ECHANGE CONVECTIF INTERNE @TABLE C.1 ISO/DIS 6946:2015(E).....	70
TABEAU 5 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION BUREAU 5 SUD POUR LA TEMPERATURE	84
TABEAU 6 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION BUREAU 5 SUD POUR L'HUMIDITE RELATIVE	84
TABEAU 7 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION MEETING ROOM NORD POUR LA TEMPERATURE	87
TABEAU 8 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION MEETING ROOM NORD POUR L'HUMIDITE RELATIVE	87
TABEAU 9 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION MEETING ROOM SUD POUR LA TEMPERATURE.....	90
TABEAU 10 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION MEETING ROOM SUD POUR L'HUMIDITE RELATIVE	90
TABEAU 11 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION ANCIEN CAFE POUR LA TEMPERATURE	93
TABEAU 12 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION ANCIEN CAFE POUR L'HUMIDITE RELATIVE	93
TABEAU 13 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION RECEPTION POUR LA TEMPERATURE.....	94
TABEAU 14 : RESUME DES CRITERES DE CALIBRATION RECEPTION POUR L'HUMIDITE RELATIVE.....	94
TABEAU 15 : RESUME FINAL DES CRITERES DE CALIBRATION POUR LA TEMPERATURE.....	96
TABEAU 16 : RESUME FINAL DES CRITERES DE CALIBRATION POUR L'HUMIDITE RELATIVE.....	96
TABEAU 17 : RECAPITULATIF DES MESURES DU CAPTEUR 1 DURANT LA PERIODE D'ETUDE (23/03 – 02/06).....	101
TABEAU 18 : RECAPITULATIF DES MESURES DU CAPTEUR 2 DURANT LA PERIODE D'ETUDE (23/03 – 02/06).....	103
TABEAU 19 : RECAPITULATIF DES MESURES DU CAPTEUR 3 DURANT LA PERIODE D'ETUDE (23/03 – 02/06).....	105
TABEAU 20 : RECAPITULATIF DES MESURES DU CAPTEUR 4 DURANT LA PERIODE D'ETUDE (23/03 – 02/06).....	107
TABEAU 21 : RECAPITULATIF DES MESURES DU CAPTEUR 5 DURANT LA PERIODE D'ETUDE (23/03 – 02/06).....	109
TABEAU 22 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LE SCENARIO S1	114
TABEAU 23 : EVOLUTION ET BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL DU BATIMENT (S1).....	114
TABEAU 24 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LE SCENARIO S2	116
TABEAU 25 : EVOLUTION ET BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL DU BATIMENT (S2).....	116
TABEAU 26 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LE SCENARIO S3	118
TABEAU 27 : EVOLUTION ET BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL DU BATIMENT (S3).....	118
TABEAU 28 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LE SCENARIO S4	120
TABEAU 29 : EVOLUTION ET BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL DU BATIMENT (S4).....	120
TABEAU 30 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LE SCENARIO S5	122
TABEAU 31 : EVOLUTION ET BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL DU BATIMENT (S5).....	122
TABEAU 32 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LE SCENARIO S6	124
TABEAU 33 : EVOLUTION ET BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL DU BATIMENT (S6).....	124

TABLEAU 34 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LE SCENARIO S7	126
TABLEAU 35 : EVOLUTION ET BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL DU BATIMENT (S7).....	126
TABLEAU 36 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LE SCENARIO BATIMENT ACTUEL.....	127
TABLEAU 37 : EVOLUTION ET BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL DU BATIMENT ACTUEL.....	127
TABLEAU 38 : PAS DE TEMPS VALIDE PAR PIECE EN FONCTION DU SCENARIO	130
TABLEAU 39 : NOMBRE D'HEURES DE CONFORT ANNUEL SUPPLEMENTAIRE PAR RAPPORT A S0 (H/AN).....	130
TABLEAU 40 : RECAPITULATIF SYNTHETIQUE DES VALEURS MAXIMALES DES SCENARIOS INDIVIDUELS.....	133
TABLEAU 41 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LA COMBINAISON C1.....	136
TABLEAU 42 : PART RELATIVE DE CHAQUE STRATEGIE DANS LA COMBINAISON C1 POUR LES HEURES DE CONFORT SUPPLEMENTAIRE ANNUEL (H/AN) – S2 : VENTILATION NATURELLE ET S3 : VENTILATION MECANIQUE.....	137
TABLEAU 43 : PART RELATIVE DE CHAQUE STRATEGIE DANS LA COMBINAISON C1 POUR LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE (°C) – S2 : VENTILATION NATURELLE ET S3 : VENTILATION MECANIQUE	137
TABLEAU 44 : PART RELATIVE DE CHAQUE STRATEGIE DANS LA COMBINAISON C2 POUR LES HEURES DE CONFORT SUPPLEMENTAIRE ANNUEL (H/AN) – S1 : TERRASSE VEGETALISEE ET S2 : VENTILATION NATURELLE.....	139
TABLEAU 45 : PART RELATIVE DE CHAQUE STRATEGIE DANS LA COMBINAISON C2 POUR LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE (°C) – S1 : TERRASSE VEGETALISEE ET S2 : VENTILATION NATURELLE.....	139
TABLEAU 46 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LA COMBINAISON C3.....	140
TABLEAU 47 : PART RELATIVE DE CHAQUE STRATEGIE DANS LA COMBINAISON C3 POUR LES HEURES DE CONFORT SUPPLEMENTAIRE ANNUEL (H/AN) – S4 : DOUBLE PEAU ET S5 : PROTECTIONS SOLAIRES	141
TABLEAU 48 : PART RELATIVE DE CHAQUE STRATEGIE DANS LA COMBINAISON C3 POUR LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE (°C) – S4 : DOUBLE PEAU ET S5 : PROTECTIONS SOLAIRES	141
TABLEAU 49 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE POUR LA COMBINAISON C4.....	142
TABLEAU 50 : COMPARAISON DES HEURES DE CONFORT SUPPLEMENTAIRES DANS LA COMBINAISON C4 (H/AN).....	143
TABLEAU 51 : COMPARAISON DES Δ TEMPERATURE DANS LA COMBINAISON C4 (°C)	143
TABLEAU 52 : COMPARAISON DES Δ INDICE PMV DANS LA COMBINAISON C4 (POINT).....	143
TABLEAU 53 : COMPARAISON DES RESULTATS PAR PIECE DE LA COMBINAISON C5.....	145
TABLEAU 54 : COMPARAISON DES HEURES DE CONFORT SUPPLEMENTAIRES DANS LA COMBINAISON C5 (H/AN).....	146
TABLEAU 55 : COMPARAISON DES Δ TEMPERATURE DANS LA COMBINAISON C5 (°C)	146
TABLEAU 56 : COMPARAISON DES Δ INDICE PMV DANS LA COMBINAISON C5 (POINT).....	146
TABLEAU 57 : ORDRE DE PRIORITE DES STRATEGIES INDIVIDUELLES POUR LA REALISATION DE L'ANALYSE CUMULATIVE.....	150
TABLEAU 58 : PAS DE TEMPS VALIDE POUR CHAQUE PIECE D'ETUDE ET A CHAQUE ETAPE DE L'ANALYSE CUMULATIVE...	151
TABLEAU 59 : RESULTATS DE L'ANALYSE CUMULATIVE (SOMME DES 6 PIECES D'ETUDE).....	151
TABLEAU 60 : REPRESENTATION DU BESOIN EN ENERGIE DE REFROIDISSEMENT SENSIBLE ANNUEL (MWh/AN).....	152
TABLEAU 61 : REPRESENTATION DE L'EVOLUTION DU NOMBRE D'HEURES DE CONFORT ANNUEL (H/AN)	152

1.Introduction

1.1. Motivations

En 2025, il existe un consensus scientifique bien établi sur la responsabilité humaine dans le changement climatique. Parmi les secteurs les plus impliqués dans cette crise, le domaine de la construction occupe une place centrale. En 2022, environ 34% de la demande énergétique mondiale, 21% des émissions mondiales de gaz à effet de serre et 37% des émissions de dioxyde de carbone liées à l'énergie et aux processus industriels étaient attribués à ce secteur (United Nations Environment Programme et GlobalABC, 2024).

Une proportion importante de cette consommation d'énergie est attribuable à la production de matériaux à forte intensité carbone, comme le ciment, ou à l'utilisation de technologies visant à contrer les effets climatiques, tel que la climatisation. « La demande mondiale de services de refroidissement des espaces a augmenté de plus de 45% depuis 2010 » (United Nations Environment Programme et GlobalABC, 2024). Cette dynamique se traduit par une sollicitation croissante des réseaux électriques et contribue à l'augmentation continue des émissions de gaz à effet de serre (United Nations Environment Programme et GlobalABC, 2024).

Ces données mettent en évidence la nécessité de limiter ce réchauffement climatique en dessous de 1,5°C, seuil au-delà duquel les conséquences deviennent critiques. Parmi celles-ci figurent l'élévation du niveau des mers, la multiplication des extrêmes climatiques (vagues de chaleur, précipitations intenses et sécheresses prolongées), ainsi que la dégradation des écosystèmes. Les bâtiments, en tant qu'infrastructures et milieux de vie, sont directement exposés à ces perturbations, tout comme les occupants qui les fréquentent (Commission de l'océan Indien, 2020).

1.2. Contexte et enjeux

Une grande partie de l'Asie du Sud-Est se caractérise par un climat chaud et humide, avec des températures mensuelles moyennes dépassant 22-25°C et un taux d'humidité relative dépassant 70% tout au long de l'année (Kubota et al., 2018a). Actuellement, environ 40% de la population mondiale réside dans cette zone intertropicale, et les projections suggèrent que ce chiffre pourrait augmenter à 60% d'ici 2060 (ADEME, 2019).

Les dynamiques préoccupantes constatées à l'échelle mondiale sont également visibles en Asie du Sud-Est. La croissance démographique et économique soutenue, notamment observée dans les pays en développement de la région, a provoqué une expansion rapide du secteur de la construction et des infrastructures (Taing et Leclercq, 2022). Cette croissance a été associée à une hausse notable de la demande en énergie : entre 1990 et 2014, la consommation d'énergies des pays membres de l'ASEAN¹ a été multipliée par 2,6, comparativement à une augmentation de seulement 56% à l'échelle mondiale sur la même période (Kubota et al., 2018a).

Cette tendance est particulièrement mise en évidence par le Vietnam. Comme l'ont souligné OCHSENBEIN et Kretz (2020), la construction au Vietnam a progressé à un rythme moyen d'environ 8% par an depuis 2012, ce qui représente près du double de la moyenne des pays de l'ASEAN, estimée à 4,8% entre 2012 et 2017.

Cette croissance, surtout observée dans les zones urbaines, se produit souvent sans une évaluation appropriée de ses répercussions environnementales (Taing et Leclercq, 2022). En effet, cette expansion n'est pas toujours adaptée au contexte climatique local et dépasse souvent les capacités de mise en œuvre de pratiques durables, ce qui se traduit par une généralisation de l'inconfort thermique et une consommation énergétique élevée dans ces bâtiments. Il est important de souligner que cette problématique ne concerne pas uniquement le secteur résidentiel, mais englobe toutes les typologies de construction, y compris les immeubles de bureaux.

¹ ASEAN : Association des nations de l'Asie du Sud-Est, organisation politique, économique et culturelle.

L'urbanisation croissante, la diminution des espaces végétalisés, la ventilation naturelle insuffisante et l'augmentation de l'imperméabilisation des sols contribuent à l'émergence des îlots de chaleur urbains (ICU), aggravant encore un peu plus l'inconfort thermique en milieu urbain.

Dans ce contexte, l'utilisation de la climatisation s'est répandue comme une réponse à l'augmentation de la température dans les espaces intérieurs. Cependant, cette solution engendre des dérives préoccupantes telles que le surdimensionnement des équipements, le réglage à des températures excessivement basses (souvent entre 16 et 22°C au lieu des 24-26°C recommandés), ainsi que des rejets de chaleur qui contribuent eux aussi à la pollution atmosphérique et à l'intensification des ICU (Commission de l'océan Indien, 2020).

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments représente donc un enjeu stratégique pour concilier le confort thermique et la diminution de l'empreinte environnementale. Pour autant, il est constaté que les normes de performance énergétique et les outils de mesure du confort sont souvent sous-développés ou inadaptés dans la plupart des pays tropicaux. Même en présence de réglementations, leur application reste donc souvent limitée.

L'architecture bioclimatique est ainsi considérée comme une option pertinente qui offre des solutions adaptées aux contraintes climatiques locales tout en promouvant la sobriété énergétique. Cependant, il est constaté que sa mise en œuvre reste limitée ou inadaptée dans de nombreux projets (ADEME, 2019). Cette observation met en évidence la nécessité de conduire des études, fondées sur des cas réels, afin d'évaluer de manière rigoureuse l'efficacité de ces stratégies dans un contexte tropical. Ces recherches sont essentielles pour établir des références locales, opérationnelles et durables.

1.3. Objectifs

La conception d'un bâtiment durable assurant un niveau de confort thermique adéquat pour ses occupants, nécessite, en amont, une analyse approfondie de son comportement face aux conditions climatiques. Ce diagnostic permet d'identifier les leviers d'action disponibles et de définir les stratégies bioclimatiques susceptibles d'être mises en œuvre.

La présente recherche a pour objectif d'évaluer diverses stratégies bioclimatiques appliquées en climat tropical, en vue de formuler des recommandations relatives à leur intégration dans des projets de rénovation ou de conception. Il s'agira notamment d'établir un classement de ces stratégies en fonction de leur efficacité thermique, de leur pertinence contextuelle et de leur coût d'implémentation. Dans un premier temps, chaque stratégie sera étudiée de manière isolée afin d'analyser ses effets spécifiques. Par la suite, des combinaisons de stratégies seront testées dans le but d'évaluer des synergies potentielles ou, à l'inverse, des gains négligeables.

Ce mémoire étant réalisé au Vietnam dans une agence d'architecture internationale, nommée T3 Architects, certains de ces projets vietnamiens serviront d'exemples ou d'études de cas à part entière. La présente recherche a finalement pour objectif de contribuer à l'amélioration du confort thermique et de l'efficacité énergétique des espaces de travail au Vietnam, tout en promouvant une approche de conception durable mais aussi accessible. Il est ainsi visé de fournir aux concepteurs des informations concrètes pour ne pas avoir systématiquement recours à des solutions technologiques coûteuses ou énergivores.

2. Etat de l'art

2.1. Architecture bioclimatique et architecture vernaculaire

Un élément essentiel de l'évolution de l'architecture contemporaine est la dépendance croissante des bâtiments envers les systèmes mécaniques de ventilation, de climatisation et de chauffage. Au cours du XXe siècle, la diffusion de ces technologies a progressivement conduit à reléguer les considérations climatiques au second plan lors de la conception architecturale. Ces avancées techniques ont favorisé la création d'environnements intérieurs uniformisés, souvent au détriment d'une consommation énergétique élevée et d'un fort impact environnemental.

À partir des années 1950-1960, le mouvement architectural connu sous le nom « High-Tech » a conduit à une séparation de plus en plus marquée des projets architecturaux de leur environnement climatique, en accordant une place centrale à la technologie dans le processus de conception (Frampton Kenneth, 1983). En réaction à cette tendance technocentrée, une approche alternative a émergé dans les années 1960 : l'architecture bioclimatique. Cette approche propose une réintégration des données climatiques et environnementales dès le processus de conception, tout en mettant en avant l'utilisation des ressources locales. L'objectif est de réduire la dépendance aux systèmes de régulation et de rétablir une cohérence entre le bâti et son environnement proche.

Sur le plan historique, l'architecte et chercheur Victor Olgyay joue un rôle central dans l'élaboration de l'approche bioclimatique en architecture. En 1963, le terme est explicitement introduit dans son ouvrage de référence « Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism » (Anh Tuan Nguyen, 2013). Cette approche propose une méthode de conception basée sur l'intégration des données climatiques locales et des besoins physiologiques humains. Cette démarche s'inscrit dans une logique de sobriété énergétique, où le bâtiment interagit intelligemment avec son environnement au lieu de s'y opposer (Anh Tuan Nguyen, 2013).

Les stratégies de l'architecture bioclimatique sont principalement issues des savoirs de l'architecture vernaculaire, développés de manière empirique au cours des siècles. Ces constructions traditionnelles, souvent très bien adaptées à leur climat d'origine, montrent la possibilité de faire face à des conditions climatiques extrêmes sans dépendre de technologies mécaniques ou polluantes (Kubota et al., 2018b). L'architecture vernaculaire a connu une évolution progressive en s'adaptant aux conditions naturelles et sociales propres à chaque territoire (Anh Tuan Nguyen, 2013).

Des principes de l'architecture vernaculaire en climat chaud et humide en Asie sont illustrés à travers les quatre exemples suivants :

- En **Indonésie**, l'architecture coloniale hollandaise (début du 20^e siècle) a progressivement évolué pour s'adapter aux conditions climatiques tropicales. Ces bâtiments intègrent plusieurs stratégies de refroidissement passif, telles que la ventilation nocturne, l'emploi de corridors traversants, des plafonds élevés, ainsi que des ouvertures permanentes situées au-dessus des fenêtres et des portes, favorisant la circulation naturelle de l'air (Kubota et al., 2018b).



Figure 1 : Exemple d'architecture vernaculaire en Indonésie – Source : (Jhamaria, 2020)

- En **Malaisie**, la maison traditionnelle malaise constitue, elle aussi, un exemple d'architecture vernaculaire adaptée à son climat local. Construite en bois et surélevée du sol, elle intègre plusieurs stratégies de refroidissement passif, telles que la protection contre l'exposition directe au rayonnement solaire ou la ventilation transversale, contribuant ainsi efficacement à abaisser la température de l'air intérieur (Toe et Kubota, 2015).

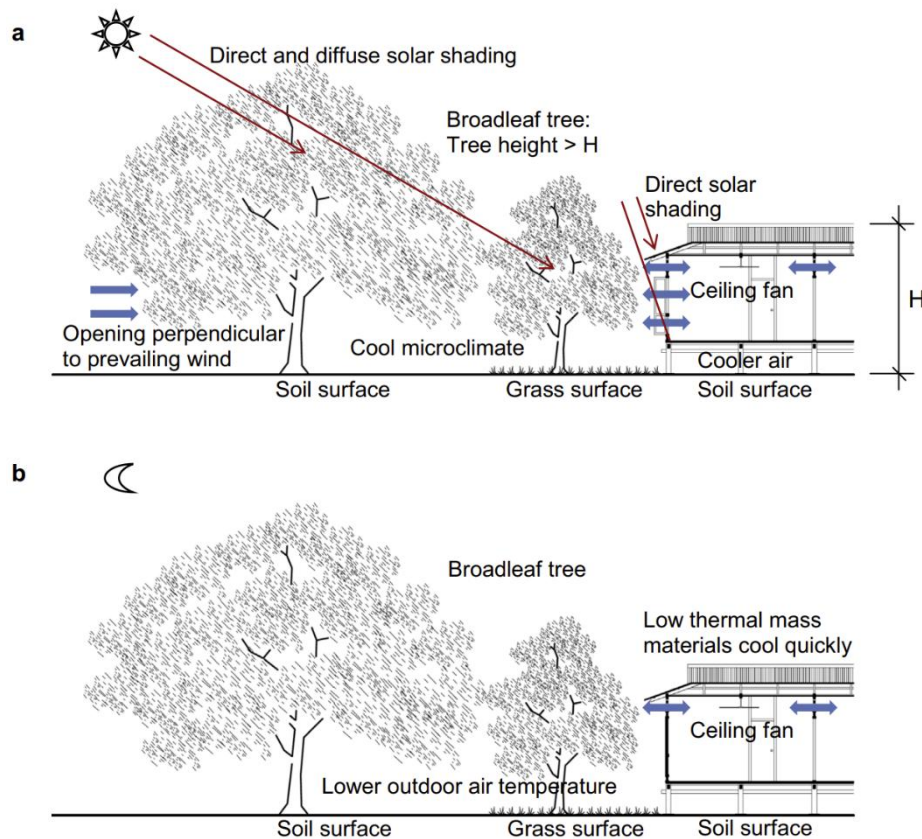


Figure 2 : Illustrations conceptuelles des techniques de refroidissement passif utilisées dans les maisons traditionnelles malaises. (a) Journée ; (b) Nuit - Source : (Toe et Kubota, 2015)

- Au **Népal**, les maisons traditionnelles se distinguent par l'utilisation de matériaux naturels (de la pierre, du bois et de la brique locale, par exemple) et de techniques de construction spécifiques à chaque région. Une habitation dans les régions montagneuses ou dans les zones collinaires ne devant pas répondre aux mêmes besoins (Cahute, 2016). Elles constituent donc des références en matière de conception durable et intégrée au contexte (Kubota et al., 2018b).

- Au **Vietnam**, l'architecture traditionnelle intègre de longue date des principes bioclimatiques adaptés au climat tropical. Cette tradition vernaculaire est notamment illustrée par un proverbe populaire : « planter des palmiers à l'avant (sud) et des bananiers à l'arrière (nord) » (Doan Quang Vinh, communication personnelle, 16 mai 2025). Les palmiers produisent un ombrage filtré, qui permet de réduire la chaleur directe sans pour autant bloquer la ventilation. Quant aux bananiers, ils sont plus faciles à cultiver dans des zones plus humides et ombragées. Ce proverbe souligne donc l'importance de tirer parti de l'ensoleillement, du vent et de l'ombre.



Figure 3 : Exemple d'architecture vernaculaire au Vietnam – Source : (Abdel, 2020)

Les exemples précédents démontrent que l'efficacité de la conception bioclimatique d'un bâtiment ne prend tout son sens que dans un contexte culturel et climatique précis.

Dans ce contexte, l'architecture bioclimatique moderne a poursuivi son développement de manière progressive, en réponse aux problématiques relatives aux ressources naturelles et à l'environnement. Cette évolution a été stimulée par l'émergence de nouveaux concepts, de normes, de découvertes scientifiques, ainsi que par des impératifs liés aux coûts de la construction et à la consommation énergétique (A.T. Nguyen et Reiter, 2017). La conception bioclimatique est désormais essentielle pour la résilience, car elle garantit le confort des occupants face aux pénuries d'énergie et aux phénomènes météorologiques extrêmes (Ungureanu et al., 2024).

A ce stade de l'étude, il convient de considérer plusieurs points. Tout d'abord, même si les traditions constituent des fondements solides pour appréhender la conception bioclimatique, elles sont intrinsèquement liées à la dimension temporelle. Éric Mercer, architecte britannique et ancien président du "Vernacular Architecture Group" (1979 – 1981), a formulé cette notion en définissant l'architecture vernaculaire de la façon suivante : « Les bâtiments vernaculaires sont ceux qui appartiennent à un type communément répandu dans une zone donnée à une époque donnée » (Traduction Libre d'après Mercer, cité par Peate, 1976). Cette définition met en évidence un second point important. La majorité des études consacrées à l'architecture vernaculaire/bioclimatique se concentrent sur les habitations anciennes et sont réalisées principalement en milieu rural. Ces édifices sont, de manière logique, davantage exposés à la nature que le milieu urbain. Or, il est établi que plus de la moitié de la population mondiale réside en zone urbaine, et cette proportion est en constante augmentation. Une projection indique 66% de la population mondiale en milieu urbain d'ici 2050 (Nations Unies, 2014).

2.2. Notion de confort thermique

L'objectif principal d'un bâtiment est de garantir un confort thermique intérieur optimal, quelles que soient les conditions extérieures. Le confort thermique est donc largement reconnu comme un élément crucial, bien qu'il soit également l'un des aspects les plus complexes à appréhender.

Cette notion de confort thermique est définie par l'ASHRAE² comme « une condition d'esprit qui exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement thermique et qui est évaluée par une évaluation subjective » (Traduction libre d'après ASHRAE, 2020). Cette définition englobe des dimensions physiologiques, comportementales et psychologiques, incluant l'interprétation, les préférences individuelles et les réponses subjectives aux conditions environnementales dynamiques (Rodriguez et D'Alessandro, 2019).

Le confort thermique constitue un paramètre essentiel pour la santé, le bien-être et la productivité des individus. En effet, un faible niveau de confort thermique est susceptible d'engendrer une diminution de la productivité, des problèmes de santé et une insatisfaction générales (Al Horr et al., 2016; Frontczak et Wargocki, 2011). Il représente aussi un facteur déterminant dans la conception et l'exploitation des bâtiments, influençant directement la consommation d'énergie des systèmes de chauffage et de refroidissement. Ainsi, un des objectifs principaux consiste souvent à optimiser la satisfaction des occupants tout en améliorant l'efficacité énergétique (Al Horr et al., 2016).

² American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

« Le confort thermique est influencé par un ensemble de six paramètres principaux, lesquels peuvent être classés en deux catégories distinctes » (Kiki et al., 2020) :

- **Paramètres environnementaux**, relatifs au bâtiment et à l'air :
 - Température de l'air (sèche) [°C]
 - Température radiante moyenne des surfaces environnantes [°C]
 - Humidité relative de l'air [%]
 - Vitesse de l'air [m/s].

- **Paramètres personnels**, relatifs aux occupants :
 - Taux métabolique (niveau d'activité) [met]
 - Isolation des vêtements [clo].

Comme mentionné précédemment, en plus de ces six paramètres, d'autres variables telles que l'âge, le genre, l'état émotionnel, l'acclimatation, les attentes et l'adaptation des individus sont également susceptibles d'influencer la perception du confort. En raison des variations physiologiques et psychologiques significatives entre les personnes, il est donc légitime d'affirmer qu'il est difficile, voire impossible de créer un environnement thermique capable de satisfaire l'ensemble des occupants dans un espace donné (ASHRAE, 2020). Bien que le confort thermique constitue un objectif de recherche en physiologie humaine, il a récemment fait l'objet d'une attention accrue dans le secteur du bâtiment, comme en témoigne la hausse des publications dans ce domaine (Kiki et al., 2020). La mise en place de critères de confort est essentielle pour orienter les architectes et les ingénieurs dans la conception d'environnements intérieurs où une proportion significative des occupants bénéficie d'un confort thermique adéquat.

Historiquement, la recherche sur le confort thermique a été structurée autour de deux approches principales (Rodriguez et D'Alessandro, 2019) : les modèles statiques, fondés sur le bilan thermique, et les modèles adaptatifs, issus des études de terrain. Plus récemment, des modèles hybrides ont également été élaborés pour combiner les forces des deux approches précédentes.

2.2.1. Modèles Statiques

Ces modèles évaluent le confort thermique en se basant sur le principe de l'équilibre thermique du corps humain et les échanges de chaleur avec l'environnement immédiat. Le modèle le plus reconnu est le *Predicted Mean Vote* (PMV), élaboré par P.O. Fanger dans les années 1970 (Kiki et al., 2020). Il permet de prédire la sensation thermique moyenne d'un groupe important d'individus sur une échelle standardisée. Le PMV est fréquemment employé en association avec le *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD), qui estime le pourcentage d'occupants insatisfaits de l'environnement thermique (Rodriguez et D'Alessandro, 2019).

Ces modèles statiques sont à la base de normes internationales (Kiki et al., 2020) telles que :

- *ASHRAE Standard 55, 2020* : 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
- *EN15251* : (norme européenne).

Ils sont considérés comme adaptés aux environnements à climats contrôlés (climatisés). Toutefois, ces modèles sont fréquemment remis en question en raison de leur incapacité à prendre en compte l'adaptation physiologique, comportementale et psychologique des occupants dans des environnements réels. En particulier les bâtiments naturellement ventilés et certains climats spécifiques (Anh Tuan Nguyen et al., 2012).

2.2.2. Modèles Adaptatifs

L'approche adaptative a été proposée pour la première fois dans les années 1970 en réponse aux limitations précédentes des modèles statiques et à la nécessité de réaliser des économies d'énergie (Kiki et al., 2020). Le principe fondamental est que « si un changement se produit de manière à provoquer une gêne, les individus réagissent de manière à rétablir le confort » (Yao et al., 2009). Cette recherche de confort peut se traduire par plusieurs types d'ajustements (Mishra et Ramgopal, 2015; Anh Tuan Nguyen, 2013) :

- *Ajustements comportementaux*, à savoir le changement de vêtements, la modification de la posture ou du niveau d'activité, l'ouverture ou la fermeture de fenêtres/portes, ou l'utilisation de ventilateurs. Ces ajustements sont considérés comme les plus efficaces pour maintenir un confort thermique.
- *Ajustements physiologiques*, également appelés acclimatation. Ils font référence aux réponses développées à la suite d'une exposition prolongée à un environnement inconfortable. On retrouve, par exemple, la modification de la température de sudation chez une personne résidant dans un climat chaud.
- *Ajustements psychologiques*, correspondant à l'ajustement des attentes et des préférences.

Grâce à ces ajustements, il a été observé que le confort peut être atteint pour une grande variété de températures intérieures (Yao et al., 2009).

Ces modèles reposent sur les résultats d'enquêtes de terrain et établissent une corrélation entre la température de confort des occupants et les conditions météorologiques extérieures. Ces modèles adaptatifs ont par la suite été intégrés dans des normes telles que l'ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2020). Les modèles adaptatifs prédisent généralement des températures de confort plus élevées dans les bâtiments naturellement ventilés des climats chaud et humides, en comparaison avec les modèles basés sur le bilan thermique, ce qui permet de réaliser d'importantes économies d'énergie (Anh Tuan Nguyen, 2013).

2.2.3. Modèles Hybrides

Ces modèles ont pour objectif de pallier les insuffisances des deux approches précédentes en intégrant les paramètres environnementaux, mais aussi les retours sur la sensation thermique des occupants. Pour cela, le PMV est par exemple combiné à des facteurs adaptatifs. L'Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV) a été élaboré en tenant compte de facteurs tels que la culture, le climat, ainsi que les adaptations sociales, psychologiques et comportementales (Yao et al., 2009). Son développement a été réalisé à l'aide d'une étude de terrain menée auprès de 3621 étudiants dans des bâtiments de conférence non climatisés à Chongqing, en Chine.

Un débat persiste quant à la supériorité d'un modèle par rapport à l'autre. Il est affirmé que les modèles statiques exagèrent la sensation thermique, en particulier dans les bâtiments naturellement ventilés de certaines régions climatiques. D'autres arguments suggèrent que l'approche adaptative simplifiée est susceptible de sous-estimer les résultats du bilan thermique, ce qui pourrait accroître l'inconfort et inciter les occupants à une consommation énergétique accrue pour y remédier (Rodriguez et D'Alessandro, 2019). Cependant, il existe de plus en plus un consensus considérant que les deux approches sont complémentaires. Le modèle de bilan thermique apporte un support théorique, tandis que l'approche adaptative prend en considération les mécanismes d'adaptation humaine et propose une méthode additionnelle pour évaluer diverses situations thermiques (Anh Tuan Nguyen et al., 2012).

Néanmoins, malgré la diversité de ces approches, la question du confort thermique des occupants demeure non résolue dans de nombreuses régions du globe, en particulier au Vietnam, pays objet de cette étude. Plusieurs propositions ont été formulées, mais celles-ci présentent généralement des limites d'applications significatives, empêchant toute généralisation.

Etant donné que les approches de conception visant à assurer le confort thermique varient selon les différentes régions du monde, comme cela a été mentionné précédemment, la section suivante de cette revue de littérature se concentrera sur les modèles de confort thermique proposés pour le Vietnam. L'objectif est de sélectionner le modèle le plus approprié pour évaluer les performances thermiques du bâtiment d'étude.

2.3. Caractéristiques climatiques du Vietnam

Pour aborder la question du confort thermique au Vietnam, il est essentiel de commencer par définir le contexte climatique de ce pays.

Le Vietnam est un pays situé au centre de l'Asie du Sud-Est (Latitude: 15°54'11.02 N; Longitude: 105°48'24.09 E).

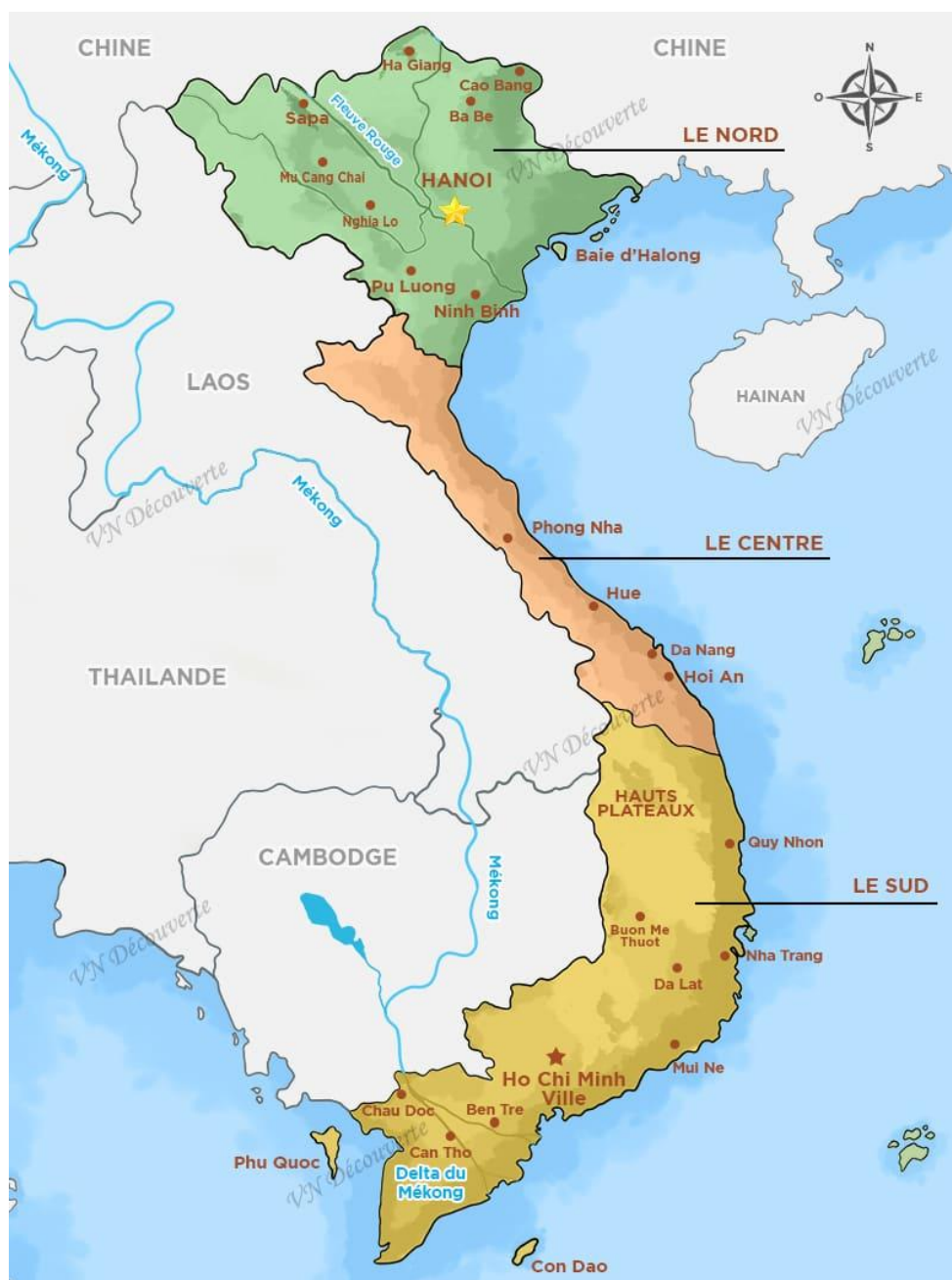
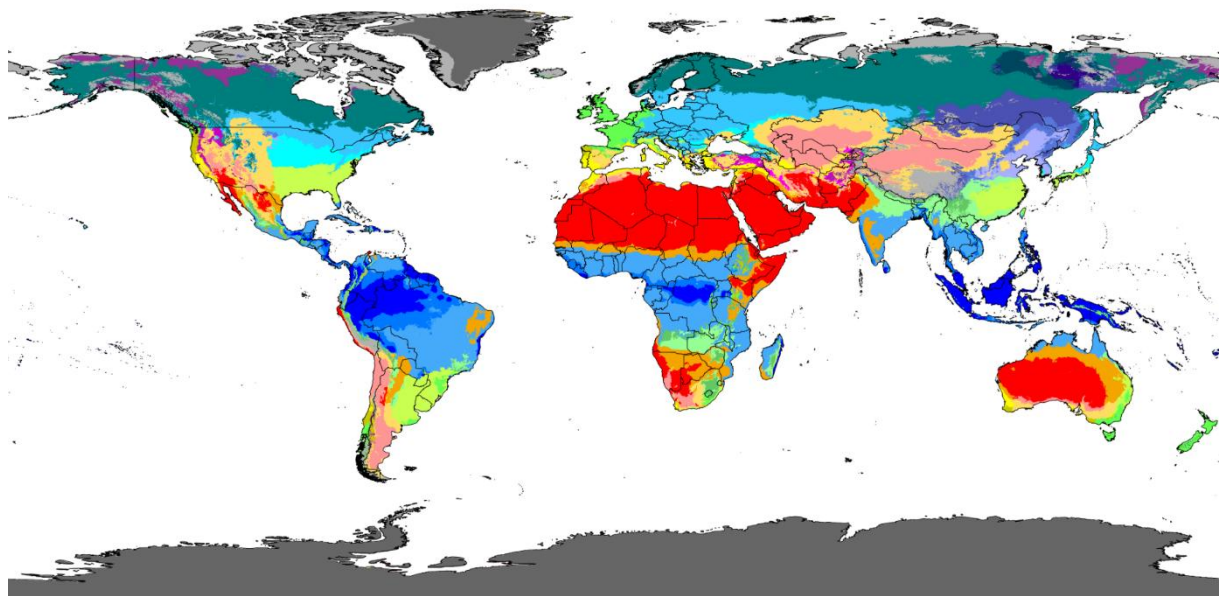


Figure 4 : Carte du Vietnam en 3 régions (VN Découverte, s. d.)

Son territoire s'étend sur une superficie de 331 690 km² et il dénombre 100 352 192 habitants en 2023 (Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, s. d.). Anh Tuan Nguyen (2013) communique des informations générales sur le pays :

« L'ensemble du territoire du Vietnam est situé sous les tropiques (entre les latitudes nord et sud de 24°), ce qui donne une température annuelle moyenne élevée et un rayonnement solaire sur tout le territoire. Les deux tiers du Vietnam sont couverts de montagnes et de hautes terres. Les plaines sont étroites et s'étendent le long du rivage marin. Ces caractéristiques géographiques combinées aux alizés génèrent beaucoup de pluie sur le pays. Les précipitations de la plupart des régions dépassent largement 1000 mm par an. Les fortes précipitations et le rayonnement solaire rendent également l'air très humide avec une plage d'humidité moyenne de 77 à 87% »

Le Vietnam est généralement caractérisé par un climat tropical de mousson. Toutefois, en raison de l'étendue de son territoire, l'emploi de la classification de Köppen-Geiger est considérée comme plus appropriée pour cette étude. Le Système de Classification Climatique Köppen-Geiger est le plus couramment utilisé et permet d'identifier 5 principaux types de climat (totalisant 31 régions climatiques) (Beck et al., 2018) : A-climat tropical, B-climat sec, C-climat tempéré, D-climat continental et E-climat polaire.



Régions climatiques :



Figure 5 : Carte des climats de Köppen-Geiger – Present-day map (Beck et al., 2018)

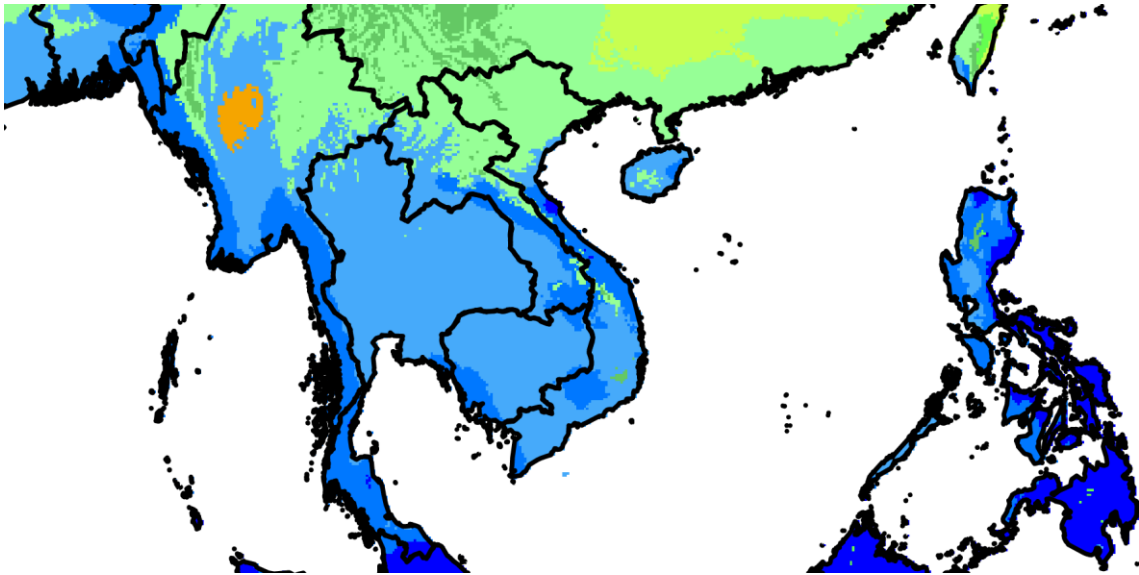


Figure 6 : Carte des climats de Köppen-Geiger, zoom sur le Vietnam (Beck et al., 2018)

Cette classification permet ainsi de subdiviser le pays en trois régions climatiques principales (Beck et al., 2018) :

- **Am** : Au centre du pays et dans plusieurs provinces du Sud-Est, un climat tropical de mousson sans hiver froid est observé, avec des températures fréquemment supérieures à 15°C et susceptibles d'excéder 40°C et une moyenne annuelle des précipitations cumulées importante. Ce climat est fortement influencé par la mer et les tempêtes tropicales. ■
- **Aw et As** : Dans la majeure partie du Sud du pays, un climat tropical de savane est présent, caractérisé par deux saisons distinctes (sèche et humide). Une demande de refroidissement prédominante est constatée tout au long de l'année en raison de températures élevées et du fort rayonnement solaire. ■
- **Cwa** : Au Nord, un climat subtropical humide est identifié, marqué par un hiver court et froid mais des étés longs, chauds et humides. Les températures peuvent y atteindre 40°C. Ces climats sont habituellement trouvés à l'intérieur des continents ou sur leur côte Est. ■

Au Vietnam, l'humidité relative de l'air demeure constamment élevée et atteint fréquemment 90% durant la nuit. La variation diurne de la température est, quant à elle, faible, avec une valeur d'environ 7°C, même en été. Ce phénomène s'explique par l'humidité relative importante et un ciel nuageux qui prévient les déperditions thermiques par rayonnement terrestre (Anh Tuan Nguyen, 2013).

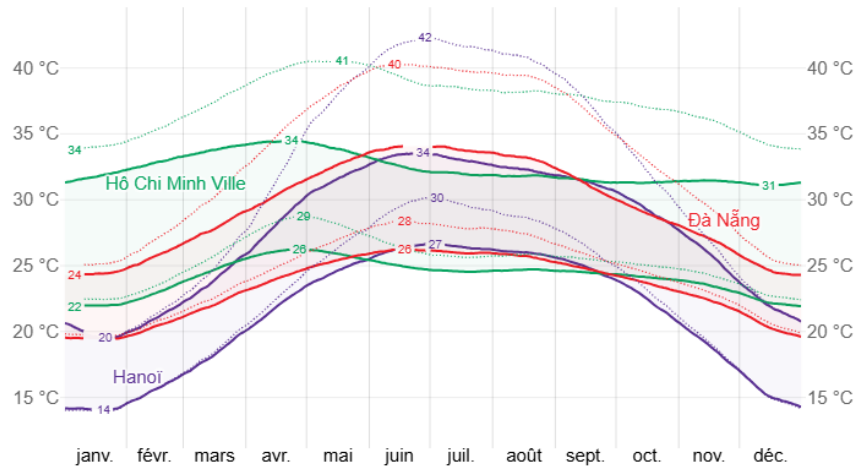


Figure 7 : Température moyenne maximale et minimale au Vietnam © WeatherSpark.com

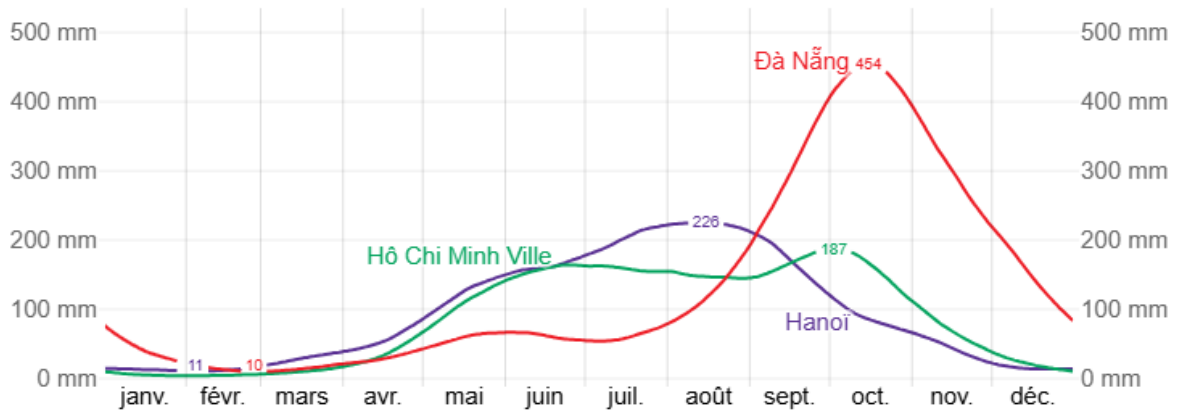


Figure 8 : Pluviométrie mensuelle moyenne au Vietnam © WeatherSpark.com

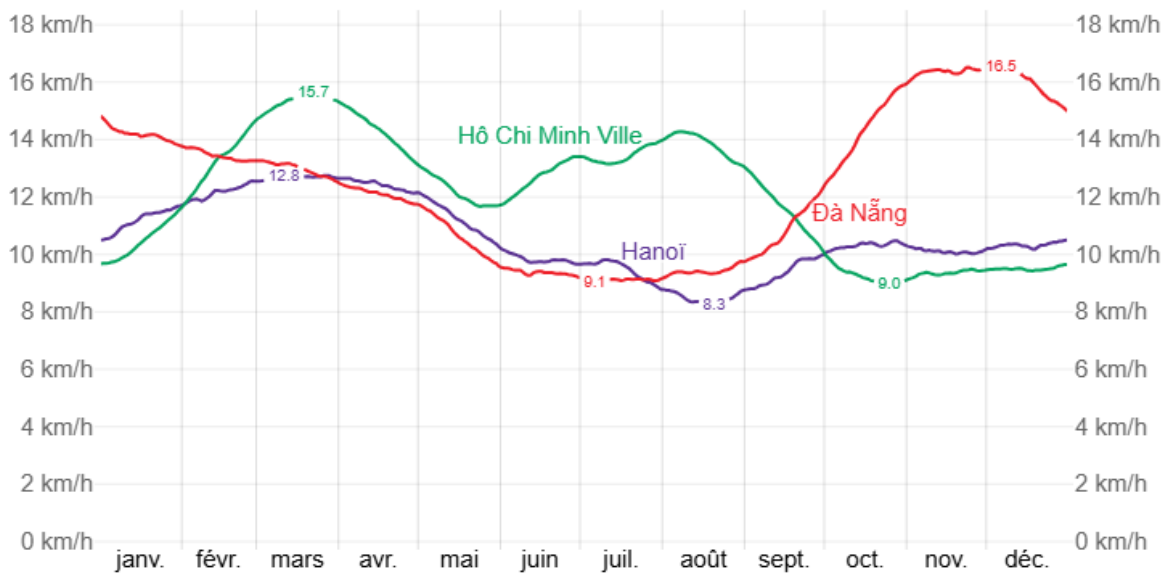


Figure 9 : Vitesse moyenne du vent au Vietnam © WeatherSpark.com

2.4. Confort thermique au Vietnam

Comme mentionné précédemment, les régions tropicales font face à une augmentation significative de la population et des besoins énergétiques pour la climatisation. Pour autant, la recherche relative au confort thermique dans ces régions est paradoxalement limitée en comparaison avec d'autres (2.3 % des 17 688 documents scientifiques sur le confort thermique consultés par Rodriguez et D'Alessandro (2019) portent sur les climats tropicaux) (Kiki et al., 2020).

Les études actuelles indiquent que les populations des régions tropicales chaudes et humides manifestent généralement une tolérance accrue aux températures intérieures élevées et aux environnements humides, mais une tolérance moindre au froid que celle anticipée par les modèles standard (Rodriguez et D'Alessandro, 2019). Les investigations de terrain menées dans les climats tropicaux mettent également en évidence une large gamme de températures de confort intérieures. Par exemple, à Singapour, une température de l'air intérieur de 29,6°C avec ventilation naturelle est jugée acceptable (Taing, 2024). En Thaïlande, la température neutre est d'environ 28°C pour les espaces à ventilation naturelle (NV) et de 25°C pour les espaces climatisés (AC). Enfin, au Mexique, il est suggéré que des températures supérieures à 30°C peuvent être supportées, pourvu qu'un contrôle sur les mécanismes d'adaptation soit disponible (Rodriguez et D'Alessandro, 2019).

Pour prendre une décision éclairée concernant le choix d'un modèle de confort, il est important de distinguer les approches destinées aux bâtiments naturellement ventilés (NV) de celles adaptées pour les bâtiments climatisés (AC), tout en tenant compte des spécificités du Vietnam et de l'Asie du Sud-Est.

Le modèle de Fanger (PMV-PPD) est jugé applicable pour les bâtiments climatisés (Anh Tuan Nguyen, 2013), y compris avec des sujets asiatiques. Cependant, il est à noter que l'humidité au Vietnam descend rarement en dessous de 60% et peut aisément atteindre les 90%. Cette information est importante, car le modèle PMV-PPD est susceptible de produire des résultats inexacts pour une humidité supérieure à 70% (A.-T. Nguyen et Reiter, 2014).

De plus, diverses études sur le terrain, menées notamment au Vietnam et au Bénin, ont mis en évidence une tendance du modèle PMV à surestimer de manière systématique la sensation de chaleur perçue par les occupants. Souvent, ces individus rapportent ressentir une sensation « neutre », alors que le PMV prédit une sensation « chaude » (D. T. K. Le et al., 2025; Anh Tuan Nguyen, 2013). En raison de la surestimation de la chaleur et de ses exigences strictes, l'utilisation du PMV standard peut prédire un pourcentage très faible, voire nul, de temps de confort acceptable au cours de l'année pour les climats chauds et humides du Vietnam (D. T. K. Le et al., 2025). Des résultats nuls peuvent constituer un obstacle dans le cadre d'une analyse comparative.

En ce qui concerne les bâtiments naturellement ventilés, plusieurs études de terrain ont mis en évidence l'inefficacité fréquente du modèle de Fanger standard dans la prédiction de la sensation thermique des occupants (Anh Tuan Nguyen et al., 2012). De plus, dans le cas de vitesse moyenne de l'air supérieure à 0,2 m/s, la norme ASHRAE 55 préconise d'employer le modèle SET à la place. Il permet de « rendre compte de l'effet de refroidissement des vitesses d'air supérieures » (ASHRAE, 2020) mais tout comme le PMV, il reste lui aussi un modèle statique (Kiki et al., 2020).

Finalement, l'approche du confort adaptatif a émergé comme une méthode alternative dans ces contextes. Un modèle a été spécifiquement développé pour l'Asie du Sud-Est, au moyen d'une méta-analyse d'un vaste ensemble d'observations issues d'enquêtes de terrain réalisées dans cette région (Anh Tuan Nguyen et al., 2012). Il a ensuite été validé pour une application spécifique au Vietnam (Anh Tuan Nguyen, 2013). Ce modèle est malheureusement uniquement applicable aux bâtiments utilisant la ventilation naturelle, car les études ont montré que dans les bâtiments climatisés, la température de confort des occupants est presque indépendante de la température extérieure, contrairement à la relation établie ici (Anh Tuan Nguyen et al., 2012).

Pour finir, nous considérons la norme vietnamienne régissant la conception des systèmes de ventilation et de la climatisation, à savoir la TCVN 5687 :2010. Elle repose sur les indices PMV-PPD du modèle de Fanger (Anh Tuan Nguyen, 2013) et ne prend pas en compte l'adaptation humaine, malgré des températures de confort qui semblent légèrement augmentées. Ensuite, la norme TCVN 5687 :2010 définit une plage d'humidité restreinte afin de garantir le confort, tandis que l'ASHRAE 55-2020 ne spécifie pas de limites inférieures pour celle-ci. Une proposition de modèle de confort thermique adapté aux habitants du Vietnam, basée sur la théorie de Fanger mais ajustée aux spécificités climatiques de la région, a défini un seuil minimum d'humidité relative à 30%. Cette limite est déterminée par le constat que l'humidité descend rarement en dessous de ce seuil dans ces climats, et que les habitants du Vietnam ne sont donc pas familiarisés avec les désagréments liés à l'air sec (Anh Tuan Nguyen, 2013). De plus, des recherches effectuées sur le confort adaptatif en Asie du Sud-Est ont révélé une influence restreinte de l'humidité relative sur le ressenti thermique (Anh Tuan Nguyen, 2013). La valeur minimale de 30% pour l'humidité relative sera donc retenue par la suite.

Les précédentes versions des codes du bâtiment au Vietnam prescrivaient des conditions fixes pour les périodes chaudes et froides, sans tenir compte des stratégies de contrôle ni des lieux de construction (Anh Tuan Nguyen, 2013). Bien que la présente norme propose des plages pour différentes saisons et activités, elle pourrait encore être considérée comme insuffisamment « adaptative » dans un sens plus large.

De plus, cette norme n'est pas spécifiquement adaptée aux bâtiments à ventilation naturelle ou mode mixte et utilise donc des plages de vitesse de l'air particulièrement strictes. Des recherches ont révélé que les occupants de bâtiments naturellement ventilés en zones tropicales expriment fréquemment le besoin d'un flux d'air accru pour leur bien-être, avec des vitesses excédant les recommandations de la norme ASHRAE 55 (0,2 m/s pour les bâtiments climatisés et 0,8 m/s pour ceux non climatisés). Certains individus ont même manifesté le désir de vitesse atteignant 1,6 m/s (Dang et Pitts, 2021).

La littérature existante met ainsi en évidence des limitations significatives pour la localisation considérée et pour les bâtiments se distinguant par un fonctionnement autre que NV ou AC. Une étude a été réalisée sur les « Mixed Mode Houses » à Danang, au Vietnam (D. T. K. Le et al., 2025), toutefois, aucune investigation équivalente n'a encore été menée pour d'autres typologies.

2.5. Architecture au Vietnam

L'architecture vietnamienne est confrontée à des enjeux majeurs, requérant un équilibre entre son héritage traditionnel, les impératifs de la modernité urbaine et la nécessité d'adopter des pratiques durables.

L'architecture vernaculaire vietnamienne repose sur des principes adaptés au climat local. Les principales stratégies bioclimatiques identifiées dans la littérature comprennent la ventilation naturelle, l'orientation et la forme du bâtiment, ainsi que la protection solaire (Anh Tuan Nguyen, 2013; Rodriguez et D'Alessandro, 2019; Taing, 2024). Historiquement, l'architecture de cette région a été façonnée par les modes de vie liés aux cours d'eau et aux habitations sur pilotis, en particulier dans les deltas des fleuves Rouge et Mékong (Anh Tuan Nguyen, 2013). Cependant, une part considérable de ce patrimoine a été perdue en raison de conflits armés, de catastrophes naturelles et de politiques étatiques spécifiques. Les structures restantes sont généralement de dimensions modestes et récentes (A.-T. Nguyen et al., 2011).

La croissance urbaine rapide, en particulier observée à Hanoï et Hô Chi Minh-Ville, a entraîné une forte demande en bureaux et en logements, avec un taux d'urbanisation national d'environ 41% (« Recommendations for the Design of an Energy-Efficient and Indoor Comfortable Office Building in Vietnam », 2019).

En ce qui concerne ces catégories de logements en milieu urbain, il est possible d'identifier (D. T. K. Le et al., 2025; A.-T. Nguyen et al., 2011) :

- Les maisons en rangée, également appelées "tube houses". Elles représentent le type de logement le plus courant dans les zones urbaines du Vietnam. Ces constructions se distinguent par leur façade étroite, généralement comprise entre 3 et 5 mètres, et par leur profondeur pouvant atteindre jusqu'à 20 mètres. Elles sont généralement mitoyennes.
- Les maisons individuelles (detached houses), constituent la deuxième catégorie de logements la plus courante, principalement présente dans les zones rurales et suburbaines. Elles nécessitent des terrains de plus grande superficie.
- Les appartements connaissent également une importance croissante dans l'urbanisme des grandes villes.



Figure 10 : Maisons en rangée à HCM, photo personnelle



Figure 11 : Maisons individuelles et appartements à HCM, photo personnelle

Au Vietnam, les nouveaux immeubles de bureaux suivent une tendance architecturale dite "internationalisée", qui se distingue par l'utilisation fréquente de structure en béton, façades en verre et de murs en briques. Ce type de construction a connu un développement significatif au cours des vingt dernières années (début des années 2000) . Le nombre croissant de ce type de bâtiment est associé à une hausse notable de leur consommation énergétique, les positionnant parmi les plus énergivores, après les hôtels, les commerces de détail et les établissements de santé (« Recommendations for the Design of an Energy-Efficient and Indoor Comfortable Office Building in Vietnam », 2019).

La majeure partie de cette consommation est attribuable aux systèmes de ventilation et de climatisation (CVC), ainsi qu'aux équipements de bureau. Cette forte demande énergétique s'explique principalement par une conception architecturale généralement fermée, fondée sur un environnement intérieur intégralement conditionné (« Recommendations for the Design of an Energy-Efficient and Indoor Comfortable Office Building in Vietnam », 2019).

Par ailleurs, il est constaté que de nombreux bâtiments étudiés se distinguent par un manque d'isolation thermique et ne respectent pas les normes du code national QCVN 09:2017/BXD en ce qui concerne la réduction des transferts de chaleur (« Recommendations for the Design of an Energy-Efficient and Indoor Comfortable Office Building in Vietnam », 2019).



Figure 12 : Bitexco Financial Tower à HCM, photo personnelle

Le développement des bâtiments « verts » au Vietnam est encore à un stade préliminaire de développement. A la fin de l'année 2021, à peine plus de 200 projets étaient recensés dans le pays (Li et al., 2025). Le système national d'évaluation environnementale, dénommé LOTUS (version 3.0 publiée en 2019), repose sur une démarche volontaire, contrairement au système singapourien Green Mark, qui lui est obligatoire (Lai et al., 2023). Alors que LOTUS met l'accent sur la réduction de l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI), Green Mark privilégie l'intégration des énergies renouvelables. En revanche, le marché vietnamien propose une gamme croissante de produits et de matériaux de construction à faible impact environnemental. L'Etat soutient également la production de matériaux plus durables, tels que le verre à faible émissivité ou les briques non cuites (T. S. Le et al., 2023).

En règle générale, même avec l'introduction de nouvelles réglementations, il existe toujours des lacunes en ce qui concerne les outils de calcul, les listes de contrôle et autres ressources destinées aux architectes et ingénieurs. La sensibilisation à la conception durable et au confort thermique est limitée, tant chez les concepteurs que chez les occupants (Taing, 2024). Les initiatives récentes, encouragées par les politiques gouvernementales et l'émergence de technologies et de matériaux plus durables, ont pour objectif de réduire cet écart. La poursuite des études et l'amélioration des compétences sont essentielles pour que le Vietnam puisse développer une architecture répondant aux exigences de confort, aux objectifs de durabilité et à la préservation de son identité culturelle (A.-T. Nguyen et al., 2011).

2.6. Normes et règlements au Vietnam

Le Vietnam a mis en place un ensemble de règles et de normes pour encadrer la construction et promouvoir l'efficacité énergétique, cependant, des lacunes subsistent concernant leur mise en œuvre et leur exhaustivité. Voici quelques exemples comprenant des décrets gouvernementaux et des normes techniques :

- QCVN 02 :2009/BXD constitue le code relatif aux données physiques et climatiques naturelles pour la construction (A.-T. Nguyen et al., 2011).
- QCVN 09 :2017/BXD est une réglementation qui établit des exigences pour la performance thermique du bâtiment (résistance thermique minimale des parois opaques, coefficient de gain de chaleur solaire pour les vitrages, etc.) (T. S. Le et al., 2023)
- QCVN 01 :2008/BXD constitue le Code du bâtiment du Vietnam relatif à la planification régionale et urbaine et à la planification résidentielle rurale (Ministry of Construction, 2008).
- TCVN 5687 :2010 et TCVN 9258 :2012 sont des normes nationales pour la ventilation et la climatisation dans les bâtiments résidentiels, publics et industriels et la protection thermique des maisons (Ministry of Construction, 2010).

On peut observer qu'au Vietnam, il n'existe pas de code du bâtiment spécifiquement dédié au concept du "bioclimatisme". Cependant, ces principes de conception sont de plus en plus reconnus et font l'objet de recherches et de recommandations. Les études portant sur la relation entre l'architecture et les climats sont menées au Vietnam depuis les années 1960 (Anh Tuan Nguyen, 2013). Pour autant, les limitations dans le domaine de la recherche conduisent souvent à l'adoption de technologies et de méthodes de conception basées sur des pratiques établies par d'autres pays, dans d'autres contextes climatiques (Taing, 2024).

En résumé, on constate que le Vietnam est en train de mettre en place un cadre réglementaire visant à promouvoir l'efficacité énergétique et la durabilité dans le domaine de la construction, cependant, des défis subsistent en ce qui concerne sa mise en œuvre. Cette démarche se repose sur les normes internationales tout en visant leur adaptation aux conditions climatiques et socio-culturelles spécifiques du pays. Les études soulignent l'importance de renforcer les compétences techniques, en particulier dans les laboratoires de test, et de sensibiliser les praticiens aux principes bioclimatiques. Cette démarche est d'autant plus cruciale dans un contexte où les solutions traditionnelles s'avèrent insuffisantes face aux défis climatiques extrêmes (A.-T. Nguyen et al., 2011).

2.7. Stratégies bioclimatiques en région tropicale

2.7.1. Utilisation de matériaux locaux et biosourcés

La section suivante est dédiée à l'examen des stratégies bioclimatiques principales dans les régions chaude et humide, telles que documentées dans la littérature. Ces stratégies seront succinctement présentées, puis catégorisées en différents groupes de solutions architecturales.

L'architecture vernaculaire des climats tropicaux a développé, au fil des siècles, des solutions adaptées aux conditions climatiques, en utilisant des matériaux locaux disponibles. Ces derniers, souvent caractérisés par leur faible impact environnemental et leur facilité de mise en œuvre, incluent :

- *Terre* (brique de terre, adobe, pisé, terre-paille) : La terre est fréquemment employée pour la construction des murs dans de nombreuses zones tropicales (Guedes et Cantuaria, 2019).

Ce matériau présente une inertie thermique élevée, ce qui permet d'atténuer et de retarder les échanges de chaleur entre l'environnement intérieur et extérieur, si une différence de température entre le jour et la nuit existe. De plus, il démontre une capacité de régulation hygrométrique, en absorbant l'humidité ambiante lorsque son niveau est élevé et en la restituant lorsqu'il est faible. Sa disponibilité et son coût modéré (Guedes et Cantuaria, 2019) contribuent à la réduction de l'empreinte carbone des constructions et au soutien de l'économie locale.

- *Bois* : Largement utilisé pour les colonnes et charpentes (Anh Tuan Nguyen, 2013), le bois présente une faible conductivité thermique et une faible inertie thermique.
- *Végétation* (chaume, feuilles de palmier, paille, bambou) : Fréquemment employée pour les toitures et certains éléments de façade (Anh Tuan Nguyen, 2013).

Le chaume et la paille se distinguent par leur très faible conductivité thermique, ce qui en fait d'excellents isolants naturels, tout en permettant le stockage du carbone comme le bois. (Latha et al., 2015). Au Vietnam, le bambou est fréquemment employé en raison de sa légèreté, de sa disponibilité (Guedes et Cantuaria, 2019; Lai et al., 2023) et de sa faible conductivité thermique. Ce matériau peut également offrir une durabilité prolongée et résister aux infestations s'il est traité de manière adéquate (par exemple, trempé dans la boue puis fumé) (Lai et al., 2023).

- *Pierre* (granit, calcaire, schiste, etc.) : Utilisée pour les murs et plus régulièrement pour les sols car les pierres naturelles comme le granit contribuent à maintenir des températures intérieures plus fraîches (Commission de l'océan Indien, 2020; Latha et al., 2015).

Les matériaux massifs, tels que la pierre et la terre, confèrent une inertie thermique élevée aux parois, ce qui peut aider à maintenir les bâtiments frais plus longtemps. Cependant, leur utilisation doit être réfléchie (Guedes et Cantuaria, 2019), car une inertie thermique non optimisée peut avoir un impact négatif, particulièrement à cause de la libération de chaleur la nuit, au moment où la fraîcheur est recherchée.

Malgré ces nombreux avantages, il est constaté que les matériaux traditionnels sont culturellement considérés comme de qualité ou de valeur inférieure en comparaison avec les matériaux modernes importés (Rodriguez et D'Alessandro, 2019).

2.7.2. Gestion des îlots de chaleur urbains et intérêt de l'étude du microclimat

Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont un phénomène couramment observé dans les milieux urbains. Ils sont caractérisés par des températures plus élevées en zones urbaines par rapport aux régions rurales environnantes, ce qui génère un inconfort thermique pour les populations (Kubota et al., 2018b). Cette question est particulièrement importante dans les régions tropicales, caractérisées par un climat naturellement chaud et humide tout au long de l'année.

La formation et le renforcement des ICU dans les villes tropicales sont attribuables à plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, on peut citer l'augmentation de la densité urbaine et des surfaces imperméabilisées, qui ont une capacité plus élevée d'absorption et de libération de la chaleur dans l'environnement (Kubota et al., 2018b). Ensuite, la réduction de la végétation urbaine et la perturbation de la circulation de l'air, engendrées par le développement des infrastructures et des constructions, ont un impact majeur. Enfin, la chaleur produite par les activités humaines, comme la climatisation, contribue de façon significative aux ICU (Joo Hwa et Boon-Lay, 2006). Dans des villes telles qu'Hanoï, la température atmosphérique moyenne est susceptible d'augmenter de 2,1 °C d'ici 2030, dont 0,6°C est directement attribuable aux modifications de l'affectation des sols, ce qui amplifie l'effet d'ICU (Kubota et al., 2018b).

Par conséquent, l'intégration de la végétation autour des bâtiments représente une stratégie bioclimatique à part entière par son « effet d'oasis » et l'ombrage qu'elle procure (Joo Hwa et Boon-Lay, 2006). Cette méthode est particulièrement efficace pour créer des îlots de fraîcheur, permettant de réduire la température extérieure d'environ 8°C par rapport à un environnement urbain bitumé (Commission de l'océan Indien, 2020). En plus des avantages thermiques, la présence de végétation contribue au confort physiologique et psychologique des individus (Guedes et Cantuaria, 2019).

Une compréhension précise de ce microclimat est aussi indispensable pour la conception de bâtiments qui intègrent des stratégies passives, car elle permet d'améliorer les performances et la durabilité des équipements extérieurs (Goyal, 2023).

L'utilisation de certains matériaux peut aussi jouer un rôle dans la lutte contre les ICU à une échelle plus petite. L'adoption de matériaux à haute réflectivité (albédo élevé) pour les toitures (« cool roof ») ou les surfaces urbaines permet de réduire l'absorption du rayonnement solaire (Kubota et al., 2018b). Dans les contextes climatiques tropicaux, l'écart maximal de températures de surface externe peut finalement atteindre 7°C entre des revêtements de couleurs claires et sombres (Joo Hwa et Boon-Lay, 2006). En plus de prévenir l'accumulation de chaleur, la végétation contribue également à limiter l'imperméabilisation des sols dans les régions avec des précipitations intenses, comme c'est le cas du Vietnam.

2.7.3. Intégration des énergies renouvelables

L'intégration d'énergies renouvelables dans la conception bioclimatique est essentielle pour la construction de bâtiments plus durables et économes en énergie, ce qui en fait une stratégie bioclimatique majeure. Cette démarche s'inscrit dans le cadre du concept de la « Trias Energetica », qui propose une hiérarchie des mesures de durabilité : en premier lieu, réduire la demande énergétique par l'amélioration de la performance thermique du bâtiment, ensuite, maximiser l'utilisation d'énergie renouvelable ; et enfin, si l'emploi d'énergies non renouvelables est inévitable, les exploiter de manière efficiente (A+BE, Architecture And The Built Environment, 2021).

Les énergies renouvelables, telles que le solaire photovoltaïque (potentiel solaire abondant dans les régions tropicales), le solaire thermique, l'énergie éolienne, la biomasse et le biogaz, permettent de produire de l'électricité ou de l'eau chaude sanitaire de manière économiquement viable et avec un faible impact environnemental.

2.7.4. Orientation du bâtiment

L'orientation d'un bâtiment est un choix fondamental lors de sa conception initiale afin d'atténuer les contraintes climatiques et optimiser les gains environnementaux (Commission de l'océan Indien, 2020). Cette orientation influence directement l'exposition au rayonnement solaire et aux vents dominants, ce qui a un impact direct sur le confort thermique et la consommation énergétique (« Recommendations for the Design of an Energy-Efficient and Indoor Comfortable Office Building in Vietnam », 2019).

Privilégier l'orientation du bâtiment le long de l'axe Nord-Sud, permet de diminuer l'exposition, qui peut être particulièrement problématique sur les façades Est et Ouest. L'orientation du bâti doit aussi permettre une ventilation naturelle efficace en s'alignant sur la trajectoire des vents dominants. Il est important de noter que l'optimisation de l'orientation peut être complexe, car la meilleure direction n'est pas toujours une combinaison parfaite entre exposition au soleil et direction du vent. L'environnement urbain peut aussi limiter les choix possibles.

Malgré les avantages de la compacité d'un bâtiment dans les régions froides, celle-ci ne garantit pas nécessairement des économies d'énergie significatives dans les climats chauds et peut même être contre-productive si elle n'est pas appropriée (Abdou, 2020). Dans les climats chauds et humides, il est surtout recommandé que la conception des bâtiments favorise les espaces ouverts afin de permettre une circulation d'air efficace (Guedes et Cantuaria, 2019).

2.7.5. Protection solaire

Les dispositifs de protection solaire sont d'une importance capitale, étant donné qu'ils constituent le moyen le plus efficace de se protéger contre le rayonnement solaire direct (Abdou, 2020), principal responsable de surchauffe (Hashemi et Khatami, 2017). D'après les recherches, ces protections peuvent abaisser la température intérieure d'environ 2,5 à 4,5°C dans les bâtiments non climatisés (Abdou, 2020). Ainsi, ces dispositifs ont un impact significatif sur la consommation énergétique des constructions. Leur performance est particulièrement remarquable durant les périodes les plus chaudes de l'année, où elles peuvent réduire le risque de surchauffe extrême jusqu'à 52% (Hashemi et Khatami, 2017).

Différents types de protections solaires sont mis en œuvre sur un bâtiment :

- *En toiture* : Cette partie du bâtiment est la plus exposée au rayonnement solaire, recevant en moyenne 50 à 60% des apports solaires. Elle peut être protégée par l'installation d'un écran de protection supérieur, créant ainsi une lame d'air ventilée. Ce dispositif permet à la fois de bloquer le rayonnement solaire et d'évacuer la chaleur (Commission de l'océan Indien, 2020). Les débords de toiture, les auvents et les varangues constituent également des protections solaires horizontales efficaces, particulièrement sur les orientations Nord et Sud, moins exposées au soleil rasant de l'Est et de l'Ouest (Commission de l'océan Indien, 2020).
- *Sur les façades* : Les façades incluant les fenêtres et les murs nécessitent également une protection, de préférence externe, car elle intercepte le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la surface concernée (Guedes et Cantuaria, 2019). Pour les façades Est et Ouest, l'emploi de protections solaires verticales est fortement recommandé en raison de l'angle bas du soleil (Commission de l'océan Indien, 2020). Il est même conseillé d'éviter les grandes ouvertures sur ces façades. Ces brise-soleil, qu'ils soient horizontaux ou verticaux, peuvent être fixes ou mobiles (ces derniers pouvant être actionnés manuellement par les occupants ou s'ajuster automatiquement) (Guedes et Cantuaria, 2019). Pour la protection des façades, les doubles peaux sont une solution envisageable. Ces façades de plusieurs couches, composées d'une peau externe protectrice, d'une cavité ventilée, le tout fixé à la structure porteuse du bâtiment, permettent de diminuer le gain de chaleur solaire de l'enveloppe et, donc de réduire la consommation énergétique du bâtiment.

- Par la *composition architecturale et l'environnement immédiat* : La configuration même du bâtiment peut générer de l'ombrage. En utilisant par exemple, des espaces de service moins sensibles à la chaleur, des patios/cours intérieures ou même des bâtiments voisins comme protection (A+BE, Architecture And The Built Environment, 2021; Guedes et Cantuaria, 2019).
- Par la *végétation* : La végétation, notamment les arbres à feuilles persistantes, peut également constituer un écran solaire efficace pour les bâtiments (Guedes et Cantuaria, 2019).

Il est essentiel de protéger les fenêtres des effets néfastes d'un ensoleillement direct excessif, mais il faut aussi veiller à préserver le confort visuel des occupants, élément essentiel pour leur bien-être et leur productivité (Commission de l'océan Indien, 2020). Les protections solaires externes jouent donc un rôle essentiel dans la conception bioclimatique en climat tropical. Toutefois, il est essentiel que leur application soit réalisée dans le cadre d'une approche holistique qui prend en compte également la ventilation naturelle, les matériaux de construction et l'adaptation des occupants, dans le but d'assurer un confort thermique optimal.

2.7.6. Les façades et les toitures vertes

Les façades végétalisées représentent une solution de conception durable de plus en plus adoptée et efficace pour les bâtiments situés en climat tropical. Fonctionnant selon un principe similaire à celui d'une double peau, elles agissent comme un dispositif de protection solaire, diminuant le rayonnement reçu par l'enveloppe du bâtiment.

Ces systèmes sont capables de diminuer la température de l'air tout en améliorant sa qualité en intérieur (Taing, 2020) grâce à l'évapotranspiration. Bien qu'elles puissent entraîner une légère augmentation de l'humidité relative, celle-ci demeure généralement dans la zone de confort en climat tropical (50-70%) (A+BE, Architecture And The Built Environment, 2021).

Leur utilisation est donc courante dans la conception durable, mais elle exige une expertise pour la sélection des espèces végétales, l'entretien et ces techniques de construction.

2.7.7. Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est documentée comme une stratégie fondamentale et économiquement avantageuse pour améliorer le confort thermique en climat tropical (Anh Tuan Nguyen, 2013). Les architectures vernaculaires vietnamiennes intégraient couramment la ventilation naturelle comme stratégie principale (A+BE, Architecture And The Built Environment, 2021).

Ses bénéfices majeurs incluent :

- Contribution au refroidissement physiologique : Elle favorise l'accroissement des déperditions thermiques par convection et évaporation cutanée, ce qui permet de rétablir la neutralité thermique à des températures excédant de près de 3K (environ 3°C) la limite supérieure de confort (Dang et Pitts, 2021).
- Diminution des consommations énergétiques : L'optimisation de la ventilation naturelle constitue une approche économiquement avantageuse pour réduire la demande énergétique des systèmes de refroidissement. Une construction ventilée naturellement peut réduire ses dépenses énergétiques de 40% en comparaison avec un même bâtiment climatisé (Latha et al., 2015).
- Optimisation de la qualité de l'air intérieur : Elle favorise l'évacuation des polluants et du dioxyde de carbone (CO₂), garantissant ainsi un environnement intérieur plus sain (Goyal, 2023).

Pour maximiser l'efficacité de la ventilation naturelle, plusieurs stratégies de conception peuvent être utilisées :

- Orienter la construction en fonction des vents dominants.
- Favoriser les configurations ouvertes, avec un nombre réduit de cloisons intérieures et de portes, pour une circulation optimale de l'air (Guedes et Cantuaria, 2019).
- Prévoir de larges ouvertures et une porosité adéquate sur des façades opposées afin de faciliter la ventilation traversante (Toe et Kubota, 2015).
- Mettre en œuvre la ventilation nocturne pour refroidir la masse thermique de la construction, bien que son efficacité puisse être restreinte dans les climats très humides caractérisés par de faibles variations diurnes (Kubota et al., 2018b; Toe et Kubota, 2015).
- Recourir à des persiennes, jalousies et autres dispositifs ajustables pour réguler le flux d'air (Guedes et Cantuaria, 2019).
- L'emploi de brasseurs d'air (ventilateurs de plafond) permet d'accroître la vitesse de l'air et de réduire la température ressentie de plusieurs degrés (par exemple, de 4°C pour une vitesse de 1 m/s) (Commission de l'océan Indien, 2020).

- Mise en œuvre du refroidissement évaporatif : Cette technique est moins efficace dans les climats très humides car elle augmente une humidité déjà élevée, ce qui peut générer un inconfort supplémentaire (Anh Tuan Nguyen, 2013).

Malgré les avantages qu'elle présente, la mise en œuvre pratique de la ventilation naturelle dans les climats chauds et humides est entravée par plusieurs obstacles :

- Premièrement, comme mentionné précédemment, une inadéquation existe entre les normes de confort traditionnelles et cette approche.
- Deuxièmement, la densité urbaine constitue un obstacle. Un environnement urbain dense peut restreindre la circulation naturelle du vent, diminuant ainsi l'efficacité de la ventilation naturelle (Taing, 2024).
- Enfin, des vitesses d'air supérieures à 1,5 m/s sont susceptibles de générer des désagréments (Commission de l'océan Indien, 2020) dans certains espaces comme les bureaux ou les commerces (la vitesse maximale de l'air dans les bureaux est généralement fixée à 1 m/s pour éviter que les papiers ne s'envolent).

Malgré le fait que la ventilation naturelle puisse considérablement élargir la plage de confort thermique, parvenir à un tel résultat de manière entièrement passive s'avère difficile dans les climats chauds et humides. C'est une solution qui requiert de multiples ajustements ou compromis, mais demeure une stratégie fondamentale et hautement recommandée. Elle est souvent combinée avec d'autres mesures pour maximiser ses résultats.

2.7.8. Isolation thermique par matériau

L'architecture vietnamienne, en particulier les constructions modernes et les maisons urbaines mitoyennes, se distingue souvent par une absence d'isolation thermique (P. A. Nguyen, 2021). Ces logements favorisent plutôt les structures légères et les grandes ouvertures, en se basant davantage sur le refroidissement passif.

Lorsque l'isolation est appliquée, les couches isolantes sont en général localisées au niveau du toit (P. A. Nguyen, 2021), ce qui peut améliorer de manière significative la performance thermique (Abdou, 2020). Néanmoins, l'isolation thermique est souvent perçue comme onéreuse, et ces matériaux restent peu disponibles sur les marchés locaux. Par ailleurs, il est important de noter que l'humidité ambiante peut mettre en péril la longévité des isolants, ce qui nécessite une maintenance plus régulière (Lai et al., 2023). Bien que les constructions non isolées bénéficient du rafraîchissement par convection externe et rayonnement nocturne, elles sont également sujettes à une infiltration importante de chaleur indésirable, ce qui entraîne une augmentation de la demande en climatisation.

Bien que l'isolation thermique puisse améliorer significativement l'efficacité énergétique et le confort dans les bâtiments climatisés au Vietnam, sa mise en œuvre doit être stratégique et adaptée au contexte climatique local (P. A. Nguyen, 2021).

2.7.9. Education et outils de conception

Pour promouvoir l'architecture bioclimatique au Vietnam et dans des climats chauds et humides similaires, il est essentiel de mettre en place des programmes éducatifs et des outils de conception adaptés (A+BE, Architecture And The Built Environment, 2021). Le manque de sensibilisation du grand public et le manque de formation en architecture durable représentent des obstacles majeurs pour la promotion des pratiques architecturales durables au Vietnam (P. A. Nguyen, 2021). Les professionnels de l'architecture sont souvent réticents à utiliser des outils de simulation en raison de leur coût élevé et du temps qu'ils requièrent (Anh Tuan Nguyen, 2013). Toutefois, l'intégration de mesures bioclimatiques efficaces nécessite une formation complète des futurs architectes et le développement d'outils simples et adaptés aux environnements chauds et humides (A+BE, Architecture And The Built Environment, 2021).

2.7.10. Synthèse des stratégies bioclimatiques en région tropicale

La conception bioclimatique est un processus complexe qui nécessite une quantité significative d'informations pour permettre une bonne prise de décision. Une tendance constatée montre une préférence accordée à l'esthétique et aux coûts de construction, au détriment du confort et des performances à long terme (Taing, 2024).

Dans les régions tropicales, où la chaleur et l'humidité sont constantes, les stratégies bioclimatiques doivent reposer sur trois principes essentiels : la protection (contre le rayonnement solaire et les îlots de chaleur urbains), la ventilation (naturelle ou mécanique), ainsi que le choix avisé des matériaux et des sources d'énergie. L'association des connaissances traditionnelles (telles que celles liées à la terre, à la végétation, à la ventilation, etc.) avec les avancées modernes (comme les double-peaux, les simulations thermiques, etc.) offre des opportunités significatives en matière de conception de bâtiments durables et agréables à vivre. Cependant, leur adoption est freinée par des contraintes économiques, culturelles et techniques. Il est donc essentiel d'adopter une approche prenant en compte le contexte local, le microclimat et les usages spécifiques afin de concevoir une architecture tropicale résiliente, économique et parfaitement intégrée à son environnement.

N°	Stratégie	Type	Impact principal	Avantages clés
1	Protection solaire	Enveloppe / Ouvertures	Réduction des apports solaires directs	Diminution de 2,5 à 4,5 °C. Diminution des charges de refroidissement.
2	Ventilation naturelle et mécanique	Système passif / Système actif	Confort thermique réel et perçu Qualité de l'air	Augmentation de la tolérance à la chaleur (+3 °C). Réduction des dépenses énergétiques de 40 %. Amélioration de la qualité de l'air.
3	Façades vertes	Enveloppe / Double peau	Ombre, fraîcheur Filtration de l'air	Diminution de la température à proximité. Amélioration de la qualité de l'air.
4	Végétalisation urbaine	Urbain / Microclimat	Réduction des ICU Rafrâichissement local	Diminution de la température locale (îlots de fraîcheur). Augmentation du confort physiologique et psychologique.
5	Matériaux à albédo élevé	Matériau de surface (toiture non isolée)	Réduction de l'absorption solaire	Réduction de la température de surface externe jusqu'à 7 °C.
6	Energies renouvelables	Système actif	Réduction de la consommation d'énergie	Diminution de l'impact environnemental. Production locale d'énergie.
7	Matériaux locaux	Matériau	Régulation de l'humidité Déphasage de l'apport de chaleur	Diminution de l'impact environnemental (matériaux locaux et bas carbone). Favorise l'économie locale.
8	Orientation du bâti	Implantation	Limite les apports solaires Prise en compte des vents dominants	Réduction des besoins en climatisation. Favorise la ventilation naturelle.
9	Isolation thermique (toiture prioritaire)	Enveloppe / Matériau	Réduction des transferts thermiques	Amélioration du confort et de l'efficacité énergétique.
10	Outils d'aide à la conception (BIM, BPS...)	Outil de conception	Permet une optimisation générale	Aide à la décision dès la phase de conception.

Tableau 1 : Récapitulatif des stratégies bioclimatiques en climat tropical

2.8. Etude de cas : T3 Architects

Comme mentionné plus tôt, nous avons eu la chance dans le cadre de ce mémoire de travailler au sein de l'agence franco-vietnamienne T3 ARCHITECTS. C'est une équipe internationale d'architectes et de designers d'intérieur qui s'impose aujourd'hui comme une référence de l'architecture durable et frugale en Asie du Sud-Est. Fondée par Monsieur Charles GALLAVARDIN et Madame Tereza GALLAVARDIN, l'agence est basée à Hô Chi Minh Ville (Vietnam), avec une antenne à Phnom Penh. Elle développe une approche contextuelle, articulée autour de l'écologie, le bien-être et la culture et est engagée dans une démarche de conception bioclimatique ancrée dans les réalités climatiques, sociales et économiques des territoires tropicaux. Leur architecture se distingue, particulièrement, par une capacité à conjuguer esthétisme contemporain, traditions vernaculaires et intégration de stratégies passives au cœur de la conception.

L'étude de cas suivante porte sur trois projets réalisés par T3 ARCHITECTS à HCM Ville, et montre la manière dont des principes bioclimatiques peuvent être intégrés avec cohérence dans des programmes variés, en climat tropical. Ces projets sont tous différents en taille et en fonction (boutique, bureau, brasserie, lieu culturel) mais partagent cette même philosophie de conception, fondée sur la frugalité, la valorisation de l'existant, et une attention portée au confort et à la santé des usagers. Le bâtiment d'étude de ce mémoire est lui aussi une réalisation de l'agence, il sera présenté par la suite.

2.8.1. IVOIRE Pastry Shop, HCM Ville

Ce petit projet commercial urbain intègre plusieurs stratégies bioclimatiques indirectes, plutôt axées sur la réduction de l'empreinte carbone et la qualité de l'air intérieur. T3 a préservé la structure existante et utilisé des matériaux locaux (céramique artisanale, bois massif, enduits naturels). Le mobilier en plastique recyclé participe aussi à cette logique circulaire.



Figure 13 : IVOIRE Pastry Shop, Saigon - Source : site internet T3 @That's Luminous

2.8.2. BELGO Brewery Pub, HCM Ville

Pour ce projet, T3 a réinvesti une structure existante en acier, qu'ils ont renforcée par un mur en briques réemployées. Des ouvertures hautes, ainsi qu'une cour à l'arrière, permettent une ventilation naturelle quand la climatisation est éteinte. L'aménagement intérieur favorise les circulations d'air entre les niveaux par des ouvertures. Bien que le projet reste fortement dépendant de la climatisation, ces dispositifs montrent une volonté d'hybridation climatique et de sobriété constructive.



Figure 14 : BELGO Brewery Pub, Saigon - Source : site internet T3 @Herve GOUBAND

2.8.3. The Cocoa Project, HCM Ville

Ce projet de réhabilitation d'une ancienne villa tropicale, s'inscrit lui aussi dans une démarche bioclimatique. T3 a utilisé les qualités originelles de la villa (lames béton, structure moderniste, enduits à la chaux) et a limité les nouveaux apports de matériaux. Le jardin tropical a été restauré et permet à la fois d'apporter de la lumière, de rafraîchir l'ambiance et de gérer l'infiltration de l'eau de pluie. La végétation grimpante prévue sur les murs et la mise en place de ventilateurs mécaniques complètent la conception bioclimatique.

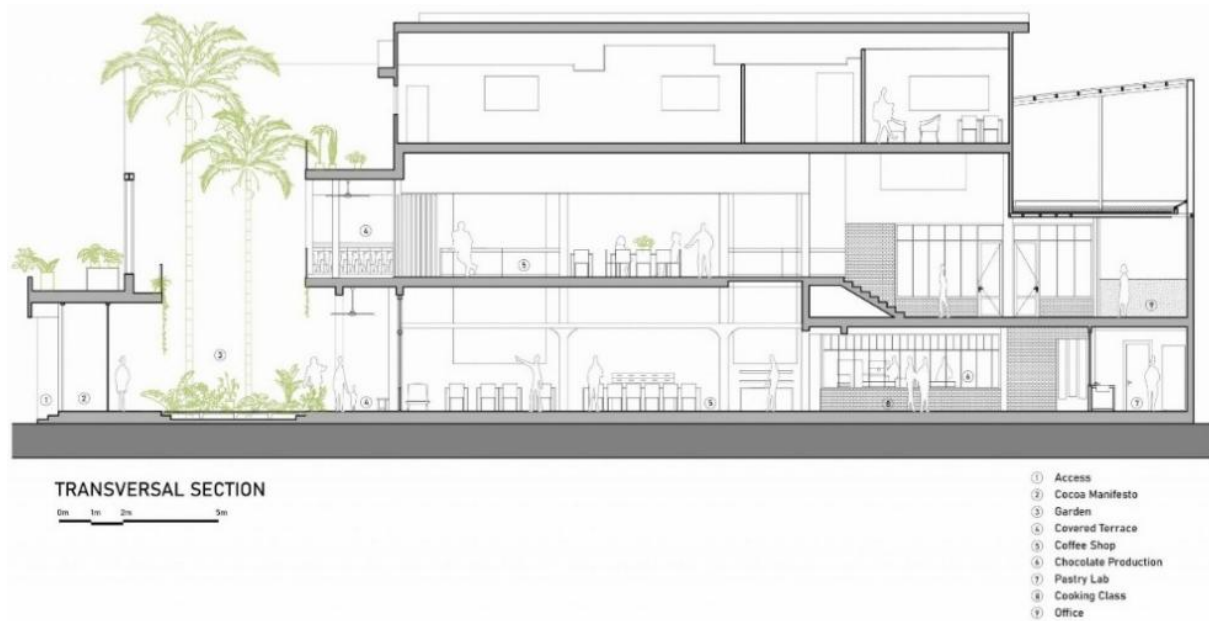


Figure 15 : Coupe transversale The Cocoa Project – Source : T3 Architects



Figure 16 : The Cocoa Project, Saigon – Source : photo personnelle (gauche) / site T3 @Hiroyuki OKI (droite)

2.9. Synthèse de l'état de l'art

Le développement technologique a profondément transformé la pratique architecturale. En réaction, les principes bioclimatiques se sont imposés comme une approche pertinente, puisant dans la tradition vernaculaire. Cette démarche réoriente le débat vers une prise en compte des ressources climatiques locales telles que l'ensoleillement, le vent, la végétation et les matériaux. L'objectif principal étant de minimiser la consommation énergétique et d'optimiser le confort thermique des occupants, grâce à une meilleure prise en compte du contexte environnemental.

L'architecture bioclimatique est associée à de nombreuses études sur le confort thermique. Cette notion est de nature complexe et influencée par de nombreux paramètres physiques, mais également personnels et culturels. De ce fait, les modèles prédictifs et cadres normatifs qui ont été définis par la suite restent étroitement liés à un contexte spécifique, et cela au détriment de certains pays du monde comme le Vietnam.

Aujourd'hui, l'architecture vietnamienne doit relever un défi multiple consistant à préserver son héritage traditionnel, satisfaire les exigences de la modernité urbaine et réussir à intégrer des pratiques durables adaptées à son secteur de la construction en climat tropical. Au cours des vingt dernières années, l'urbanisation croissante a entraîné un développement important des immeubles bureaux et de logements urbains s'inspirant majoritairement d'un style internationalisé. Ce dernier repose sur des éléments énergivores comme le béton, la climatisation et les façades vitrées, induisant ainsi une consommation énergétique importante.

L'analyse de la littérature a permis d'identifier une multitude de pratiques constructives, qu'elles soient contemporaines ou traditionnelles. Ces solutions offrent de nombreux avantages concernant la prise en compte du climat ou de la gestion du confort thermique intérieur en zone tropicale. Ces stratégies bioclimatiques sont documentées et regroupées selon leur nature en 10 catégories distinctes portant sur les matériaux, l'implantation, l'enveloppe, la ventilation, le microclimat, les systèmes passifs et finalement les outils de conception.

Le dernier point mentionné revêt une importance particulière face à la complexité croissante des bâtiments, le manque de sensibilisation, les impératifs de performances énergétiques et la diversité des contextes climatiques et des usages. Il devient nécessaire d'enrichir les méthodes traditionnelles pour une transition vers une architecture plus durable. Malgré la difficulté de réintégrer l'architecture bioclimatique dans une production contemporaine dominée par une vision technocentrée, certaines pratiques, comme celles portées par l'agence T3 Architects, illustrent la pertinence et l'efficacité d'une approche contextuelle, sobre et intégrée.

3.Problématique et question de recherche

Comme mentionné précédemment, au Vietnam, la surchauffe dans les bâtiments est et sera un enjeu majeur à cause d'un climat contraignant. Lors de nouveaux projets ou de rénovations, il est fréquent que les propriétaires accordent plus d'importance au budget et à l'esthétique plutôt qu'à la performance thermique (Taing, 2024). Ce manque de mise en œuvre de stratégie bioclimatique peut aussi s'expliquer par des lacunes réglementaires. La législation nationale en matière d'efficacité énergétique des bâtiments ne concerne que les grands bâtiments (plus de 2500 m²), laissant ainsi les autres projets sans orientations spécifiques en matière d'efficacité énergétique (P. A. Nguyen, 2021).

Les recherches menées au Vietnam se limitent souvent à l'analyse d'une stratégie spécifique appliquée à un seul type d'espace, ce qui défavorise la mutualisation des informations. Les résultats sont souvent techniques et peu adaptés pour servir de recommandations aux architectes et aux ingénieurs. De plus, peu de résultats portent sur une logique de mise en œuvre, de coût et d'intégration aisée sur un bâtiment existant. Les études ont aussi tendance à délaisser les bâtiments de bureaux et le parc existant.

Cette démarche conduit à poser la question centrale de ce mémoire : *Quels sont les impacts des stratégies bioclimatiques sur le comportement thermique d'un bâtiment de bureaux, en mode mixte, situé en climat chaud et humide.*

Pour y répondre, plusieurs sous-questions doivent être posées :

- Quels bénéfices ces stratégies apportent-elles en termes de confort thermique pour les occupants ?
- Quelle proportion de l'année peut être qualifiée de confortable thermiquement en fonction des stratégies mises en œuvre ?
- Quelle sera la demande en termes de refroidissement pour chaque scénario ou combinaison de scénarios ?
- Est-il possible, avec un investissement limité, d'améliorer significativement le confort thermique dans un bâtiment de bureaux ? Si oui, quelles sont les stratégies ou combinaisons de stratégies les plus efficaces et les plus pertinentes ?

Ce travail vise à sensibiliser les architectes à l'importance de prendre en considération ces éléments lors de la conception des bâtiments. Tout en soulignant la possibilité qu'un bâtiment puisse offrir un environnement confortable, sans une dépendance totale aux systèmes de climatisation.

4. Méthodologie

Pour évaluer le confort thermique dans un bâtiment existant, le standard ASHRAE propose plusieurs méthodes (Taing, 2020) :

- Enquêtes auprès des occupants (Occupant Surveys) (ASHRAE, 2020)
- Mesures environnementales (Environmental Measurement) (ASHRAE, 2020)
- Approche de simulation calibrée de l'ensemble du bâtiment (Whole-Building Calibrated Simulation Approach) (ASHRAE, 2014).

La dernière approche sera employée et complétée par des mesures environnementales visant à assurer la calibration du modèle. Cette approche nous permettra d'examiner le bâtiment dans son état initial, de quantifier l'impact de chaque stratégie individuellement et de projeter des scénarios de simulation « futurs ».

Méthodologie générale

1 - Contexte du cas d'étude : Cette étude débutera par le choix du bâtiment d'étude et la présentation de son contexte, suivie par une description détaillée de son état initial avant rénovation et de son état actuel. En parallèle, le plan de simulation calibrée sera élaboré, impliquant la sélection du logiciel de simulation, la définition des données de calibration et la conception des divers scénarios de simulation.

2 - Collecte des données : Cette phase impliquera la sélection des zones d'intérêt du bâtiment et la collecte exhaustive des plans et données techniques. Des relevés in situ (température, humidité relative, profils d'occupation, etc.) seront menés, complétés par des entretiens avec les occupants et l'acquisition de données météorologiques spécifiques. Toutes les hypothèses (systèmes, occupation, gains, etc.) seront formulées et justifiées conformément à la littérature scientifique.

3 - Mise en place du modèle de simulation : Durant cette phase, le modèle de simulation sera réalisé à l'aide des différents environnements de simulation du logiciel TRNSYS. Une attention particulière sera portée au zonage, aux objets d'ombrage, aux profils d'utilisation, aux systèmes CVC, ainsi qu'au taux d'infiltration. Il sera important de minimiser l'utilisation de valeurs par défaut et d'assurer le débogage du modèle.

4 - Calibration du modèle : La validation du modèle s'effectuera par comparaison graphique et statistique de ses prévisions avec les données mesurées. Un processus itératif d'ajustement du modèle sera mis en œuvre jusqu'à l'obtention d'une correspondance acceptable. Les critères de calibration utilisés seront l'erreur de biais moyen normalisée (NMBE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)).

5 - Mise en place du scénario de référence, des variantes et des critères de comparaison : Cette étape inclura la production du scénario de référence, lequel représente l'état initial du bâtiment avant rénovation. Ce modèle servira de base pour le développement des simulations suivantes. Pour finir, les différents critères de comparaison seront décrits et justifiés.

6 - Résultats : Les résultats des mesures sur site et des différentes simulations seront présentés puis commentés. Chacune des stratégies sera comparée aux résultats du scénario initial afin de quantifier l'amélioration ou la détérioration des conditions thermiques et des besoins en énergie.

7 - Discussions : Cette dernière partie analyse les résultats des simulations avec plusieurs niveaux de lecture : d'abord l'impact thermique de chaque stratégie individuelle, puis les effets de leurs combinaisons, avant d'aborder une analyse cumulative permettant d'identifier les gains marginaux. Ces éléments permettront de classer les interventions les plus efficaces et d'en tirer des recommandations adaptées au contexte tropical.

La méthodologie adoptée pour ce mémoire s'articule en plusieurs étapes successives, présentées dans le schéma ci-dessous :

Problématique : *Stratégies bioclimatiques et comportement thermique en climat chaud et humide (climat tropical). Cas d'application au Vietnam : Dreamplex Flexi Office Ngo Quang Huy.*

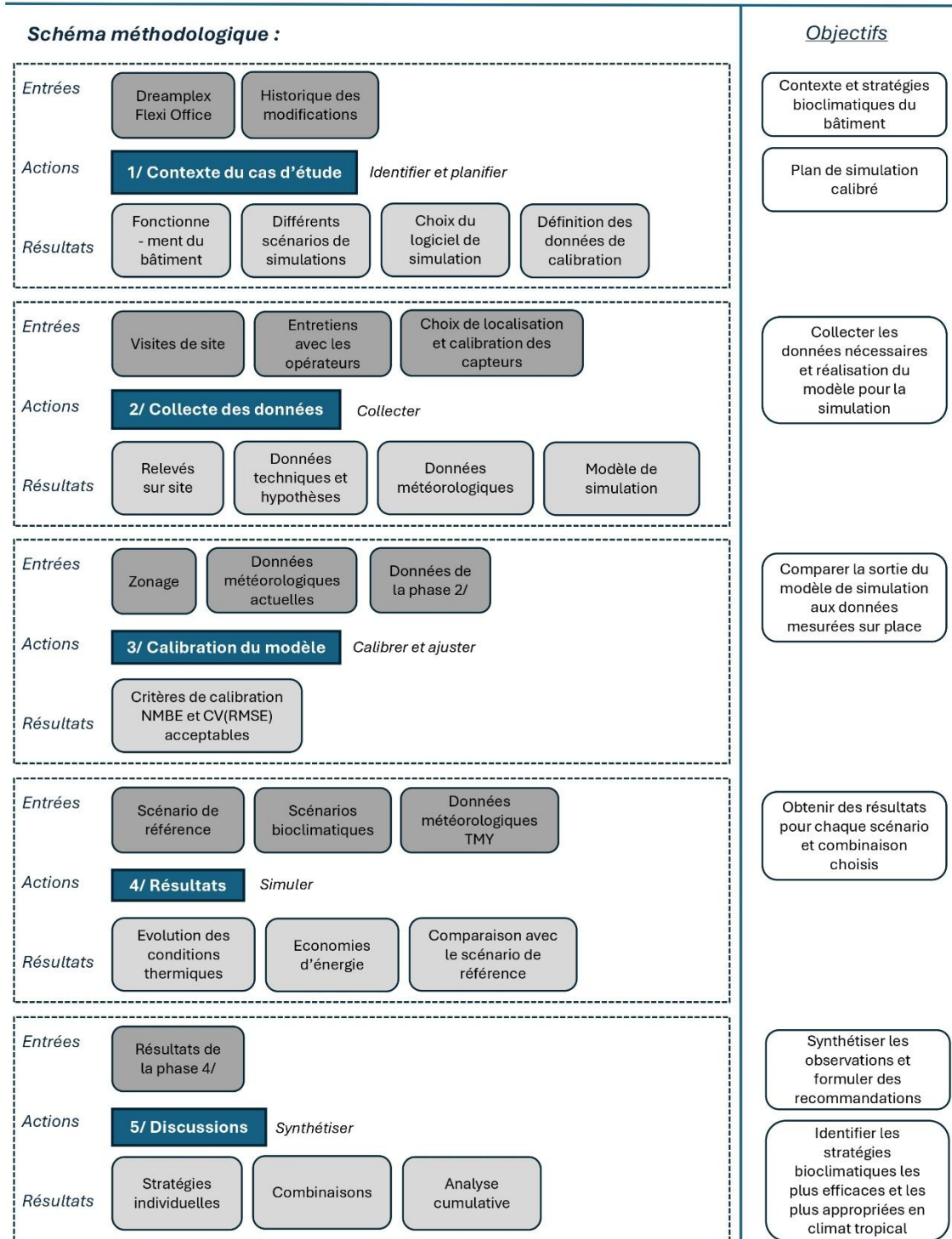


Figure 17 : Schéma méthodologique

4.1. Contexte du cas d'étude

4.1.1. Présentation de Hô-Chi-Minh Ville (HCM Ville)

HCM Ville, désignée par le nom Saigon jusqu'en 1976, est actuellement la ville la plus densément peuplée du sud/centre Vietnam. C'est un centre économique et culturel très important dans le pays (Nam Thanh et al., 2024).

L'urbanisation d'Hô-Chi-Minh Ville est très compacte, due à une croissance non planifiée (P. A. Nguyen, 2021). L'architecture locale est une combinaison entre des éléments traditionnels et modernes. Elle est marquée par son patrimoine fluvial (système de rivières Dong Nai-Saigon) et une forte influence occidentale, avec des styles architecturaux indo-français et sino-français adaptés au contexte tropical (Nam Thanh et al., 2024).

HCM Ville est située à 10°48'N de latitude, dans la zone climatique tropicale. L'année est divisée en deux saisons principales : la saison des pluies (de mai à octobre) et la saison sèche (de novembre à avril) (Dang et Pitts, 2021).

Les températures et l'humidité relative sont constamment élevées pendant une grande partie de l'année. La température moyenne mensuelle varie entre 26 et 29°C, et l'humidité entre 70 et 80% (Climat, météo par mois, température moyenne pour Hô Chi Minh Ville (Vietnam), s. d.). La demande de refroidissement prédomine donc logiquement sur celle de chauffage. La ville est aussi confrontée à des problèmes d'inondations dus aux eaux de pluie ou aux débordements de la rivière. La topographie plate de la ville ne favorisant pas un bon drainage (Gubry, 2010).

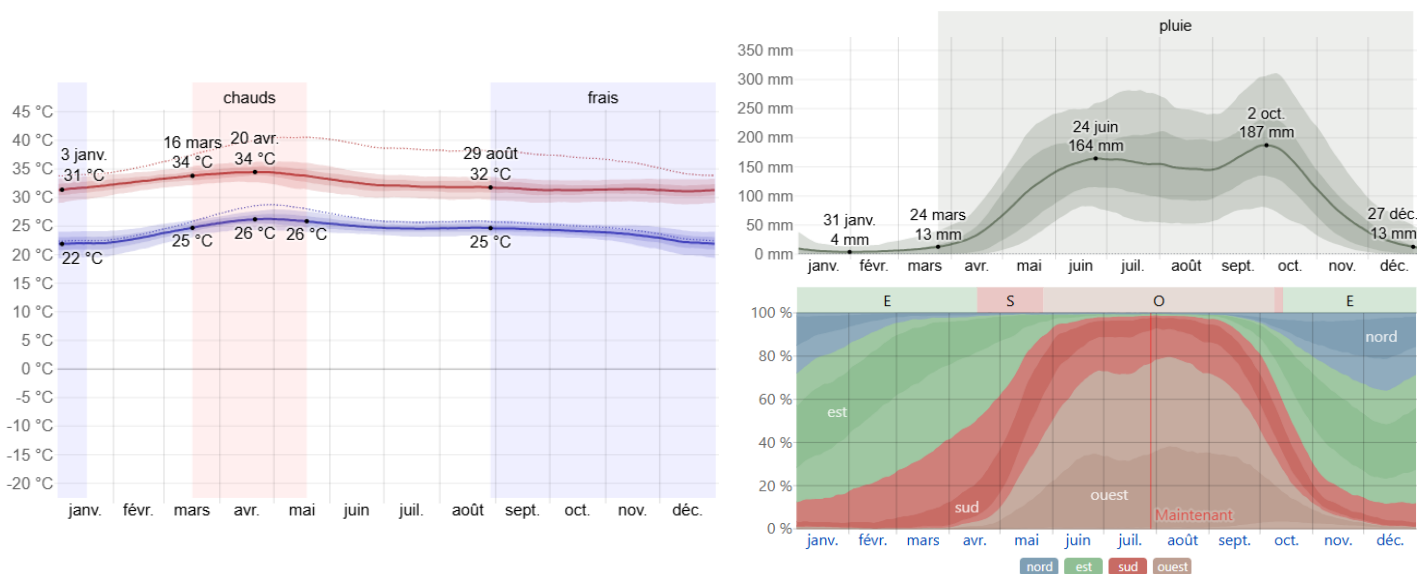


Figure 18 : Température, pluviométrie mensuelle et direction du vent à HCM Ville @ WeatherSpark.com

4.1.2. Présentation du bâtiment (actuel et avant rénovation)

Le choix du bâtiment a été réalisé suite à de nombreuses discussions avec Charles GALLAVARDIN et le directeur de l'agence d'HCM Ville, Rafael LIRA. Initialement, une étude portant sur le Cocoa Project, présentée précédemment, a été discutée. Finalement, le choix du Dreamplex Office s'est imposé en raison de la richesse des stratégies bioclimatiques intégrées et de sa diversité d'usages. Conçu comme un espace de coworking en climat tropical dense, il offre le cadre idéal pour analyser les interactions entre conception passive et confort thermique, tout en permettant d'étudier les effets d'une rénovation bioclimatique d'un bâtiment existant, enjeu central d'une transition écologique du bâti. Le Dreamplex Flexi Office Ngo Quang Huy sera donc la base de ce projet de recherche.

Le quartier de Thảo Điền, situé dans le deuxième arrondissement de Hô Chi Minh Ville (arrondissement de Thu Đức), est une sorte de presqu'île entourée par la rivière Saigon. Le Dreamplex Ngo Quang Huy se trouve au 42, rue Ngô Quang Huy, à l'angle de Xuan Thuy et Ngô Quang Huy, en plein cœur du quartier.

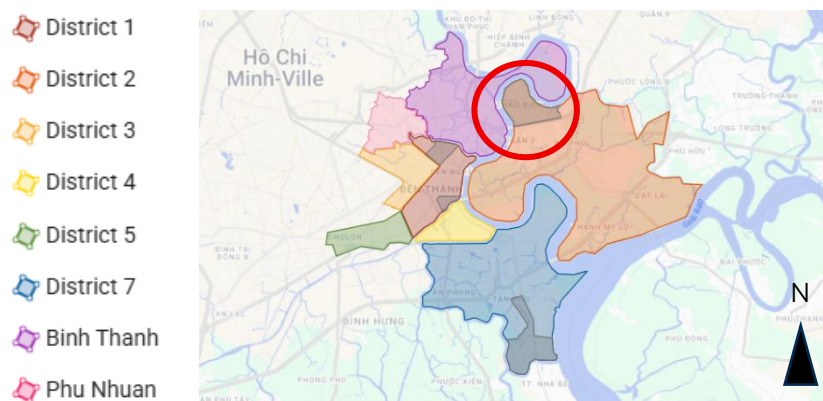


Figure 19 : Carte de l'emplacement de Thao Dien @lepetitjournal.com

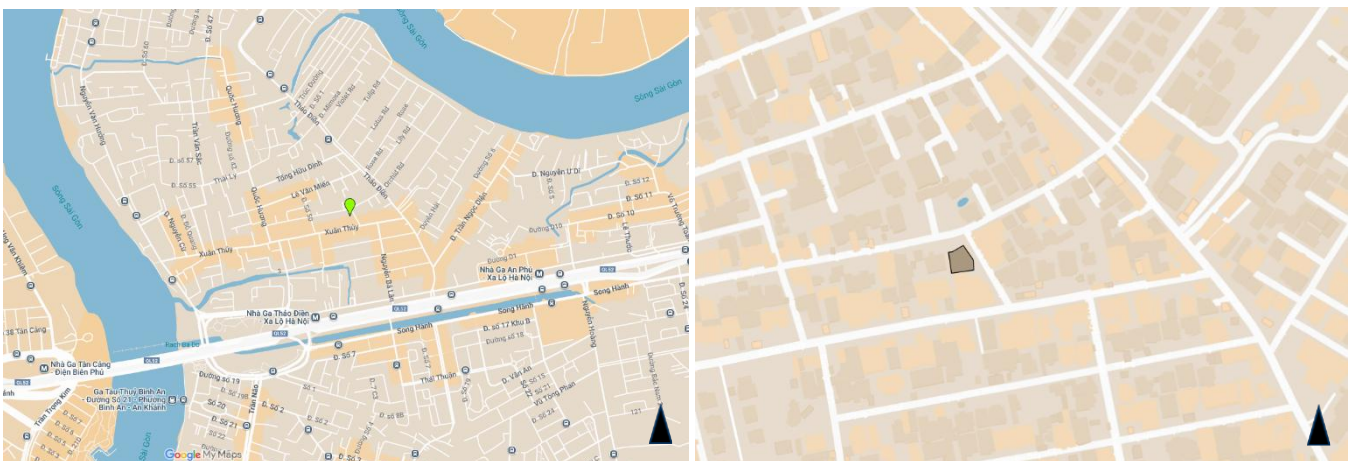


Figure 20 : Emplacement et orientation du Dreamplex Ngo Quang Huy @Mymaps.com

Cet espace de bureaux/coworking est un projet de rénovation d'un bâtiment existant. La rénovation a été achevée en 2020 et l'ouverture au public a eu lieu en 2021. Cet « ancien four solaire » se caractérisait par une structure métallique de type poteau-poutre, des murs en briques couverts d'enduit et une grande quantité de fenêtres à simple vitrage non protégées contre les rayonnements directs. Le bâtiment n'a jamais fonctionné entre le projet initial et l'intervention de T3. Le système de ventilation et de climatisation était pratiquement inexistant avant la rénovation.

Le bâtiment actuel comprend 5 étages (rez-de-chaussée et quatre étages) avec plusieurs terrasses/balcons en hauteur, le tout situé dans un jardin tropical. Il est reconnaissable avec sa double peau en bambou et ses protections solaires en tissu caractéristiques (centre de la figure suivante).



Figure 21 : Dreamplex Flexi-Office, Saigon – Source : site internet T3 @Hiroyuki Oki



Figure 22 : Dreamplex Flexi-Office, Saigon – Source : site internet T3 @Hiroyuki Oki

Le rez-de-chaussée a été pensé de manière à favoriser un lien fluide avec le jardin. Il est composé d'une zone d'accueil, d'un ancien " espace café" principalement en double hauteur, d'une kitchenette, d'un espace bureau à l'Est et enfin des espaces de service au centre du bâtiment. Le niveau r+1 comprend trois salles de réunion "meeting room" et un espace de coworking. Cette dernière zone et la circulation de l'étage fonctionnent en mezzanine. L'objectif était de concevoir des environnements de travail variés entre les étages afin de promouvoir la flexibilité des utilisations. À partir du deuxième, les étages se composent d'un nombre de bureaux privés variant de 11 à 5 (dernier étage). Il s'agit d'espaces clos conçus pour accueillir des équipes de moins de 10 personnes pour une utilisation prolongée. Au quatrième étage, on retrouve finalement un vaste espace terrasse en toiture orienté Ouest. La superficie au sol totale du bâtiment s'élève à 1468,14 m², avec un taux de vitrage extérieur de 28,1 %. Les plans complets sont fournis en **annexe 1**.

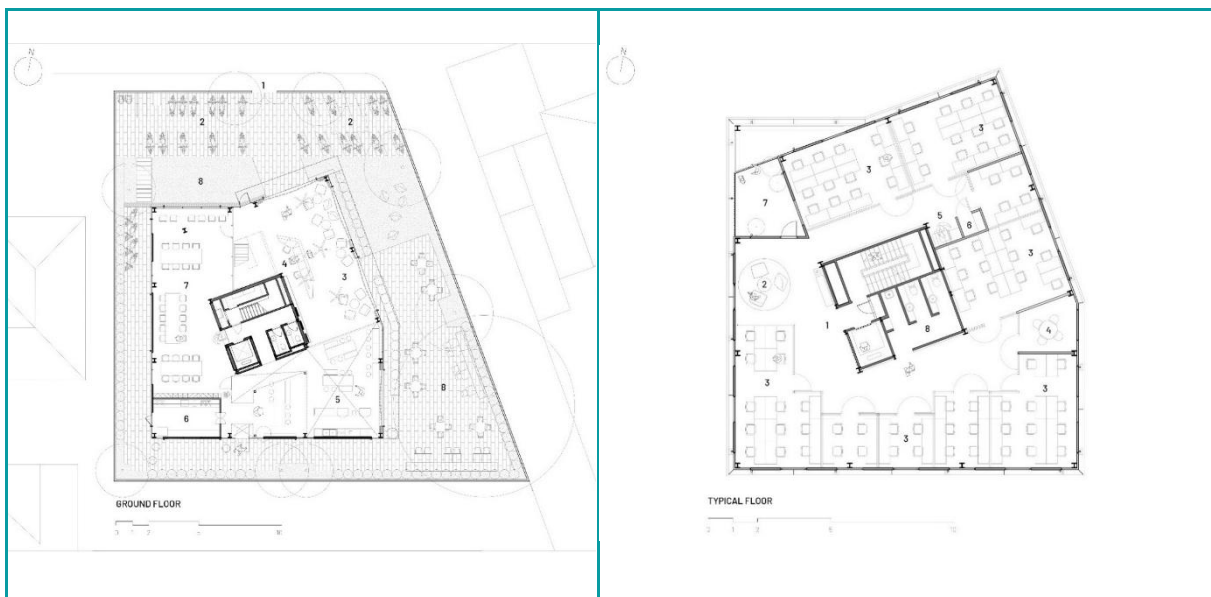


Figure 23 : RDC et étage type Dreamplex - Source : site internet T3

En ce qui concerne la conception bioclimatique, la structure principale du bâtiment existant a été préservée afin de minimiser la consommation d'énergie grise. Le rez-de-chaussée, quant à lui, a été conçu afin de promouvoir la ventilation naturelle et de réduire la dépendance à la climatisation en remplaçant plusieurs baies fixes sur diverses façades (Nord et Est) par des baies ouvrantes. Dans l'espace en double hauteur, l'accueil et la kitchenette, des ventilateurs mécaniques sont placés de manière stratégique pour optimiser cette ventilation naturelle. L'ensemble du rez-de-chaussée est en contact direct avec un jardin qui, avant les rénovations, se composait uniquement d'une grande dalle en béton. Cela a permis de restaurer le sol naturel et perméable par endroit, de procéder à de nouvelles plantations d'arbres et de plantes, tout en permettant de dégager certains arbres existants de l'emprise du béton.

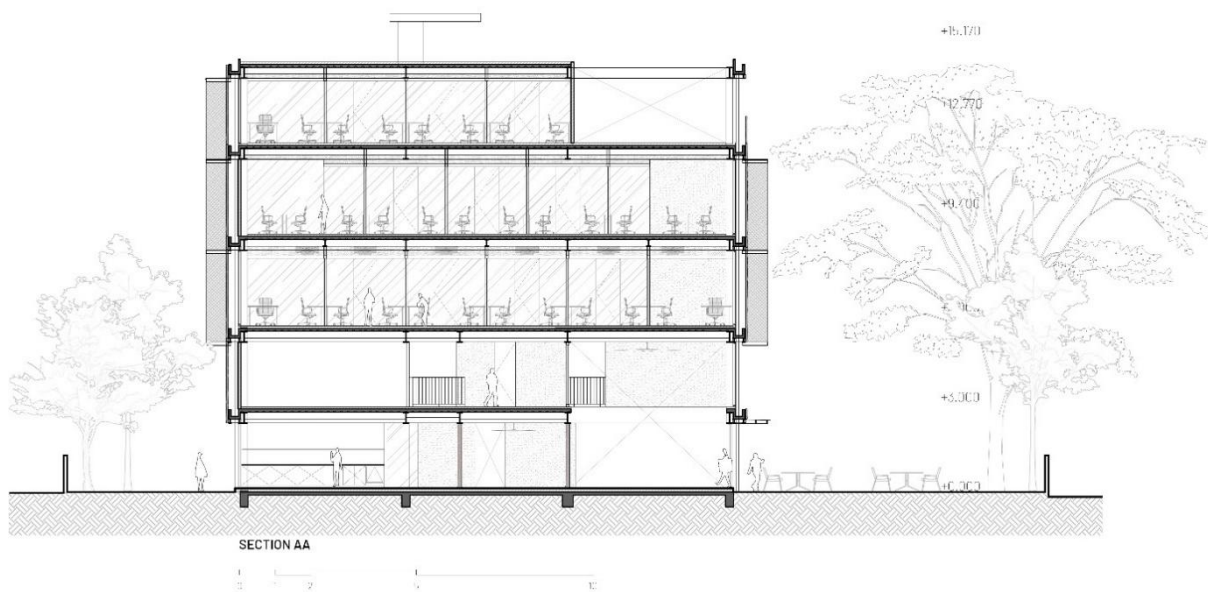


Figure 24 : Coupe AA – Source : site internet T3

En complément des modifications réalisées sur le partitionnement intérieur des étages et le rez-de-chaussée, une double façade ventilée en bambou a été intégrée. Elle agit comme un dispositif de protection solaire visant à préserver la fraîcheur de la façade principale. Cette double enveloppe est ensuite utilisée comme support pour des protections solaires horizontales et verticales en tissu, adaptées individuellement à chaque orientation ou façade. Ces stratégies bioclimatiques ont été intégrées dès la phase de conception de cette rénovation en tant que ligne directrice du projet. Des casquettes solaires sont également installées au-dessus de certaines baies du rez-de-chaussée.

A l'origine, la rénovation incluait l'isolation de la toiture du quatrième étage et l'installation d'une pergola en dur (métal avec des lames ou en toile) pour le rooftop accessible. Ceci aurait permis de préserver la toiture d'une exposition significative au rayonnement solaire, entraînant ainsi des températures plus élevées dans les bureaux situés en dessous. Ces deux interventions n'ont jusqu'ici pas été réalisées pour des raisons économiques.

Ces solutions bioclimatiques ne peuvent pas, à elles seules, garantir une protection totale contre le climat tropical. Chaque bureau, salle de réunion et espace de coworking est équipé d'au moins une unité de climatisation dont la capacité varie en fonction de l'usage de la pièce. En ce qui concerne l'accueil et l'ancienne zone café du rez-de-chaussée, chacune est équipée d'une unité visant à assurer le confort de ces espaces en cas de forte chaleur, lorsque la ventilation naturelle et les ventilateurs mécaniques ne sont plus suffisants.



Figure 25 : Façade Est, Dreamplex, Saigon – Source : site internet T3 @Hiroyuki Oki

4.1.3. Logiciel de simulation

Pour la réalisation de la simulation calibrée, il a été nécessaire de choisir entre plusieurs logiciels tels que Design Builder ou TRNSYS. Bien que Design Builder repose sur un modèle géométrique tridimensionnel de bâtiment, ce qui constitue un avantage significatif, TRNSYS a finalement été préféré. Cet outil de simulation se distingue par sa puissance et sa flexibilité par rapport à Design Builder. Il convient particulièrement aux utilisateurs souhaitant exercer un contrôle détaillé sur leurs modèles et le flux de données (Andreas KARITNIG, 2008). Pour ceux qui souhaitent accéder au code source du noyau et des modèles de composants, ces éléments sont également disponibles dans une logique de transparence.

Par ailleurs, le logiciel TRNSYS est également employé dans le cadre de l'enseignement de la Physique du Bâtiment dispensé par le professeur Philippe ANDRÉ à l'Université de Liège. Ainsi, ce dernier a permis l'obtention d'une licence dans le cadre de ce mémoire. La décision a également été motivée par un encadrement spécifique de la doctorante Elisabeth DAVIN.

TRNSYS (Transient Systems Simulation Program) est un logiciel de simulation destiné à modéliser le comportement thermique des bâtiments. Il a été initialement développé au Laboratoire d'Énergie Solaire (SEL) de l'Université du Wisconsin pour la simulation des systèmes solaires thermiques, avec une première version commerciale lancée en 1975. Au fil du temps, TRNSYS a été étendu pour devenir un ensemble complet de modélisation énergétique des bâtiments (Andreas KARITNIG, 2008).

Trois environnements distincts du logiciel TRNSYS sont exploités dans le cadre de cette étude :

Pour commencer, la simulation sur TRNSYS implique la modélisation du bâtiment à l'aide de **TRNSYS 3D**, fonctionnant comme un plugin SketchUp. Ce processus permet de créer un modèle géométrique 3D du bâtiment à partir de plans ou de modèles existants, pour ensuite en décrire le fonctionnement. À ce stade, le modèle est constitué de "zones thermiques" présentant des adjacences et des formes spécifiques. Il est également envisageable de modéliser des "objets d'ombrage", qui seront utilisés pour projeter des ombres et influencer le rayonnement solaire reçu par les ouvertures.

Ensuite, on trouve **TrnBuild**, une interface qui permet d'accéder à la définition des paramètres du bâtiment, tels que la composition des parois, les gains, les profils d'occupation et divers régimes appelés "type" tels que la ventilation, la climatisation, etc.

Finalement, **TRNSYS Studio** est l'environnement final utilisé pour saisir les données météorologiques, les paramètres du sol, etc., et surtout pour sélectionner les variables sur lesquelles les simulations donneront des résultats.

4.1.4. Choix des données de calibrations

La sélection et la collecte des données de calibration constituent la première étape importante de la simulation calibrée, telle que spécifiée dans l'ASHRAE Guideline 14 (2014). Pour cela, des mesures ponctuelles de température et d'humidité seront effectuées. Cette décision a été prise en raison de l'indisponibilité des factures mensuelles ou des données horaires des compteurs.

Il est ensuite important de sélectionner la station météorologique qui reflète de manière optimale les conditions microclimatiques du site. La station de Tan Son Nhat International Airport sera utilisée. Elle se trouve à moins de 10 km du centre de Ho-Chi-Minh City et offre des conditions très similaires à celles rencontrées dans le quartier de Thao Dien, même si elle se situe obligatoirement dans un milieu moins dense et plus ventilé.

La station météo de Tan Son Nhat est enregistrée sous le WIGOS Station Identifier : 0-20000-0-48900 (Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR), s. d.). Les données horaires utilisées proviennent de la NOAA (Administration nationale océanique et atmosphérique).

Ces données météorologiques horaires sont complétées par d'autres jeux de données provenant de la même station. Le premier jeu de données est celui de la pression atmosphérique provenant du site internet MétéoStat (Data Sources | Meteostat Developers, s. d.). Finalement, les dernières données manquantes portant sur le rayonnement solaire à la surface terrestre proviennent du service CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) et plus précisément du jeu de données "CAMS Radiation Timeseries".

L'ensemble de ces données a permis de créer un jeu de données météorologiques réelles agrégées, utilisé pour la calibration. La première journée de ce jeu de données est en **annexe 2**.

Une fois que le modèle de simulation est calibré, un fichier météo TMY (Typical Meteorological Year) sera utilisé pour simuler un comportement thermique dans des conditions météorologiques "typiques". Pour cela, le fichier TMYx2009-2023 provenant de Climate.OneBuilding.Org pour la station de Tan Son Nhat sera mobilisé. Ce choix est justifié par le fait que les TMY sont destinés à représenter les conditions climatiques médianes qu'un bâtiment pourrait rencontrer (Lawrie et al., 2022).

4.1.5. Scénario de référence

Le scénario de référence (appelé S0 par la suite) modélise l'état du bâtiment avant toute intervention architecturale ou bioclimatique. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Structure métallique poteau-poutre et murs en brique directement exposés à de fortes charges thermiques ;
- Nombreuses fenêtres simple vitrage sans aucune protection solaire ;
- Aucune ventilation naturelle efficace et baies fixes ;
- Sol extérieur entièrement bétonné, sans végétation.
- Pas de ventilateurs ni dispositifs de brassage d'air intérieur au RDC pour améliorer le confort perçu ;
- Pas de pergola pour le rooftop accessible ni d'isolation thermique des dalles supérieures.
- Les unités de climatisation spécifiques à chaque espace seront conservées dans S0.



Figure 26 : Visualisation du scénario de référence S0 – Source : @T3 Architects

4.1.6. Scénarios de simulation

Chaque scénario simule l'ajout d'une unique stratégie bioclimatique au bâtiment de référence (S0). Cette approche permet d'évaluer l'impact spécifique de chaque intervention.

Scénario 1 – Sol partiellement végétalisé (S1) :

Ce scénario intègre une transformation partielle du sol du jardin au rez-de-chaussée, avec un traitement mi-gazon, mi-béton, à la place de la dalle béton d'origine.

Scénario 2 – Ventilation naturelle traversante (S2) :

Ce scénario simule l'ouverture de baies vitrées ou portes sur les 4 façades au RDC, permettant une ventilation traversante dans les espaces ouverts.

Scénario 3 – Ventilateurs mécaniques au RDC (S3) :

Ce scénario introduit des ventilateurs de plafond stratégiquement placés dans l'accueil, l'espace café et la kitchenette.

Scénario 4 – Double peau ventilée en bambou (S4) :

Ce scénario ajoute une façade secondaire en bambou, détachée de la façade principale, jouant le rôle de zone tampon thermique et d'ombrage partiel.

Scénario 5 – Protections solaires textiles (S5) :

Ce scénario introduit des protections solaires horizontales et verticales en tissu, adaptées à chaque orientation de façade.

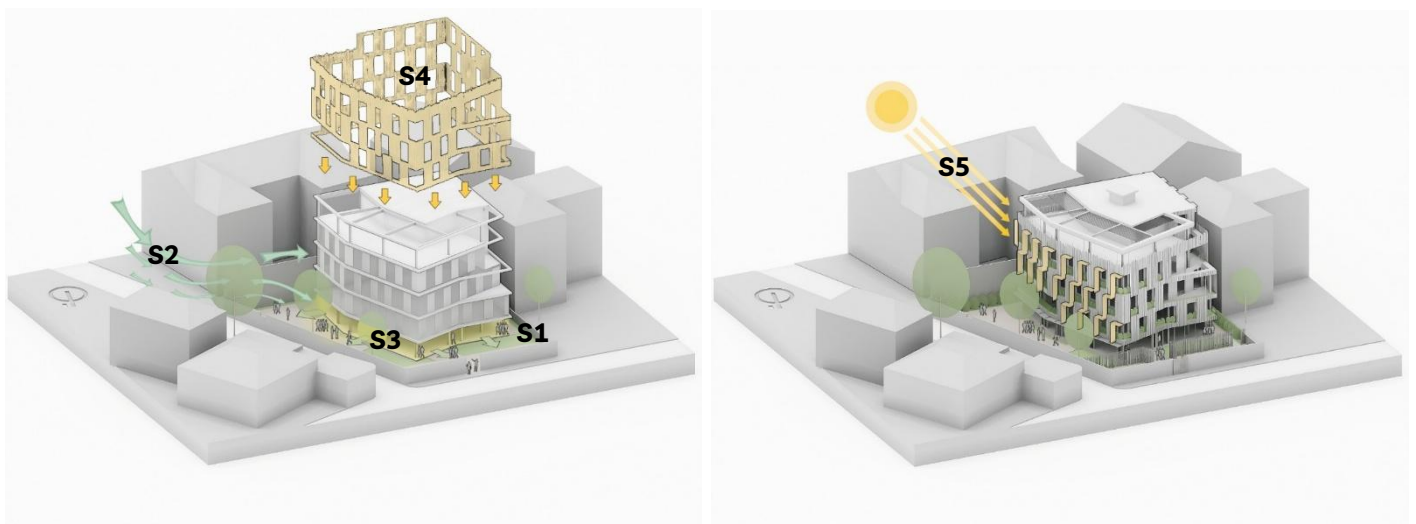


Figure 27 : Visualisation des scénarios S1-S4 (gauche) et S5 (droite) – Source : @T3 Architects

Scénario 6 – Pergola sur toiture (S6) :

Ce scénario simule l'installation d'une pergola en dur, au-dessus de la terrasse du R+4 (rooftop).

Scénario 7 – Isolation des dalles de toiture (S7) :

Certaines dalles seront isolées par l'intérieur (rooftop accessible) et les autres par l'extérieur avec l'isolation XPS initialement prévue (polystyrène extrudé d'épaisseur 8 cm).

Pour donner suite à la calibration et à la simulation de ces premiers scénarios, des combinaisons, caractérisées par un impact thermique significatif et une mise en œuvre réaliste, seront également réalisées. Pour finir, un scénario de type "effet cumulé" sera produit en intégrant les stratégies selon l'ordre de priorité dégagé. L'objectif de cette étape consistera à déterminer les limites du confort thermique et à identifier le point à partir duquel les gains commencent à devenir marginaux.

Type de scénarios	Scénarios associés
<i>Avant rénovation</i>	1. Bâtiment avant rénovation (S0)
<i>Rénovation actuelle</i>	2. Terrasse végétalisée (S1) 3. Ventilation naturelle (S2) 4. Ventilateurs mécaniques (S3) 5. Double peau en bambou (S4) 6. Protections solaires en tissu (S5)
<i>Options "futures"</i>	7. Pergola en toiture (S6) 8. Isolation des dalles de toiture (S7)

Tableau 2 : Récapitulatif des scénarios de simulations individuels

4.2. Collecte des données

4.2.1. Zones d'intérêts

La température de l'air et l'humidité relative seront évaluées dans cinq pièces du bâtiment (initialement six, mais l'un des capteurs a été compromis au cours des trois mois de mesure). L'objectif est de sélectionner des pièces représentatives présentant des fonctions variées, des systèmes de ventilation différents, des orientations diverses et situées à différents étages. Finalement, les 5 pièces retenues sont les suivantes :

- **Ancien Café** (numéroté 1) : situé au Sud du rez-de-chaussée, le capteur a été positionné sur une étagère dans la zone sous-mezzanine. Cet espace est équipé de 3 ventilateurs mécaniques dans la double hauteur et est occupé par un nombre de personnes extérieures variant entre 5 et 15 selon les observations. On y retrouve une unité de climatisation.
- **Réception** (numéroté 2) : située à l'Est du rez-de-chaussée, le capteur a été positionné sur le bureau d'accueil. Cet espace est équipé de 4 ventilateurs mécaniques et est occupé par 3 personnes fixes et entre 5 et 10 personnes extérieures selon les jours. On y retrouve une unité de climatisation.
- **Meeting room Sud** (numéroté 3) : située sur la façade Est de la mezzanine (R+1), le capteur a été positionné sur la table. Elle est enchâssée entre la meeting room numéro 2 et l'espace café en double hauteur. Les plannings d'occupation et le nombre d'occupants sont très variables. On y retrouve une unité de climatisation.
- **Meeting room Nord** (numéroté 4) : située dans le coin Nord-Est de la mezzanine (R+1), le capteur a été positionné sur la table. Les plannings d'occupation et le nombre d'occupants sont très variables. On y retrouve une unité de climatisation.
- **Bureau 5 Sud** (numéroté 5) : situé à l'Ouest du R+3, le capteur a été positionné au centre de la pièce sur un bureau. C'est un bureau loué par une entreprise avec 3 personnes. On y retrouve deux unités de climatisation.
- **Bureau 2 Est** (numéroté 6) : situé à l'Est du R+3, le capteur a été initialement positionné au centre de la pièce sur un bureau. Cet espace est un bureau vide se situant directement sous le rooftop du R+4.



Figure 28 : Emplacements des zones d'intérêts - de gauche à droite : RDC, R+1, R+3 - Source : site internet T3

4.2.2. Description des capteurs

La prise de mesure a été réalisée entre le 26 mars à 10h et le 02 juin à 10h30, soit entre la fin de la saison sèche et le début de la saison humide sur une période de 10 semaines. Ces 5 capteurs ont été placés dans chaque pièce, sur une table ou sur une étagère, entre 1m20 et 1m50 du sol. Les dispositifs utilisés pour les mesures sont 6 thermomètres/hygromètres ThermoPro TP357.

Le tableau suivant décrit les spécificités de ces capteurs.

ThermoPro TP357	
Quantité	5
Plage de température	-20.0 à 60.0 °C
Précision de la température	±0.5 °C de 0 à 60 °C
Plage d'humidité	10% à environ 99%
Précision d'humidité	±2% de 30% à 80%, sinon ±3%

Tableau 3 : Caractéristiques ThermoPro TP357

4.2.3. Calibration des capteurs

Avant leur installation sur site, les six capteurs ont été calibrés dans un environnement intérieur stable. Cette calibration visait à identifier et corriger les écarts de lecture. Les capteurs ont été disposés côte à côte dans des conditions identiques pendant deux périodes successives, 2h le matin et 2h l'après-midi.

À chaque pas de temps, une valeur moyenne de référence a été calculée à partir des résultats de l'ensemble des capteurs. Les écarts individuels par rapport à cette moyenne ont ensuite été utilisés pour déterminer des coefficients de correction spécifiques pour chaque capteur, en température (°C) et en humidité relative (%). Les écarts observés sont restés modérés : les corrections appliquées varient entre -0,08 °C et +0,12 °C pour la température, et entre -0.895 % et +1.14 % pour l'humidité. Ces corrections ont ensuite été appliquées aux données brutes collectées sur le terrain de manière systématique, afin d'améliorer la cohérence et la fiabilité des mesures.

Les résultats de cette calibration se trouvent en **annexe 3**.

4.2.4. Relevés et visites de site

Les données ont été collectées avec un intervalle de 30 minutes, entre le 26 mars à 10h30 et le 02 juin à 10h. Les résultats complets de température et d'humidité relative de chaque capteur sont en dans la partie « Résultats ».

Pour les pièces autres que les bureaux, il était difficile d'estimer précisément le nombre d'occupants et le profil d'utilisation ; des estimations seront donc utilisées puis ajustées. Concernant les profils d'occupation, la journée typique dans les bureaux débute à 9h et se termine à 18h30 du lundi au vendredi. La climatisation est allumée en continu sur ces plages horaires. Pour le rez-de-chaussée et les salles de réunion, l'occupation des lieux varie entre 8h et 19h du lundi au vendredi et de 8h à 12h le samedi matin. La fermeture des baies et la mise en marche de la climatisation n'est pas automatisée, mais dans une majorité de cas, elle s'opérait entre 10h et 16h. Le reste du temps, le rez-de-chaussée est complètement ouvert sur l'extérieur. Le nombre de personnes utilisant les pièces a été relevé lors de multiples visites de site, un récapitulatif des informations collectées se trouve en **annexe 4**.

4.2.5. Composition des parois

À partir des données techniques et des plans, un jeu de parois a été créé. Les caractéristiques de chaque matériau utilisé se trouvent en **annexe 5** et la composition des parois qui en résulte en **annexe 6**.

4.2.6. Hypothèses

Les hypothèses suivantes ont été mises en place à l'aide de la littérature scientifique, des discussions avec la doctorante Elisabeth Davin et des études d'efficacité énergétique réalisées sur le bâtiment par l'entreprise Artelia. Elles sont utilisées pour pallier certains manquements de TRNSYS et pour modéliser le plus fidèlement possible l'impact de certaines stratégies bioclimatiques.

4.2.6.1. Hypothèse portant sur la vitesse de l'air

Sur la base de l'étude thermodynamique d'Artelia, il a été recommandé d'utiliser des ventilateurs mécaniques induisant une vitesse de l'air à hauteur de travail de : 1.0 - 1.2 m/s. La valeur de **1 m/s** sera donc utilisée dans la suite de cette étude. Concernant les unités de climatisation, il a été conseillé d'utiliser des unités intérieures cassette 4 voies. Elles répartissent l'air dans toutes les directions et aucun courant d'air n'est ressenti à hauteur de travail. La littérature indique que la vitesse de l'air dans le cas d'une cassette 4 voies, vers le haut de la pièce (au-dessus de 2 mètres), est significativement supérieure à 0,15 m/s, mais qu'après le renvoi vers le centre de la pièce, la vitesse de l'air est considérablement inférieure à 0,15 m/s (Bamodu et al., 2015). Une valeur de vitesse de l'air à hauteur des occupants de **0,1 m/s** sera donc utilisée pour les espaces climatisés par la suite.

4.2.6.2. Hypothèse portant sur les ventilateurs mécaniques

Les ventilateurs mécaniques installés au rez-de-chaussée du bâtiment ne peuvent pas être modélisés directement comme composants dynamiques dans TrnBuild. Pour intégrer leur effet sur le confort et les échanges thermiques, il a été choisi de représenter leur influence via une modification des coefficients d'échange convectif. Elle sera appliquée aux parois intérieures proches de leur zone d'action.

La résistance thermique de surface (R_s) est la résistance au transfert de chaleur qui se produit à la surface d'un composant de bâtiment lorsque celui-ci est en contact avec l'air. Elle quantifie la "difficulté" pour la chaleur de passer de l'air ambiant à la surface du matériau (ou vice-versa). La résistance thermique de surface est l'inverse de la somme du coefficient d'échange convectif h_c et du coefficient radiatif h_r (ISO, 2015; Szodrai et Lakatos, 2017).

$$R_s = \frac{1}{(h_c + h_r)} \quad (1)$$

Avec :

R_s : Résistance thermique de surface en $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$;

h_c : Coefficient d'échange convectif en $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

h_r : Coefficient d'échange radiatif en $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

L'annexe C de la norme ISO 6946 (Composants et parois de bâtiments) fournit les relations suivantes pour les surfaces internes (2) et les surfaces externes (en présence d'air ambiant en mouvement) (3) (ISO, 2015) :

$$h_c = h_{ci} \quad (2)$$

Les valeurs de h_{ci} sont données dans la table suivante :

Convective surface coefficient	Direction of heat flow		
$m^2 \cdot K/W$	Upwards	Horizontal	Downwards
h_{ci}	5,0	2,5	0,7

Tableau 4 : Coefficient d'échange convectif interne @Table C.1 ISO/DIS 6946:2015(E)

$$h_c = h_{ce} \quad (3)$$

Avec :

$$h_{ce} = 4 + 4 \cdot v \quad (4)$$

Où : v est la vitesse de l'air adjacente à la surface en m/s.

D'après les données météorologiques de HCM Ville (*Climat, météo par mois, température moyenne pour Hô Chi Minh Ville (Vietnam)*, s. d.), la vitesse horaire moyenne du vent varie entre un maximum de 15,7 km/h et 9,0 km/h. Une valeur moyenne de 3,3 m/s (12,35 km/h) sera employée pour la suite des calculs.

A l'aide de la relation (4), on obtient une valeur de coefficient d'échange convectif extérieur de 17,2 W/(m².K). Elle se situe dans la moyenne basse de la plage de valeurs observées dans les *régions insulaires tropicales* (entre 10 et 60 W/(m².K)) (Cui et al., 2019). Ce résultat est considéré comme cohérent car les coefficients d'échange convectif de surface externe varient considérablement en fonction des conditions de vent et de pluie. Lorsque le vent est faible, la valeur diminue fortement (Cui et al., 2019).

Les ventilateurs mécaniques fonctionnent en augmentant localement la vitesse de l'air, ce qui a pour effet de renforcer les échanges convectifs entre l'air intérieur et les surfaces (murs, planchers, plafonds). Les valeurs mesurées de h_c étaient significativement plus élevées en présence de convection forcée (ventilateur) qu'en convection naturelle (absence de ventilateur) selon Szodrai et Lakatos (2017). La valeur du coefficient d'échange convectif sera donc augmentée lorsqu'un ventilateur mécanique est en fonctionnement à proximité (pour les parois mais aussi les fenêtres).

Selon W. Chen et al. (2018), pour une vitesse de l'air induite par un ventilateur mécanique au plafond (3m30 de hauteur) de 1.03 m/s à 1m10 du sol, cette vitesse de l'air diminue jusqu'à une valeur de 0.49 m/s à 0.1m (hauteur des chevilles) (Chen et al., 2018). Notre cas d'étude étant similaire, cette valeur de vitesse de l'air sera réutilisée pour le calcul du coefficient d'échange convectif du sol intérieur avec ventilateur mécanique. Pour cela, la relation pour les surfaces externes sera utilisée comme approximation avec des valeurs de vitesse de l'air correspondantes.

Un ventilateur de plafond fonctionne en "aspirant l'air ambiant à travers l'espace situé entre le ventilateur et le plafond". Ce processus est dû au fait que le ventilateur crée une "pression négative au-dessus de ses pales" (Chen et al., 2018). Dans notre cas, les ventilateurs mécaniques sont dirigés vers le bas et ils sont à une distance suffisante du plafond pour considérer que la vitesse de l'air au-dessus des pales est faible. On fait donc l'hypothèse d'une vitesse de l'air au-dessus de 0.3 m/s.

Finalement, le tableau suivant récapitule les coefficients d'échanges convectifs qui seront utilisés en fonction de la surface considérée (sol, plafond, murs) et de la présence ou non de ventilation mécanique.

Surface (flux)	Type d'espace	h_c en W/(m ² .K)	h_c en kJ/(h.m ² .K)
<i>Mur intérieur</i>	Sans ventilation mécanique	2.5	9.36
<i>Mur intérieur</i>	Avec ventilation mécanique	8	28.8
<i>Mur extérieur</i>	Sans ventilation mécanique	17.2	61.92
<i>Sol intérieur</i>	Sans ventilation mécanique	0.7	2.52
<i>Sol intérieur</i>	Avec ventilation mécanique	6	21.6
<i>Sol extérieur (toiture accessible)</i>	Sans ventilation mécanique	17.2	61.92
<i>Plafond intérieur</i>	Sans ventilation mécanique	5.0	18
<i>Plafond intérieur</i>	Avec ventilation mécanique	5.2	18.72

Figure 29 : Coefficients d'échanges convectifs utilisés dans TrnBuild

4.2.6.3. Hypothèse portant sur l'impact de la végétation pour le RDC

Cette hypothèse prend en compte l'influence de la végétation à la place d'une dalle béton complète au RDC. La végétation urbaine a un impact significatif sur la température de l'air et l'humidité relative dans les climats chauds et humides, comme l'illustre une étude menée à Singapour (He et al., 2022).

Les surfaces végétalisées entraînent des températures de l'air moyennes plus basses que les surfaces en béton pendant la journée. La différence maximale de température de l'air moyenne entre les surfaces végétalisées et en béton a été observée à 15h00 (allant de 0,56 °C à 1,72 °C selon le type de végétation), tandis que la différence minimale est survenue à 9h00 (de 0,05 °C à 0,29 °C selon le type de végétation).

On s'intéresse à la température et à l'humidité relative à une hauteur de 0.9 m car ces valeurs vont nous servir à paramétrer la température de l'air et l'humidité relative entrant par les baies vitrées ouvertes du RDC. L'ouverture de ces baies étant entre 10h et 16h, on s'intéresse donc aux résultats de 9h et de 15h. A 9h, la différence entre le gazon et le béton est minime (environ 0.1°C), alors qu'à 15h, elle est d'environ 1.5°C à 0.9m. Le matin (9h), le béton n'a pas encore accumulé de chaleur, sa température est donc proche de celle du gazon. Pour autant, il commence à faire chaud très rapidement, aux alentours de 10h en général. On considère donc que dès 10h, le béton commence à chauffer fortement et que le gazon refroidit activement par évapotranspiration. En considérant une évolution linéaire entre 10h et 15h, on utilise l'hypothèse de **0.8°C** de différence entre le béton et le gazon sur la plage horaire 10h - 16h.

Concernant l'humidité relative, au-dessus des surfaces végétalisées, y compris le gazon, elle est plus élevée que celle au-dessus des surfaces en béton pendant toute la journée. La différence maximale d'humidité relative moyenne entre les surfaces végétalisées et le béton s'est produite à 21h00 (variant de 4,02 % à 9,95 %). La différence minimale est survenue à 9h00 (variant de 0,40 % à 4,07 %) (He et al., 2022). Le gain d'humidité apporté par le gazon est faible le matin (2 % environ), mais très net l'après-midi (jusqu'à 7 %). A nouveau, en considérant une évolution linéaire, une augmentation de **4.5%** d'humidité relative sera utilisée comme hypothèse.

Pour finir sur les hypothèses portant sur ce scénario, une valeur d'albédo de **0.2** sera utilisée pour le gazon (herbe rase) et **0.3** pour la dalle béton qui est en bon état et de couleur gris clair.

4.2.6.4. Hypothèse portant sur l'impact de la ventilation naturelle pour le RDC

Concernant la ventilation naturelle de notre bâtiment, il serait intéressant de savoir quel est le volume d'air renouvelé par heure lorsque les baies sont ouvertes.

Les systèmes mixtes comme c'est notre cas, sont conçus pour maximiser l'utilisation des méthodes de refroidissement passif (comme la ventilation naturelle) tout en intégrant des systèmes de refroidissement mécaniques supplémentaires pour les conditions les plus extrêmes. L'objectif est de minimiser la consommation d'énergie tout en maintenant un confort satisfaisant (Zaraa Allah et al., 2023). L'impact sur le volume d'air renouvelé induit par les ventilateurs mécaniques sera considéré comme nul dans cette étude. En effet, ces appareils sont généralement utilisés pour améliorer le confort thermique en fournissant un mouvement d'air localisé.

Bien que la ventilation naturelle soit une stratégie passive efficace, elle est difficile à contrôler et sa variabilité peut être une contrainte (Environmental design, 1999; Liping et Hien, 2007). La littérature indique donc peu de valeur de taux de renouvellement d'air dû à la ventilation traversante, spécialement dans le cas d'une ventilation traversante d'un bâtiment en centre-ville en climat tropical. Une valeur standard sera choisie pour la suite de cette étude. Il est tout de même noté que la ventilation traversante est généralement beaucoup plus efficace et atteint des taux de ventilation plus élevés que la ventilation à simple face (Single-Sided Ventilation - SSV) (Al-Rikabi et al., 2024), ce qui est notre cas. En effet, une autre étude a montré que le débit d'air en ventilation traversante peut être près du double de celui de la ventilation à simple face pour des ouvertures et des conditions météorologiques identiques (Omrani et al., 2017). Les taux de ventilation supérieurs à **10 changements d'air par heure** (ACH) peuvent être atteints par la ventilation traversante selon CIBSE GUIDE A – Environmental Design (1999). Cette valeur sera donc retenue par la suite.

4.2.6.5. Hypothèse portant sur le taux d'infiltration

N'ayant pas de valeur précise de l'étanchéité à l'air du bâtiment, un tableau donnant des ordres de grandeurs d'infiltration par niveau de rénovation sera utilisé (Mees (C.) et Loncour (X.), 2015). Le Dreamplex est considéré comme non rénové avec joints ouverts et pas de membrane continue, une valeur d'étanchéité à l'air à 50 Pa de **9 vol/h** est donc retenue.

Dans TRNSYS, il faut encoder cette valeur à pression atmosphérique. La capture d'écran suivante venant d'une doctorante ayant obtenu des informations de la formation PEB – Etanchéité à l'air (Wallonie), permet le passage en pression atmosphérique. En considérant que le bâtiment est protégé du vent (site urbain), on obtient finalement un taux d'infiltration à pression atmosphérique de **0.3 vol/h**. Pour les zones sans contact avec l'extérieur, l'infiltration sera considérée comme nulle.

Étanchéité à l'air

☐ Valeurs caractérisant l'étanchéité à l'air :

- \dot{V}_{50} [m³/h]
 - Débit de fuite pour une différence de pression de 50 Pa
 - Calculé par interpolation des mesures lors du test de pressurisation
- n_{50} [h⁻¹] = \dot{V}_{50}/V_{int}
 - Taux de renouvellement d'air pour une différence de pression de 50 Pa
 - Pour une différence de pression de 2 Pa : $n_{sb} = n_{50} / a$
 - $a = 20$ si bâtiment fortement exposé au vent
 - $a = 25$ si bâtiment normalement exposé au vent
 - $a = 30$ si bâtiment protégé du vent (site urbain)
 - L'étanchéité à l'air moyenne de l'habitat belge : $n_{50} \approx 8,7 \text{ h}^{-1}$

Figure 30 : Etanchéité à l'air – Source : Formation PEB

4.2.6.6. Hypothèse portant sur les caractéristiques des occupants

Pour commencer avec le taux métabolique, selon la table 5-1 Metabolic Rates for Typical Tasks (ASHRAE, 2020), les activités suivantes sont celles correspondant le plus aux activités observées sur place :

- Reading, seated : 1.0 met
- Writing : 1.0 met
- Typing : 1.1 met

Il est possible de grouper des valeurs à 0.1 met de différence (ASHRAE, 2020). La valeur finale sera donc interpolée car on considère que les gens alternent entre les différentes activités équitablement sur 1h. On utilise finalement une valeur de : **1.05 met**.

Concernant l'isolation vestimentaire, " il est permis d'utiliser un seul occupant représentatif avec une valeur moyenne d'isolation vestimentaire pour représenter plusieurs individus lorsque ces derniers sont libres d'ajuster leurs vêtements pour tenir compte des différences individuelles en réponse à l'environnement thermique" (ASHRAE, 2020).

Selon la table 5-2 de la norme ASHRAE 55 (2020) : Clothing Insulation Icl Values for Typical Ensembles, les occupants ont les caractéristiques suivantes :

- Trousers, short-sleeve shirt : 0.57 clo
- Trousers, long-sleeve shirt : 0.61 clo

De la même façon que pour le taux métabolique, la valeur moyenne finale sera donc **0.59 clo**.

4.3. Mise en place du modèle de simulation

4.3.1. Environnement TRNSYS 3D

Comme mentionné précédemment, la simulation sera effectuée sur six zones thermiques. Cependant, l'intégralité du bâtiment sera modélisée en utilisant le plugin TRNSYS 3D sur SketchUp. Chaque pièce, chaque circulation et chaque grand ensemble ont été considérés comme des zones thermiques distinctes. Toutes les fenêtres extérieures ont été prises en compte car elles auront une incidence significative lors de la modélisation avec la matrice d'ombrage. En ce qui concerne les fenêtres adjacentes, elles ont été modélisées pour les 6 zones thermiques, tandis que les autres parois vitrées seront traitées dans TrnBuild comme des "couches massives" avec les caractéristiques d'une paroi en verre simple vitrage et cadre en aluminium, afin de faciliter la simulation et le débogage. Plusieurs surfaces virtuelles ont été utilisées, notamment pour représenter la double hauteur, le rez-de-chaussée et les circulations verticales.

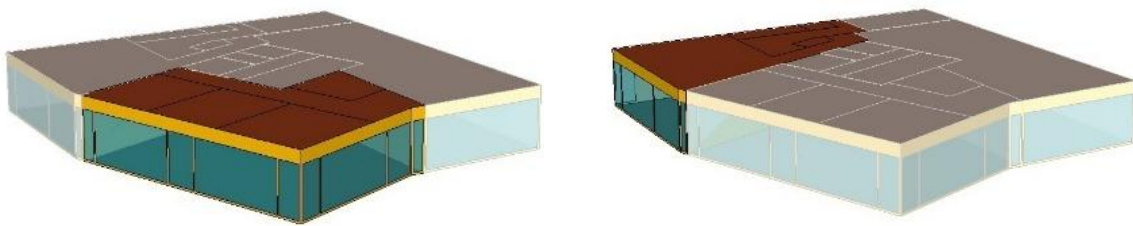


Figure 31 : Modélisation des zones thermiques du RDC

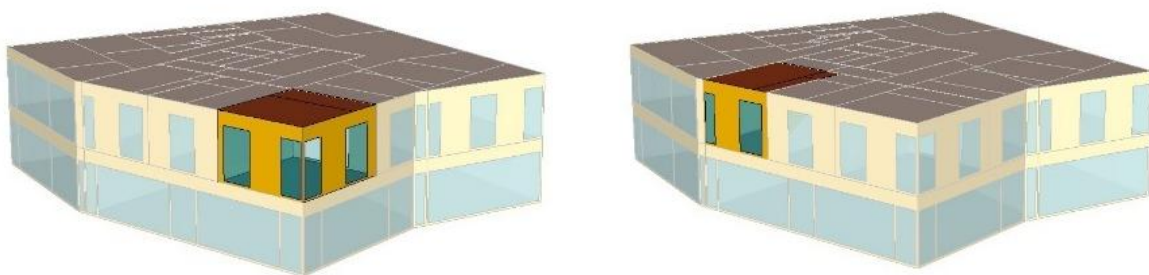


Figure 32 : Modélisation des zones thermiques du R+1

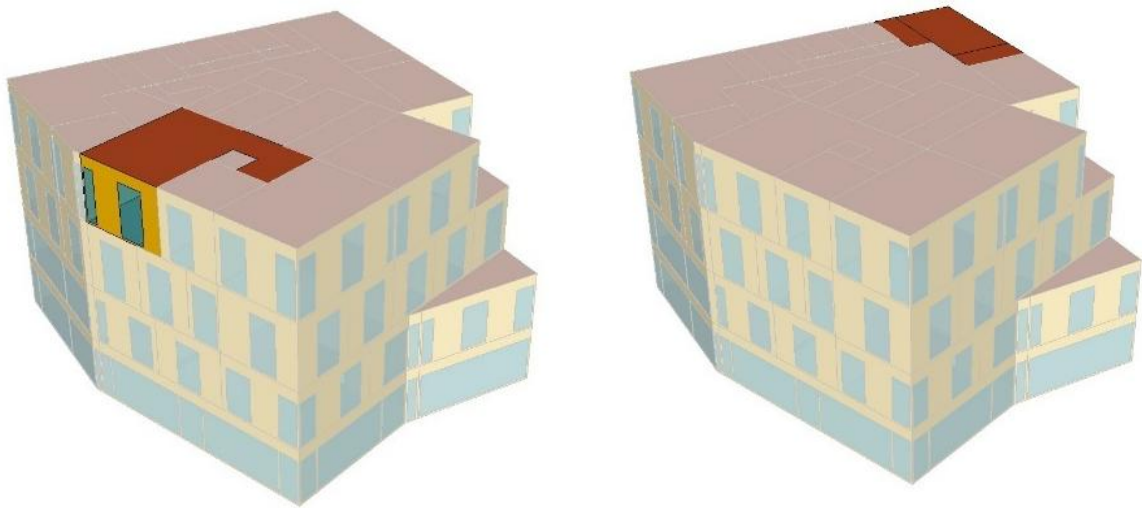


Figure 33 : Modélisation des zones thermiques du R+3

À ce stade, le bâtiment est correctement orienté dans SketchUp et les objets d'ombrage sont tracés (en mauve). Ces derniers vont influencer le rayonnement incident sur les fenêtres et non sur la façade. C'est pourquoi les protections solaires en tissu et les casquettes solaires ont été entièrement modélisées, tandis que la double peau ne l'a pas été. Pour mettre en œuvre un ombrage sur une paroi opaque, la procédure sera effectuée directement dans TRNBuild en utilisant un coefficient d'ombrage associé à chaque paroi. Finalement, l'environnement extérieur, incluant les bâtiments adjacents, les arbres et les murs d'enceinte, a été lui aussi tracé en tant qu'objet d'ombrage afin que son influence soit correctement intégrée dans la simulation.

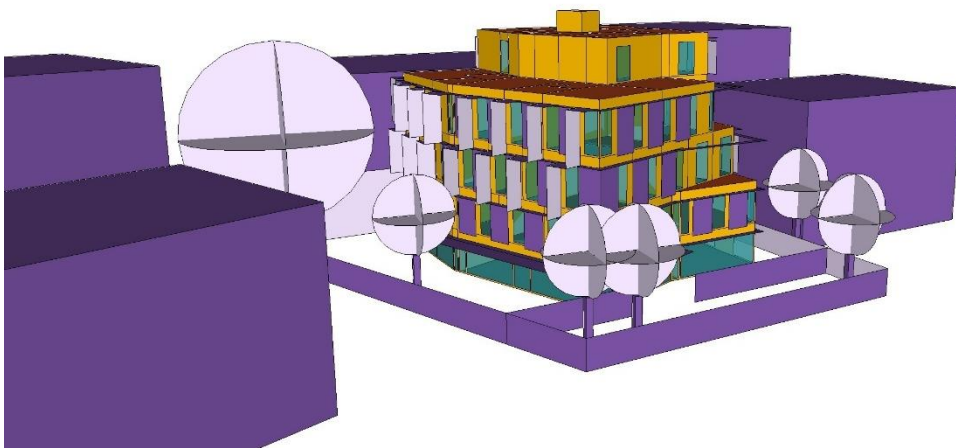


Figure 34 : Modélisation finale TRNSYS 3D

4.3.2. Environnement TrnBuild

La première étape du paramétrage dans TrnBuild a porté sur les vitrages. Les caractéristiques utilisées sont les suivantes :

Type de vitrage	Nom	U W/m ² . K	g %/100	Fraction de vitrage	Matériau du cadre
EXT_Window1	Extraweiss 10 mm	5.56	0.878	0.1 (fixe)	Aluminium
EXT_Window2	Extraweiss 10 mm	5.56	0.878	0.2 (ouvrant)	Aluminium
ADJ_Window1	Extraweiss 10 mm	5.56	0.878	0.1 (fixe)	Aluminium
ADJ_Window2	Extraweiss 10 mm	5.56	0.878	0.2 (porte vitrée)	Aluminium
EXT_Window1_ventilation	Extraweiss 10 mm	5.56	0.878	0.1 (fixe)	Aluminium
EXT_Window1_ventilation	Extraweiss 10 mm	5.56	0.878	0.2 (ouvrant)	Aluminium

Figure 35 : Caractéristiques des vitrages dans TrnBuild

Afin de modéliser les phases d'ouverture et de fermeture des baies, le planning suivant a été utilisé :

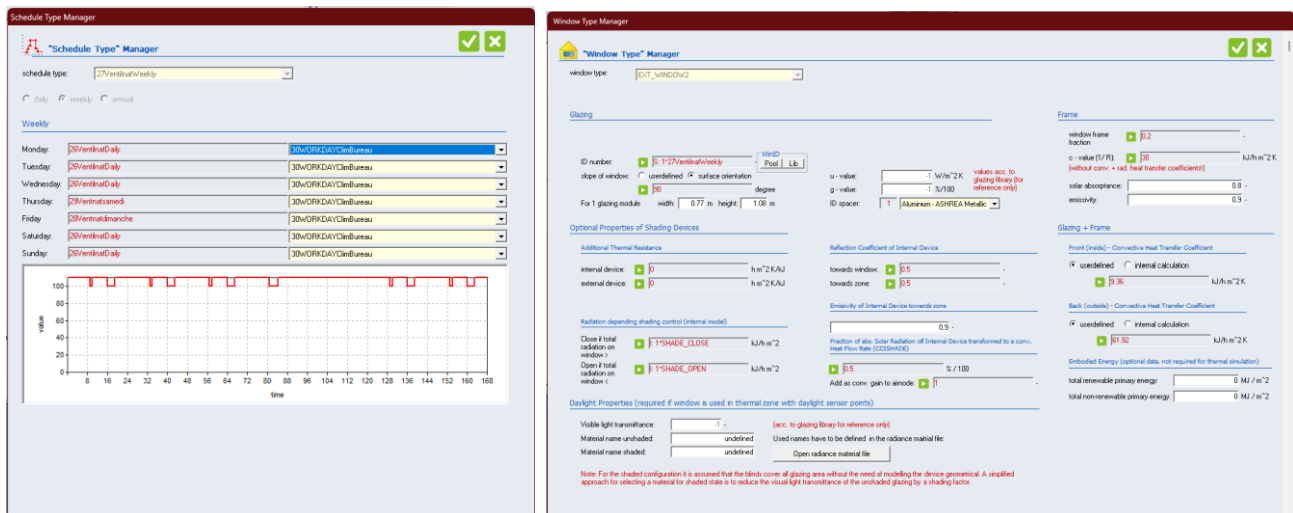


Figure 36 : Gestion de la ventilation naturelle dans TrnBuild

Selon ce dernier, TrnBuild réalise une modification d'ID, ce qui permet la transition d'une fenêtre à une ouverture sans vitrage avec un coefficient U très élevé et un facteur g de 1 (laissant passer tout le rayonnement). Pour la prise en compte de l'ombrage de la double peau, un "external shading factor" de 0.85 sera appliqué sur les parois externes.

Ensuite, les types "ventilation" (**annexe 7**), "infiltration" et "refroidissement" ont été configurés. Durant les visites sur site, la température de consigne dans les pièces était fixée à 22°C. En se référant aux fiches techniques et aux études énergétiques (**annexe 8**), la capacité de refroidissement des unités de climatisation sera de 1.6kW, ce qui équivaut à 5760 kJ/h en puissance absolue. En ce qui concerne la déshumidification, le système sera activé dès que le taux d'humidité relative atteindra 55 % et que la pièce sera utilisée. La littérature indique des niveaux d'humidité relative confortables qui se situent entre 40 et 60 % dans un bâtiment climatisé (Damiani et al., 2016).

Enfin, pour les charges internes, chaque salle sera pourvue de gains liés : aux occupants, au matériel et à l'éclairage. Pour les occupants, on utilise une valeur de 60 W/m² (ASHRAE, 2020), correspondant à un niveau d'activité variant entre assis et travaillant sur un ordinateur. Nous nous trouvons dans une situation où l'éclairage LED est utilisé dans l'intégralité du bâtiment. Ainsi, une puissance spécifique de 4 W/m² (« Tout au LED », 2022), soit 14.4 kJ/h/m² est renseignée. Pour les gains spécifiques aux équipements, il est supposé que chaque individu est équipé d'un ordinateur ayant une charge interne de 75 W (Environmental design, 1999), ce qui équivaut à 270 kJ/h. Les ventilateurs de plafonds ont une puissance nominale de 75 W par unité. L'**annexe 9** constitue une synthèse de certains gains spécifiques non mentionnés (imprimante, électroménager, etc.).

4.3.3. Environnement TRNSYS Studio

Finalement, le fichier provenant de TRNSYS 3D (fichier .b18) est utilisé dans TRNSYS Studio. Pour ce faire, on utilise divers modules tels que les données du bâtiment, du sol et les informations météorologiques. L'intégralité de ces modules forme la structure de notre modélisation.

Dans cette première structure, on retrouve les modules suivants :

- Type 9e - Lecteur de fichier de données météo (format personnalisé) : il permet l'import de données horaires externes à partir d'un fichier texte à plusieurs colonnes (données météorologiques réelles).
- Type 33e – Calculateur psychrométrique : il calcule les propriétés de l'air humide.
- Type 69b – Calculateur du facteur de nébulosité : il se base sur les données météorologiques et la hauteur du site.
- Type 16c – Calcul du rayonnement sur surface inclinée : il permet le calcul du rayonnement solaire total incident à partir des données de rayonnement global et diffus.
- Type 77 - Modèle de température du sol en profondeur : il est principalement employé pour déterminer les interactions thermiques avec le sol (l'albédo peut y être paramétré).
- Type 56 Building – Modèle de construction multizone (.b18).
- Type 65c – Plotter pour les résultats

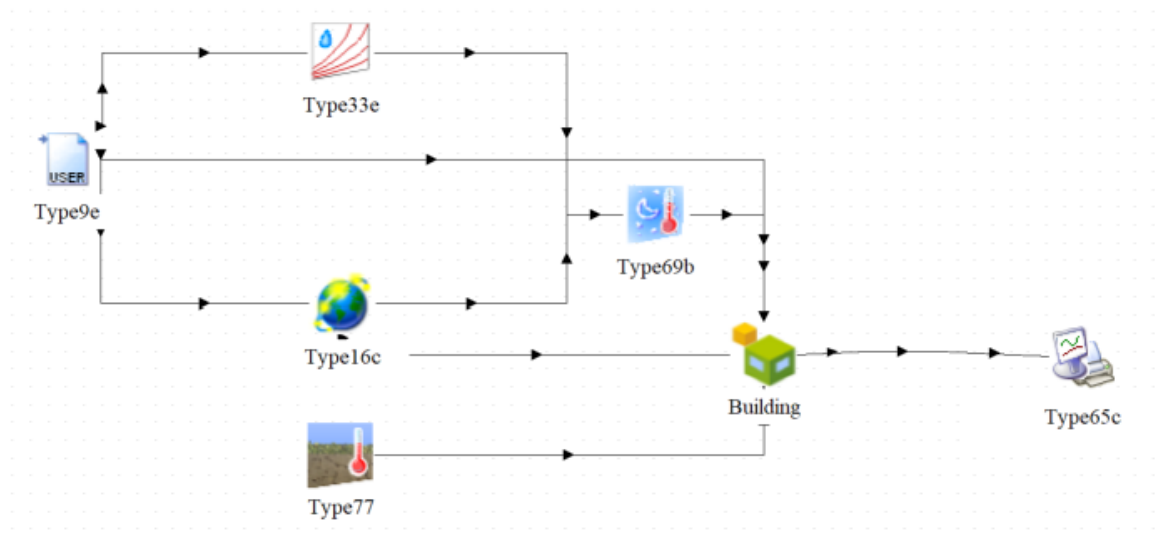


Figure 37 : Structure de la simulation avec données météorologiques réelles – Capture d'écran tirée du logiciel

4.4. Calibration du modèle

4.4.1. Incertitude et paramètres de la calibration

La calibration est un processus qui permet d'évaluer la performance thermique à long terme d'un bâtiment sans nécessiter des mesures sur site sur une durée prolongée (Anh Tuan Nguyen et al., 2012). Il est important, à ce stade, de prendre en considération les incertitudes de mesure de chaque capteur, dues à leur déplacement ou à leur mauvais positionnement.

Les plages de mesures retirées pour chaque capteur sont les suivantes :

- Capteur 5 (Bureau 5 Sud) : la période du 12/04/2025 à 12h00 jusqu'au 23/04/2025 à 13h30 sera exclue en raison de son déplacement vers une autre salle par l'équipe de gestion (opération de nettoyage).
- Capteur 4 (Meeting room Nord) : la période du 12/04/2025 à 12h00 jusqu'au 23/04/2025 à 13h00 sera exclue en raison de son déplacement vers une autre salle par l'équipe de gestion (opération de nettoyage).
- Capteur 3 (Meeting room Sud) : la période du 12/04/2025 à 12h00 jusqu'au 23/04/2025 à 13h00 sera exclue en raison de son déplacement vers une autre salle par l'équipe de gestion (opération de nettoyage).
- Capteur 2 (Réception) : la période du 12/04/2025 à 12h00 jusqu'au 23/04/2025 à 13h00 sera exclue en raison de son déplacement vers une autre salle par l'équipe de gestion (opération de nettoyage). La période du 23/04/2025 à 13h00 jusqu'au 15/05/2025 à 11h00 sera également exclue car le capteur a été retrouvé à plusieurs reprises, derrière un ordinateur, dans un tiroir du bureau ou directement sous la ventilation.
- Capteur 1 (Ancien Café) : la période du 12/04/2025 à 12h00 jusqu'au 23/04/2025 à 13h00 sera exclue en raison de son déplacement vers une autre salle par l'équipe de gestion (opération de nettoyage). La période du 23/04/2025 à 13h00 jusqu'au 15/05/2025 à 11h00 sera également exclue car le capteur a été retrouvé à plusieurs reprises, dans une armoire, directement sous la climatisation ou avec les piles retirées par une personne extérieure.

Etant collectées à intervalles de 30 minutes, les données permettent de calibrer sur des périodes plus courtes, caractéristiques du mode d'exploitation (ASHRAE, 2014). Dans notre situation, la durée sera de 3 semaines minimum pour chaque saison. Ces intervalles sont considérés comme étant représentatifs d'un cycle opérationnel standard pour le bâtiment et permettent de ne pas utiliser des résultats erronés qui induiraient des erreurs et des biais dans les résultats futurs.

4.4.2. Critères de calibration (NMBE et CV(RMSE))

Les deux critères de calibration statistique suivants, à savoir le NMBE (Normal Mean Bias Error) et le CV(RMSE) (Coefficient Variation of Root Mean Squared Error), seront appliqués. Cette méthode permet de vérifier que le modèle atteint des seuils acceptables, définis par la norme ASHRAE (ASHRAE, 2014, 2020). Les seuils applicables pour des mesures effectuées sur une base horaire sont de $\pm 10 \%$ et $\pm 30 \%$, respectivement.

L'indice NMBE est employé afin d'évaluer la différence moyenne entre les données simulées et les données mesurées. Le CV(RMSE) permet d'appréhender la capacité du modèle à être réaliste (Kaboré, 2015).

À chaque étape, il est prévu de calculer et de vérifier ces indices statistiques. L'objectif consistera à ajuster les paramètres d'une zone thermique avant de passer à la suivante. Pour finir, une vérification globale sera réalisée pour l'ensemble des zones thermiques de l'étude.

Le NMBE est calculé à l'aide de la relation suivante (Kaboré, 2015) :

$$NMBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{ip} - t_{im})}{n-1} * \frac{1}{\overline{t_m}} (\%) \quad (5)$$

Avec :

- t_{ip} : variable simulée (à chaque pas de temps)
- t_{im} : variable mesurée (à chaque pas de temps)
- $\overline{t_m}$: moyenne arithmétique des n variables mesurées
- n : nombre de mesures de la variable

Le CV(RMSE) est calculé à l'aide de la relation suivante (Kaboré, 2015) :

$$CV(RMSE)(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{ip} - t_{im})^2}{n-1}} * \frac{1}{\overline{t_m}} (\%) \quad (6)$$

Avec :

- t_{ip} : variable simulée (à chaque pas de temps)
- t_{im} : variable mesurée (à chaque pas de temps)
- $\overline{t_m}$: moyenne arithmétique des n variables mesurées
- n : nombre de mesures de la variable

4.4.3. Processus itératif de calibration

Il est envisageable d'employer des algorithmes spécifiques pour cette phase de calibration, cependant, pour cette recherche, la décision a été prise d'opter pour une approche de type "essais et erreurs".

À chaque itération, l'objectif est d'analyser les graphiques afin d'identifier où le modèle s'éloigne le plus des mesures réelles. Des écarts systématiques (NMBE) peuvent signaler des anomalies dans les apports/dépensements constants (isolation, infiltration, charges internes par exemple). Des écarts dynamiques (CV(RMSE)) élevés peuvent indiquer des problèmes avec les profils horaires, ou l'inertie thermique par exemple.

Pour chaque pièce, un tableau récapitulatif des itérations les plus importantes est fourni et les graphiques associés sont en annexe. La simulation pour la calibration débute le 24 mars à 00h00 afin de compenser les deux premiers jours pendant lesquels les calculs s'initialisent et peuvent produire des résultats incorrects.

4.4.3.1. Zone thermique Bureau 5 Sud (Capteur 5)

Itération n°1 : exclusion des systèmes de CVC afin d'étudier le comportement du modèle. Mise en évidence d'une surestimation des températures et de l'humidité relative.

Itération n°2 à 12 : Ajustement initial des paramètres de la climatisation et de la déshumidification. Capacité de refroidissement sensible fixée à 5760 kJ/h (valeur provenant de la documentation technique), suite à l'observation d'erreurs de convergence causées par une capacité illimitée.

Itération n°13 : rectification d'un décalage temporel (modification de la date de début de la simulation). Les deux premiers jours étant incohérents en raison des "initial values" du logiciel.

Itération n°14 à 21 : Implémentation d'un planning d'occupation détaillé des bureaux. Réaction cohérente du modèle avec les profils journaliers observés.

Itération n°22 à 26 : Ajustement du taux d'infiltration, précisant la valeur à 0,2 vol/h (tests : 0,3 à 0,05, 0,09, 0,2 vol/h). Décision confirmée par une amélioration significative des valeurs d'humidité en dehors des heures d'ouverture.

Itération n°27 à 35 : Ajustement de la consigne de déshumidification et de la température. Réduction des gains internes provenant des équipements (270 kJ/h à 200 kJ/h).

La 35ème itération a finalement été sélectionnée comme la version finale du modèle calibré pour cette zone en raison de sa représentativité, même pendant les périodes d'inoccupation telles que les week-ends (**annexe 10 et 11**).

Itération	Température [°C]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	8.03	11.46	10.09	13.88
N°21	0.38	7.22	2.75	6.91
N°25	0.37	7.30	2.78	6.94
N°35	-0.36	7.42	2.10	6.69
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 5 : Résumé des critères de calibration Bureau 5 Sud pour la température

Itération	Humidité [%]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	10.49	17.49	19.13	24.55
N°21	7.59	16.43	12.68	18.30
N°25	1.1	15.06	5.95	15.08
N°35	-0.37	14.90	2.51	12.53
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 6 : Résumé des critères de calibration Bureau 5 Sud pour l'humidité relative

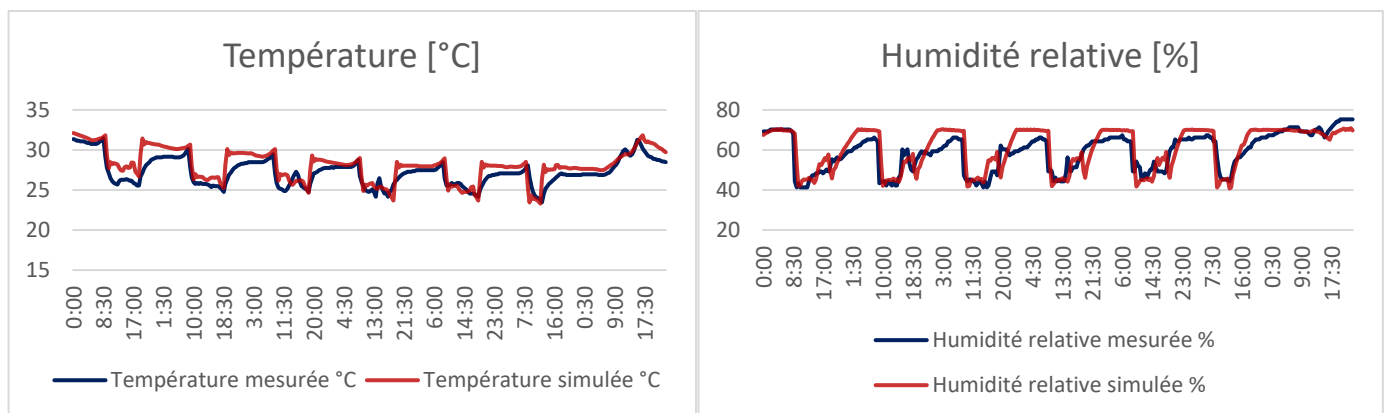


Figure 38 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur une semaine (19/05 - 25/05)

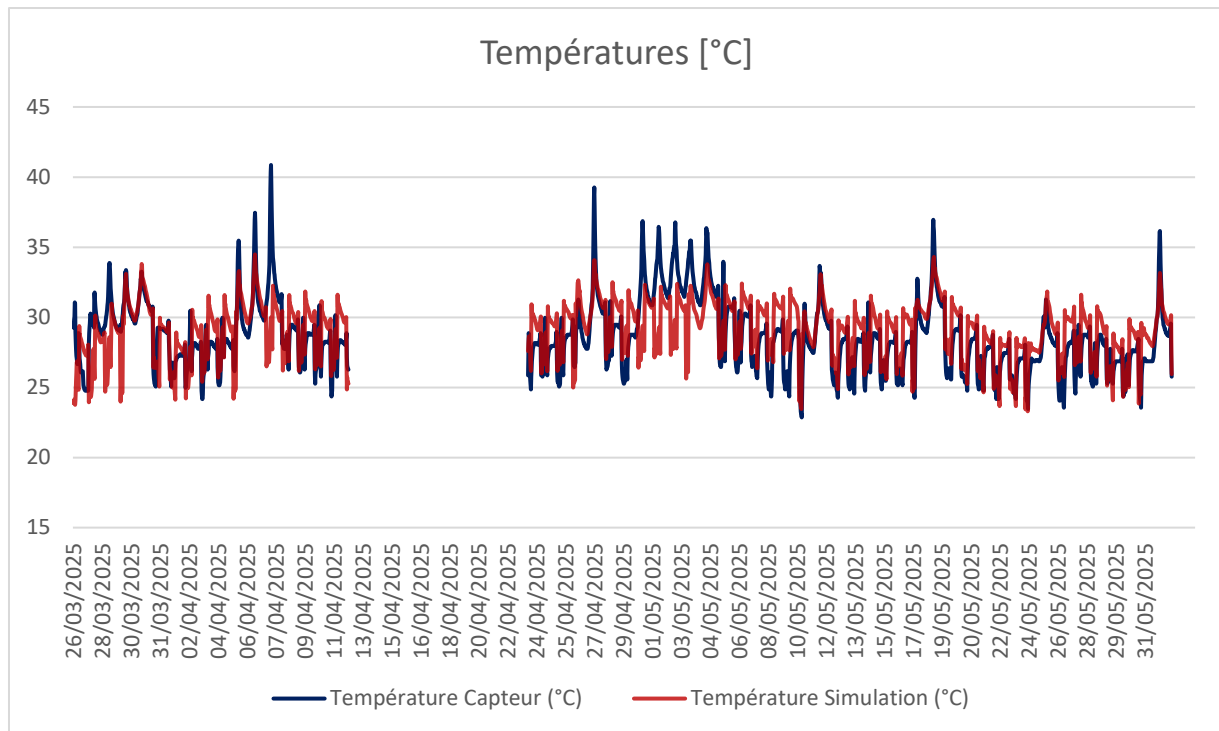


Figure 39 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur deux saisons (température)

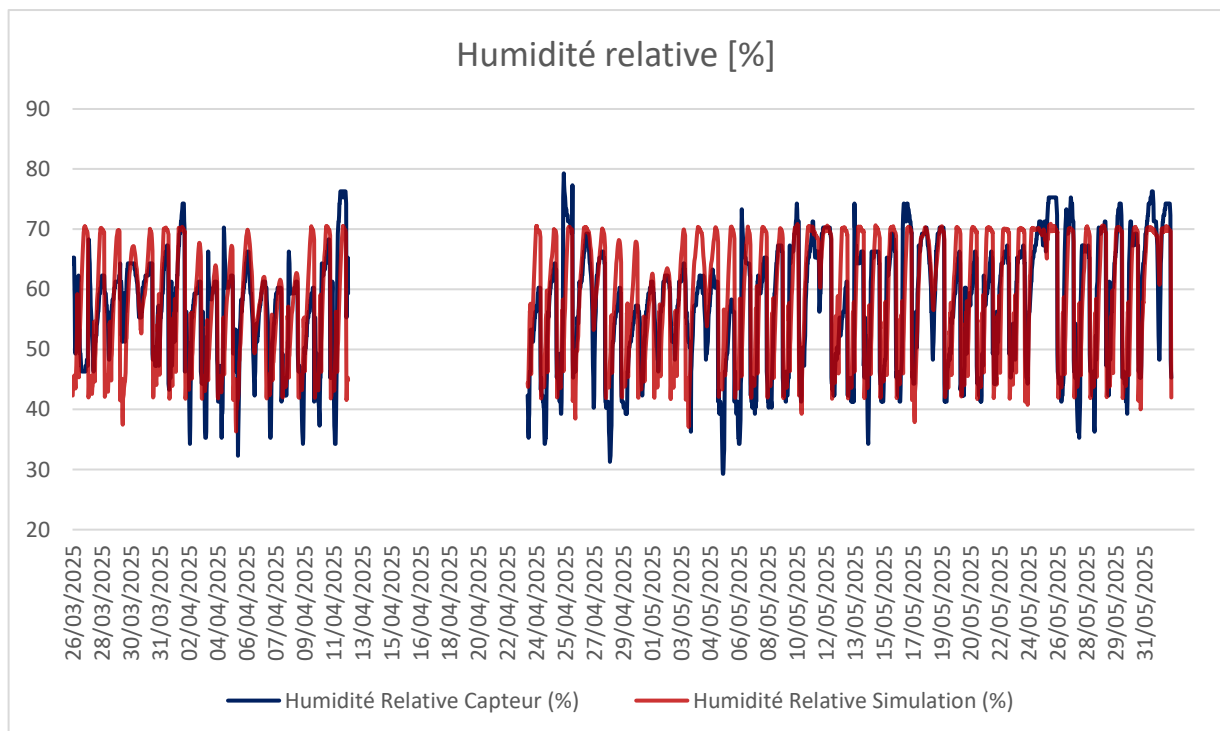


Figure 40 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur deux saisons (humidité relative)

4.4.3.2. Zone thermique Meeting room Nord (Capteur 4)

Itération n°1 : Exclusion des systèmes de CVC afin d'étudier le comportement du modèle. Mise en évidence d'une surestimation des températures et de l'humidité relative.

Itération n°2 à 6 : Ajustement de la climatisation et de la déshumidification avec les mêmes paramètres que les bureaux.

Itération n°7 à 9 : Implémentation d'un planning d'occupation détaillé de la salle de réunion pour une semaine type (05/05/2025-11/05/2025).

Itération n°10 à 13 : Ajustement des gains liés aux équipements, du seuil de déshumidification et du taux d'infiltration. Modifications mineures du planning.

Itération n°14 à 16 : Augmentation des gains liés aux équipements et aux occupants. La consigne de déshumidification et la température de consigne ont été fixées à 50% et 20°C respectivement, pour répondre aux besoins de refroidissement rapide. Planning d'occupation intégré aux gains internes.

La 16ème itération a finalement été sélectionnée comme la version finale du modèle calibré pour cette zone. (**annexe 12 et 13**)

Itération	Température [°C]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	3.34	10.22	2.46	9.75
N°9	0.53	11.41	0.65	10.50
N°16	0.07	9.97	0.23	9.34
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 7 : Résumé des critères de calibration Meeting room Nord pour la température

Itération	Humidité [%]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	14.70	18.78	20.06	24.18
N°9	-4.40	19.98	-1.28	16.37
N°16	2.41	15.45	4.84	14.21
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 8 : Résumé des critères de calibration Meeting room Nord pour l'humidité relative

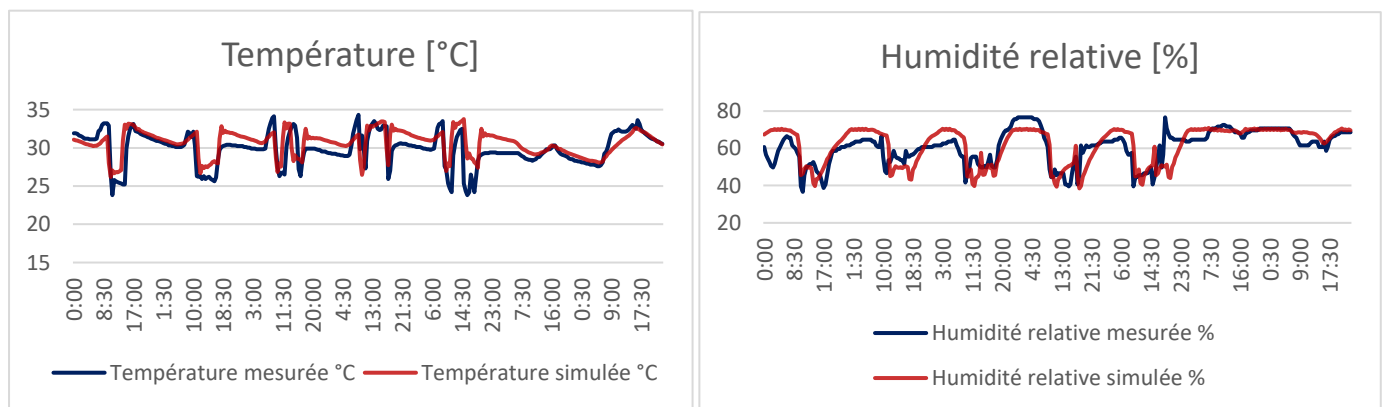


Figure 41 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur une semaine (05/05 - 11/05)

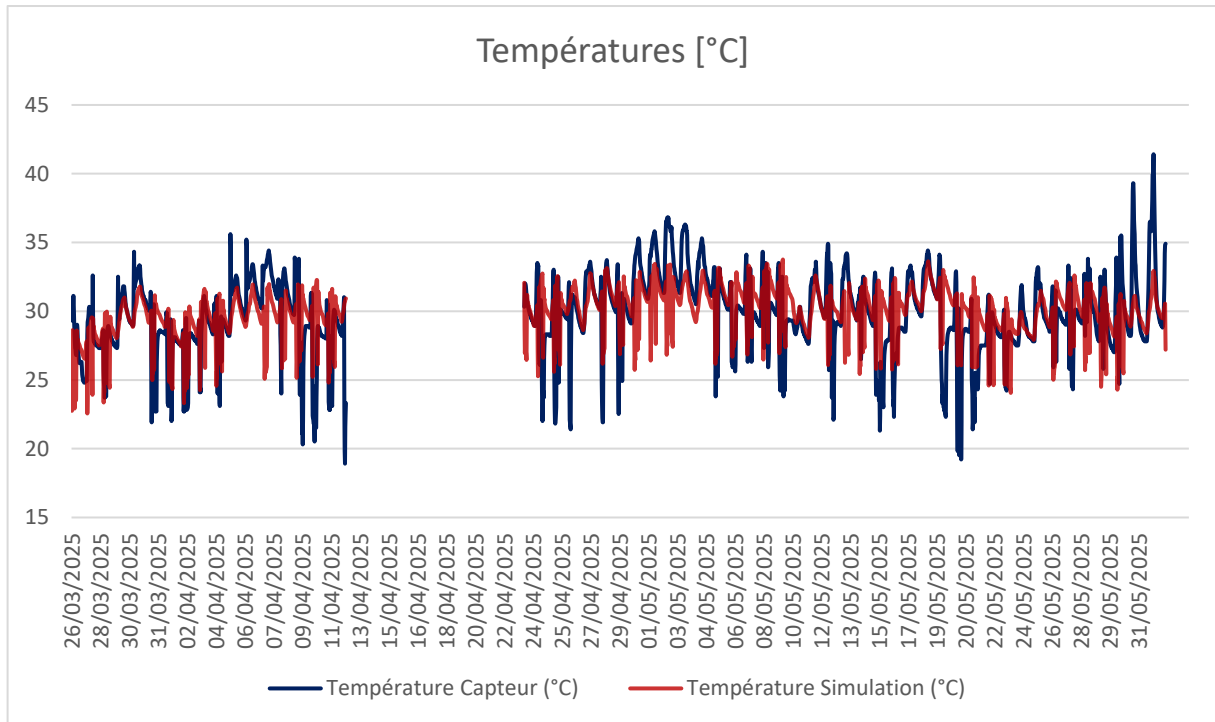


Figure 42 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur deux saisons (température)

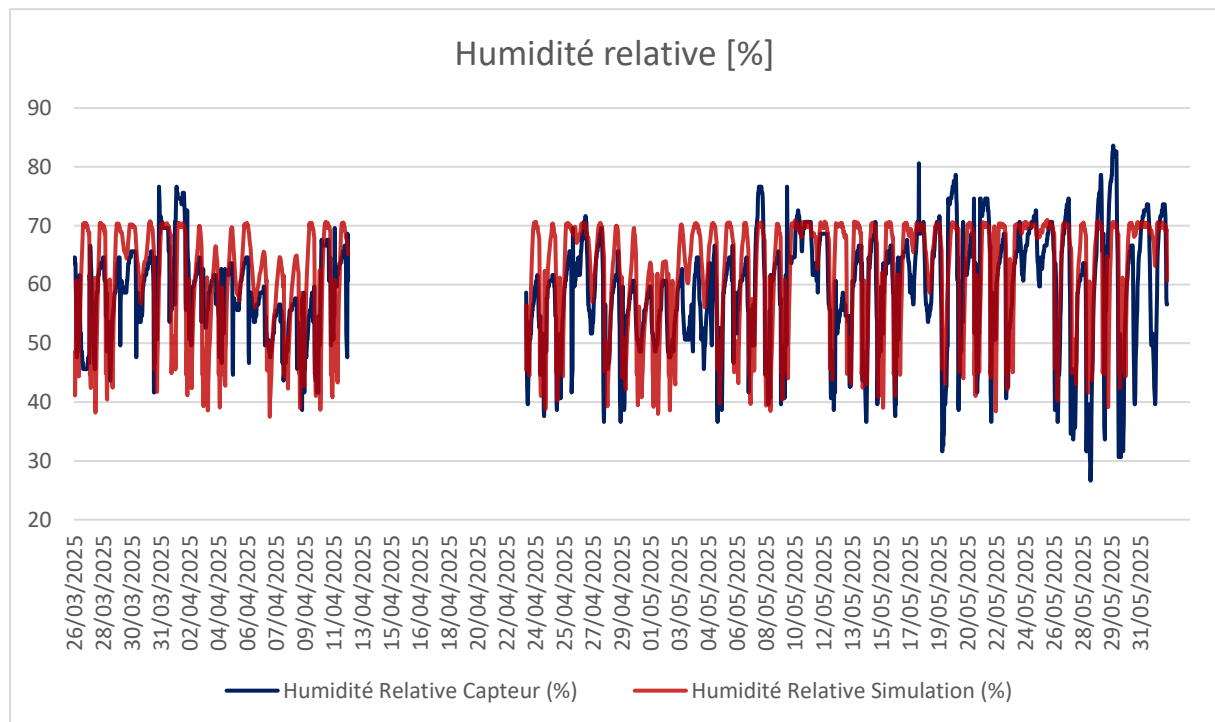


Figure 43 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur deux saisons (humidité relative)

4.4.3.3. Zone thermique Meeting room Sud (Capteur 3)

Itération n°1 : Implémentation d'un planning d'occupation détaillé de la salle de réunion pour une semaine type (12/05/2025-18/05/2025). Les observations révèlent une utilisation moindre avec plusieurs journées inoccupées. Ajustement des gains internes (personne et équipement) dans ce sens. Utilisation des paramètres (climatisation et taux d'infiltration) de la Meeting room Nord.

Itération n°2 à 4 : Ajustement du planning et intégration de ce dernier dans les gains internes. Utilisation d'un taux d'infiltration de 0.4 vol/h.

Itération n°5 à 7 : Modification des gains liés aux personnes et équipements, et du seuil de déshumidification.

Itération n°8 à 11 : Essais portant sur la température de consigne et un seuil de déshumidification de 99% en dehors des heures d'ouverture (augmentation du biais systématique)

La 7ème itération a finalement été sélectionnée comme la version finale du modèle calibré pour cette zone. **(annexe 14 et 15)**

Itération	Température [°C]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	3.43	9.97	4.16	11.93
N°7	2.39	9.43	3.17	11.58
N°11	3.39	8.57	3.5	11.47
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 9 : Résumé des critères de calibration Meeting room Sud pour la température

Itération	Humidité [%]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	0.42	16.22	3.97	16.87
N°7	3.39	14.68	6.61	16.44
N°11	7.39	17.32	12.10	19.59
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 10 : Résumé des critères de calibration Meeting room Sud pour l'humidité relative

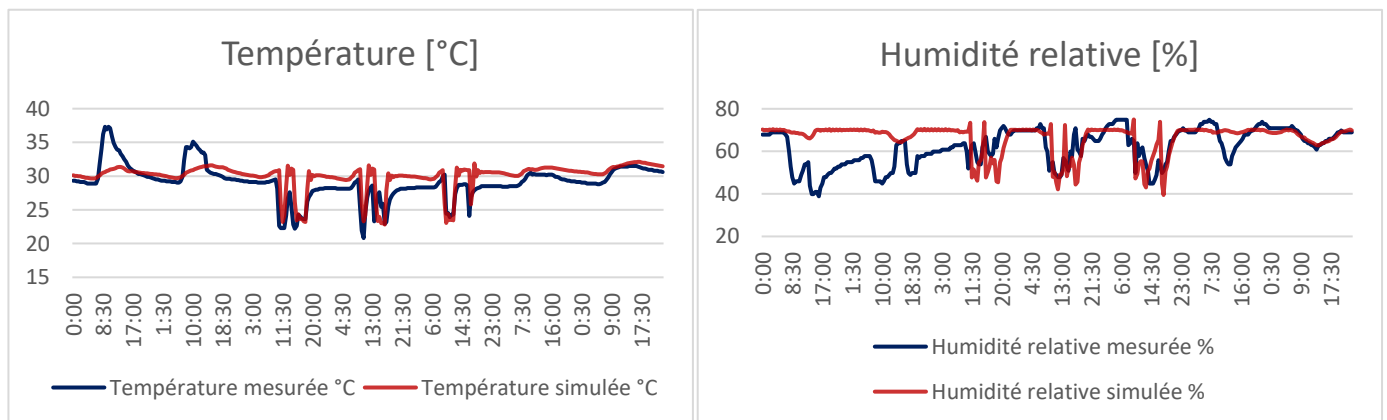


Figure 44 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur une semaine (12/05 - 18/05)

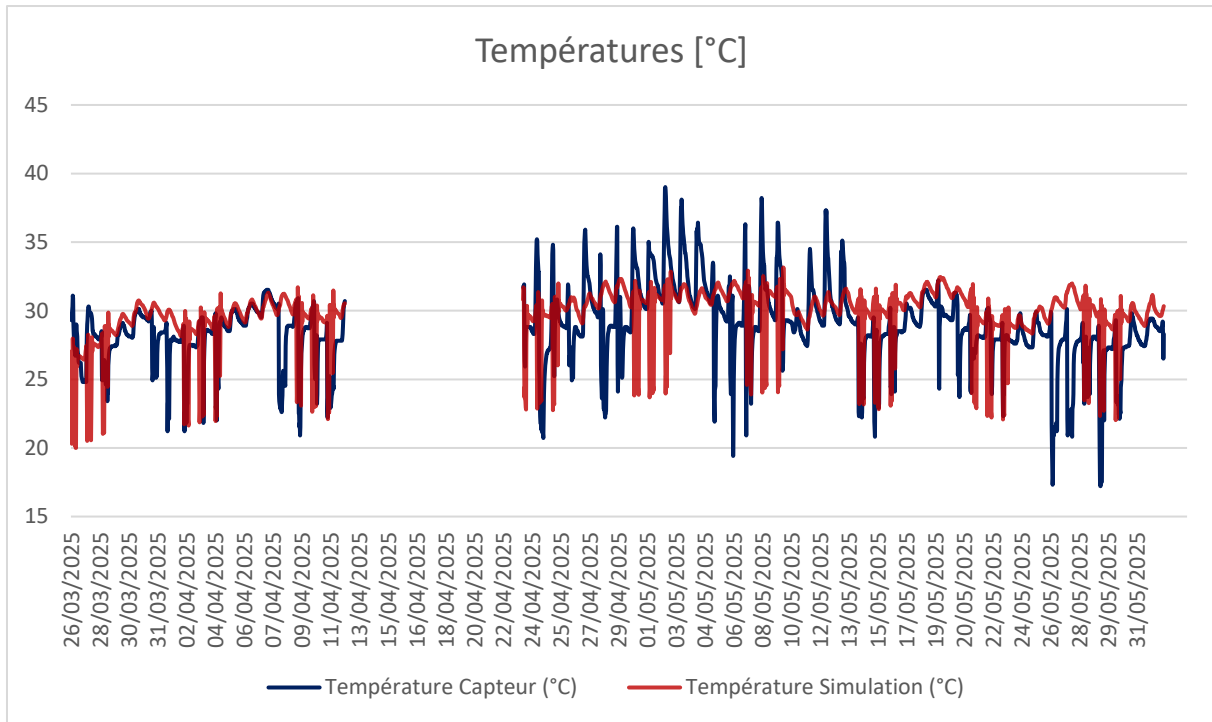


Figure 45 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur deux saisons (température)

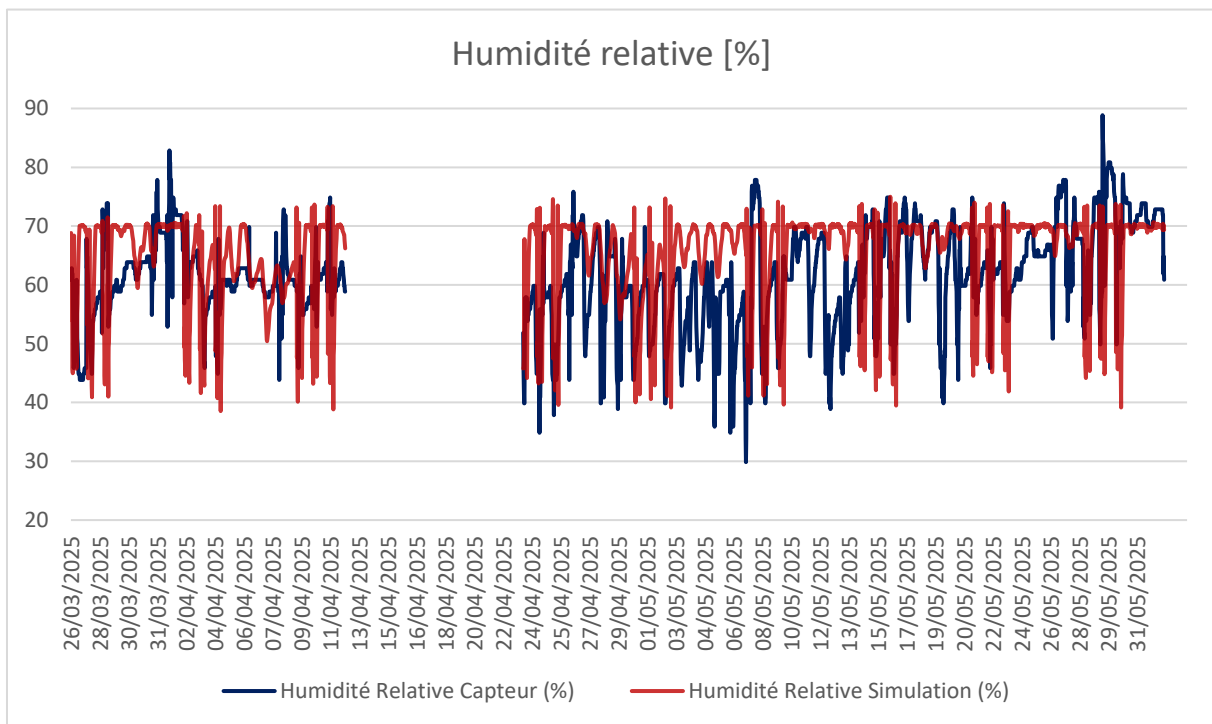


Figure 46 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur deux saisons (humidité relative)

4.4.3.4. Zone thermique Ancien Café (Capteur 1)

Itération n°1 : Exclusion des systèmes de CVC afin d'étudier le comportement du modèle. Les températures semblent sous-estimées et l'humidité relative surestimée.

Itération n°2 à 16 : Ajustement de la climatisation et de la déshumidification.

Itération n°17 : Implémentation de la ventilation naturelle (10 vol/h, diminution de 0.4°C et augmentation de 4.5% selon les hypothèses précédentes).

Itération n°18 à 19 : Ajustement des seuils de déshumidification (50% et 75%).

Itération n°20 : Confirmation du maintien du taux d'infiltration à 0.3 vol/h.

Itération n°21 à 22 : Modification du planning d'utilisation de la climatisation et de la ventilation naturelle. Augmentation de la puissance frigorifique sensible à 3.2 kW (11520 kJ/h), justifiée par la taille plus importante de la pièce.

Itération n°23 à 27 : Ajustement de la consigne de température et du seuil de déshumidification (55%)

Itération n°28 : Augmentation des gains internes liés aux occupants pour compenser la mobilité accrue du RDC. Ajout de gains internes équipements supplémentaires pour inclure des éléments précédemment omis (écrans publicitaires et éclairage des présentoirs).

La 29ème itération a finalement été sélectionnée comme la version finale du modèle calibré pour cette zone. Une différence entre les périodes de calibration a été observée, la période du 15/05 au 02/06 sera privilégiée. (**annexe 16 et 17**)

Itération	Température [°C]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	-6.61	7.47	0.88	4.47
N°17	-6.10	7.19	1.18	3.87
N°29	-5.53	6.81	2.03	4.43
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 11 : Résumé des critères de calibration Ancien café pour la température

Itération	Humidité [%]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	18.21	19.59	14.02	16.80
N°17	5.92	13.67	1.14	11.28
N°29	5.75	12.49	0.72	9.27
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 12 : Résumé des critères de calibration Ancien café pour l'humidité relative

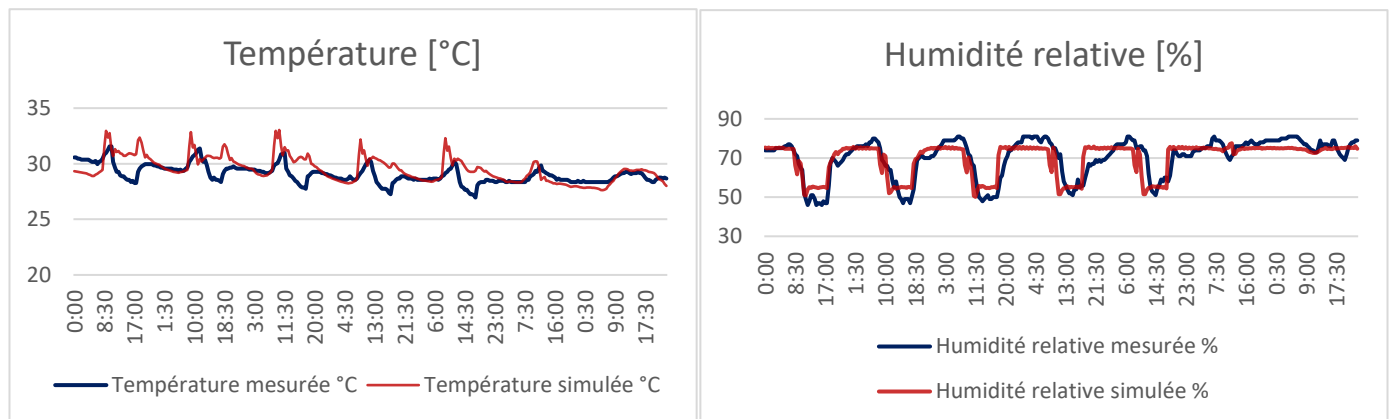


Figure 47 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur une semaine (19/05 - 25/05)

4.4.3.5. Zone thermique Réception (Capteur 2)

Itération n°1 : Utilisation des paramètres finaux de la calibration de la zone Ancien café. Le RDC étant ouvert et les zones connectées entre elles directement, ces paramètres devraient aussi être adaptés pour la zone thermique Réception.

Itération n°2 : Ajout de gains internes équipements supplémentaires pour inclure des éléments précédemment omis (écrans publicitaires, imprimantes). Réduction du seuil de déshumidification (53%).

La 2ème itération a finalement été sélectionnée comme la version finale du modèle calibré pour cette zone. (**annexe 18 et 19**)

Itération	Température [°C]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	-5.42	6.35	0.22	2.24
N°2	-2.12	5.07	3.21	5.21
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 13 : Résumé des critères de calibration Réception pour la température

Itération	Humidité [%]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
N°1	3.95	10.31	1.05	9.23
N°2	1.38	10.11	-0.65	8.88
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 14 : Résumé des critères de calibration Réception pour l'humidité relative

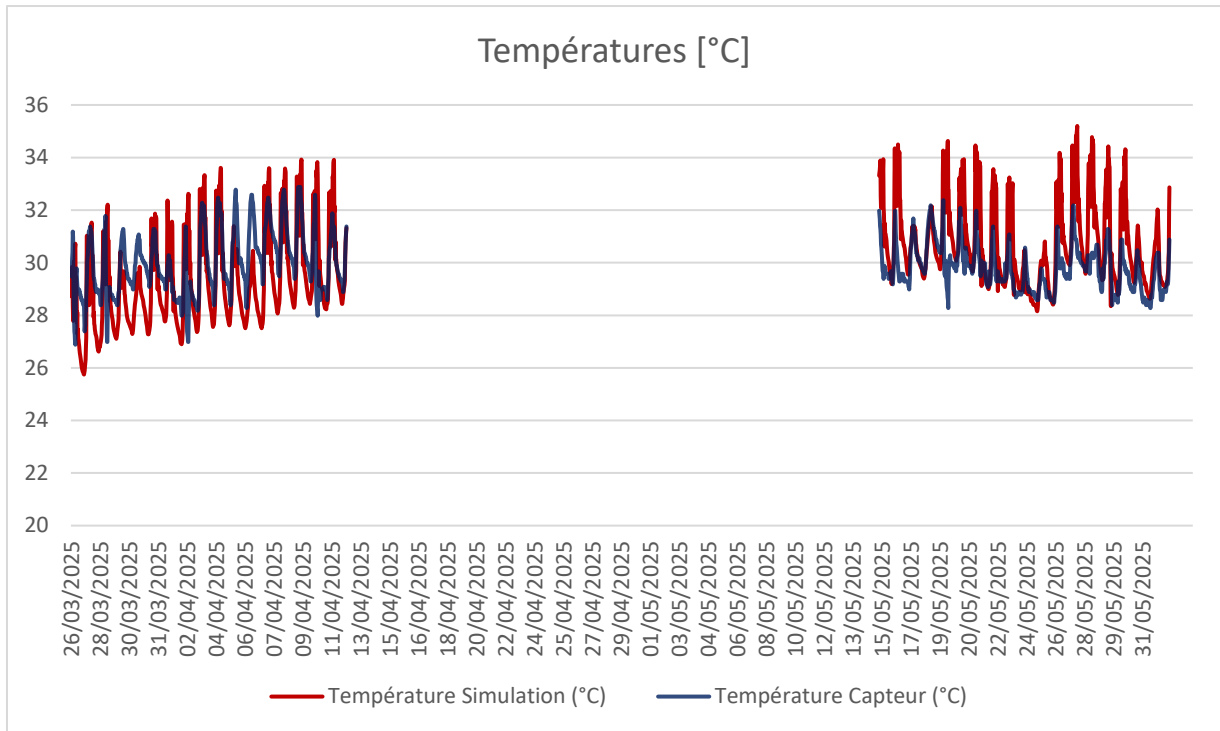


Figure 48 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur deux saisons (température)

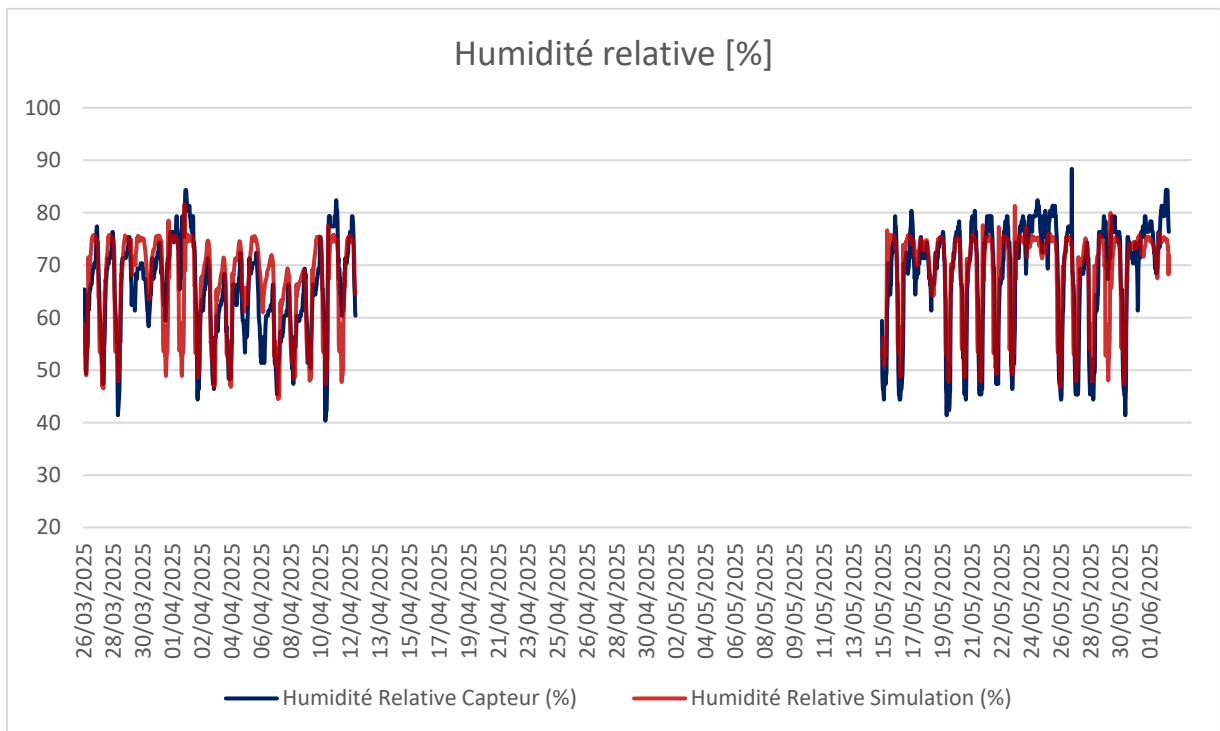


Figure 49 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulées sur deux saisons (humidité relative)

4.4.4. Calibration finale

A ce stade, une dernière vérification de chaque pièce est réalisée :

Itération	Température [°C]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
Bureau 5 Sud (R3)	-0.18	7.37	2.29	6.74
Meeting Nord (R1)	0.70	10.07	0.85	9.44
Meeting Sud (R1)	3.32	9.66	4.10	11.82
Ancien café (RDC)	-5.47	6.76	2.09	4.46
Réception (RDC)	-2.12	5.07	3.21	5.25
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 15 : Résumé final des critères de calibration pour la température

Itération	Humidité [%]			
	Saison sèche		Saison humide	
	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)
Bureau 5 Sud (R3)	-0.46	14.86	2.49	12.51
Meeting Nord (R1)	1.94	15.40	4.44	14.10
Meeting Sud (R1)	2.76	14.61	6.07	16.14
Ancien café (RDC)	5.72	12.47	0.71	9.27
Réception (RDC)	1.38	10.11	-0.65	8.88
ASHRAE	<±10%	<±30%	<±10%	<±30%

Tableau 16 : Résumé final des critères de calibration pour l'humidité relative

Le bâtiment étant occupé de manière irrégulière et avec les hypothèses se basant sur la littérature existante et non sur des mesures réelles, l'incertitude des résultats de simulation est inévitable. Une telle incertitude n'est pas facile à reproduire en utilisant des modèles déterministes, par conséquent, le modèle calibré n'est pas une solution parfaitement convergente. En revanche, il rentre dans le cadre de la norme ASHRAE avec des coefficients statistiques qui répondent aux exigences.

4.5. Mise en place du scénario de référence, des variantes et des critères de comparaison

4.5.1. Scénario de référence et variantes

Pour la réalisation du scénario de référence et des scénarios supplémentaires, le fichier employé lors de la phase de calibration est progressivement délesté des paramètres détaillés dans la section "Mise en place du modèle de simulation". L'objectif étant de restituer le bâtiment dans son état avant rénovation. Les modifications seront donc effectuées uniquement dans les environnements TrnBuild puis TRNSYS Studio, laissant la géométrie et les volumes tel quel.

En ce qui concerne ces différents scénarios, deux d'entre eux nécessitent des informations complémentaires car ils ne font pas partie du bâtiment dans son état actuel (scénarios futurs). Il s'agit de l'isolation de la toiture (S7) et de la mise en place d'une pergola sur le rooftop (S6).

Pour le premier, les parois de toiture sont remplacées par des compositions contenant un isolant XPS d'une épaisseur de 8 cm, conformément aux propositions présentes dans les travaux de rénovation.

Dans le deuxième cas, on s'intéresse à l'installation d'une pergola en toiture avec des toiles tendues. Afin de modéliser son effet, un coefficient d'ombrage est paramétré dans TrnBuild. Ce coefficient est défini par le rapport entre la surface opaque de l'élément d'ombrage et la surface totale projetée sur les parois correspondantes. Une valeur de 0.6 sera finalement utilisée, indiquant que 60% du rayonnement solaire est absorbé ou renvoyé par les tissus. Cette valeur est issue des tests effectués sur des échantillons de tissu uni blanc. Pour une porosité de 10%, le coefficient d'ombrage interne correspondant est de 0,41, ce qui se traduit par une transmission solaire directe de 41% (Peng, 2016).

La dernière modification réalisée dans l'environnement TrnBuild consiste à supprimer l'ensemble du système de climatisation du bâtiment afin d'analyser l'impact précis de chaque stratégie bioclimatique. Il est tout de même prévu de rajouter cette climatisation pour simuler les besoins en énergie de refroidissement sensible. Chaque scénario sera ensuite réalisé à partir de cet état initial afin de garantir qu'ils partent tous d'une base commune.

Suite aux modifications précédentes effectuées dans l'environnement TrnBuild, un nouveau schéma de simulation est finalement utilisé dans l'environnement TRNSYS Studio. Ce dernier permet l'utilisation du fichier météorologique TMY mentionné précédemment.

- Type 15-3 – Fichier météo au format epw (TMY).
- Type 77 - Modèle de température du sol en profondeur : il est principalement employé pour déterminer les interactions thermiques avec le sol (l'albédo peut y être paramétré).
- Type 56 « Building » – Modèle de construction multizone (format .b18).

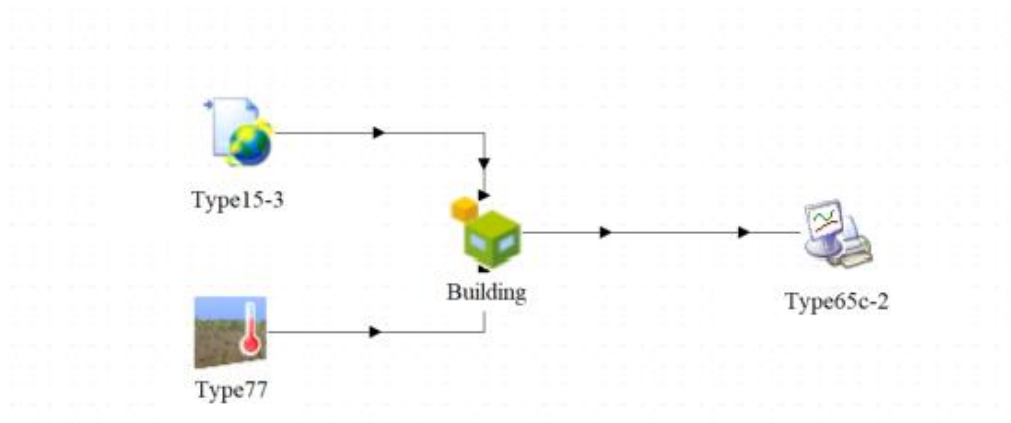


Figure 50 : Structure de la simulation avec fichier TMY(epw) – Capture d'écran tirée du logiciel

4.5.2. Critères de comparaison

Dans le cadre de cette étude, l'objectif est d'évaluer les bénéfices énergétiques et l'amélioration du confort engendrés par les différentes stratégies. Ainsi, il est nécessaire de définir en amont les indicateurs de performance qui seront mesurés et analysés.

Nous nous pencherons sur :

- L'évolution des températures intérieures (provenant directement de la simulation TRNSYS)
- L'évolution de l'humidité relative (provenant directement de la simulation TRNSYS)
- L'évolution du PMV standard pour les étages et du PMV/SET pour le rez-de-chaussée (provenant de la simulation TRNSYS).

Les indices de confort thermique PMV sont calculés directement à partir du logiciel de simulation. Compte tenu des limitations mentionnées précédemment, ils ne seront pas employés dans le but d'évaluer le confort thermique directement, mais plutôt comme des indicateurs supplémentaires pour caractériser des variations entre stratégies. Pour cela, chacune des 6 pièces d'études se verra dotée d'un type « confort » dans TrnBuild. Deux paramétrages distincts seront instaurés, l'un pour les pièces situées aux étages et l'autre pour celles du rez-de-chaussée :

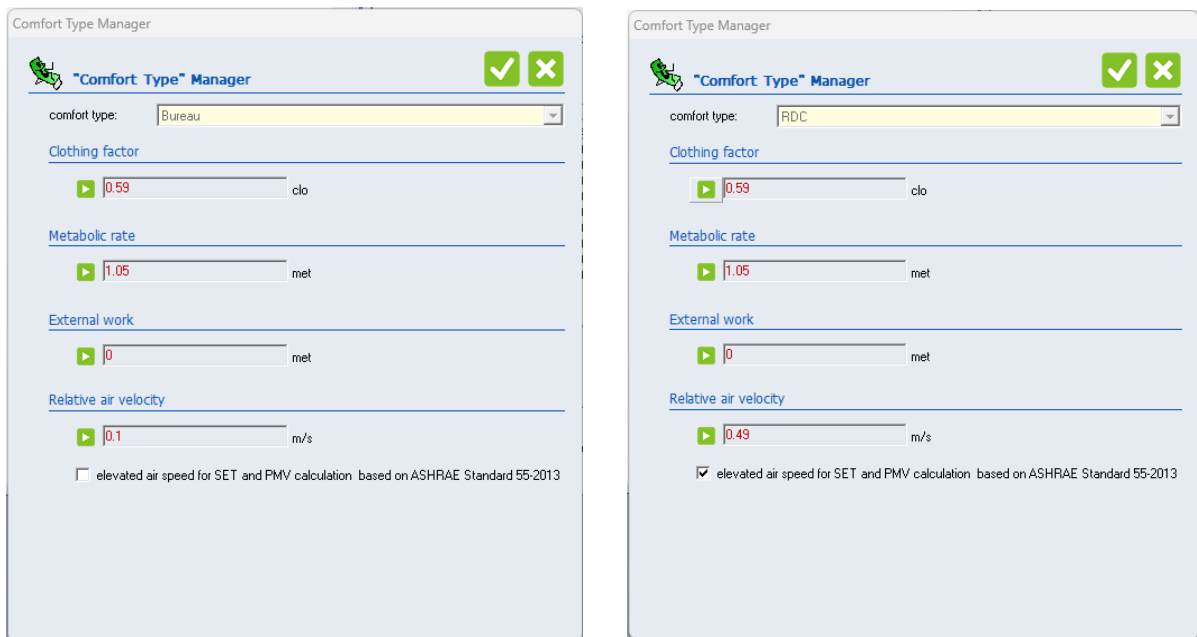


Figure 51 : Paramètre du type confort dans TrnBuild – Etages (gauche) et RDC (droite)

Les hypothèses précédentes portant sur les caractéristiques des occupants et sur les ventilateurs mécaniques seront prises en compte pour ce paramétrage.

Le logiciel TRNSYS se base sur les 6 paramètres de Fanger (température de l'air en degrés Celsius, température moyenne radiante en degrés Celsius, humidité relative en pourcentage, vitesse de l'air en mètres par seconde, taux métabolique en met et isolation vestimentaire en clo) afin de déterminer le PMV standard. Ainsi, certaines valeurs sont considérées comme des constantes d'entrée, tandis que d'autres sont variables dans le temps en fonction des résultats de la simulation.

Cependant, cette méthode du PMV standard présente une limitation pour les vitesses de l'air supérieures à 0,2 m/s. En cas de vitesse de l'air élevée, il est nécessaire d'ajuster les indices PMV en utilisant le modèle SET. Il est conçu pour des vitesses élevées et pour des occupants avec des taux métaboliques moyens compris entre 1,0 et 2,0 MET, ainsi qu'une isolation vestimentaire entre 0 et 1,5 clo.

Dans TRNSYS 18, le modèle basé sur la température effective standard (SET) est implémenté de manière directe. Il sert à modéliser l'effet de ventilateur mécanique contrôlé (TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, 2021), ce qui correspond aux deux pièces étudiées du rez-de-chaussée. Pour cela, il est nécessaire de spécifier 4 niveaux de vitesse de l'air dans le logiciel. Des valeurs comprises entre 0.49 m/s (représentant la vitesse de l'air à hauteur des chevilles selon les hypothèses précédentes) et 1 m/s (correspondant à la vitesse de l'air retenue à hauteur des occupants selon les études thermiques précédentes) sont utilisées. Le premier niveau de vitesse de l'air est défini dans le type de confort, tandis que les 3 autres sont ajustés dans les propriétés.

En dernier lieu, une analyse globale du bâtiment sera effectuée en se basant sur le besoin en énergie de refroidissement sensible requise (exprimée en kJ/h par le logiciel TRNSYS). La conversion de cette valeur en MWh permettra de comparer l'impact énergétique spécifique des différentes stratégies bioclimatiques.

5. Résultats

Cette partie expose les résultats de l'analyse du Dreamplex Ngo Quang Huy à Ho Chi Minh Ville. La première étape de l'analyse se concentrera sur la présentation et l'analyse des données recueillies sur site, à savoir dans chacune des 5 zones d'intérêt du bâtiment actuel. Par la suite, les résultats de la simulation de chaque scénario bioclimatique individuel seront présentés. Chaque section contiendra 4 graphiques illustrant l'évolution annuelle des 4 critères de comparaison mentionnés précédemment. Enfin, ces valeurs seront moyennées à l'année, pour chacune des pièces, afin d'établir une base de comparaison pour la partie « Discussions » suivante.

5.1. Résultats des mesures sur site

5.1.1. Capteur 1 : Réception en RDC

Cette pièce ne montre aucun indice significatif de surchauffe (température dépassant 33°C). La stabilité des températures et l'absence de pics suggèrent un environnement intérieur stable et régulé. Les fluctuations importantes de l'hygrométrie confirment une relation étroite avec l'air extérieur, notamment à travers la ventilation naturelle et l'utilisation des ouvertures. Malgré un taux d'humidité relative élevé, celui-ci demeure dans une plage standard pour un climat tropical.

Les observations quotidiennes révèlent des pics de température modérés, qui se produisent principalement entre 12h00 et 14h00, sans augmentation soudaine le matin. Au fil de la journée, l'humidité relative décroît progressivement pour atteindre son niveau le plus bas aux alentours de 14 heures. Une augmentation de l'humidité est constatée au cours de la seconde partie de la période examinée, correspondant à la saison humide.

	Date : 26/03 – 12/04	Date : 15/05 – 02/06
<i>Nombres de mesures</i>	795	837
<i>Température moyenne (°C)</i>	29.89 °C	29.71 °C
<i>Min – Max Température (°C)</i>	26.8 – 32.8 °C	28.2 – 32.3 °C
<i>Amplitude moyenne quotidienne (°C)</i>	3.61 °C	2.41 °C
<i>HR moyenne (%)</i>	64.3 %	69.0 %
<i>Min – Max HR (%)</i>	40 – 84 %	41 – 88 %
<i>Amplitude moyenne quotidienne (%)</i>	22.8 %	25.3 %

Tableau 17 : Récapitulatif des mesures du capteur 1 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

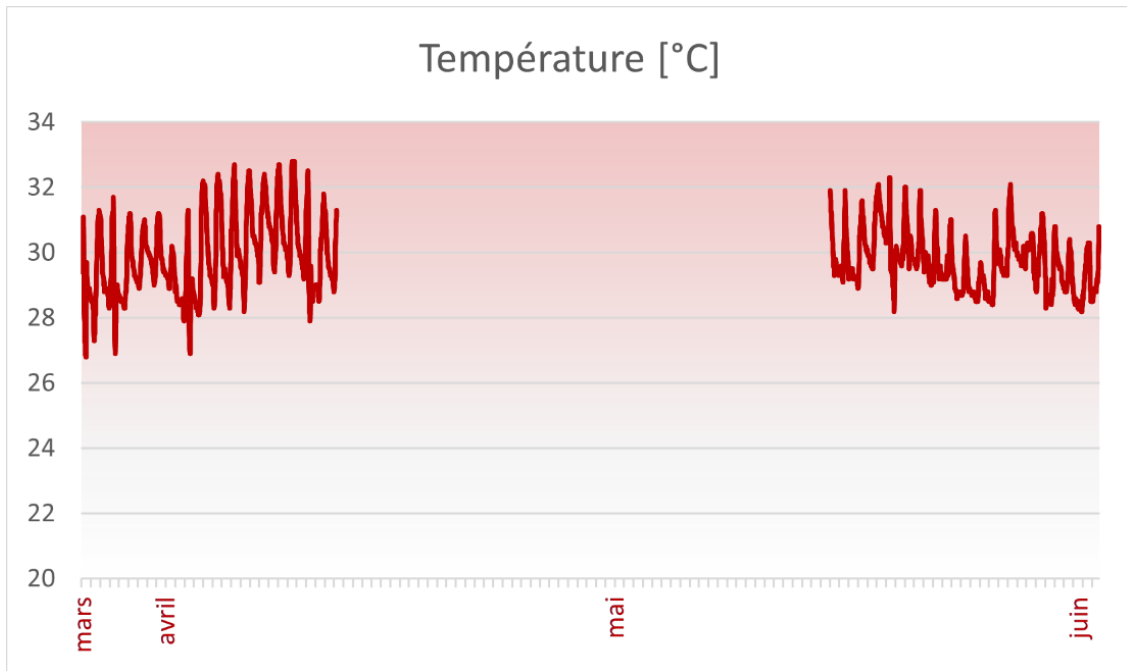


Figure 52 : Températures du capteur 1 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

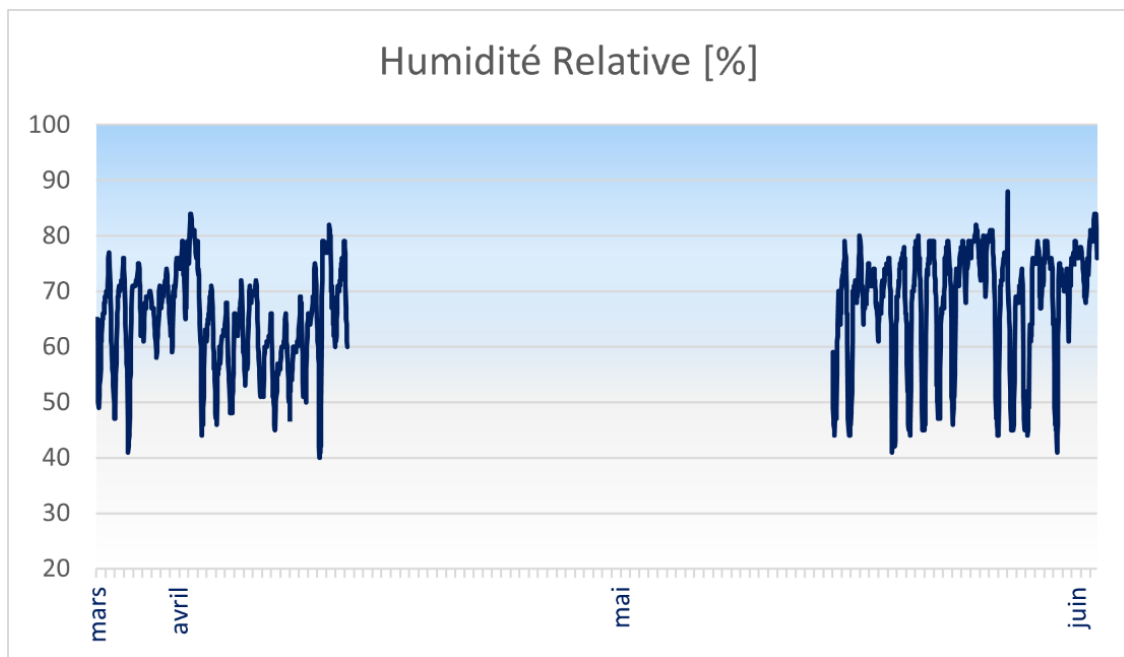


Figure 53 : Humidité relative du capteur 1 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

5.1.2. Capteur 2 : Ancien Café en RDC

Cette pièce présente un profil thermo-hygrométrique semblable à celui de la zone précédente, mettant en évidence le lien spatial entre les deux espaces. Elle se distingue tout de même par une variabilité de température plus marquée et une humidité maximale plus élevée.

Cette pièce ne montre aucun signe significatif de surchauffe à nouveau (température dépassant 33°C). La stabilité des températures et l'absence de pics suggèrent un environnement intérieur stable et régulé.

L'humidité est naturellement impactée par l'ouverture des baies, ce qui explique une humidité relative moyenne élevée, en phase avec l'humidité ambiante extérieure.

Les seuls pics thermiques observés surviennent vers midi, tandis que l'humidité suit précisément le cycle naturel de ventilation et de réchauffement de l'environnement.

On observe une hausse importante de l'humidité moyenne durant la seconde moitié de la période d'étude, ce qui concorde, à nouveau, avec la saison humide.

	Date : 26/03 – 12/04	Date : 15/05 – 02/06
<i>Nombres de mesures</i>	795	837
<i>Température moyenne (°C)</i>	29.78 °C	29.08 °C
<i>Min – Max Température (°C)</i>	26.8 – 32.3 °C	26.9 – 31.5 °C
<i>Amplitude moyenne quotidienne (°C)</i>	2.91 °C	2.49 °C
<i>HR moyenne (%)</i>	63.9 %	69.8 %
<i>Min – Max HR (%)</i>	41 – 84 %	46 – 84 %
<i>Amplitude moyenne quotidienne (%)</i>	20.7 %	23.3 %

Tableau 18 : Récapitulatif des mesures du capteur 2 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

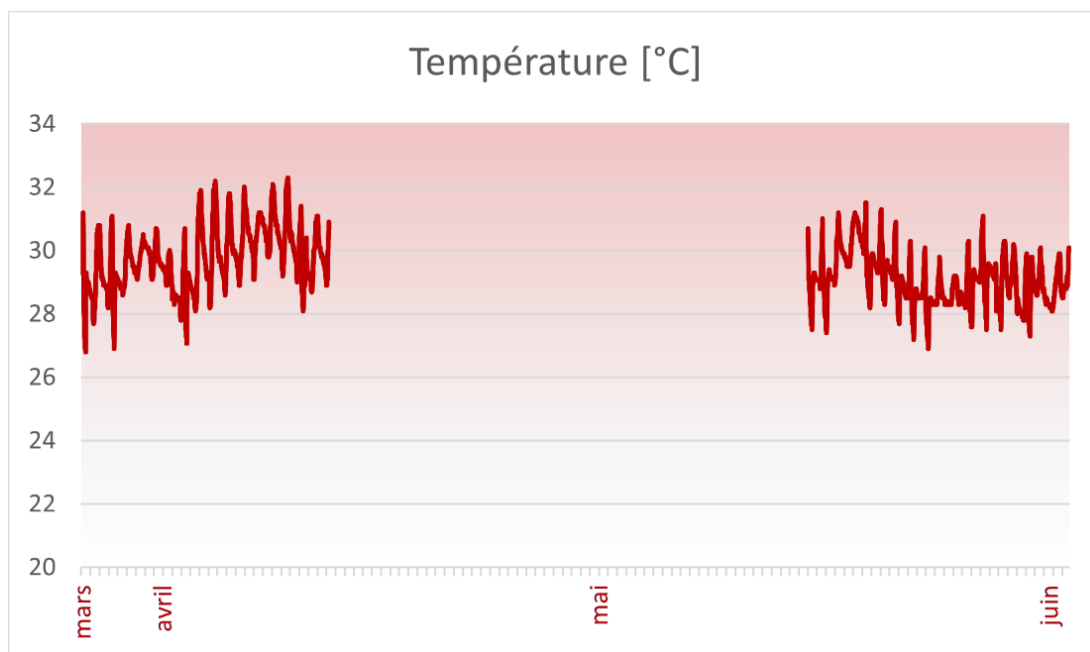


Figure 54 : Température du capteur 2 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

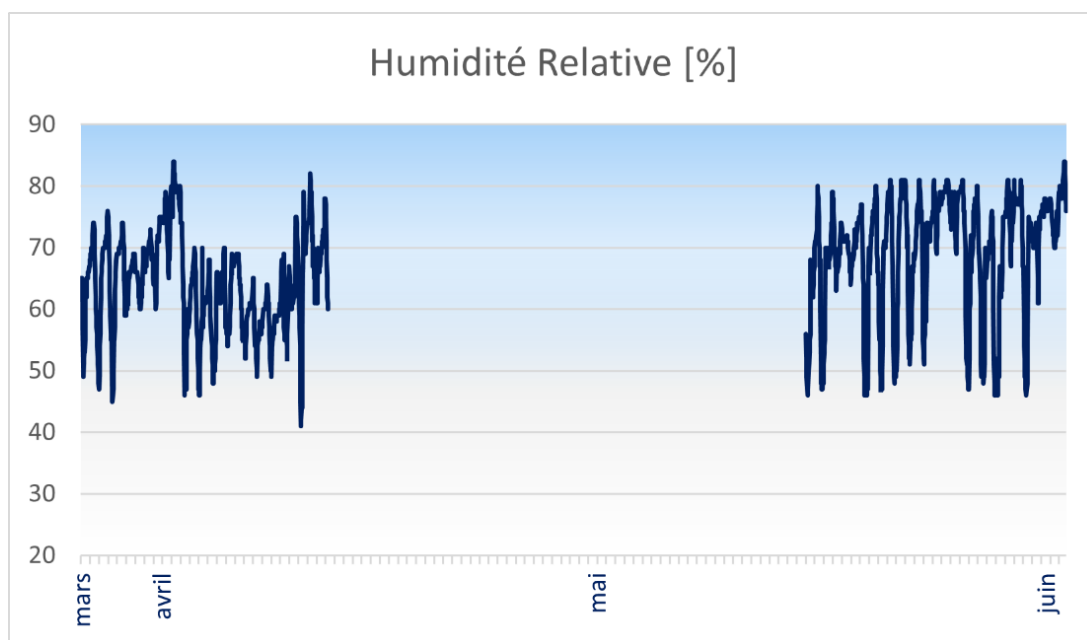


Figure 55 : Humidité relative du capteur 2 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

5.1.3. Capteur 3 : Meeting room Sud en R+1

En se basant sur des critères de variations rapides et significatives de température ($\geq 1^\circ\text{C}$ sur 30 minutes) et d'humidité relative ($\geq 5\%$ sur 30 minutes). 81 sessions de réunions potentielles ont été identifiées. Pendant les réunions, on observe des diminutions notables de la température et de l'humidité relative. Ces dernières demeurent constantes tout au long de la séance. Ceci est tout à fait normal car la climatisation s'enclenche lors de l'utilisation de ces pièces.

La grande amplitude thermique observée indique un espace confiné soumis à un usage ponctuel. Cette pièce présente également des surchauffes fréquentes (supérieures à 33°C).

Les données révèlent un impact solaire matinal important, avec des pics thermiques survenant généralement entre 10h00 et 13h00. L'augmentation rapide de la température dès 7h00 met bien en évidence un effet du soleil important sur cet espace.

On observe une hausse de l'humidité moyenne durant la seconde moitié de la période d'étude, ce qui concorde, à nouveau, avec la saison humide.

	Date : 26/03 – 12/04	Date : 23/04 – 02/06
<i>Nombres de mesures</i>	819	1913
<i>Température moyenne ($^\circ\text{C}$)</i>	28.08 $^\circ\text{C}$	29.04 $^\circ\text{C}$
<i>Min – Max Température ($^\circ\text{C}$)</i>	20.09 – 31.5 $^\circ\text{C}$	17.2 – 39.0 $^\circ\text{C}$
<i>Amplitude moyenne quotidienne ($^\circ\text{C}$)</i>	5.33 $^\circ\text{C}$	7.52 $^\circ\text{C}$
<i>HR moyenne (%)</i>	62.2 %	62.6 %
<i>Min – Max HR (%)</i>	45 – 84 %	31 – 90 %
<i>Amplitude moyenne quotidienne (%)</i>	16.2 %	22.9 %

Tableau 19 : Récapitulatif des mesures du capteur 3 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

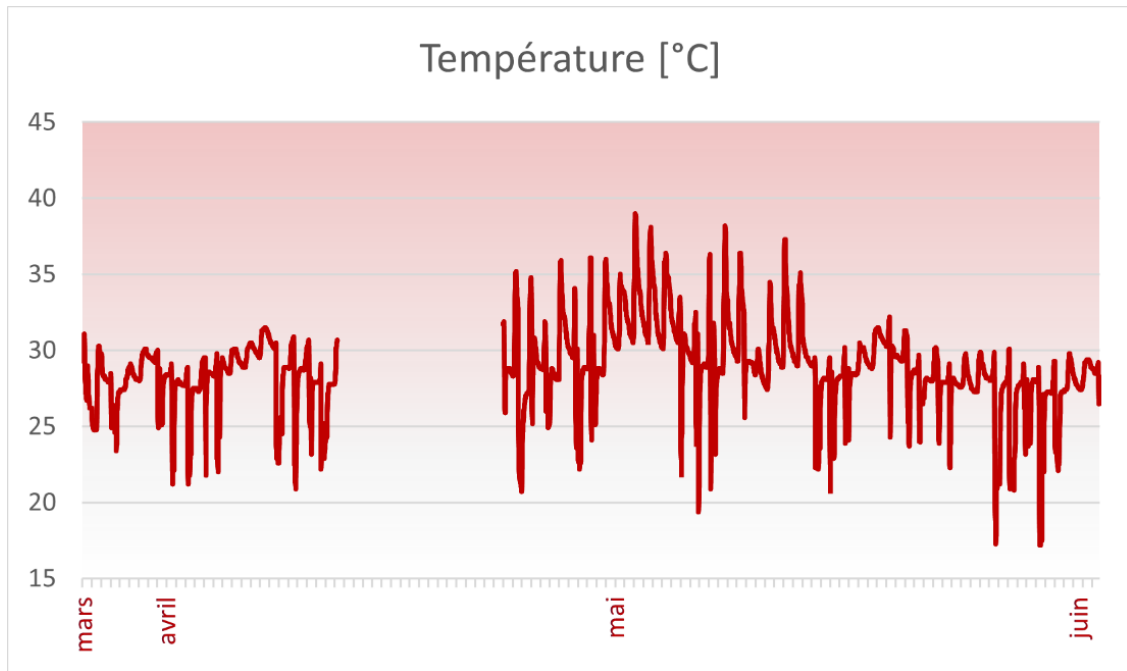


Figure 56 : Température du capteur 3 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

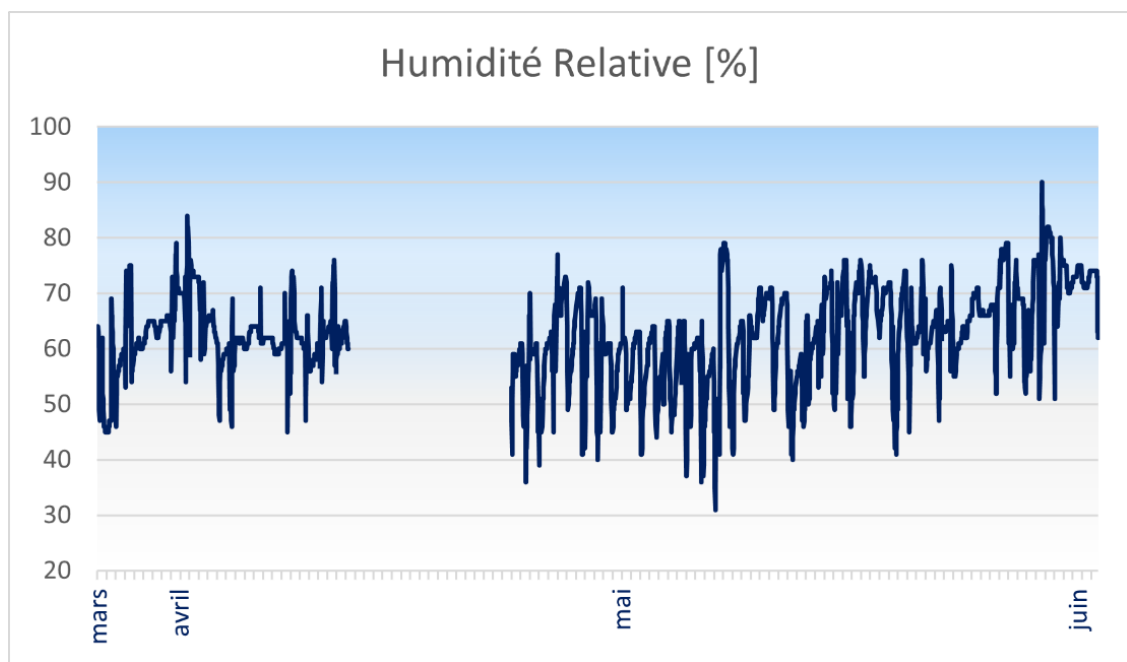


Figure 57 : Humidité relative du capteur 3 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

5.1.4. Capteur 4 : Meeting Nord en R+1

Cette salle est davantage utilisée que la salle de réunion précédente, comme en témoignent les 98 sessions potentielles identifiées (mêmes critères que précédemment). Des baisses significatives de la température et de l'humidité relative sont aussi observées pendant les réunions.

La grande amplitude thermique observée indique à nouveau un espace confiné soumis à un usage ponctuel et la pièce présente à nouveau des surchauffes fréquentes (supérieure à 33°C).

Les températures moyennes y sont légèrement plus élevées que dans la salle précédente, potentiellement en raison d'une surface vitrée plus importante. L'effet du soleil le matin (façade Est) est aussi bien visible mais est plus atténué.

On observe une hausse importante de l'humidité moyenne durant la seconde moitié de la période d'étude, ce qui concorde, à nouveau, avec la saison humide.

	Date : 26/03 – 12/04	Date : 23/04 – 02/06
<i>Nombres de mesures</i>	819	1913
<i>Température moyenne (°C)</i>	28.99 °C	30.06 °C
<i>Min – Max Température (°C)</i>	18.9 – 35.6 °C	19.2 – 41.4 °C
<i>Amplitude moyenne quotidienne (°C)</i>	7.71 °C	7.87 °C
<i>HR moyenne (%)</i>	58.7 %	59.6 %
<i>Min – Max HR (%)</i>	39 – 77 %	27 – 84 %
<i>Amplitude moyenne quotidienne (%)</i>	19.72 %	26.83 %

Tableau 20 : Récapitulatif des mesures du capteur 4 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

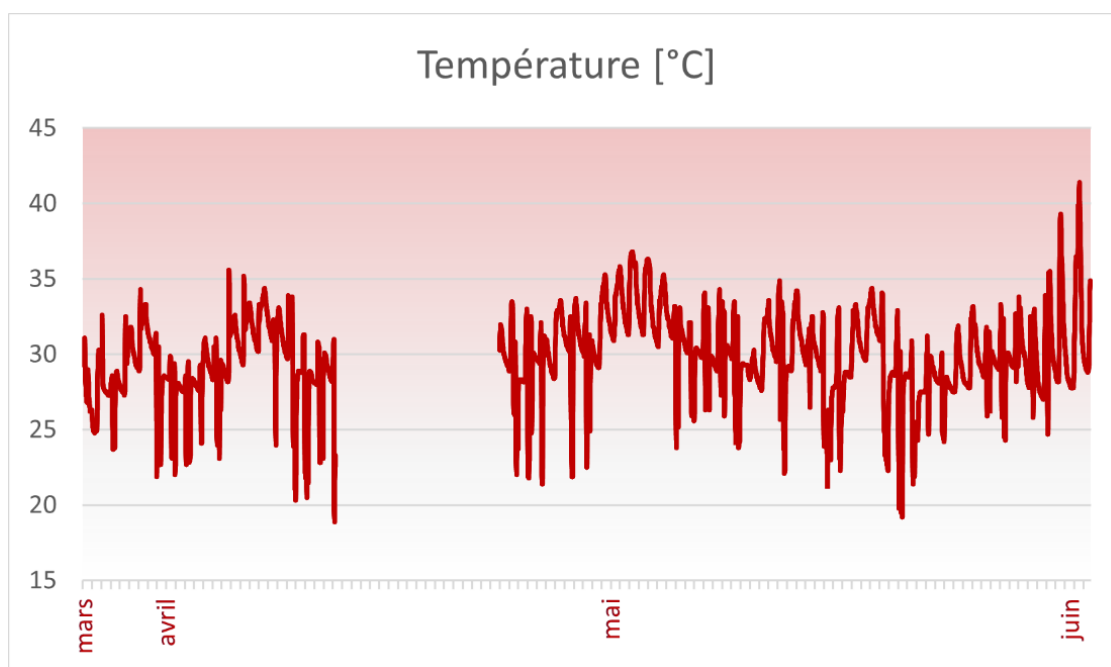


Figure 58 : Température du capteur 4 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

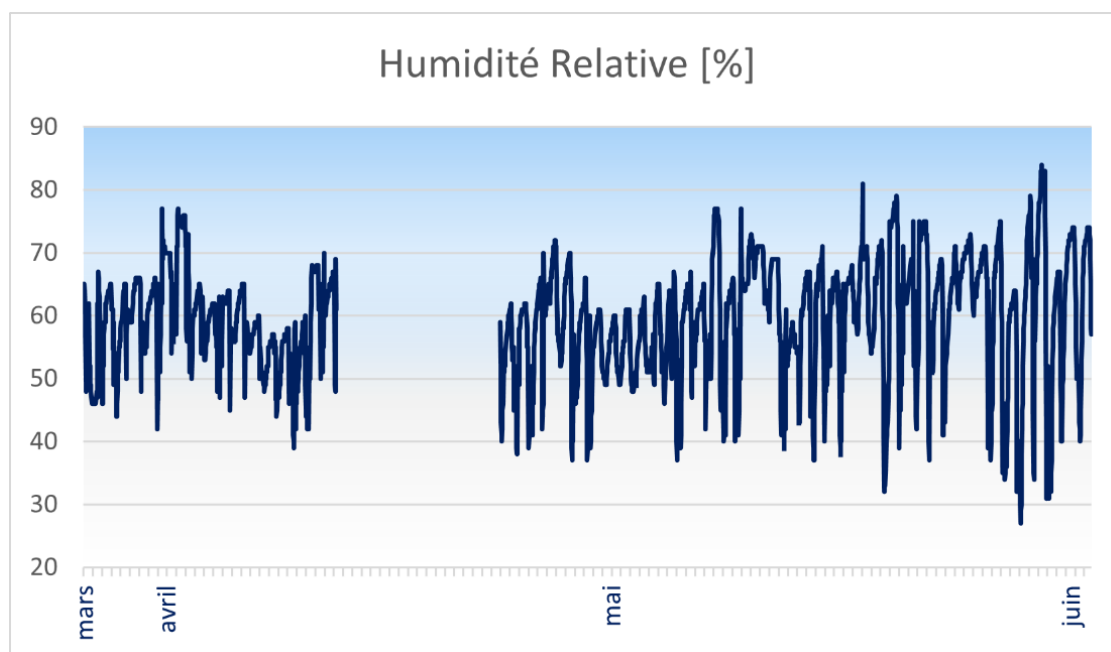


Figure 59 : Humidité relative du capteur 4 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

5.1.5. Capteur 5 : Bureau 5 Sud en R+3

Les relevés journaliers révèlent une diminution notable de la température d'environ 1,5 à 2°C vers 8h30 chaque matin, possiblement attribuable à la mise en marche du système de climatisation par le personnel d'entretien avant l'arrivée des occupants. En même temps, on observe une baisse d'environ 10% de l'humidité relative, probablement causée par la phase de déshumidification lors du démarrage du système.

La climatisation fonctionne de 8h30 à 18h. En dehors de ces horaires et durant le week-end, la température de la pièce augmente pendant la journée et diminue progressivement pendant la nuit. Une température particulièrement élevée de 40.9 °C a été relevée le 7 avril 2025, mais correspond à un jour férié où le bureau était probablement vide.

La première partie correspond vraisemblablement à la fin de la saison sèche, avec un ensoleillement important sur ses façades Sud et Ouest. Ce bureau atteint ses pics thermiques plus tardivement que les salles de réunions précédentes, généralement entre 15h00 et 18h00, ce qui est cohérent au vu du cycle solaire. L'humidité relative reste élevée tout au long de la journée, suggérant un espace confiné sans lien avec l'extérieur.

La deuxième partie de la période d'étude montre une baisse des températures et des variations hygrométriques plus marquées, ce qui est cohérent avec l'arrivée de la saison humide.

	Date : 26/03 – 12/04	Date : 23/04 – 02/06
<i>Nombres de mesures</i>	819	1913
<i>Température moyenne (°C)</i>	29 °C	28.6 °C
<i>Min – Max Température (°C)</i>	24.2 – 40.9 °C	22.9 – 39.3 °C
<i>Amplitude moyenne quotidienne (°C)</i>	5.81 °C	5.5 °C
<i>HR moyenne (%)</i>	56 %	57.5 %
<i>Min – Max HR (%)</i>	32 – 76 %	29 – 79 %
<i>Amplitude moyenne quotidienne (%)</i>	24.67 %	26.8 %

Tableau 21 : Récapitulatif des mesures du capteur 5 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

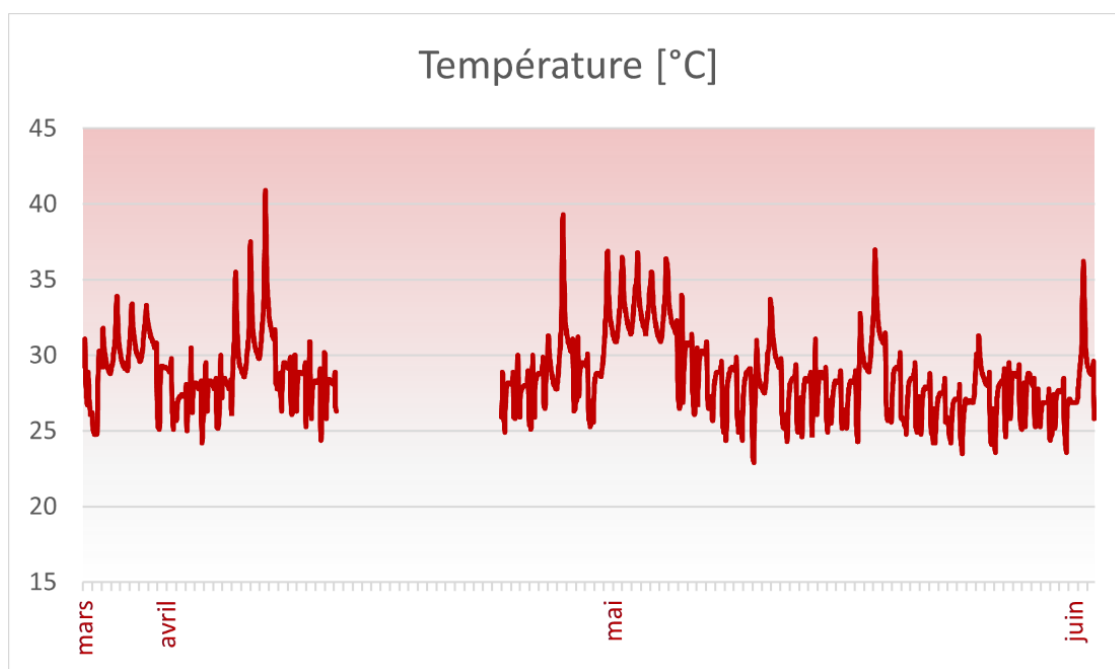


Figure 60 : Température du capteur 5 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

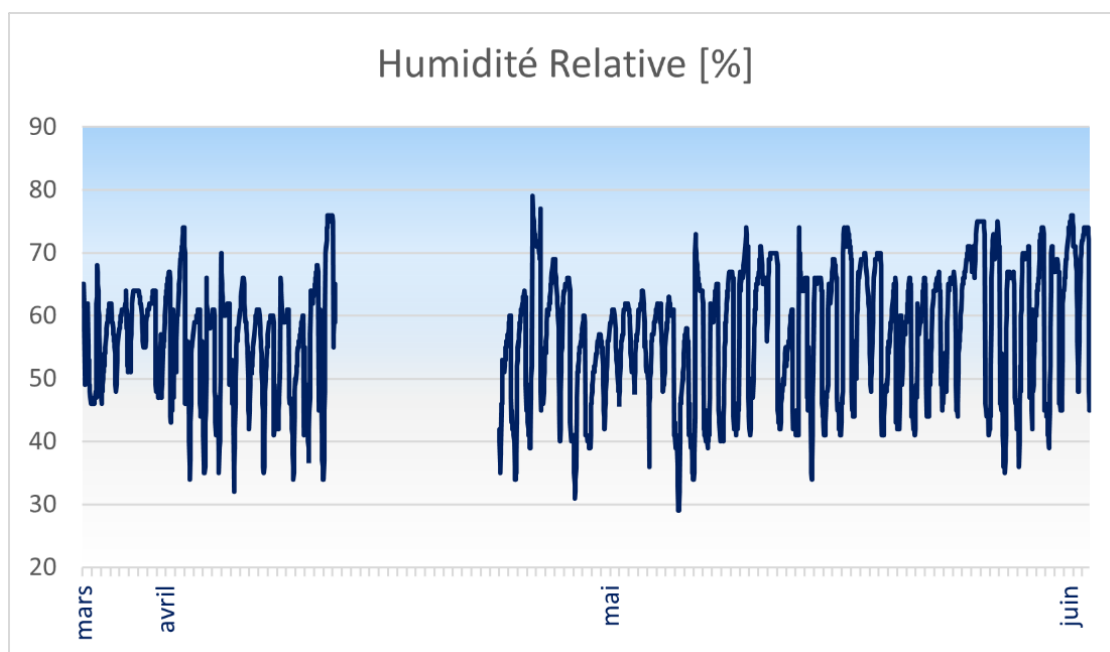


Figure 61 : Humidité relative du capteur 5 durant la période d'étude (23/03 – 02/06)

5.2. Résultats de la simulation

Les résultats de simulation présentés ci-après permettent d'évaluer l'impact de chaque stratégie bioclimatique sur le comportement thermique et les besoins énergétiques du Dreamplex.

Pour chacun de ces scénarios, quatre graphiques illustrent l'évolution annuelle de la température de l'air, de l'humidité relative, de l'indice PMV et des besoins de refroidissement sensible dans les six pièces étudiées.

Ces résultats sont ensuite synthétisés dans un tableau comparatif. Il permet de mettre en évidence les écarts annuels moyens de chaque pièce par rapport au scénario de référence, dans le but d'évaluer de manière quantitative les améliorations apportées par chaque stratégie. Cette variation de moyenne annuelle est désignée par le symbole Δ , une valeur positive indiquant une augmentation et inversement.

- Ancien café (capteur 1) : **RDCpièce1**
- Réception (capteur 2) : **RDCpièce2**
- Meeting room Sud (capteur 3) : **R1pièce3**
- Meeting room Nord (capteur 4) : **R1pièce4**
- Bureau 5 Sud (capteur 5) : **R3pièce5**
- Bureau 2 Est : **R3pièce6**

5.2.1. Scénario initial S0

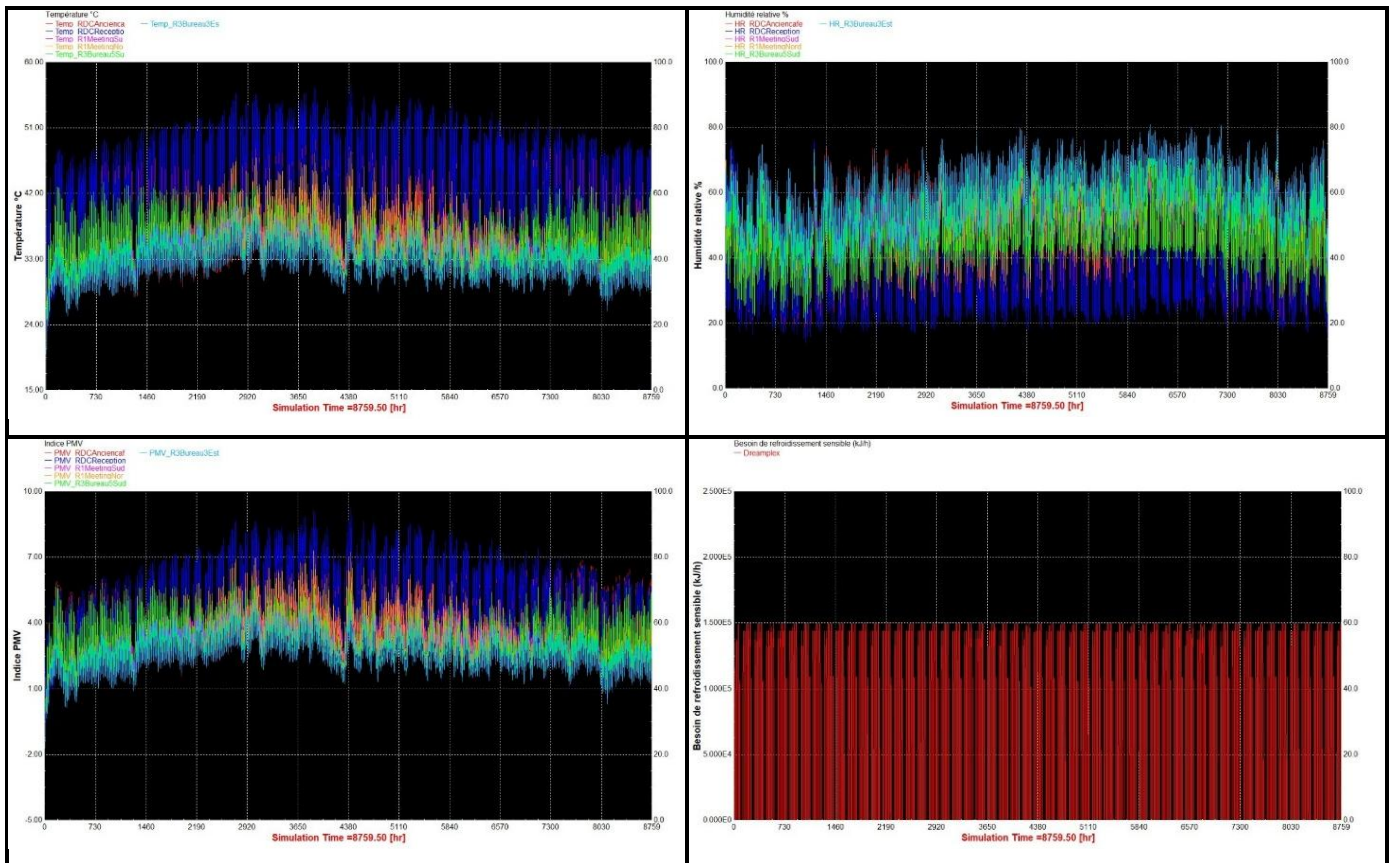


Figure 62 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour le scénario S0

Dans ce scénario initial, on observe des températures extrêmes (atteignant jusqu'à 54°C au rez-de-chaussée) dans toutes les pièces, ce qui appuie la qualification de "four solaire" attribuée au bâtiment avant sa rénovation. Les valeurs des indices PMV sont logiquement très élevées, et la plage de confort thermique PMV $[-0,5 ; 0,5]$ n'est observée que dans deux cas, spécifiquement pour le bureau 2 Est (R3pièce6) situé au troisième étage. La consommation d'énergie nécessaire pour le refroidissement sensible, sur une base annuelle, s'élève à 196,99 MWh.

5.2.2. Scénario terrasse végétalisée S1 (au rez-de-chaussée)

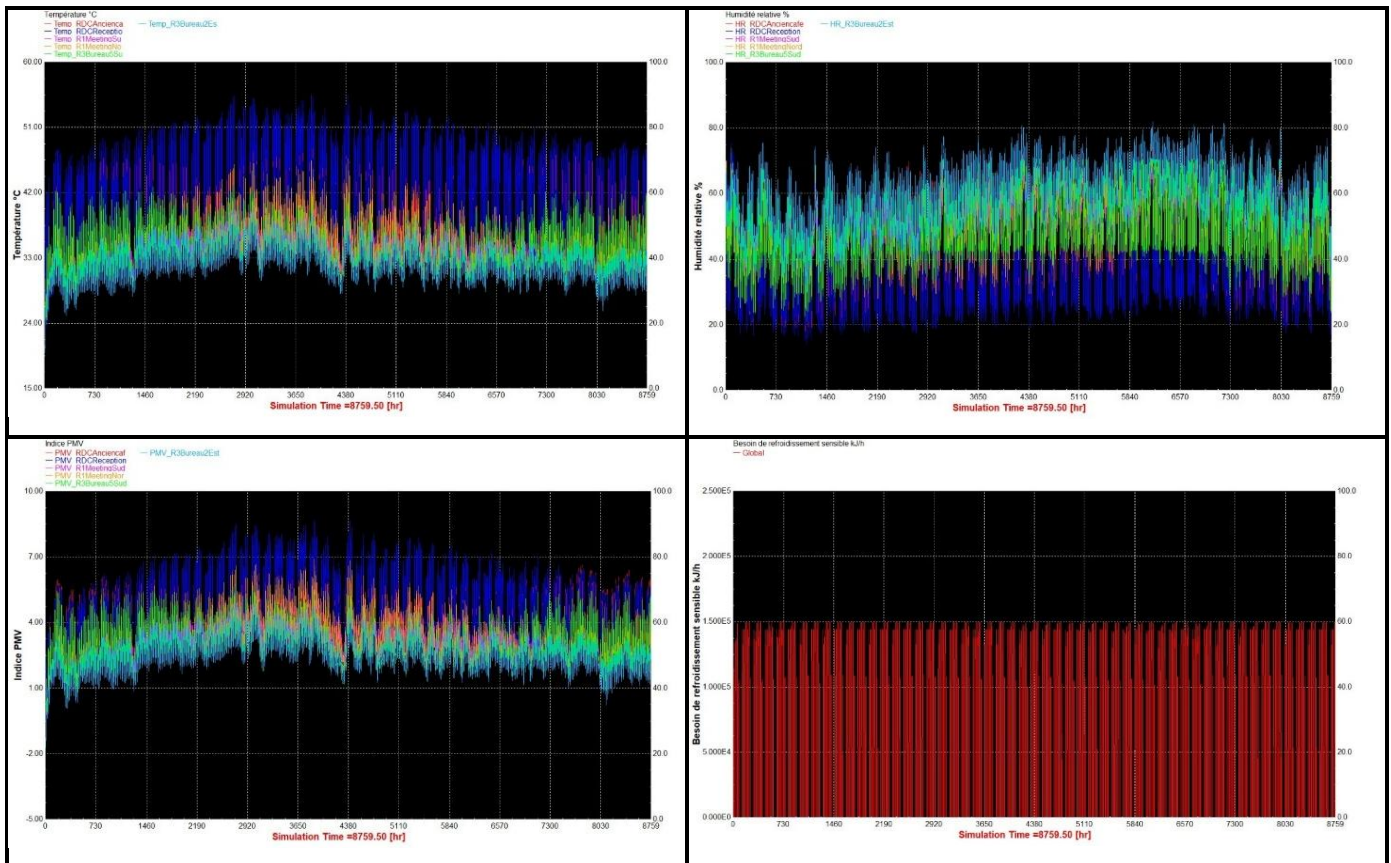


Figure 63 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour le scénario S1

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-0.49	-0.55	-0.64	-0.62	-0.50	-0.32
Δ Humidité relative (%)	+1.27	+1.34	+1.68	+1.52	+0.96	+1.03
Δ Indice PMV (point)	-0.17	-0.19	-0.21	-0.20	-0.16	-0.10

Tableau 22 : Comparaison des résultats par pièce pour le scénario S1

Critère de comparaison	Dreamplex
Besoin de refroidissement sensible annuel (MWh)	196.44
Δ Refroidissement (MWh)	-0.55

Tableau 23 : Evolution et besoin en énergie de refroidissement sensible annuel du bâtiment (S1)

Ce scénario vise à évaluer l'impact thermique du remplacement de la dalle en béton de l'espace extérieur par une terrasse végétalisée.

Pour cette solution seule, les résultats indiquent une amélioration faible mais constante du comportement thermique dans l'ensemble des pièces. La température intérieure baisse de 0.32 à 0.64°C, avec une efficacité légèrement plus marquée au premier étage (dans les deux salles de réunion). L'humidité relative augmente également, ce qui va dans le sens d'un assèchement de l'air. L'indice PMV s'améliore dans toutes les pièces, avec une baisse allant jusqu'à 0.21 point. En termes de performances énergétiques, cette stratégie permet une réduction de 0.55 MWh/an des besoins de refroidissement sensible sur l'ensemble du bâtiment.

En résumé :

- Diminution de la température intérieure : 0.32 à 0.64 °C.
- Augmentation de l'humidité relative : 0.96 à 1.68 %.
- Diminution de l'indice PMV : 0.10 à 0.21 point.
- Diminution du besoin en énergie de refroidissement sensible : 0.55 MWh/an.
- Effets faibles et spatialement indifférenciés.

Dans ce cas, la végétalisation de la terrasse n'est pas associée à une ouverture des baies ni à une ventilation naturelle, elle agit uniquement sur l'albédo et la réflexion du rayonnement solaire. Ainsi, cette stratégie fonctionne comme un levier secondaire, mais dont l'efficacité seule demeure limitée. Pour autant, elle incarne une stratégie écologique et paysagère de grande importance.

5.2.3. Scénario ventilation naturelle S2 (au rez-de-chaussée)

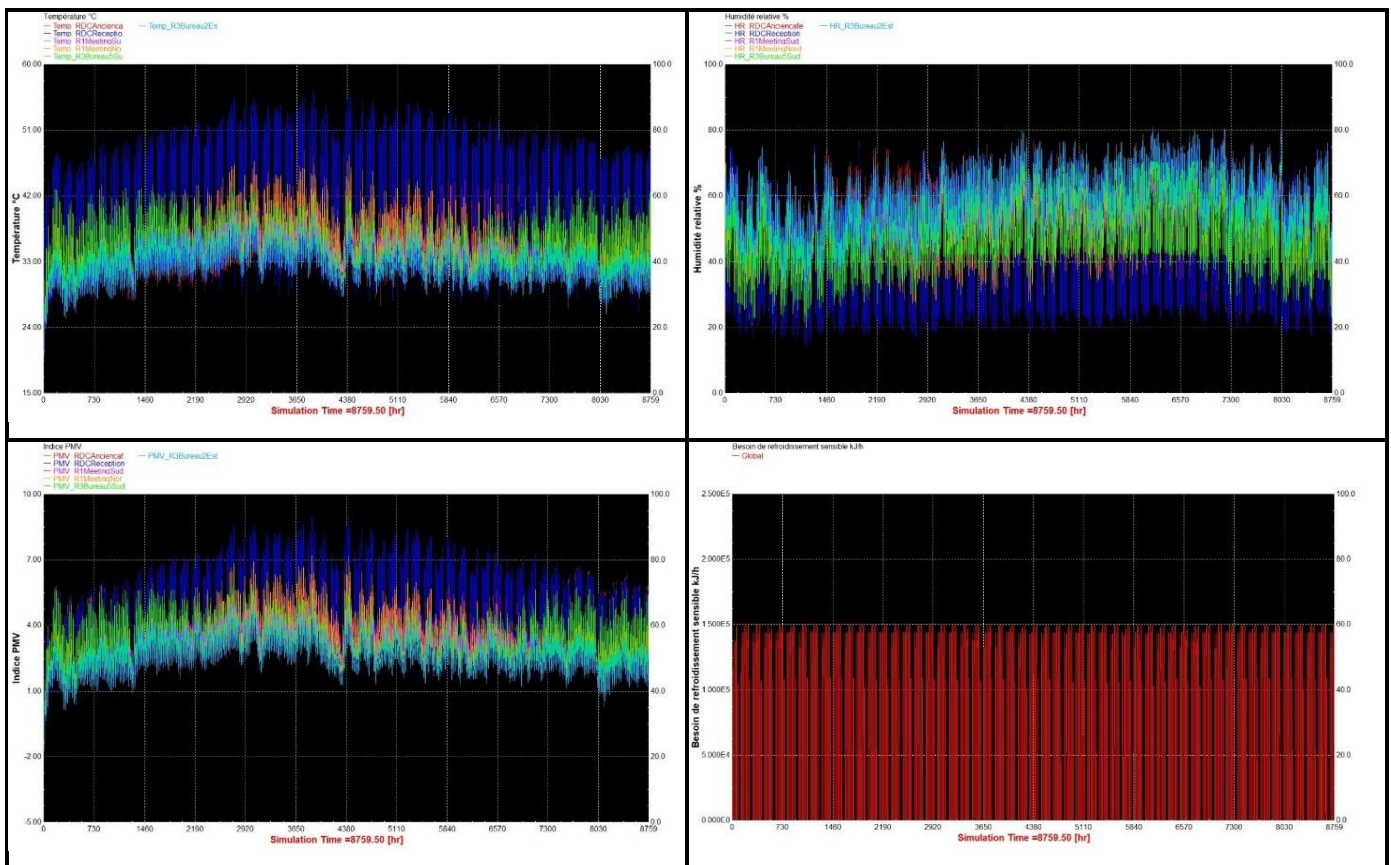


Figure 64 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour le scénario S2

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-1.40	-1.11	-0.17	-0.13	-0.01	-0.02
Δ Humidité relative (%)	+2.84	+2.61	+0.43	+0.34	+0.03	+0.06
Δ Indice PMV (point)	-0.30	-0.22	-0.05	-0.04	-0.00	-0.01

Tableau 24 : Comparaison des résultats par pièce pour le scénario S2

Critère de comparaison	Dreamplex
Besoin de refroidissement sensible annuel (MWh)	196.97
Δ Refroidissement (MWh)	-0.02

Tableau 25 : Evolution et besoin en énergie de refroidissement sensible annuel du bâtiment (S2)

Ce scénario vise à évaluer les impacts de l'ouverture de certaines baies du rez-de-chaussée dans le but de mettre en place une ventilation naturelle par courant d'air traversant.

Les résultats montrent une amélioration de l'ambiance thermique au rez-de-chaussée, avec une baisse significative de la température intérieure : jusqu'à 1.40 °C dans la pièce 1 et 1.11 °C dans la pièce 2. Cette baisse de température s'accompagne d'une augmentation notable de l'humidité relative (jusqu'à 2.84 %). Les gains sont en revanche quasi inexistantes aux étages supérieurs, avec des réductions de température de l'ordre de 0.01 à 0.17 °C, un impact faible sur l'humidité et négligeable sur le PMV. Concernant ce dernier, les pièces du rez-de-chaussée enregistrent une amélioration de 0.22 à 0.30 point, ce qui représente un gain de confort non négligeable. Enfin, la réduction des besoins de refroidissement est faible, avec seulement 0.02 MWh/an économisés, ce qui traduit un effet local mais peu impactant sur la performance énergétique globale.

En résumé :

- Diminution de la température intérieure : jusqu'à 1.4 °C au RDC, faible au R1 et négligeable ailleurs.
- Augmentation de l'humidité relative : jusqu'à 2.84% (RDCpièce1), faible aux étages.
- Diminution de l'indice PMV : 0.22 et 0.30 au RDC, négligeable aux étages.
- Diminution du besoin en énergie de refroidissement sensible : 0.02 MWh/an.
- Effets très localisés (RDC), utile pour les zones traversantes.

Ces résultats montrent que la ventilation naturelle peut être bénéfique, mais n'a qu'un impact local, limité aux espaces directement connectés à l'ouverture. Elle peut être valorisée dans les zones communes ouvertes (exemple : espace ancien café ou réception), mais ne suffit pas à améliorer l'ambiance thermique de manière significative au RDC et encore moins aux étages.

5.2.4. Scénario ventilateurs mécaniques S3 (au rez-de-chaussée)

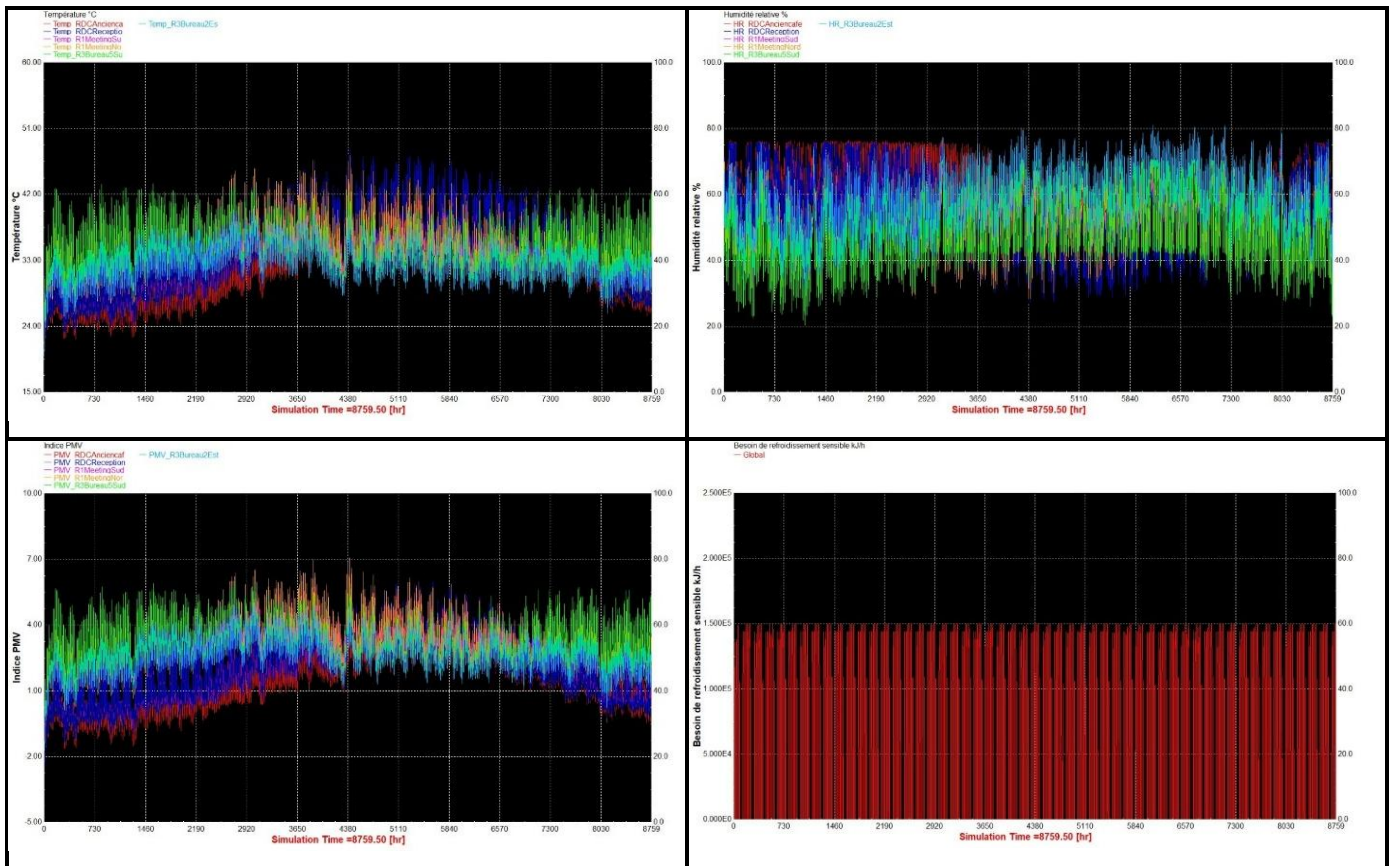


Figure 65 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour le scénario S3

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-4.08	-3.90	-1.17	-0.89	-0.11	-0.14
Δ Humidité relative (%)	+9.11	+8.49	+3.08	+2.23	+0.22	+0.45
Δ Indice PMV (point)	-2.20	-2.13	-0.37	-0.28	-0.03	-0.04

Tableau 26 : Comparaison des résultats par pièce pour le scénario S3

Critère de comparaison	Dreamplex
Besoin de refroidissement sensible annuel (MWh)	196.86
Δ Refroidissement (MWh)	-0.13

Tableau 27 : Evolution et besoin en énergie de refroidissement sensible annuel du bâtiment (S3)

Ce scénario mesure l'installation de ventilateurs de plafond dans les zones communes du rez-de-chaussée. Dans la réalité, cette mesure n'a pas pour but de modifier la température, mais d'améliorer le refroidissement perçu en augmentant la vitesse de l'air au contact des occupants.

On voit que cette simulation du brassage d'air produit une forte amélioration de l'ambiance thermique perçue, avec un abaissement équivalent de la température ressentie allant jusqu'à 4.08°C au RDC (RDCpièce1). Les baisses sont plus modérées aux étages, mais impactent tout de même la mezzanine, en lien direct avec la double hauteur (diminution de 0.89 à 1.17 °C). L'indice PMV diminue lui aussi fortement : jusqu'à 2.20 points dans la pièce 1 au RDC et 2.13 points dans la pièce 2. Pour la première fois, sur une petite partie de l'année, la plage de PMV [-0.5 ; 0.5] est atteinte pour les pièces du RDC. Aux étages, l'effet reste faible, avec des baisses de 0.28 à 0.37 points au R1 et peu significatif en R3 (0.04 points en moins au maximum). Les gains en termes de consommation de refroidissement restent tout de même limités à 0.13 MWh/an.

En résumé :

- Diminution de la température intérieure : jusqu'à 4.08 °C au RDC et 1.17 °C au R1.
- Augmentation de l'humidité relative : jusqu'à 9.11% (RDCpièce1).
- Diminution de l'indice PMV : -2.2 points au RDC, -0.37 en R1 et marginal en R3.
- Diminution du besoin en énergie de refroidissement : 0.13 MWh/an.
- Impact fort et localisé au RDC, moindre mais existant au R1.

Cette stratégie constitue l'un des leviers les plus efficaces en termes de confort thermique ressenti jusqu'à présent. Elle est particulièrement adaptée dans les espaces ouverts ou peu climatisés.

5.2.5. Scénario double peau bambou S4

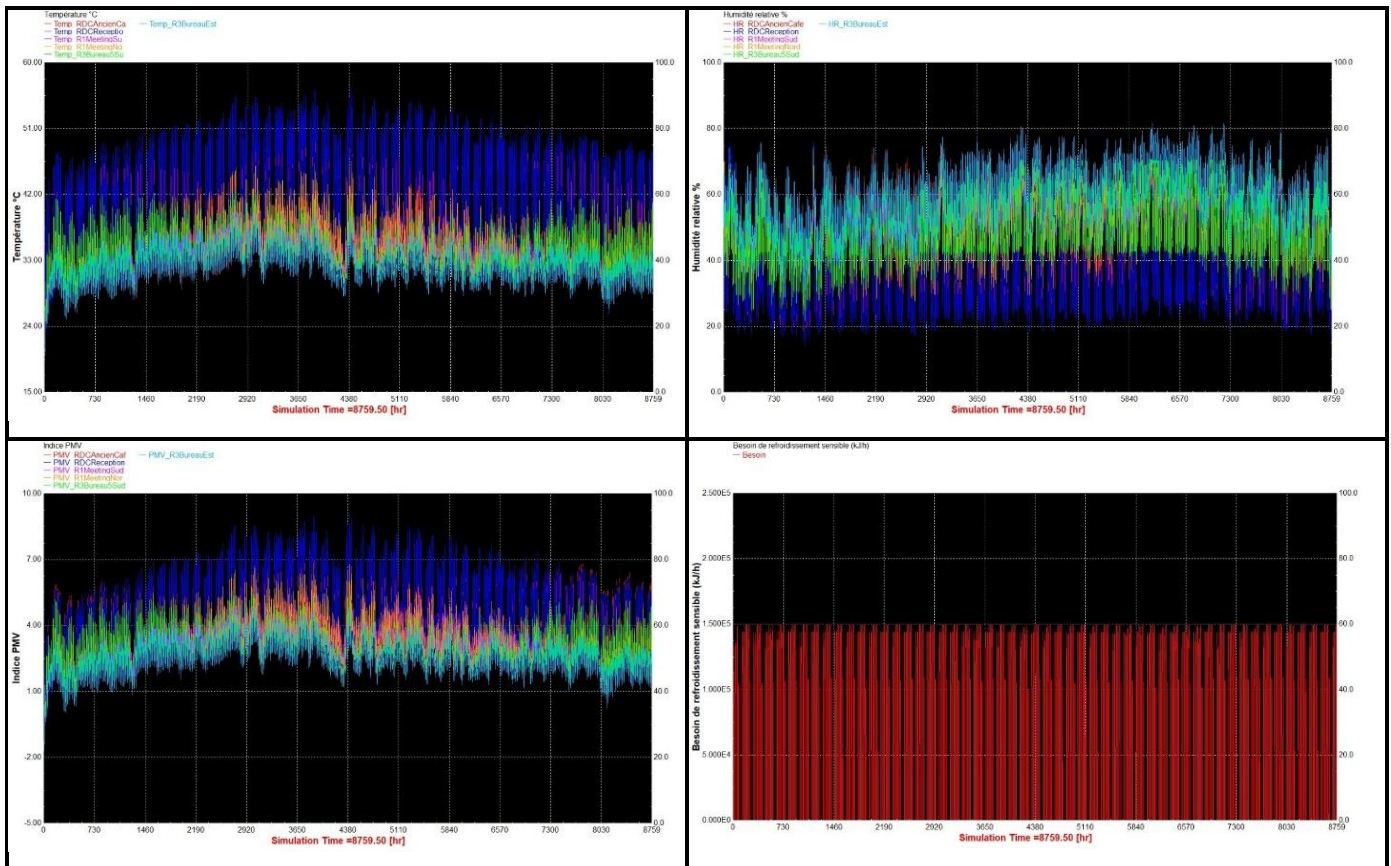


Figure 66 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour le scénario S4

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-0.14	-0.21	-0.52	-0.57	-0.70	-0.35
Δ Humidité relative (%)	+0.35	+0.52	+1.35	+1.40	+1.44	+1.13
Δ Indice PMV (point)	-0.05	-0.07	-0.17	-0.19	-0.23	-0.11

Tableau 28 : Comparaison des résultats par pièce pour le scénario S4

Critère de comparaison	Dreamplex
Besoin de refroidissement sensible annuel (MWh)	196.45
Δ Refroidissement (MWh)	-0.54

Tableau 29 : Evolution et besoin en énergie de refroidissement sensible annuel du bâtiment (S4)

Ce scénario teste l'effet d'une double peau en bambou, installée comme protection solaire sur l'intégralité des façades, hormis au rez-de-chaussée. Ce dispositif agit à la fois comme un écran au rayonnement solaire direct et comme une zone tampon ventilée.

Les résultats indiquent une amélioration de l'ambiance thermique modérée dans l'ensemble des pièces. La réduction de la température intérieure varie de 0.14 °C à 0.70 °C, avec des effets plus marqués dans les meeting rooms et les bureaux du dernier étage (diminution de 0.70 °C en R3pièce5). Cette stratégie s'avère particulièrement avantageuse pour les niveaux supérieurs exposés à un ensoleillement direct important. L'humidité relative augmente légèrement, avec une augmentation maximale de 1.44 %. Sur le plan de l'indice PMV, les effets sont également progressifs : de 0.05 à 0.23 points de réduction, là encore avec une efficacité croissante selon la hauteur et l'exposition. R3pièce5, au Sud-Ouest, atteint la plus forte amélioration. Enfin, la stratégie permet d'économiser 0.54 MWh/an de refroidissement.

En résumé :

- Diminution de la température intérieure : jusqu'à 0.70 °C (effet croissant avec les étages et l'orientation).
- Augmentation de l'humidité relative : 0.35 à 1.44 %.
- Diminution de l'indice PMV : 0.05 à 0.23 points.
- Réduction de la consommation de refroidissement : 0.13 MWh/an.
- Stratégie passive efficace, surtout pour les étages exposés.

Ces résultats montrent que la façade bambou double peau constitue une solution pertinente dans un climat tropical, en jouant un rôle de protection solaire ventilée pour l'ensemble des étages.

5.2.6. Scénario protections solaires S5

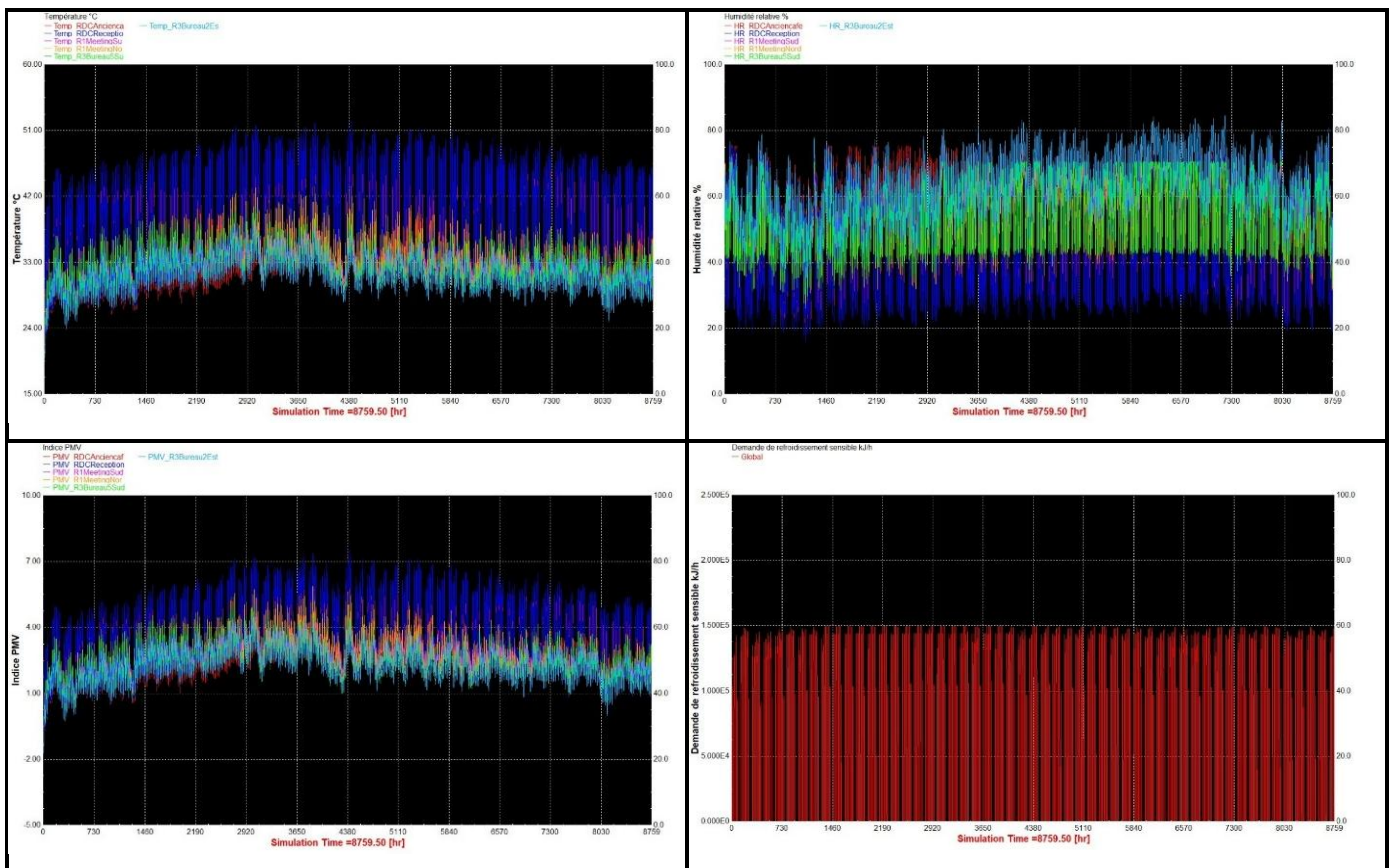


Figure 67 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour le scénario S5

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-2.54	-2.50	-2.73	-2.20	-2.38	-1.32
Δ Humidité relative (%)	+6.56	+6.38	+7.47	+5.38	+4.70	+4.45
Δ Indice PMV (point)	-0.88	-0.86	-0.88	-0.71	-0.77	-0.42

Tableau 30 : Comparaison des résultats par pièce pour le scénario S5

Critère de comparaison	Dreamplex
Besoin de refroidissement sensible annuel (MWh)	192.42
Δ Refroidissement (MWh)	-4.57

Tableau 31 : Evolution et besoin en énergie de refroidissement sensible annuel du bâtiment (S5)

Ce scénario simule l'installation de protections solaires extérieures en textile autour des ouvertures et d'une casquette au-dessus des baies du RDC, visant à réduire le rayonnement solaire direct pénétrant par les ouvertures dans les espaces intérieurs.

Les résultats montrent une réduction très nette des températures intérieures, avec des gains allant de 1.32 °C à 2.73 °C, les plus importants étant observés au 1er étage (R1pièce3) et au rez-de-chaussée. La protection est donc efficace dans les espaces avec une forte exposition directe, quelle que soit leur hauteur. L'humidité relative augmente fortement, jusqu'à 7.47 % (R1pièce3). L'indice PMV connaît une baisse significative dans toutes les pièces, de 0.42 à 0.88 point, ce qui témoigne d'une amélioration généralisée du confort thermique. Ces valeurs sur l'ensemble du bâtiment sont parmi les meilleures observées pour une stratégie passive testée seule. Sur le plan énergétique, la réduction de la demande de refroidissement est particulièrement élevée, avec 4.57 MWh/an économisés, ce qui place cette stratégie en tête concernant les performances énergétiques des dispositifs individuels simulés.

En résumé :

- Diminution de la température intérieure : 1.32 à 2.73 °C (effet fort et homogène).
- Augmentation de l'humidité relative : 4.45 à 7.47 %.
- Diminution de l'indice PMV : 0.42 à 0.88 point.
- Diminution du besoin en énergie de refroidissement sensible : 4.57 MWh/an (très élevé).
- Stratégie passive à fort impact global.

Ces résultats montrent que les protections solaires extérieures représentent l'une des solutions les plus efficaces dans le contexte vietnamien, combinant forte amélioration du confort thermique et réduction significative de la consommation énergétique, en particulier sur les façades très exposées au rayonnement direct.

5.2.7. Scénario pergola en toiture S6

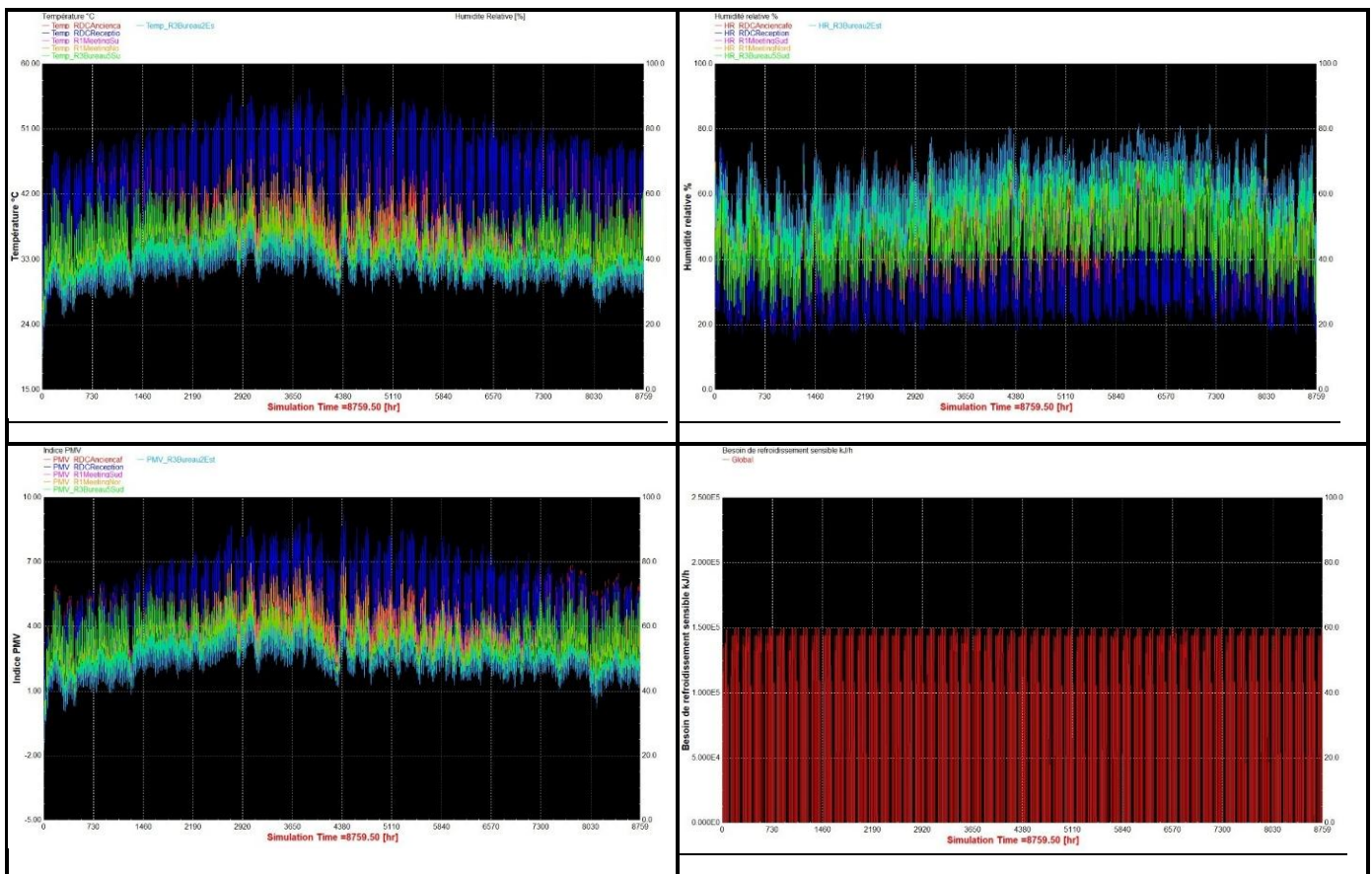


Figure 68 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour le scénario S6

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-0.01	-0.03	-0.11	-0.06	-0.07	-0.81
Δ Humidité relative (%)	+0.03	+0.08	+0.28	+0.15	+0.14	+2.57
Δ Indice PMV (point)	-0.00	-0.01	-0.04	-0.02	-0.02	-0.25

Tableau 32 : Comparaison des résultats par pièce pour le scénario S6

Critère de comparaison	Dreamplex
Besoin de refroidissement sensible annuel (MWh)	196.89
Δ Refroidissement (MWh)	-0.10

Tableau 33 : Evolution et besoin en énergie de refroidissement sensible annuel du bâtiment (S6)

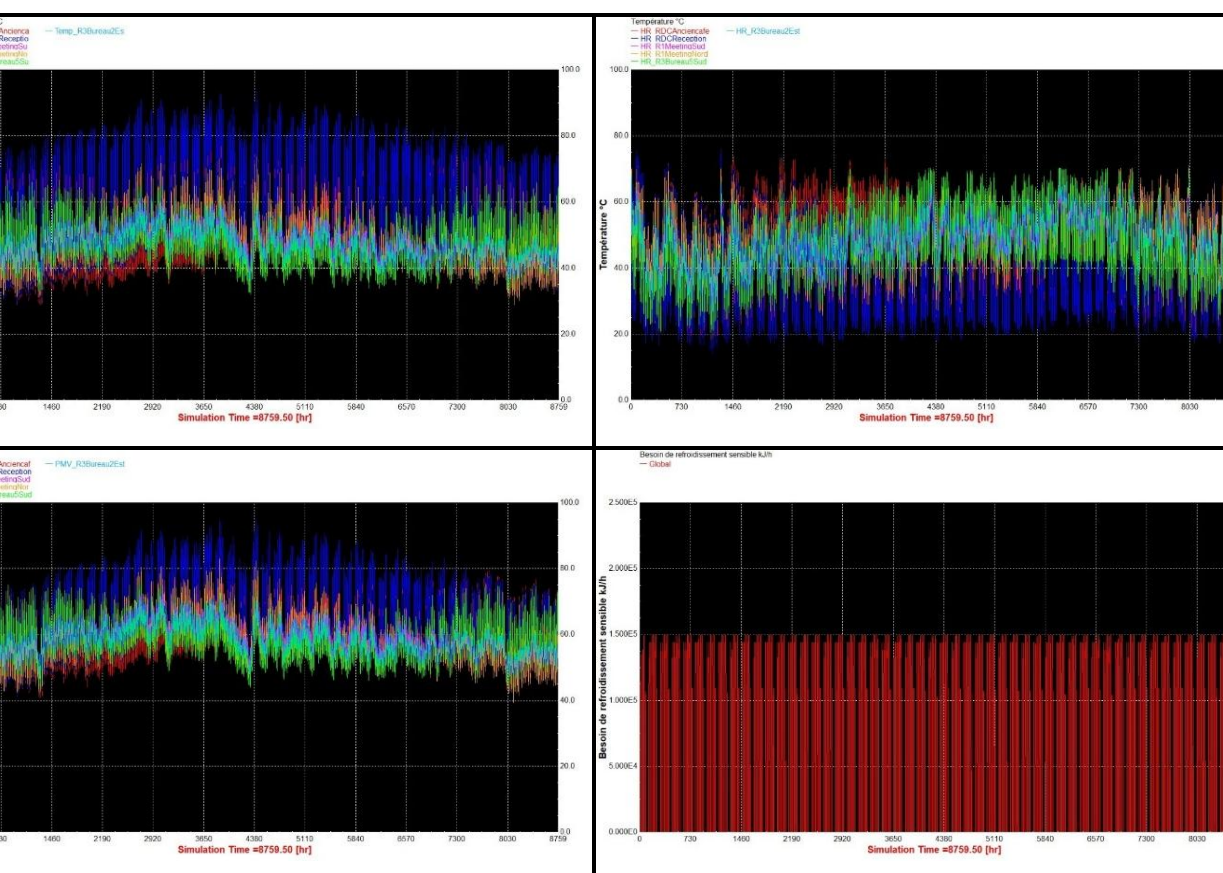
Ce scénario évalue l'impact d'une pergola installée au dernier étage accessible (rooftop), visant à réduire l'ensoleillement direct sur la toiture marchable et donc à limiter les apports thermiques dans les bureaux directement en dessous.

Les résultats montrent logiquement que l'effet est très localisé au niveau du 3e étage. Dans les autres étages (RDC et R+1), l'impact thermique est négligeable : la température ne baisse que de 0.01 à 0.11 °C, et l'humidité relative évolue très peu. En revanche, la pièce 6 enregistre une baisse de 0.81 °C, confirmant que l'effet protecteur de la pergola se manifeste pour les espaces en dessous. L'indice PMV suit la même tendance : seul l'espace directement sous la pergola bénéficie d'une réduction significative (0.25 point en moins), tandis que les autres pièces ne gagnent que 0.00 à 0.04 point, ce qui reste imperceptible pour les occupants. Sur le plan énergétique, la réduction de consommation de refroidissement reste modeste, avec 0.10 MWh/an économisés, reflétant à nouveau l'effet très localisé.

En résumé :

- Diminution de la température intérieure : jusqu'à 0.81 °C (au dernier étage, sous le rooftop).
- Augmentation de l'humidité relative : 2.57 % (R3pièce6).
- Diminution de l'indice PMV : jusqu'à 0.25 point.
- Diminution du besoin en énergie de refroidissement sensible : 0.10 MWh/an.
- Effet thermique très localisé, quasi nul hors bureaux sous toiture marchable.

La pergola en toiture constitue une stratégie d'appoint efficace pour le niveau supérieur fortement exposé, mais son efficacité globale reste limitée. Elle présente aussi un intérêt architectural en créant de l'ombre pour un usage potentiel du rooftop en journée.



Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	+0.08	+0.17	+0.53	+0.32	+1.27	+3.34
Δ Humidité relative (%)	-0.20	-0.43	-1.36	-0.79	-2.53	-10.07
Δ Indice PMV (point)	+0.03	+0.06	+0.18	+0.11	+0.44	+1.05

Tableau 34 : Comparaison des résultats par pièce pour le scénario S7

Critère de comparaison	Dreamplex
Besoin de refroidissement sensible annuel (MWh)	197.47
Δ Refroidissement (MWh)	+0.48

Tableau 35 : Evolution et besoin en énergie de refroidissement sensible annuel du bâtiment (S7)

Ce scénario vise à limiter les apports de chaleur par conduction à travers la toiture en ajoutant une couche d'isolation thermique. Il s'agit d'une mesure passive réputée efficace dans les climats tempérés, mais qui doit montrer son efficacité en climat tropical.

Les résultats montrent un impact globalement négatif. La température intérieure augmente dans toutes les pièces, avec au dernier étage une augmentation de 3.34 °C, ce qui signifie probablement que l'ajout d'isolation empêche la dissipation naturelle de la chaleur accumulée et conduit à une surchauffe générale. L'humidité relative diminue également, avec une diminution notable de 10.07 % (R3pièce6). L'indice PMV s'élève également dans toutes les zones, atteignant +1.05 point, ce qui reflète une nette dégradation du confort perçu. Même dans les pièces les moins affectées (RDC), l'augmentation, même moindre, du PMV indique un effet contre-productif. Enfin, l'isolation entraîne une augmentation des besoins de refroidissement de 0.48 MWh/an, soulignant que cette mesure, dans ce contexte et sans stratégie supplémentaire, génère un effet d'accumulation thermique néfaste.

En résumé :

- Température intérieure : hausse généralisée, jusqu'à 3.34 °C.
- Humidité relative : diminution générale en lien avec la température (jusqu'à 10.07 %).
- Indice PMV : augmentation dans toutes les pièces (jusqu'à +1.05 point en pièce 6).
- Augmentation du besoin en énergie de refroidissement sensible : 0.48 MWh/an.
- Stratégie contre-productive seule, à éviter sans mesures complémentaires.

L'isolation de la toiture aggrave significativement le confort thermique et la performance énergétique du bâtiment. Elle ne peut donc être envisagée seule, et ne devrait être utilisée qu'en combinaison avec d'autres mesures.

5.2.9. Scénario bâtiment actuel

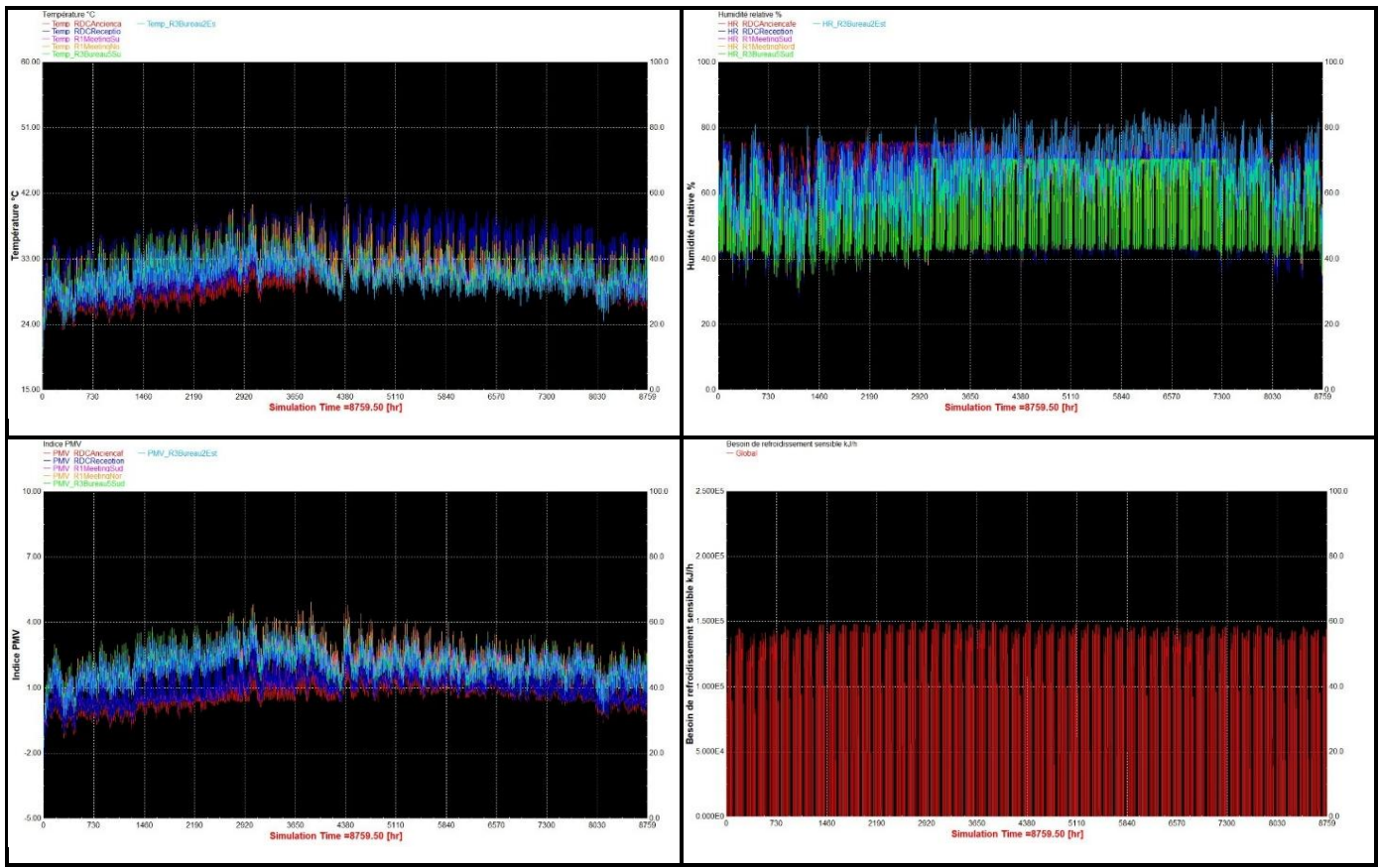


Figure 70 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour le scénario bâtiment actuel

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-6.69	-6.66	-4.59	-3.91	-3.59	-2.04
Δ Humidité relative (%)	+16.85	+16.40	+12.61	+9.32	+6.83	+7.04
Δ Indice PMV (point)	-2.97	-2.96	-1.48	-1.26	-1.17	-0.65

Tableau 36 : Comparaison des résultats par pièce pour le scénario bâtiment actuel

Critère de comparaison	Dreamplex
Besoin de refroidissement sensible annuel (MWh)	188.21
Δ Refroidissement (MWh)	-8.78

Tableau 37 : Evolution et besoin en énergie de refroidissement sensible annuel du bâtiment actuel

Cette simulation supplémentaire correspond à l'état actuel du Dreamplex, après rénovation, c'est-à-dire avec toutes les stratégies précédentes, mais sans pergola ni isolation thermique de toiture. Il constitue une synthèse et sert de point de référence supplémentaire dans l'évaluation globale.

Les résultats sont logiquement bien meilleurs que ceux du bâtiment initial (scénario 0), avec une amélioration marquée du confort thermique dans l'ensemble des pièces. La température intérieure est réduite de 2.04 à 6.69 °C, les effets les plus forts étant observés au rez-de-chaussée. L'humidité relative a aussi augmenté, allant de 6.83 % à 16.85 %. L'indice PMV connaît une baisse importante : de 0.65 point (R3pièce6) à 2.97 points (RDCpièce1), ce qui indique une amélioration importante du confort thermique perçu dans toutes les zones du bâtiment. Enfin, la réduction de la demande en refroidissement atteint 8.78 MWh/an.

En résumé :

- Diminution de la température intérieure : 2.04 à 6.69 °C (forte amélioration).
- Augmentation de l'humidité relative : 6.83 à 16.85 %.
- Diminution de l'indice PMV : 0.65 à 2.97 points.
- Diminution du besoin en énergie de refroidissement sensible : 8.78 MWh/an.
- Bilan très positif sur tous les indicateurs, amélioration globale visible mais tout de même moins importante dans les bureaux sous toiture.

6. Discussions

6.1. Analyse des scénarios individuels

6.1.1. Introduction générale

L'évaluation des stratégies bioclimatiques appliquées individuellement permet de mieux comprendre les effets spécifiques de chaque intervention sur le comportement thermique du Dreamplex. Jusqu'à présent, ces performances thermiques ont été interprétées à travers les indicateurs fournis par la simulation, à savoir :

- l'évolution annuelle de la température intérieure (°C).
- l'évolution annuelle de l'humidité relative (%).
- l'évolution annuelle de l'indice PMV Standard et PMV/SET.
- l'évolution annuelle du besoin en énergie de refroidissement sensible (kJ/h).

Cette approche a permis d'identifier les leviers les plus efficaces, mais aussi ceux dont l'intérêt paraît limité lorsqu'ils sont appliqués seuls. Afin de compléter cette lecture, ces résultats vont désormais être enrichis avec un nouveau critère : le confort thermique des occupants à l'aide du nombre d'heures de confort annuel.

Pour la suite, chaque scénario conservera un total de 6158 pas de temps, correspondant aux horaires d'occupation du bâtiment suivantes :

- du lundi au vendredi : de 8h – 19h,
- le samedi : de 8h – 12h.

Ces plages horaires reflètent les périodes d'utilisation réelles du bâtiment et où le confort thermique présente un réel enjeu. Afin d'évaluer ce confort thermique de manière contextualisée, tout en palliant les insuffisances de la littérature existante, des valeurs seuils et plages d'humidité ont été définies. Elle se base sur une « petite enquête de confort » menée par Pham en 2002 au Vietnam (Anh Tuan Nguyen, 2013). Dans cette étude, des individus se sont déclarés thermiquement confortables entre 28,5 et 29,5°C avec 90% d'humidité relative.

Sur la base de ce constat et en cohérence avec les informations d'autres travaux sur le confort en climat tropical, un pas de temps est considéré comme inconfortable lorsque la température intérieure dépasse 29 °C et que l'humidité relative se situe en dehors de la plage 30% - 90%, considérée comme acceptable. Cette double lecture : confort et efficacité thermique, va permettre une évaluation plus complète de la pertinence de chaque stratégie bioclimatique.

6.1.2. Analyse du confort

Sur la base des seuils de confort définis précédemment, on obtient le nombre de pas de temps valides par pièce, pour chacun des scénarios. Les résultats sont fournis dans le tableau suivant :

	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	Bâtiment actuel
R3Pièce6	270	314	272	298	331	766	399	32	1143
R3Pièce5	43	56	43	49	62	354	46	24	756
R1Pièce4	55	65	57	140	65	257	57	49	666
R1Pièce3	32	33	32	65	35	123	32	32	589
RDCPièce2	32	29	102	498	36	214	33	29	897
RDCPièce1	18	14	79	391	19	167	18	17	945

Tableau 38 : Pas de temps valide par pièce en fonction du scénario

A partir des valeurs précédentes, les pas de temps confortables sont traduits en heures de confort annuel puis comparés aux résultats du scénario de référence S0 (un pas de temps équivalant à 30 minutes). Cela donne les heures de confort annuel supplémentaires suivantes :

	<i>Terrasse végétalisée</i> S1	<i>Ventilation naturelle</i> S2	<i>Ventilateurs mécanique</i> S3	<i>Double peau</i> S4	<i>Protections solaires</i> S5	<i>Pergola en toiture</i> S6	<i>Isolation en toiture</i> S7	<i>Bâtiment actuel</i>
R3Pièce6	22	1	14	30.5	248	64.5	-119	436.5
R3Pièce5	6.5	0	3	9.5	155.5	1.5	-9.5	356.5
R1Pièce4	5	1	42.5	5	101	1	-3	305.5
R1Pièce3	0.5	0	16.5	1.5	45.5	0	0	278.5
RDCPièce2	-1.5	35	233	2	91	0.5	-1.5	432.5
RDCPièce1	-2	30.5	186.5	0.5	74.5	0	-0.5	463.5

Tableau 39 : Nombre d'heures de confort annuel supplémentaire par rapport à S0 (h/an)

Ces données permettent de tirer les enseignements suivants :

- La terrasse végétalisée S1, seule, n'améliore pas ou très peu le confort thermique intérieur. Elle n'apporte que 29.5 heures de confort annuel supplémentaires sur l'ensemble des pièces. On observe même un recul des heures de confort dans les deux pièces du RDC. Il s'explique probablement par un impact localisé sur le microclimat immédiat, sans effet direct dans les volumes intérieurs. Ses résultats sont cohérents avec une terrasse végétalisée seule, autour d'un bâtiment fermé.
- Concernant la stratégie S2 (ventilation naturelle), elle montre une amélioration modérée avec 67.5 heures de confort supplémentaires globales. Les effets les plus marqués sont logiquement observés dans les espaces du RDC (plus de 30h évitées par an dans chacune des pièces). Son effet devient marginal aux étages supérieurs, montrant que les bénéfices en termes de confort sont localisés à la zone ventilée, sans propagation notable vers la mezzanine.
- Le scénario ventilation mécanique S3 montre lui aussi une performance significative avec un total de 495.5 heures de confort supplémentaires cumulées. Il se distingue par une efficacité logiquement très marquée au RDC (186.5h et 233h), mais aussi des gains notables en mezzanine. C'est donc une solution active, peu technique et très efficace.
- Pour la double peau en bambou (S4), le gain cumulé est plus limité (49 heures) et les résultats présentent une cohérence spatiale : l'amélioration se concentre sur les pièces exposées aux étages. Tandis que les pièces plus basses n'en tirent que peu de bénéfices.
- Le scénario protections solaires S5 permet des gains très significatifs dans toutes les pièces, allant de 74.5 heures dans la pièce 1 du RDC, à 248 heures dans la pièce 6 du R3. Au total, ce scénario cumule 715.5 heures de confort supplémentaires par an par rapport au scénario initial. Ces résultats montrent que la maîtrise des apports solaires directs par les ouvertures est un facteur déterminant dans la lutte contre la surchauffe en climat tropical.
- La pergola produit un effet ciblé sur les pièces sous toiture. Le R3 est donc favorisé avec 64.5 heures de confort annuel supplémentaires dans la pièce 6. Les autres niveaux affichent des gains très faibles, voire inexistantes. Ce scénario totalise 67.5 heures de confort, ce qui le situe parmi les interventions moyennement efficaces mais très dépendantes de la localisation.
- A l'inverse, l'isolation en toiture (S7) appliquée seule aggrave le confort dans presque toutes les pièces, avec une diminution totale de 133.5 heures de confort annuel. La pièce 6 au R3 subit une dégradation très importante (-119 h), à nouveau probablement liée à l'accumulation de chaleur sans stratégie d'évacuation.
- Enfin, les données du bâtiment actuel confirment l'apport des interventions réalisées, même si des optimisations supplémentaires restent possibles.

6.1.3. Récapitulatif de l'étude des scénarios individuels

Parmi l'ensemble des stratégies testées, trois approches se démarquent par leur efficacité globale, leur cohérence spatiale et leur faisabilité techniques :

- Les protections solaires (S5) ressortent comme la meilleure stratégie individuelle en termes de confort et d'efficacité énergétique. Elles sont aussi accessibles en termes de coût. Leur efficacité transversale (toute pièce et tous étages) en fait un levier principal en climat tropical.
- La ventilation mécanique (S3) améliore très fortement le confort perçu, mais il est important de noter que son impact énergétique n'est pas négligeable. En considérant une puissance nominale de 75 W (hypothèses précédentes) et une utilisation de 8 heures par jour, ce ventilateur consomme annuellement environ 170 kWh. Bien qu'elle n'influence pas directement la température, elle offre donc une solution simple, économique et largement applicable.

D'autres stratégies présentent un intérêt ciblé ou conditionnel :

- La ventilation naturelle (S2) du rez-de-chaussée constitue une stratégie passive efficace, à condition que le bâtiment soit traversant. Ses effets, localisés au RDC, ne se propagent pas à l'échelle du bâtiment. Elle peut tout de même être une stratégie complémentaire intéressante et peu coûteuse, avec un bon potentiel d'intégration dès la conception ou dans les rénovations.
- Une stratégie comme la pergola en toiture (S6) peut être très utile, mais son effet est le plus localisé de toutes les stratégies. Elle n'est donc pas suffisante seule, mais peut devenir une stratégie d'appoint peu coûteuse dans des bâtiments où la surchauffe sous toiture est une problématique majeure.
- La double peau en bambou (S4) constitue une bonne stratégie passive complémentaire, surtout aux étages et pour les façades les plus exposées. Elle a aussi une valeur architecturale non négligeable. Elle gagne à être intégrée dans une stratégie combinée avec des protections solaires.
- On retrouve ensuite la terrasse végétalisée (S1). Appliquée seule, elle montre une efficacité très limitée sur le plan thermique, avec des gains marginaux de confort et un coût potentiel non négligeable. Elle gagne aussi à être intégrée dans une stratégie combinée, mais cette fois-ci avec la ventilation naturelle. S1 est une solution à fort potentiel paysager, écologique et pour l'infiltration des eaux de pluie, mais moins pour le confort thermique.

Enfin, une stratégie s'avère contre-productive si elle est mal maîtrisée :

- L'isolation thermique de la toiture (S7), en l'absence d'ombrage ou de dissipation thermique, engendre une accumulation de chaleur, dégradant le confort thermique et augmentant les besoins énergétiques. Elle ne doit être envisagée qu'en complément d'autres mesures correctrices.

Scénario	ΔT max (°C)	ΔPMV max (point)	Heures de confort supplémentaires max (h/an)	Δ Refroidissement (MWh/an)
<i>S1 – Terrasse végétalisée</i>	-0.64 (pièce3)	-0.21 (pièce3)	22 h (pièce6)	-0.55
<i>S2 – Ventilation naturelle</i>	-1.40 (pièce1)	-0.30 (pièce1)	35 h (pièce2)	-0.02
<i>S3 – Ventilation mécanique</i>	-4.08 (pièce1, ressenti)	-2.20 (pièce1)	233 h (pièce2)	-0.13
<i>S4 – Double peau bambou</i>	-0.70 (pièce5)	-0.23 (pièce5)	30.5 h (pièce6)	-0.54
<i>S5 – Protections solaires</i>	-2.73 (pièce3)	-0.88 (pièce1/3)	248 h (pièce6)	-4.57
<i>S6 – Pergola en dur</i>	-0.81 (pièce6)	-0.25 (pièce6)	64.5 h (pièce6)	-0.10
<i>S7 – Isolation toiture</i>	+3.34 (pièce6)	+1.05 (pièce6)	-119 h (pièce6)	+0.48

Tableau 40 : Récapitulatif synthétique des valeurs maximales des scénarios individuels

6.2. Analyse de scénarios combinés

6.2.1. Objectif et logique des combinaisons

Après avoir évalué l'incidence de chaque stratégie bioclimatique appliquée de façon isolée, il convient désormais d'examiner leurs effets lorsqu'elles sont combinées. Pour ce faire, deux types de combinaisons vont être étudiées :

- Combinaisons de stratégies individuelles

Cette étape permet d'évaluer la complémentarité entre des solutions déjà testées isolément. Elles visent à identifier les interactions positives, neutres ou négatives entre des dispositifs déjà intégrés dans le bâtiment existant. Leur élaboration s'appuie sur les enseignements tirés des scénarios individuels ainsi que sur une logique technique (association de stratégie active et passive), constructive et spatiale.

- Combinaisons prospectives

Cette étape permet d'intégrer des interventions non réalisées mais jugées pertinentes au vu des résultats du bâtiment actuel. Elles vont permettre d'anticiper l'impact global sur la performance thermique et la consommation énergétique.

Dans cette optique, trois scénarios combinés individuels (C1 à C3) et deux combinaisons prospectives (C4 et C5) ont été définis. Les combinaisons retenues sont finalement les suivantes :

- C1 : ventilation naturelle + ventilation mécanique

Cette combinaison associe l'apport d'air extérieur par ventilation naturelle, avec l'effet localisé de confort thermique par brassage d'air. Elle est particulièrement pertinente dans les climats tropicaux urbains, où la ventilation naturelle n'est pas toujours suffisante pour atteindre une vitesse d'air perçue agréable. Cette combinaison est aussi caractérisée par une faisabilité élevée car elle repose sur des travaux et des équipements légers et peu coûteux. L'objectif est d'étudier deux approches différentes de la ventilation qui ont eu toutes deux des effets très localisés au niveau des ouvertures mais marqués.

- C2 : ventilation naturelle + terrasse végétalisée

Cette combinaison a pour objectif d'étudier les effets de la ventilation naturelle combinée au phénomène d'évapotranspiration. La terrasse végétalisée agit comme une surface rafraîchissante, réduisant la température de l'air entrant et la ventilation naturelle permet de distribuer cet air plus frais dans les espaces traversants. Il s'agit d'une combinaison faiblement technicisée, utilisable dans le contexte d'une rénovation légère. Ces deux stratégies ayant montré un potentiel individuel modéré ou faible, la combinaison vise ainsi à étudier leurs effets simultanés.

- C3 : façade double peau + protections solaires

Cette combinaison associe deux stratégies de contrôle solaire, pour la façade et pour les ouvertures. L'intérêt est de tester leur efficacité conjointe, en particulier sur les espaces soumis à un fort ensoleillement. Elles seront donc simulées dans une logique de cohérence spatiale en façade.

- C4 : bâtiment rénové actuel + pergola + isolation toiture

Ce scénario teste l'intégralité des stratégies individuelles simulées jusqu'à présent. L'isolation réduit les apports par conduction, tandis que la pergola limite les gains solaires directs. Cette combinaison est conçue pour essayer de corriger les effets néfastes observés avec l'isolation seule, grâce à l'effet de la pergola. L'objectif est de savoir si la pergola protège l'enveloppe en amont et évite l'effet de « piège thermique » induit par l'isolation pour un niveau de performance supérieur à long terme.

- C5 : bâtiment rénové actuel + pergola uniquement

C'est une variante plus économe et légère à court terme que la combinaison précédente. L'objectif est de vérifier dans quelle mesure l'absence d'isolation peut être compensée par un ombrage bien conçu. La pergola a un impact positif très ciblé sur les pièces sous toitures qui sont, dans le bâtiment actuel, une zone où le confort peut encore être amélioré.

Chaque scénario est analysé dans une sous-partie dédiée, à partir des mêmes indicateurs que les scénarios individuels. Les résultats seront finalement comparés à ceux des différents scénarios individuels concernés, ou au bâtiment actuel pour les combinaisons prospectives (C4 et C5).

Pour évaluer la pertinence des trois premières combinaisons, il ne suffit pas de constater les performances globales. Il est également important de comprendre la contribution relative de chaque stratégie à la performance globale de la combinaison. Pour cela, la contribution relative des stratégies individuelles est calculée et exprimée sous la forme d'un pourcentage. Ceci permettra de déterminer quelle stratégie est responsable de la majorité des effets observés, ainsi que d'évaluer si l'autre stratégie apporte un effet complémentaire ou marginal.

Ces pourcentages sont calculés à partir des deux indicateurs suivants :

- le nombre d'heure de confort annuel (h/an),
- la température intérieure annuelle moyenne (°C).

6.2.2. Combinaisons de stratégies individuelles

6.2.2.1. Combinaison ventilation naturelle et ventilation mécanique C1 au rez-de-chaussée

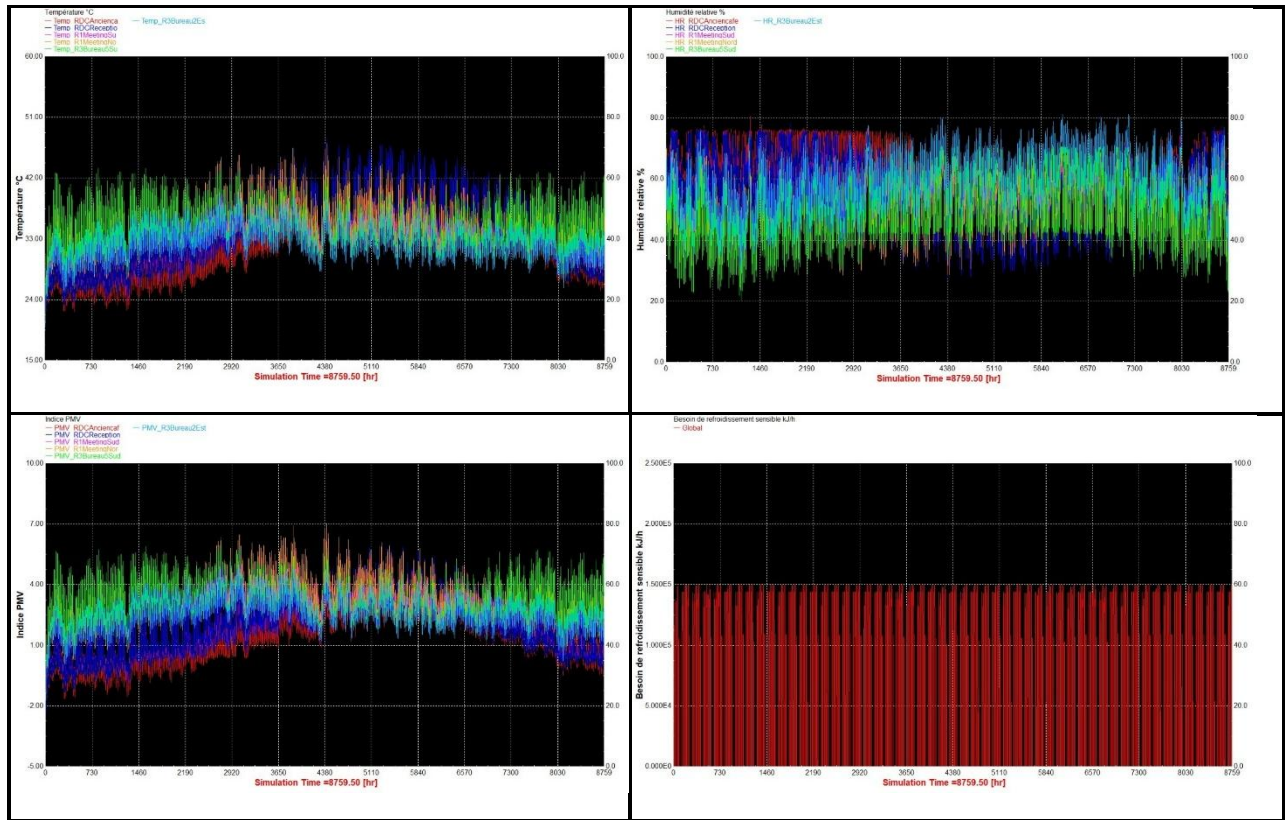


Figure 71 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour la combinaison C1

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-4.58	-4.32	-1.31	-1.00	-0.12	-0.16
Δ Humidité relative (%)	+10.90	+9.91	+3.45	+2.51	+0.24	+0.49
Δ Indice PMV (point)	-2.32	-2.23	-0.41	-0.31	-0.04	-0.05
Heures de confort supplémentaires (h/an)	214	249	17	44.5	3.5	15
Δ Refroidissement (MWh)	-0.14					

Tableau 41 : Comparaison des résultats par pièce pour la combinaison C1

Pièce	S2	S3	C1	S2 : %C1	S3 : %C1
R3pièce6	1.0	14.0	15.0	6.7%	93.3%
R3pièce5	0.0	3.0	3.5	0%	85.7%
R1pièce4	1.0	42.5	44.5	2.2%	95.5%
R1pièce3	0.0	16.5	17	0%	97.1%
RDCpièce2	35.0	233	249	14.1%	93.6%
RDCpièce1	30.5	186.5	214	14.2%	87.1%

Tableau 42 : Part relative de chaque stratégie dans la combinaison C1 pour les heures de confort supplémentaire annuel (h/an) – S2 : ventilation naturelle et S3 : ventilation mécanique

Pièce	S2	S3	C1	S2 : %C1	S3 : %C1
R3pièce6	-0.02	-0.14	-0.16	12.5%	87.5%
R3pièce5	-0.01	-0.11	-0.12	8.3%	91.7%
R1pièce4	-0.13	-0.89	-1.00	13%	89%
R1pièce3	-0.17	-1.17	-1.31	13%	89.3%
RDCpièce2	-1.11	-3.90	-4.32	25.7%	90.3%
RDCpièce1	-1.40	-4.08	-4.58	30.6%	89.1%

Tableau 43 : Part relative de chaque stratégie dans la combinaison C1 pour la température moyenne annuelle (°C) – S2 : ventilation naturelle et S3 : ventilation mécanique

La combinaison C1 conduit à des améliorations notables du confort thermique, avec 249 heures supplémentaires de confort par an (RDCpièce2) et une réduction de températures atteignant 4.58°C (RDCpièce1). Ces résultats traduisent à nouveau l'efficacité de la ventilation mécanique, qui contribue à elle seule de 85.7 à 97.1% des performances de la combinaison, selon les pièces.

La ventilation naturelle apporte une contribution secondaire mais non négligeable au RDC, représentant 25 à 30% de la réduction thermique dans cette zone, et environ 14% des heures de confort. En revanche, son impact devient plus faible voire quasi nul dans les étages, où le peu de connexion (mezzanine seulement) avec le RDC limite son efficacité.

Au final, cette combinaison dépasse légèrement la meilleure des deux stratégies isolées, montrant une légère complémentarité sans effet de synergie marqué. Son intérêt principal réside dans son potentiel à adapter la stratégie de ventilation selon les conditions climatiques et les espaces. Elle peut s'appuyer sur la ventilation naturelle lorsque possible, tout en assurant un confort constant via la ventilation mécanique.

6.2.2.2. Combinaison ventilation naturelle et terrasse végétalisée C2 au rez-de-chaussée

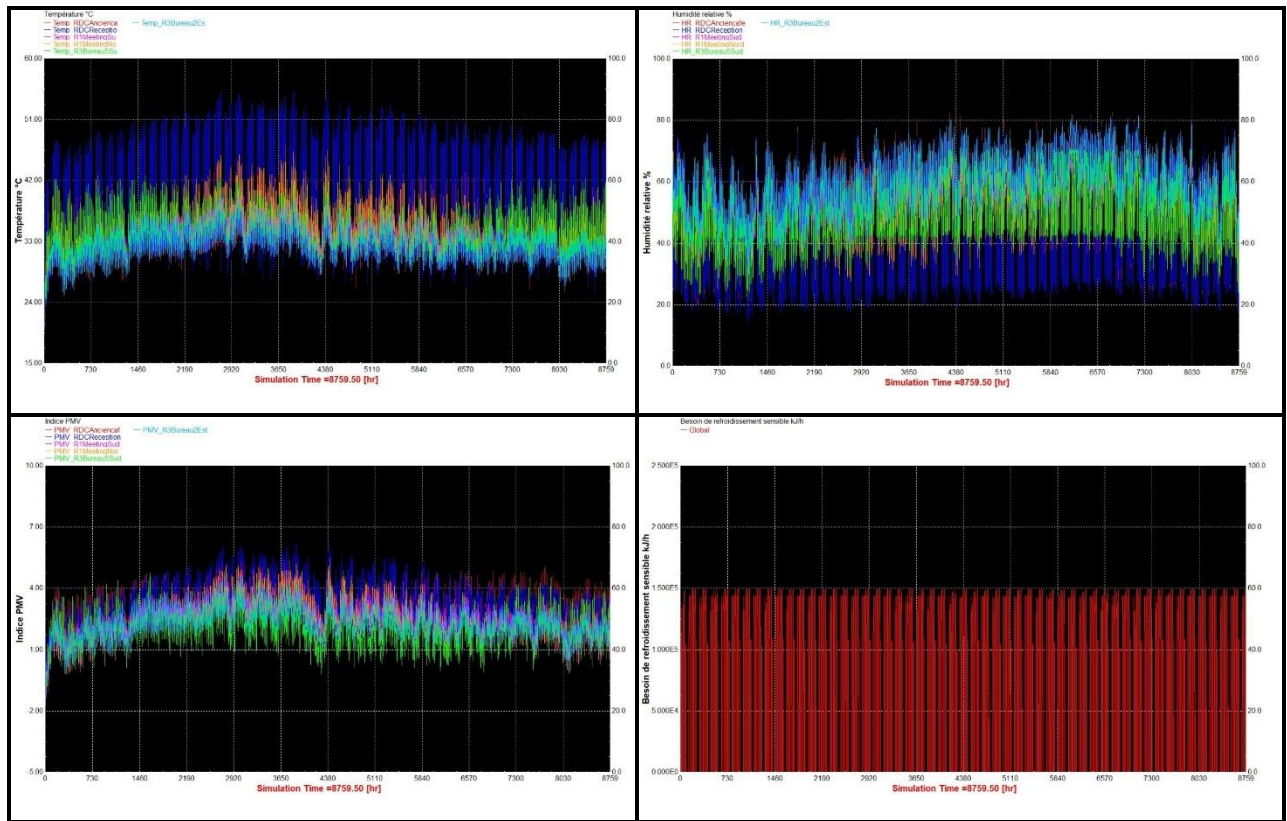


Figure 72 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour la combinaison C2

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-1.91	-1.68	-0.80	-0.75	-0.52	-0.33
Δ Humidité relative (%)	+4.13	+4.04	+2.12	+1.86	+0.99	+1.09
Δ Indice PMV (point)	-0.47	-0.42	-0.26	-0.24	-0.17	-0.11
Heure de confort supplémentaires (h/an)	56	57.5	1	6	8	26
Δ Refroidissement (MWh)	-0.57					

Figure 73 : Comparaison des résultats par pièce pour la combinaison C2

Pièce	S1	S2	C2	S1 : %C2	S2 : %C2
R3pièce6	22	1.0	26	84.6%	3.8%
R3pièce5	6.5	0.0	8	81.25%	0%
R1pièce4	5	1.0	6	83.3%	16.7%
R1pièce3	0.5	0.0	1	50%	0%
RDCpièce2	-1.5	35	57.5	-2.6%	60.9%
RDCpièce1	-2.0	30.5	56	-3.6%	54.5%

Tableau 44 : Part relative de chaque stratégie dans la combinaison C2 pour les heures de confort supplémentaire annuel (h/an) – S1 : terrasse végétalisée et S2 : ventilation naturelle

Pièce	S1	S2	C2	S1 : %C2	S2 : %C2
R3pièce6	-0.32	-0.02	-0.33	97%	6.1%
R3pièce5	-0.50	-0.01	-0.52	96.2%	1.9%
R1pièce4	-0.62	-0.13	-0.75	82.7%	17.3%
R1pièce3	-0.64	-0.17	-0.80	80%	21.25%
RDCpièce2	-0.55	-1.11	-1.68	32.74%	66.1%
RDCpièce1	-0.49	-1.40	-1.91	25.7%	73.3%

Tableau 45 : Part relative de chaque stratégie dans la combinaison C2 pour la température moyenne annuelle (°C) – S1 : terrasse végétalisée et S2 : ventilation naturelle

La combinaison C2 affiche des effets modérés mais cohérents en termes de localisation. On retrouve jusqu'à 57,5 h/an de confort supplémentaires (RDCpièce2) et une réduction de température moyenne annuelle de -1.91 °C (RDCpièce1). L'analyse des contributions montre que la terrasse végétalisée (S1) est la stratégie dominante dans cette combinaison pour les étages. En revanche au rez-de-chaussée, les deux stratégies contribuent de manière plus équilibrée : la ventilation naturelle (S2) représente environ 55 à 60% des heures de confort supplémentaires, tandis que S1 assure un tiers de la baisse de température. Ce résultat suggère une certaine complémentarité spatiale et d'effet.

La combinaison des deux stratégies au RDC pour les heures de confort dépasse nettement la meilleure des deux stratégies isolées. Ainsi, la terrasse végétalisée, dont les effets étaient initialement défavorables en isolation, semble désormais exercer une influence positive dans la combinaison. Cela témoigne d'un effet combiné réel, bien que sans synergie forte au vu des résultats portant sur la température moyenne annuelle.

6.2.2.3. Combinaison façade double peau et protections solaires C3

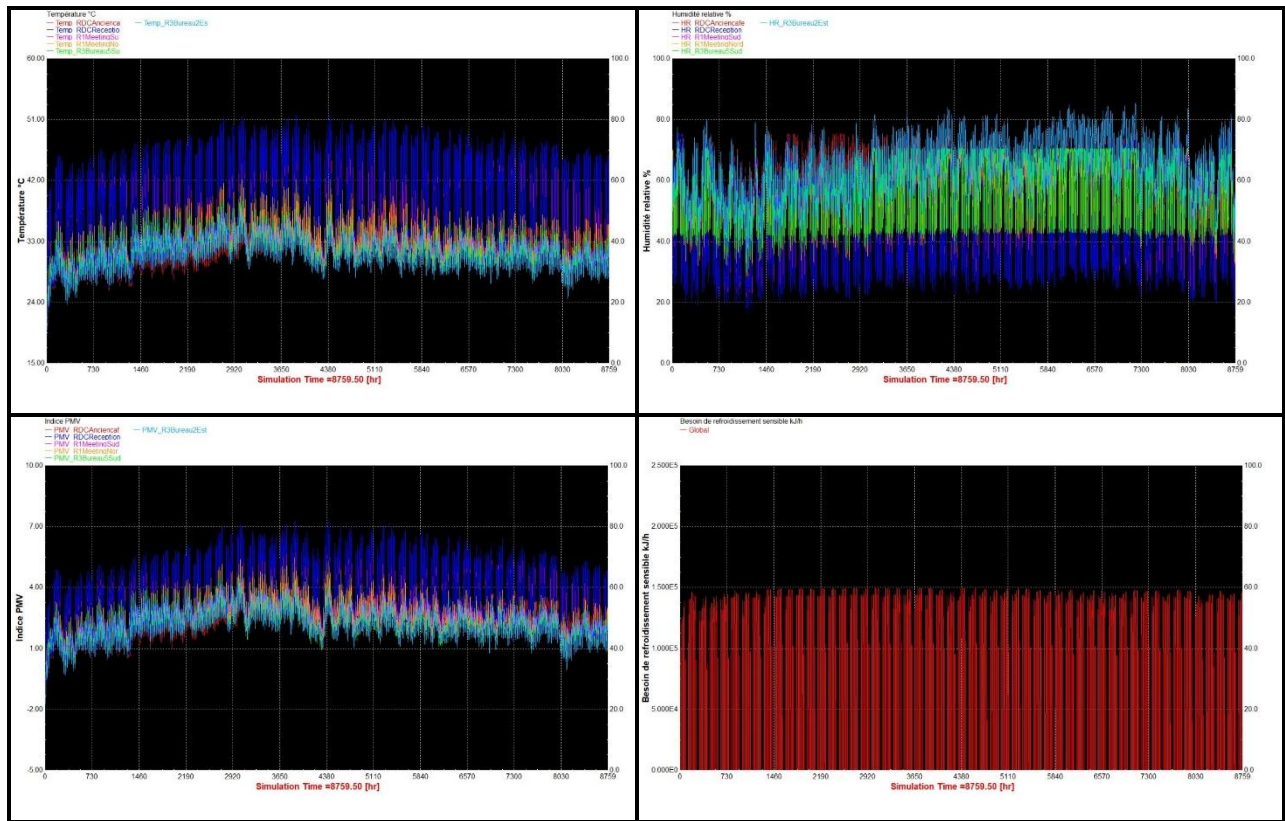


Figure 74 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour la combinaison C3

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-2.68	-2.71	-3.26	-2.77	-3.08	-1.67
Δ Humidité relative (%)	+6.94	+6.97	+8.95	+6.76	+6.04	+5.69
Δ Indice PMV (point)	-0.93	-0.93	-1.05	-0.90	-1.00	-0.53
Heures de confort supplémentaires (h/an)	82.5 h/an	101.5 h/an	77.5 h/an	139.5 h/an	239.5 h/an	334.5 h/an
Δ Refroidissement (MWh)	-6.61					

Tableau 46 : Comparaison des résultats par pièce pour la combinaison C3

Pièce	S4	S5	C3	S4 : %C3	S5 : %C3
R3pièce6	30.5	248	334.5	9.1%	74.1%
R3pièce5	9.5	155.5	239.5	4%	64.9%
R1pièce4	5.0	101	139.5	3.6%	72.4%
R1pièce3	1.5	45.5	77.5	1.9%	58.7%
RDCpièce2	2.0	91	101.5	2%	89.7
RDCpièce1	0.5	74.5	82.5	0.6%	90.3%

Tableau 47 : Part relative de chaque stratégie dans la combinaison C3 pour les heures de confort supplémentaire annuel (h/an) – S4 : double peau et S5 : protections solaires

Pièce	S4	S5	C3	S4 : %C3	S5 : %C3
R3pièce6	-0.35	-1.32	-1.67	21%	79%
R3pièce5	-0.70	-2.38	-3.08	22.7%	77.3%
R1pièce4	-0.57	-2.20	-2.77	20.6%	79.4%
R1pièce3	-0.52	-2.73	-3.26	16%	83.7%
RDCpièce2	-0.21	-2.50	-2.71	7.7%	92.6%
RDCpièce1	-0.14	-2.54	-2.68	5.2%	94.8%

Tableau 48 : Part relative de chaque stratégie dans la combinaison C3 pour la température moyenne annuelle (°C) - S4 : double peau et S5 : protections solaires

La combinaison C3 produit des résultats thermiques très élevés, avec des gains de confort atteignant jusqu'à 334.5 heures supplémentaires par an (R3pièce6) et une réduction de la température moyenne allant jusqu'à 3.26 °C (R1pièce3).

L'analyse des contributions révèle une domination nette des protections solaires (S5), qui représentent entre 58.7 et 90.3% des effets en confort et près de 77.3 à 94.8% de la diminution thermique selon les pièces. La double peau en bambou (S4), bien que moins performante seule, apporte une contribution non négligeable, en particulier dans les étages (jusqu'à 22.7% des effets thermiques).

Ces données montrent une synergie faible mais réelle. La combinaison C3 dépasse les résultats des stratégies isolées en termes de confort, en particulier dans les pièces les plus exposées au rayonnement direct. La complémentarité entre ombrage ponctuel et filtration continue se traduit par une réduction renforcée des apports solaires, sans conflit entre les deux dispositifs. En résumé, C3 confirme l'intérêt de combiner plusieurs stratégies solaires complémentaires, notamment dans ce contexte de climat tropical. Elle permet une maîtrise précise des apports selon les orientations, tout en renforçant le confort thermique global de l'ensemble des niveaux du bâtiment.

6.2.3. Combinaisons prospectives

6.2.3.1. Combinaison bâtiment actuel plus isolation et pergola C4

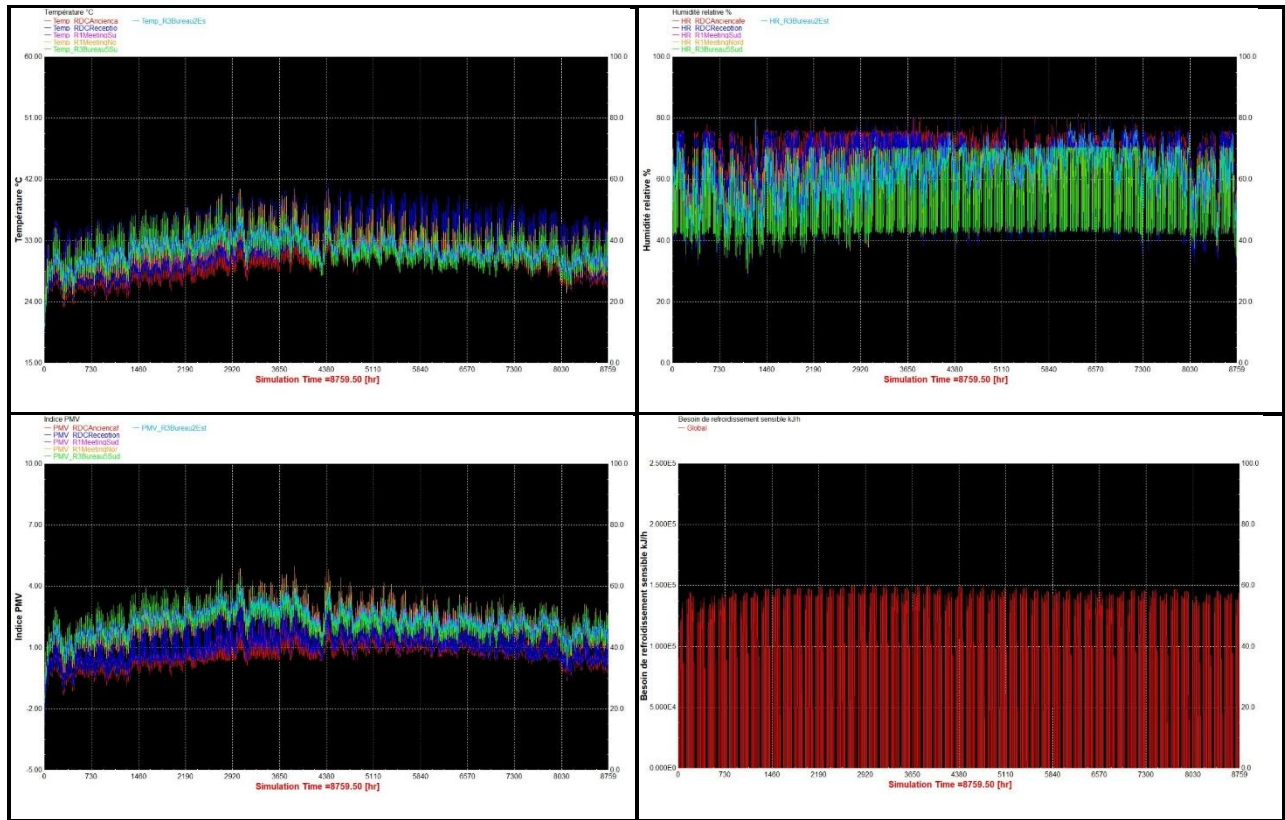


Figure 75 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour la combinaison C4

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-6.67	-6.61	-4.44	-3.82	-3.14	-1.02
Δ Humidité relative (%)	+16.92	+16.37	+12.20	+9.10	+6.28	+3.06
Δ Indice PMV (point)	-2.98	-2.96	-1.42	-1.23	-1.01	-0.33
Heures de confort supplémentaires (h/an)	461	425.5	246	288	206.5	24
Δ Refroidissement (MWh)	-8.88					

Tableau 49 : Comparaison des résultats par pièce pour la combinaison C4

Représentant une combinaison prospective, elle est comparée aux résultats obtenus pour le Dreamplex rénové, tel qu'il existe actuellement.

Pièce	Bâtiment actuel	C4	Ecart (h/an)
R3pièce6	436.5	24	-412.5
R3pièce5	356.5	206.5	-150
R1pièce4	305.5	288	-17.5
R1pièce3	278.5	246	-32.5
RDCpièce2	432.5	425.5	-7.0
RDCpièce1	463.5	461	-2.5

Tableau 50 : Comparaison des heures de confort supplémentaires dans la combinaison C4 (h/an)

Pièce	Bâtiment actuel	C4	Ecart (°C)
R3pièce6	-2.04	-1.02	+1.02
R3pièce5	-3.59	-3.14	+0.45
R1pièce4	-3.91	-3.82	+0.09
R1pièce3	-4.59	-4.44	+0.15
RDCpièce2	-6.66	-6.61	+0.05
RDCpièce1	-6.69	-6.67	+0.02

Tableau 51 : Comparaison des Δ Température dans la combinaison C4 (°C)

Pièce	Bâtiment actuel	C4	Ecart (point)
R3pièce6	-0.65	-0.33	+0.32
R3pièce5	-1.17	-1.01	+0.16
R1pièce4	-1.26	-1.23	+0.03
R1pièce3	-1.48	-1.42	+0.06
RDCpièce2	-2.96	-2.96	+0.00
RDCpièce1	-2.97	-2.98	-0.01

Tableau 52 : Comparaison des Δ Indice PMV dans la combinaison C4 (point)

Si la combinaison C4 permet une légère amélioration énergétique (8.88 MWh/an au lieu de 8.75), les résultats en termes de confort sont globalement négatifs.

Les écarts négatifs observés sur tous les indicateurs traduisent une dégradation du confort thermique dans toutes les pièces. Ce recul est particulièrement marquant dans la pièce 6, directement sous la toiture marchable, où la diminution de température est deux fois moins importante qu'avec le bâtiment actuel (-1.02 °C au lieu de -2.04°C). Le nombre d'heures d'inconforts évitées diminue fortement également : seulement 24 h/an avec C4 contre 436.5 h/an, soit une perte de 412.5 heures. Ces résultats confirment l'effet déjà observé dans le scénario S7 (isolation seule). L'isolation empêche la chaleur de partir, et sans stratégie de dissipation efficace (modification du partitionnement intérieur et mise en place de ventilation traversante par exemple), elle s'accumule dans les étages, dégradant le confort. Même au rez-de-chaussée, les gains de confort sont moindres : jusqu'à 7 heures de confort en moins et un PMV qui stagne voire se dégrade légèrement.

En résumé, la combinaison C4 ne peut pas être considérée comme pertinente ici. Elle illustre parfaitement que l'amélioration technique de l'enveloppe ne garantit pas un gain de confort dans les climats tropicaux, et que toute intervention doit être pensée dans une logique d'équilibre global entre protection, dissipation et renouvellement d'air.

6.2.3.2. Combinaison bâtiment actuel plus pergola C5

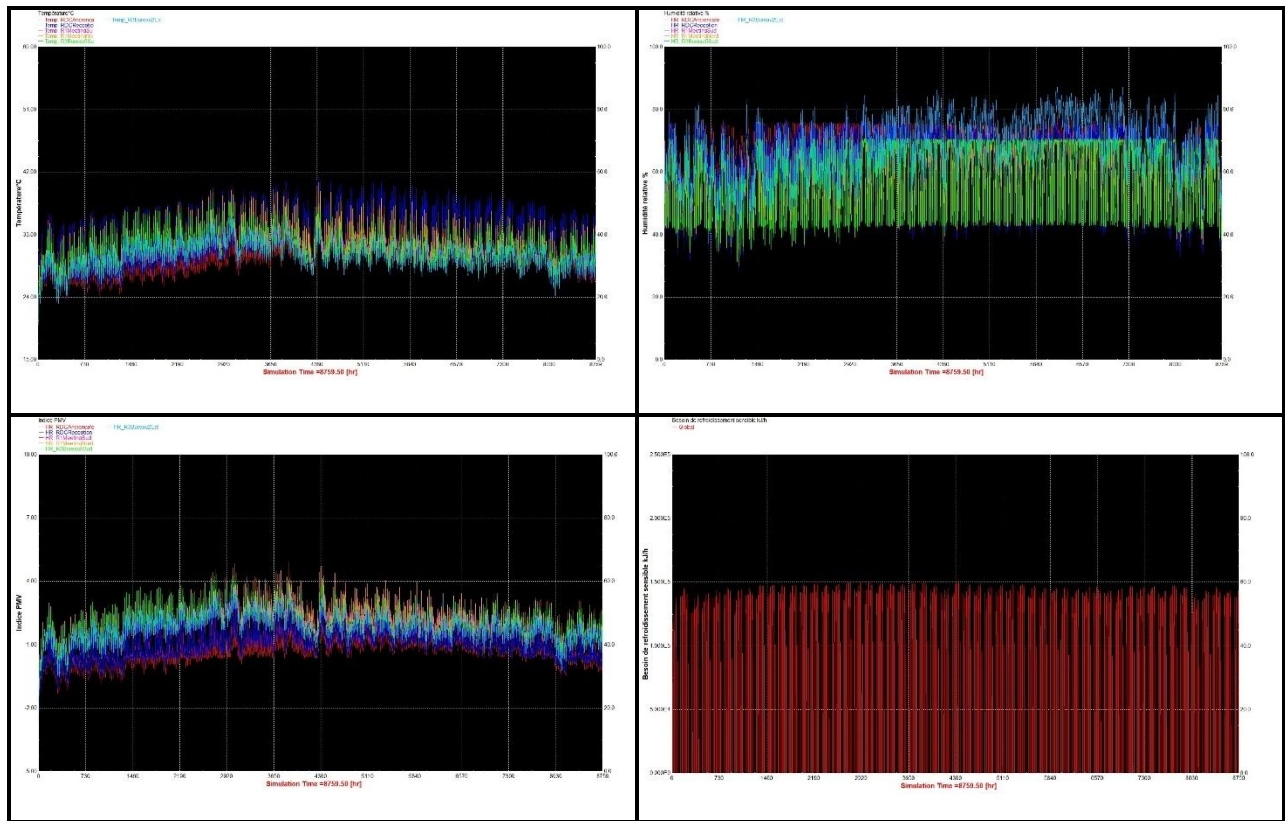


Figure 76 : Résultats annuels de température, d'humidité relative, de l'indice PMV et du besoin de refroidissement sensible pour la combinaison C5

Critère de comparaison	RDCpièce1	RDCpièce2	R1pièce3	R1pièce4	R3pièce5	R3pièce6
Δ Température (°C)	-6.70	-6.68	-4.69	-3.97	-3.65	-2.85
Δ Humidité relative (%)	+16.99	+16.55	+12.83	+9.39	+6.93	+10.00
Δ Indice PMV (point)	-2.98	-2.98	-1.51	-1.28	-1.19	-0.90
Heures de confort supplémentaires (h/an)	464	437.5	300	317.5	374.5	741.5
Δ Refroidissement (MWh)	-9.22					

Tableau 53 : Comparaison des résultats par pièce de la combinaison C5

Représentant une combinaison prospective, elle est comparée aux résultats obtenus pour le Dreamplex rénové, tel qu'il existe actuellement.

Pièce	Bâtiment actuel	C5	Ecart (h/an)
R3pièce6	436.5	741.5	+305
R3pièce5	356.5	374.5	+18
R1pièce4	305.5	317.5	+12.0
R1pièce3	278.5	300	+21.5
RDCpièce2	432.5	437.5	+5.0
RDCpièce1	463.5	464	+0.5

Tableau 54 : Comparaison des heures de confort supplémentaires dans la combinaison C5 (h/an)

Pièce	Bâtiment actuel	C5	Ecart (°C)
R3pièce6	-2.04	-2.85	-0.81
R3pièce5	-3.59	-3.65	-0.06
R1pièce4	-3.91	-3.97	-0.06
R1pièce3	-4.59	-4.69	-0.10
RDCpièce2	-6.66	-6.68	-0.02
RDCpièce1	-6.69	-6.70	-0.01

Tableau 55 : Comparaison des Δ Température dans la combinaison C5 (°C)

Pièce	Bâtiment actuel	C5	Ecart (point)
R3pièce6	-0.65	-0.90	-0.25
R3pièce5	-1.17	-1.19	-0.02
R1pièce4	-1.26	-1.28	-0.02
R1pièce3	-1.48	-1.51	-0.03
RDCpièce2	-2.96	-2.98	-0.02
RDCpièce1	-2.97	-2.98	-0.01

Tableau 56 : Comparaison des Δ Indice PMV dans la combinaison C5 (point)

Les résultats obtenus sont nettement positifs sur tous les indicateurs, dans l'ensemble des pièces. Le nombre d'heures de confort annuel augmente dans toutes les zones, avec des gains particulièrement marqués à l'étage supérieur (R3pièce 6) : +305 heures par rapport au bâtiment actuel. Les températures intérieures sont en baisse, de 0.81 °C sous la toiture et 0.01 à 0.10 °C dans les niveaux inférieurs. Les indices PMV s'améliorent eux aussi dans toutes les pièces, jusqu'à -0.25 points dans la pièce 6, indiquant une perception thermique plus confortable.

Ces performances dépassent systématiquement celles du bâtiment rénové actuel, que ce soit au RDC, aux étages ou sous la toiture. Contrairement à l'effet négatif observé avec l'isolation en plus (C4), la pergola ne piège pas la chaleur et agit comme un dispositif passif équilibré.

Côté énergétique, la combinaison C5 affiche également le meilleur score parmi les deux combinaisons prospectives, avec 9.22 MWh/an de besoin en énergie de refroidissement sensible évité, soit un gain supplémentaire notable par rapport à la situation actuelle.

En résumé, C5 montre que des stratégies simples et bien ciblées peuvent produire des résultats thermiques très convaincants, supérieurs à ceux de combinaisons plus coûteuses. Dans un contexte tropical, la priorité doit être donnée à la réduction des apports solaires directs sans enfermement thermique. La pergola remplit cet objectif avec efficacité et peut être recommandée comme intervention prioritaire pour renforcer le confort de ce bâtiment.

6.2.4. Synthèse des combinaisons

Les combinaisons testées ont permis d'explorer différents types d'interactions entre stratégies bioclimatiques dans une optique d'optimisation du confort thermique au Dreamplex. Leur comparaison révèle plusieurs enseignements :

C1 (ventilation naturelle + ventilation mécanique) au rez-de-chaussée :

- Résultats : Amélioration marquée du confort thermique
- Analyse : La ventilation mécanique est responsable de la majorité des bénéfices. La ventilation naturelle ne contribue que dans les zones basses.
- Conclusion : Légère complémentarité mais pas de synergie marquée. Intéressant pour une gestion adaptative selon les conditions climatiques.

C2 (ventilation naturelle + terrasse végétalisée) au rez-de-chaussée :

- Résultats : Effets modérés mais cohérents en termes de localisation.
- Analyse : La terrasse végétalisée (S1) domine largement aux étages mais au RDC la contribution est partagée avec une domination de la ventilation naturelle.
- Conclusion : Complémentarité spatiale et d'effet. La combinaison dépasse les effets isolés pour le confort, ce qui est cohérent avec le fait que le microclimat influe peu sur le comportement thermique d'un bâtiment fermé à proximité. Une solution passive à faible coût technologique et cohérente.

C3 (façade double peau + protections solaires) :

- Résultats : Très bons gains thermiques dans toutes les pièces, en particulier aux étages.
- Analyse : Les protections solaires (S5) représentent 60 à 95% des effets. La double peau en bambou (S4) renforce les effets thermiques selon l'orientation et la hauteur.
- Conclusion : Bonne synergie entre ombrage ponctuel et filtration du rayonnement. Recommandée dans une stratégie de maîtrise solaire complète. Les économies énergétiques sont aussi particulièrement importantes.

C4 (bâtiment rénové + isolation + pergola) :

- Résultats : Moins performant que le bâtiment rénové, voire contre-productif, surtout sous toiture.
- Analyse : L'isolation piège la chaleur sans voie d'évacuation. La pergola n'arrive pas à compenser cet effet.
- Conclusion : Stratégie déséquilibrée et à éviter. Montre les limites d'une approche non globale et trop technique en climat tropical.

C5 (pergola) :

- Résultats : Meilleures performances globales.
- Analyse : La pergola réduit fortement les apports solaires sans enfermer la chaleur. Elle améliore le confort à tous les niveaux, mais très fortement sous toiture.
- Conclusion : Stratégie simple et prioritaire, offre le meilleur rapport efficacité/coût pour des problèmes de surchauffe sous la toiture.

6.3. Analyse cumulative

Suite à l'évaluation individuelle des stratégies bioclimatiques (S1 à S7) et à l'étude de combinaisons ciblées (C1 à C5), cette section propose une analyse cumulative des résultats. L'objectif est d'identifier le point à partir duquel les gains deviennent marginaux, permettant ainsi d'identifier la combinaison optimale sans surinvestissement inutile. L'analyse s'appuiera spécifiquement sur le cas du Dreamplex, en prenant en considération les résultats précédents ainsi que ses besoins spécifiques en termes de performance thermique.

6.3.1. Ordre de priorité

Pour réaliser une analyse cumulative cohérente, un ordre d'intégration des stratégies bioclimatiques a été défini en fonction de leur efficacité et des interactions observées dans les combinaisons précédentes, de leur complémentarité spatiale et de leur faisabilité techniques et économiques, en se basant sur les résultats d'un rapport de l'ADEME sur l'adaptation des bâtiments au changement climatiques (ADEME, 2023).

Ce bâtiment rencontre des contraintes thermiques significatives au niveau des étages supérieurs, en particulier sous la toiture, ainsi qu'une grande diversité d'occupations, allant des bureaux individuels aux espaces ouverts. Dans ce cadre, il est primordial de donner la priorité à des stratégies efficaces et appropriées à ces divers usages.

Rang	Stratégie	Motifs du classement
1	Protections solaires (S5)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Excellent impact global sur le confort thermique (jusqu'à 248 h/an évitées) ✓ Domination dans la combinaison C3 et synergie démontrée avec la double peau ✓ Très bon rendement énergétique (4.57 MWh/an) + Mise en œuvre simple, peu coûteuse, adaptable aux façades existantes
2	Ventilation mécanique (S3)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amélioration significative du confort perçu (mais localisée) ✓ Très bons résultats PMV et heures d'inconfort évitées (jusqu'à 233 h) ✓ Stratégie dominante dans C1 (85 à 97% de l'effet) + Efficace pour un usage dans les espaces communs ou peu climatisés
3	Double peau (S4)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Résultats modérés seuls mais forte synergie avec S5 en C3 ✓ Effets réguliers, particulièrement pour les étages exposés + Matériau local, durable et valeur architecturale
4	Pergola (S6)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Très bon effet local (sous la toiture) + Pertinent dans le cas du DREAMPLEX selon C5 + Peut améliorer l'usage du rooftop en plus de réduire les gains solaires ⚠ Effet spatialement limité à l'étage supérieur
5	Ventilation naturelle (S2)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bon effet dans la zone d'action - Faible performance à l'échelle du bâtiment ⚠ Dépend fortement de la configuration des ouvertures, de la météo et de l'usage
6	Terrasse végétalisée (S1)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Réduction modérée de l'inconfort au RDC, meilleur en combinaison (C2) - Faible performance seule + Atout esthétique, bénéfice écologique et contribue à l'infiltration des eaux de pluie
7	Isolation toiture (S7)	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Effets négatifs constatés (-119 h de confort, surchauffe) ⚠ À éviter seule sans protection solaire ou ventilation adaptée

Tableau 57 : Ordre de priorité des stratégies individuelles pour la réalisation de l'analyse cumulative

Pour cela, deux indicateurs principaux sont retenus : le total des heures de confort pour l'intégralité des 6 pièces de l'étude et les besoins annuels en énergie de refroidissement sensible. Ils facilitent la synthèse en prenant en considération à la fois le confort des utilisateurs et l'efficacité énergétique. Les heures de confort sont un indicateur direct de l'amélioration du confort thermique, prenant en compte les fluctuations de température et d'humidité à travers toutes les pièces. Calculer la moyenne sur toutes les pièces choisies permet d'éviter un biais lié à des améliorations ponctuelles dans certaines zones. Le pourcentage des heures d'occupation réelles du bâtiment sera aussi calculé. En parallèle, la demande en énergie de refroidissement constitue un indicateur objectif de la performance énergétique, essentielle dans un contexte de sobriété énergétique.

6.3.2. Résultats de l'analyse cumulative

Pour cette analyse cumulative, les profils d'occupation n'étant pas généralisables à l'ensemble du bâtiment ni à l'ensemble des pièces, un focus sur les 6 zones d'étude, considérées comme représentatives, sera à nouveau réalisé.

	S5	+S3	+S4	+S2	+S6	+S1	+S7
R3Pièce6	766	823	980	1486	1494	1753	318
R3Pièce5	354	380	548	576	577	792	456
R1Pièce4	257	466	602	622	620	690	631
R1Pièce3	123	440	607	649	648	632	524
RDCPièce2	214	1046	1092	1098	1110	907	883
RDCPièce1	167	1196	1235	1240	1246	946	940

Tableau 58 : Pas de temps valide pour chaque pièce d'étude et à chaque étape de l'analyse cumulative

Etape	Stratégies cumulées	Nombre d'heures de confort annuel (h/an) – Sans climatisation	Besoin en énergie de refroidissement (MWh/an) – Avec climatisation
0	Référence	225 (1.2 %)	196.99 (100 %)
1	+ S5 – Protections solaires	940.5 (5.1 %)	192.42 (97.7 %)
2	+ S3 – Ventilation mécanique	2175.5 (11.8 %)	191.96 (97.4 %)
3	+ S4 – Double peau	2532 (13.7 %)	189.85 (96.4 %)
4	+ S6 – Pergola	2835.5 (15.3 %)	189.43 (96.2 %)
5	+ S2 – Ventilation naturelle	2847.5 (15.4 %)	189.40 (96.2 %)
6	+ S1 – Terrasse végétalisée	2860 (15.5 %)	187.77 (95.3 %)
7	+ S7 – Isolation toiture	1876 (10.2 %)	188.11 (95.5 %)

Tableau 59 : Résultats de l'analyse cumulative (somme des 6 pièces d'étude)

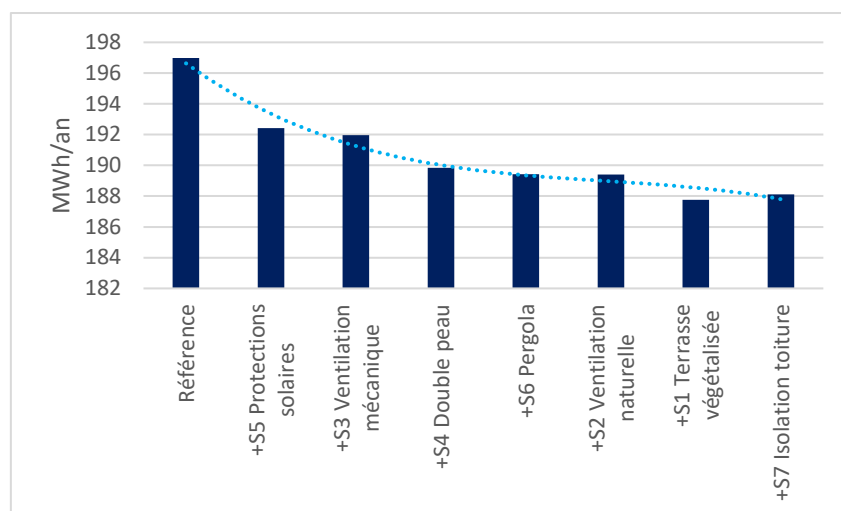


Tableau 60 : Représentation du besoin en énergie de refroidissement sensible annuel (MWh/an)

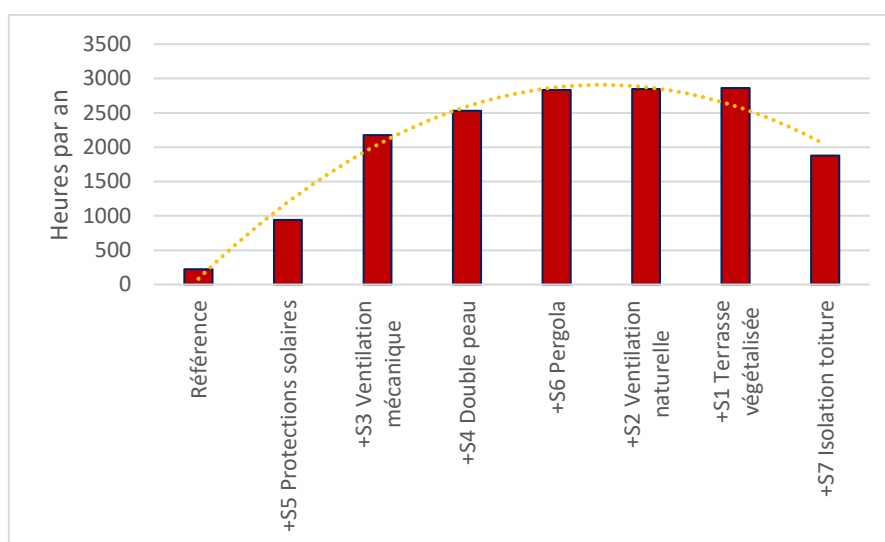


Tableau 61 : Représentation de l'évolution du nombre d'heures de confort annuel (h/an)

6.3.3. Synthèse de l'analyse cumulative

- L'ajout des protections solaires (S5) permet un premier saut significatif, avec 940.5 heures de confort sur l'année (soit 5.1 % des heures d'occupation annuelle) et une réduction notable de la consommation énergétique.
- La ventilation mécanique (S3) amplifie fortement ce gain (jusqu'à 2175.5 h), ce qui représente 11.8 % des heures d'occupation annuelle.
- Les stratégies suivantes (S4, S6) continuent d'améliorer les performances, mais avec des gains progressivement moindres. L'ajout de la double peau n'apporte "que" 356,5 heures supplémentaires. Lors de ces étapes, le pourcentage des heures d'occupation annuel passe à 13.7 % puis 15.3 %. A ce stade, le plateau de performances est presque atteint avec 2835.5 h/an.
- Les ajouts de la ventilation naturelle (S2) et de la terrasse végétalisée (S1) au rez-de-chaussée n'apportent logiquement qu'un gain marginal à l'ensemble du bâtiment (24.5 heures au total), faisant passer le pourcentage à 15.4 % puis 15.5 %. Les besoins de refroidissement continuent cependant de diminuer.
- L'isolation de la toiture (S7), entraîne finalement un recul du confort global (10.2 % des heures d'occupation annuelle) et augmente les besoins en énergie de refroidissement jusqu'à 188.11 MWh/an.

En résumé, l'analyse cumulative démontre qu'au-delà des quatre stratégies combinées (protections solaires, ventilation mécanique, double peau et pergola), les gains en confort deviennent marginaux. Ces solutions permettent déjà d'atteindre plus de 15 % d'heures de confort annuel (sans climatisation), tout en réduisant les besoins en refroidissement de 3.8%. Ainsi, ce seuil représente l'équilibre optimal.

6.4. Synthèse de la discussion

Ce travail de recherche visait à évaluer l'impact de stratégies bioclimatiques appliquées à un bâtiment de bureaux en climat chaud et humide, en prenant pour étude de cas le Dreamplex Ngo Quang Huy à Ho Chi Minh Ville. A travers des simulations thermiques et des relevés sur site, cette section souhaite apporter des réponses aux sous-problématiques soulevées :

1. Quels bénéfices ces stratégies apportent-elles en termes de confort thermique pour les occupants ?
2. Quelle proportion de l'année peut être qualifiée de confortable thermiquement en fonction des stratégies mises en œuvre ?
3. Quelle est la demande en énergie de refroidissement associée à chaque scénario ?
4. Est-il possible, avec un investissement limité, d'améliorer significativement le confort thermique ? Quelles sont alors les stratégies les plus pertinentes ?

6.4.1. Bénéfices des stratégies bioclimatiques sur le confort thermique

L'analyse détaillée des scénarios individuels et combinés révèle l'influence des stratégies bioclimatiques sur la performance thermique du Dreamplex. L'évaluation a été réalisée en se basant sur quatre indicateurs complémentaires : la température intérieure, l'humidité relative, l'indice PMV (Predicted Mean Vote) et le nombre d'heures de confort par an (le tout hors climatisation). Ces indicateurs permettent d'appréhender non seulement la réduction des contraintes thermiques, mais également la perception du confort par les usagers.

Les résultats indiquent que certaines stratégies, telles que l'utilisation de protections solaires (S5) ou la mise en place d'une ventilation mécanique (S3), entraînent des améliorations significatives de manière isolée. Par exemple, l'application de protections solaires a entraîné une diminution de la température pouvant atteindre 2,54 °C dans les pièces les plus exposées, tout en offrant plus de 240 heures de confort supplémentaire par an. D'autres stratégies telles que l'utilisation d'une double peau en bambou (S4) ou l'installation d'une pergola sur le toit (S6) ont montré une grande efficacité lorsqu'elles sont combinées, renforçant les effets globaux.

En règle générale, les effets sont plus prononcés dans les pièces les plus exposées à un ensoleillement direct, telles que les façades ou les toitures, ce qui souligne l'importance d'une réponse ciblée en fonction de l'orientation. Les résultats concordent également avec les caractéristiques spatiales particulières du Dreamplex, telles que le côté traversant du RDC, la répartition verticale et l'usage distinct des espaces (bureaux individuels ou espaces communs).

Enfin, l'étude met en évidence que le confort thermique n'est pas seulement influencé par la diminution des températures, mais également par les mouvements de l'air et le ressenti global (PMV). Les stratégies actives telles que la ventilation mécanique, bien que peu influentes sur la température absolue, ont un impact significatif sur la température ressentie et sur l'indice PMV, ce qui en fait des leviers importants, en particulier dans les zones intérieures naturellement peu ventilées.

6.4.2. Proportion annuelle de confort thermique atteignable selon les stratégies

L'un des aspects importants de cette recherche réside dans la mesure de la période de l'année pendant laquelle les espaces de bureau peuvent être jugés comme étant thermiquement confortables, sans nécessiter l'utilisation systématique de la climatisation. Cette évaluation s'appuie sur des études de terrain menées au Vietnam et en Asie du Sud-Est, et vise à quantifier le nombre d'heures de confort supplémentaires par rapport au scénario de référence.

Le bâtiment actuel, dans son état avant rénovation, affiche un faible niveau de confort thermique, avec seulement 225 heures de confort par an, sans recours à la climatisation (soit 1.2 % des heures d'occupation). Dès la mise en œuvre d'une première stratégie, telle que l'installation de protections solaires (S5), une amélioration significative est constatée : environ 5 % du nombre total d'heures d'occupation annuelles deviennent confortables. L'ajout progressif permet d'atteindre jusqu'à 2860 heures de confort sur les 18 474 possibles, ce qui représente 15.5 % de l'année. Ce nombre reste modeste, mais il met en évidence la capacité de l'approche bioclimatique dans un contexte tropical particulièrement contraignant.

L'analyse cumulative révèle également une diminution progressive des gains : tandis que les premières stratégies mises en place entraînent une augmentation significative du nombre d'heures confortables, les ajouts ultérieurs génèrent des bénéfices plus modestes, ce qui suggère l'existence d'un seuil au-delà duquel les interventions supplémentaires deviennent peu efficaces. Par exemple, l'intégration de la ventilation naturelle (S2) à la terrasse végétalisée (S1) située après la pergola (S6) n'entraîne qu'une augmentation de moins de 25 heures par rapport aux 2800 heures déjà accumulées.

Cette analyse permet d'identifier une combinaison optimale qui assurerait une amélioration significative du confort sans recourir à toutes les stratégies envisagées. Elle met en évidence que, dans un bâtiment à usage mixte tel que le Dreamplex, la performance bioclimatique est conditionnée par une combinaison d'interventions ciblées, adaptées à l'orientation, à l'utilisation des espaces et aux possibilités de ventilation naturelle.

6.4.3. Evolution de la demande en énergie de refroidissement selon les scénarios

Un autre aspect évalué dans cette étude concerne la diminution des besoins en énergie pour le refroidissement sensible, un paramètre qui permet d'évaluer les économies d'énergie potentielles.

Le scénario de référence affiche une demande en refroidissement sensible de 196.99 MWh/an, ce qui témoigne du fort besoin d'utilisation des systèmes de climatisation pour réguler la température à un niveau confortable dans les pièces. Dès l'installation des dispositifs de protection solaire (S5), cette demande diminue de façon non négligeable (-4.57 MWh/an). L'ajout successif des autres stratégies conduit à une diminution graduelle, bien que de moins en moins significative. La combinaison cumulative optimale permet d'atteindre une diminution de 9.22 MWh/an, ce qui représente une économie relative d'environ 4.7 % par rapport à la situation de départ.

Les économies d'énergie obtenues à travers la simulation apparaissent relativement faibles. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce résultat. Tout d'abord, le modèle semble sous-estimer la consommation réelle des climatiseurs, probablement en raison d'un paramétrage incomplet ou idéalisé du système. Ensuite, il convient de souligner que l'efficacité des stratégies bioclimatiques concernant les besoins en énergie dépend fortement de la répartition des unités de climatisation dans le bâtiment. Les deux espaces communs du RDC, équipés de seulement deux climatiseurs, concentrent une partie importante des mesures testées (végétalisation, ventilation naturelle et mécanique). Leur impact sur la consommation globale est donc limité, puisque ce sont les étages qui concentrent la majorité des appareils, avec au moins une unité par bureau. Ainsi, les valeurs modestes obtenues ne traduisent pas une inefficacité des mesures étudiées, mais reflètent à la fois les limites du modèle de simulation et le caractère localisé ou partiel de certaines interventions.

Cette diminution, bien que faible, doit aussi être interprétée à l'échelle d'un usage constant, sur plusieurs années et dans un contexte de hausse des prix de l'énergie. Elle est aussi particulièrement pertinente lorsqu'elle est croisée avec les données de confort thermique. Une mesure telle que l'isolation de la toiture (S7) peut entraîner une diminution de la consommation énergétique, mais en réalité, elle entraîne aussi une détérioration du confort thermique (hausse des températures et diminution du nombre d'heures confortables). Cela met en évidence l'importance de ne pas séparer les performances thermiques perçues des consommations énergétiques.

De manière générale, les stratégies examinées ne suffisent pas, seules, à éliminer l'utilisation de la climatisation, mais elles représentent un moyen d'améliorer l'efficacité énergétique et permettent de réduire les pics de consommation, en accord avec les défis contemporains et les principes de construction durable bioclimatique.

6.4.4. Identification des stratégies les plus efficaces et pertinentes à coût maîtrisé

L'un des objectifs principaux de cette étude était d'évaluer la possibilité d'améliorer de manière significative le confort thermique dans un bâtiment de bureaux existant en classant les interventions les plus efficaces en fonction de leur impact thermique, énergétique et de leur faisabilité.

L'analyse cumulative réalisée dans la dernière partie de la discussion a permis d'analyser les impacts de chaque stratégie ajoutée de manière successive. Elle souligne un phénomène clair de rendement décroissant : les premières interventions (protections solaires, ventilation mécanique et double peau) permettent de couvrir plus de 80 % des gains en heures de confort obtenus dans le scénario cumulatif final.

Ces stratégies se distinguent donc comme les principaux leviers à activer, d'autant qu'elles présentent une compatibilité spatiale forte (s'appliquent à plusieurs zones du bâtiment), une simplicité de mise en œuvre (du moins pour S3 et S5) et une complémentarité démontrée dans les combinaisons testées (C1 et C3).

En revanche, certaines solutions telles que l'isolation de la toiture (S7) peuvent s'avérer inefficaces dans un climat tropical si elles ne sont pas associées à une stratégie efficace de dissipation de la chaleur. D'autres éléments tels que la terrasse végétalisée (S1) ou la ventilation naturelle (S2) ont un impact plus limité et localisé, mais ils peuvent être incorporés de manière complémentaire dans une approche paysagère ou architecturale globale.

Enfin, la combinaison prospective C5 (pergola seule) montre qu'une approche ciblée peut se révéler plus efficace que des combinaisons plus complexes et onéreuses. Cela incite à adopter une approche pragmatique basée sur une analyse précise des conditions climatiques locales, de l'usage du bâtiment et des potentialités architecturales.

7. Conclusions

7.1. Apports

Au-delà de la réponse aux problématiques précédentes, ce travail présente plusieurs apports sur le plan méthodologique et sur le plan opérationnel.

Dans un contexte où les références locales sont rares et hétérogènes, ce mémoire propose des données quantitatives obtenues à partir d'une modélisation dynamique calibrée avec des relevés sur site. Les indicateurs obtenus fournissent donc une référence locale pour le cas des bureaux, utile à la fois pour la recherche et pour les concepteurs. Cette étude participe ainsi à combler une lacune importante dans la littérature concernant le contexte vietnamien.

La méthodologie mise en place, qui combine des mesures sur le terrain, une modélisation thermique calibrée et une analyse multicritère, peut également être reproduite. Elle peut être transposée à d'autres bâtiments similaires, tant pour l'analyse d'existant que pour l'aide à la conception de projets neufs. Ce processus permet également un pilotage progressif et raisonné des interventions.

Enfin, ce mémoire présente divers résultats graphiques et synthétiques qui peuvent être exploités pour aider à la prise de décision :

- Tableaux comparatifs pour chaque stratégie,
- Informations spatiales des performances selon les zones du bâtiment,
- Classement des stratégies par ordre d'efficacité avec justification,
- Courbe cumulative illustrant l'évolution des gains selon les étapes d'intervention.

7.2. Limites

Comme toute recherche scientifique, cette étude présente plusieurs limites qu'il est important de mettre en évidence pour en déterminer la portée et guider les futures recherches.

En premier lieu, la durée limitée de la campagne de mesures constitue une limite notable. Les capteurs ont été positionnés pour plusieurs semaines, cette période étant suffisante dans le cadre de ce mémoire et de la norme. Cependant, des relevés annuels permettraient de capturer l'ensemble des variations saisonnières et climatiques propres au climat tropical de Ho Chi Minh Ville. De plus, le vol du capteur numéro 6 a limité la couverture spatiale prévue.

Une autre contrainte à mentionner est la précision des capteurs utilisés. Selon la norme ASHRAE 55, une précision de ± 0.2 °C est exigée pour les mesures de température de l'air (ASHRAE, 2020). Les capteurs utilisés dans cette étude affichaient une précision de ± 0.5 °C, ce qui implique une analyse prudente de leurs résultats. Ainsi, le processus de calibration s'est avéré être particulièrement important.

Par ailleurs, l'enquête de satisfaction thermique réalisée n'a pas atteint un taux de réponse suffisant en raison d'une diffusion limitée par l'équipe de gestion du Dreamplex. Cette faible participation ne permet pas de confirmer les résultats à travers une analyse subjective des utilisateurs.

En ce qui concerne l'outil de simulation, plusieurs hypothèses ont été nécessaires pour élaborer le modèle et pallier les lacunes du logiciel. Ensuite, les résultats ne couvrent pas l'ensemble des zones du bâtiment mais uniquement des espaces jugés représentatifs, choisis pour leur diversité d'exposition, d'usage et de position dans le Dreamplex.

Enfin, la principale limite de cette étude réside dans l'absence de modèle de confort thermique approprié pour le cas étudié. Le Dreamplex est un bureau caractérisé par un fonctionnement en mode mixte. Dans ce cadre, aucun des modèles existants n'est entièrement applicable ou n'a été validé pour le climat tropical. Ainsi, l'évaluation du confort s'est basée sur une définition manuelle de plage et de seuils de tolérance, s'appuyant sur la littérature scientifique. Malgré le fait qu'elle permette une comparaison rigoureuse entre scénarios, cette approche reste fondée sur des hypothèses et souligne la nécessité de développer à l'avenir des modèles de confort adaptés aux bâtiments tertiaires du Vietnam, en particulier ceux fonctionnant en mode mixte.

7.3. Perspectives

Plusieurs pistes de recherche et d'application peuvent être envisagées à la suite de cette étude, dans le but d'approfondir les résultats obtenus et de généraliser à d'autres contextes.

Une première orientation serait d'étendre cette méthodologie à d'autres partitionnements de notre cas d'étude ou à d'autres typologies de bâtiments, comme les logements collectifs, écoles, hôpitaux ou commerces. Étant également confrontés aux enjeux du confort thermique en climat tropical, cela permettrait d'enrichir les recommandations selon les usages, les horaires d'occupation ou des attentes thermiques différentes.

Une modélisation plus poussée des systèmes de climatisation serait aussi une perspective intéressante. L'usage du prix réel de l'électricité au Vietnam et son évolution future permettrait de comparer les coûts d'investissement des solutions bioclimatiques aux économies d'énergie réalisées sur le long terme.

Un autre axe de développement consisterait à évaluer les retours des occupants sur le long terme, en croisant les données de simulation avec des enquêtes de satisfaction régulière et représentative.

Finalement, dans une logique d'aide à la décision, le développement d'un outil interactif serait particulièrement intéressant. Il permettrait de générer automatiquement toutes les combinaisons possibles de stratégies bioclimatiques, en les croisant avec les besoins et les coûts estimés de mise en œuvre. En intégrant une base de données locale (prix des matériaux, main d'œuvre, etc.), cet outil pourrait offrir aux concepteurs une vision claire des investissements les plus efficaces selon différents types de travaux et de budget.

7.4. Réflexion

Face aux perturbations climatiques croissantes et à l'urbanisation rapide en Asie du Sud-Est, les bâtiments de bureaux doivent relever un défi majeur : garantir un niveau de confort thermique optimal tout en réduisant leur consommation énergétique. L'utilisation généralisée de la climatisation, largement répandue dans des pays tels que le Vietnam, crée une dépendance significative et contribue à l'aggravation du phénomène de réchauffement climatique.

A son niveau, ce mémoire s'inscrit dans une réflexion portant sur le rôle stratégique du bioclimatisme dans la transition énergétique des bâtiments. A travers l'étude du DREAMPLEX Ngo Quang Huy à Ho Chi Minh Ville, il montre qu'une approche architecturale fondée sur les conditions climatiques locales et l'exploitation de ressources passives peut générer des gains de confort réels et réduire le besoin d'énergie pour le refroidissement, même dans des bâtiments existants, partiellement climatisés.

Au-delà des résultats chiffrés, ce travail propose une méthodologie reproductible, applicable à d'autres bâtiments similaires et fournit des informations d'aide à la décision. Ce mémoire participe, par la même occasion à la construction de références locales, encore rares et rappelle que le bioclimatisme ne constitue pas une alternative marginale, mais une composante essentielle de l'architecture durable en climat tropical.

8. Références

8.1. Bibliographie

- A+BE, Architecture And The Built Environment. (2021, 17 février). A+BE | Architecture and the Built Environment, No. 02 (2021): Housing Refurbishment for Energy Efficiency and Comfort. A+BE | Architecture and the Built Environment. <https://doi.org/10.7480/ABE.2021.02>
- Abdel, H. (2020, 27 septembre). *A Look into Vietnamese Vernacular Construction: 1+1>2 Architect's Rural Community Houses*. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/948452/a-look-into-vietnamese-vernacular-construction-1-plus-1-2-architects-rural-community-houses>
- Abdou, I. O. (2020). Études de l'amélioration de la performance énergétique et de stratégies de conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide.
- ADEME. (2019). Le bâtiment en climat tropical - Un réseau au service de la conception durable. <https://www.vegetal-e.com/fr/fiche/document-303/2019-le-batiment-en-climat-tropical.html>
- ADEME. (2023). *Résilience; Adaptation des bâtiments au changement climatique*.
- Al Horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A. et Elsarrag, E. (2016). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.03.006>
- Al-Rikabi, I. J., Karam, J., Alsaad, H., Ghali, K., Ghaddar, N. et Voelker, C. (2024). The impact of mechanical and natural ventilation modes on the spread of indoor airborne contaminants: A review. *Journal of Building Engineering*, 85, 108715. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108715>
- Andreas KARITNIG. (2008). *Comparison of the two Building Simulation Environments TRNSYS and DesignBuilder*.
- ASHRAE. (2014). ASHRAE Guideline 14.
- ASHRAE, A. (2020). ANSI/ASHRAE Standard 55-2020.

- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A. et Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Cahute, D. (2016, 21 septembre). Les maisons traditionnelles rurales au Népal : un patrimoine varié. *Douce Cahute*. <https://maison-monde.com/maisons-traditionnelles-rurales-nepal/>
- Chen, W., Liu, S., Gao, Y., Zhang, H., Arens, E., Zhao, L. et Liu, J. (2018). Experimental and numerical investigations of indoor air movement distribution with an office ceiling fan. *Building and Environment*, 130, 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.016>
- Climat, météo par mois, température moyenne pour Hô Chi Minh Ville (Vietnam)*. (s. d.). Weather Spark. <https://fr.weatherspark.com/y/116950/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-H%C3%B4-Chi-Minh-Ville-Vietnam-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>
- Commission de l'océan Indien. (2020, 21 janvier). GECKO - Guide de l'Eco-Konception. <https://www.commissionoceanindien.org/gecko/>
- Cui, Y., Xie, J., Liu, J. et Xue, P. (2019). Experimental and Theoretical Study on the Heat Transfer Coefficients of Building External Surfaces in the Tropical Island Region. *Applied Sciences*, 9(6), 1063. <https://doi.org/10.3390/app9061063>
- Damiati, S. A., Zaki, S. A., Rijal, H. B. et Wonorahardjo, S. (2016). Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid season. *Building and Environment*, 109, 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.024>
- Dang, H. T. et Pitts, A. (2021). Simultaneous Influences of Temperature and Airflow on Comfort Perceptions in Residential Buildings in Vietnam. *Environmental design*. (1999) ([New ed.]). CIBSE.
- Frampton Kenneth. (1983). Towards a Critical Regionalism: Six Points for an Architecture of Resistance.
- Frontczak, M. et Wargocki, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46(4), 922-937. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>
- Goyal, J. (2023). Passive Strategies for Building Design in Tropical Climates: A Comprehensive Guide.

- Guedes, M. C. et Cantuaria, G. (dir.). (2019). *Bioclimatic Architecture in Warm Climates: A Guide for Best Practices in Africa*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12036-8>
- Hashemi, A. et Khatami, N. (2017). Effects of Solar Shading on Thermal Comfort in Low-income Tropical Housing. *Energy Procedia*, 111, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.025>
- He, Y., Lin, E. S., Zhang, W., Tan, C. L., Tan, P. Y. et Wong, N. H. (2022). Local microclimate above shrub and grass in tropical city: A case study in Singapore. *Urban Climate*, 43, 101142. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101142>
- ISO. (2015). Composants et parois de bâtiments — Résistance thermique et coefficient de transmission thermique — Méthode de calcul DRAFT ISO/DIS 6946.
- Jhamaria, R. (2020, 8 juillet). Vernacular Architecture of Indonesia. *RTF | Rethinking The Future*. <http://www.re-thinkingthefuture.com/rtf-fresh-perspectives/a1232-vernacular-architecture-of-indonesia/>
- Joo Hwa, B. et Boon-Lay, O. (2006). Tropical Sustainable Architecture.
- Kaboré, M. (2015). Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne.
- Kiki, G., Kouchadé, C., Houngan, A., Zannou-Tchoko, S. J. et André, P. (2020). Evaluation of thermal comfort in an office building in the humid tropical climate of Benin. *Building and Environment*, 185, 107277. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107277>
- Kubota, T., Rijal, H. B. et Takaguchi, H. (dir.). (2018a). *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8465-2>
- Kubota, T., Rijal, H. B. et Takaguchi, H. (dir.). (2018b). *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8465-2>
- Lai, F., Zhou, J., Lu, L., Hasanuzzaman, M. et Yuan, Y. (2023). Green building technologies in Southeast Asia: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102946. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102946>

- Latha, P. K., Darshana, Y. et Venugopal, V. (2015). Role of building material in thermal comfort in tropical climates – A review. *Journal of Building Engineering*, 3, 104-113.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.06.003>
- Lawrie, Linda K, et Drury B Crawley. (2022). Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx).
- Le, D. T. K., Tanaka, I., Cho, S. et Mayama, R. (2025). Thermal Comfort in Mixed-Mode Cooled Houses: A Field Study in the Hot-Humid Climate of Danang, Vietnam. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.5167510>
- Le, T. S., Zegowitz, A., Le, C. C., Kunzel, H., Schwede, D., Luu, T. H., Le, T. T. et Nguyen, T. T. (2023). The Development of Energy-Efficient and Sustainable Buildings: A Case Study in Vietnam. *Sustainability*, 15(22), 15921. <https://doi.org/10.3390/su152215921>
- Li, J., Gou, Z. et Cai, S. (2025). BRIDGING THE DEVELOPMENT GAP OF GREEN BUILDING IN SOUTHEAST ASIA: COMPARISON BETWEEN SINGAPORE AND VIETNAM. *Journal of Green Building*, 20(1), 199-220. <https://doi.org/10.3992/jgb.20.1.199>
- Liping, W. et Hien, W. N. (2007). The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Building and Environment*, 42(12), 4006-4015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.027>
- Mees (C.) et Loncour (X.). (2015). *L'étanchéité à l'air des bâtiments*. Buildwise.
<https://www.buildwise.be/fr/publications/notes-d-information-technique/255/>
- Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. (s. d.). *Présentation du Vietnam*. France Diplomatie - Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/dossiers-pays/vietnam/presentation-du-vietnam/>
- Ministry of Construction. (2008). VIETNAM BUILDING CODE REGIONAL AND URBAN PLANNING AND RURAL RESIDENTIAL PLANNING.
- Ministry of Construction. (2010). THÔNG GIÓ - ĐIỀU HÒA KHÔNG KHÍ TIÊU CHUẨN THIẾT KẾ.

- Mishra, A. K. et Ramgopal, M. (2015). An adaptive thermal comfort model for the tropical climatic regions of India (Köppen climate type A). *Building and Environment*, 85, 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.006>
- Nations Unies (dir.). (2014). *Situation de la population mondiale en 2014: rapport concis*. Nations Unies.
- Nguyen, Anh Tuan. (2013). *SUSTAINABLE HOUSING IN VIETNAM: CLIMATE RESPONSIVE DESIGN STRATEGIES TO OPTIMIZE THERMAL COMFORT*.
- Nguyen, Anh Tuan, Singh, M. K. et Reiter, S. (2012). An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia. *Building and Environment*, 56, 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.021>
- Nguyen, A.-T. et Reiter, S. (2014). A climate analysis tool for passive heating and cooling strategies in hot humid climate based on Typical Meteorological Year data sets. *Energy and Buildings*, 68, 756-763. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.050>
- Nguyen, A.T. et Reiter, S. (2017). Bioclimatism in architecture: An evolutionary perspective. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 12(1), 16-29. <https://doi.org/10.2495/dne-v12-n1-16-29>
- Nguyen, A.-T., Tran, Q.-B., Tran, D.-Q. et Reiter, S. (2011). An investigation on climate responsive design strategies of vernacular housing in Vietnam. *Building and Environment*, 46(10), 2088-2106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.019>
- Nguyen, P. A. (2021). *Housing refurbishment for energy efficiency and comfort: toward sustainable housing in Vietnam*. BK Books.
- Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR)*. (s. d.). <https://oscar.wmo.int/surface/#/search/station/stationReportDetails/0-20000-0-48900>
- OCHSENBEIN, H. et Kretz, M. (2020). *Croissance du secteur de la construction au Vietnam depuis 1990*. Ambassade de France au Vietnam. <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/c5a2dc7c-5ca2-4561-a5fe-fda02d7724fe/files/e3f97c66-062f-47e0-a310-784532d36218>
- Peate, I. C. (1976). Eric Mercer: English vernacular houses. A study of traditional farmhouses and cottages. Royal Commission on Historical Monuments England. London: H. M. Stationery Office,

1975. 268 pp., 113 pls., 204 figs. £17.50. *Antiquity*, 50(199-200), 250-251.
<https://doi.org/10.1017/s0003598x00071301>
- Peng, Y. (2016). *The Optical Properties Test on Shading Fabric*. International Conference on Mechanics, Materials and Structural Engineering (ICMMSE 2016), Jeju Island, South-Korea.
<https://doi.org/10.2991/icmmse-16.2016.57>
- Recommendations for the Design of an Energy-Efficient and Indoor Comfortable Office Building in Vietnam. (2019). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3284-5_4
- Rodriguez, C. M. et D'Alessandro, M. (2019). Indoor thermal comfort review: The tropics as the next frontier. *Urban Climate*, 29, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100488>
- Szodrai, F. et Lakatos, Á. (2017). Effect of the air motion on the heat transport behaviour of wall structures. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 8(1), 67-73.
<https://doi.org/10.1556/1848.2017.8.1.10>
- Taing, K. (2020). *Analyse et modélisation des données d'un bâtiment pour l'évaluation de son comportement thermique*.
- Taing, K. (2024, 19 décembre). *Architectural Design Process for a Bioclimatic Building: Study of Methods and Design Strategies for Building Comfort in the Tropical Climate*.
- Taing, K. et Leclercq, P. (2022). Adoption contextuelle des pratiques pédagogiques : entre écosystèmes physique et logiciel, le cas de l'architecture bioclimatique en Asie du sud-est. *SHS Web of Conferences*, 147, 07002. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202214707002>
- Toe, D. H. C. et Kubota, T. (2015). Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot-humid climate of Malaysia. *Solar Energy*, 114, 229-258. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.035>
- Tout au LED. (2022). *Energie Plus Le Site*. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/eclairage3/tout-au-led/>
- TRANSOLAR Energietechnik GmbH. (2021). Manual - Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild.
- Ungureanu, V., Bragança, L., Baniotopoulos, C. et Abdalla, K. M. (dir.). (2024). *4th International Conference « Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience » & Midterm Conference of*

CircularB "Implementation of Circular Economy in the Built Environment". Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7>

United Nations Environment Programme et GlobalABC. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>

VN Découverte. (s. d.). *Carte du Vietnam : 3 régions*. <https://vietnamdecouverte.com/geographie-carte-touristique-vietnam>

Yao, R., Li, B. et Liu, J. (2009). A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment*, 44(10), 2089-2096. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.014>

Zaraa Allah, M., Mohamed Kamar, H., Hariri, A. et Wong, K. Y. (2023). Investigating adaptive thermal comfort in office settings: A case study in Johor Bahru, Malaysia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100466. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100466>