

Mémoire

Auteur : Simonis, Nathalie

Promoteur(s) : Abrahams, Pauline; 2540

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en énergies renouvelables et bâtiments durables

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18133>

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.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UNI.LU – Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication

Utilisation d'un modèle calibré de simulation TRNSYS pour analyser les effets d'un mur végétal intérieur sur le confort thermique d'un bureau dans le contexte du changement climatique



Nathalie SIMONIS

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLOMES DE

**MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT – FINALITE ENERGIES
RENOUVELABLES ET BATIMENTS DURABLES (ULIEGE)**

MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FINALITE ENERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

REDIGE SOUS LA DIRECTION DE : Pauline ABRAHAMS et Stefan MAAS

COMITE DE LECTURE :
Elisabeth DAVIN
Gratien KIKI
Claudia FALZONE

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.

L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège et/ ou de l'Université du Luxembourg

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : Nathalie Simonis, nathalie.simonis@live.com

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'Université de Liège et plus particulièrement l'équipe du campus d'Arlon. La formation que j'y ai reçue, notamment sur les différents outils liés à la planification et gestion de projets énergies renouvelables, m'ont été d'une très grande utilité pour mener à bien ce travail.

Je tiens ensuite à exprimer toute ma reconnaissance envers mes promoteurs, Madame Pauline Abrahams et Monsieur Stefan Maas, pour leurs conseils avisés pendant la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier le Professeur Philippe André et l'ensemble de l'équipe BEMS pour leurs conseils, leurs réponses à mes questions, leurs efforts pour m'intégrer dans l'équipe, pour leur patience, leur soutien, leurs explications du logiciel TRNSYS, leurs réponses rapides aux mails, et enfin l'équipe SAM pour leur aide précieuse sur l'analyse statistique des données et l'utilisation du logiciel RStudio.

Merci aux entreprises SOUND ECOLOGY et CITA VERDI pour la fourniture et l'installation du mur végétal.

J'adresse aussi un tout grand merci à ma famille pour leur regard éclairant, leurs conseils, l'immense soutien qu'ils m'ont fourni tout au long de mes études, les connaissances qu'ils m'ont transmises et leurs encouragements surtout quand je pensais ne pas y arriver.

MERCI BEAUCOUP!

THANK YOU VERY MUCH!

MUCHAS GRACIAS!

VIELEN DANK!

VILLMOOLS MERCI!

Table des Matières

Remerciements	3
Table des Matières	4
Liste des abréviations	6
Liste des tableaux	8
Liste des figures	9
Résumé	10
Summary	10
Introduction générale	11
État de l’art	12
1. Les murs végétaux intérieurs et extérieurs	12
2. Définition du confort thermique intérieur	19
3. Méthodes de modélisation en simulation et outils de simulation des MV	21
4. Description du projet Green4Indoor - Wallonia	25
5. Le bureau en période de changement climatique	26
Méthodologie	28
1. Informations sur la chambre climatique du Laboratoire Jacques Geelen	29
2. Définition des scénarios	32
3. Prises de mesures/ collecte de données/ Instruments (capteurs)	33
4. Modèle TRNSYS (SketchUp, Simulation Studio, TRNBuild)	33
5. Données météo de Sébastien Doutreloup/ prévisions futures	38
Résultats obtenus	40
1. Température dans la chambre climatique avant et après installation du MV.....	40
2. Taux d’humidité dans la chambre climatique et apports d’humidité par le MV.....	41
3. Échanges thermiques à travers la paroi en régime stationnaire	43
4. Calcul des indices de confort dans la chambre climatique (CBE Thermal Comfort tool, équation de Fanger, Tests occupants)	44
5. Besoins énergétiques de la chambre climatique	48
6. Résultats des simulations TRNSYS.....	49
Discussion	53
1. Interprétation des mesures avant et après le mur végétal	53
2. Évaluation du confort thermique (TRNSYS, équation de Fanger et Test de confort)	53
3. Limites de l’expérience.....	54

Conclusion.....	56
Bibliographie.....	58
Annexes	62
Annexe 1 : Laboratoire Jacques Geelen.....	62
Annexe 2 : Résultats des tests de confort par les 4 occupants.....	68
Annexe 3 : Fiches des plantes du mur végétal	69
Annexe 4 : Questionnaire donné aux occupants de la chambre climatique	79
Annexe 5 : Code de calcul pour la méthode de Fanger.....	81

Liste des abréviations

BEMS = Building Energy Monitoring and Simulation

BuGG = Bundesverband Gebäudegrün E.v. (Association fédérale pour les bâtiments verts)

CBE = Center for the Built Environment (Université de Californie à Berkeley – UC Berkeley)

CC = Chambre Climatique

CCNUCC = Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

COV = Composé organique volatil

DBU = Deutsche Bundesstiftung Umwelt = Fondation fédérale allemande pour l'environnement

EED = Eau Environnement Développement

ESM = Earth System Models

FOG = Bâtiment laboratoire préfabriqué (laboratoire Jacques Geelen)

GW = Green Wall

GHG = Greenhouse Gas

GW = Green Wall

HR / RH = Humidité relative / Relative Humidity

HWE = Heatwave event

IPCC = GIEC Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

LW = Living Wall

LWS = Living Wall System

MAR = Modèle Atmosphérique Régional

MV = Mur Vert/ Mur Végétal

OSB = Oriented Strand Board

PET = Physiological Equivalent Temperature

PMV = Predicted Mean Vote

PPD = Predicted Percentage of Dissatisfied (pourcentage prévisible d'insatisfaits)

SAM = Laboratoire Sensing of Atmospheres and Monitoring

SEGEFA = Service d'Etude en Géographie Economique Fondamentale et Appliquée

SET = Standard Effective Temperature

SP = set point

TMY = Typical Meteorological Year

TU Weihenstephan. Triesdorf : Université des sciences appliquées de Weihenstephan-Triesdorf

UE = Union Européenne

UR = Unité de Recherche

UTCI = Universal Thermal Climate Index

XMY = Extreme Meteorological Year

ZAE Bayern = Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. = Centre bavarois de recherche appliquée en énergie

Liste des tableaux

Tableau 1: Recherches sur les MV intérieurs en Allemagne	16
Tableau 2: Liste des mémoires de l'ULiège sur les MV	18
Tableau 3: Liste des plantes du mur végétal (SOUND ECOLOGY).....	31
Tableau 4: Layer Type Manager (création personnelle).....	34
Tableau 5: Températures dans la chambre climatique et le buffer	41
Tableau 6: Taux d'humidité MIN, MAX et MOYEN dans la chambre climatique et le buffer pour les différents scénarios	43
Tableau 7: Composition des couches de la paroi du laboratoire Jacques Geelen	43
Tableau 8: Calcul du confort thermique	44
Tableau 9: Confort thermique évalué par les occupants en mode hiver (création personnelle)	46
Tableau 10: Confort thermique évalué par les occupants en mode été (création personnelle)	47
Tableau 11: Calcul des coefficients PMV et PPD	48
Tableau 12: Calcul des demandes énergétiques des résistances	49
Tableau 13: Données extrêmes des graphiques de la simulation TRNSYS (création personnelle)	49
Tableau 14: Comparaison des résultats de l'équation de Fanger (création personnelle)	54

Liste des figures

Figure 1: Typologie des murs verts (création personnelle)	12
Figure 2: CBE Thermal Comfort Tool ASHRAE-55 (ASHRAE 2017).....	19
Figure 3 : Schéma du modèle COMSOL Multiphysics (Alvarado-Alvarado, A. 2023)	24
Figure 4: Schéma du Laboratoire Jacques Geelen	30
Figure 5: Système de ventilation	30
Figure 6: Photo du mur végétal intérieur	31
Figure 7: Schéma des différents scénarios (création personnelle)	32
Figure 8: Modèle du Laboratoire Jacques Geelen (création personnelle sur SketchUp)	34
Figure 9: Exemple de composition de couche dans le Layer Type Manager (création personnelle sur TRNBuild)	34
Figure 10: Wall Type Manager (création personnelle sur TRNBuild)	35
Figure 11: Détails de la zone et de l'airnode CHAMBRE_CLIMATIQUE (création personnelle sur TRNBuild)	36
Figure 12: « Heating Type Manager », «Ventilation Type Manager » (création personnelle sur TRNBuild)	36
Figure 13: Schedule Type Manager pour les gains internes de la chambre climatique (création personnelle sur TRNBuild)	37
Figure 14: Importation des données météo de Sébastien Doutreloup.....	38
Figure 15: Modèle Simulation Studio (création Elisabeth Davin).....	39
Figure 16: Températures dans le FOG en été, avec et sans climatisation, avec et sans MV ..	40
Figure 17: Taux d'humidité dans la CC et le buffer en hiver sans MV avec aluminium	42
Figure 18: Taux d'humidité dans la CC et le buffer en hiver avec MV avec aluminium	42
Figure 19: Évaluation du confort thermique par le CBE Thermal Tool en mode été	45
Figure 20: Évaluation du confort thermique par le CBE Thermal Tool en mode hiver	45
Figure 21: Graph 1 - XMY - avec MV	50
Figure 22: Graph 2 - XMY - avec MV - outputs	50
Figure 23: Graph 2 - XMY - avec MV - détaillé.....	51
Figure 24: Graph 2 - XMY - sans MV	51

Résumé

Dans le contexte mondial actuel impliquant crise énergétique, changements climatiques, multiplication des périodes de températures extrêmes, il est urgent de trouver des méthodes alternatives efficaces pour assurer la performance thermique des bâtiments ainsi que pour réduire la consommation énergétique de ceux-ci. Ce mémoire constitue une contribution à l'amélioration des performances énergétiques et du confort thermique intérieur d'un bureau en incorporant un mur végétal intérieur et s'intègre dans un travail multidisciplinaire intégrant d'autres aspects comme la qualité de l'air intérieur, le confort visuel et l'utilisation des eaux grises pour alimenter le mur végétal.

Ce travail de recherche est basé sur une approche expérimentale et analytique et intègre différents outils comme l'utilisation d'un modèle calibré de simulation TRNSYS y compris dans un contexte de changement climatique, des mesures réelles dans une chambre climatique avant et après installation du mur vert et l'enregistrement des réactions d'utilisateurs placés dans cette chambre climatique.

Les résultats obtenus montrent que les murs verts intérieurs ont un certain impact positif sur le confort thermique des occupants d'un bureau. En été, ils contribuent à réduire la température ambiante en créant un effet de rafraîchissement naturel par évapotranspiration. L'étude souligne également certains défis liés à l'installation, l'utilisation et la gestion des murs verts intérieurs (éclairage, irrigation, entretien des plantes) qu'il importe d'optimiser pour maximiser leurs bénéfices énergétiques, environnementaux et économiques. Des suggestions sont fournies pour des recherches ultérieures et des améliorations à apporter.

Summary

In the current global context involving energy crisis, climate change, multiplication of periods of extreme temperatures, it is urgent to find effective alternative methods to ensure the thermal performance of buildings as well as to reduce their energy consumption. This thesis constitutes a contribution to the improvement of the energy performance and the interior thermal comfort of an office by incorporating an interior green wall and is integrated into a multidisciplinary work integrating other aspects such as the quality of the interior air, the visual comfort and the use of gray water to feed the green wall.

This research work is based on an experimental and analytical approach and integrates various tools such as the use of a calibrated simulation model TRNSYS including in a context of climate change, real measurements in a climatic chamber before and after installation of the green wall and the recording of the reactions of users placed in this climatic chamber.

The results obtained show that interior green walls have a certain positive impact on the thermal comfort of office occupants. In summer, they help reduce the ambient temperature by creating a natural cooling effect through evapotranspiration. The study also highlights certain challenges related to the installation, use and management of interior green walls (lighting, irrigation, plant maintenance) that must be optimized to maximize their energy, environmental and economic benefits. Suggestions are provided for further researches and improvements to be made.

Introduction générale

Dans le contexte mondial actuel, la crise énergétique, les changements climatiques, la hausse des températures et la perte des espaces verts ont conduit à l'apparition de températures inconfortables dans les bâtiments. La structure des bâtiments ne suffit plus à elle seule à assurer le confort thermique de ses occupants. C'est pourquoi, il est nécessaire de trouver des méthodes alternatives efficaces pour assurer la performance thermique des bâtiments ainsi que pour réduire la consommation énergétique de ceux-ci. Ce mémoire s'inscrit dans la recherche visant l'amélioration des performances énergétiques et thermiques des bâtiments en incorporant des murs végétaux intérieurs et extérieurs dans leur conception. Selon un rapport de la Fondation Européenne pour le Climat (European Climate Foundation, 2022), le secteur du bâtiment représenterait 40% de la consommation totale d'énergie de l'Union Européenne et 36% des émissions de CO₂. Afin d'atteindre les objectifs climatiques de l'UE, le secteur du bâtiment devra atteindre 60% de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2030 et se décarboner complètement d'ici 2050.

Au niveau de l'impact sur le confort thermique, il est bien connu que le climat intérieur est particulièrement important pour les personnes, car elles passent la plupart de leur temps dans des bâtiments. La température ambiante et le taux d'humidité sont des facteurs importants pour la qualité de vie, car ils peuvent influencer la qualité du sommeil et la santé.

Ce travail de recherche vise à améliorer la performance énergétique et la qualité du confort thermique intérieur d'un bureau. Pour ce faire, un modèle calibré de simulation TRNSYS est utilisé pour analyser les effets d'un mur végétal intérieur sur le confort thermique d'un bureau dans le contexte du changement climatique. Il s'intègre dans le projet Green4Indoor-Wallonia, une étude scientifique multidisciplinaire menée par des chercheurs et étudiants de l'unité de recherche SPHERES (UR SPHERES) de l'université de Liège, qui vise à mesurer les impacts d'un mur végétal intérieur sur les performances d'un bureau en termes de qualité de l'air intérieur, de confort thermique, de confort visuel et de l'utilisation des eaux grises pour alimenter un mur végétal. Ce projet regroupe les équipes de recherche BEMS (Building Energy Monitoring and Simulation), SAM (Laboratoire Sensing of Atmospheres and Monitoring), EED (Eau Environnement Développement), le SEGEFA (Service d'Étude en Géographie Economique Fondamentale et Appliquée) de la faculté des Sciences de l'ULiège en partenariat avec la société luxembourgeoise Sound Ecology située à Wiltz et la société Cita Verdi (spécialiste des murs et toitures végétalisés à Bruxelles et au Luxembourg) qui ont fourni et installé le mur végétal intérieur.

Dans un premier temps, l'état de l'art sera développé et quelques concepts clés seront définis comme ceux de mur végétal intérieur et de confort thermique intérieur. Ensuite la méthodologie de recherche sera détaillée, suivie des résultats de l'expérimentation en chambre climatique et de la modélisation à l'aide de l'outil de simulation TRNSYS. Enfin, les mesures prises et les modélisations seront analysées pour comparer l'impact du MV sur le confort thermique.

État de l'art

1. Les murs végétaux intérieurs et extérieurs

L'intérêt pour les murs végétaux est apparu depuis plusieurs années et se renforce considérant la forte augmentation des zones urbanisées et l'apparition d'îlots de chaleur. Les surfaces des constructions verticales représentent deux fois la surface au sol des bâtiments (Kohler, 2008). Quand on parle de l'impact de la végétalisation des villes sur la performance thermique d'un bureau, il y a généralement 3 types de végétalisation qui sont considérés : les murs végétaux intérieurs, extérieurs et les toitures végétalisées. Ils ont tous pour but de réduire les effets d'îlot de chaleur dans les villes.

Concernant les murs végétaux, on distingue généralement les murs végétaux extérieurs (façades vertes et murs vivants) et les murs végétaux intérieurs (biowall). Le diagramme ci-dessous en résume la variété.

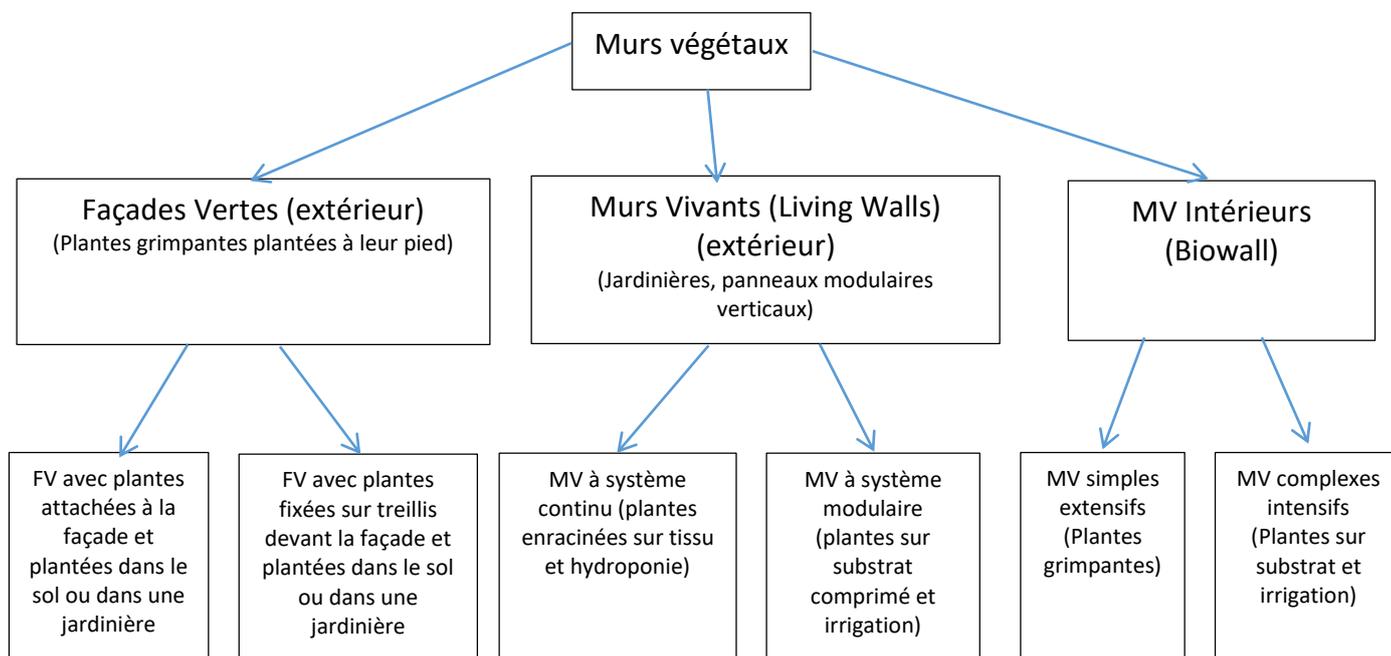


Figure 1: Typologie des murs verts (création personnelle)

Le présent mémoire se focalise sur les murs végétaux intérieurs. Il existe deux types principaux de murs verts intérieurs : les murs verts simples extensifs et les murs verts complexes intensifs. Dans le premier cas, il s'agit simplement de plantes grimpantes comme le lierre. Dans le second cas (celui utilisé dans le cadre de ce projet), un système de renforcement est fixé au mur avec une lame d'air entre le mur et le mur végétal. Des substrats sont placés dans la structure fixée au mur et les plantes sont placées dans le substrat. Dans ce cas, le substrat et la structure fixée au mur peuvent influencer la température du fait de leurs matériaux de construction, la création de ponts thermiques et par l'influence du substrat sur l'humidité de la pièce. L'isolation thermique induite par les plantes et le substrat dépendent de l'épaisseur du substrat, sa densité, son taux d'humidité, la densité du feuillage

des plantes, le mouvement de l'air dans les espaces intermédiaires, la capacité du substrat et des plantes à arrêter le vent.

Il existe de nombreuses études sur les MV extérieurs mais encore peu sur les MV intérieurs (Gunawardena, K. 2019). Ces études se concentrent sur différents aspects mais principalement sur l'impact sur la qualité de l'air (Shao, Y. 2021 ; Daneshpanah, S. 2019 ; Cheung, I. 2017), le choix des plantes (Shen, X. 2023), et du système d'éclairage (Kaltsidi, M. P., et al. 2020). L'impact sur le confort thermique est assez peu analysé et peu d'études ont intégré les différents aspects contrairement à l'approche retenue par l'équipe de l'ULiège. La plupart des études réalisées depuis la fin des années nonante confirment que les murs végétaux ont un impact sur le microclimat et la qualité de l'air autour et dans les bâtiments.

Nous en faisons une synthèse ci-dessous :

Des scientifiques de l'Université de Cologne et du Centre de recherche de Jülich (Edelman 2021) ont montré que les façades vertes régulent positivement le climat de la maison. Ils ont enregistré les courbes de température quotidiennes des façades couvertes de lierre vert par rapport aux façades de maisons classiques en plâtre ainsi que l'humidité de l'air près de la façade sur plusieurs semaines. Il a été constaté que le lierre, comme d'autres plantes grimpantes, a un effet rafraîchissant durable sur les façades en été et calorifuge en hiver. En été, la façade verte envahie par la végétation montrait des baisses de température de 10 à 13 °C pendant la journée alors que la température de la façade nue de la maison montait jusqu'à 35 °C. Des expériences menées jusqu'ici à Cologne, on retiendra que :

- le lierre (*Hedera helix*) qui nécessite un entretien relativement facile (le couper de temps en temps) et reste vert toute l'année et la "vigne vierge" (*Parthenocissus spec.*) dont les feuilles changent fortement de couleur en automne conviennent bien pour végétaliser les façades ;
- les avis sur ces plantes de façade sont très différents : la majorité des enquêtes auprès de la population allemande montrent des attitudes et des inquiétudes négatives vis-à-vis de la dégradation supposée générale des murs et des nécessaires travaux d'entretien récurrents, sans lesquels une croissance sauvage excessive peut se produire ;
- sur les façades nues en été au cours de la journée, de fortes différences d'évolution de la température jusqu'à plus de 30°C pouvaient être mesurées ;
- le lierre a un effet rafraîchissant prononcé sur les façades vertes. Les jours les plus froids, la façade de lierre agit comme un tampon thermique isolant.

Dans son travail de fin d'études « Innover dans la conception des murs végétaux afin de maximiser leurs effets sur la qualité de l'air » (ULiège Gembloux AGT, 2021), Anaïs Hellebaut a confirmé une diminution significative de la température grâce aux MV.

Dans sa thèse de doctorat à l'Université de Hanovre, Robert von Tils (Von Tils, 2020) a réalisé une simulation couplée du climat intérieur et extérieur. Il a pris en compte la teneur variable en eau du sol, qui est l'un des principaux facteurs des performances d'évapotranspiration de la végétation et a simulé la capacité de chauffage et de refroidissement d'une construction avec une façade multicouche et des fenêtres. Le réalisme du modèle a été vérifié à l'aide de

données de mesure. Afin d'étudier l'influence de la verdure sur le climat intérieur, le climat extérieur a été simulé pour un petit complexe de bâtiments pour un bâtiment à toit plat de trois étages. Il a eu recours aux données météorologiques (Berlin-Tempelhof) sur trois mois d'été (1/6 - 31/8/2003). Cette période a été caractérisée par des températures estivales élevées et une période sèche plus longue qu'à l'accoutumée. De nombreux scénarios avec des arbres, une végétalisation intensive et extensive du toit avec et sans accumulation d'eau, ainsi qu'une végétalisation de façade irriguée et non irriguée ont été réalisés. De ces simulations, on retiendra que :

- la position et l'orientation des pièces intérieures et de leurs fenêtres ont une grande influence sur les températures à l'intérieur ;
- les pièces très ensoleillées ont la variation de température quotidienne la plus élevée et chauffent le plus ; les intérieurs surchauffés dégagent leur chaleur vers les pièces voisines plus fraîches ainsi que via la façade extérieure ;
- les fenêtres et les grands arbres qui ombragent la façade présentent le plus fort effet de refroidissement sur les températures intérieures et la charge de refroidissement, suivis par la végétalisation extensive de la façade ;
- les toits verts ont le plus grand effet sur les pièces adjacentes dans les combles ;
- la différence d'alimentation en eau des types de végétalisation des bâtiments est particulièrement visible pendant les périodes sèches de plusieurs semaines et influence l'évapotranspiration des plantes ainsi que l'effet de refroidissement ;
- l'effet de refroidissement des mesures de végétalisation est plus important à l'intérieur qu'à l'extérieur en raison de la proximité des mesures, du plus petit volume à refroidir, du plus faible échange d'air et des températures élevées ou de la charge de refroidissement
- la modélisation du mur végétal se fait à partir de différentes couches avec différentes propriétés prédéfinies de matériau. Il est ainsi possible d'étudier l'influence de différentes formes de végétation, de différents matériaux de paroi ou de différentes couches d'isolation. Dans le cas présent, cinq couches ont été utilisées. L'auteur a ensuite procédé au calcul des flux individuels, au bilan énergétique à l'interface entre la végétation et l'atmosphère.

Une rare étude réalisée sur un MV intérieur indique que le système est capable de réduire les taux de particules, d'éliminer les COV et le CO₂, en plus de moduler la température et l'humidité (Irga et al., 2017). Pourtant, une attention particulière doit être portée sur le choix du type de mur végétal, et sur les matériaux utilisés. Par exemple, il semblerait que les systèmes de treillis et de panneaux modulaires soient relativement durables en termes d'épuration de l'air et d'économies d'énergie, à l'inverse des systèmes de couches de feutre (Feng & Hewage, 2014). La création de murs verts durables doit donc tenir compte des matériaux utilisés, car ils peuvent exercer une grande influence sur l'impact environnemental (Ottelé et al., 2011).

Parmi les progrès récents en matière de MV intérieurs, nous retiendrons :

- la sélection de plantes plus résistantes et mieux adaptées à la culture à l'intérieur ;
- l'intégration de micro-organismes et de mousses ;
- l'utilisation de systèmes d'irrigation automatisés ;

- le recours à des filtres à paroi biologique au travers desquels l'air est activement forcé afin d'améliorer encore l'effet de purification de l'air ;
- l'utilisation de substrats plus performants permettant en outre une meilleure isolation thermique et acoustique ;
- les MV constituent désormais des éléments intégraux de la conception architecturale : création de motifs, de textures et couleurs attractives en harmonie avec l'esthétique globale de l'intérieur ;
- le développement de systèmes modulaires facilitant installation et entretien ;
- la mise en place de services complets comprenant non seulement l'installation mais aussi la maintenance régulière (entretien des plantes, remplacement des plantes dégradées et des systèmes d'irrigation défectueux).

Pour élargir la perspective et bien comprendre les enjeux, il m'est apparu opportun de terminer cette partie de l'état de l'art en analysant brièvement le développement récent des MV dans deux pays européens à savoir l'Allemagne et la Belgique.

En Allemagne, le verdissement des toitures, des façades et des murs intérieurs a connu un développement très rapide ces dernières années : de nombreuses villes allemandes ont mis en place des programmes de subventions pour les toits et les façades vertes, beaucoup d'instituts de recherche et d'universités travaillent actuellement sur des projets liés aux impacts et au développement du bâtiment vert. L'association fédérale allemande Bundesverband GebäudeGrün e.V. (BuGG) soutient le secteur notamment par l'organisation de conférences et de formations spécialisées ainsi que par la publication de nombreux documents (brochures, manuels, analyse du marché en matière de produits, d'aides financières et de recherches). Créée en 2018 à Berlin, elle comprend 13 collaborateurs et 450 membres. Cette association a comptabilisé 75 millions de mètres carrés de toitures vertes installés en Allemagne sur la période 2008-2021 dont 8,7 millions installés en 2021. Pour les façades vertes, BuGG a inventorié 86 600 m² installés en 2021 dont 13 300 m² fixées au mur et 73 300 m² fixées au sol. Pour les murs verts intérieurs, les données sont plus rares; BuGG les estime à 11 900 m² installés en 2021. 23 écoles supérieures et 15 institutions de recherche sont actuellement impliquées dans le verdissement des bâtiments en Allemagne au travers de 65 projets de recherche dont 42 sur les façades, 38 sur les toitures et 2 sur les murs intérieurs. Ces recherches se focalisent sur l'impact climatique et la gestion de l'eau au niveau des villes, l'optimisation du verdissement en relation avec la biodiversité, l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment, la combinaison du verdissement avec des installations solaires et l'agriculture urbaine. D'autres s'occupent de stratégie d'intégration du bâtiment vert dans la pratique communale ou du développement de systèmes innovants et de techniques de construction appropriées. Les 2 projets de recherche traitant des murs verts intérieurs sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Université / Institut	Titre	Période	Financement
TH Köln	Murs verts intérieurs dans la construction en bois : impact sur la qualité de l'air intérieur et sur les parois en bois voisines	2021-21	Brueninghoff GmbH Co. KG

ZAE Bayern	Green4indoor: Influence du mur vert sur le climat intérieur, les occupants et les facteurs climatiques	2021-23	Deutsche Bundesstiftung Umwelt (BDU)
------------	--	---------	--------------------------------------

Tableau 1: Recherches sur les MV intérieurs en Allemagne

L'étude de TH Köln (Dalhoff A., 2022) est consacrée à l'impact d'un MV intérieur sur la qualité de l'air intérieur dans un bâtiment en bois et sur la teneur en humidité du bois des composants adjacents. Le MV, constitué de plantes à feuillage tropical et subtropical, forme une façade intérieure, un rideau sans contact direct des végétaux avec le mur porteur. La construction métallique est résistante à la corrosion et permet une circulation d'air optimale. L'irrigation est effectuée à l'aide d'un système d'arrosage entièrement automatique. Le liquide en excès est soit renvoyé dans un bassin d'eau en dessous (système fermé), soit évacué via un tuyau d'évacuation des eaux usées (système ouvert). Huit enregistreurs de données combinés température-humidité sont montés sur un axe vertical. Les mesures ont eu lieu pendant les mois d'été. Pendant cette période, une sur-humidification de la pièce par le MV est à prévoir - surtout lorsque les températures extérieures sont plus chaudes et que l'humidité extérieure est déjà élevée. Le MV d'environ 9 m² a été installé dans une salle de réunion de 110 m². Le bois est un matériau hygroscopique ; il absorbe l'eau de l'air et la restitue. Après l'installation du MV intérieur, l'humidité relative a augmenté de 26,7 points dépassant - sans concept de ventilation - les valeurs limites selon la norme DIN EN 15251. Dans l'ensemble, il y a eu une augmentation de la teneur en humidité du bois de 2,9 points. La teneur moyenne en humidité du bois sur la surface avec le MV installé était de 11,2 %. Aucun effet négatif sur les composants en bois adjacents n'a été observé. Au contraire, en augmentant l'humidité relative dans la pièce - surtout pendant la saison de chauffage hivernale - le MV peut réduire le risque possible de craquements et de fissures dans le bois.

Dans l'étude Green4indoor du ZAE Bayern (Bucher A. 2015), il a été testé si un MV améliore le climat intérieur d'un bâtiment à faible consommation d'énergie en ce qui concerne l'humidité souvent trop faible et sans un niveau élevé de germes comme avec un humidificateur. Les résultats obtenus en pesant les quantités d'eau évaporées par les plantes (50 g/m²/h) ont confirmé que les meilleurs murs verts permettent d'augmenter l'humidité relative de l'air intérieur de 8% (grand bureau ouvert) à 20% (petit bureau fermé). Plus l'humidité est faible dans la pièce, plus l'évaporation est importante. Les principaux facteurs influençant l'évaporation sont la vitesse de l'air et le rayonnement lumineux alors que la température a un effet mineur. Le MV permet d'améliorer le niveau de confort en raison de l'humidité plus élevée en hiver. En été, le MV peut par contre augmenter le risque de précipitations d'eau. La surface de MV appropriée et la consommation d'énergie correspondante ont été calculées en fonction de la taille de la pièce.

En Belgique, il existe depuis longtemps des façades ou murs couverts de différentes plantes principalement le lierre. Ce n'est pourtant que beaucoup plus récemment que les façades, toitures et murs verts ont reçu une attention croissante des pouvoirs publics, des entreprises et des particuliers. Quelques villes belges, notamment Bruxelles, Gand, Anvers et Liège ont vu la mise en place de MV dans des espaces publics et commerciaux et des bâtiments publics (hôpitaux, bibliothèques, écoles, universités). Quelques autorités locales appuient la végétalisation à travers différentes actions comme :

- la campagne « Végétalisez vos façades » à Wavre (<https://www.wavre.be/vegetalisez-vos-facades>) : la Ville assure à ses frais la création de la fosse de plantation et son remplissage par du substrat adéquat ; elle subsidie à 80% l'acquisition des plantations et des supports pour un montant maximum de 200 € ;
- la Ville de Tournai (www.tournai.be/reglements-redevances-et-taxes/reglement-concours-facades-vegetalisees-2023) a lancé un concours de façades végétalisées en 2023 avec une douzaine de prix de 150 € ;
- le Fonds ING pour les Bâtiments Durables, géré par la Fondation Roi Baudouin (www.kbs-frb.be/fr/11-projets-de-vegetalisation-de-facades-de-batiments-publics-se-partagent-500000-euros) appuie avec 500.000 € onze projets de végétalisation de l'espace public comme le siège principal de la police de Liège, le CHU Saint-Pierre à Bruxelles, le quartier Heihoek de Malines, le conservatoire de Verviers, le site industriel rénové de Cocon à Sint-Niklaas...

Au niveau de la recherche, des efforts louables sont à relever à l'Université de Liège tant au niveau du Campus de Gembloux que de celui d'Arlon. Plusieurs mémoires d'étudiants ont été réalisés depuis 2021 et d'autres sont en cours. Un MV extérieur a été mis en place au Centre Culturel de Gembloux et un MV intérieur au Laboratoire du Campus d'Arlon.

Année	Auteur	Université	Titre
2022	Willaert, A.	Liège/Campus Arlon	L'étude d'impact de murs végétaux sur la qualité de l'air intérieur http://hdl.handle.net/2268.2/14284
2021	Signorato, E.	Liège/Campus Arlon	Paramétrage d'une méthodologie pour l'étude de l'impact de murs végétaux in situ http://hdl.handle.net/2268.2/13180
2021	Forget, L.	Liège/Campus Gembloux	Relations plantes-insectes au sein et aux abords des murs végétaux https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/13089/4/TFE_Forget_Laetitia.pdf
2021	Hellebaut, A.	Liège/Campus Gembloux	Innover dans la conception des murs végétaux afin de maximiser leurs effets sur la qualité de l'air https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/13158
2021	Vandersmissen, G.	Liège/Campus Gembloux	Les façades végétalisées : Analyse comparative et mise au point d'un outil d'aide à la décision http://hdl.handle.net/2268.2/13260

2018	Baudoux T.	Liège/Campus Gembloux	Murs verts : une approche « Habitats analogues ». Test pour la mise en œuvre de murs végétalisés analogues aux habitats de falaises et de vieux murs http://hdl.handle.net/2268.2/5106
------	------------	-----------------------	---

Tableau 2: Liste des mémoires de l'ULiège sur les MV

Les murs verts sont en général installés par quelques entreprises telles que :

- CANOPY (www.canopy-greenroofs.be) à Gand,
- Cita Verdi (www.citaverdi.com/murs-toitures-vegetalisees) à Bruxelles associée à Sound Ecology (www.sound-ecology.com/green-walls) au Luxembourg,
- G.S. ecotech (www.gsecotech.be) à Petit Rechain,
- ecoworks (ecoworks.be) à Vilvorde,
- Krinkels (www.krinkels.be) à Bruxelles,
- la Spin Off MURVERT (<https://murvert.be>) à Gembloux...

L'Institut wallon de Formation en Alternance et des indépendants et Petites et Moyennes Entreprises - IFAPME (www.ifapme.be) organise une formation d'un an en « Végétalisation des bâtiments » à Villers-le-Bouillet.

En **résumé**, quelques premières impressions se dégagent de mes recherches bibliographiques mais elles restent à confirmer à partir des travaux en cours et des recherches plus vastes à entreprendre :

- Un MV intérieur peut contribuer à l'amélioration du confort thermique en augmentant l'humidité d'un bureau en hiver et en baissant la température de l'air par évapotranspiration en été ; l'impact thermique est moins prononcé que pour des MV extérieurs ;
- Un MV intérieur peut contribuer à réduire la consommation d'énergie pour la climatisation en été ;
- Pour réguler et automatiser les performances d'un MV fonctionnel, il est nécessaire d'avoir un arrosage régulé des plantes sans risque de surcharge de l'air, de choisir des plantes et des substrats avec des taux d'évapotranspiration élevés en milieu peu humide ;
- Un MV intérieur est sensible à disponibilité de lumière ; l'appoint par des lampes artificielles réduit les économies d'énergie potentielles et le bénéfice environnemental attendu ;
- Un MV intérieur nécessite une stratégie d'entretien afin de maintenir sa bonne fonctionnalité à long terme ;
- Un dimensionnement judicieux d'un MV et la prise en compte de la végétalisation intérieure dans la conception des équipements techniques (ventilation) d'un bâtiment sont indispensables ;
- Les recherches multidisciplinaires entamées à l'Uliège prennent tout à fait leur valeur dans ce cadre et ouvrent des perspectives innovantes tant au niveau belge qu'europpéen.

2. Définition du confort thermique intérieur

Le confort thermique peut être déterminé par 2 méthodes bien établies qui fournissent des critères pour déterminer si l'environnement thermique d'un bureau est susceptible d'être perçu comme confortable par ses occupants :

- La méthode de L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. « ASHRAE Standard 55 » (ASHRAE 2017) se base sur une combinaison de facteurs environnementaux thermiques intérieurs et de facteurs propres à l'individu afin de produire des conditions thermiques qui soient acceptables pour la majorité des occupants d'un espace. L'ASHRAE Standard 55 se base sur 6 facteurs : le taux métabolique, l'isolation offerte par les vêtements, la température de l'air la température radiante, la vitesse de l'air et l'humidité relative. Ces facteurs peuvent évoluer avec le temps. Notons cependant que l'outil de calcul du confort thermique développé par l'Université de Californie à Berkeley, le « CBE Thermal Comfort Tool » mesure ces données en régime stationnaire.

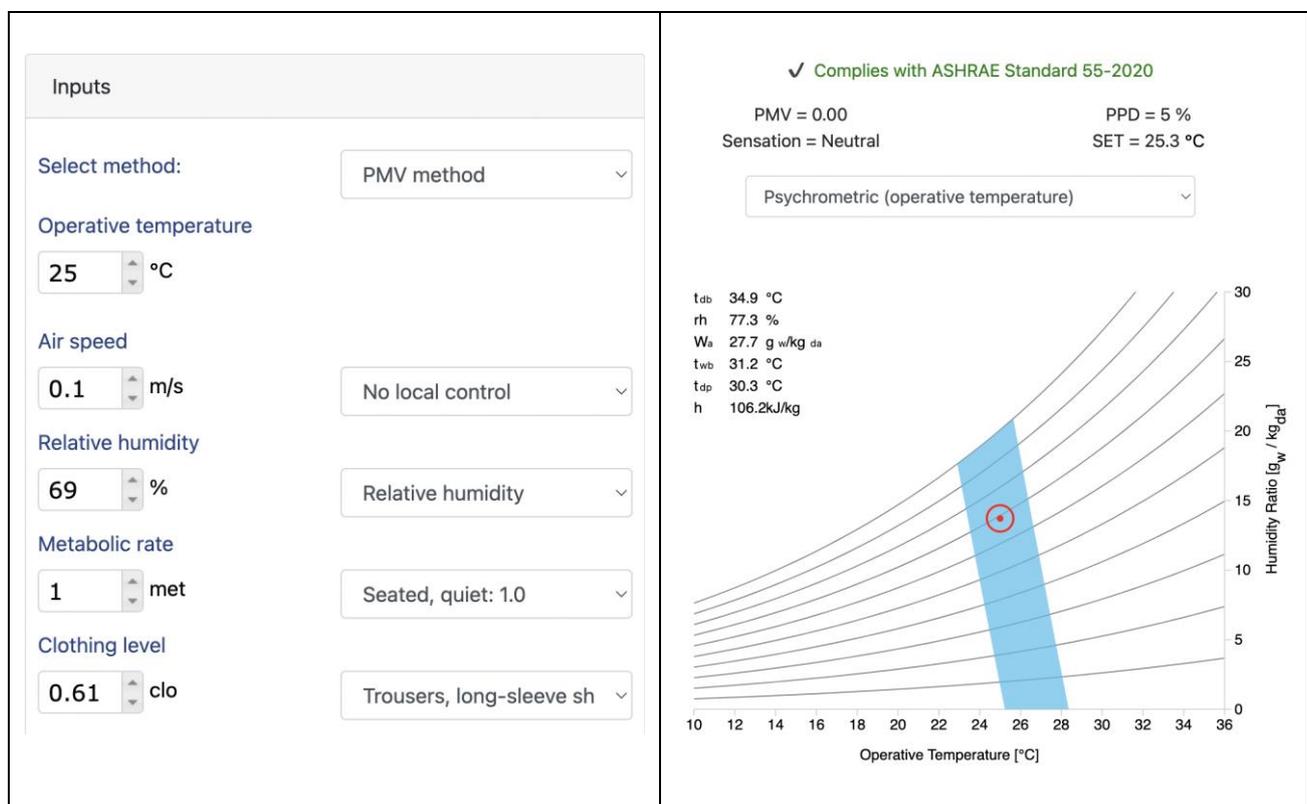


Figure 2: CBE Thermal Comfort Tool ASHRAE-55 (ASHRAE 2017)

Cette méthode se base sur le tableau psychrométrique avec en abscisse la température opérative (en °C) définie comme la température uniforme d'un mur radiatif imaginaire par rapport à l'environnement thermique réel et prenant en compte la température ambiante, la température moyenne de surface des surfaces environnantes et le rayonnement thermique et en ordonnée le taux d'humidité relative (en g_w/kg_{da}). En rentrant la température opérative, la vitesse de l'air, l'humidité relative de l'air, le taux métabolique de l'individu et son niveau

d'habillement dans l'outil, il calcule : - le Predicted Mean Vote (PMV) qui indique la différence moyenne perçue entre l'état thermique réel et l'état thermique idéal ; une valeur de PMV proche de zéro indique un état thermique confortable ; - le Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) qui estime la proportion d'occupants qui pourraient être insatisfaits du confort thermique. Les autres paramètres calculés sont la température standard effective (*Standard Effective Temperature – SET*), la température de bulbe sec (t_{db}), l'humidité relative (r_h), l'humidité absolue (W_a), la température de bulbe humide, le point de rosée (t_{dp}) et l'enthalpie (h). La méthode ASHRAE convient bien aux situations standards, est pratique et intègre plusieurs paramètres ; elle implique des calculs assez complexes et est sensible aux valeurs d'entrée choisies.

- La méthode « ISO-7730 Standard » quant à elle est basée sur la « Predicted Mean Vote » telle que calculée par l'équation du confort thermique de Fanger. Selon Fanger et Roulet (Fanger, 1982 ; Roulet, 2004), le confort thermique est un état de satisfaction de l'individu par rapport à son environnement. Cette satisfaction dépend de l'équilibre entre la chaleur interne du corps humain et les échanges de chaleur avec l'environnement. Le modèle de Fanger prend en compte plusieurs paramètres pour évaluer le confort thermique des occupants d'un bâtiment à savoir des paramètres liés à l'environnement : la température de l'air (T_a en °C ou K), la température radiante moyenne (T_{mrt} en °C ou K), la vitesse relative de l'air (v en m/s), la pression partielle de vapeur d'eau (p en Pa), la température des surfaces environnantes, le degré de turbulence de l'air, l'humidité relative de l'air et des paramètres liés à l'individu comme son activité métabolique (M en Watt), son travail mécanique fourni (W en Watt), la surface de peau du sujet (A en m^2), l'activité spécifique du sujet ($m = M/A = W/m^2$), son travail, spécifique ($w = W/A = W/m^2$), la résistance thermique des vêtements portés (R en clo ou m^2K/W) et la fraction de la surface habillée. Ces paramètres sont ensuite utilisés pour calculer le PMV (Predicted Mean Vote) qui représente la valeur de la sensation thermique moyenne de personnes situées dans un environnement (généralement un bâtiment). Le PMV est exprimé en chiffres sur une échelle qui va de -3 à +3, avec -3 = (Très froid) et +3 = (Très chaud), 0 signifie que la personne est satisfaite. Il utilise également le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) qui exprime la partie des sujets qui sont insatisfaits dans des conditions données. L'équation de Fanger est donnée par :

$$PMV = (0,303 \exp(-0,036 m) + 0,028) [m - w - 0,00305 (5533 - 6,99 (m - w) - p) - 0,42 (m - w - 58,15) - 0,000017 m (5867 - p) - 0,0014 m (307 - T_a D) - F]$$

Avec :

$$F = 3,96 \cdot 10^{-8} f (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) + f h (T_{cl} - T_a)$$

$$h = 2,38 (T_{cl} - T_a)^{1/4} \text{ ou } h = 12,06 \sqrt{v}$$

$$T_{cl} = 308,9 - 0,028 (m - w) - RF$$

$$f = 1,00 + 1,290 R \quad \text{si } R < 0,078 \text{ m}^2K/W$$

$$f = 1,05 + 0,645 R \quad \text{si } R < 0,078 \text{ m}^2K/W$$

$$PPD = 1 - 0,95 \exp(-0,003353 PMV^4 - 0,2179 PMV^2)$$

Température de l'air : Θ_a [°C] ou T_a [K]
Température radiante moyenne : Θ_{mrt} [°C] ou T_{mrt} [K]
Vitesse relative de l'air : v [m/s]
Pression partielle de vapeur d'eau : p [Pa]
Activité métabolique du sujet : M [Watt]
Travail mécanique fourni : W [Watt]
Surface de peau du sujet : A [m ²]
Activité spécifique du sujet : $m = M/A$ [W/m ²]
Travail spécifique du sujet : $w = W/A$ [W/m ²]
Résistance thermique des habits : R [m ² K/W]
Habillement : [Clo] = $R/0,155$
Fraction de la surface habillée : f

Équation 1: Équation de Fanger : PMV et PPD (Fanger 1982 ; Roulet 2010)

La méthode ISO moins largement adoptée présente les mêmes avantages et contraintes que la méthode ASHRAE mais accorde une plus grande importance aux vêtements portés par les occupants.

3. Méthodes de modélisation en simulation et outils de simulation des MV

Les méthodologies adoptées pour les travaux de recherche sur les MV peuvent être divisées en trois grandes catégories : observationnelles, expérimentales et de modélisation (Hunter et al., 2014 ; Yazdanseta, 2017). Nous les avons adaptées aux MV intérieurs :

- La méthodologie observationnelle, dans laquelle les données sont recueillies à partir d'un mur vert existant, est la plus courante mais est aussi la plus faible car les données des études d'observation sont fortement influencées par la construction particulière et l'utilisation du bâtiment (habitation, bureau). Une façon possible d'aborder ce problème est de comparer les données d'observation avec quelques sites de contrôle choisis au hasard avant et après l'installation du MV.
- La méthodologie expérimentale repose sur des données de terrain et offre plus de contrôle lors de la configuration des expériences mais le manque de réplification adéquate constitue un facteur limitant. Hunter et al. suggèrent d'introduire des redondances dans les expériences pour résoudre ce problème. Par exemple, une étude comparative de deux MV ayant une même orientation (au lieu d'un) à un mur nu permet d'introduire un contrôle plus efficace pour une expérience. La plupart des études expérimentales ont été menées sur de courtes durées. Pour collecter des données fiables sur l'impact thermique des MV au cours des saisons, les plantes doivent être bien implantées sur le site et les expérimentations doivent être menées sur au moins un an (Hunter et al., 2014). Dans la plupart des cas, les emplacements des instruments et capteurs utilisés ne sont pas non plus clairement décrits.
- La modélisation numérique permet également d'évaluer les effets énergétiques et thermiques des MV. Il est dans ce cas largement bénéfique d'évaluer les modèles

numériques à l'aide d'études observationnelles ou expérimentales. La modélisation des MV intérieurs implique généralement des considérations spécifiques liées à l'environnement intérieur du bâtiment. On distingue aussi les modèles statiques et dynamiques (CEGIBAT, 2019).

Les principales méthodes pour modéliser les murs verts intérieurs comprennent :

- Modèles thermiques zonés qui modélisent la zone intérieure contenant le mur vert comme une entité distincte avec ses propriétés thermiques. Les équations de bilan thermique prennent alors en compte les échanges de chaleur avec les autres zones du bâtiment, en tenant compte de l'effet de refroidissement par évapotranspiration des plantes ;
- Modèles hygrothermiques (Designing Building, the construction wiki. 2020) qui intègrent les effets de la végétation sur l'humidité relative de l'air à l'intérieur de la pièce. Cela permet de tenir compte de la capacité du MV à contribuer à l'humidité intérieure. Pour les MV intérieurs, il peut être pertinent de modéliser la croissance des plantes et les processus d'évapotranspiration à l'intérieur de l'espace. Cela peut fournir des informations sur l'effet de rafraîchissement résultant de l'évapotranspiration ;
- Modèles CFD (Computational Fluid Dynamics) utilisés pour modéliser en détail les distributions de température, vitesse de l'air et humidité autour du MV intérieur ; cela peut fournir des informations précises sur les flux d'air et les gradients de température dans l'espace intérieur (Raczkowski A. 2021 ; Nielsen P. 2015 ; Designing Building, the construction wiki 2023) ;
- Modèles couplés qui combinent la modélisation thermique avec des modèles de confort thermique humain. Ils évaluent comment les MV intérieurs influencent non seulement la température ambiante, mais aussi le ressenti et le confort des occupants.

Le choix de la méthode de modélisation dépend de la complexité de l'analyse souhaitée, des objectifs de l'étude et de la disponibilité des données. Les approches couplées ou basées sur des simulations CFD permettent une modélisation plus réaliste et précise. Tilley et al. (2012) ont par exemple développé un modèle numérique qui a montré un bon ajustement par rapport aux mesures d'études sur le terrain. Cependant, ils ont observé des erreurs de pas de temps horaire dues à de mauvaises estimations de l'évapotranspiration.

Il existe plusieurs outils de simulation utilisés dans le domaine de la modélisation environnementale et énergétique qui permettent également de modéliser et étudier les MV intérieurs et leur impact sur le confort thermique. Ces outils sont des logiciels informatiques spécialement conçus pour effectuer des simulations et fournissent une interface utilisateur conviviale pour créer, configurer et exécuter des simulations. Ils incluent souvent des modèles mathématiques pré-définis, des bibliothèques de composants et des algorithmes pour simuler des phénomènes complexes. Les outils de simulation sont conçus pour rendre le processus de simulation plus accessible aux utilisateurs sans nécessiter une programmation détaillée :

- TRNSYS (Transient System Simulation Tool), un logiciel de simulation de systèmes énergétiques qui permet de modéliser des systèmes de chauffage, de climatisation, de production d'énergie et d'autres systèmes techniques et offre une grande flexibilité

en termes de modélisation de systèmes complexes. TRNSYS ne se limite pas à un modèle unique, mais permet aux utilisateurs de créer des modèles personnalisés en assemblant des composants issus de sa bibliothèque et en procédant par étapes :

- Sélection de composants individuels à partir d'une bibliothèque qui comprend une grande variété de systèmes et d'équipements, tels que des panneaux solaires, des échangeurs de chaleur, des systèmes de chauffage et de refroidissement, des systèmes de ventilation, etc. ;
 - Assemblage des composants pour créer un modèle de système énergétique. Pour modéliser un bâtiment avec un MV intérieur, il faut sélectionner des composants pour le bâtiment lui-même, le système de chauffage/refroidissement, les murs, les fenêtres, et potentiellement ajouter des composants pour représenter l'effet du mur vert ;
 - Configuration des paramètres et propriétés de chaque composant en fonction du modèle. Pour le MV intérieur, il faut spécifier les propriétés thermiques du mur, les propriétés de la végétation, et les taux d'évapotranspiration ;
 - Exécution de la simulation une fois le modèle assemblé et configuré pour analyser le comportement du système énergétique au fil du temps. TRNSYS effectue des calculs en temps réel pour évaluer les flux de chaleur, les températures, les échanges d'énergie, etc.
-
- EnergyPlus, un logiciel de simulation thermique dynamique utilisé pour analyser la performance énergétique des bâtiments ; ce logiciel a été utilisé dans l'étude de Abdollah Baghaei Daemei (2021) qui compare la performance thermique d'un MV à un mur nu sur la façade nord d'un immeuble résidentiel de 2 étages dans le climat humide de Rasht (Iran) pendant l'été à travers des données collectées (température et humidité) en temps réel. Un bâtiment existant a été modélisé dans EnergyPlus à des fins de validation. Selon les résultats, une diminution de la température et de l'humidité relative a été observée dans le cas du bâtiment avec un MV. Le MV a fait chuter la température intérieure de 9 % et le niveau d'humidité relative de 32 %. En outre, afin de prédire les performances du MV dans un court intervalle de temps, un *deep artificial neural network* a été formé à partir des données expérimentales et un ensemble de données météorologiques sur 15 jours a été collecté et introduit dans le *deep learning model*.
 - COMSOL Multiphysics®, un logiciel de simulation utilisé pour modéliser une variété de phénomènes physiques. Contrairement à la plupart des modèles précédents qui permettent des simulations thermiques unidimensionnelles dans lesquelles les conditions aux limites, comme le transport convectif de l'humidité, n'étaient pas ou seulement partiellement prises en compte, Alvarado-Alvarado A. (2023) propose une manière plus complète de prédire le comportement hygrothermique des MV en intégrant un modèle multiphysique 3D qui couple le transport de chaleur et d'humidité dans Comsol Multiphysics®. La cavité d'air qui sépare habituellement le MV du bâtiment est également prise en compte. Des termes de puits de chaleur y sont ajoutés pour représenter l'évapotranspiration des plantes et des substrats, en tenant compte de la densité de surface foliaire et de la saturation en eau du substrat. Ce modèle a été validé par rapport à des expériences où quatre panneaux d'essai de MV

ont été évalués dans une chambre climatique dans des conditions de régime permanent. Les quatre MV ont diminué la température de surface de la maçonnerie de 0,89 à 1,14 ° C. La contribution moyenne de l'effet d'évapotranspiration était de 30 %, tandis que la contribution de la cavité d'air était de 61 %.

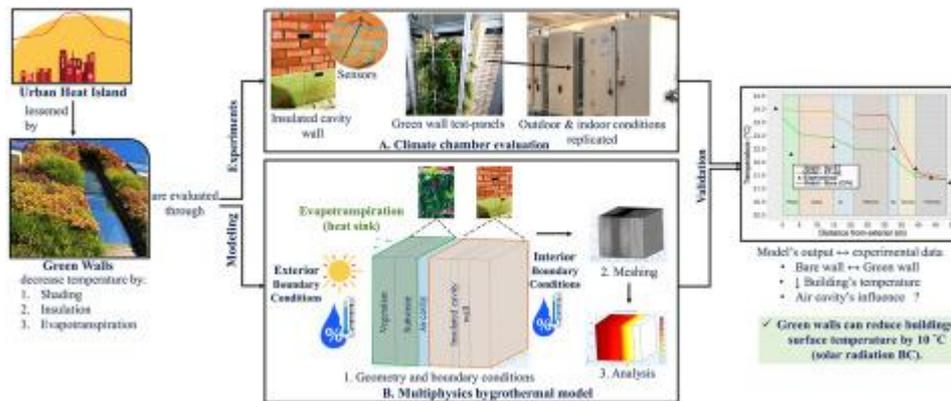


Figure 3 : Schéma du modèle COMSOL Multiphysics (Alvarado-Alvarado, A. 2023)

- ENVI-met (<https://envi-met.info>), un modèle holistique tridimensionnel non hydrostatique pour la simulation des interactions surface-plante-air utilisé pour simuler des environnements urbains et pour évaluer les impacts d'une architecture verte. Il est conçu pour une micro-échelle avec une résolution horizontale typique de 0,5 à 10 m et un délai typique de 24 à 48 heures avec un pas de temps de 1 à 5 secondes. Cette résolution permet d'analyser les interactions à petite échelle entre les bâtiments individuels, les surfaces et les plantes. Selon les ressources informatiques et le temps, ENVI-met peut être utilisé pour simuler des mois complets ou même une année entière. La modélisation comprend :
 - les flux de rayonnement (ondes courtes et longues) en ce qui concerne l'ombrage, la réflexion et le re-rayonnement des systèmes de construction et de la végétation. ENVI-met fournit une modélisation haute résolution de tous les flux radiatifs, y compris les réflexions multiples dans les zones urbaines et la diffusion du rayonnement dans les cimes des arbres ;
 - la transpiration, l'évaporation et le flux de chaleur sensible de la végétation dans l'air, y compris la simulation complète de tous les paramètres physiques de la plante (par exemple, le taux de photosynthèse) ;
 - le calcul dynamique de la température de surface et de la température des murs pour chaque élément de façade et de toiture supportant jusqu'à 3 couches de matériaux et 7 points de calcul dans le mur/toit ;
 - le support des systèmes de végétalisation des murs/toits, y compris la couche de substrat ;
 - l'échange d'eau et de chaleur à l'intérieur du système de sol, y compris l'absorption d'eau par les plantes ;
 - la représentation 3D de la végétation, y compris la modélisation dynamique du bilan hydrique de chaque espèce ;
 - le calcul d'indices biométéorologiques tels que la température radiante moyenne, PMV/PPD, PET ou UTCI via BioMet.

ENVI-met comprend un modèle 3D complet CFD (Computational Fluid Dynamics). Il résout les équations de Navier-Stokes pour chaque grille dans l'espace et pour chaque

pas de temps. Les effets de la végétation sont inclus en tant que forces de traînée dans le champ de vent. Le flux de vent est mis à jour à des intervalles de temps donnés. ENVI-met prend également en charge un calcul de débit en temps réel, ce qui signifie que le champ de débit est traité comme une variable normale et est calculé à chaque étape. En raison des très petits pas de temps nécessaires ici, ce mode de calcul nécessite des ordinateurs très puissants. La température de l'air et l'humidité spécifique de l'air sont déterminées par les différentes sources et puits de chaleur et de vapeur sensibles à l'intérieur du domaine du modèle. La surface du sol et les feuilles de la végétation agissent comme des sources ou des puits pour la température et l'humidité dans le modèle atmosphère. Les murs et les toits des bâtiments agissent principalement comme des surfaces échangeant de la chaleur avec l'atmosphère, mais peuvent également agir comme des sources d'humidité si la façade ou le toit est végétalisé. ENVI-met prend en charge les plantes verticales simples telles que l'herbe ou le maïs, mais permet également des géométries de végétation 3D complexes comme les grands arbres. Toutes les plantes sont traitées comme des espèces individuelles avec un contrôle intégré de l'équilibre hydrique et un concept de réaction au stress thermique et hydrique.

Pour ce mémoire, nous avons utilisé l'outil de simulation TRNSYS dans le cadre du projet Green4Indoor - Wallonia. Il présente toute la flexibilité et les performances requises pour ce genre de projet de recherche sans le recours à des outils extrêmement complexes, à des banques de données sophistiquées et à des temps de calcul machine exorbitants.

4. Description du projet Green4Indoor - Wallonia

Les travaux de ce mémoire s'intègrent dans le projet Green4Indoor-Wallonia. Il s'agit d'une étude scientifique multidisciplinaire menée par des chercheurs et étudiants de l'unité de recherche SPHERES (UR SPHERES) de l'université de Liège, qui vise à mesurer les impacts d'un mur végétal intérieur sur la performance d'un bureau en termes de qualité de l'air intérieur, de confort thermique, de confort visuel et de l'utilisation des eaux grises pour alimenter un mur végétal. Ce projet regroupe les équipes de recherche BEMS (Building Energy Monitoring and Simulation), SAM (Laboratoire Sensing of Atmospheres and Monitoring), EED (Eau Environnement Développement), le SEGEFA (Service d'Étude en Géographie Economique Fondamentale et Appliquée) de la faculté des Sciences de l'ULiège en partenariat avec la société luxembourgeoise Sound Ecology située à Wiltz et la société Cita Verdi (spécialiste des murs et toitures végétalisés à Bruxelles et au Luxembourg) qui nous ont fourni un mur végétal intérieur.

Par équipe, les objectifs du projet sont :

- L'étude de l'impact des murs végétaux intérieurs sur la qualité de l'air intérieur et l'évolution au cours du temps des concentrations en COV, formaldéhyde, moisissures, particules fines (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀), CO, NO, NO₂, NO_x, O₂, CO₂ (**SAM**)
- L'étude de l'impact des murs végétaux intérieurs sur la performance énergétique d'un bâtiment, le confort thermique, la surchauffe estivale en période de changement climatique, et les échanges de chaleur à travers la paroi (**BEMS**)

- L'étude de l'impact de l'utilisation d'eaux propres et d'eaux grises sur l'irrigation des murs végétaux intérieurs, l'étude de l'humidité résiduelle dans le massif à l'entrée et à la sortie de l'eau du mur suite à son irrigation, des performances en termes d'élimination des nutriments et des polluants et étude du relargage de polluants atmosphériques captés par les feuilles du mur végétal (**EED**)
- Analyse spatio-temporelle afin de mettre en évidence les facteurs urbains ou socio-économiques qui pourraient expliquer l'apparition et la diffusion des murs végétaux intérieurs (**SEGEFA**)

Cette recherche est financée par l'appel à projets "Crédits d'opportunité" dans le cadre d'une coopération interdépartementale de l'UR SPHERES.

5. Le bureau en période de changement climatique

En 2015, 195 États membres de la CCNUCC et de l'Union Européenne ont adopté par consensus l'Accord de Paris. Cet accord avait pour objectif l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, le maintien des températures mondiales en dessous de 2°C au-dessus des niveaux préindustriels, ainsi que la « mise en place de flux financiers adéquats, d'une nouvelle architecture technologique et d'un cadre amélioré de renforcement des capacités ». Cependant depuis, on estime que la température moyenne mondiale de 2022 est supérieure d'environ 1,15°C à la moyenne préindustrielle et le dernier rapport du GIEC prévoit que nous devrions passer le seuil critique des 1,5°C de hausse d'ici 2030.

Au niveau de la Belgique, lorsqu'on parle des perturbations induites par le changement climatique, la première image qui fait surface est celle de températures extrêmes qui causent des périodes de froid extrême ou des périodes de canicule. Selon le site de l'IRM (Institut royal météorologique de Belgique), on parle de vague de chaleur climatique lorsque « la température maximale du jour est égale ou supérieur à 25°C pendant au moins cinq jours consécutifs, dont 3 jours supérieurs à 30°C ». Elle prend fin la première journée où la température maximale passe sous les 25°C. Au Luxembourg, Météolux décrète qu'il y a une canicule lorsque « les températures maximales dépassent les 32°C dans la journée, et que la température moyenne de la veille était supérieure à 23°C ».

Afin de simuler l'impact de températures extrêmes futures sur la modélisation de bureau sur TRNSYS, le data set « *Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR : Typical and extreme meteorological year and heatwaves* » de Sébastien Doutreloup a été utilisé. Celui-ci a pour objectif de fournir des données météorologiques formatées et adaptées aux experts du bâtiment afin qu'ils puissent prendre en compte ces prévisions météorologiques dans le design et l'architecture de nouveaux bâtiments et qu'ils puissent optimiser les systèmes de gestion énergétique des bâtiments. Le Model Atmosphérique Régional (MAR) fournit des données qui sont estimées pour un pas de temps d'une heure et pour un rayon de 5 km, cela permet d'accéder à des données qui sont temporellement et spatialement homogènes. Chaque région a son propre data set. Le dossier pour la ville d'Arlon contient 593 fichiers de données météorologiques.

Le choix du fichier idéal se fait généralement en 6 étapes :

- 1) Trouver une ville/région sur laquelle se focaliser ;
- 2) Trouver la nature du fichier de référence. Il existe plusieurs types de fichier : les TMY (Typical Meteorological Year), les XMY (Extreme Meteorological Year), les HWE-HI (Most intense heatwave event), les HWE-HT (warmest heatwave event), les HWE-LD (Longest heatwave event) et les HWE-all (all heatwave events) ;
- 3) Choisir la période sur laquelle se focaliser ;
- 4) Choisir un scénario parmi ceux annoncés par le GIEC. Ceux-ci sont :
 - SSP5-8.5 : le monde continue d'utiliser des énergies fossiles et la température augmente de plus de 5°C d'ici 2100, les émissions de Gaz à effet de serre (GES) sont très élevés ;
 - SSP3-7.0 : les différents pays priorisent la sécurité régionale, la société reste très vulnérable au changement climatique, les émissions de GES sont élevés ;
 - SSP2-4.5 : le monde continue avec la tendance actuelle sans grande déviation, les émissions de GES sont intermédiaires.
- 5) Choisir un modèle MAR parmi les suivants :
 - le modèle MAR-ERA5 : MAR contraint par la ré-analyse ERA5, représente le climat le plus proche de la réalité ;
 - MAR-BCC (Wu, 2019) : MAR contraint par le BCC-CSM2-MR- Beijing Climate Centre ;
 - MAR-MPI (Gutjahr, 2019) : MAR contraint par la réanalyse MPI-ESM1-2-HR- Max Planck Institute) ;
 - MAR-MIR (Tatebe, 2019) : MAR contraint par la réanalyse du MIROC6- Japanese modelling community qui surestime de manière significative la température et l'irradiation solaire en été ; ce modèle a simulé le plus grand réchauffement à l'horizon 2100 ; cette simulation est considérée comme montrant le climat le plus extrême qui pourrait se produire.
- 6) Choix final du fichier pour la modélisation.

Afin d'avoir une représentation des conditions météorologiques les plus extrêmes, les types de fichiers de référence « XMY » (en hiver) et « HWE-all » (en été) ont été choisis pour la période 2035-2050. Cette période correspond à celle utilisée dans les différents Accords ratifiés par les pays membres de la CCNUCC et l'Union Européenne ainsi que dans les rapports du GIEC qui font des prévisions à l'horizon de 2030 et 2050. Le scénario SSP5-8.5 a été sélectionné pour comprendre ce qui se passerait si les pays continuaient à utiliser les énergies fossiles. Enfin, le modèle MAR-MIR a été sélectionné pour avoir une idée des températures les plus extrêmes qui pourraient être atteintes. Les fichiers finaux sélectionnés seront donc : Arlon-City_XMY_2035-2050_ssp585_MAR-MIR_TTbased et Arlon-City_HWE-all_2035-2050_ssp585_MAR-MIR. Ceux-ci seront comparés aux données météorologiques de deux semaines extrêmes (une en hiver et une en été) qui ont été mesurées en 2018 par la station météorologique située au Campus-Environnement à Arlon.

Méthodologie

Pour déterminer l'impact d'un mur vert intérieur considéré comme un mur d'eau sur le confort thermique d'un bureau, l'approche générale retenue implique une analyse des facteurs tels que les conditions ambiantes, la température de l'air, l'humidité, etc. 3 phases sont distinguées pour y parvenir dans le cas d'un MV intérieur installé dans une chambre climatique représentant un bureau :

Phase I : Préparation

- Mesure des données de référence : avant d'installer le mur vert, collecter des données détaillées sur les conditions de confort thermique dans le bureau, y compris la température de l'air, la température relative, l'humidité relative, la vitesse de l'air et les échanges thermiques à travers la paroi de la chambre climatique ;
- Collecte de données météorologiques sur une période d'une année (2018), pour refléter les variations saisonnières (été, hiver). Les données comprennent notamment la température extérieure, l'humidité relative, l'ensoleillement et la pression atmosphérique ;
- Choix des capteurs appropriés pour enregistrer les données thermiques nécessaires : sondes de températures, hygromètres et fluxmètres ;
- Installation du MV et de son système d'irrigation et réglage des appareils de chauffage et de simulation des gains (résistance unique), d'humidification et d'éclairage du bureau ;
- Estimation de la conductivité thermique du MV qui détermine sa capacité à transmettre la chaleur. Le coefficient de transmission thermique U sera utilisé pour quantifier la quantité de chaleur qui passe à travers le MV. Un MV vert bien conçu avec une faible valeur U permet de minimiser les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été, améliorant ainsi le confort thermique ;
- Détermination du facteur de surface du mur vert qui représente la surface totale de végétation par rapport à la surface du mur. Un facteur de surface élevé signifie que le mur vert couvre une grande partie du mur, ce qui peut augmenter son effet d'isolation thermique et ses bénéfices pour le confort thermique.

Phase II : Mesures en laboratoire et analyses

- Mesures régulières après installation sous forme de cycles en régime hiver puis été (avec et sans climatisation) ;
- Comparaison des mesures effectuées avant et après installation du MV pour identifier les variations et déterminer s'il y a eu des changements significatifs au niveau de la demande de chaud et de froid requise pour maintenir le confort thermique dans le bureau ;
- Modélisation de la transmission de chaleur par des simulations informatiques pour estimer la façon dont le mur vert affecte les flux de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du bureau. Cela permet de prédire comment le MV peut influencer le confort thermique intérieur. Le modèle inclut le profil d'occupation du bureau, y

compris les heures d'ouverture et de fermeture, les périodes d'occupation et d'inoccupation, ainsi que les apports internes de chaleur dus aux occupants, aux équipements électroniques (Ordinateur), aux éclairages, etc.

- Analyse du comportement thermique dynamique (logiciel TRNSYS) qui prend en compte les changements de température tout au long de la journée et de l'année, ainsi que l'effet des apports internes et externes de chaleur, tels que le chauffage, la climatisation, l'éclairage et les occupants ;
- Analyse de l'effet d'évapotranspiration des plantes du MV qui contribue à la régulation de la température ambiante en refroidissant l'air à travers le processus de transpiration végétale et donc à l'amélioration du confort thermique ;
- Calcul du confort en utilisant la méthode PPD/ PMV et l'équation de Fanger.

Phase III : Implication d'occupants et modifications

- Collecte de feedbacks auprès d'occupants du bureau (4) : commentaires sur le confort thermique et leur perception du mur vert ;
- Proposition d'ajustements et modifications pour optimiser la conception du mur vert, son emplacement ou ses caractéristiques notamment thermiques, afin d'atteindre les objectifs de confort thermique et d'efficacité énergétique souhaités.

1. Informations sur la chambre climatique du Laboratoire Jacques Geelen

Le laboratoire Jacques Geelen est composé de 5 zones thermiques : une annexe, une réserve, une zone buffer avec en son centre une chambre climatique et un bureau/ salle technique. Les zones qui nous concernent dans le cadre du projet sont la chambre climatique et la zone buffer. La chambre climatique mesure généralement 20 m² au sol et possède un volume de 50 m³. Au début de l'expérience, les murs de la chambre climatique étaient recouverts d'aluminium pour permettre à l'équipe SAM de mesurer la présence de VOC, de PM2.5, de moisissures et d'aldéhydes sans que ceux-ci ne se dissipent à travers la paroi, ne collent à la paroi ou qu'il n'y ait des échanges avec le buffer. Cela modifiait le volume d'air de la pièce qui faisait 17,74 m² au sol avec un volume total de 46,65 m³. La paroi de la chambre climatique est composée d'une couche d'OSB (1 cm), d'un pare-vapeur (moins d'1 mm), d'une couche d'isolant (laine de roche ; 14 cm), d'une autre couche d'OSB (1 cm), d'une membrane pare-pluie (moins d'1 mm), d'une lame d'air de 1 cm et d'une couche de bardage extérieur en bois de 2 cm.

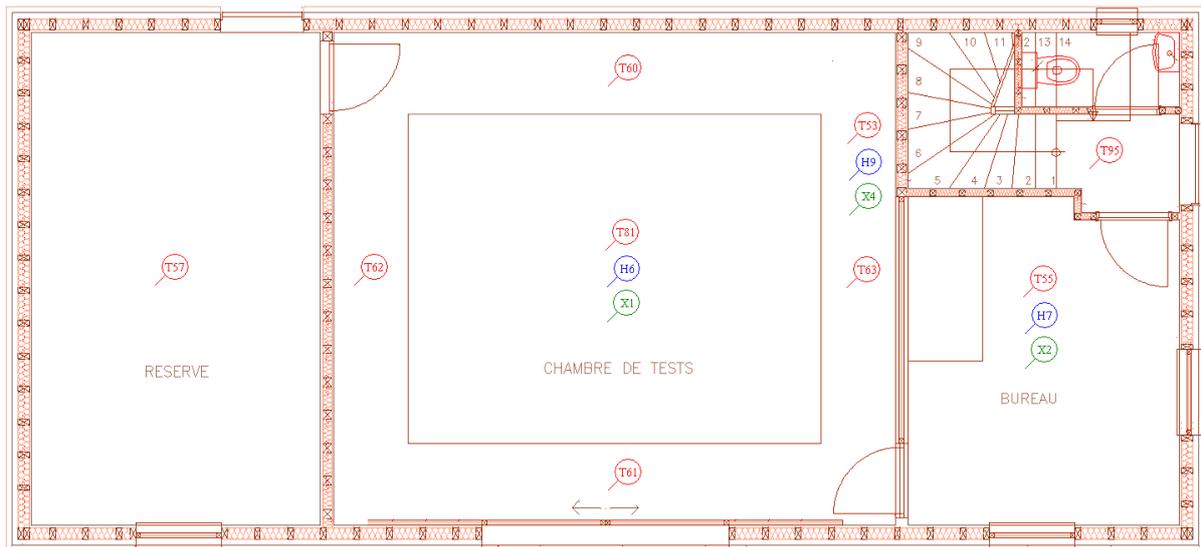


Figure 4: Schéma du Laboratoire Jacques Geelen

Le FOG est équipé de plusieurs capteurs de température, d'humidité et de CO₂, de systèmes de ventilation, de chauffage, de refroidissement et d'humidification. La chambre climatique possède un débit d'air de 21 m³/h avec la ventilation et de 2 m³/h sans ventilation. La vitesse de l'air dans la chambre climatique varie entre 0,1 et 0,15 m/s en fonction de l'utilisation du système de climatisation et de l'utilisation du plafond froid. Le système de ventilation fonctionne en circuit fermé ; il n'y a aucune entrée d'air extérieur et la puissance du ventilateur entre le buffer et la chambre climatique est de 14 W.



Figure 5: Système de ventilation

Le système de refroidissement est assuré par compresseur « Bitzer ». Le chauffage est assuré par des résistances électriques situées dans le plafond. L'humidification de la chambre climatique est assurée par l'humidificateur situé dans le système de conditionnement d'air, c'est une « humidification chaude » (vapeur) qui apporte beaucoup de chaleur. La déshumidification est assurée par compresseur « Bitzer » ; le système de refroidissement déshumidifie également la chambre climatique. L'éclairage dans la chambre climatique est assuré par 4 tubes néons.

La chambre climatique et le FOG sont équipés de plusieurs capteurs permanents : capteurs thermiques (température de l'air, température résultante), capteurs de CO₂, capteurs d'humidité relative, simulateur d'occupation (résistance thermique), capteurs du débit d'eau,

capteurs de la pression atmosphérique et des capteurs de flux thermique (fluxmètre). Il y a au total 94 capteurs dans le FOG, dont 54 sont utilisés dans le cadre de ce projet à savoir 49 pour la température, 2 pour l'humidité, 1 pour le CO2 et 2 débitmètres (voir annexe 1 pour liste détaillée et emplacement des capteurs).

Dans le cadre du projet Green4Indoor-Wallonia, 2 murs verts de 60 kg/m² chacun (quand ils sont humides) ont été installés dans la chambre climatique. Chaque mur vert fait 140 x 210 cm de dimension. Ils sont fixés directement sur le mur en OSB. Le mur est composé de 10 plantes dont 80 % sont des plantes avec des propriétés de purification de l'air et 20 % sont des plantes décoratives. Les plantes choisies sont principalement des plantes provenant de régions tropicales chaudes et humides (Amérique du Sud, Amérique centrale, Afrique tropicale, Asie du Sud-Est, Afrique occidentale) à savoir :

Bégonia rex « Alaska creek »	Dracaena fragrans
Epipremnum aureum	Chlorophytum comosum « Ocean »
Aglaonema commutatum « silver bay »	Chamaedorea elegans
Hedera helix « Pittsburgh »	Nephrolepis exaltata « Bostoniensis »
Spathiphyllum wallisii « sensation »	Tradescantia zebrina

Tableau 3: Liste des plantes du mur végétal (SOUND ECOLOGY)



Figure 6: Photo du mur végétal intérieur

Les caractéristiques des différentes plantes utilisées dans ce mur vert sont résumées en annexe 3 sous forme de fiches.

L'éclairage qui alimente les plantes est assuré par 2 lampes UV de 50 W chacune (modèle : FLORALED, gamme X-WALL-T50 Pro- Spot 50 W), qui sont allumées pendant 10h/jour. Les lampes sont allumées et éteintes grâce à une minuterie fixée aux horaires de bureau de 7h à 17h.

Le facteur de surface du MV qui représente la surface totale de végétation (5,88 m²) par rapport à la surface du mur (12,5 m²) est de 47 %.

2. Définition des scénarios

Les scénarios sont définis pour le système composé de la base de données météo (Arlon 2018), d'un ordinateur et de la chambre climatique. Chaque scénario a été précédé par une mise en régime du système durant 3 jours et obtenue en fixant des températures dans la chambre et dans le buffer pour l'été respectivement de 24 et 35°C et pour l'hiver de 21 et 2°C. Après la mise en régime, l'évolution des températures, de l'humidité et la consommation d'énergie ont été relevées sur une période d'une semaine (168 h).

Les différents scénarios sont synthétisés dans le schéma ci-dessous :

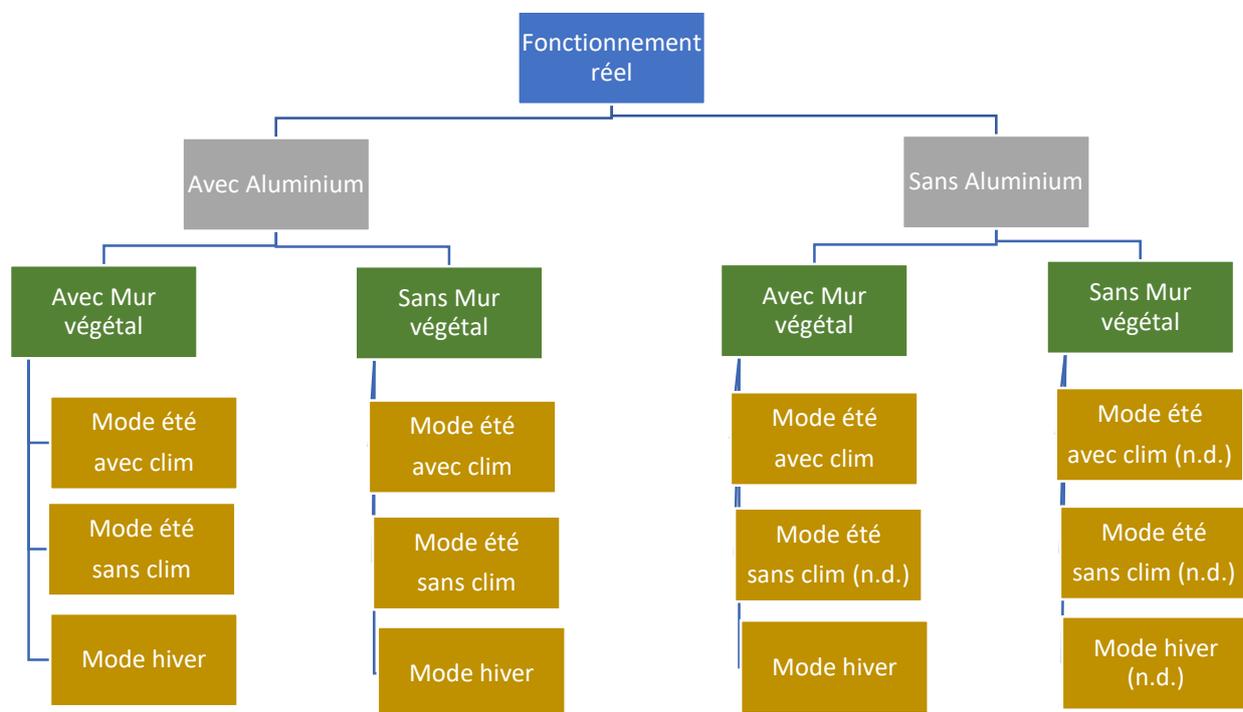


Figure 7: Schéma des différents scénarios (création personnelle)

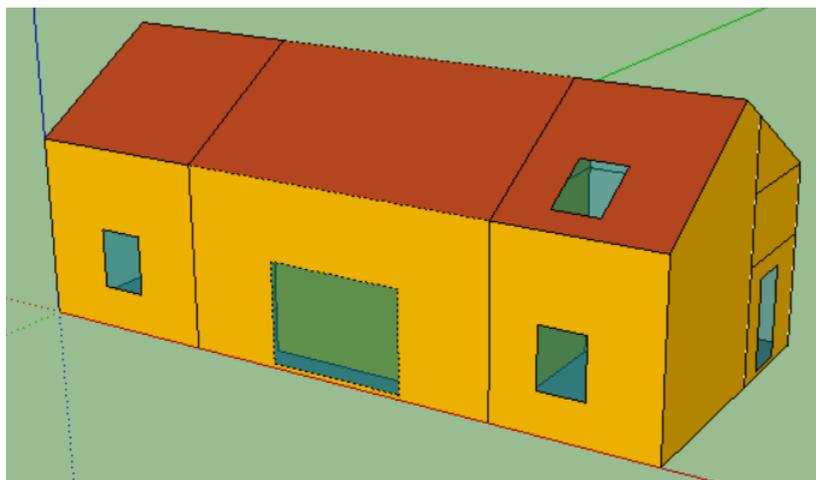
La répétition des 6 scénarios après l'enlèvement du ruban adhésif en aluminium n'a pu être réalisée que pour le cas avec MV en été avec climatisation et en hiver.

3. Prises de mesures/ collecte de données/ Instruments (capteurs)

Afin de mesurer les déperditions de chaleur à travers la paroi et les échanges thermiques entre la chambre climatique et le buffer, des fluxmètres ont été placés sur la face intérieure et extérieure de la chambre climatique. Les fluxmètres sont de modèle EKO HF-10S et sont calibrés par EKO. Ils ont une épaisseur de 0,5 mm, et une longueur x largeur de 100 x 100 mm. La sensibilité de chaque capteur est de $12 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, leur résistance thermique est de $0,0016 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ et chaque capteur pèse 40 g. Ils ont un temps de réponse de 25 secondes. Pour installer les fluxmètres, un trou de la taille des capteurs a été découpé dans l'aluminium, les capteurs ont ensuite été collés contre le mur en OSB avec du ruban adhésif en aluminium. Un isolant a été placé entre les câbles du capteur (au point de contact avec le carré noir et les câbles) avant d'être recouvert entièrement par le ruban adhésif. Une sonde de température a également été placée à côté du fluxmètre, elle aussi collée avec le ruban adhésif en aluminium. Dans la chambre climatique, 1 seul capteur a été posé. Le capteur est composé d'un empilement de cellules positives (+) et négatives (-). La face positive (+) mesure la température intérieure et la face négative (-) mesure la température extérieure. Il y a donc ainsi une mesure du flux de chaleur qui traverse la paroi et une mesure des différences de températures.

4. Modèle TRNSYS (SketchUp, Simulation Studio, TRNBuild)

Afin de modéliser un bureau, le laboratoire Jacques Geelen a été utilisé. Pour cela, 8 zones thermiques ont été créées sur TRNSYS 3D. Leurs dimensions sont fournies en annexe 1. Les « adjacences » et les « Virtual surfaces » ont ensuite été définies entre les différentes zones thermiques (voir annexe 1). La « Technical_Room » étant en contact avec l'extérieur et la zone « Buffer », elle possède une construction de paroi définie comme « EXT_WALL » et une autre construction de paroi définie comme « ADJ_WALL ». Toutes les parois de la zone « Chambre_Climatique » sont considérées comme adjacentes au « Buffer » car il s'agit de zones thermiques différentes. Les zones « Staircase0 », « Staircase1 » et « Staircase2 » sont séparées par des « Virtual Surface », ce qui signifie que ces trois zones doivent être considérées comme étant une seule zone thermique car elles possèdent le même volume d'air partagé.



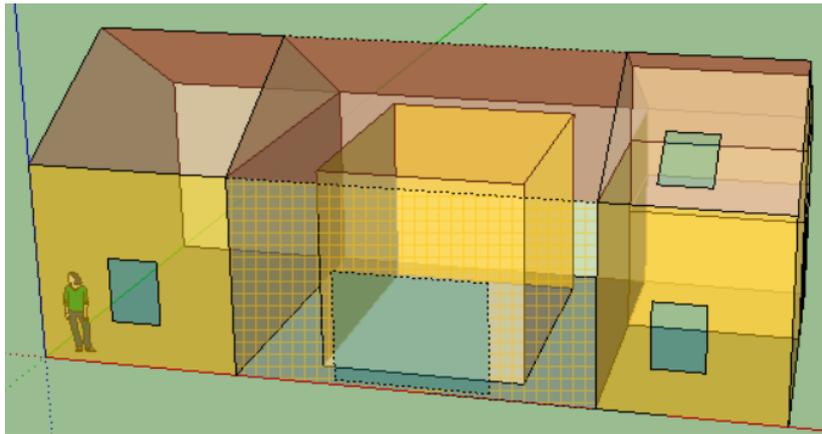


Figure 8: Modèle du Laboratoire Jacques Geelen (création personnelle sur SketchUp)

Une fois les adjacences définies, le document a été exporté vers TRNBUILD et les couches ont été définies dans le « Layer Type Manager » puis combinées ensemble dans le « Wall Type Manager » afin de composer la paroi.

N°	Layer type	Building	Conductivité (kJ/h*m*K)	Capacité (kJ/kg*K)	Densité (kg/m³)	Épaisseur (m)	U (W/m² K)
1	MUR_VERT	Massive layer	2,18556	4,186	997	0,100	6,07
2	MUR_OSB	Massive layer	0,468	1,88	650	0,010	13
3	PARE_VAPEUR	Massive layer	0,108	1,8	300	0,001	30,03
4	LAINE_DE_ROCHE	Massive layer	0,144	1,03	50	0,140	0,29
5	MUR_OSB	Massive layer	0.468	1,88	650	0,010	13
6	LAME_DAIR	Massive layer	0,09	1,005	1,204	0,010	2,5
7	BARDAGE_EXT	Massive layer	0,54	2,5	450	0,020	7,5

Tableau 4: Layer Type Manager (création personnelle)

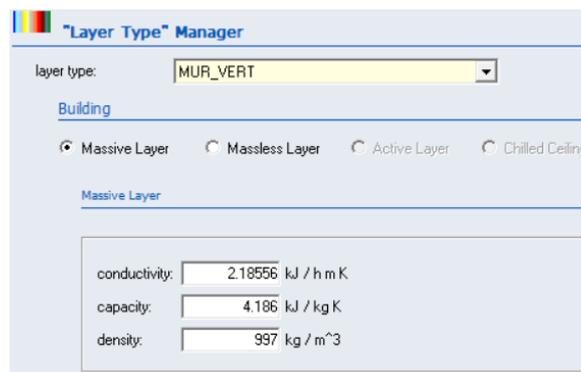


Figure 9: Exemple de composition de couche dans le Layer Type Manager (création personnelle sur TRNBuild)

Dans le « Layer Type Manager », le mur végétal est considéré comme un mur d'eau car la sphaigne qui est une couche poreuse est imbibée d'eau. En effet, elle peut retenir jusqu'à 20 fois sa masse en eau. En moyenne, 100 g de sphaigne sèche absorbent 1000 à 1500 g d'eau.

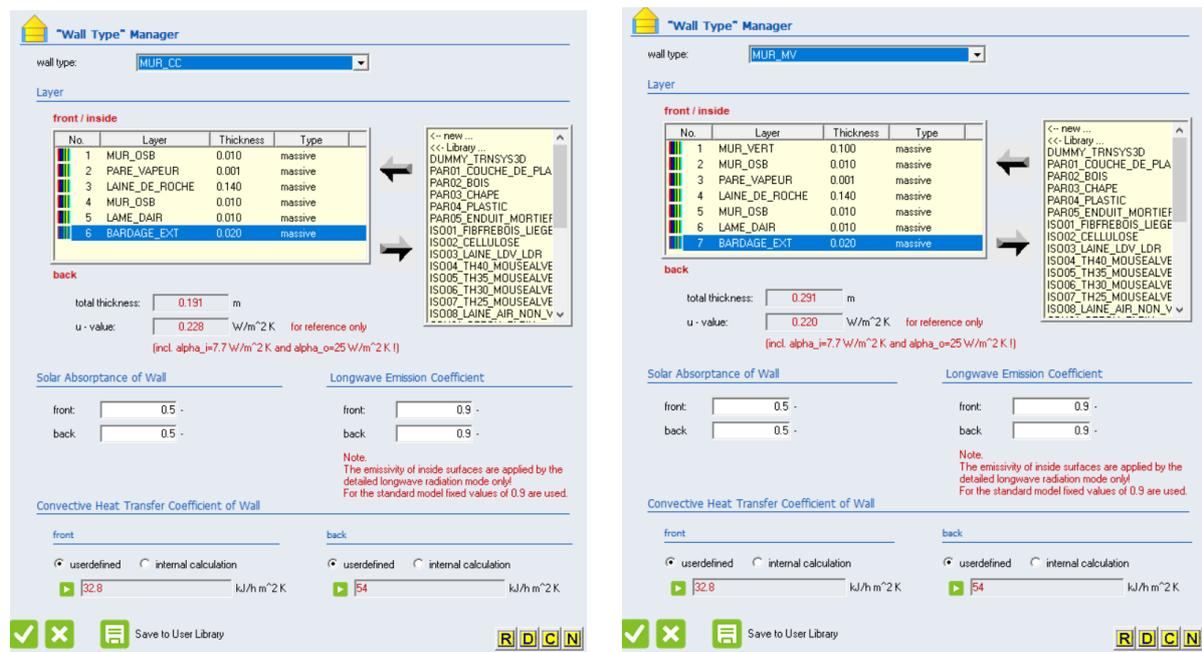


Figure 10: Wall Type Manager (création personnelle sur TRNBuild)

Deux types de « Wall type » sont définis : un avec la présence du MV pour la façade exposée au Sud (S_317_90) et un sans la présence du MV pour les autres façades, d'orientations (H_0_0), (W_47_90), (N_137_90), (E_227_90). En bas du « Wall Type Manager », le coefficient d'absorption solaire est fixé à 0,5 ; le coefficient d'émission des ondes longues est fixé à 0,9 et le coefficient de transfert de chaleur convectif de la paroi est fixé à 32,8 kJ/h*m²*K à l'avant et à 54 kJ/h*m²*K à l'arrière par défaut. Après avoir composé les différents types de murs, ceux si sont attribués à différentes « zones » avec différentes « orientations » et différents « airnodes ».

Afin de simplifier la modélisation du Laboratoire Jacques Geelen, seule la chambre climatique a été considérée pour la suite des mesures, notamment car les autres zones thermiques ne sont pas prises en compte dans ces mesures et car la zone « Buffer » est considérée comme reprenant les conditions atmosphériques extérieures.

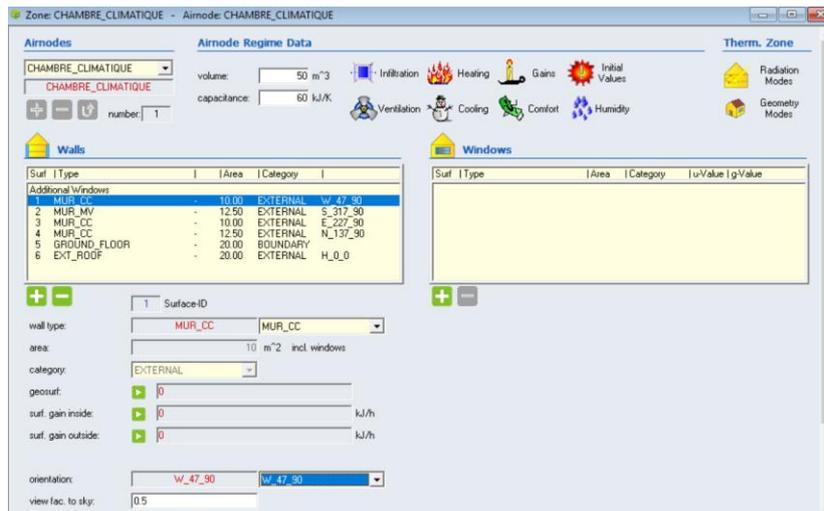


Figure 11: Détails de la zone et de l'airnode CHAMBRE_CLIMATIQUE (création personnelle sur TRNBuild)

Suite à la construction de la zone et des différents types de murs, les autres paramètres ont été ajoutés. Le « geosurf » qui représente la fraction du rayonnement direct total entrant dans la zone et frappant la surface reste à 0 et le « view factor to sky » est fixé à 0,5 pour les murs verticaux et à 1 pour les murs extérieurs. Dans les « Inputs », la température du sol « T_SOL » a été ajoutée parmi les « user defined inputs ».

Enfin, les différents systèmes ont été ajoutés au modèle. Pour l'infiltration, un taux de changement de l'air de $0,6 \text{ h}^{-1}$ est considéré en se basant sur les expériences précédentes avec la chambre climatique. Pour la ventilation, un taux de renouvellement de l'air de $0,6 \text{ h}^{-1}$ est considéré conformément aux règles pour la qualité de l'air intérieur dans les locaux de travail. La température du flux d'air est définie comme « outside » et l'humidité de l'air est définie comme « relative humidity » et comme venant de « outside ». La température dans le « Heating Type Manager » reçoit un « set temperature » de 21°C .

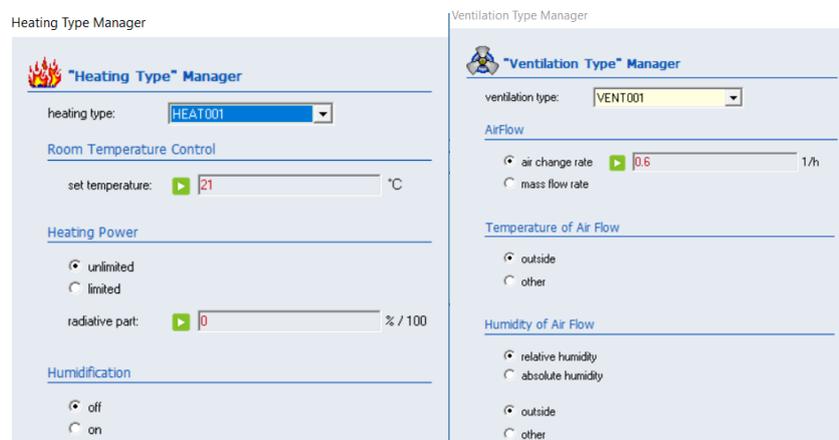


Figure 12: « Heating Type Manager », « Ventilation Type Manager » (création personnelle sur TRNBuild)

Pour le « Schedule », un horaire journalier a été créé pour définir l'occupation du bureau. Celui-ci est occupé pour une durée de 10 h/jour de 7 à 17 heures. Ceci permet de calculer les gains internes de chaleur liés à l'occupation.

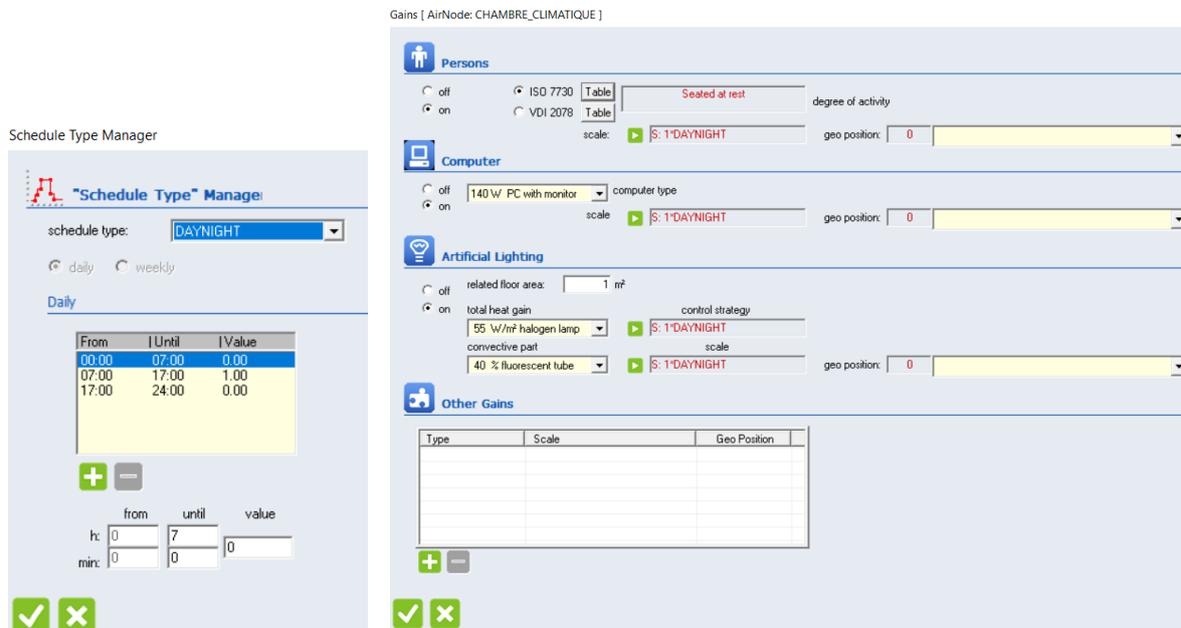


Figure 13: Schedule Type Manager pour les gains internes de la chambre climatique (création personnelle sur TRNBuild)

Parmi les gains internes, il y a 1 occupant. Suivant la Norme ISO-7730, il est considéré comme assis à un ordinateur avec son moniteur de 140 W. L'éclairage est également considéré ici avec 55 W/m² pour chacune des quatre lampes halogènes. Pour le « Comfort Type Manager », le facteur d'habillement des occupants du bureau est considéré à 1 clo, le taux métabolique est de 1 met, il n'y a pas de travail extérieur et la vitesse de l'air est de 0,1 m/s.

Avant de connecter le bâtiment dans « simulation studio », les données de sortie « outputs » TAIR (température de l'air), TOP (température opérative), Qheat (demande de chaud), Qcool (demande de froid), PMV (Predicted Mean Vote), PPD (Predicted Percentage Dissatisfied), QVENT (gains d'énergie de ventilation), QSENS (chaleur sensible) et RELHUM (Humidité relative) sont sélectionnées. Le logiciel TRNBuild produit un tableau de synthèse SUMMARY BAL fournissant les bilans énergétiques (Energy Balance) par zone thermique (voir Annexe 1).

Afin d'utiliser le bâtiment (Type 56) dans Simulation Studio, il doit être connecté à un processeur météo permettant d'importer les données sous forme de document « .txt » (Type 9e et Type 16c), un type qui se charge de l'humidité et de l'enthalpie (Type 33e), un processeur de rayonnement (Type 69b), deux plotters/printer (Type 65d) et un type 77 pour les caractéristiques et la température du sol.

Pour les données météo, 3 types de données ont été utilisées pour réaliser les tests de confort et calculer les demandes de chaud et de froid.

- Les données réellement utilisées lors des tests de confort thermique dans le laboratoire Jacques Geelen qui correspondent aux températures hivernales et estivales de l'année 2018 ;
- Les prévisions futures climatiques (XMY) de Sébastien Doutreloup pour la période 2030 – 2050 ;
- Les prévisions futures climatiques (HWE-all) de Sébastien Doutreloup pour la période 2030 – 2050.

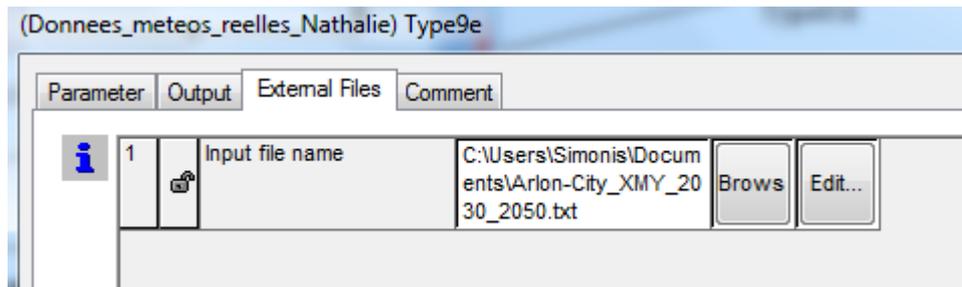


Figure 14: Importation des données météo de Sébastien Doutreloup

Ces données ont ensuite été reliées au modèle de la chambre climatique et le Type 56 (bâtiment) a été relié au Type 65d (Online plotter without file), (voir annexe 1).

5. Données météo de Sébastien Doutreloup/ prévisions futures

Les fichiers météo finaux sélectionnés pour la modélisation TRNSYS du laboratoire Jacques Geelen étaient le fichier Arlon-City_XMY_2035-2050_ssp585_MAR-MIR_TTbased.csv et le fichier Arlon-City_HWE-all_2035-2050_ssp585_MAR-MIR.csv. Ceux-ci ont été comparés aux données météorologiques de deux semaines extrêmes (une en hiver et une en été) qui ont été mesurées en 2018 par la station météorologique située au Campus-Environnement à Arlon. Afin de pouvoir exploiter ces fichiers, chacun d'entre eux a d'abord été converti en fichier Excel. Sur le fichier Excel, la première colonne des « dates » a été déplacée vers la fin du tableau, afin de ne pas être lue (seule les 5 premières colonnes sont lues par le Type 16). Le format des valeurs a été modifié afin qu'Excel puisse reconnaître ces valeurs comme étant des nombres, mais également afin de retirer les valeurs non-utilisables, de supprimer les lignes et les espaces vides et d'aligner les données (ce qui est important pour la version texte du fichier). L'ordre des données a également été modifié afin de les avoir classées dans l'ordre suivant : date (donnée par un simple nombre d'ordre de classement), « dry bulb temperature » (°C), « relative humidity » (%), « atmospheric pressure » (qui a dû être divisé par 100 pour avoir la valeur en hPa) et « global radiation » (Wh/m²). Une fois toutes ces modifications réalisées, les différents fichiers ont été convertis en fichier « .txt » afin de pouvoir être utilisés par le Type 9e et le Type 16c. Ceux-ci sont ensuite reliés entre eux, mais également reliés au Type 33e (qui se charge du taux d'humidité et de l'enthalpie), au Type 69b (qui est un processeur de rayonnement qui se charge du « total horizontal temperature and humidity ») et deux « online plotters » (Type 65d). Les Types 16c et 69b sont également reliés au modèle du bâtiment (Type 56), qui est lui-même relié à un traceur graphique (plotter) et au Type 77 (température et caractéristiques du sol).

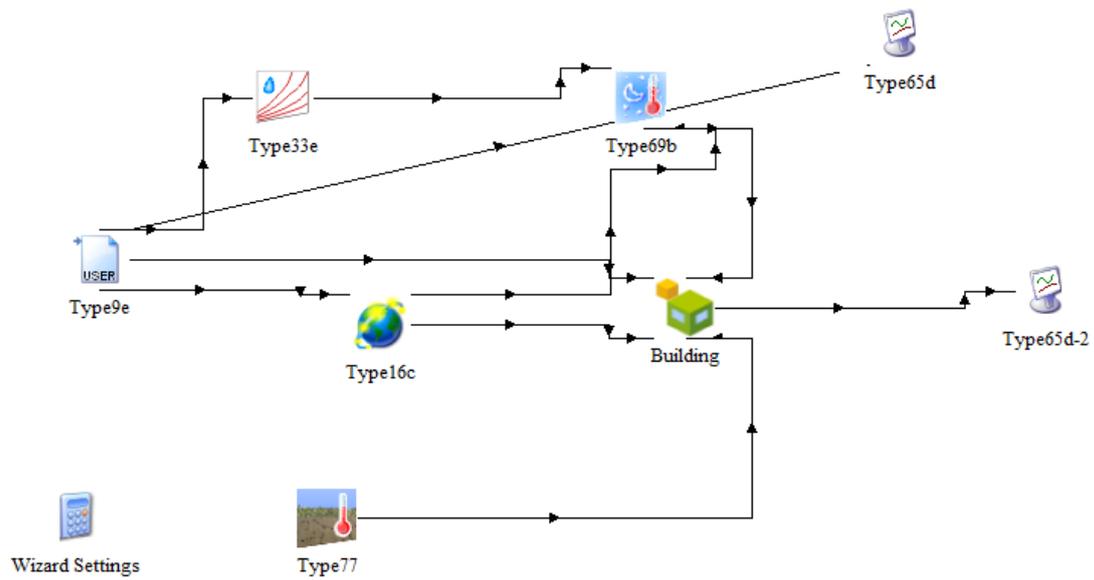


Figure 15: Modèle Simulation Studio (création Elisabeth Davin)

Les données météo en fichier texte sont ensuite introduites dans le Type 9e et deux graphiques en sont extraits. Un des graphiques reprenant les données du Type 9e (température extérieure, humidité relative, pression atmosphérique, rayonnement solaire) et l'autre reprenant les « outputs » du type building (température de l'air dans la chambre climatique, température opérative, PMV, PPD, humidité relative dans la chambre climatique, la demande de chaud et de froid pour maintenir la température de la chambre climatique à 21°C, les besoins de ventilation et la chaleur sensible dans la pièce).

Résultats obtenus

1. Température dans la chambre climatique avant et après installation du MV

Lors des expériences, les températures dans la chambre climatique et le buffer ont pu être mesurées. Ces mesures de températures sont représentées ci-dessous sur des graphiques avec en abscisse le nombre d'heures pendant lequel la mesure a été réalisée (168 h) et en ordonnée la température mesurée. Les données du buffer (T_BUFFER) sont représentées en bleu et les données de la chambre climatique (T_CR) sont représentées en orange.

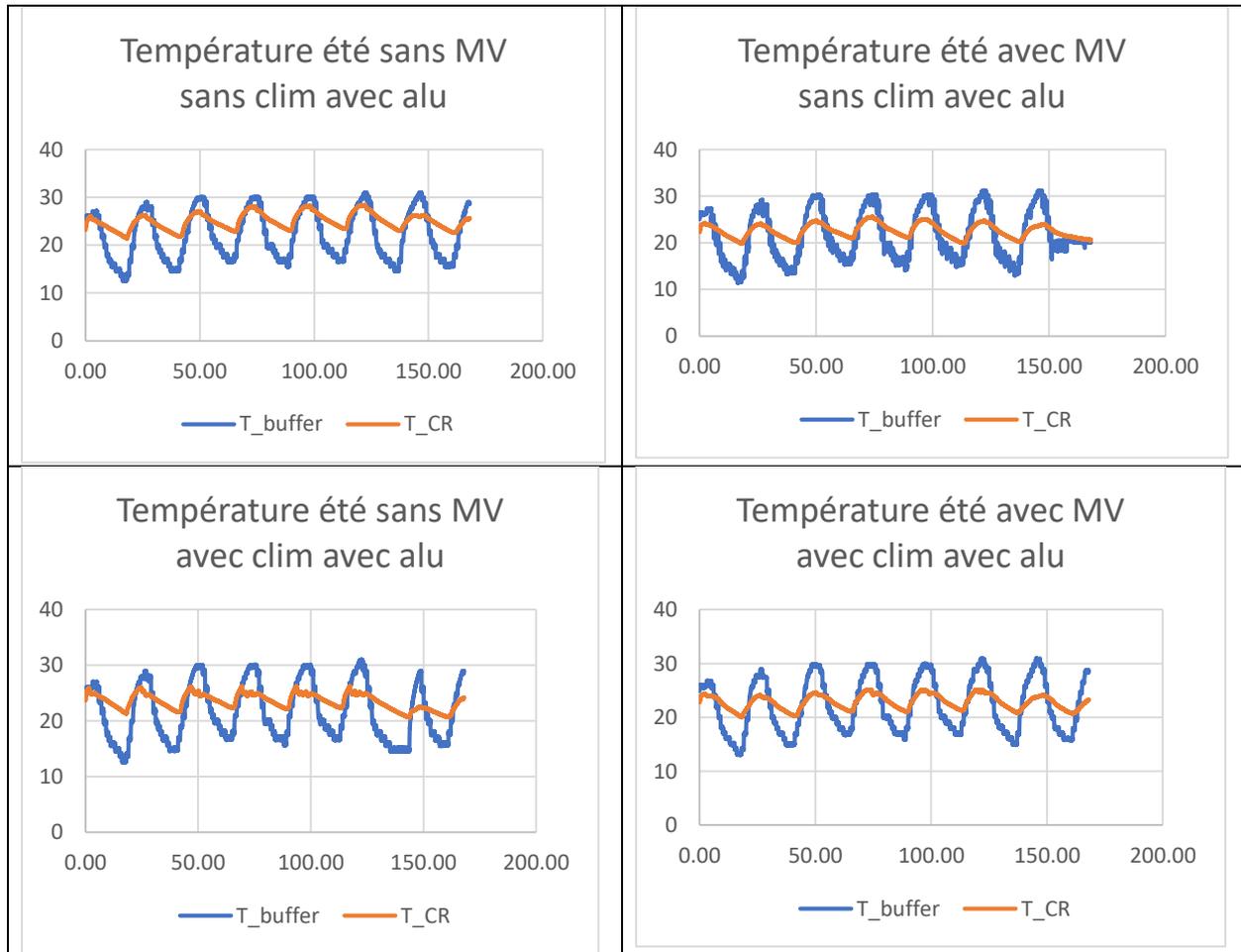


Figure 16: Températures dans le FOG en été, avec et sans climatisation, avec et sans MV

Les valeurs extrêmes et moyennes pour les températures sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Mode	Température	MIN (°C)	MAX (°C)	MOYENNE (°C)
(1) Hiver-sans MV- avec aluminium	T_BUFFER	1,47	12,32	5,5
	T_CR	14,75	21,31	20,55
(2) Eté-sans MV-sans clim-avec aluminium	T_BUFFER	12,45	31,05	22,15
	T_CR	21,38	28,41	24,99

(3) Eté-sans MV-avec clim-avec aluminium	T_BUFFER	12,45	31,02	21,64
	T_CR	20,56	26,27	23,52
(4) Hiver-avec MV- avec aluminium	T_BUFFER	2,46	12,36	5,68
	T_CR	15,36	21,55	20,42
(5) Eté-avec MV-sans clim-avec aluminium	T_BUFFER	11,37	31,3	21,67
	T_CR	19,76	25,63	22,53
(6) Eté-avec MV-avec clim-avec aluminium	T_BUFFER	12,98	31,02	22,24
	T_CR	19,99	25,19	22,84

Tableau 5: Températures dans la chambre climatique et le buffer

La comparaison des données pour les différents scénarios (avec et sans le MV) montre que la température moyenne dans la chambre climatique a baissé en présence du MV. En hiver, la température dans la chambre climatique a baissé de 0,6 %. En été sans climatisation, la température dans la chambre climatique a baissé de 9,8 % avec l'ajout du MV. En été avec un système de climatisation, la température dans la chambre climatique a baissé de 2,9 % après l'ajout du MV. La présence du mur végétal n'a eu qu'un faible impact sur la température dans le buffer (augmentation de la température du buffer de 2-3 % en hiver et en été sans climatisation et baisse de 2 % en été sans climatisation). La variation de ces températures peut être attribuée à un autre facteur que la présence ou non du MV.

Variations des températures mesurées		
(1) et (4) T_BUFFER	0,03	3,27 %
(1) et (4) T_CR	-0,006	-0,63 %
(2) et (5) T_BUFFER	-0,022	-2,17 %
(2) et (5) T_CR	-0,098	-9,84 %
(3) et (6) T_BUFFER	0,028	2,77 %
(3) et (6) T_CR	-0,029	-2,89 %

2. Taux d'humidité dans la chambre climatique et apports d'humidité par le MV

Lors des expériences, les taux d'humidité dans la chambre climatique et le buffer ainsi que les apports d'humidité par le mur végétal ont pu être mesurés. Ces mesures d'humidité sont représentées ci-dessous sur des graphiques avec en abscisse le nombre d'heures pendant lequel la mesure a été réalisée (168 h) et en ordonnées le taux d'humidité. Les données du buffer (H9) sont représentées en orange et les données de la chambre climatique (H6) sont représentées en bleu.

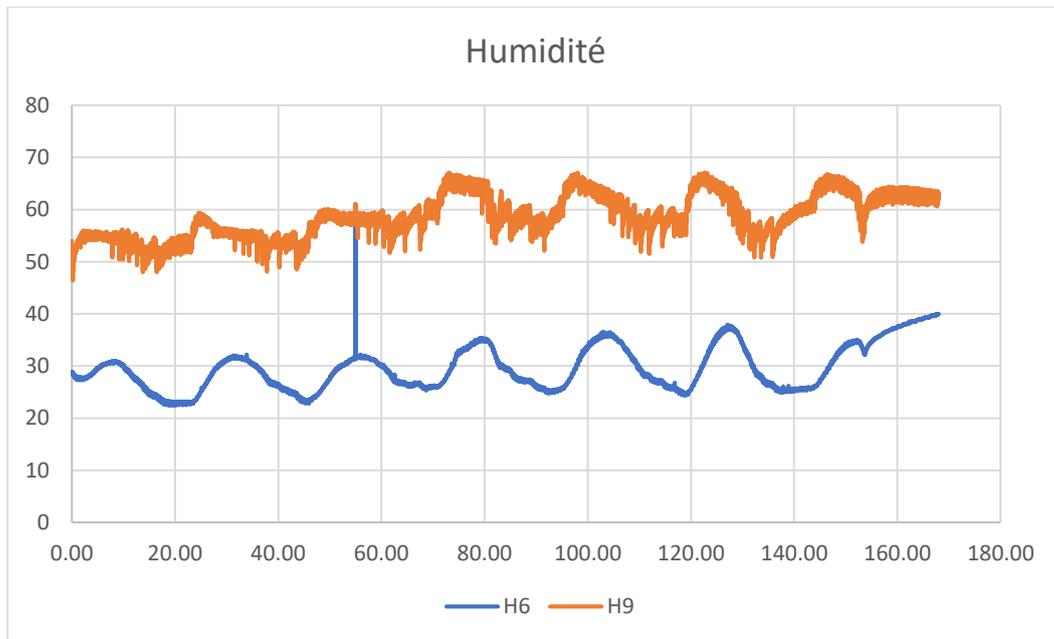


Figure 17: Taux d'humidité dans la CC et le buffer en hiver sans MV avec aluminium

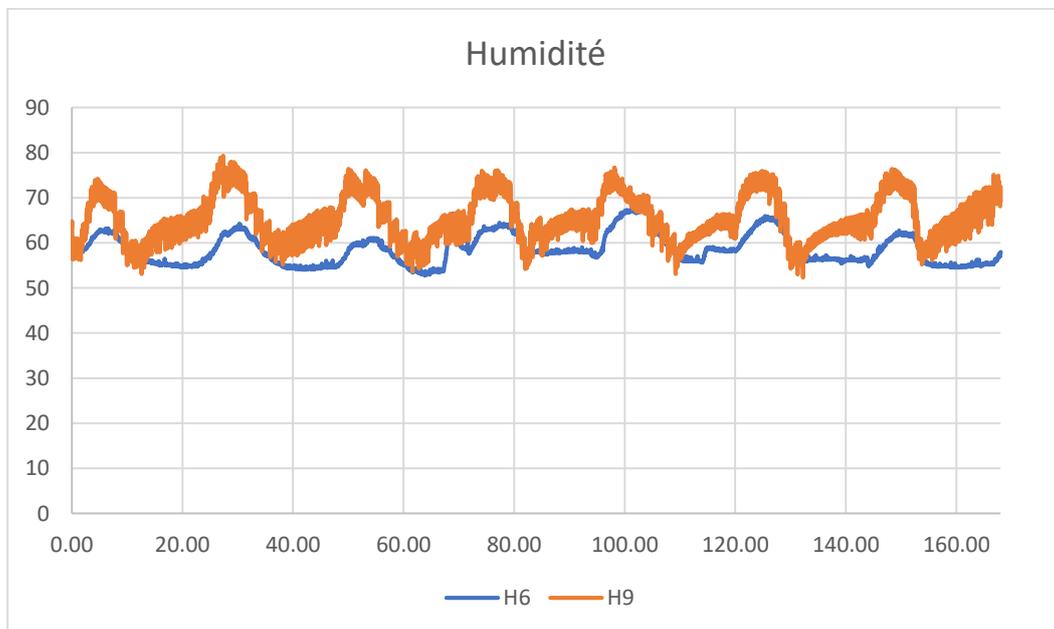


Figure 18: Taux d'humidité dans la CC et le buffer en hiver avec MV avec aluminium

Les valeurs extrêmes et les moyennes des taux d'humidité relevés sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Mode	Capteur Humidité	Humidité MIN (%)	Humidité MAX (%)	Humidité Moyenne (%)
(1) Hiver-sans MV- avec aluminium	H6	22,4	59,0	29,6
	H9	46,4	67,1	58,8
(2) Eté-sans MV- sans clim- avec aluminium	H6	32,5	53,6	44,2
	H9	28,1	71,7	47,4
(3) Eté-sans MV- avec clim- avec aluminium	H6	37,9	54,5	45,7
	H9	29,3	73,7	47,4

(4) Hiver-avec MV- avec aluminium	H6	52,8	67,7	58,5
	H9	52,3	79,3	65,4
(5) Eté-avec MV- sans clim- avec aluminium	H6	64,9	79,4	71,7
	H9	40,1	73,3	52,4
(6) Eté-avec MV- avec clim- avec aluminium	H6	64,1	76,8	70,5
	H9	39,9	75,8	53,3

Tableau 6: Taux d'humidité MIN, MAX et MOYEN dans la chambre climatique et le buffer pour les différents scénarios

En comparant les données pour les différents scénarios (modes ; avec et sans le MV), il est possible de constater qu'en hiver avec l'ajout du mur végétal, le taux d'humidité moyenne dans la chambre climatique (H6) a augmenté de 97,3 %. En été sans climatisation, le taux d'humidité a augmenté de 62,2 % dans la chambre climatique avec l'ajout du MV. En été, avec climatisation, le taux d'humidité dans la chambre climatique a augmenté de 54,4 % après l'addition du MV. La présence du MV n'a eu qu'un faible impact d'environ 10 % sur le taux d'humidité dans le buffer.

Variation des Taux d'Humidité	
(1) et (4) H6	97,3 %
(1) et (4) H9	11,0 %
(2) et (5) H6	62,2 %
(2) et (5) H9	10,6 %
(3) et (6) H6	54,4 %
(3) et (6) H9	12,2 %

3. Échanges thermiques à travers la paroi en régime stationnaire

La densité de flux (q) a été calculée par l'équation : $U \times (\vartheta_i - \vartheta_e) = (1/ R_T) \times (\vartheta_i - \vartheta_e)$

Avec les résistances thermiques des couches qui sont égales à $R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1} + R_n$

	R	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Résistance (m²K/W)
Mur végétal	R1	0,10	0,6071	0,1647
OSB (intérieur)	R2	0,01	0,13	0,0769
Pare-Vapeur	R3	0,001	0,03	0,0333
isolant (laine de roche)	R4	0,14	0,04	3,5
OSB	R5	0,01	0,13	0,0769
Membrane pare-pluie	R6	0,001	Valeur négligeable, pas prise en compte	Valeur négligeable, pas prise en compte
Lame d'air	R7	0,01	0,025	0,4
Bardage (extérieur)	R8	0,02	0,15	0,1333
Somme		0,292	1,112	4,385

Tableau 7: Composition des couches de la paroi du laboratoire Jacques Geelen

On a :

$$U = 1 / (R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1} + R_n + R_{se}) = 1 / (0,13 + 0,0769 + 0,0333 + 3,5 + 0,0769 + 0,4 + 0,1333 + 0,04) = 0,228 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K (sans le MV)}$$

$$U = 1 / (R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1} + R_n + R_{se}) = 1 / (0,13 + 0,1647 + 0,0769 + 0,0333 + 3,5 + 0,0769 + 0,4 + 0,1333 + 0,04) = 0,219 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K (avec le MV)}$$

$$\text{Densité de flux (q)} = U \times (\vartheta_i - \vartheta_e)$$

$$\text{Mode hiver (sans MV)} = 0,2277 \times (21 - 2) = 4,33 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Mode été (Sans MV)} = 0,2277 \times (26 - 35) = -2,05 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Mode hiver (avec MV)} = 0,2195 \times (21 - 2) = 4,17 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Mode été (avec MV)} = 0,2195 \times (26 - 35) = -1,98 \text{ W/m}^2$$

Dans les conditions de la mise en régime, la densité de flux diminue de 3,7 % en présence du MV en hiver et de 3,4 % en été.

4. Calcul des indices de confort dans la chambre climatique (CBE Thermal Comfort tool, équation de Fanger, Tests occupants)

Lors des expériences, 3 méthodes différentes sont utilisées pour mesurer le confort thermique dans la chambre climatique. La première méthode consiste à utiliser le « CBE Thermal Comfort tool » développé par le « Center for the Built Environment » de l'UC Berkeley (Université de Californie à Berkeley), la deuxième à faire évaluer le confort thermique par des occupants et la dernière à calculer le confort thermique à partir des données mesurées par tous les différents capteurs avec l'équation de Fanger.

Le CBE Thermal Comfort tool calcule le confort thermique en régime stationnaire. Les données utilisées pour réaliser les calculs correspondent donc aux températures, à la vitesse de l'air, à l'humidité relative, au taux métabolique et au niveau d'habillement supposés dans le « scénario » pour les mises en régime du laboratoire.

Mode	Température opérative (chambre climatique)	Vitesse de l'air	Humidité relative	Taux métabolique	Niveau d'habillement	PMV	PPD
Hiver	21°C	0,1 m/s	30 %	1 met	0,57 clo	-1.37	44 %
Eté	25°C	0,1 m/s	50 %	1 met	0,57 clo	0.01	5 %

Tableau 8: Calcul du confort thermique

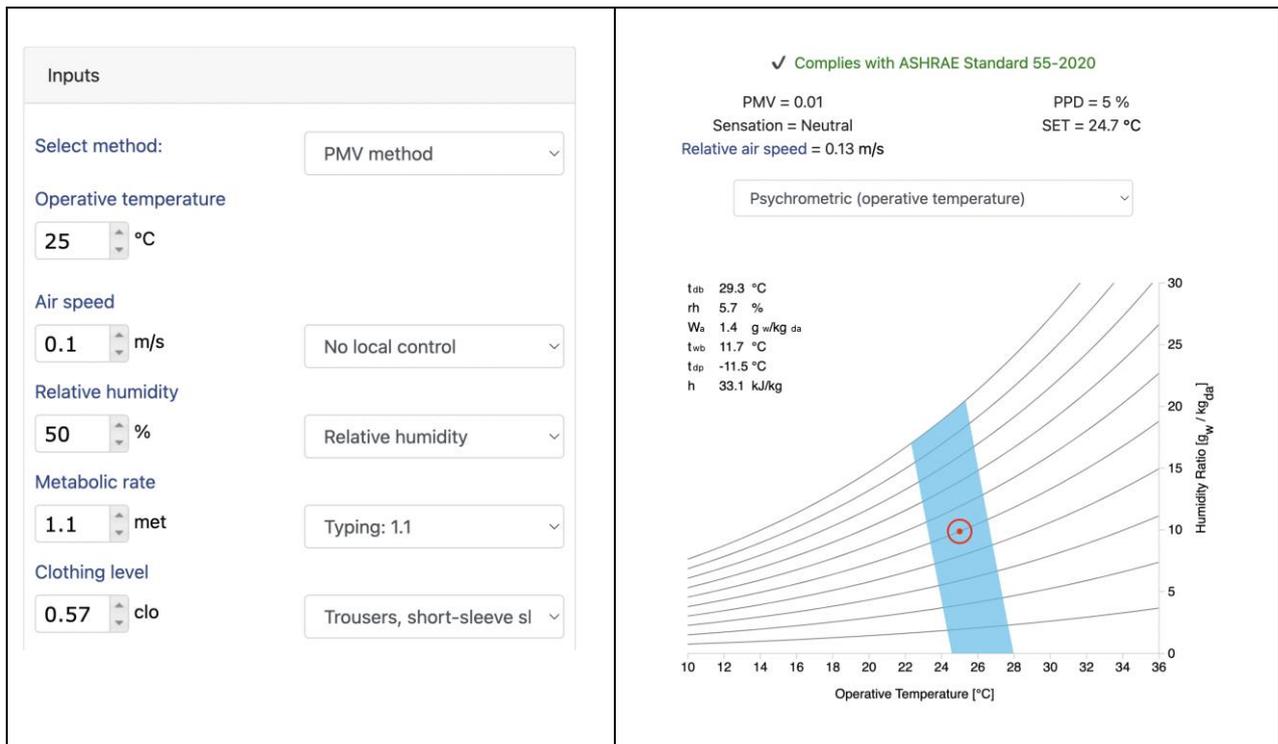


Figure 19: Évaluation du confort thermique par le CBE Thermal Tool en mode été



Figure 20: Évaluation du confort thermique par le CBE Thermal Tool en mode hiver

Selon ces figures, l’outil de calcul évalue le confort thermique de la chambre climatique comme étant légèrement froide en hiver avec le niveau d’habillement et les autres conditions indiquées et comme étant neutre en été. En hiver, l’outil affiche un pourcentage de personnes insatisfaites de 44 % (un peu moins de la moitié des personnes dans la pièce) et en été, il affiche un pourcentage de 5 % de personnes insatisfaites. Selon Roulet (2010) dans sa comparaison entre PMV et PPD, même en situation idéale avec un PMV de 0, le pourcentage

de personnes insatisfaites par le confort thermique dans une pièce sera toujours égal ou supérieur à 5 %. Le confort thermique en été peut donc être considéré comme optimal.

Pour la mesure du confort thermique évalué par des occupants, 4 étudiants (3 hommes, 1 femme) ont évalué le confort thermique dans la chambre climatique en répondant à un questionnaire. Ces 4 étudiants (tous âgés entre 25 et 27 ans) ont été sélectionnés pour leur disponibilité lors de la totalité de la durée des expériences (pendant le mois de juillet). Lors de la mise en régime de chaque expérience (en mode hiver et en mode été), chaque étudiant rentrait seul dans la chambre climatique. Les mesures ayant été réalisées en été, les étudiants étaient vêtus d'un t-shirt à manches courtes, d'un pantalon jeans, de chaussures fermées avec des chaussettes et de sous-vêtements (0,57 clo au total). Chaque étudiant était assis à un bureau en bois placé au centre de la pièce avec leur ordinateur faisant face au mur végétal pendant 30 minutes. Un questionnaire de 5 questions en 3 exemplaires leur a été remis. Chaque étudiant avait pour consigne de répondre aux 3 questionnaires à 15 minutes d'intervalle. Une première fois en rentrant dans la salle, la deuxième fois au bout de 15 minutes et la troisième fois au bout de 30 minutes avant de sortir de la pièce, et ceci afin de mesurer l'évolution de la sensation de confort thermique sur 30 minutes. Selon la Norme ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) dans leur rapport sur les conditions environnementales thermiques pour l'occupation humaine, « les occupants doivent avoir une résidence de plus de 15 minutes dans un espace pour s'habituer à la température ». Les questions portaient sur le confort thermique qui devait être évalué entre 1 (très froid) et 7 (trop chaud) pour garder la même échelle de mesure du confort thermique que Fanger (1982) allant de -3 (très froid) à 3 (très chaud). Il était ensuite demandé aux étudiants d'évaluer la qualité de l'air intérieur de 5 (tout à fait acceptable) à -5 (tout à fait inacceptable), le climat de travail et les conditions de travail à travers plusieurs sous questions : évaluer la température de 1 (confortable) à 7 (inconfortable), le mouvement de l'air de 1 (air stagnant) à 7 (courants d'air), la sécheresse/l'humidité de l'air de 1 (sec) à 7 (humide) et la qualité de l'air de 1 (frais) à 7 (étouffant). Les deux dernières questions portaient sur les mesures que les occupants peuvent influencer en termes de température et de ventilation/aération avec 1 qui signifie qu'ils n'exercent aucune influence et 7 qui signifie qu'ils ont un contrôle total et enfin ils devaient dire s'il y a d'autres aspects du confort thermique dans la chambre climatique qu'ils désiraient commenter. Les réponses aux questionnaires sont les suivantes (voir annexe pour tableau détaillé) :

Occupant	Confort thermique de 1 à 7		Qualité de l'air De 5 à -5		Mouvement de l'air De 1 à 7		Humidité De 1 à 7		Fraicheur de l'air De 1 à 7	
	0 min		0 min		0 min		0 min		0 min	
1 (14h42 - 15h12)	0 min	4	0 min	4	0 min	2	0 min	4	0 min	2
	15 min	4	15 min	3	15 min	2	15 min	4	15 min	2
	30 min	3	30 min	3	30 min	2	30 min	4	30 min	2
2 (15h45 - 16h15)	0 min	2	0 min	1	0 min	6	0 min	5	0 min	6
	15 min	3	15 min	1	15 min	5	15 min	5	15 min	5
	30 min	3	30 min	1	30 min	5	30 min	5	30 min	5
3 (16h19 - 16h49)	0 min	2	0 min	5	0 min	3	0 min	5	0 min	2
	15 min	3	15 min	4	15 min	2	15 min	2	15 min	2
	30 min	2	30 min	4	30 min	2	30 min	3	30 min	2
4 (14h05 - 14h35)	0 min	2	0 min	4	0 min	3	0 min	5	0 min	2
	15 min	3	15 min	4	15 min	2	15 min	4	15 min	2
	30 min	3	30 min	4	30 min	2	30 min	4	30 min	2

Tableau 9: Confort thermique évalué par les occupants en mode hiver (création personnelle)

Occupant	Confort thermique de 1 à 7		Qualité de l'air De 5 à -5		Mouvement de l'air De 1 à 7		Humidité De 1 à 7		Fraicheur de l'air De 1 à 7	
1 (16h19 - 16h49)	0 min	4	0 min	4	0 min	3	0 min	4	0 min	4
	15 min	4	15 min	3	15 min	3	15 min	4	15 min	4
	30 min	4	30 min	3	30 min	3	30 min	4	30 min	4
2 (16h12 – 16h42)	0 min	3	0 min	1	0 min	4	0 min	5	0 min	5
	15 min	4	15 min	1	15 min	4	15 min	4	15 min	4
	30 min	4	30 min	1	30 min	4	30 min	4	30 min	4
3 (-)	0 min	4	0 min	-1	0 min	1	0 min	3	0 min	4
	15 min	3	15 min	1	15 min	2	15 min	3	15 min	3
	30 min	3	30 min	2	30 min	2	30 min	3	30 min	3
4 (15h35 – 16h08)	0 min	3	0 min	5	0 min	1	0 min	2	0 min	1
	15 min	4	15 min	1	15 min	2	15 min	2	15 min	3
	30 min	4	30 min	1	30 min	2	30 min	2	30 min	2

Tableau 10: Confort thermique évalué par les occupants en mode été (création personnelle)

En régime hiver, les occupants ont trouvé le confort thermique neutre ou à peine frais dans 66 % des cas et frais dans 33 % (en **jaune**). 42 % (en **vert**) ont trouvé que l'air était relativement humide. En régime été, 67 % des occupants ont trouvé le confort neutre et 33 % à peine frais. Aucun occupant n'a signalé de niveau de confort trop chaud. 50 % (en **bleu clair**) des occupants ont trouvé que l'air était relativement sec. D'autres essais recourant à un plus grand nombre de participants sont nécessaires y compris durant l'hiver en Belgique.

La dernière méthode de calcul du confort thermique utilisée a été d'utiliser l'équation de Fanger. Selon Fanger (1982) et Roulet (2010), les individus étant assis dans la pièce et réalisant une « activité sédentaire » dégagent 70 W/m² et 126 W/personne (le métabolisme est estimé à 1,1 met pour une personne de 70 kg dont la surface du corps est de 1,8 m²). La vitesse relative de l'air mesurée dans la chambre climatique est de l'ordre de 0,1 m/s. Le niveau d'habillement est de 0,57 clo pour une tenue considérée « d'été » composée de sous-vêtements, d'une chemise/ d'un t-shirt à manches courtes, d'un pantalon long léger, de chaussettes légères et de chaussures. En été, le niveau d'habillement idéal est de 0,5 clo et de 1,0 clo en hiver pour des personnes dans un bureau. La température opérative idéale en hiver est estimée à 22,0 °C ± 1,0 et à 24,5 °C ± 1,0 en été.

Une fois ces données regroupées, elles peuvent être utilisées sur Excel pour résoudre l'équation grâce à des macros et à des itérations. Ce code développé par Elisabeth Davin (voir annexe 5), permet de calculer le PMV, PPD et Tcl en rentrant le temps, M en [Watt], W en [Watt], Ta en [°C], Tr en [°C], v en [m/s], rh en [%] et lcl (la limite de charge corporelle) en [W/m²]. Les résultats du calcul sont les suivants (les tests de confort de référence n'ayant pas encore été réalisés sans l'aluminium, les données des tests avec aluminium seront utilisées) :

TEST	PMV (moyenne)	PPD (moyenne)	Tcl (moyenne)
Mode hiver, sans MV, avec aluminium	-0,40	8,37	25,80
Mode été, sans MV, sans clim, avec aluminium	0,539	13,21	28,08

Mode été, sans MV, avec clim, avec aluminium	-0,061	8,38	26,60
Mode hiver, avec MV, avec aluminium	-0,185	6,16	26,07
Mode été, avec MV, sans clim, avec aluminium	0,338	9,67	27,11
Mode été, avec MV, avec clim, avec aluminium	0,366	9,58	27,17
Mode hiver, avec MV, sans aluminium	-0,144	5,47	26,11
Mode été, avec MV, sans clim, sans aluminium	n.d.	n.d.	n.d.
Mode été, avec MV, avec clim, sans aluminium	0,49	17,61	27,56

Tableau 11: Calcul des coefficients PMV et PPD

Ces résultats montrent que la présence du mur végétal augmente la sensation de confort dans la pièce en hiver et en été (cas sans climatisation). En été, sans MV, il y a une différence considérable entre le PPD avec et sans l'utilisation d'un système de climatisation. Cette différence de satisfaction est réduite en été avec la présence d'un MV, où la différence entre le PPD avec et sans l'utilisation d'un système de climatisation devient négligeable.

5. Besoins énergétiques de la chambre climatique

En se basant sur les résultats des tests réels dans la chambre climatique, les demandes énergétiques des résistances sur une semaine sont fournies dans le tableau ci-dessous :

Sans le mur végétal, avec l'aluminium :		
Mode	Prévisions (CH1_Demand)	Réalité (CH1_RealPwr)
Hiver	87,82 kWh	87,82 kWh
Eté sans climatisation	22,54 kWh	22,51 kWh
Eté avec climatisation	20,98 kWh	20,99 kWh

Avec le mur végétal, avec l'aluminium :				
Mode	Prévisions (CH1_Demand)	Réalité (CH1_RealPwr)	Prévisions Lampes UV (CH2_OnOff)	Réalité Lampes UV (CH2_RealPwr)
Hiver	129,04 kWh	128,90 kWh	0,097 kWh	6,71 kWh
Eté sans climatisation	16,15 kWh	16,15 kWh	0,064 kWh	4,71 kWh
Eté avec climatisation	17,20 kWh	17,19 kWh	0,072 kWh	5,24 kWh

Avec le mur végétal, sans aluminium :				
Mode	Prévisions (CH1_Demand)	Réalité (CH1_RealPwr)	Prévisions Lampes UV (CH2_OnOff)	Réalité Lampes UV (CH2_RealPwr)
Hiver	150,49 kWh	150,47 kWh	0,074 kWh	5,18 kWh

Eté sans climatisation	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Eté avec climatisation :	15,65 kWh	15,65 kWh	0,081 kWh	5,85 kWh

Tableau 12: Calcul des demandes énergétiques des résistances

CH1_Demand = Set point (demande de puissance aux résistances électriques)

CH1_RealPwr = Demande de puissance aux résistances électriques réellement mesurée

CH2_OnOff = Set point (demande de puissance aux lampes UV)

CH2_RealPwr = Puissance des lampes UV réellement mesurée

On peut vérifier que les mesures réelles correspondent bien aux prévisions sauf pour les lampes UV. En été, la présence du MV permet de réduire la consommation de 28 % sans climatisation et de 18 % avec climatisation.

6. Résultats des simulations TRNSYS

Les résultats des simulations TRNSYS réalisées avec un pas de temps de 1 h pour une durée totale de 908 heures se présentent sous deux formats :

- un tableau qui reprend le nom du dossier météo (colonne A), les valeurs minimales et maximales des différentes données météo extérieures (Graph 1 ; colonnes C à F) provenant des tableaux Excel, et les valeurs minimales et maximales des outputs du Bâtiment/Type 56 (Graph 2 ; colonnes G à O) obtenues à partir des graphiques ci-dessous ;
- des graphiques qui représentent les données météo Arlon-City_XMY_2035-2050_ssp585_MAR-MIR_TTbased.csv et Arlon-City_HWE-all_2035-2050_ssp585_MAR-MIR.csv (Graph 1), et les outputs (Graph 2) avec et sans mur végétal.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	Dossier météo et présence ou pas du MV	Valeur Maximale et minimale	Température extérieure (°C)	Humidité relative dehors (%)	Pression atmosphérique (hPa)	Radiation solaire (Wh/m2)	Température de l'air dans la chambre climatique (°C)	Température opérative dans la chambre climatique (°C)	PMV	PPD (%)	Humidité relative dans la chambre climatique (%)	QHEAT dans la chambre climatique (kJ/h)	QCOOL dans la chambre climatique (kJ/h)	QVENT dans la chambre climatique (kJ/h)	QSENS dans la chambre climatique (kJ/h)
1		MIN	-10,1	20,1	936,62	0	20	20	-1,629	44,57	10,47	1217	0	-1135	-4130
2		MOYENNE	14,32	72,57	970,11	150,9									
3	ARLON XMY avec MV	MAX	38,05	100	992,62	905,7	21	20,81	-1,368	55,15	48,45	4130	0	-328,4	-1217
4		MIN	-10,1	20,1	936,62	0	20	20	-1,629	43,24	10,47	1113	0	-1130	-4242
5		MOYENNE	14,32	72,57	970,11	150,9									
6	ARLON XMY sans MV	MAX	38,05	100	992,62	905,7	21	20,83	-1,357	59,47	50	4225	0	-332,8	-1189
7		MIN	16,31	19,08	958,99	0	20	20	-1,629	25,1	50	0	0	-76,76	-992
8		MOYENNE	26,94	53,42	971,4	270,12									
9	ARLON HWE avec MV	MAX	38,05	97,08	982,27	894,8	21	21,12	-0,99	57,9	100	992	2178	622,3	2178
10		MIN	16,31	19,08	958,99	0	20	20	-1,629	24,91	47,34	0	0	-76,76	-515,3
11		MOYENNE	26,94	53,42	971,4	270,12									
12	ARLON HWE sans MV	MAX	38,05	97,08	982,27	894,8	21	21,15	-0,96	57,9	100	766,8	2387	-622,3	2406
13															

Tableau 13: Données extrêmes des graphiques de la simulation TRNSYS (création personnelle)

Les valeurs minimales, maximales et moyennes pour les températures extérieures, l'humidité relative extérieure, la pression atmosphérique et le rayonnement solaire proviennent de calculs réalisés dans les tableaux Excel des différents fichiers météo. Les autres données ont été estimées / lues sur les différents graphiques.

Graph 1 XMY avec MV



Figure 21: Graph 1 - XMY - avec MV

La figure « Graph 1 – XMY- avec MV » représente graphiquement les données du document météo « .txt » qui sont lues par les Types 9e et 16c. Elles restent identiques en l’absence du MV.

Graph 2 XMY avec et sans MV - outputs

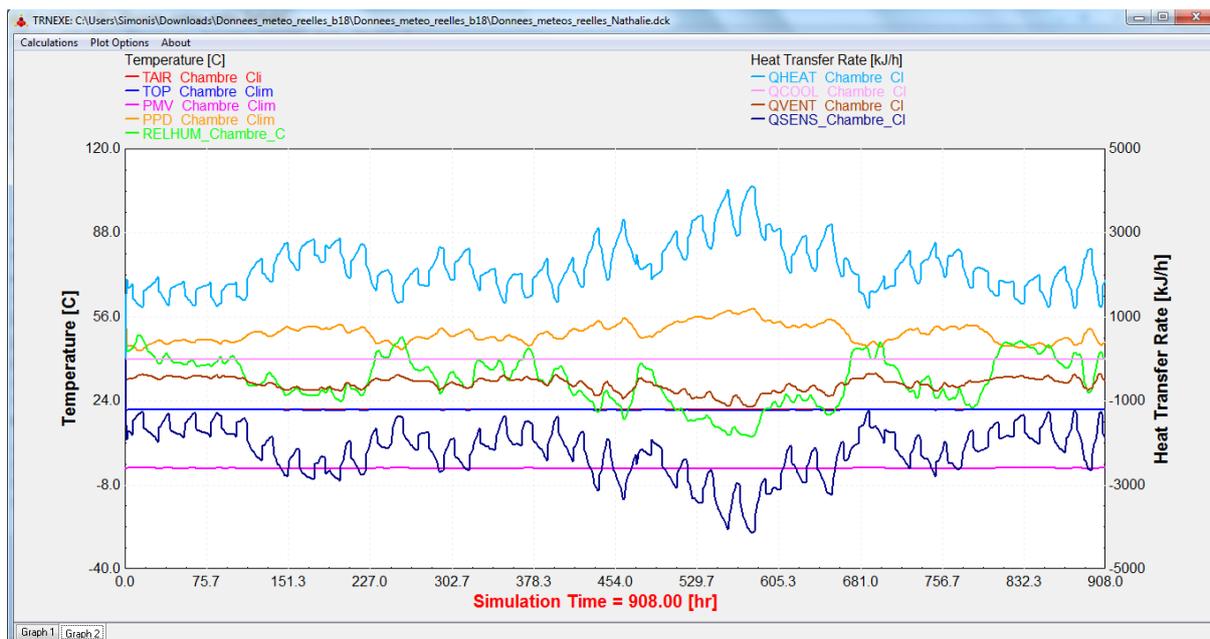


Figure 22: Graph 2 - XMY - avec MV - outputs

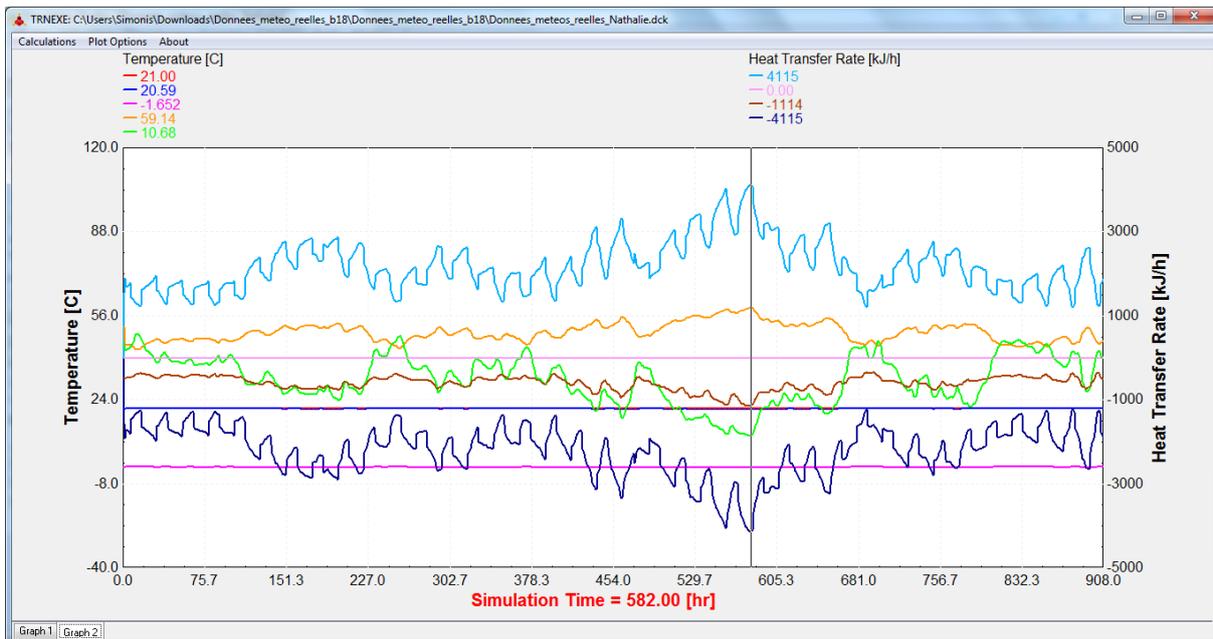


Figure 23: Graph 2 - XMY - avec MV - détaillé



Figure 24: Graph 2 - XMY - sans MV

Les graphiques « Graph 2 – XMY- avec MV » et « Graph 2 – XMY- sans MV » représentent graphiquement les outputs du bâtiment pour les données météo XMY en présence et en absence du MV. Les deux courbes ne sont pratiquement pas différenciables ce qui témoigne des effets minimes de la présence du MV. Il est cependant observable en regardant les détails des différents graphiques que la valeur de la demande de chauffage sensible du nœud d'air (QHEAT) est plus faible en présence du MV.

	Avec MV	Sans MV	Variation
QHEAT	4115 kJ/h	4225 kJ/h	Diminution de 2,6%

Le PPD et le PMV sont également légèrement plus faibles en présence du MV, il y a donc moins de personnes insatisfaites par les conditions thermiques de la chambre climatique, même si la différence reste faible.

	Avec MV	Sans MV	Variation
PPD	59,14%	59,47%	Diminution de 0,6%
PMV	-1,652	-1,658	Diminution de 0,4%

Discussion

1. Interprétation des mesures avant et après le mur végétal

Les nombreuses mesures réalisées dans la chambre climatique (température, humidité, densité de flux...) avant et après l'installation du MV ont fourni d'importants résultats que nous avons analysés dans le chapitre Résultats obtenus. Nous pouvons en donner une interprétation synthétique comme suit :

- La comparaison des données de température pour les différents scénarios (avec et sans le MV) montre que la température moyenne dans la chambre climatique a baissé en présence du MV. Cette baisse est très faible (0,6 %) en mode hiver, faible (2,9 %) en mode été avec un système de climatisation et plus importante (9,8 %) en mode été sans climatisation. La présence du MV n'a eu qu'un faible impact (2-3 %) sur la température dans le buffer et cela peut même être attribué à d'autres facteurs ;
- La présence du mur végétal entraîne une forte augmentation du taux d'humidité moyen dans la chambre climatique, tant en mode hiver (+97,3 %) qu'en mode été sans climatisation (+62,2 %) et qu'en mode été avec climatisation (+54,4 %). La présence du mur végétal entraîne une faible augmentation (+10 %) du taux d'humidité moyen dans le buffer et cela dans les 3 modes ;
- Concernant les échanges thermiques à travers la paroi durant la mise en régime, la densité de flux diminue de 3,7 % en présence du MV en hiver et de 3,4 % en été ;
- L'analyse de la demande énergétique des résistances a confirmé que les mesures réelles correspondaient bien aux prévisions. En été, la présence du MV permet de réduire la consommation d'énergie électrique de 28 % sans climatisation et de 18 % avec climatisation.

Tous ces résultats sont compatibles avec ceux de la littérature (Bucher A. 2015 ; Pérez-Urrestarazu, L., et al. 2016) sur le sujet. Par exemple, des baisses de température de 0,8 à 4,8°C ont été obtenues grâce au mur installé à l'université de Séville. L'augmentation de l'humidité est particulièrement spectaculaire pour les tests réalisés sur un MV souvent trop fortement irrigué. Dans son livre « *The Vertical Garden : from Nature to the City* », Patrick Blanc (2012) signale que l'humidité relative décroît en s'éloignant du mur vert passant de 90 % à 5 cm, 80 % à 10-20 cm, 70 % à 30-50 cm, 60-65 % à 1 m et se normalise à 59 % à environ 1,5 m du substrat du MV. Il affirme également que davantage de données sont nécessaires pour clarifier l'influence du MV sur les conditions intérieures, car le potentiel d'augmentation des niveaux d'humidité est un risque pour le confort thermique et la santé des occupants.

2. Évaluation du confort thermique (TRNSYS, équation de Fanger et Test de confort)

En observant le tableau réalisé à partir des données mesurées en temps réel dans la chambre climatique et utilisées dans l'équation de Fanger, il est possible de déterminer que pour une situation avec aluminium, si l'on compare les données de confort (PMV, PPD) avec et sans la présence du mur végétal : le pourcentage de personnes insatisfaites et le predicted mean vote sont plus proches de 0 en présence d'un mur végétal. Cette tendance est cependant inversée en présence d'un système de climatisation, situation pour laquelle le confort dans la

pièce est supérieur en absence du mur végétal. La raison de cette tendance ne s'explique pas de manière évidente mais pourrait être liée à la présence des lampes avec MV.

Mode	PMV / PPD	Sans MV	Avec MV
Hiver avec aluminium	PMV	-0,40	-0,185
	PPD	8,37	6,16
Eté avec aluminium sans clim	PMV	0,539	0,338
	PPD	13,24	9,67
Eté avec aluminium avec clim	PMV	-0,061	0,366
	PPD	8,38	9,58

Tableau 14: Comparaison des résultats de l'équation de Fanger (création personnelle)

Les résultats de la comparaison se basant sur la méthode CBE ont permis de confirmer que le confort thermique de la chambre climatique était conforme aux attentes à savoir légèrement froid dans 33 % des cas en mode hiver avec le niveau d'habillement et les autres conditions indiquées et neutre en été (67 % des occupants). D'autres essais recourant à un plus grand nombre de participants sont nécessaires y compris durant l'hiver en Belgique pour réduire certains effets de biais constatés.

3. Limites de l'expérience

Il importe également de relever ici les facteurs qui ont limité la qualité et la reproductibilité des résultats obtenus jusqu'ici :

- L'utilisation d'aluminium sur les murs intérieurs de la chambre climatique pour les tests relatifs à la qualité de l'air intérieur et programmés avant les tests de confort thermique qui n'ont pu commencer qu'en fin juin 2023 ;
- Les entrées et sorties de personnes de la chambre climatique afin des faire des prélèvements et des travaux de peinture, de récupérer et changer les bacs d'eaux... ;
- Contrôle insuffisant sur l'humidité dans la chambre climatique dû aux systèmes utilisés (chauffage, refroidissement) et à un trop fort arrosage des plantes ;
- Problèmes d'arrosage du MV, utilisation de 60 litres par mur au lieu de 30 litres par mur entraînant des inondations dans le laboratoire ;
- Dégradation de certaines des plantes du MV ;
- Certaines données sont manquantes car il y a eu des défaillances techniques de nombreux capteurs de température qu'il a fallu remplacer par seulement 3 capteurs disponibles ;
- Limites du FOG :
 - à cause du plancher chauffant dans tout le bâtiment, il n'est pas possible de simuler des températures hivernales extrêmes dans le buffer comme nous pourrions en avoir en période de changement climatique. En dessous de 0°C dans le buffer, l'eau dans les tuyaux du plancher chauffant pourrait geler ;
 - La chambre climatique étant située à l'intérieur d'un bâtiment, les effets que pourraient avoir le rayonnement solaire sur la paroi/ le mur ne peuvent pas être simulés ;
 - Il n'y a pas de fenêtre dans la chambre climatique donc pas de ventilation naturelle.

- Problème de biais : Les mesures ont été réalisées en été, le fait de rentrer dans une pièce plus fraîche que la température présente en extérieure peut biaiser le ressenti de confort dans la chambre climatique. (Ex. Rentrer dans une pièce à 21°C quand la température extérieure est de 27-30 °C) ; le fait également d'avoir placé les occupants en face du MV a pu introduire une modification de la perception. Ceci a été confirmé dans l'étude récente de l'université de Louisiane (Seddghikhanshir, A. 2022) durant laquelle 40 participants ont été placés dans une chambre climatique avec ou sans un environnement virtuel immersif représentant un MV virtuel. Le fait de regarder le MV virtuel entraîne une modification de la sensation et de certaines réponses physiologiques de l'organisme (température de peau, pulsation cardiaque et variabilité de la fréquence cardiaque) ;
- Les effets d'une activité des occupants avant entrée dans la chambre climatique peuvent influencer la perception de confort.

Conclusion

Ce travail de recherche basé sur une approche expérimentale et analytique nous a permis de tester et de comparer différents outils comme l'utilisation d'un modèle calibré de simulation TRNSYS y compris dans un contexte de changement climatique, d'effectuer des mesures réelles dans une chambre climatique avant et après installation du mur vert et d'enregistrer des réactions d'utilisateurs placés dans cette chambre climatique.

Les premiers résultats obtenus montrent que les murs verts intérieurs ont un certain impact positif sur le confort thermique des occupants d'un bureau. En mode été, ils contribuent à réduire la température ambiante en créant un effet de rafraîchissement naturel par évapotranspiration. Cela peut atténuer les désagréments lors de pics de chaleur et maintenir une température plus agréable pour les occupants d'un bureau. En mode hiver, le mur vert contribue à une forte augmentation de l'humidité dans la chambre climatique ce qui pourrait contribuer favorablement à réduire la sécheresse engendrée par les systèmes de chauffage classiques.

Les défis rencontrés lors de l'installation, l'utilisation et la gestion du mur végétal intérieur (éclairage, irrigation, entretien des plantes) démontrent qu'il importe de mieux maîtriser ces facteurs avant de lancer des programmes de test, de mesures et de modélisation et ensuite d'optimiser pour maximiser leurs bénéfices énergétiques, environnementaux et économiques. Les impacts constatés restent limités notamment à cause de la taille réduite du mur vert (faible facteur de surface du mur vert : 47 %) et du développement insuffisant des plantes au moment des tests.

Des recherches ultérieures pourront approfondir différents aspects avant de généraliser l'adoption des murs végétaux intérieurs dans les bureaux. Il importe tout d'abord de compléter les tests en chambre climatique sans aluminium et d'ajouter des mesures de température des parois à l'aide de caméras thermiques. Une analyse statistique après collecte d'un grand nombre de données pour déterminer la signification statistique des variations observées est nécessaire. La surface de mur vert appropriée et la consommation d'énergie correspondante pourront être calculées en fonction de la taille de la pièce.

Pour mieux analyser les réactions des occupants, il serait recommandable d'augmenter leur nombre, de reproduire les tests durant l'hiver en Belgique et de suivre certaines réponses physiologiques de leur organisme (température de peau, pulsation cardiaque et variabilité de la fréquence cardiaque). L'utilisation de l'outil de mesure COMOS développé par l'université de Kaiserslautern permettrait de mesurer directement les différentes composantes du confort thermique. L'installation et le test de murs verts dans certains bureaux du Campus d'Arlon permettrait de confirmer ou pas les résultats obtenus jusqu'ici en chambre climatique.

Au niveau des améliorations à apporter, il serait souhaitable de renforcer la planification des travaux de recherche basée sur une approche rationnelle, d'assurer un suivi plus régulier par le management du programme, de renforcer la collaboration entre les équipes travaillant sur les différentes composantes de la recherche, de constituer un stock minimum de pièces de

rechange et de capteurs pour faire face aux défaillances, de diversifier la gamme d'outils de modélisation utilisés. Les progrès récents en matière de murs verts intérieurs et particulièrement la sélection de plantes plus résistantes et mieux adaptées à la culture à l'intérieur et l'utilisation de substrats plus performants permettant une meilleure isolation thermique.

Malgré la complexité et les différentes contraintes évoquées, il n'en demeure pas moins que cette étude a permis de capter l'impact d'un mur végétal intérieur sur le confort thermique d'un bureau. Les recherches multidisciplinaires entamées à l'Uliège ouvrent des perspectives innovantes tant au niveau belge qu'europpéen.

Bibliographie

1. Abdullah Fawaz Sultan, A. (2022). *Green interior walls and their use in sustainable commercial spaces*. International Journal of Advanced Research on Planning and Sustainable Development, 5(1), 41-60.
https://ijarpsd.journals.ekb.eg/article_274362.html
2. Alvarado-Alvarado, A. (2023). *Modeling the hygrothermal behavior of green walls in Comsol Multiphysics®: Validation against measurements in a climate chamber*. Building and Environment Volume 238, 15 June 2023, 110377
3. ASHRAE-55. (2017). *Thermal environment conditions for human occupancy*. ASHRAE.
4. Blanc P. (2012). *The Vertical Garden : from Nature to the City*. Livre publié par W. W. Norton and Co.
5. Bucher, A.; Kohlrausch, F.; Kuckelkorn, J.; Troll, R. (2015, juin) *Berechenbare Unterstützung der Klimatisierung von energetisch hocheffizienten Gebäuden durch dezentrale, funktionale Innenraumbegrünung* (Soutien calculable pour la climatisation de bâtiments à haut rendement énergétique grâce à un verdissement intérieur décentralisé et fonctionnel)
<https://www.irbnet.de/daten/rswb/16019005729.pdf>
6. CEGIBAT. (2019). *Simulation thermique dynamique (STD)*.
<https://cegibat.grdf.fr/dossier-techniques/simulation-thermique-dynamique>
7. Charoenkit, S., & Yiemwattana, S. (2016). *Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review*. Building and environment, 105, 82-94.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316301895>
8. Charoenkit, S., & Yiemwattana, S. (2016). *Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review*. Building and environment, 105, 82-94.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316301895>
9. Cheung, I. (2017). *Impact of interior living walls on indoor air quality: study in a dynamic environment* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
<https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0362866>
10. Convertino, F., Vox, G., et Schettini, E.(2019). *Heat transfer mechanisms in vertical green systems and energy balance equations*. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/330633441_Heat_transfer_mechanisms_in_vertical_green_systems_and_energy_balance_equations
11. Dalhoff, N.; Kloster, N.; Wenker, J. (2022) *Innenräume in Holzbauten vertikal begrünen*. (Verdissement vertical des espaces intérieurs des bâtiments en bois) GEG Baupraxis <https://www.geg-baupraxis.de/innenraeume-in-holzbauten-vertikal-begrueuen/>
12. Daemei, A. (2021). *Investigating the thermal performance of green wall: Experimental analysis, deep learning model, and simulation studies in a humid climate*. Building and Environment 205(1–2):108201
13. Daneshpanah, S. (2019). *Field experiment on the effect of interior living walls on indoor environmental quality*.
<https://circuit.bcit.ca/repository/islandora/object/repository%3A886>
14. Designing Buildings, the construction wiki. (2020).
<https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Hygrothermal>

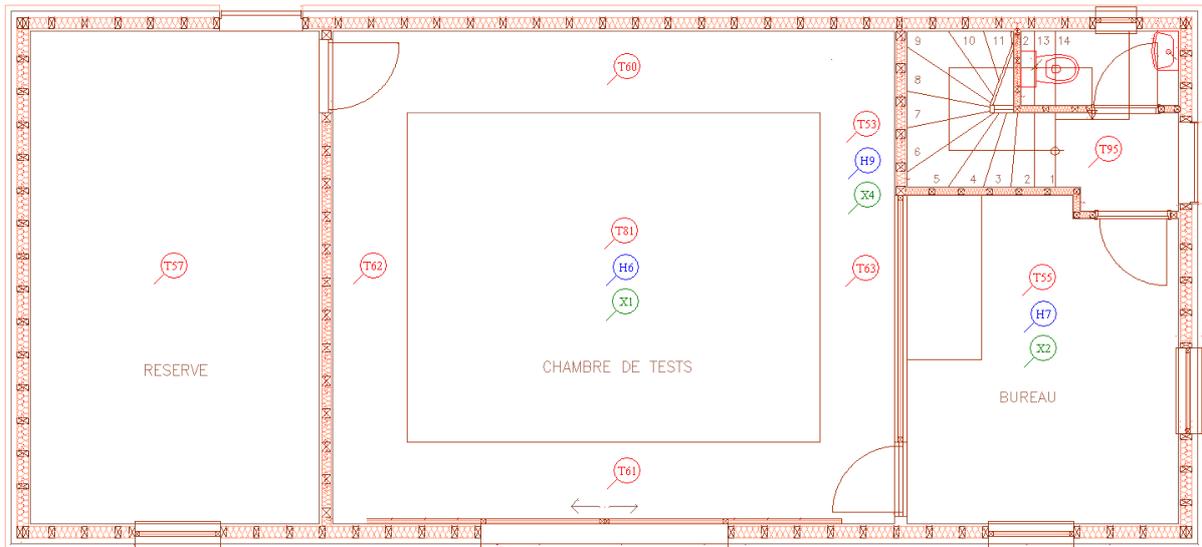
15. Designing Buildings, the construction wiki. (2023).
https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Computational_fluid_dynamics_for_buildings
16. Dominici, L., Comino, E., Torpy, F., et Irga P. (2022). *Vertical Greening Systems: A Critical Comparison of Do-It-Yourself Designs*. *Plants* 2022, 11, 3230.
<https://pdfs.semanticscholar.org/7b3c/80ff2a03ed4398f0817df468dd7ba9cb34ad.pdf?ga=2.19444479.63967918.1675099317-2130477945.1674994924>
17. Edelmann, HG. (2021) Multitalente Efeu, Moos und Co : *Potentiale und Effekte auf Temperatur, Luftfeuchte, Stickoxide, CO2 und Feinstaub. Biodiversität und Klima – Vernetzung der Akteure in Deutschland XVI – Dokumentation der 16. Tagung BfN-Skripten* 596, Bundesamt für Naturschutz
18. European Climate Foundation. (March 2022). *Building Europe's Net-Zero Future: Why the transition to energy efficient and electrified buildings strengthens Europe's Economy*. <https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2022/03/ecf-building-emissions-problem-march2022.pdf>
19. Fanger, P.O. (1982). *Thermal Comfort*. Florida, USA, R.E. Krieger
20. Fernández-Cañero, R., Urrestarazu, L. P., & Franco Salas, A. (2012). *Assessment of the cooling potential of an indoor living wall using different substrates in a warm climate*. *Indoor and Built Environment*, 21(5), 642-650
<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1420326X11420457>
21. Fox, M., Morewood, J., Murphy, T., Lunt, P., & Goodhew, S. (2022). *Living wall systems for improved thermal performance of existing buildings*. *Building and Environment*, 207, 108491.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321008878>
22. Franco, A., Fernández-Cañero, R., Pérez-Urrestarazu, L., & Valera, D. L. (2012). *Wind tunnel analysis of artificial substrates used in active living walls for indoor environment conditioning in Mediterranean buildings*. *Building and Environment*, 51, 370-378.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311004203>
23. Gunawardena, K-C., Steemers, K. (2019). *Living walls in indoor environments. Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.014>
24. Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J. S., Brüggemann, N., ... & Stössel, A. (2019). *Max planck institute earth system model (MPI-ESM1. 2) for the high-resolution model intercomparison project (HighResMIP)*. *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3241-3281.
<https://gmd.copernicus.org/articles/12/3241/2019/>
25. Hellebaut, A. 2021 *Innover dans la conception des murs végétaux afin de maximiser leurs effets sur la qualité de l'air* <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/13158>
26. ISO. (1993). *Norme ISO-7730 : Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique*. Genève, CEN et ISO.
27. Kaltsidi, M. P., Fernández-Cañero, R., & Pérez-Urrestarazu, L. (2020). *Assessment of different LED lighting systems for indoor living walls*. *Scientia Horticulturae*, 272, 109522. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423820303502>
28. Malys, L., Musy, M., & Inard, C. (2014). *A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption*. *Building and Environment*, 73, 187-197.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313003685>

29. Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). *Life cycle embodied energy analysis of indoor active living wall systems*. Energy Reports, 6, 391-395.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472031605X>
30. Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). *Green wall systems: A review of their characteristics*. Renewable and sustainable energy reviews, 41, 863-871.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114006637>
31. Nielsen, P. V. (2015). *Fifty years of CFD for room air distribution*. Building and Environment, 91, 78-90.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013231500092X>
32. Organisation météorologique mondiale. (6 novembre 2022). *Aggravation des impacts du changement climatique dans le contexte des huit années les plus chaudes jamais enregistrées*. Organisation météorologique mondiale.
<https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/aggravation-des-impacts-du-changement-climatique-dans-le-contexte-des#:~:text=Temp%C3%A9rature%3A%20On%20estime%20que%20la,les%20plus%20chaudes%20jamais%20enregistr%C3%A9es>.
33. Pérez-Urrestarazu, L., Fernández-Cañero, R., Franco, A., & Egea, G. (2016). *Influence of an active living wall on indoor temperature and humidity conditions*. Ecological Engineering, 90, 120-124.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416300507>
34. Peterková, J., Michalčíková, M., Novák, V., Slávik, R., Zach, J., Korjenic, A., ... & Raich, B. (2019). *The influence of green walls on interior climate conditions and human health*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 282, p. 02041). EDP Sciences.
https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/31/mateconf_cesbp2019_02041/mateconf_cesbp2019_02041.html
35. Poorova, Z., & Vranayova, Z. (2021). *Humidity, air temperature, CO2 and well-being of people with and without green walls*. In Proceedings of EcoComfort 2020 (pp. 336-346). Springer International Publishing.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-57340-9_41
36. Raji, B., Tenpierik, M. J., & Van Den Dobbelsteen, A. (2015). *The impact of greening systems on building energy performance: A literature review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 610-623.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000994>
37. Raczkowski, A., Suchorab, Z., & Brzyski, P. (2019). *Computational fluid dynamics simulation of thermal comfort in naturally ventilated room*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 252, p. 04007). EDP Sciences.
https://www.researchgate.net/publication/330362959_Computational_fluid_dynamics_simulation_of_thermal_comfort_in_naturally_ventilated_room
38. Roulet, C.-A. (2010). *Santé et Qualité de l'environnement intérieur dans le bâtiment. Ingénierie de l'environnement*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. ISBN 978-2-88074-793-0
39. Salamone, F., Barozzi, B., Danza, L., Ghellere, M., & Meroni, I. (2020). *Correlation between indoor environmental data and biometric parameters for the impact assessment of a living wall in a ZEB lab*. Sensors, 20(9), 2523.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2523>

40. Sedghikhanshir, A. et al. (2022) *Exploring the Impact of Green Walls on Occupant Thermal State in Immersive Virtual Environment*. Sustainability, 2022, 14, 1840
41. Shao, Y., Li, J., Zhou, Z., Zhang, F., & Cui, Y. (2021). *The impact of indoor living wall systems on air quality: a comparative monitoring test in building corridors*. Sustainability, 13(14), 7884. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/7884>
42. Shen, X., Sun, Q., Mosey, G., Ma, J., Wang, L., Ge, M. (2023). *Benchmark of plant-based VOCs control effect for indoor air quality: Green wall case in smith campus at Harvard University*. Science of The Total Environment, 2023
43. SOUND ECOLOGY. Web Page <https://www.sound-ecology.com/?lang=fr>
44. Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., ... & Kimoto, M. (2019). *Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6*. Geoscientific Model Development, 12(7), 2727-2765. <https://gmd.copernicus.org/articles/12/2727/2019/>
45. Tilley, D. (2012). *Vegetated Walls : Thermal and Growth Properties of Structured Green Facades*. Final Report to Green Roofs for Healthy Cities. https://www.researchgate.net/profile/David-Tilley-3/publication/328267296_Vegetated_Walls_Thermal_and_Growth_Properties_of_Structured_Green_Facades/links/5bc224d6458515a7a9e72512/Vegetated-Walls-Thermal-and-Growth-Properties-of-Structured-Green-Facades.pdf
46. Von Tils, R. (Thèse 2020) *Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima - Simulationen mit einem mikroskaligen Modell* (Influence du verdissement des bâtiments sur le climat intérieur - simulations avec un modèle microscopique), Université de Hannover
47. Wu, T., Lu, Y., Fang, Y., Xin, X., Li, L., Li, W., ... & Liu, X. (2019). *The Beijing Climate Center climate system model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6*. Geoscientific Model Development, 12(4), 1573-1600. <https://gmd.copernicus.org/articles/12/1573/2019/>
48. Yazdanseta A. (2017). *Designing Green Walls: An Early-design Framework to Estimate the Cooling. Impact of Indirect Green Walls on Buildings in Six Different Climates*. Dissertation. The Harvard University Graduate School of Design
49. Zhao, Q., Lian, Z., & Lai, D. (2021). *Thermal comfort models and their developments: A review*. Energy and Built Environment, 2(1), 21-33. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123320300593>

Annexes

Annexe 1 : Laboratoire Jacques Geelen



Dimensions de la chambre climatique - avec aluminium

<ul style="list-style-type: none"> • 3,68 m (largeur) x 4,82 m (longueur) x 2,63 m (hauteur) • surface au sol : 17,74 m² • volume : 46,65 m³ 	<p>(création personnelle - Nathalie)</p>
---	--

Dimensions de la chambre climatique - sans aluminium

<ul style="list-style-type: none"> • 5 m (largeur) x 4 m (longueur) x 2,5 m (hauteur) • surface au sol : 20 m² • volume: 50 m³ 	<p>(création personnelle - Nathalie)</p>
---	--

	TRNSYS 3d Zone	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)
1	Technical_Room	4	6,5	6
2	Buffer	7	6,5	4
3	Chambre_Climatique	5	4	2,5
4	Office	3,5	4	6
5	Toiture_CC	7	6,5	2
6	Staircase0	3,5	2,5	2,5
7	Staircase1	3,5	2,5	1,5
8	Staircase2	3,5	2,5	2

Dimensions des zones thermiques du Laboratoire Jacques Geelen (création personnelle)

	TRNSYS 3D Zone	Largeur (m)	Hauteur (m)
1	Technical_Room	1	1,3
2	Buffer	3	2,2
3	Office	1	1,3
4	Office	1	1,3
5	Staircase0	0,9	2

Dimensions des fenêtres du bâtiment

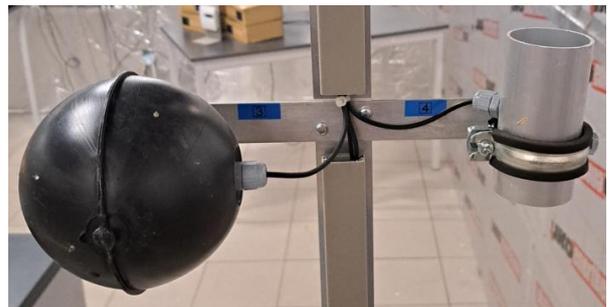
Capteurs

- 5 mâts (température), avec 3 niveaux de capteurs
 - 40 cm (bas)
 - 136 cm (milieu)
 - 230 cm (haut)



(création personnelle - Nathalie)

- Sonde "globe" = Température résultante
- Tube = Température de l'air



(création personnelle - Nathalie)

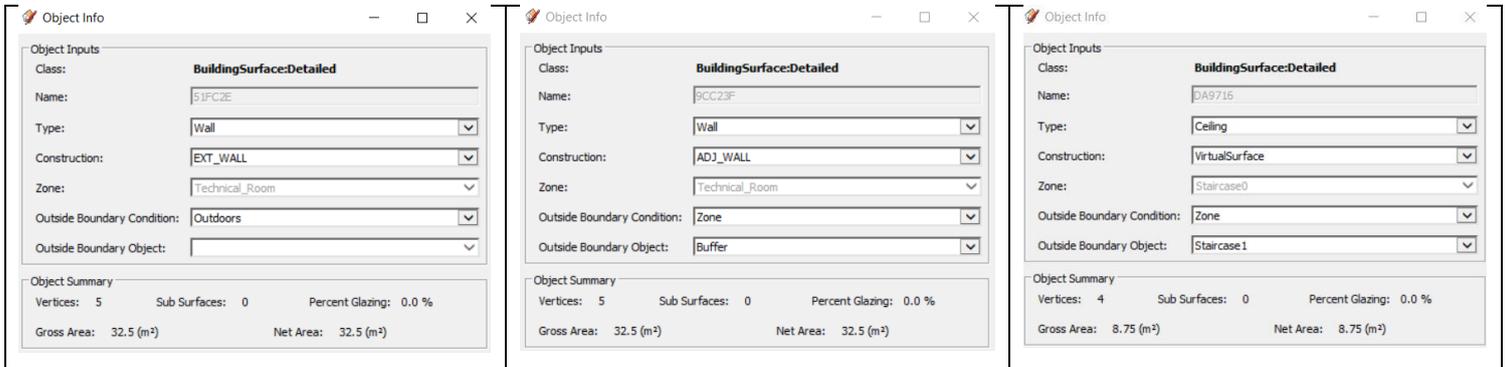
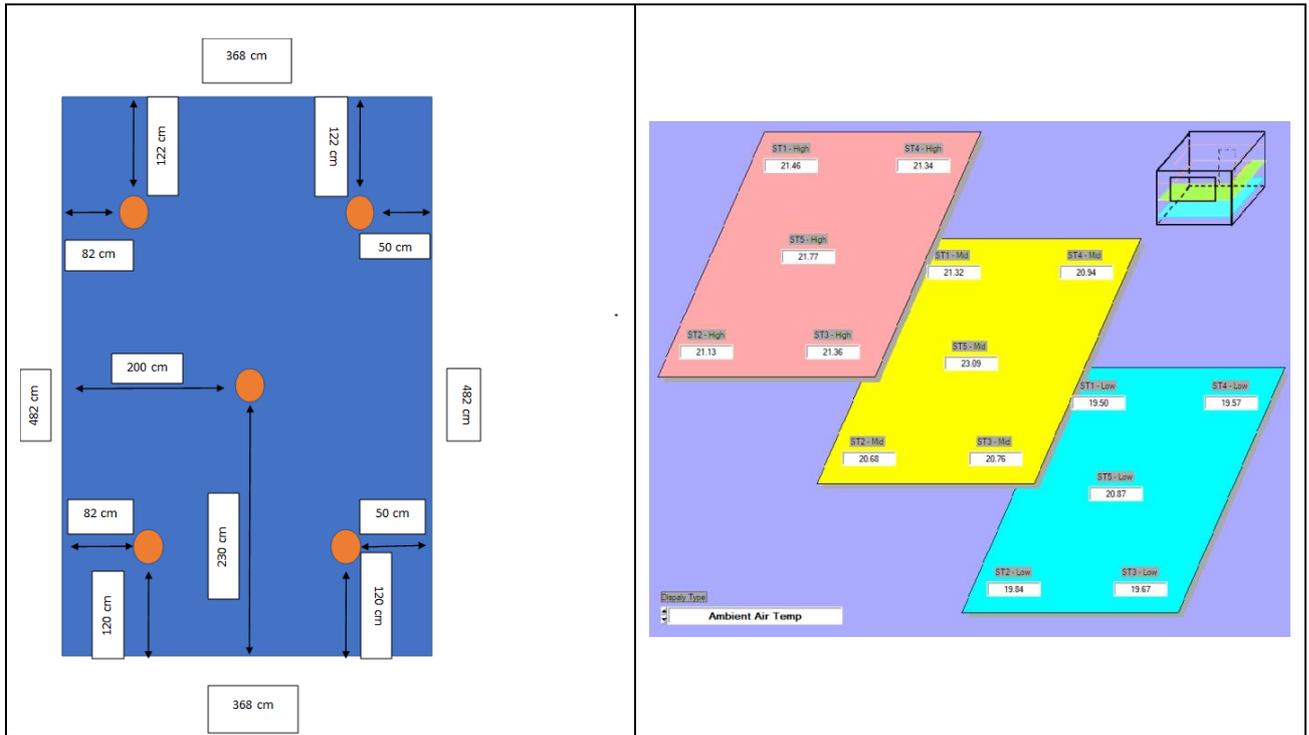
Liste des capteurs installés dans la chambre climatique

T4 = Cold Ceiling Inlet Temperature [°C]	T75 = Capteur de T° de la paroi dans la CC du côté où sera placé le MV	Q13 = Water Flow Rate [l/min]	VXI4.3(St2.TaM) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI6.2(St4.TrM) = (Temperature Climatic Room)
T9 = Cold Ceiling Outlet Temperature [°C]	T76 = Capteur de T° de la paroi dans la CC (du plafond)	Q14 = Water Flow Rate [l/min]	VXI4.4(St2.TrH) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI6.3(St4.TaM) = (Temperature Climatic Room) régulation du plafond froid
T57 = T° local technique	T77 = Capteur de T° de la paroi dans la CC du sol	VXI3.0(St1.TrL) = (Temperature Climatic Room)	VXI4.5(St2.TaH) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI6.4(St4.TrH) = (Temperature Climatic Room)
T58 = T° extérieure réelle	T78 = Capteur de T° de la paroi dans la CC du côté de la grande fenêtre extérieure	VXI3.1(St1.TaL) = (Temperature Climatic Room)	VXI5.0(St3.TrL) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI6.5(St4.TaH) = (Temperature Climatic Room)
T59 = Buffer (outside) temperature [°C]	T79 = Capteur de T° de la paroi dans la CC du côté de la porte de la CC	VXI3.2(St1.TrM) = (Temperature Climatic Room)	VXI5.1(St3.TaL) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI7.0(St5.TrL) = (Temperature Climatic Room)
T60 = Buffer (outside) temperature [°C]	T80 = Capteur de T° de la paroi dans la CC du côté de la chambre technique	VXI3.3(St1.TaM) = (Temperature Climatic Room)	VXI5.2(St3.TrM) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI7.1(St5.TaL) = (Temperature Climatic Room)
T61 = Buffer (outside) temperature [°C]	T81 = Climatic chamber (inside) Temperature [°C]	VXI3.4(St1.TrH) = (Temperature Climatic Room)	VXI5.3(St3.TaM) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI7.2(St5.TrM) = (Temperature Climatic Room)
T62 = Buffer (outside) temperature [°C]	T82 = sonde globe fixe Température [°C]	VXI3.5(St1.TaH) = (Temperature Climatic Room)	VXI5.4(St3.TrH) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI7.3(St5.TaM) = (Temperature Climatic Room)
T63 = Buffer (outside) temperature [°C]	H6 = Humidité Chambre Climatique	VXI4.0(St2.TrL) = (Temperature Climatic Room)	VXI5.5(St3.TaH) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI7.4(St5.TrH) = (Temperature Climatic Room)
T66 = AHU inlet air temperature (COIL) [°C]	H9 = Humidité Buffer	VXI4.1(St2.TaL) = (Temperature Climatic Room)	VXI6.0(St4.TrL) = (Temperature Climatic Room)	=	VXI7.5(St5.TaH) = (Temperature Climatic Room)
T67 = AHU outlet air temperature (COIL) [°C]	X1 = Concentration en CO2 dans la chambre climatique	VXI4.2(St2.TrM) = (Temperature Climatic Room)	VXI6.1(St4.TaL) = (Temperature Climatic Room)	=	

Explication du nom des capteurs de température dans la chambre climatique

Code du Capteur	VXI3	VXI4	VXI5	VXI6	VXI7
Numéro du mat	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5
Type de T°	Ta (Température ambiante), Tr (Température résultante)				
Hauteur du capteur	L (Low), M (Middle), H (High)				

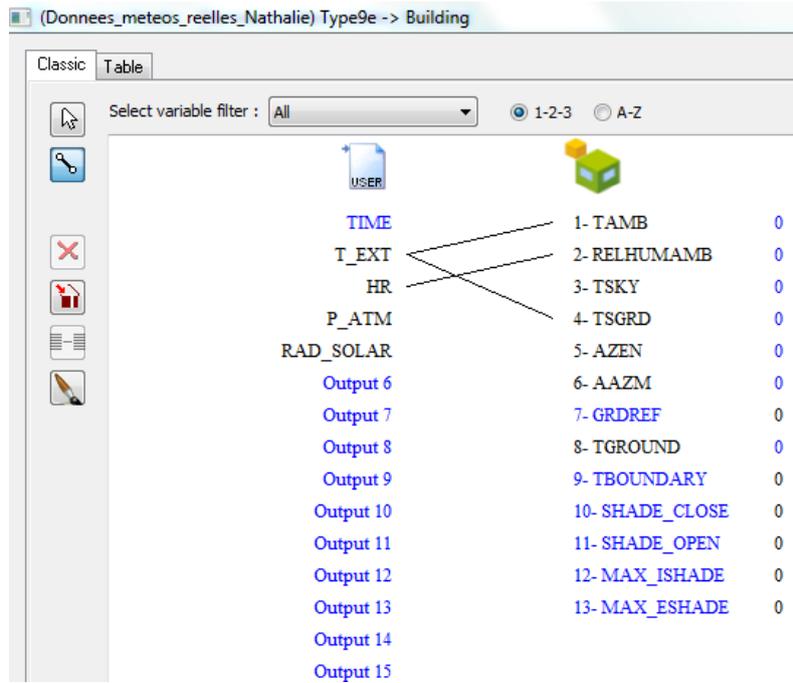
Emplacement des capteurs dans le Laboratoire Jacques Geelen



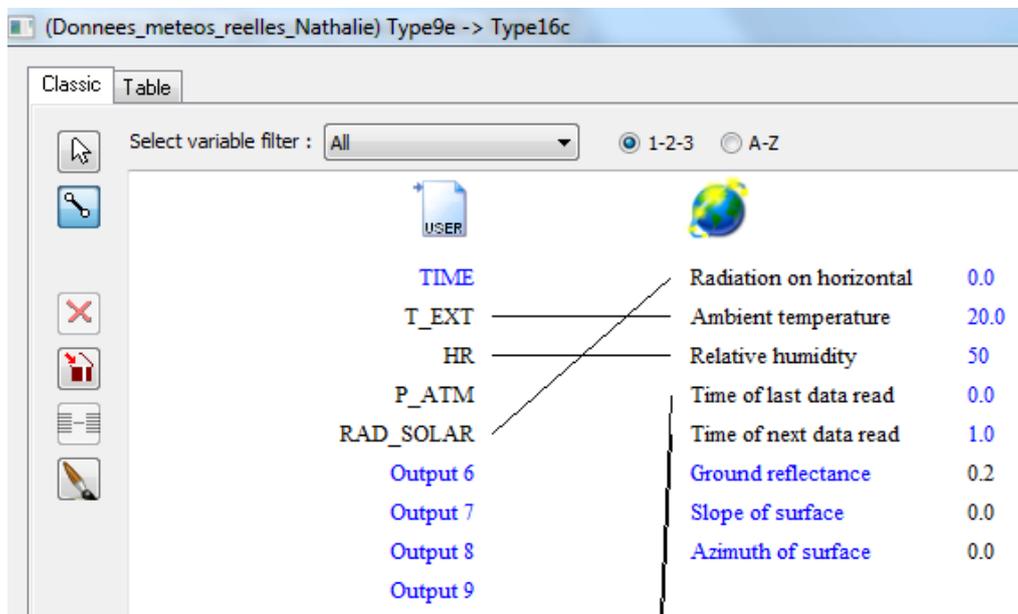
Object Info : adjacence entre les différentes zones thermiques

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Energy balance per zone													
2	Zonenr	ReI_BAL	BAL_ENERGY=	(-)DQAIRdt	(+)QHEAT	(-)QCOOL	(+)QINF	(+)QVENT	(+)QCOUPL	(+)QTRANS	(+)QGAININT	(+)QWGAIN	(+)QSOLGAIN	(+)QSOLAIR
3	-	%	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ	kJ
4	1	0	1.99E-04	6.00E+04	1.71E+10	3.03E+07	-4.35E+09	-4.35E+09	0.00E+00	-1.00E+10	1.64E+09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	Energy balance for sum of all zone													
6	0	0	1.99E-04	6.00E+04	1.71E+10	3.03E+07	-4.35E+09	-4.35E+09	0.00E+00	-1.00E+10	1.64E+09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7			energy balance for a surface should be close to 0	change of internal energy of zone	sensible heating demand of airnode (positive values)	sensible cooling demand of airnode	sensible infiltration energy gain of airnode	sensible ventilation energy gain of airnode	sensible coupling gains of airnodes	transmission into the surface from inner surface node	internal gains (convective+radiative)	wall gains		convective energy gain of airnode due transmitted solar radiation through external windows which is transformed immediately into a convective heat flow
8	SUMMARY BAL													

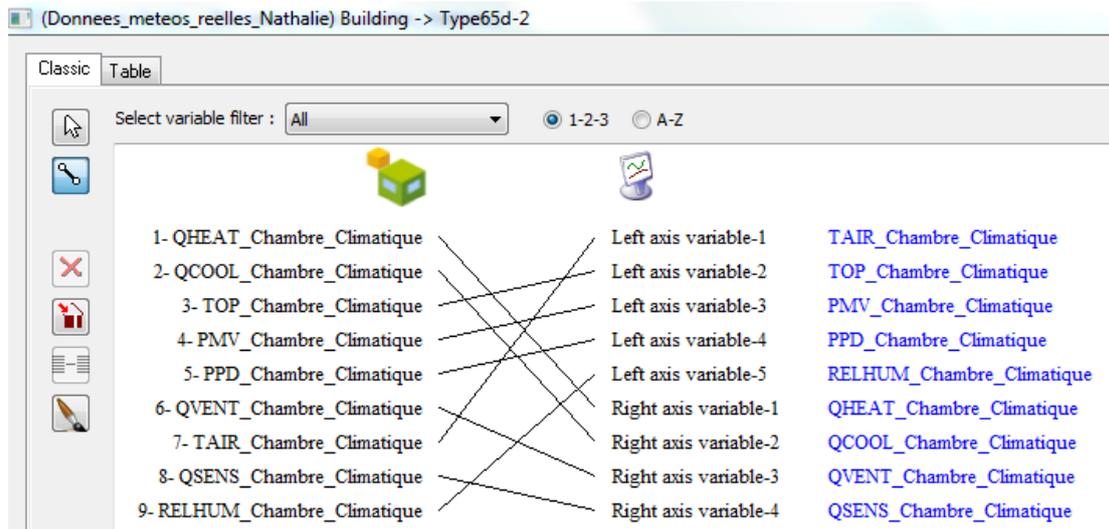
SUMMARY_BAL : Bilan d'énergie par zone



Connections entre les "Weather data" et le "Building"



Connections Type 9e -> Type 16c



Connections entre le "Building" et le "Plotter"

Annexe 2 : Résultats des tests de confort par les 4 occupants

Occupant	Age	Sexe	heure d'entrée	heure de sortie	Minutes de test	Confort Thermique (de 1 à 7)	Qualité de l'air (de 5 à 5)	Température (de 1 à 7)	Mouvement de l'air (de 1 à 7)	Sécheresse/Humidité (de 1 à 7)	Fraicheur de l'air (de 1 à 7)	Influence sur température (de 1 à 7)	Influence sur ventilation aération (de 1 à 7)
Tests en mode hiver avec mur végétal	1 (Eduardo)	M	16h19	16h49	0	4	4	2	2	4	2	1	1
					15	4	3	2	2	4	1	1	
					30	3	3	2	2	4	1	1	
	2 (Carrelle)	F	15h45	16h15	0	2	1	5	6	5	6	5	5
					15	3	1	6	5	5	5	5	
					30	3	1	6	5	5	5	5	
	3 (Dayane)	M	14h42	15h12	0	2	5	2	3	5	2	1	1
					15	3	4	1	2	2	2	1	
					30	2	4	2	2	3	1	1	
	4 (Sylvain)	M	14h05	14h35	0	2	4	2	3	5	2	1	1
					15	3	4	2	2	4	2	1	
					30	3	4	3	2	4	2	1	
Tests en mode hiver avec mur végétal	1 (Eduardo)	M	16h49	17h19	0	4	4	1	3	4	4	1	1
					15	4	3	1	3	4	4	1	
					30	4	3	1	3	4	4	1	
	2 (Carrelle)	F	16h12	16h42	0	3	1	5	4	5	5	5	5
					15	4	1	4	4	4	4	5	
					30	4	1	4	4	4	4	5	
	3 (Dayane)	M	14h22	14h55	0	4	-1	3	1	3	4	1	1
					15	3	1	3	2	3	3	1	
					30	3	2	1	2	3	1	1	
	4 (Sylvain)	M	15h35	16h08	0	3	5	1	1	2	1	1	1
					15	4	1	2	2	3	2	2	
					30	4	1	2	2	2	2	2	

Annexe 3 : Fiches des plantes du mur végétal

Aglaonema commutatum 'silver bay'

Image	
Nom latin/ Nom commun	Aglaonema commutatum 'silver bay'
Famille	Araceae
Description	Feuillage : Feuilles vert foncé, avec des taches grises. Sont brillantes, allongées et mesurent 20 x 9 cm. Dimensions et floraison : 15 cm de hauteur et 30 cm d'étalement. Floraison en juillet de spathe blanches, puis fructification de baies rouge foncé. Qualités : Originaire de Malaisie et des Philippines. Espèce la plus répandue. Les sujets adultes ont des tiges marquées par des cicatrices.
Fonction / Propriétés	-Purificateur d'air -L'aglaonema est connue pour ses propriétés dépolluantes. Elle absorberait le benzène (encres, fumées, peintures, vernis) et le formaldéhyde (agglomérés, colles, isolants, vernis).
Type de plante	Plantes dépolluantes
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	0,15 à 1 m
Largeur à maturité	0,25 à 0,60 m
Besoins en eau	Moyen
Résistance au Froid	Fragile
Résistance au chaud / origine	Originaire des forêts tropicales
Températures idéales	La température idéale est de 16 °C. La plante n'étant pas rustique, la température ne doit pas être inférieure à 10 °C, et pour le bien-être de la plante, il est important qu'elle n'excède pas 21 °C.
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/674/aglaonema

Chamaedorea elegans

Image	
Nom latin/ Nom commun	Chamaedorea elegans
Famille	Araceae
Description	<p>Le Chamaedorea elegans est un palmier nain, à petit développement et à croissance lente. Les jeunes palmes sont de couleur vert pâle et foncent en grandissant, atteignant une couleur vert moyen à vert foncé. Ce palmier de montagne produit environ 2 à 3 nouvelles palmes par an. Elles vont ensuite s'agrandir et s'allonger au fur et à mesure des années. Origine : Originnaire du Mexique. Variété très courante chez nous, vous la trouverez chez de très nombreux fleuristes.</p> <p>Fleurs et fruits : Petites fleurs jaunes. Petits fruits ronds et noirs à maturité.</p> <p>Port et feuillage : Cultivé en pot chez nous, il atteint environ 1,20 m à taille adulte. Palmes vert brillant allant de vert pâle à vert foncé, de 0,30 à 0,60 m de long.</p> <p>Qualités et usages : Plante très élégante. Peu rustique, fragile. Facile d'entretien. Variété peu exigeante.</p>
Fonction / Propriétés	-Propriétés dépolluantes, capacité d'absorber les vapeurs toxiques de benzène (encre, fumée, vernis, peinture) et d'assainir l'air intérieur.
Type de plante	Plantes dépolluantes
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	1 à 1,50 m
Largeur à maturité	/
Besoins en eau	Important
Résistance au Froid	Fragile
Résistance au chaud / origine	Originnaire du Mexique, des régions tropicales d'Amérique, poussent en plein soleil, Il aime l'humidité et la chaleur
Températures idéales	Maintenez-le toute l'année dans une pièce chaude, où la température est comprise entre 12 et 20 °C, pour qu'il se porte bien.
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/1549/chamaedorea-elegans

Epipremnum aureum

Image	
Nom latin/ Nom commun	Epipremnum aureum
Famille	Araceae
Description	<p>Tige : Tiges de forme anguleuse et de couleur jaune-vert. La variété 'Golden Queen' a des tiges quasiment jaune d'or, la 'Marble Queen' blanches veinées de vert.</p> <p>Feuillage : Feuilles luisantes, d'un beau vert vif, avec des taches jaunes ou blanches. Elles font entre 10 cm et 15 cm de longueur, sont ovales et pointues au début pour atteindre à maturité entre 20 cm et 30 cm et avoir une forme de cœur. La variété 'Golden Queen' a des feuilles quasiment jaune d'or, la 'Marble Queen' blanches tachetées de vert et gris et la 'Wilcoxii' veinées de vert et jaune.</p> <p>Qualités : Originaire des Îles Salomon. Port grimpant ou rampant. Une des deux espèces les plus connues.</p>
Fonction / Propriétés	On lui reconnaît des vertus dépolluantes contre le monoxyde de carbone (chauffages, moteurs), le toluène (peintures, solvants), le benzène (encres, fumées, peintures, vernis) et le formaldéhyde (agglomérés, colles, isolants, vernis).
Type de plante	Plantes dépolluantes
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	1 à 2 m
Largeur à maturité	0,20 à 0,30 m
Besoins en eau	Moyen, à vaporiser
Résistance au Froid	Fragile
Résistance au chaud / origine	Originaire des endroits humides et chauds du Sud-est Asiatique et de l'Inde orientale
Températures idéales	Si la température extérieure le permet, entre 18 et 25 °C, vous pouvez sortir le pothos entre mai et septembre. En hiver, veillez à le maintenir à une température qui ne baisse pas en dessous de 14 °C. Ne le placez pas près d'un radiateur qui assèche l'air.
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/243/pothos

Spathiphyllum wallisii 'sensation'

Image	
Nom latin/ Nom commun	Spathiphyllum wallisii 'sensation'
Famille	Araceae
Description	<p>Caractère des fleurs et des fruits : Belles fleurs aux spathes d'un blanc pur, élancées et gracieuses.</p> <p>Taille de l'arbre, aspect, période de floraison : Feuilles allongées et fines, en forme de lance. Croissance rapide.</p> <p>Qualités : Espèce la plus courante. Caractère des fleurs et des fruits : Grandes spathes très blanches, effilées, virant au vert à maturité. Spadice allongé de couleur crème à vert-jaune.</p> <p>Taille de l'arbre, aspect, période de floraison : Feuilles nervurées de couleur vert-sombre.</p>
Fonction / Propriétés	Cette plante a l'avantage d'assainir l'air de votre pièce
Type de plante	Plantes dépolluantes
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	0,60 à 1 m
Largeur à maturité	0,50 à 1 m
Besoins en eau	Important, à vaporiser
Résistance au Froid	Fragile
Résistance au chaud / origine	Pousse naturellement sous un climat chaud et humide, proviennent des forêts d'Amérique tropicale, Colombie et du Venezuela
Températures idéales	<p>En hiver, il se plaît bien entre 16 et 18 °C. Il pourra résister à une température minimale de 13 °C mais seulement pour une courte période.</p> <p>En été, il sera en bonne forme entre 19 et 21 °C et commencera à souffrir au-delà de 27 °C. Maintenez une bonne humidité, surtout en cas de fortes chaleurs, en l'arrosant et le vaporisant régulièrement.</p>
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/638/spathiphyllum

Nephrolepis exaltata 'Bostoniensis'

Image	
Nom latin/ Nom commun	Nephrolepis exaltata 'Bostoniensis'
Famille	Polypodiacées
Description	<p>Végétation : Feuillage vert clair, grandes frondes bien développées et très touffues de port arqué. Hauteur de 0,40 à 0,60 m pour 0,80 à 1,20 m de large. Qualités : La touffe grossit d'année en année et la plante vit longtemps. Son ampleur produit un bel effet.</p>
Fonction / Propriétés	<p>Depuis quelques années, le nephrolepis est également apprécié pour son action dépolluante sur l'air ambiant de nos intérieurs. La plante aurait en effet la capacité d'absorber les COV (composants organiques volatils) et en particulier le formaldéhyde et le xylène dégagés par exemple par les colles, peintures, moquettes, meubles en particules agglomérées, cires, produits d'entretien et papiers peints. Un pot dans chaque pièce pourrait ainsi permettre d'assainir l'atmosphère. Mais pour que la plante joue ce rôle, il faut absolument lui donner de bonnes conditions de culture, car une plante en mauvaise santé ne sera d'aucune utilité.</p>
Type de plante	Plantes dépolluantes
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	0,30 à 0,60 m
Largeur à maturité	0,60 à 1,20 m
Besoins en eau	Moyen, à vaporiser
Résistance au Froid	Fragile
Résistance au chaud / origine	<p>Cette fougère aime les climats tropicaux humides, où il ne gèle jamais. Elle prospère à l'extérieur en Floride et dans ce type de régions offrant une grande humidité atmosphérique (au minimum 60 %) et jamais moins de 15 °C en hiver. En Europe, elle est exclusivement cultivée en intérieur ou en véranda pour échapper au froid à la mauvaise saison.</p>
Températures idéales	Elle préfère les températures supérieures à 12 °C. En été, elle n'aime pas non plus avoir trop chaud
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/672/nephrolepis

Chlorophytum comosum 'Ocean'

Image	
Nom latin/ Nom commun	Chlorophytum comosum 'Ocean'
Famille	Agavacées
Description	<p>Forme et dimensions des feuilles : Touffes souples de 0,20 m de hauteur et 0,30 m de diamètre. Fines feuilles vert clair, de 0,30 m de long et 2 cm de large, lancéolées et arquées.</p> <p>Couleur des feuilles : Des stolons jaunes de 60 cm sortent entre les feuilles. Ils portent des petites fleurs blanches éphémères, vite remplacées par des plantules.</p> <p>Qualités : Espèce la plus répandue en France. En milieu naturel, les plantules s'enracinent spontanément dans la terre. En pot, on peut attacher les stolons sur un arceau de bambou pour obtenir un effet décoratif. Forme et dimensions des feuilles : Feuillage moins long (environ 0,20 m) et plus large que l'espèce, touffe plus compacte.</p> <p>Couleur des feuilles : Feuilles vert foncé, marginées de blanc crème.</p>
Fonction / Propriétés	Cette plante possède la propriété d'absorber des polluants de l'air, notamment le monoxyde de carbone et le dioxyde d'azote ainsi que certains composés organiques volatils (COV), comme le méthanal ou le xylène.
Type de plante	Plantes dépolluantes
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	0,15 à 0,60 m
Largeur à maturité	0,15 à 0,50 m
Besoins en eau	Moyen, à vaporiser
Résistance au Froid	Fragile
Résistance au chaud / origine	Originaire d'Afrique occidentale. Utilisée à l'extérieur en plante annuelle l'été, en suspension et en pot.
Températures idéales	Une température de 18 °C est idéale, au-delà, il faut bassiner le feuillage qui a tendance à se dessécher. En hiver, maintenez-le plutôt à une température de 7 à 10 °C.
Sources	<p>https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/170/chlorophytum</p> <p>https://fr.wikipedia.org/wiki/Chlorophytum_comosum#Propri%C3%A9t%C3%A9s</p>

Dracaena fragrans

Image	
Nom latin/ Nom commun	Dracaena fragrans
Famille	Asparagacées
Description	<p>Feuillage : Groupe de variétés aux feuilles striées. Touffes de feuilles en panache. Origine et dimensions : Afrique tropicale. Hauteur : 1,20 m et plus. Étalement : 0,45 m. Qualités : Espèce rarement vendue, mais ses variétés panachées sont plus répandues, par ex : 'Lemon Lime', aux feuilles vert-jaune striées de vert et de blanc, et 'Warneckeï', aux feuilles bordées de bandes blanches. Température minimale en hiver de 13 °C. À cultiver le plus longtemps possible dans un pot de 15 à 17 cm.</p>
Fonction / Propriétés	<p>Le dracaena est connu pour ses propriétés dépolluantes. Il absorbe principalement le xylène et le benzène (fumées, encres, peintures, vernis), le trichloréthylène (dégraissants, nettoyants vêtements, moquettes, mousses et tissus) et le formaldéhyde (colles, agglomérés, isolations, vernis).</p>
Type de plante	Plantes dépolluantes
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	0,15 à 10 m et +
Largeur à maturité	0,30 à 2,50 m
Besoins en eau	Moyen, à vaporiser
Résistance au Froid	Fragile
Résistance au chaud / origine	Originaire d'Afrique tropicale ou d'Asie
Températures idéales	Conservez-les dans un endroit chaud et ombragé, à une température comprise entre 21 et 24 °C.
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/17/dracena

Hedera helix 'Pittsburgh'

Image	
Nom latin/ Nom commun	Hedera helix 'Pittsburgh'
Famille	Araliacées
Description	<p>Feuillage : Feuilles vert foncé. Feuillage persistant. Aspect, usages : Grimpant jusqu'à 10 m, mais aussi bon couvre-sol. Qualités : Très rustique. Convient à tous les terrains. Variété intéressante pour les abeilles grâce à sa floraison en automne.</p>
Fonction / Propriétés	La plante a un effet purificateur d'air
Type de plante	Plantes dépolluantes
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	1 à 10 m et +
Largeur à maturité	/
Besoins en eau	Moyen, à vaporiser
Résistance au Froid	Résistante
Résistance au chaud / origine	Très répandu dans tous les sous-bois d'Europe, il peut être grimpant ou rampant et est très rustique et envahissant.
Températures idéales	Placez ces pots à la chaleur derrière une vitre (18 à 20 °C environ)
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/72/lierre

Begonia rex 'Alaska creek'

Image	
Nom latin/ Nom commun	Begonia rex 'Alaska creek'
Famille	Bégoniacées
Description	Fleur/floraison : Floraison en hiver et début du printemps. Hauteur : 0,40 m. Qualités : Groupe d'hybrides rhizomateux à feuillage persistant décoratif.
Fonction / Propriétés	Les fleurs de bégonia sont comestibles, on peut réaliser d'excellentes confitures avec celles-ci.
Type de plante	Plantes ornementales
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	0,15 à 5 m
Largeur à maturité	/
Besoins en eau	Faible
Résistance au Froid	Résistante
Résistance au chaud / origine	Les bégonias sont principalement originaires des régions tropicales chaudes et humides d'Amérique du Sud et d'Amérique centrale, mais on trouve également des bégonias sauvages qui poussent en Afrique tropicale ou en Asie du Sud-Est.
Températures idéales	Le bégonia a besoin de beaucoup de lumière, mais craint les rayons forts du soleil. Installez-le sur un rebord de fenêtre à l'est ou à l'ouest, à une température de 18 °C environ, à l'abri des courants d'air.
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/128/begonia

Tradescantia zebrina

Image	
Nom latin/ Nom commun	Tradescantia zebrina
Famille	Commelinacées
Description	<p>Culture : Extérieur, en pleine terre mais aussi beaucoup utilisée en tableau végétal.</p> <p>Description : Feuilles vertes rayées d'argent sur le dessus et violet lumineux en dessous. Son port est retombant.</p> <p>Qualités : Originaire du Mexique. Réputée pour son très beau feuillage. L'espèce est tapissante et s'étale beaucoup.</p>
Fonction / Propriétés	On l'utilise comme herbe à thé, pour confectionner une boisson froide appelée Matali. Elle serait aussi utilisée en Chine comme lubrifiant
Type de plante	Plantes ornementales
Végétation	Vivace
Feuillage	Persistant
Hauteur à maturité	0 à 1,50 m
Largeur à maturité	0,20 à 1 m
Besoins en eau	Faible, à vaporiser
Résistance au Froid	Résistante
Résistance au chaud / origine	Tradescantia zebrina vient du Mexique, Amérique centrale et Colombie, elle s'est naturalisée dans certaines régions d'Asie, Afrique, Australie, Amérique du Sud et différentes îles océaniques.
Températures idéales	<p>Il a besoin de lumière vive, sans soleil direct.</p> <p>Il aime une atmosphère chaude et humide, autour de 21 et 24 °C. La température minimale ne doit pas être inférieure à 7 ou 10 °C. Il est sensible au gel.</p>
Sources	https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/244/tradescantia

Sécheresse/ humidité de l'air: Sec 1 2 3 4 5 6 7 Humide

Qualité de l'air : Frais 1 2 3 4 5 6 7 Étouffant

4) Dans le bureau, dans quelle mesure pouvez-vous influencer les fonctions suivantes?
cochez une case par ligne

Température: Aucune influence 1 2 3 4 5 6 7 Contrôle total

Ventilation: Aucune influence 1 2 3 4 5 6 7 Contrôle total
Aération

5) Il y a-t-il d'autres aspects du confort thermique dans la chambre climatique que vous désirez commenter (OUI / NON)?

Si oui, faites le ci-dessus:

Nom: (*facultatif*) _____

Votre nom n'est pas indispensable, et vous êtes libre de le mettre ou non. Il nous aiderait à mieux tenir compte des remarques importantes.

Voici la fin du questionnaire. Merci pour votre peine et votre temps.

Annexe 5 : Code de calcul pour la méthode de Fanger

```
Sub PMV ()
.
Dim derniereligne As Long
Derniereligne = Range(« A10485576 »).End(xlUp).Row

Dim Tcl As Currency
Dim hr As Currency
Dim S As Currency
Dim ArAdu As Currency
Dim factor As Currency
Dim lclr As Currency

Dim fcl As Currency
Dim E As Currency
Dim Ediff As Currency
Dim Hres As Currency
Dim hs As Currency
Dim R As Currency
Dim C As Currency
Dim Balance As Currency
Dim PMV As Currency
Dim PPD As Currency

Dim M As Currency
Dim W As Currency
Dim Ta As Currency
Dim Tr As Currency
Dim v As Currency
Dim rh As Currency
Dim lcl As Currency

Dim i As Integer
I= 2

Do

M =Cells(i, 2)
W =Cells(i, 3)
Ta =Cells(i, 4)
Tr =Cells(i, 5)
v =Cells(i, 6)
rh =Cells(i, 7)
lcl = Cells(i, 8)

lcl = lcl * 0.155
Tsk = 35.7 - 0.0285 * M

'// Calculation of Pa (Pa)
Pa = (rh / 100) * 0.1333 * Exp(18.6686 - 4030.183 / (Ta + 235))

'//*** Calculation of Dlimneutral and Dlimminimal ***
'// Calculation of S (W/m2),fcl (n.d.), hr W/m2C with stepwise iteration
Tcl = Ta
hr = 3
S = 0
ArAdu = 0.77
factor = 500
lclr = lcl

Do
fcl = 1.05 + 0.65 * lcl
E = 0.42 * ((M - W) - 58)
```

```

Ediff= 3.05 * (0.255 * Tsk - 3.36 - Pa)
Hres = 0.0173 * M * (5.867 - Pa) + 0.0014 * M * (34 - Ta)
Tcl = Tsk - lcl * (M - W - E - Ediff - Hres - S)
hr= 5.67E-08 * 0.95 * ArAdu * (Exp(4 * WorksheetFunction.Ln(273 + Tcl)) - Exp(4 * WorksheetFunction.Ln(273 + Tr))) /
(Tcl - Tr)
'hc = 12.1*Math.pow(v,0.5) ;
hc = 12.1 * WorksheetFunction.Power(v,0.5)
R = fcl * hr * (Tcl - Tr)
C = fcl * hc * (Tcl - Ta)
Balance = M - W - E - Ediff - Hres - R - C - S
If Balance > 0 Then
S = S + factor
factor = factor / 2
Else
S = S - factor
End if

Loop While Abs(Balance) > 0.01
S = M - W - E - Ediff - Hres - R - C

PMV = (0.303 * Math.Exp(-0.036 * M) + 0.028) * S
PPD = 100 - 95 * Math.Exp(-0.03353 * WorksheetFunction.Power(PMV,4)) - 0.2179 * WorksheetFunction.Power(PMV,2)

Cells(i , 14) = PMV
Cells(i, 15) = PPD
Cells(i, 13) = Tcl

i = i + 1

Loop While i < derniereligne

End Sub

Sub Test_vba()

Dim v As Currency

v = Cells(2, 6)
Cells(2, 16) = 12.1 * WorksheetFunction.Power(v, 0.5)

End Sub

```