

Þÿ DÉVELOPPEMENT D UNE MÉTHODOLOGIE DE PRÉ-ÉVALU CONFORT THERMIQUE DES ESPACES TERTIAIRES EN PHASE AMONT DE CONCEPTION

Auteur : Noël, Henri

Promoteur(s) : Kiki, Gratien Jesugo Dieudonné; 2770

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/26535>

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 – Faculty of Science, Technology and Medicine

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE DE PRÉ-ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE DES ESPACES TERTIAIRES EN PHASE AMONT DE CONCEPTION

HENRI NOËL

MEMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLÔMES DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, A FINALITE SPECIALISEE (ULIEGE)
MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FILIERE ENERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)

ANNÉE ACADÉMIQUE 2025-2026

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE KIKI GRATIEN ET SCHOLZEN FRANCK

COMITÉ DE LECTURE :

WOUTERS ANNE

ABRAHAMS PAULINE

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 SIX Consulting & Engineering.

*L'autorité académique est représentée par le(s) (co-)promoteur(s), membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : NOËL Henri,
noel.henri03@gmail.com.

I. Remerciements

Au terme de ce travail de fin d'études, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont accompagné et soutenu tout au long de ce parcours.

Je remercie en premier lieu l'entreprise SIX Consulting & Engineering de m'avoir accueilli en stage et de m'avoir offert un cadre stimulant pour mener à bien ce mémoire. Mes remerciements vont tout particulièrement à mon maître de stage, Monsieur Lucas Vanderavero, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et le partage de son expérience, qui ont nourri ce travail tout au long de sa réalisation.

Je tiens également à remercier mes promoteurs, Monsieur Gratien KIKI et Monsieur Franck SCHOLZEN, ainsi que mes lectrices, Madame Anne WOUTERS et Madame Pauline ABRAHAMS, pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce mémoire, pour leurs remarques constructives et pour l'attention portée à mon travail.

Mes remerciements s'adressent plus largement à l'ensemble des professeurs de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg, dont l'enseignement et la rigueur ont constitué le socle des connaissances mobilisées dans ce travail.

Enfin, je remercie ma famille, pour son soutien indéfectible et ses encouragements constants, ainsi que toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, dans la rédaction de ce mémoire. Leur présence et leur appui ont été précieux jusqu'à l'aboutissement de ce projet.

II. Résumé

Le confort thermique est une composante essentielle de la qualité des bâtiments tertiaires et un critère central des certifications environnementales telles que BREEAM, dont le crédit Hea 04 impose une évaluation appuyée sur des indicateurs reconnus. En pratique, cette évaluation repose sur la simulation thermique dynamique (STD), rigoureuse mais longue et coûteuse à mettre en œuvre, ce qui la rend difficilement mobilisable en phase amont, lorsque de nombreuses variantes doivent être comparées et que les décisions de conception sont les plus influentes.

Ce travail, réalisé lors d'un stage chez SIX Consulting & Engineering sur le bâtiment de fret de Liège Airport, développe une méthodologie de pré-évaluation du confort thermique des espaces tertiaires. Fondée sur le modèle PMV/PPD et les catégories de la norme ISO 7730, elle vise à estimer la catégorie de confort probable d'un scénario sans relancer une STD complète pour chaque variante. À partir d'une situation initiale, une analyse paramétrique « un facteur à la fois » fait varier les paramètres du confort sur une zone de référence, puis sur six zones typologiques et deux stratégies de ventilation, les résultats étant exprimés en catégorie ISO 7730 et en pourcentage d'heures hors catégorie B.

La démarche aboutit à un tableau synthétique filtrable, accompagné d'un protocole d'utilisation, permettant à un ingénieur de comparer rapidement des scénarios et de cibler ceux qui justifient une simulation détaillée. Les résultats hiérarchisent les leviers de confort : l'activité métabolique et la stratégie de refroidissement dominant le déclassement, tandis que la vitesse d'air et la consigne de chauffage s'avèrent neutres. Constituant une pré-évaluation normative et non une preuve de conformité, la méthode se positionne comme une étape intermédiaire, complémentaire de la STD, dont elle prépare et rationalise l'usage en conception.

III. Déclaration relative à l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle

Dans un souci de transparence, l'auteur déclare avoir eu recours à des outils d'intelligence artificielle dans le cadre de ce mémoire. Leur usage s'est strictement limité à l'aide rédactionnelle : reformulation et amélioration de la syntaxe, correction orthographique et grammaticale, et aide à l'identification de ressources bibliographiques. Les outils mobilisés sont ChatGPT (OpenAI) et Claude (Anthropic) pour le travail rédactionnel et syntaxique, ainsi que ResearchRabbit pour la recherche de références scientifiques.

En revanche, aucun outil d'intelligence artificielle n'a été utilisé pour le travail scientifique proprement dit. La modélisation et les simulations sous IES VE, la conception de la méthodologie, la construction du tableau filtrable ainsi que l'analyse et l'interprétation des résultats relèvent intégralement du travail personnel de l'auteur. Les références identifiées à l'aide de ces outils ont par ailleurs été vérifiées et consultées directement avant toute citation.

L'auteur assume l'entière responsabilité du contenu du présent document.

IV. Table des matières

Liste des abréviations	1
Liste des figures	3
Liste des tableaux	4
1 Introduction	5
2 Présentation de l'entreprise	10
3 État de l'art	12
3.1 Le confort thermique dans les bâtiments tertiaires : enjeux et contexte climatique	12
3.2 Les modèles d'évaluation du confort : PMV/PPD, paramètres et limites	16
3.2.1 Approche rationnelle et adaptative	16
3.2.2 Le modèle PMV/PPD et ses six paramètres	16
3.2.3 Les paramètres personnels : MET et CLO.....	20
3.2.4 Le rôle des paramètres environnementaux	22
3.2.5 Limites du modèle PMV/PPD	23
3.3 Le cadre normatif du confort thermique	25
3.4 BREEAM Hea 04 et l'évaluation du confort thermique.....	28
3.5 La simulation thermique dynamique et IES VE	31
3.6 Méthodes simplifiées, aide à la décision et analyse paramétrique	34
3.7 Synthèse et positionnement du mémoire	36
4 Objectif de la recherche.....	38
4.1 Contexte et problématique.....	38
4.2 Objectif principal et objectifs spécifiques	39
5 Positionnement épistémologique : une recherche par conception	40
5.1 Une méthodologie comme résultat de recherche	40
5.2 Les deux activités de la démarche : construire et évaluer	40
5.3 Une démarche de conception structurée en étapes	41
5.4 Positionnement de la contribution	42
6 Présentation du cas d'étude : le bâtiment de Liège Airport.....	43

6.1	Description générale et périmètre de l'étude	43
6.2	Justification du choix du bâtiment.....	44
6.3	Découpage en zones thermiques et zones retenues.....	45
6.4	Hypothèses d'occupation et gains internes	45
6.5	Enveloppe thermique.....	46
6.6	Systèmes techniques et consignes	47
6.7	Modélisation dans IES VE	48
6.8	Rôle du cas d'étude dans la démarche.....	49
6.9	Origine et fiabilité du modèle de simulation.....	49
7	Méthodologie	51
7.1	Positionnement général et logique de la démarche	51
7.2	Distinction entre méthodologie de recherche et protocole applicatif.....	52
7.3	Choix d'une analyse paramétrique contrôlée (OFAT)	52
7.4	Rappel du cas d'application et des zones étudiées	53
7.5	Déroulé de l'analyse paramétrique	54
7.5.1	Étape 1 : Vérification du traitement du CLO dans IES VE.	54
7.5.2	Étape 2 : Analyse paramétrique sur une zone de référence.....	54
7.5.3	Étape 3 : Application aux six zones typologiques.	55
7.5.4	Étape 4 : Comparaison des stratégies de ventilation.....	55
7.5.5	Étape 5 : Recherche exploratoire de la catégorie A.	55
7.6	Construction du tableau filtrable	56
7.7	Protocole d'utilisation du tableau en phase d'avant-projet	57
7.8	Domaine de validité et limites méthodologiques.....	58
7.9	Synthèse de la démarche	58
8	Résultats : une méthodologie de pré-évaluation et sa mise à l'épreuve	59
8.1	Résultat principal : une méthode adossée aux simulations PMV/PPD	59
8.2	Étape 1 : délimiter le domaine d'application	59
8.3	Étape 2 : formaliser les variables d'entrée	60
8.4	Étape 3 : construire la matrice paramétrique	60

8.5	Étape 4 : choisir les indicateurs de sortie et le critère de classement.....	60
8.6	Étapes 5 et 6 : le tableau filtrable et le protocole	61
8.7	Ampleur de l’instanciation : les simulations	61
8.8	Hierarchisation des leviers du confort	62
8.9	Cohérence des résultats d’une zone à l’autre.....	63
8.10	Comparaison des variantes techniques	64
8.11	Exploration des marges supérieures (catégorie A)	65
8.12	Le tableau filtrable à l’œuvre : exemple d’utilisation	66
8.13	Synthèse : ce que les résultats établissent	67
9	Discussion.....	68
9.1	Interprétation d’ensemble : ce que la méthode établit.....	68
9.2	Positionnement par rapport aux approches existantes	68
9.3	Limites liées au modèle PMV.....	69
9.4	Limites liées au logiciel de simulation (IES VE).....	69
9.5	Limites liées à l’approche paramétrique (OFAT)	70
9.6	Limites liées aux hypothèses d’usage : MET, CLO et humidité	71
9.7	Périmètre : confort global et inconfort local	71
9.8	Validité et statut du cas d’étude.....	71
9.9	Perspectives	72
10	Conclusion.....	74
11	Annexe	76
11.1	Annexe A : Données techniques du bâtiment cas d’étude.	76
11.1.1	A.1. Périmètre de l’étude	76
11.1.2	A.2. Zones typologiques étudiées	76
11.1.3	A.3. Enveloppe thermique (partie bureaux)	77
11.1.4	A.4. Gains internes	77
11.1.5	A.5. Systèmes techniques	78
11.1.6	A.6. Pompe à chaleur (fiche technique Aermec NRG1100).....	78
11.1.7	A.7. Données de simulation	79

11.2	Annexe B : Explication des hypothèses.....	79
11.3	Annexe C : Tableau filtrable	83
11.3.1	Les filtres	83
11.3.2	Le tableau	83
11.4	Annexe D : Plan de l'aéroport de Liège	85
11.5	Annexe E : Démonstration de l'utilisation du CLO par IES VE.	90
11.5.1	Où le CLO intervient dans la formule de Fanger	90
11.5.2	Une équation implicite, résolue par itération	90
11.5.3	Une variable comportementale, non observable.....	91
11.5.4	Affichage vs calcul : la valeur moyenne est trompeuse	91
11.5.5	La logique réelle : la méthode Min/Max	92
11.5.6	Démonstration et conséquence pour la méthode	92
12	Bibliographie	94
13	Iconographie	99
13.1	Figures.....	99
13.2	Tableaux	101

Liste des abréviations

Les principales abréviations et sigles employés dans ce mémoire sont répertoriés ci-dessous.

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BRE : Building Research Establishment

BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method

CEN : Comité européen de normalisation

CIBSE : Chartered Institution of Building Services Engineers

CLO : Indice d'isolation vestimentaire (*clothing insulation*)

CTA : Centrale de traitement d'air

DSY : *Design Summer Year* — fichier météorologique d'été de référence

EN : Norme européenne

Hea 04 : Crédit « Thermal comfort » du référentiel BREEAM

HVAC : Chauffage, ventilation et climatisation (*heating, ventilation and air-conditioning*)

HR : Humidité relative

IES VE : Integrated Environmental Solutions — Virtual Environment, logiciel de simulation

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change — GIEC

ISO : International Organization for Standardization

MET : Taux métabolique (*metabolic rate*)

NIST : National Institute of Standards and Technology

OFAT : Analyse « un facteur à la fois » (*one factor at a time*)

PAC : Pompe à chaleur

PEB : Performance énergétique des bâtiments

PIR : Polyisocyanurate, isolant

PMV : Vote moyen prévisible (*predicted mean vote*)

PPD : Pourcentage prévisible d'insatisfaits (*predicted percentage of dissatisfied*)

PUR : Polyuréthane, isolant

STD : Simulation thermique dynamique

Mots clés

Mots clés : confort thermique ; PMV/PPD ; ISO 7730 ; BREEAM Hea 04 ; simulation thermique dynamique ; analyse paramétrique ; pré-évaluation ; aide à la décision.

Liste des figures

Figure 1 : Logo de l'entreprise SIX.....	10
Figure 2 : évolution des anomalies de températures de l'air en surface depuis 1980	13
Figure 3 : Anomalies et extrêmes de la température de l'air en surface durant l'été 2025. ..	13
Figure 4 : Schéma de principe des besoins de refroidissement d'un bâtiment	14
Figure 5 : Indice PMV et bilan thermique du corps humain	17
Figure 6 : Correspondance entre les indices PMV et PPD	20
Figure 7 : Schéma d'une STD : données entrées vs données sorties.....	31
Figure 8 : Aéroport de Liège	44
Figure 9 : Schéma simplifié de la méthodologie utilisée.....	51
Figure 10 : Pourcentage d'heures hors catégorie B pour la zone de référence.	62
Figure 11 : Hiérarchisation des leviers sur la zone de référence : pourcentage d'heures hors catégorie B par hypothèse, trié par sévérité.	63
Figure 12 : Catégorie de confort par zone et par hypothèse : vérification interne de cohérence	64
Figure 13 : Effet du régime de ventilation (bypass vs température constante) sur le nombre de scénarios conformes, par zone.	65
Figure 14 : Extrait du tableau filtrable pour le bureau de 4 personnes atteignant la catégorie B.	66
Figure 15 : Extrait du tableau filtrable pour le bureau de 4 personnes ayant un MET de 2. ..	67

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les six paramètres du modèle PMV/PPD et leur rôle dans le confort thermique.	17
Tableau 2 : Tableau reprenant le taux métabolique (MET) selon l'activité d'une personne..	21
Tableau 3 : Représentation de l'isolation vestimentaire selon le type de vêtements	22
Tableau 4 : Tableau reprenant le niveau de confort lié au PMV selon la norme ISO 7730:2005	25
Tableau 5 : Articulation des normes mobilisées dans le mémoire.....	26
Tableau 6 : Tableau reprenant la qualité BREEAM selon la catégorie atteinte	28
Tableau 7 : Hypothèses de gains internes dans les zones administratives.	46
Tableau 8 : Compositions d'enveloppe prévues pour la partie bureaux.	47
Tableau 9 : Systèmes techniques et consignes des zones administratives	47
Tableau 10 : Répartition des simulations thermiques dynamiques par zone et par régime de ventilation (les essais de catégorie A, menés sur trois zones, sont inclus dans les scénarios bypass).....	62

1 Introduction

Le changement climatique modifie progressivement les conditions dans lesquelles les bâtiments sont conçus, exploités et évalués. En Europe, l'augmentation des températures moyennes et l'intensification des épisodes de chaleur forment déjà des tendances documentées par la littérature scientifique et les rapports climatiques internationaux (IPCC, 2022, 2023). Ces évolutions renforcent la question du confort thermique intérieur, en particulier dans les bâtiments occupés quotidiennement, où les usagers passent une part importante de leur temps. Le bâtiment ne peut donc plus être considéré uniquement comme une enveloppe destinée à limiter les consommations d'énergie ; il doit également être conçu comme un environnement intérieur capable de préserver la santé, le bien-être et la performance des occupants.

Dans ce contexte, le risque de surchauffe devient un enjeu central. Plusieurs travaux montrent que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur accroît le risque d'inconfort thermique dans les bâtiments, ainsi que les besoins potentiels de refroidissement (Hamdy et al., 2017 ; Attia et al., 2023). Cette problématique est particulièrement importante dans les bâtiments tertiaires, car ceux-ci combinent souvent des apports internes importants, liés à l'occupation, à l'éclairage et aux équipements informatiques, avec des exigences élevées en matière de confort. Les choix réalisés en phase de conception : enveloppe, protections solaires, ventilation, systèmes de chauffage et de refroidissement, régulation. Ils ont donc une influence directe sur les conditions thermiques ressenties par les occupants.

Le confort thermique s'apparente également à un enjeu économique et organisationnel. Dans les environnements de travail, des conditions thermiques inadaptées peuvent affecter la concentration, le bien-être, la satisfaction et la performance des occupants. Les études portant sur les bureaux montrent que la température intérieure influence les performances de travail, même si l'ampleur de cet effet dépend du type de tâche, du contexte et des méthodes d'évaluation utilisées (Seppänen et al., 2006 ; Porras-Salazar et al., 2021). Plus largement, la littérature relative à la qualité de l'environnement intérieur établit un lien entre

de bonnes conditions de confort, la santé des occupants, la productivité et certains indicateurs organisationnels tels que les congés maladie ou les absences (Tarantini et al., 2017 ; Mendell et Mirrer, 2009). Il convient toutefois de rester prudent : l'absentéisme ne dépend jamais uniquement du confort thermique. Il s'agit d'un phénomène multifactoriel, influencé par des facteurs individuels, organisationnels, sanitaires et environnementaux. Le confort thermique n'en demeure pas moins un facteur important de la qualité des environnements de travail.

Pour évaluer ce confort, plusieurs approches existent. Dans les bâtiments tertiaires climatisés ou mécaniquement ventilés, le modèle PMV/PPD développé par Fanger reste l'une des méthodes les plus utilisées. Le PMV (*Predicted Mean Vote*) prédit la sensation thermique moyenne d'un groupe d'occupants, tandis que le PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) estime le pourcentage prévisible d'occupants insatisfaits (Fanger, 1970). Ces indices sont repris dans la norme ISO 7730:2005, qui définit des catégories de confort thermique sur la base de plages de PMV et de valeurs maximales de PPD (ISO, 2025). Le modèle repose sur six paramètres : la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse de l'air, l'humidité relative, le niveau d'activité métabolique et l'isolation vestimentaire. Cette structure rend le modèle particulièrement intéressant pour une analyse paramétrique, car elle permet d'identifier les variables qui influencent directement les résultats de confort.

Dans le cadre des certifications environnementales, le confort thermique occupe une place importante. BREEAM, méthode internationale d'évaluation environnementale des bâtiments, intègre cette question à travers le crédit Hea 04, consacré au confort thermique. Ce crédit vise à s'assurer que les conditions intérieures prévues par le projet sont compatibles avec un niveau de confort satisfaisant pour les occupants et que les systèmes de régulation permettent de maintenir ces conditions en exploitation. Dans les projets tertiaires, cette exigence conduit généralement à mobiliser une simulation thermique dynamique afin d'évaluer les températures intérieures, les risques de surchauffe et les indicateurs de confort selon les référentiels applicables.

La Simulation Thermique Dynamique correspond à un outil puissant pour analyser le comportement horaire d'un bâtiment. Elle permet de prendre en compte les interactions entre le climat extérieur, l'enveloppe, les apports solaires, l'inertie, l'occupation, les gains internes et les systèmes HVAC. Cependant, sa mise en œuvre peut être longue et coûteuse, surtout lorsque plusieurs scénarios techniques doivent être comparés en phase amont. La modélisation, le paramétrage, le calcul et l'interprétation des résultats nécessitent du temps et une expertise spécifique. Cette limite est régulièrement soulignée dans la littérature sur les outils d'aide à la décision en conception énergétique : les simulations détaillées sont utiles, mais elles sont parfois mobilisées trop tard ou trop difficilement pour éclairer les choix des premières phases de conception (Attia et al., 2012 ; Ochoa & Capeluto, 2009).

C'est dans cette problématique que s'inscrit le présent travail de fin d'études. Le mémoire est réalisé dans le cadre d'un stage chez Six Engineering, bureau d'études en ingénierie du bâtiment. Le cas d'application est un bâtiment de fret aérien situé à Liège Airport, comprenant un hall logistique et des espaces administratifs associés. Le travail ne vise toutefois pas à réaliser un diagnostic complet de l'ensemble du bâtiment. Le hall de fret est uniquement utilisé pour contextualiser le projet. L'analyse porte sur les espaces administratifs et tertiaires, car ce sont les zones occupées de manière régulière par des usagers et pertinentes pour l'évaluation du confort thermique selon les indices PMV et PPD.

La problématique centrale peut être formulée de la manière suivante : comment aider un ingénieur à anticiper, dès la phase de conception, la catégorie de confort thermique d'un espace tertiaire sans devoir relancer immédiatement une simulation thermique dynamique complète pour chaque variante technique envisagée ? Cette question se situe à l'interface entre rigueur scientifique et utilité opérationnelle. D'un côté, l'évaluation du confort doit rester fondée sur des modèles reconnus, des normes et des hypothèses justifiables. De l'autre, l'ingénieur a besoin d'un outil simple et rapide pour comparer plusieurs scénarios, identifier les configurations défavorables et orienter les choix techniques avant la validation finale.

L'objectif principal de ce mémoire est donc de développer une méthodologie de pré-évaluation du confort thermique dans les espaces tertiaires. Cette méthodologie repose sur le modèle PMV/PPD, sur une analyse paramétrique des variables influençant le confort et sur l'exploitation de résultats issus d'IES VE. Le résultat principal est une méthode reproductible permettant de transformer des sorties de simulation en un tableau synthétique filtrable d'aide à la décision. Ce tableau doit permettre à un ingénieur d'identifier rapidement, pour une zone donnée et un scénario technique donné, la catégorie de confort probable, le nombre d'heures hors catégorie et, lorsque l'information est disponible, l'ordre de grandeur du coût d'équipement associé.

La méthode se place en amont de la STD, qu'elle ne remplace pas. La STD reste nécessaire pour la validation finale du projet, notamment dans un cadre certificatif tel que BREEAM. La méthodologie proposée intervient en amont : elle vise à filtrer les scénarios, à repérer les situations à risque, à comparer les variantes et à réserver les simulations détaillées aux configurations les plus pertinentes. Ce positionnement permet de préserver la rigueur du travail tout en répondant à une problématique concrète rencontrée dans les bureaux d'études.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de recherche par conception (*design science research*), dans laquelle le résultat scientifique attendu est un artefact, ici une méthodologie, conçu pour répondre à un problème pratique, puis évalué sur un cas d'application (Hevner et al., 2004 ; March & Smith, 1995). Le bâtiment de fret de Liège Airport y est mobilisé comme cas d'instanciation et de mise à l'épreuve de la méthode.

Le mémoire est structuré de la manière suivante. Le premier chapitre présente l'état de l'art nécessaire à la compréhension du sujet : confort thermique, modèle PMV/PPD, norme ISO 7730, certification BREEAM Hea 04, simulation thermique dynamique, rôle d'IES VE et limites connues du modèle de Fanger. Le deuxième chapitre formalise la question de recherche et les objectifs du travail. Le troisième chapitre décrit la méthodologie développée : positionnement général, sélection des zones, hypothèses paramétriques, étapes de simulation et construction du tableau synthétique. Le quatrième chapitre

présente les résultats, compris comme la formalisation progressive d'une méthodologie et d'un outil d'aide à la décision. Enfin, le dernier chapitre discute la portée de la méthode, ses limites, les conditions de transposition à d'autres bâtiments et les perspectives de validation future.

2 Présentation de l'entreprise

Le présent travail s'est déroulé au sein de Six Consulting & Engineering, bureau d'études en ingénierie et conseil pour le secteur de la construction, fondé en 2005. L'entreprise exerce principalement en Belgique et au Grand-Duché de Luxembourg, depuis ses implantations de Namur, Liège et Windhof. Elle réunit aujourd'hui de l'ordre de soixante-cinq collaborateurs et a poursuivi ces dernières années une croissance soutenue.

Historiquement adossée aux projets d'un unique donneur d'ordre, l'entreprise a engagé un tournant stratégique en s'ouvrant au marché extérieur. Cette diversification l'a conduite à intervenir sur des projets plus variés et plus complexes que les bâtiments résidentiels classiques. Comme des équipements universitaires, des hôtels ou des immeubles de bureaux, notamment. Et à réduire sa dépendance à un client unique.

L'activité de l'entreprise s'organise autour de quatre pôles complémentaires : les *techniques spéciales* (conception et optimisation des installations de chauffage, ventilation, climatisation et électricité) ; la *stabilité* (études de structures) ; l'*énergie* (solutions énergétiques durables et études de performance énergétique des bâtiments) ; et l'*architecture*. C'est au sein du pôle consacré aux techniques spéciales et à la performance énergétique que s'inscrit ce travail. La problématique est d'évaluer le confort thermique en phase amont, elle relève directement des missions du bureau.

L'entreprise accompagne par ailleurs son développement d'une modernisation de ses méthodes, notamment par l'intégration d'outils numériques et par un investissement dans la recherche appliquée à l'optimisation énergétique. C'est dans cette démarche que s'inscrit le présent mémoire : la méthodologie de pré-évaluation développée vise à outiller la pratique du bureau en phase de conception, en complément des outils de simulation déjà employés.



Figure 1 : Logo de l'entreprise SIX

Les informations relatives à l'entreprise proviennent du site officiel de Six Consulting & Engineering et d'échanges internes réalisés dans le cadre du stage.

3 État de l'art

3.1 Le confort thermique dans les bâtiments tertiaires : enjeux et contexte climatique

Le confort thermique est une composante centrale de la qualité de l'environnement intérieur. Il se définit comme l'état de satisfaction d'un individu vis-à-vis de son environnement thermique et ne se réduit pas à la seule température de l'air : à température d'air identique, deux locaux peuvent procurer des sensations différentes selon la température moyenne radiante, la vitesse de l'air, l'humidité relative, l'activité métabolique des occupants et leur isolation vestimentaire (Fanger, 1970 ; ISO, 2025; ASHRAE, 2023). Dans les bâtiments tertiaires, où les occupants passent plusieurs heures par jour dans des conditions d'activité relativement stables, cette dimension conditionne directement la qualité d'usage et la satisfaction perçue (Mendell et Mirer, 2009 ; Porras-Salazar et al., 2021). Le confort y constitue donc un critère de performance à part entière, au même titre que la performance énergétique, la qualité de l'air, l'éclairage ou l'acoustique.

Cet enjeu s'intensifie avec le changement climatique. Les rapports du GIEC établissent comme robuste la hausse des températures moyennes et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des extrêmes chauds, à l'échelle mondiale comme européenne (IPCC, 2022, 2023). Concevoir un bâtiment capable de maintenir des conditions intérieures acceptables suppose désormais d'anticiper non seulement le climat actuel mais aussi des conditions futures plus chaudes, ce qui place le risque de surchauffe au cœur de la conception (Hamdy et al., 2017 ; Attia et al., 2023). La figure suivante illustre l'évolution des anomalies de températures de l'air en surface depuis 1980.

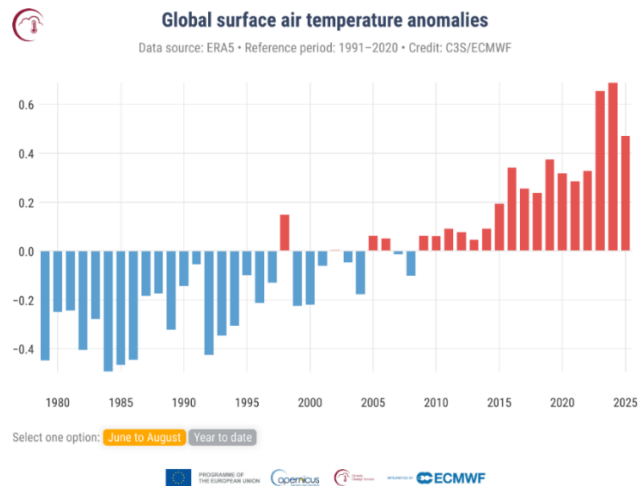


Figure 2 : évolution des anomalies de températures de l'air en surface depuis 1980

Quant à elle, la figure suivante illustre les anomalies et extrêmes de la température de l'air en surface durant l'été 2025.

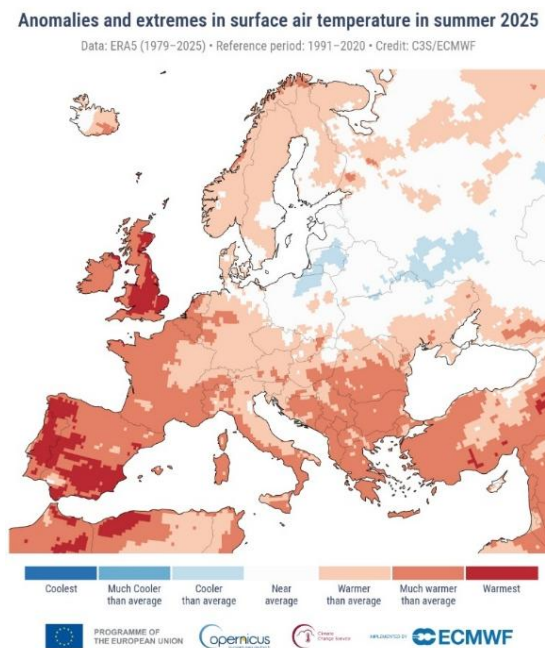


Figure 3 : Anomalies et extrêmes de la température de l'air en surface durant l'été 2025.

Ces figures illustrent l'augmentation récente des anomalies de température et la fréquence accrue des épisodes chauds en Europe, ce qui renforce la pertinence d'une réflexion sur le confort thermique en phase de conception.

Dans le tertiaire, ce risque est amplifié par les apports internes, illustrés dans la figure qui suit. Les occupants, l'éclairage et les équipements informatiques produisent une chaleur qui s'ajoute aux apports solaires et aux transferts à travers l'enveloppe. Bénéfiques en hiver, ces apports accentuent l'inconfort en mi-saison et en été (Attia et al., 2023). Les open spaces, salles de réunion, salles de formation et cafétérias présentent en outre des profils d'occupation concentrés dans le temps, source de variations rapides des charges internes et des conditions de confort.

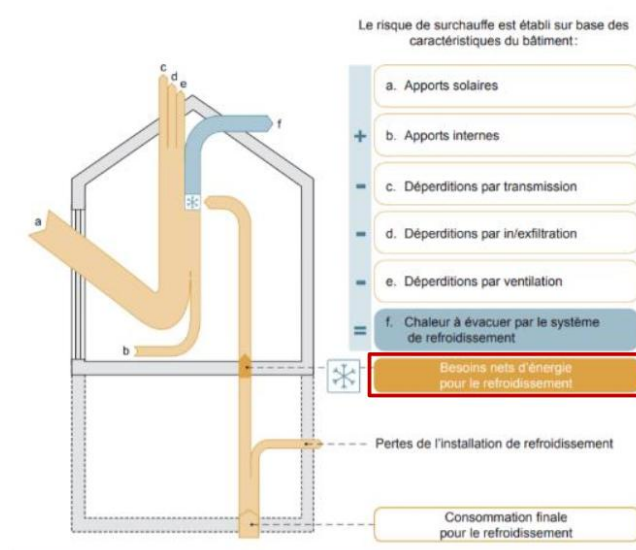


Figure 4 : Schéma de principe des besoins de refroidissement d'un bâtiment

Le confort est par ailleurs indissociable de la performance énergétique : maintenir une ambiance confortable mobilise chauffage, refroidissement et ventilation, de sorte que les choix de conception et de régulation pèsent simultanément sur le confort et sur les consommations (Attia et al., 2012). Cette tension est particulièrement vive dans les bâtiments performants : une isolation et une étanchéité renforcées réduisent les pertes hivernales mais accroissent la sensibilité aux apports internes et solaires lorsque ventilation, protections solaires et stratégies de refroidissement sont mal dimensionnées

(Hamdy et al., 2017). Le confort ne peut donc être traité comme un critère vérifié en fin de projet : il doit être intégré dès les phases amont, lorsque l'enveloppe, l'orientation, les systèmes et les profils d'usage restent modifiables (Attia et al., 2012 ; Ochoa & Capeluto, 2009).

La dimension sanitaire et organisationnelle doit être formulée avec prudence. Des conditions thermiques défavorables peuvent être associées à des symptômes ressentis et à une perception dégradée de l'environnement de travail (Mendell et Mirer., 2009). Quant au lien entre température et performance, des travaux anciens situaient un optimum autour de 22 °C, avec une dégradation au-delà de 23-24 °C (Seppänen et al., 2006) ; mais une méta-analyse de 35 études n'a pas confirmé de relation statistiquement robuste entre température et performance dans la plage usuelle de bureau (Porras-Salazar et al., 2021). Il convient donc d'éviter toute formulation simpliste reliant directement inconfort thermique et absentéisme ou baisse de productivité : l'absentéisme est multifactoriel. Le confort thermique demeure néanmoins un facteur reconnu de la qualité de l'environnement de travail et de la satisfaction des occupants (Tarantini et al., 2017).

Le confort thermique se situe ainsi à l'intersection d'un enjeu physique, énergétique, sanitaire, surtout pour ce travail de conception. C'est ce dernier point qui motive le mémoire : développer une méthode permettant d'éclairer, dès l'amont, les choix techniques qui déterminent les conditions de confort futures.

3.2 Les modèles d'évaluation du confort : PMV/PPD, paramètres et limites

3.2.1 Approche rationnelle et adaptative

Évaluer le confort suppose de relier les conditions physiques d'un local à la sensation thermique probable des occupants. Deux familles de modèles coexistent. Les *modèles rationnels* reposent sur le bilan thermique du corps humain : l'individu est en confort lorsque la chaleur produite par le métabolisme est dissipée vers l'environnement sans effort thermorégulateur excessif, par convection, rayonnement, évaporation et respiration (Fanger, 1970 ; ISO, 2025). Le modèle PMV/PPD de Fanger appartient à cette famille. Les *modèles adaptatifs*, eux, considèrent que la sensation dépend aussi de l'expérience thermique récente, des attentes et de la capacité d'action des occupants, de l'ouverture des fenêtres, de l'adaptation vestimentaire et des déplacements (de Dear & Brager, 1998 ; Humphreys & Nicol, 2002). Ils sont surtout pertinents pour les bâtiments naturellement ventilés.

Ce mémoire retient le PMV/PPD parce qu'il se présente le cadre d'évaluation mobilisé par l'ISO 7730: 2025 et par le crédit BREEAM Hea 04 applicable aux espaces tertiaires étudiés (ISO, 2025). Ce choix n'affirme pas que le PMV décrive parfaitement le confort réel ; il traduit sa cohérence avec le cadre normatif et certificatif du projet et avec une méthodologie fondée sur des paramètres explicites. L'approche adaptative reste convoquée pour discuter les limites du modèle.

3.2.2 Le modèle PMV/PPD et ses six paramètres

Le PMV (*Predicted Mean Vote*) a été établi par Fanger à partir d'expériences en chambres climatiques reliant les votes thermiques de groupes de sujets aux conditions physiques et au bilan thermique du corps (Fanger, 1970). Il prédit le vote thermique *moyen* d'un grand groupe sur une échelle à sept niveaux, de -3 (froid) à +3 (chaud), 0 correspondant à la neutralité. La figure suivante illustre cette échelle. Son objet n'est pas la sensation individuelle mais la sensation moyenne d'un groupe exposé aux mêmes conditions.

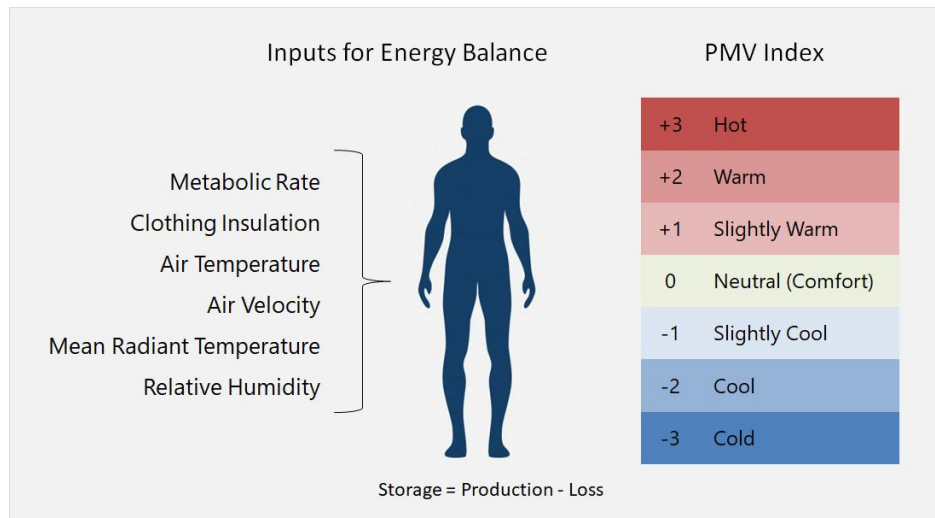


Figure 5 : Indice PMV et bilan thermique du corps humain

Le calcul repose sur six paramètres, répartis en deux familles.

Tableau 1 : Les six paramètres du modèle PMV/PPD et leur rôle dans le confort thermique.

Famille	Paramètre	Rôle dans le confort thermique
Environnemental	Température de l'air	Échanges convectifs avec l'air ambiant
Environnemental	Température moyenne radiante	Échanges radiatifs avec les surfaces environnantes
Environnemental	Vitesse de l'air	Pertes convectives et effet de refroidissement
Environnemental	Humidité relative	Échanges évaporatoires et perception de moiteur
Personnel	Taux métabolique (MET)	Production interne de chaleur liée à l'activité
Personnel	Isolation vestimentaire (CLO)	Résistance aux échanges corps-environnement

Cette structure est centrale pour le mémoire : puisque le PMV dépend d'un nombre limité de paramètres identifiés, il se prête à une analyse paramétrique. Le PMV se calcule à partir de

la charge thermique du corps, soit l'écart entre chaleur produite et chaleur dissipée. Dans sa forme synthétique :

$$PMV = [0,303 \cdot e - 0,036 \cdot M + 0,028] \cdot L$$

Où M représente le métabolisme et L la charge thermique du corps (Fanger, 1970 ; ISO, 2005). Lorsque L est proche de zéro, le corps est proche de la neutralité ; positive ou négative, elle déplace la sensation vers le chaud ou le froid.

Cette forme synthétique masque toutefois le rôle des six paramètres : ceux-ci n'interviennent pas dans le facteur de tête, mais dans la charge thermique L , qui constitue le bilan entre la chaleur produite par le corps et l'ensemble des pertes vers l'environnement. En développant ces échanges, la charge thermique s'écrit (Fanger, 1970 ; ISO, 2025) :

$$\begin{aligned} L = & (M - W) - 3,05 \cdot [5,73 - 0,007 (M - W) - p_a] \\ & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned}$$

Équation du PMV

Chaque terme correspond à un mode d'échange thermique, et c'est à travers eux que les six paramètres précédemment listés entrent réellement dans le calcul :

— le terme $(M - W)$ représente la production interne de chaleur, où M est le *taux métabolique* et W le travail mécanique externe, généralement négligeable en milieu tertiaire ;

— les termes en 3,05 et 0,42 traduisent les pertes par *évaporation* cutanée, fonction de la pression partielle de vapeur d'eau p_a , elle-même directement liée à l'*humidité relative* ;

— les termes en 0,0173 et 0,0014 représentent les pertes *respiratoires*, latente et sensible, fonction de p_a et de la *température de l'air* t_a ;

— le terme en $3,96 \cdot 10^{-8}$ décrit les pertes par *rayonnement* entre la surface du vêtement et les parois, portées par la *température moyenne radiante* $\bar{t}_r$;

— le dernier terme, $f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$, correspond aux pertes par *convection* vers l'air, où le coefficient h_c dépend de la *vitesse de l'air*.

Les deux grandeurs f_{cl} (facteur de surface habillée) et t_{cl} (température de surface du vêtement) relient ces échanges à l'*isolation vestimentaire* (CLO). La température t_{cl} n'est pas connue a priori : elle est solution d'une équation implicite, résolue par itérations successives par le moteur de simulation. Le traitement particulier de ce paramètre est détaillé dans le chapitre Méthodologie.

Ce développement montre que les six paramètres :

1. Température de l'air,
2. Température moyenne radiante,
3. Vitesse de l'air,
4. Humidité relative,
5. Taux métabolique et
6. Isolation vestimentaire

Ils n'agissent pas isolément mais de manière couplée dans un même bilan. C'est ce couplage qui fonde l'intérêt d'une analyse paramétrique pour isoler l'effet apparent de chacun, tout en justifiant la prudence d'interprétation, puisque faire varier un seul paramètre à la fois ne rend pas compte de leurs interactions.

Le PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) complète le PMV en estimant la proportion prévisible d'insatisfaits :

$$PPD = 100 - 95 \cdot e - (0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)$$

Le PPD croît dès que le PMV s'écarte de la neutralité, dans un sens comme dans l'autre. Même à PMV nul, il demeure d'environ 5 % : il est impossible de satisfaire thermiquement l'ensemble d'un groupe, même en conditions optimales.

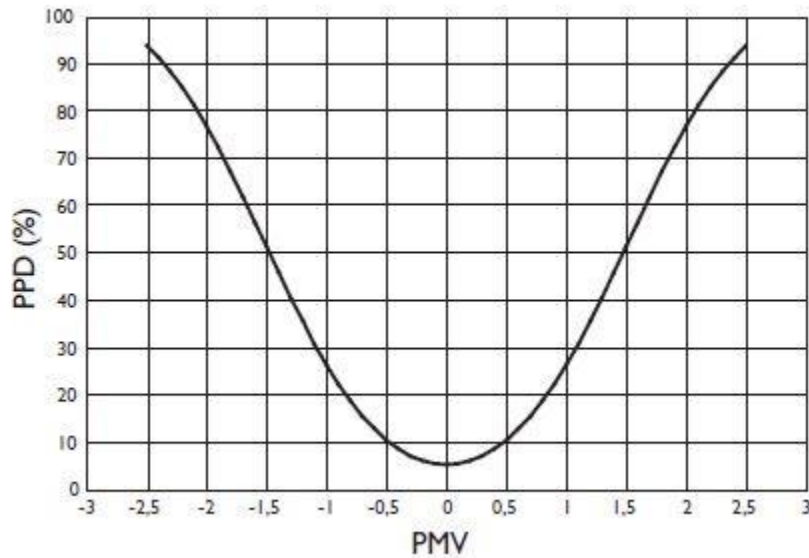


Figure 6 : Correspondance entre les indices PMV et PPD

L'ISO 7730:2005 traduit ces indices en catégories de confort : catégorie A ($-0,2 < PMV < +0,2$; $PPD < 6 \%$), catégorie B ($-0,5 < PMV < +0,5$; $PPD < 10 \%$) et catégorie C ($-0,7 < PMV < +0,7$; $PPD < 15 \%$) (ISO, 2025). Dans ce mémoire, la catégorie B représente l'objectif principal : suffisamment exigeante pour limiter la proportion d'insatisfaits, mais plus réaliste à maintenir en exploitation que la catégorie A, traitée comme une optimisation exploratoire.

3.2.3 Les paramètres personnels : MET et CLO

Contrairement aux quatre paramètres environnementaux, le MET et le CLO ne sont pas des caractéristiques du bâtiment. Ils dépendent du comportement humain, de l'activité, de la saison, du contexte professionnel et des habitudes vestimentaires (ISO, 2007, 2021 ; ASHRAE, 2023). Ils introduisent donc dans l'évaluation une part irréductible d'incertitude, mais aussi la possibilité de relier le confort à l'usage réel des espaces. Ce qui est décisif lorsqu'on compare les différentes typologies tertiaires.

Le *taux métabolique* correspond à la chaleur interne produite selon l'activité ; 1 MET équivaut conventionnellement à environ $58,15 \text{ W/m}^2$ de surface corporelle (Fanger, 1970 ; ISO, 2021). À conditions identiques, une personne assise, debout ou en activité légère ne ressent pas le même confort : un métabolisme plus élevé déplace le PMV vers le chaud. L'ISO 8996:2021

encadre l'estimation du MET et permet d'associer une hypothèse d'activité à chaque zone (sédentaire en bureau et open space ; assise en réunion ; distinction participants assis / formateur debout en salle de formation ; usage ponctuel en vestiaire) détaillé dans le tableau qui suit. En conception, le MET reste estimé à partir de l'usage attendu, jamais mesuré : c'est une valeur représentative, à documenter et, le cas échéant, à tester en plusieurs scénarios.

Tableau 2 : Tableau reprenant le taux métabolique (MET) selon l'activité d'une personne

Activité	Taux métabolique (Met)
Repos (assis tranquillement)	0.8
Lecture ou écriture	1.0
Assis, travail de bureau léger	1.2
Debout, activité légère	1.4
Debout, activité moyenne	1.8
Marche (3 km/h)	2.0
Ménage	2.5
Marche (5 km/h)	2.8
Travail lourd (port de charges, etc.)	3.5
Course à pied (8 km/h)	8.0

L'*isolation vestimentaire* est la résistance thermique des vêtements ; $1 \text{ clo} \approx 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (Fanger, 1970 ; ISO, 2007). Une tenue plus isolante réduit les pertes et déplace la sensation vers le chaud. L'ISO 9920:2007 fournit les méthodes d'estimation du CLO à partir d'ensembles vestimentaires types. Le CLO est cependant une hypothèse comportementale, non un réglage technique. Il varie avec la saison, la culture professionnelle et les préférences individuelles, et son estimation est complexe. L'ajustement, la superposition des couches, la posture, la ventilation à travers les tissus en font partie (ISO, 2007 ; Havenith et al., 2015). Une plage de CLO peut être plus représentative qu'une valeur unique, à condition d'explicitier l'hypothèse d'adaptation sous-jacente, d'autant que les codes vestimentaires limitent souvent cette adaptation en contexte professionnel. Le tableau suivant permet d'avoir une idée de l'échelle de l'isolation vestimentaire.

Tableau 3 : Représentation de l'isolation vestimentaire selon le type de vêtements

Type de vêtement	Isolation vestimentaire (Clo)
Nu	0.0
Été, vêtements légers	0.5
Vêtements d'intérieur typiques	0.6
Chemise à manches longues, pantalon	0.7
Costume léger	0.9
Costume avec pull	1.0
Vêtements d'hiver	1.3
Vêtements d'hiver avec manteau	1.5
Manteau d'hiver lourd, tenue thermique	2.0

La sensibilité du PMV à ces deux paramètres est forte et justifie l'approche paramétrique du mémoire : deux scénarios partageant température et ventilation peuvent relever de catégories différentes si l'activité ou la vêtue diffèrent. Le tableau synthétique doit donc toujours associer un résultat PMV à ses hypothèses de MET et de CLO ; sans cela, le résultat n'est pas interprétable.

3.2.4 Le rôle des paramètres environnementaux

Les quatre paramètres environnementaux décrivent l'ambiance thermique ; leur définition et leur mesure sont normalisées par l'ISO 7726, qui fixe les grandeurs physiques caractérisant un environnement thermique (ISO, 2025).

La température de l'air (t_a) est la température de l'air entourant l'occupant, indépendamment de tout rayonnement (ISO, 2025). Plus elle est élevée, plus les échanges convectifs entre le corps et l'air diminuent et plus la sensation se déplace vers le chaud (Fanger, 1970 ; ISO, 2025).

La température moyenne radiante ($\bar{t}_r$) est définie par l'ISO 7726 comme la température uniforme d'une enceinte imaginaire dans laquelle le transfert de chaleur par rayonnement depuis le corps humain serait égal au transfert réel dans l'enceinte non uniforme (ISO, 2025). Combinée à la température de l'air, elle définit la température opérative, grandeur de référence retenue par l'ISO 7730 et l'ASHRAE 55 pour caractériser l'ambiance (ISO, 2025; ASHRAE, 2023).

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau présente dans l'air et la pression de vapeur saturante à la même température, exprimé en pourcentage (ASHRAE, 2023 ; ISO, 2025). Elle agit sur le confort par l'évaporation de la sueur : un air déjà

humide freine cette évaporation et accentue la sensation de moiteur. Conformément à l'ISO 7730, son influence demeure faible aux températures modérées proches du confort et peut généralement être négligée dans cette plage, mais devient sensible aux humidités élevées (ISO, 2025).

La vitesse de l'air (v_{ar}) caractérise le mouvement de l'air au voisinage de l'occupant, grandeur définie et mesurée selon l'ISO 7726 (ISO, 2025). Un air plus mobile accentue les pertes par convection et évaporation et rafraîchit ; à plus basse température, il peut engendrer un inconfort local de type courant d'air (draught), défini par l'ISO 7730 comme un refroidissement local du corps causé par le mouvement de l'air (ISO, 2025).

3.2.5 Limites du modèle PMV/PPD

Le caractère normatif du PMV n'efface pas ses limites, qui encadrent l'interprétation des résultats et justifient le positionnement du travail comme pré-évaluation. Premièrement, le modèle a été calibré en chambre climatique, en conditions stationnaires, alors que les bâtiments réels présentent des conditions variables. Les apports solaires changeants, la régulation dynamique et occupation fluctuante sont notamment soulignés (Fanger, 1970). Deuxièmement, il prédit un vote moyen, non la sensation individuelle ; le PPD résiduel d'environ 5 % à PMV nul rappelle qu'une part d'occupants reste toujours insatisfaite (ISO, 2025). Troisièmement, il intègre mal l'adaptation : Humphreys & Nicol (2002) montrent que l'application de l'ISO-PMV peut être trompeuse dans des environnements quotidiens lorsque les mécanismes d'adaptation ne sont pas pris en compte, et van Hoof (2008) dresse, quarante ans après Fanger, un bilan critique de la portée du modèle.

La portée de ces réserves est aujourd'hui mieux documentée. Dans leur analyse de la *ASHRAE Global Thermal Comfort Database II*, la plus vaste de son type, Cheung et al. (2019) montrent que le PMV présente une capacité prédictive limitée, avec environ 34 % de prédictions correctes selon leur critère d'évaluation, et une précision comparable en bâtiment climatisé, naturellement ventilé et en mode mixte ; le PPD, de son côté, reproduit mal le taux d'insatisfaction observé. Ce constat n'invalide pas le PMV, qui demeure l'indice de référence des normes et des certifications, mais il invite à interpréter ses résultats comme une estimation normative plutôt que comme une mesure exacte du confort ressenti.

Quatrièmement, le MET et le CLO sont estimés et non mesurés, ce qui est une source d'incertitude centrale pour une méthode reposant sur des hypothèses paramétriques. Enfin, le PMV évalue le confort *global* : une catégorie B ne garantit pas l'absence d'inconfort local. Différents paramètres comme courant d'air, asymétrie de rayonnement, gradient vertical de température, sol froid, que l'ISO 7730 traite par ailleurs (ISO, 2025) peuvent impacter ce PMV. Le PMV/PPD doit donc être lu comme un outil normatif et comparatif, dépendant de ses hypothèses d'entrée et du modèle de simulation, et non comme une mesure directe du confort réellement ressenti.

3.3 Le cadre normatif du confort thermique

L'évaluation du confort s'appuie sur un ensemble de normes qui fixent les paramètres à considérer, les méthodes de calcul et les seuils d'interprétation, évitant que les hypothèses soient choisies arbitrairement. Quatre références structurent ce mémoire, complétées par le cadre européen EN 16798.

L'ISO 7730:2005 (*Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*) est la référence principale : elle prédit la sensation générale et le degré d'inconfort en environnement modéré via le PMV et le PPD, et traite aussi certains critères d'inconfort local (ISO, 2025). Son apport majeur est la définition des catégories A, B et C, qui traduisent les indices en niveaux d'exigence. Lenzuni et al. (2009) soulignent à cet égard que la norme propose plusieurs critères de confort sans toujours indiquer comment sélectionner la catégorie pertinente selon la situation. On notera qu'une révision ISO 7730:2005 a depuis été publiée ; la version 2025 reste néanmoins la référence opérante dans le cadre BREEAM mobilisé ici.

Tableau 4 : Tableau reprenant le niveau de confort lié au PMV selon la norme ISO 7730:2005

Niveau de confort	ISO 7730:2005	EN 16798-1	PMV	PPD	Correspondance ASHRAE 55
Très exigeant	A	I	$-0,2 < \text{PMV} < +0,2$	$< 6 \%$	Plus strict qu'ASHRAE 55
Standard / recommandé	B	II	$-0,5 < \text{PMV} < +0,5$	$< 10 \%$	Correspond au critère général ASHRAE 55
Acceptable	C	III	$-0,7 < \text{PMV} < +0,7$	$< 15 \%$	Plus large qu'ASHRAE 55
Tolérance élargie	—	IV	$-1,0 < \text{PMV} < +1,0$	$< 25 \%$	Hors critère général ASHRAE 55

L'ASHRAE 55-2023 (*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*) propose un cadre complémentaire d'acceptabilité thermique. Elle confirme la structure multifactorielle du confort. Les six mêmes paramètres que le PMV. Et intègre une approche adaptative pour certains bâtiments naturellement ventilés (ASHRAE, 2023). Sa fonction ici est de renforcer la justification des paramètres et de rappeler que le PMV n'est pas l'unique approche possible.

L'ISO 8996:2021 encadre la détermination du taux métabolique et l'ISO 9920:2007 l'estimation de l'isolation vestimentaire (ISO, 2021, 2007). Toutes deux permettent d'ancrer les hypothèses de MET et de CLO dans un référentiel reconnu plutôt que dans des valeurs arbitraires. Enfin, le cadre européen EN 16798-1:2019 (qui remplace l'EN 15251:2007) reprend les catégories de confort, et l'EN 16798-2:2019 précise leur interprétation, notamment la méthode du pourcentage d'heures hors plage rapporté aux heures occupées (European Committee for Standardization, 2019b). Ce point est directement utile au mémoire, puisque le tableau synthétique exprime les résultats en heures et en pourcentage d'heures hors catégorie.

Ces normes forment un cadre cohérent plutôt que des références isolées (tableau suivant).

Tableau 5 : Articulation des normes mobilisées dans le mémoire.

Norme	Rôle dans le mémoire
ISO 7730:2005	Calcul et interprétation du PMV/PPD ; catégories A, B et C
ASHRAE 55-2023	Confirmation des six paramètres ; cadre d'acceptabilité ; approche adaptative
ISO 8996:2021	Justification des hypothèses de MET selon l'activité
ISO 9920:2007	Justification des hypothèses de CLO selon la vêtue
EN 16798-1 / -2:2019	Catégories européennes ; méthode des heures hors plage sur heures occupées

Ce cadre ne supprime pas toute incertitude. Les normes définissent des conditions acceptables pour une *majorité* d'occupants, non pour chacun ; le MET et le CLO restent des estimations ; et aucune norme ne remplace une validation par simulation complète ou par mesures. Dans ce mémoire, elles servent à construire et interpréter une pré-évaluation, non à démontrer une conformité finale.

3.4 BREEAM Hea 04 et l'évaluation du confort thermique

BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), développée par le Building Research Establishment, est l'un des référentiels internationaux de durabilité des bâtiments les plus utilisés. Elle adopte une approche globale couvrant management, énergie, eau, matériaux, déchets, transports, pollution, écologie, ainsi que santé et bien-être (BRE Global, 2016). La certification fonctionne par crédits : le cumul détermine un score et un grade, de *Pass* ($\geq 30\%$) à *Outstanding* ($\geq 85\%$), le niveau *Very Good* étant généralement attendu par les acteurs institutionnels et financiers.

Tableau 6 : Tableau reprenant la qualité BREEAM selon la catégorie atteinte

Assessment score (%)	Assessment rating	Star rating
< 10	Unclassified	-
≥ 10 to < 25	Acceptable	★
≥ 25 to < 40	Pass	★ ★
≥ 40 to < 55	Good	★ ★ ★
≥ 55 to < 70	Very Good	★ ★ ★ ★
≥ 70 to < 85	Excellent	★ ★ ★ ★ ★
≥ 85	Outstanding	★ ★ ★ ★ ★ ★

Ce mémoire mobilise BREEAM via la catégorie *Health and Wellbeing*, et plus précisément le crédit Hea 04 — *Thermal comfort*, dont l'objectif est de garantir des niveaux appropriés de confort thermique et des systèmes de régulation capables de les maintenir en exploitation (BRE Global, 2016). Le crédit s'articule autour de trois exigences principales.

a) La modélisation thermique. Au stade détaillé, BREEAM impose que le confort soit évalué au moyen d'une analyse thermique appropriée, réalisée avec un logiciel capable d'une simulation dynamique complète (BREEAM, 2019), conformément aux recommandations du CIBSE AM11 (CIBSE, 2015). L'évaluation s'appuie sur des indicateurs reconnus : BREEAM renvoie au PMV et au PPD de l'ISO 7730:2005, certaines voies de conformité demandant aux espaces occupés d'atteindre la catégorie B : PMV de $-0,5$ à $+0,5$, PPD $< 10\%$, et respect des

critères d'inconfort local (ISO, 2025). Cette référence à la catégorie B fonde directement l'objectif de la méthodologie.

Le cadre normatif admet une tolérance sur les heures de dépassement : selon le CEN 16798-2:2019 (Annexe E de cette norme), un écart pouvant aller jusqu'à 6 % des heures d'occupation annuelles peut être accepté pour démontrer la conformité, lorsque l'évaluation du confort est conduite selon le CEN 16798. Il convient de noter que la BREEAM Knowledge Base a, dans une mise à jour récente, restreint l'application directe de cette tolérance à l'ISO 7730:2005. La norme ISO 7730:2025 constitue la version actuelle du référentiel PMV/PPD. Toutefois, les notes de conformité BREEAM Hea 04 consultées continuent de faire référence à la catégorie B de l'ISO 7730:2005. Dans le présent travail, le pourcentage d'heures hors catégorie B est donc utilisé comme indicateur de durée du dépassement, et non comme seuil de conformité réglementaire.

b) L'adaptabilité au changement climatique. Les conditions de confort doivent être évaluées non seulement selon le climat actuel mais aussi au regard d'un scénario climatique projeté lorsque le référentiel l'exige (BRE Global, 2016). Cette exigence rejoint les constats sur la surchauffe : le changement climatique accroît la probabilité d'épisodes de chaleur et modifie les besoins de refroidissement (Hamdy et al., 2017 ; Attia et al., 2023). Elle renforce l'intérêt d'un outil capable de comparer rapidement plusieurs scénarios de ventilation et de refroidissement. **CEN 16798-2:2019 prévoit une logique de déviation temporelle**, et que **BREEAM encadre strictement son usage**.

c) Le zonage thermique et les contrôles. BREEAM insiste sur la différenciation des zones et sur des dispositifs de régulation adaptés aux usages et aux attentes des occupants (BRE Global, 2016). Cette logique correspond exactement à l'approche par zones typologiques du mémoire, qui n'évalue pas une moyenne globale mais distingue vestiaires, bureaux, open space, salle de réunion, cafétéria et salle de formation. La base de connaissances BREEAM précise par ailleurs que les exigences de confort ne s'appliquent pas aux zones opérationnelles ou de stockage dont les conditions sont d'abord dictées par la fonction (BREEAM, 2024) ce qui justifie d'exclure le hall de fret de Liège Airport de l'analyse PMV/PPD.

La place de BREEAM doit donc être comprise précisément : il fournit le cadre d'exigence, l'ISO 7730:2005 le cadre de calcul, et la simulation thermique dynamique le moyen de production des résultats. La méthodologie se situe en amont de cette validation, comme outil de *screening* (Attia et al., 2012 ; Østergård et al., 2016).

3.5 La simulation thermique dynamique et IES VE

La simulation thermique dynamique (STD) représente l'évolution horaire des conditions (ou journalière, semestriel et autre) intérieures. La STD évolue en fonction du climat extérieur, de l'enveloppe, des apports solaires et internes, des systèmes techniques et des profils d'occupation (CIBSE, 2015). Elle traite le bâtiment comme un système évolutif et permet d'estimer besoins de chauffage et de refroidissement, températures intérieures, consommations, risques de surchauffe et indicateurs de confort (Negendahl, 2015). Cette capacité temporelle est essentielle pour le confort, qui dépend de l'heure, de la saison et de l'occupation, et non d'une moyenne annuelle. La STD est schématisée dans la figure suivante.

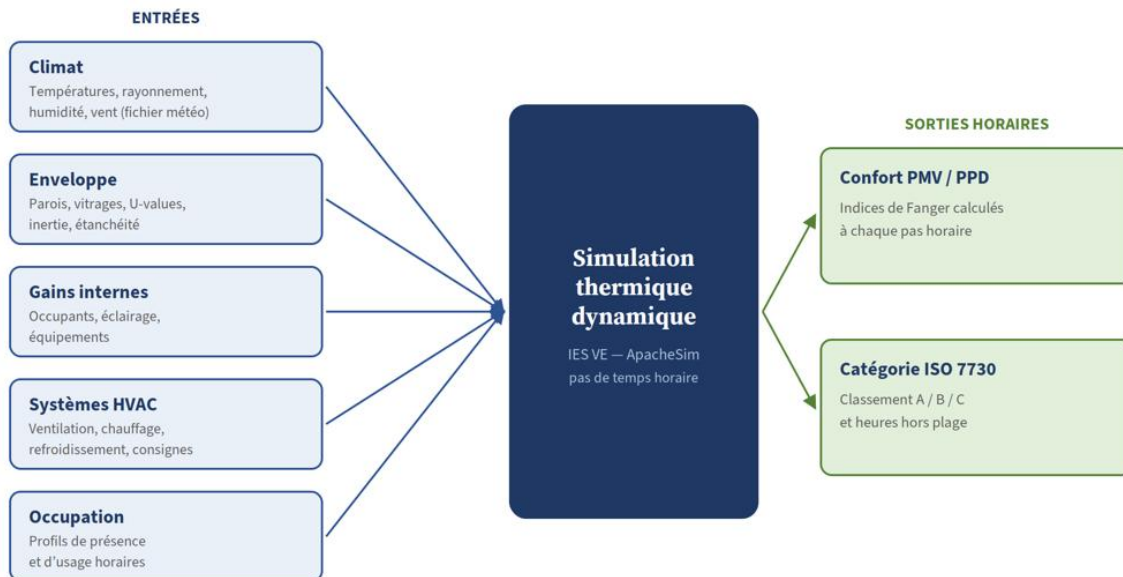


Figure 7 : Schéma d'une STD : données entrées vs données sorties

Son intérêt tient aussi à la prise en compte des interactions : une modification d'enveloppe, de débit de ventilation ou d'apports internes produit des effets couplés, difficiles à saisir par un calcul simplifié (CIBSE, 2015 ; Verticchio et al., 2024). Pour le confort, la STD permet de calculer température opérative, PMV, PPD et le nombre d'heures de dépassement : deux scénarios aux maxima proches peuvent générer des durées d'inconfort très différentes, d'où l'intérêt d'indicateurs de long terme (Carlucci & Pagliano, 2012). C'est pourquoi la STD

occupe une place centrale dans les démarches de certification, BREEAM exigeant une modélisation dynamique complète au stade détaillé (BREEAM, 2019 ; CIBSE, 2015).

La STD présente toutefois des limites pratiques en phase amont. La construction d'un modèle exige de nombreuses données : géométrie, parois, vitrages, occupation, gains, consignes, systèmes, météo. Ces données sont souvent encore incertaines au début du projet. Il en résulte un paradoxe : les décisions les plus influentes se prennent au moment où les données sont les moins consolidées et le temps de modélisation le plus contraint (Attia et al., 2012 ; Negendahl, 2015 ; Østergård et al., 2016). Ces limites n'invalident pas la STD ; elles indiquent que son usage doit être adapté au degré d'avancement du projet. Elle doit être complète en phase détaillée, mais avantageusement précédée d'outils de filtrage en amont. Cette limite sera largement couverte dans la suite de ce mémoire.

Dans ce mémoire, les simulations sont réalisées sous IES VE (*Integrated Environmental Solutions Virtual Environment*). Le module ModelIT permet de créer la géométrie du bâtiment. Le module ApacheSim réalise la STD traite les échanges thermiques, températures, charges, effets des systèmes et de l'occupation. Tandis que le module VistaPro exploite et visualise les résultats, notamment les séries temporelles de PMV et de PPD (integrated environmental solutions [ies], 2021a, 2021b, n.d.). Le choix d'IES VE est cohérent avec le cadre du travail : modélisation horaire sur l'année, différenciation des zones thermiques et extraction d'indicateurs exploitables en certification, conformément aux recommandations du CIBSE AM11 (BREEAM, 2019 ; CIBSE, 2015).

Un point appelle une attention particulière : le traitement des paramètres de confort par le logiciel. Certains des six paramètres du PMV proviennent directement de la simulation thermique, tandis que d'autres, MET et CLO, sont définis par l'utilisateur. La manière dont IES VE encode le CLO (valeur fixe, profil ou plage Min/Max) influence l'interprétation des résultats : ce n'est pas un simple réglage logiciel mais une hypothèse sur l'adaptation vestimentaire (IES, 2021). Cette utilisation du CLO par le logiciel est détaillée et prouvée en annexe E. Cette preuve est nécessaire car ce n'est pas une valeur fixe à encoder comme pour les autres paramètres.

IES VE joue donc un double rôle : outil de production des données et objet méthodologique à interroger, puisque ses résultats dépendent des hypothèses d'entrée et des options de calcul (CIBSE, 2015 ; Verticchio et al., 2024). Cette dépendance, commune à toute STD, renforce le positionnement du travail comme pré-évaluation : les sorties IES VE sont assez structurées pour alimenter une comparaison de scénarios en amont, mais ne valent pas validation expérimentale du confort réel.

3.6 Méthodes simplifiées, aide à la décision et analyse paramétrique

Une part importante des choix qui déterminent la performance d'un bâtiment est arrêtée dès les premières phases. Par exemple : orientation, enveloppe, protections solaires, ventilation, systèmes HVAC, consignes. Alors que l'information est incomplète et que plusieurs variantes restent ouvertes (Attia et al., 2012 ; Østergård et al., 2016). D'où l'intérêt des outils d'aide à la décision en phase amont, dont la fonction n'est pas de remplacer la simulation détaillée mais de fournir rapidement une information structurée pour comparer des scénarios et orienter les choix. Attia et al. (2012) observent que de nombreux outils évaluent les alternatives après la décision, alors que l'enjeu est d'informer la décision avant qu'elle ne soit figée ; ils proposent en réponse un outil de support fondé sur la simulation pour la conception amont. Ochoa & Capeluto (2009) développent une logique comparable pour les façades intelligentes, transposable au confort thermique : un outil intermédiaire peut filtrer les options avant l'analyse détaillée.

Les revues de littérature confirment ce besoin. Østergård et al. (2016) identifient les obstacles à l'usage des simulations détaillées en amont : temps de modélisation, évolution rapide du projet, exigences contradictoires, incertitude des données, nombre de variantes. Ils notent une orientation vers des approches plus proactives (méthodes statistiques, simulations automatisées, optimisation, interopérabilité accrue). La valeur d'un tel outil ne tient pas qu'à la sophistication du moteur de calcul : elle dépend de sa lisibilité, de la transparence de ses hypothèses et de son intégration dans le processus de projet (Attia et al., 2012). Le tableau synthétique filtrable du mémoire s'inscrit dans cette logique de *screening* : rapprocher une zone et un scénario d'une configuration déjà simulée pour estimer la catégorie de confort probable, conserver les scénarios favorables, écarter les défavorables et réserver la STD complète aux cas incertains.

La construction d'un tel outil s'appuie sur l'analyse paramétrique, qui fait varier un ou plusieurs paramètres d'entrée pour observer leur effet sur les sorties (consommations, températures, PMV/PPD). Elle permet d'identifier les paramètres les plus influents et de concentrer l'effort de conception sur les leviers réellement déterminants (Nguyen & Reiter,

2015). Pour le confort, elle est particulièrement adaptée puisque le PMV dépend explicitement de six paramètres : faire varier ces derniers révèle lesquels font basculer un scénario en catégorie B, en catégorie A, ou hors plage.

Il faut distinguer l'analyse paramétrique simple de la sensibilité globale. L'approche OFAT (*one-factor-at-a-time*), retenue ici, modifie un paramètre à la fois autour d'une situation initiale ; sa lisibilité et son interprétabilité directe en font un atout pour un outil d'aide à la décision. Mais elle ne capture pas les interactions entre paramètres : Saltelli & Annoni (2010) montrent que les analyses fondées sur la seule variation d'un facteur à la fois sont souvent insuffisantes, car l'effet combiné de deux paramètres peut différer de la somme de leurs effets individuels. Par exemple l'impact d'une température de soufflage selon le débit, l'occupation, l'humidité ou la vêtue. Pour une exploration plus complète, la littérature recommande des méthodes de sensibilité globale (plans d'expériences, Monte-Carlo, indices de Sobol), au prix d'un nombre de simulations et d'une lourdeur statistique nettement supérieurs (Saltelli & Annoni, 2010 ; Nguyen & Reiter, 2015).

Le choix de l'OFAT est donc un compromis méthodologique assumé : il privilégie une méthode lisible et reproductible, compréhensible par un ingénieur en phase amont, au détriment d'une exploration exhaustive des interactions. Ses résultats doivent être interprétés avec prudence : un paramètre apparu influent l'est *dans les conditions étudiées* (zone, hypothèses, plage testée, modèle IES VE), sans qu'on puisse en déduire une dominance universelle. L'analyse paramétrique joue ainsi trois rôles dans le mémoire : comprendre l'influence des paramètres du PMV sur une zone de référence, étendre cette lecture à plusieurs zones typologiques, et fournir la base logique du tableau synthétique, dont chaque ligne correspond à une combinaison contrôlée de paramètres interprétable par comparaison avec la situation initiale.

3.7 Synthèse et positionnement du mémoire

L'état de l'art établit que le confort thermique est un enjeu central du tertiaire, irréductible à la seule température et dépendant de six paramètres environnementaux et personnels (Fanger, 1970 ; ISO, 2025 ; ASHRAE, 2023). Le modèle PMV/PPD en offre le cadre d'évaluation le plus répandu en environnement modéré et mécaniquement conditionné, et l'ISO 7730:2005 le traduit en catégories A, B et C, la catégorie B constituant un objectif exigeant mais réaliste (ISO, 2025). Ses limites, désormais quantifiées (§3.2.5), imposent de lire ses résultats comme une pré-évaluation normative. Ce qui impose de lire ses résultats comme une pré-évaluation normative, non comme une mesure du confort réellement ressenti.

Le cadre normatif (ISO 7730, ASHRAE 55, ISO 8996, ISO 9920, EN 16798) assure la transparence et la reproductibilité des hypothèses, en particulier de MET et de CLO (ISO, 2025a ; ISO, 2025b ; ASHRAE, 2023 ; CEN, 2019a, 2019b). Le crédit BREEAM Hea 04 inscrit le confort dans une démarche de certification et exige une évaluation par indicateurs reconnus, différenciée par zone et attentive à l'adaptabilité climatique (BRE Global, 2016 ; BREEAM, 2019). La STD, notamment via IES VE, fournit le moyen de produire ces indicateurs en tenant compte des interactions et de la dimension temporelle du confort (CIBSE, 2015 ; Negendahl, 2015). Mais sa mobilisation répétée en phase amont se heurte au temps de modélisation, à l'incertitude des données et au nombre de variantes (Attia et al., 2012 ; Østergård et al., 2016).

C'est de cette tension entre rigueur de la simulation et besoin de décision rapide que naît le mémoire. Les outils d'aide à la décision amont y répondent en filtrant les scénarios plutôt qu'en remplaçant la STD (Attia et al., 2012 ; Ochoa & Capeluto, 2009), et l'analyse paramétrique. Ici en OFAT, lisible mais limitée quant aux interactions (Saltelli & Annoni, 2010 ; Nguyen & Reiter, 2015). Elle en fournit la base de construction. Le mémoire se situe ainsi à l'intersection de trois champs : l'évaluation normative du confort, la simulation thermique dynamique et l'aide à la décision en conception amont. Il vise la transformation de sorties de simulation en une méthodologie reproductible matérialisée par un tableau synthétique filtrable.

Le cas de Liège Airport, étudié lors du stage chez Six Engineering, sert de support à la construction et à l'illustration de cette méthodologie, dont la vocation est d'être transposable, sous conditions, à d'autres bâtiments tertiaires comparables. L'état de l'art justifie ainsi la question de recherche : comment développer une méthodologie de pré-évaluation permettant d'estimer, dès la phase amont, la catégorie de confort thermique PMV/PPD d'espaces tertiaires représentatifs, afin d'aider l'ingénieur à comparer des scénarios techniques sans relancer une STD complète pour chacun d'eux ?

4 Objectif de la recherche

4.1 Contexte et problématique

La STD est un outil puissant : elle tient compte des interactions entre le climat extérieur, l'enveloppe, l'occupation et les systèmes HVAC (CIBSE, 2015 ; Negendahl, 2015). Mais sa mise en œuvre est longue. Construire le modèle, le paramétrer, lancer le calcul et interpréter les résultats demande du temps et une expertise spécifique. Cela devient vite pénalisant dès qu'il faut comparer plusieurs variantes techniques en phase amont.

Aucune durée universelle n'existe : elle dépend du bâtiment, de l'outil et de l'expérience de l'ingénieur. À titre indicatif, chez Six Consulting & Engineering, une STD complète pour un bâtiment tertiaire représente au moins une dizaine de jours de travail. La seule construction de la géométrie et la définition des zones thermiques pèsent déjà lourd, avant même le paramétrage des parois, des systèmes et des profils d'occupation, puis l'exploitation des résultats. Relancer cette démarche pour chaque variante est, en pratique, peu compatible avec les délais d'un avant-projet.

La littérature sur les outils d'aide à la décision pointe régulièrement cette limite : les simulations détaillées sont utiles, mais elles arrivent souvent trop tard pour éclairer les premiers choix (Attia et al., 2012 ; Ochoa & Capeluto, 2009 ; Østergård et al., 2016).

Ce travail s'inscrit dans cette problématique. Il a été réalisé lors d'un stage chez Six Engineering, bureau d'études en ingénierie du bâtiment. Le cas d'application est le bâtiment de fret aérien de Liège Airport, qui associe un hall logistique et des espaces administratifs. L'analyse ne porte que sur ces espaces administratifs et tertiaires, les seuls occupés de manière régulière et pertinents pour une évaluation du confort par les indices PMV et PPD ; le hall de fret sert uniquement à situer le projet.

4.2 Objectif principal et objectifs spécifiques

L'objectif principal est de développer une méthodologie de pré-évaluation du confort thermique des espaces tertiaires. Elle s'appuie sur le modèle PMV/PPD, sur une analyse paramétrique des variables qui influencent le confort et sur les résultats horaires produits par IES VE. Son produit est un tableau synthétique filtrable : à partir des sorties de simulation, il donne, pour une zone et un scénario technique donnés, la catégorie de confort probable ainsi que le nombre et le pourcentage d'heures hors catégorie B.

Cet objectif se décline en quatre objectifs spécifiques :

- Formaliser les variables d'entrée (paramètres PMV, typologie d'espace, scénario technique) ;
- Construire une matrice paramétrique de scénarios à partir d'une situation initiale, selon une approche un facteur à la fois ;
- Choisir des indicateurs de sortie lisibles : PMV, PPD, catégorie ISO 7730, heures et pourcentage hors catégorie B ;
- Définir un tableau filtrable et un protocole d'utilisation directement exploitables par un ingénieur en phase amont.

5 Positionnement épistémologique : une recherche par conception

5.1 Une méthodologie comme résultat de recherche

Ce travail vise à concevoir une méthode répondant à un problème pratique de bureau d'études. Il relève donc de la recherche par conception (design science research), un paradigme où la contribution scientifique prend la forme d'un artefact, conçu pour résoudre une classe de problèmes puis évalué avec rigueur (Hevner et al., 2004). March et Smith (1995) distinguent quatre types d'artefacts : les *constructs* (le vocabulaire d'un domaine), les *models* (les représentations d'un problème), les *methods* (les suites d'étapes permettant de réaliser une tâche) et les *instantiations* (leur réalisation concrète dans un environnement). Dans cette typologie, une méthode est un résultat de recherche à part entière, au même titre qu'un modèle ou une théorie.

Le résultat principal de ce mémoire est précisément une méthode, au sens de March et Smith (1995) : une suite structurée d'étapes qui transforme des sorties de simulation thermique dynamique en une pré-évaluation du confort exploitable en phase amont. La littérature méthodologique conforte ce choix : elle reconnaît la contribution méthodologique comme une avancée scientifique à part entière, dotée de sa propre typologie et de son propre cycle de vie, de la proposition d'une méthode à son raffinement progressif (Bergh et al., 2022).

5.2 Les deux activités de la démarche : construire et évaluer

La recherche par conception repose sur deux activités complémentaires : construire l'artefact (*build*) et l'évaluer (*evaluate*) au regard du problème à résoudre (March & Smith, 1995 ; Hevner et al., 2004). Elles structurent ce travail, et en particulier son chapitre de résultats. La première partie relève de la construction : elle présente la méthode élaborée étape par étape, de la délimitation du domaine d'application à l'élaboration du tableau filtrable et de son protocole, en passant par la formalisation des variables d'entrée, la

matrice paramétrique et le choix des indicateurs. La seconde partie relève de l'évaluation : elle met la méthode à l'épreuve sur un cas d'instanciation, le bâtiment de Liège Airport, au moyen de plusieurs simulations. Comme l'écrivent March et Smith (1995), les instanciations « fournissent la preuve réelle » du fonctionnement d'un artefact : ces simulations ne sont pas une fin en soi, mais la démonstration que la méthode produit une information stable et exploitable.

5.3 Une démarche de conception structurée en étapes

La construction de la méthode suit, dans son esprit, le processus de recherche par conception de Peffers et al. (2007), qui distingue six activités : identifier le problème, définir les objectifs d'une solution, concevoir et développer l'artefact, le démontrer, l'évaluer et communiquer les résultats. Le mémoire reprend cette logique : le problème, la lourdeur de la STD en phase amont, est posé dans l'introduction ; les objectifs de la solution sont énoncés au chapitre précédent ; la conception de l'artefact occupe la méthodologie et la première partie des résultats ; sa démonstration et son évaluation, la seconde partie ; la discussion en précise la portée et les limites.

La conception procède de façon empirique et itérative, par essais et ajustements successifs, plutôt que par une formule analytique inverse. Ce n'est pas un pis-aller, mais la conséquence directe du problème. L'ingénieur connaît le résultat visé (une catégorie de confort, par exemple la catégorie B), mais aucune relation ne permet d'en déduire directement les paramètres à imposer : c'est un problème inverse, que la structure du modèle de Fanger rend non inversible analytiquement. Les six paramètres interviennent de manière couplée et non linéaire dans le bilan thermique, et la température de surface du vêtement, dont dépend le PMV, est elle-même solution d'une équation implicite résolue par itérations. Partir d'une situation initiale puis faire varier les paramètres pour observer le résultat n'est donc pas une approche par défaut : c'est la démarche rationnelle face à un problème qu'on ne peut pas résoudre à l'envers.

Cette logique d'essais successifs est un mode reconnu de production d'artefacts : l'expérimentation par essais et erreurs, surtout lorsqu'elle s'appuie sur la simulation

numérique et le prototypage, est une stratégie établie de conception et d'innovation (Thomke, 1998 ; Camburn et al., 2017). La STD joue ici le rôle de banc d'essai : elle permet de tester vite et à faible coût de nombreuses configurations autour d'une situation de référence, avant de stabiliser la structure de la méthode. L'analyse « un facteur à la fois » organise ces essais de façon lisible et reproductible, en isolant l'effet de chaque levier.

5.4 Positionnement de la contribution

Le type de contribution se précise avec le cadre de Gregor et Hevner (2013), qui classe les recherches par conception selon la nouveauté du problème et de la solution. Le problème traité : « évaluer le confort thermique en phase amont » est connu et déjà outillé par la simulation détaillée. La solution, une méthode de pré-évaluation fondée sur une analyse paramétrique et un tableau filtrable, est en revanche nouvelle pour ce problème. Le travail relève donc du quadrant que Gregor et Hevner (2013) appellent amélioration (*improvement*) : une meilleure solution à un problème existant. C'est le cas le plus fréquent en recherche par conception, et il fixe le niveau d'ambition : non pas une théorie générale du confort, mais un artefact méthodologique utile, dont la généralisation reste une perspective plutôt qu'une condition de validité.

Ce cadrage a deux conséquences pour la lecture du mémoire. D'abord, les valeurs chiffrées du cas d'étude sont une preuve de fonctionnement de la méthode, pas un diagnostic du bâtiment de Liège Airport. Ensuite, s'appuyer sur un cas unique n'est pas une faiblesse : en recherche par conception, l'instanciation sur un cas réel est un mode de démonstration légitime (March & Smith, 1995 ; Hevner et al., 2004), et l'étude de cas approfondie est reconnue comme une stratégie capable de produire une connaissance transférable sous conditions (Flyvbjerg, 2006).

6 Présentation du cas d'étude : le bâtiment de Liège

Airport

Ce chapitre présente le bâtiment qui sert de support à la construction et au test de la méthodologie. Sa description est nécessaire à deux titres : elle conditionne l'interprétation des résultats de confort, qui dépendent de l'enveloppe, des systèmes et des profils d'occupation, et elle fixe les caractéristiques de référence à partir desquelles la transposition à d'autres bâtiments pourra être appréciée par analogie raisonnée. Le bâtiment est mobilisé comme cas d'application, au sens défini précédemment.

6.1 Description générale et périmètre de l'étude

Le cas d'étude est le bâtiment de fret de Liège Airport, illustré dans la figure suivante. Le projet complet comprend deux ensembles : une zone logistique correspondant au hall de fret et une zone administrative regroupant bureaux, salles de réunion, vestiaires, locaux techniques, circulations et réfectoire. L'étude porte exclusivement sur les espaces administratifs et tertiaires, c'est-à-dire les locaux occupés de manière régulière par des usagers et pour lesquels l'évaluation du confort par les indices PMV et PPD est pertinente au regard du crédit BREEAM Hea 04. Au sens de l'étude PEB, la partie non résidentielle comprend notamment environ 3 450 m² de bureaux, 220 m² de vestiaires et 350 m² de locaux techniques.



Figure 8 : Aéroport de Liège

Le hall de fret n'est pas intégré à l'analyse de confort. Considéré comme une zone industrielle non chauffée au sens de la PEB. En raison notamment de la faible puissance installée rapportée à son volume, il présente des caractéristiques (grand volume, usage logistique, ouvertures fréquentes, occupation intermittente, conditions peu homogènes) qui sortent du domaine de validité du modèle PMV. Il n'est donc mobilisé que pour situer le projet dans son contexte. Ce périmètre est cohérent avec le référentiel, qui précise que les exigences de confort ne s'appliquent pas de la même manière aux zones opérationnelles ou de stockage dont les conditions sont d'abord dictées par la fonction (BRE Global, 2016 ; BREEAM, 2024).

6.2 Justification du choix du bâtiment

Le choix de ce bâtiment se justifie par la diversité de sa partie administrative. Contrairement à un immeuble de bureaux composé de locaux homogènes, le projet regroupe plusieurs types d'espaces tertiaires : bureaux, open spaces, salles de réunion, vestiaires, cafétéria, salle de formation, circulations, sanitaires et locaux techniques. Ces zones thermiques présentent des profils d'occupation, des apports internes et des usages différents. Cette variété est précisément ce qui rend le cas pertinent pour construire une méthode applicable à plusieurs typologies : l'objectif n'est pas d'analyser un local isolé, mais de disposer d'un

éventail de situations thermiques représentatives sur lesquelles tester l'influence des paramètres du PMV. Travailler sur un cas réel garantit en outre des hypothèses d'enveloppe, de systèmes et d'occupation cohérentes entre elles, issues d'un projet concret plutôt que de valeurs théoriques.

6.3 Découpage en zones thermiques et zones retenues

Dans IES VE, les espaces administratifs ont été décomposés en zones thermiques distinctes, ce qui permet d'attribuer à chacune des hypothèses propres d'occupation, de gains internes, de consignes, de ventilation et de fonctionnement des systèmes, et d'obtenir des résultats différenciés selon l'usage réel des locaux. Pour la construction du tableau synthétique, six zones caractéristiques ont été retenues :

- Les vestiaires (usage ponctuel, niveau d'activité spécifique) ;
- Un bureau de quatre personnes (travail sédentaire collectif) ;
- Un open space paysager (travail sédentaire, forte densité, exposition matinale) ;
- Une salle de réunion de douze personnes (occupation collective concentrée) ;
- Une cafétéria (occupation intermittente, centrée sur le midi) ;
- Une salle de formation (occupation collective, durée variable).

Ces six zones couvrent les principaux usages tertiaires et permettent de comparer la réponse de typologies différentes à une même variation de paramètre. Une zone supplémentaire est étudiée. Un bureau individuel, il sert de zone de référence pour la mise au point de la méthode. Ce bureau est distinct des six zones ci-dessus. Les circulations, sanitaires et locaux techniques, sans occupation régulière, ne font pas l'objet d'une analyse de confort. Les plans de l'aéroport sont dans l'annexe D permettant de se représenter les différentes zones.

6.4 Hypothèses d'occupation et gains internes

Les hypothèses d'occupation et de gains internes influencent directement les températures intérieures, les besoins de chauffage et de refroidissement, et donc les valeurs de PMV et de

PPD. Dans les zones administratives, les apports internes proviennent des occupants, de l'éclairage et des équipements informatiques. Les valeurs retenues dans le modèle sont synthétisées au tableau suivant. Ces données sont déterminées par l'équipe de SIX dédiée à ce projet.

Tableau 7 : Hypothèses de gains internes dans les zones administratives.

Source de gain interne	Valeur retenue
Équipements (ordinateurs et écrans)	100 W par personne
Gains sensibles (occupant)	90 W par personne
Gains latents (occupant)	60 W par personne
Éclairage	6 W/m ²

Des profils combinés ont été créés dans IES VE pour synchroniser occupation, éclairage et équipements : lorsqu'un occupant est présent, son poste, l'éclairage et les équipements associés sont activés ; à son départ, ces apports sont interrompus. Cette approche représente plus fidèlement les gains liés à l'utilisation effective des locaux. Les profils d'occupation diffèrent selon les espaces : les bureaux et l'open space sont occupés en journée, du lundi au vendredi, généralement de 8h à 18h ; les salles de réunion et de formation suivent un profil comparable mais plus concentré ; la cafétéria est occupée principalement le midi. Ces différences de profil sont déterminantes, car elles expliquent qu'une même hypothèse paramétrique produise des effets différents d'une zone à l'autre.

6.5 Enveloppe thermique

L'enveloppe conditionne les échanges avec l'extérieur, l'influence de l'ensoleillement, les pertes par transmission et l'inertie des parois, et donc les températures opératives à partir desquelles le PMV est calculé. Les compositions prévues pour la partie bureaux sont résumées au tableau suivant :

Tableau 8 : Compositions d'enveloppe prévues pour la partie bureaux.

Paroi / élément	Composition isolante principale
Toiture plate	120 mm de PIR
Dalle sur sol	100 mm de polyuréthane projeté
Façades	Laine de verre ou PIR selon les cas
Mur mitoyen bureaux / hall	80 mm de PUR

Les menuiseries extérieures sont prévues avec des châssis aluminium, un coefficient de transmission thermique de la fenêtre $U_w \leq 1,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, un coefficient pour le vitrage $U_g \leq 1,10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ et un facteur solaire $g \leq 40 \%$. Ces performances conditionnent directement les risques de surchauffe, les besoins de refroidissement et la stabilité des températures intérieures, et constituent donc des caractéristiques de référence pour apprécier la transposabilité de la méthode à d'autres bâtiments.

6.6 Systèmes techniques et consignes

La production thermique repose sur une bivalence entre une pompe à chaleur air/eau réversible et une chaudière gaz : la pompe à chaleur assure le chauffage et le rafraîchissement selon les saisons, la chaudière intervenant en appoint en période hivernale. Dans les espaces administratifs, l'émission de chaleur et de froid est assurée par des plafonds actifs, cohérents avec un usage tertiaire et une occupation régulière. Les principales caractéristiques techniques sont résumées au Tableau suivant.

Tableau 9 : Systèmes techniques et consignes des zones administratives

Poste	Caractéristique retenue
Production thermique	PAC air/eau réversible + chaudière gaz (appoint hiver)
Émission en zone administrative	Plafonds actifs (chaud et froid)
Consigne de chauffage (bureaux)	22 °C
Consigne de refroidissement (bureaux)	25 °C

Ventilation	CTA double flux type D, récupération $\geq 75\%$
Débits de ventilation	10 000 m ³ /h (landside) ; 5 500 m ³ /h (airside)
Humidification	Aucune (absence de système actif)

Les consignes de 22 °C et 25 °C définissent la situation initiale de l'analyse paramétrique présentée plus tard. L'absence d'humidification active a une conséquence directe sur l'évaluation du PMV : l'humidité relative n'est pas un paramètre régulé par les systèmes, ce qui justifie de la traiter comme une hypothèse de référence dans le tableau synthétique, tout en rappelant que cette simplification doit être prise en compte dans l'interprétation. Les systèmes propres au hall de fret (aérothermes, traitement de grands volumes) ne sont pas étudiés, conformément au périmètre retenu.

6.7 Modélisation dans IES VE

La simulation thermique dynamique a été réalisée sous IES VE (version 2025), à partir des plans du permis d'urbanisme (formats PDF et DWG, datés du 02/12/2025, gérés par l'équipe SIX). Le modèle support comprend la géométrie des espaces administratifs, le découpage en zones thermiques, les compositions de parois, les menuiseries, les profils d'occupation, les gains internes, les consignes, les systèmes techniques et les données météorologiques. Les données climatiques correspondent au fichier météo de Liège pour l'année 2024 (températures extérieures, humidité relative, rayonnement solaire et vitesse du vent).

Le fichier météorologique de Liège 2024 est utilisé comme support de construction méthodologique. Ce mémoire ne convient pas d'une évaluation de l'adaptabilité au changement climatique : celle-ci, qui relève de fichiers climatiques projetés (par exemple de type DSY ou de scénarios futurs) et que certaines voies de BREEAM Hea 04 peuvent requérir, dépasse le cadre du présent travail et figure parmi les perspectives.

Dans ce mémoire, IES VE est utilisé comme outil de calcul et d'extraction des indicateurs de confort thermique. Le logiciel permet de simuler le comportement horaire des zones étudiées et de produire, pour chaque scénario, les valeurs de PMV et de PPD nécessaires au classement selon l'ISO 7730. Son rôle n'est donc pas seulement de fournir un résultat

ponctuel pour le bâtiment de Liège Airport, mais de produire une base de données cohérente à partir de laquelle les scénarios peuvent être comparés et intégrés au tableau de pré-évaluation.

6.8 Rôle du cas d'étude dans la démarche

Le bâtiment de Liège Airport occupe une place centrale dans la méthodologie sans en être la finalité. Il remplit trois fonctions : fournir un modèle thermique réaliste fondé sur un projet concret (plans, parois, occupation, systèmes réels) ; offrir plusieurs zones représentatives sur lesquelles tester l'influence des paramètres du PMV ; et permettre de comparer des scénarios techniques, notamment de ventilation, avant de structurer les résultats dans un tableau synthétique filtrable.

La logique d'ensemble peut se résumer ainsi : les zones administratives fournissent le support de simulation ; les simulations IES VE fournissent les valeurs de PMV et de PPD ; ces valeurs alimentent le tableau synthétique ; et le tableau devient un outil d'aide à la décision permettant d'anticiper la catégorie de confort d'un scénario sans relancer immédiatement une STD complète pour chaque variante.

6.9 Origine et fiabilité du modèle de simulation

Le modèle thermique exploité dans ce travail n'a pas été construit ex nihilo : il a été établi par les ingénieurs du bureau d'études Six Consulting & Engineering dans le cadre du projet réel du bâtiment de Liège Airport. La géométrie, le découpage en zones thermiques, les compositions de parois, les consignes de régulation, les gains internes et les systèmes techniques y sont définis conformément aux données de projet, au rapport PEB et aux plans d'esquisse. Cette origine professionnelle montre une garantie de cohérence : le modèle reflète un dimensionnement réel, validé dans le cadre d'une mission d'ingénierie, et non une reconstitution académique.

Le travail réalisé dans ce mémoire s'appuie sur ce modèle validé. Avant exploitation, la cohérence des éléments mobilisés a été vérifiée : correspondance entre les zones du modèle et les six typologies retenues, conformité des consignes et des gains internes aux

valeurs du rapport PEB, et cohérence des sorties PMV/PPD extraites de VistaPro. Le traitement particulier de l'isolation vestimentaire par le moteur (mode Min/Max) a fait l'objet d'une vérification dédiée, détaillée en annexe E.

Le modèle n'a en revanche pas fait l'objet d'une calibration expérimentale par mesures in situ, le bâtiment étant au stade de la conception. Cette limite, inhérente à une étude en phase amont, est discutée au chapitre 9. Les résultats valent comme estimation normative cohérente, non comme mesure du confort réel.

7 Méthodologie

7.1 Positionnement général et logique de la démarche

La méthodologie vise à transformer des résultats de simulation thermique dynamique (STD) en une méthode de pré-évaluation du confort thermique exploitable en phase amont. Sa logique d'ensemble peut se résumer en une séquence : sélectionner des zones typologiques représentatives ; construire une situation initiale de référence ; faire varier les paramètres du PMV ou les paramètres techniques qui les influencent ; simuler les scénarios dans IES VE ; extraire les valeurs de PMV, de PPD et les indicateurs temporels de non-conformité ; organiser les résultats dans un tableau filtrable ; puis formaliser un protocole d'utilisation et préciser le domaine de validité de la méthode. La figure suivante synthétise cette chaîne.

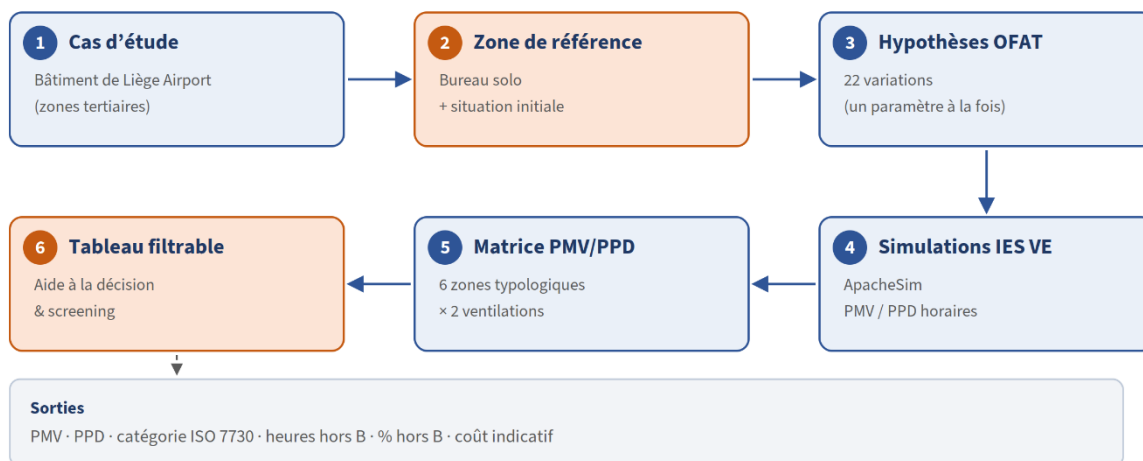


Figure 9 : Schéma simplifié de la méthodologie utilisée

Cette démarche repose sur le caractère déterministe du PMV : pour une combinaison donnée de paramètres d'entrée, le modèle produit une valeur de PMV (Fanger, 1970 ; ISO, 2025). Cette propriété permet de construire une base de scénarios comparables. Elle ne signifie pas pour autant que le confort réellement ressenti soit parfaitement prédit. La méthode est donc une pré-évaluation technique fournissant un indicateur de risque ou de probabilité de conformité.

7.2 Distinction entre méthodologie de recherche et protocole applicatif

Une distinction structurante est établie entre deux niveaux. La *méthodologie de recherche* décrit la manière dont le travail scientifique a été conduit : sélection du cas d'étude, construction du modèle, choix des zones, définition des hypothèses, réalisation des simulations, extraction et structuration des résultats. Le *protocole applicatif* décrit la manière dont un ingénieur utilisera le tableau une fois celui-ci construit : identifier une zone similaire, sélectionner les hypothèses les plus proches, lire la catégorie obtenue, interpréter le risque de non-conformité, puis décider de conserver, ajuster ou écarter le scénario.

Cette distinction évite une confusion importante : le tableau filtrable n'est pas une simple annexe de résultats, mais le produit opérationnel de la méthodologie ; de même, les valeurs PMV calculées dans IES VE ne sont pas une finalité isolée, mais le matériau servant à construire un support d'aide à la décision. Le résultat du travail est donc la méthode elle-même, dont le tableau est l'expression pratique.

7.3 Choix d'une analyse paramétrique contrôlée (OFAT)

La méthodologie repose sur une analyse paramétrique de type *one-factor-at-a-time* (OFAT) : un seul paramètre est modifié à la fois par rapport à une situation initiale, les autres restant constants. Cette approche isole l'effet apparent de chaque paramètre sur le PMV. Si la variation d'un paramètre entraîne un changement de catégorie, ce paramètre est considéré comme un levier influent dans le cadre étudié ; sinon, son influence est jugée plus limitée. Cette logique fournit directement la hiérarchie des paramètres qui sera intégrée au tableau filtrable : l'OFAT n'est donc pas seulement une technique d'analyse, mais le mécanisme par lequel la méthode classe les leviers de conception.

Ce choix est cohérent avec l'objectif du travail : il s'agit d'identifier les principaux leviers de manière lisible et reproductible. L'approche OFAT possède un intérêt pédagogique et opérationnel, car elle rend les résultats directement interprétables par un ingénieur. Elle présente toutefois une limite connue : elle n'explore pas les interactions entre paramètres. Dans un bâtiment réel, plusieurs variables évoluent simultanément. Une température de

soufflage différente peut s'accompagner d'un autre débit, d'une autre occupation ou d'une autre hypothèse de vêtue. Saltelli et Annoni (2010) montrent que les analyses OFAT sont insuffisantes comme seule méthode de sensibilité, et Nguyen et Reiter. (2015) que le choix de la méthode de sensibilité influence l'interprétation des modèles énergétiques. L'OFAT est donc utilisée ici comme méthode de pré-évaluation et de hiérarchisation, non comme une analyse de sensibilité globale exhaustive (Monte-Carlo, indices de Sobol), qui aurait exigé un nombre de simulations très supérieur.

7.4 Rappel du cas d'application et des zones étudiées

Le bâtiment support de la démarche est le bâtiment de fret de Liège Airport. Il est décrit en détail au chapitre précédent : périmètre de l'étude, découpage en zones thermiques, hypothèses d'occupation et de gains internes, enveloppe, systèmes techniques, consignes et modélisation dans IES VE. On se limite ici à rappeler les éléments strictement utiles à la compréhension de la démarche méthodologique.

L'analyse porte exclusivement sur les espaces administratifs et tertiaires, le hall de fret étant exclu du domaine de validité du modèle PMV. Six zones typologiques sont retenues pour construire et tester la méthode :

1. Vestiaires
2. Bureau de quatre personnes,
3. Open space paysager,
4. Salle de réunion de douze personnes
5. Cafétéria
6. Salle de formation

Elles sont complétées par une zone de référence distincte, un bureau individuel, sur laquelle la méthode est d'abord mise au point. Les consignes du projet, soit 22 °C en chauffage et 25°C en refroidissement, définissent la situation initiale de l'analyse paramétrique. Pour le détail des hypothèses d'enveloppe, de gains internes, de systèmes et de données climatiques, on se reportera à l'annexe A.

7.5 Déroulé de l'analyse paramétrique

L'analyse se déroule en cinq étapes, de la vérification d'un comportement logiciel jusqu'à la recherche exploratoire de la catégorie A.

7.5.1 Étape 1 : Vérification du traitement du CLO dans IES VE.

L'isolation vestimentaire (CLO) étant l'un des six paramètres du PMV, la manière dont IES VE la traite doit être vérifiée au préalable. Le CLO peut y être fixé, défini par un profil ou par une plage minimale et maximale. En mode Min/Max, le logiciel calcule le confort pour les valeurs extrêmes et retient à chaque pas de temps celle qui rapproche le plus le PMV de la neutralité, ce qui représente de façon simplifiée la capacité d'adaptation vestimentaire des occupants. La démarche consiste à comparer les valeurs de CLO affichées, les options sélectionnées et les PMV obtenus, afin d'identifier si le logiciel applique une valeur fixe, une moyenne apparente ou une logique Min/Max. Cette vérification est un préalable indispensable à l'interprétation correcte de toutes les simulations ultérieures et à la formulation rigoureuse des hypothèses de CLO. Cette étape de recherche est détaillée dans l'annexe E. Les autres paramètres sont encodés de manière claire, il suffit de définir une valeur fixe (hors humidité relative).

7.5.2 Étape 2 : Analyse paramétrique sur une zone de référence.

L'influence individuelle des paramètres est d'abord étudiée sur une zone de référence, un bureau individuel, choisi pour sa simplicité analytique : occupation homogène, géométrie simple, peu d'interactions internes. Une situation initiale est définie, puis vingt-deux hypothèses sont construites selon la logique OFAT, en modifiant un seul paramètre à la fois : vitesse de l'air, isolation vestimentaire, humidité relative, niveau d'activité métabolique (MET), consignes de température, et présence ou absence de chauffage ou de refroidissement. L'objectif n'est pas d'optimiser le PMV, mais d'identifier les paramètres dont la variation fait sortir le local de la plage $-0,5 < \text{PMV} < +0,5$; ceux-ci sont considérés comme des leviers importants ou des facteurs de risque, les autres comme moins déterminants. Cette étape produit la première hiérarchisation des paramètres, qui sera ensuite reportée dans le tableau filtrable. Le recours à un indicateur de durée (heures hors catégorie) plutôt

qu'à un seul indicateur instantané se justifie ici : un indicateur annuel agrégé peut masquer des dynamiques journalières, deux scénarios au nombre d'heures hors catégorie comparable pouvant présenter des profils horaires distincts (Carlucci & Pagliano, 2012 ; Rahif et al., 2021).

7.5.3 Étape 3 : Application aux six zones typologiques.

Les vingt-deux hypothèses sont ensuite reproduites sur les six zones caractéristiques, dans des conditions de paramétrage comparables, afin de vérifier si les enseignements tirés du bureau de référence restent valables pour des usages différents. Les résultats sont analysés selon la catégorie ISO 7730 atteinte, mais aussi selon le nombre et le pourcentage d'heures hors catégorie B sur l'année. L'indicateur temporel est essentiel : une zone peut dépasser légèrement la catégorie B sur quelques heures tandis qu'une autre la dépasse fortement et fréquemment ; à catégorie instantanée identique, le niveau de risque diffère. Cette étape transforme les simulations individuelles en base comparative multi-zones.

7.5.4 Étape 4 : Comparaison des stratégies de ventilation.

Deux stratégies sont comparées : une ventilation à température constante et une ventilation avec échangeur à bypass. L'objectif n'est pas de désigner un système universellement supérieur, mais d'évaluer si la stratégie de ventilation modifie significativement les résultats et de vérifier que la structure du tableau peut intégrer des variantes techniques. Cette comparaison répond à une problématique de conception fréquente : tester chaque option (débit constant, bypass, free-cooling, adaptation des températures de soufflage) par une STD complète représente un investissement important, et la méthode vise à identifier rapidement si une stratégie plus complexe apporte un gain réel de confort. Les analyses sont reproduites en modifiant le régime de ventilation, puis comparées selon les mêmes indicateurs.

7.5.5 Étape 5 : Recherche exploratoire de la catégorie A.

La dernière étape recherche les combinaisons de paramètres permettant d'atteindre la catégorie A de l'ISO 7730, plus stricte que la catégorie B. Cette catégorie n'est pas l'objectif opérationnel principal du mémoire, car elle est difficile à maintenir de façon robuste en

exploitation ; elle est étudiée comme scénario d'optimisation, pour comprendre les marges de réglage et les paramètres à maîtriser finement. La zone de référence retenue est le bureau de quatre personnes, les deux systèmes de ventilation étant testés et plusieurs valeurs de MET considérées. La méthode est itérative : faute de formule analytique inverse donnant directement les paramètres requis pour un PMV cible, les combinaisons sont testées progressivement à partir des enseignements de l'analyse de sensibilité, en ajustant d'abord les paramètres les plus influents. Dans un second temps, la vitesse de l'air est fixée à 0,1 m/s afin de représenter des conditions réalistes de faible courant d'air (limitée entre 0,1 et 0,2 m/s par le logiciel), ce qui rend la recherche plus exigeante mais plus pertinente. La recherche est enfin étendue à la salle de réunion de douze personnes et à l'open space paysager, pour évaluer la transposabilité des combinaisons identifiées. Les résultats sont présentés comme des scénarios d'optimisation, la variabilité réelle de l'occupation, de la vêtue et du climat rendant la catégorie A moins robuste que la catégorie B.

7.6 Construction du tableau filtrable

Le tableau filtrable est le livrable opérationnel de la méthodologie. Chaque ligne correspond à une combinaison entre une zone, une hypothèse paramétrique et un régime de ventilation, et renseigne la zone typologique, l'hypothèse testée, le paramètre modifié, le régime de ventilation, les valeurs de CLO et de MET, les conditions thermiques associées, le PMV, le PPD lorsqu'il est disponible, le nombre et le pourcentage d'heures hors catégorie B, la catégorie de confort ISO 7730 atteinte, l'interprétation au regard de l'objectif BREEAM Hea 04.

Le tableau est conçu comme un outil de filtrage : l'utilisateur sélectionne le type de zone, le régime de ventilation, la valeur de MET, la plage de CLO, la catégorie recherchée, et identifie rapidement les scénarios favorables, incertains et défavorables. Il constitue un outil de pré-évaluation et non une preuve de conformité : la validation d'un dossier BREEAM relève d'une analyse complète conforme au référentiel applicable. La structure du tableau est présentée dans l'annexe C. La méthode ne calcule pas un nouvel indice de confort pour un scénario inédit : elle procède par analogie. L'utilisateur rapproche la zone et les hypothèses de son

projet de la ligne du tableau la plus proche, déjà simulée, et en lit la catégorie. Le tableau fonctionne donc comme une base de cas de référence, non comme un modèle prédictif continu. Cette logique fixe une condition d'emploi explicite. Si aucune ligne ne correspond suffisamment au scénario étudié (typologie absente, hypothèses de MET, de CLO ou de ventilation hors des plages tabulées), la pré-évaluation perd sa validité. Alors, une simulation dédiée s'impose. La proximité entre scénario réel et scénario tabulé conditionne ainsi directement la fiabilité de l'estimation.

7.7 Protocole d'utilisation du tableau en phase d'avant-projet

Le tableau devient pleinement opérationnel lorsqu'il est associé à un protocole d'utilisation en cinq étapes. La première consiste à identifier la zone du projet et à la rapprocher d'une typologie du tableau (bureau, open space, salle de réunion, salle de formation, cafétéria, vestiaire) ; si le local ne correspond à aucune, l'usage du tableau reste indicatif. La deuxième consiste à définir les paramètres disponibles : activité, habillement, ventilation, consignes, débit d'air. Il faut recourir à des valeurs normatives lorsque certaines données ne sont pas fixées, tout en signalant l'incertitude associée (ISO, 2021 ; ASHRAE, 2023). La troisième consiste à filtrer le tableau et à sélectionner les lignes les plus proches du scénario ; si plusieurs configurations sont voisines, leur comparaison évalue la stabilité du résultat.

La quatrième étape consiste à interpréter la catégorie obtenue : un scénario en catégorie B est favorable à ce stade ; un scénario en catégorie A est optimisé mais doit être discuté en termes de faisabilité et de robustesse ; un scénario en catégorie C ou hors catégorie est défavorable ou à ajuster. La cinquième consiste à décider de la suite : conserver, ajuster, comparer à une alternative, écarter, ou engager une STD complète. Celle-ci reste mobilisée lorsque le scénario est proche d'une limite de catégorie, lorsque les hypothèses diffèrent fortement de celles du tableau, ou lorsque la décision engage des coûts importants. Ce protocole fait partie intégrante de la méthode : il relie les résultats de simulation à une décision concrète de conception et permet à un lecteur d'appliquer lui-même la démarche à un autre projet.

7.8 Domaine de validité et limites méthodologiques

La méthodologie est valable pour des bâtiments tertiaires présentant des zones comparables à celles étudiées et particulièrement adaptée aux phases amont, lorsqu'il s'agit de comparer rapidement plusieurs scénarios avant des simulations détaillées. Elle est moins adaptée aux espaces à conditions très spécifiques (halls industriels, ateliers, laboratoires, salles informatiques, zones à fortes charges internes, locaux à ventilation naturelle dominante ou à stratégies adaptatives). Elle dépend en outre des hypothèses de modélisation : enveloppe, profils d'occupation, systèmes techniques, données météorologiques et paramètres encodés dans IES VE. Sa transposition à d'autres projets est possible, mais par analogie raisonnée et non par application automatique. Plusieurs limites doivent être explicitement reconnues.

7.9 Synthèse de la démarche

La méthodologie peut se résumer ainsi : le confort est d'abord cadré scientifiquement à partir du modèle PMV/PPD et des normes associées ; une démarche paramétrique identifie ensuite l'influence des principaux paramètres ; cette démarche est appliquée à une zone de référence puis étendue à six zones typologiques et à deux stratégies de ventilation ; les résultats sont exprimés en catégorie de confort ISO 7730, en heures et en pourcentage d'heures hors catégorie B, puis organisés dans un tableau filtrable. Ce tableau constitue un outil d'aide à la décision en phase amont : il permet d'anticiper la catégorie probable d'un scénario, de comparer des variantes, d'identifier les paramètres à ajuster et de décider de l'opportunité d'une simulation détaillée. La méthode doit être lue comme une première approche structurée, transposable à d'autres bâtiments tertiaires comparables sous réserve d'adapter zones, hypothèses et scénarios. Les résultats obtenus sur le cas d'étude sont présentés au chapitre qui suit.

8 Résultats : une méthodologie de pré-évaluation et sa mise à l'épreuve

Le résultat de ce travail est une méthode (au sens de March & Smith, 1995), accompagnée de son instanciation.

Le chapitre est organisé en deux temps. La première partie présente la méthodologie comme un résultat construit, étape par étape. La seconde la met à l'épreuve sur le cas d'instanciation : les valeurs chiffrées y constituent une preuve de fonctionnement de la méthode.

Partie A : La méthodologie comme résultat construit

8.1 Résultat principal : une méthode adossée aux simulations PMV/PPD

Le résultat principal est une méthode qui transforme des sorties de simulation thermique dynamique (STD) en un outil structuré d'aide à la décision. Elle permet d'estimer la catégorie de confort probable d'un scénario, de hiérarchiser les configurations favorables et défavorables, et de cibler les cas justifiant une STD complète. La méthode se construit en six étapes, présentées ci-dessous comme autant de résultats intermédiaires : la délimitation d'un domaine d'application, la formalisation des variables d'entrée, la construction d'une matrice paramétrique, le choix des indicateurs de sortie, l'élaboration d'un tableau filtrable et la définition d'un protocole d'utilisation. Son expression opérationnelle est le tableau filtrable, présenté en annexe A.

8.2 Étape 1 : délimiter le domaine d'application

La première étape produit la délimitation d'un domaine d'application. La méthode s'applique aux espaces tertiaires occupés de manière régulière dans des conditions modérées et mécaniquement conditionnées, pour lesquels les indices PMV et PPD sont pertinents (Fanger, 1970 ; ISO, 2025). Les six typologies représentatives constituent ce domaine. Les

zones à conditions spécifiques, dont le hall de fret, en sont exclues, car elles sortent du domaine de validité du modèle PMV.

8.3 Étape 2 : formaliser les variables d'entrée

La deuxième étape formalise les variables d'entrée nécessaires à l'application de la méthode, condition de reproductibilité. Trois familles sont distinguées : les six paramètres du modèle PMV (température de l'air, température moyenne radiante, vitesse de l'air, humidité relative, taux métabolique et isolation vestimentaire) ; la typologie d'espace, qui détermine occupation et apports internes ; et le scénario technique (ventilation, consignes, présence ou non de refroidissement). Le taux métabolique et l'isolation vestimentaire étant estimés et non mesurés, ils constituent la principale source d'incertitude de la méthode (ISO, 2021).

8.4 Étape 3 : construire la matrice paramétrique

La troisième étape organise les simulations dans une matrice paramétrique construite à partir d'une situation initiale, selon une logique « un facteur à la fois » (OFAT) : un seul paramètre varie à la fois, ce qui isole son effet apparent sur le PMV et fournit une hiérarchisation lisible des leviers. Cette lisibilité a un coût assumé : l'OFAT n'explore pas les interactions entre paramètres et ne constitue donc pas une analyse de sensibilité globale exhaustive (Saltelli & Annoni, 2010 ; Nguyen & Reiter, 2015). La matrice croise les zones, les hypothèses paramétriques et les scénarios de ventilation.

8.5 Étape 4 : choisir les indicateurs de sortie et le critère de classement

La quatrième étape retient un jeu d'indicateurs lisibles : le PMV, le PPD et la catégorie ISO 7730 (A, B, C ou hors catégorie), la catégorie B étant l'objectif principal (ISO, 2025). Dans cette méthode, la catégorie affichée pour un scénario correspond à la catégorie associée aux conditions les plus défavorables observées sur la période d'occupation simulée, c'est-à-dire à la valeur de PMV extrême et au PPD correspondant. Ce choix volontairement conservateur permet de repérer rapidement les scénarios à risque : un local n'est classé dans une catégorie que s'il y satisfait dans ses conditions les plus contraignantes. Il est

cohérent avec l'ISO 7730:2005, dont les critères de confort sont établis principalement en régime stationnaire et expriment des limites à respecter (ISO, 2025).

Ce critère instantané est complété par le nombre et le pourcentage d'heures hors catégorie B, afin de ne pas confondre un dépassement ponctuel avec une situation durable d'inconfort. Ces indicateurs temporels sont utilisés en complément pour évaluer la durée des dépassements, conformément à la logique d'interprétation proposée dans le cadre de l'EN 16798-2 / CEN 16798-2:2019 (CEN, 2019). La méthode distingue ainsi trois lectures complémentaires : la catégorie instantanée la plus défavorable, le nombre d'heures hors catégorie B et le pourcentage correspondant.

8.6 Étapes 5 et 6 : le tableau filtrable et le protocole

Les deux dernières étapes produisent le livrable opérationnel. La cinquième élabore un tableau synthétique filtrable : chaque ligne associe une zone, une hypothèse, un scénario de ventilation, les valeurs de MET et de CLO, le PMV, le PPD, la catégorie ISO 7730. La sixième définit un protocole d'utilisation en cinq étapes (identifier la zone, définir les hypothèses, filtrer, interpréter la catégorie, décider), qui relie le tableau à une décision concrète de conception. Ces deux étapes sont détaillées, exemple à l'appui, dans la mise à l'épreuve de la méthode.

Partie B : Mise à l'épreuve de la méthode sur le cas d'instanciation

8.7 Ampleur de l'instanciation : les simulations

Pour établir que la méthode fonctionne, elle a été instanciée à grande échelle. Les hypothèses paramétriques ont été appliquées aux six zones typologiques, sous deux régimes de ventilation (échangeur à bypass et température constante), auxquels s'ajoutent les scénarios exploratoires de recherche de la catégorie A. Le total s'élève à *plus de 50 simulations thermiques dynamiques* réalisées et dépouillées ; le tableau suivant en donne la répartition par zone.

Tableau 10 : Répartition des simulations thermiques dynamiques par zone et par régime de ventilation (les essais de catégorie A, menés sur trois zones, sont inclus dans les scénarios bypass).

Zone	Scénarios bypass	Scénarios temp. constante	Total par zone
Vestiaires	23	23	46
Bureau 4P (avec essais cat. A)	32	23	55
Open space paysager Est	26	23	49
Salle de réunion 12 p.	26	23	49
Cafétéria	23	23	46
Salle de formation	23	23	46

Ce volume établit que la méthode a été éprouvée sur un éventail réaliste de situations tertiaires, condition pour apprécier la stabilité de ses résultats.

8.8 Hiérarchisation des leviers du confort

Appliquée à la zone de référence (un bureau individuel), la méthode hiérarchise les paramètres. Le pourcentage sur une année des heures hors catégorie B sont calculées et présentées dans la figure suivante.

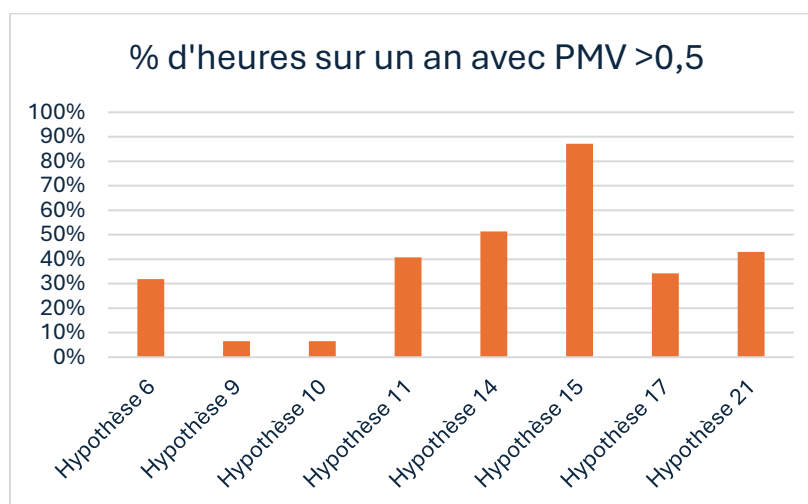


Figure 10 : Pourcentage d'heures hors catégorie B pour la zone de référence.

Dans les plages étudiées et toutes choses égales par ailleurs, les hypothèses liées à un taux métabolique élevé et à l'absence de refroidissement présentent les pourcentages d'heures hors catégorie B les plus élevés. Jusqu'à 86,5 % pour un taux métabolique de 2,0 (activité soutenue), 50,6 % pour un taux de 1,6 et 43,0 % en l'absence de refroidissement. Tandis que les hypothèses relatives à la vitesse de l'air, aux fourchettes de CLO resserrées et à la consigne de chauffage n'ont aucune heure hors catégorie B. Il s'agit d'effets apparents propres au cadre étudié, et non d'une hiérarchie universelle (Saltelli & Annoni, 2010). La figure ci-dessous illustre cette hiérarchisation.

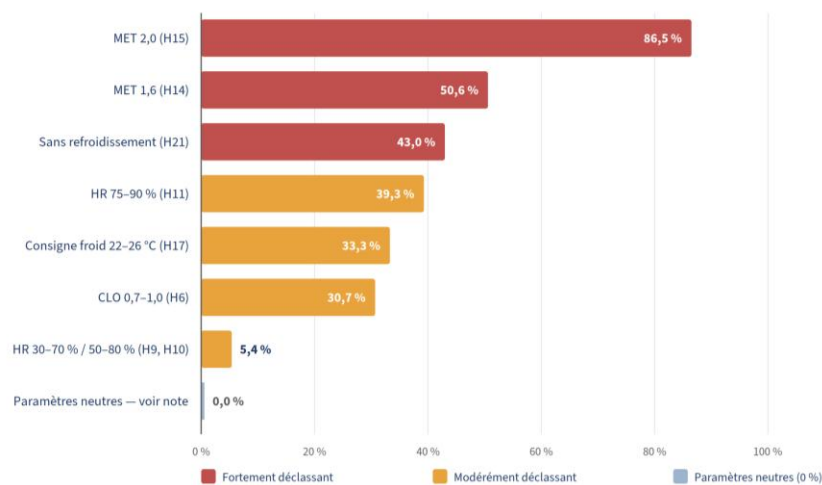


Figure 11 : Hiérarchisation des leviers sur la zone de référence : pourcentage d'heures hors catégorie B par hypothèse, trié par sévérité.

8.9 Cohérence des résultats d'une zone à l'autre

L'application des mêmes hypothèses aux six zones constitue une vérification interne de cohérence : elle teste si les leviers déterminants le restent lorsque l'usage, l'occupation et les gains internes changent. La Figure suivante présente la catégorie atteinte par chaque hypothèse dans chaque zone, sous ventilation bypass.

	Vestiaires	Bureau 4P	Open space	Salle réunion	Cafétéria	Salle format.
SI - Situation initiale	B	C	B	C	C	C
H1 - Vit. air 0,20	C	B	B	B	B	B
H2 - Vit. air 0,12	B	B	B	B	B	B
H3 - Vit. air 0,14	B	B	B	B	B	B
H4 - Vit. air 0,16	B	B	B	B	B	B
H5 - CLO 0,5-0,7	B	C	B	C	B	B
H6 - CLO 0,7-1,0	C	C	C	C	C	C
H7 - CLO 0,3-0,5	B	B	B	B	B	B
H8 - CLO 0,35-0,65	B	B	B	B	B	B
H9 - HR 30-70	B	C	C	C	C	C
H10 - HR 50-80	B	C	C	C	C	C
H11 - HR 75-90	B	C	C	C	C	C
H12 - HR 10-25	B	B	B	B	B	B
H13 - MET 1,0	B	B	B	B	B	B
H14 - MET 1,6	C	C	C	C	C	C
H15 - MET 2,0	C	C	C	C	C	C
H16 - MET 1,2	B	B	B	B	B	B
H17 - Froid 26°C	B	C	C	C	C	C
H18 - Chaud 21°C	B	C	B	C	C	C
H19 - Chaud 20°C	B	C	B	C	C	C
H20 - Chaud 19°C	B	C	B	C	C	C
H21 - Sans froid	C	C	C	C	C	C
H22 - Sans chaud	C	C	C	C	C	C
H23 - Cat A -1	-	A	A	A	-	-
H24 - Cat A -2	-	A	A	A	-	-
H25 - Cat A -3	-	B	A	A	-	-

■ Catégorie A (optimale)
■ Catégorie B (objectif)
■ Catégorie C / hors B
■ non testé

Figure 12 : Catégorie de confort par zone et par hypothèse : vérification interne de cohérence

Le résultat conforte la méthode : l'isolation vestimentaire élevée (H6), le taux métabolique élevé (H14, H15) et l'absence de refroidissement ou de chauffage (H21, H22) déclassent en catégorie C dans les six zones. Tandis que les leviers neutres comme ; vitesse de l'air (H1–H4), CLO resserré (H7, H8), humidité basse (H12) et taux métabolique faible à modéré (H13, H16), maintiennent la catégorie B partout. La stabilité de ces tendances confirme, à l'échelle du cas étudié, que la méthode produit des hiérarchisations cohérentes et non uniquement des résultats propres à la zone de référence. La vérification révèle aussi les limites de validité : la situation initiale n'atteint la catégorie B que dans deux zones (vestiaires et open space). Ce qui illustre la fonction de la méthode à savoir, signaler les configurations à risque dès la phase amont.

8.10 Comparaison des variantes techniques

Chaque scénario a été rejoué sous deux régimes de ventilation pour vérifier que la méthode intègre des variantes techniques dans une grille commune. L'écart de PPD moyen entre bypass et température constante reste faible (inférieur à 0,4 point), mais le nombre

d'hypothèses atteignant la catégorie B varie selon le régime et la zone (Figure 13). L'effet du bypass apparaît donc limité en moyenne, mais non négligeable pour certains cas limites : il n'améliore pas systématiquement le confort et modifie certains classements selon les zones. Le résultat généralisable n'est pas la supériorité d'un système, mais la capacité de la méthode à mettre cet effet en évidence, zone par zone.

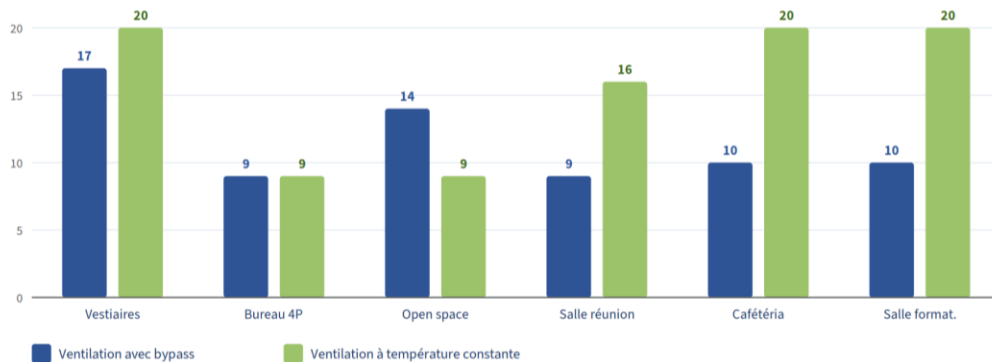


Figure 13 : Effet du régime de ventilation (bypass vs température constante) sur le nombre de scénarios conformes, par zone.

8.11 Exploration des marges supérieures (catégorie A)

Mobilisée pour explorer l'atteinte de la catégorie A ($-0,2 < PMV < +0,2$; $PPD < 6\%$), la méthode identifie, dans le bureau de quatre personnes, l'open space et la salle de réunion, des combinaisons de paramètres l'atteignant effectivement. Par exemple, dans le bureau de quatre personnes, une combinaison associant un taux métabolique de 1,4, une plage de CLO de 0,45–0,65, une température de consigne de 22–24 °C, une humidité relative de 35–45 % et une vitesse d'air fixée à 0,1 m/s permet d'atteindre la catégorie A, avec un PMV compris entre $-0,17$ et $+0,17$ et un PPD maximal de 5,6 %. Ce résultat n'est pas un objectif opérationnel. La catégorie A est sensible aux moindres variations d'usage et peu robuste en exploitation (de Dear & Brager, 1998 ; Humphreys & Nicol, 2002) mais montre que la méthode permet aussi d'explorer les marges supérieures de performance, et pas seulement de signaler les risques.

8.12 Le tableau filtrable à l'œuvre : exemple d'utilisation

L'ensemble des résultats est consolidé dans le tableau filtrable. La figure suivante en donne un extrait simplifié. Le tableau complet, comportant l'ensemble des hypothèses et des indicateurs, est fourni en annexe C. L'extrait ci-dessous, sous ventilation bypass, reprend les catégories réellement obtenues.

Température	Hypothèses	Catégorie	Ventilation	Température	Humidité	MET	CLO	Vitesse de l'air (m/s)
22-25	H1	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1,4 0,5-1		0,2
23-25	H2	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1,4 0,5-1		0,12
19-25	H3	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1,4 0,5-1		0,14
20-25	H4	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1,4 0,5-1		0,16
21-23	H7	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1,4 0,3-0,5		0,1
21-25	H8	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1,4 0,35-0,65		0,1
22-/	H12	B	Bypass 14°C	22-25	de 10-25	1,4 0,5-1		0,1
22-24	H13	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1 0,5-1		0,1
22-26	H16	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1,2 0,5-1		0,1
	Cste-H1	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1,4 0,5-1		0,2
	Cste-H2	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1,4 0,5-1		0,12
	Cste-H3	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1,4 0,5-1		0,14
	Cste-H4	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1,4 0,5-1		0,16
	Cste-H7	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1,4 0,3-0,5		0,1
	Cste-H8	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1,4 0,35-0,65		0,1
	Cste-H12	B	Constante à 21°C	22-25	de 10-25	1,4 0,5-1		0,1
	Cste-H13	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1 0,5-1		0,1
	Cste-H16	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1,2 0,5-1		0,1

Vestiaires	Bureau 4P	Paysager	Salle de réunion	Cafétaria	Salle de formation
------------	-----------	----------	------------------	-----------	--------------------

Figure 14 : Extrait du tableau filtrable pour le bureau de 4 personnes atteignant la catégorie B.

La lecture illustre le fonctionnement de la méthode. Pour un bureau à activité assise (MET 1,2, hypothèse H16), la méthode indique une catégorie B et la variante peut être conservée. Si l'hypothèse passe à une activité soutenue (MET 2,0, H15), elle signale un déclassement en catégorie C, illustré dans l'extrait suivante. Il invite à ajuster les hypothèses ou à lancer une STD. Le tableau ne fournit pas une preuve de conformité : il oriente la décision et cible les cas justifiant une simulation détaillée.

9 Discussion

9.1 Interprétation d'ensemble : ce que la méthode établit

Appliquée au cas d'étude, la méthode montre qu'on peut transformer des sorties de simulation thermique dynamique en une pré-évaluation lisible et hiérarchisée du confort. Elle classe les leviers de façon stable d'une zone à l'autre, range la comparaison de variantes techniques dans une grille commune et signale les configurations à risque dès la phase amont. Dans les scénarios étudiés, et toutes choses égales par ailleurs, le taux métabolique et la stratégie de refroidissement provoquent les déclassements les plus nets. Ces effets valent pour le cadre étudié ; ils ne définissent pas une hiérarchie universelle des déterminants du confort (Saltelli & Annoni, 2010).

La valeur de la méthode tient moins à ces résultats particuliers qu'à la démarche qui les produit : un protocole reproductible qui aide l'ingénieur à comparer des scénarios, repérer les cas favorables et cibler ceux qui justifient une simulation détaillée. Elle se place entre l'intuition d'ingénierie et la simulation complète, dans la lignée des outils d'aide à la décision en phase amont (Attia et al., 2012 ; Østergård et al., 2016).

9.2 Positionnement par rapport aux approches existantes

La méthode appartient à la famille des outils d'aide à la décision en phase amont, qui cherchent à éclairer les choix de conception sans relancer une simulation complète à chaque variante (Ochoa & Capeluto, 2009 ; Attia et al., 2012 ; Hopfe & Hensen, 2011 ; Østergård et al., 2016). Trois choix la distinguent. Elle part de sorties de STD réelles plutôt que d'un modèle simplifié reconstruit. Elle raisonne en catégories normatives de confort (ISO 7730, exploitables pour BREEAM Hea 04) plutôt qu'en indicateurs ad hoc. Et elle livre un tableau filtrable lisible par un ingénieur, sans compétence en science des données.

L'alternative la plus répandue pour explorer vite un espace de conception est le métamodèle, ou modèle de substitution, souvent couplé à une optimisation (Nguyen & Reiter, 2015 ; Hamdy et al., 2017). Ces approches sont plus puissantes sur un point : entraînées sur un

échantillon de simulations, elles approchent le comportement du bâtiment sur tout l'espace des paramètres et restituent les interactions entre variables. Elles ont aussi un coût : des simulations d'entraînement, une expertise statistique, et un résultat de type « boîte noire », moins immédiat à lire qu'une catégorie de confort justifiée hypothèse par hypothèse. L'analyse « un facteur à la fois » et le tableau explicite font le pari inverse : moins de couverture, plus de transparence et de reproductibilité, directement utilisables en réunion de projet.

La méthode se situe donc entre l'intuition d'ingénierie et les approches lourdes : STD répétée d'un côté, optimisation par métamodèle de l'autre. Elle ne les remplace pas ; elle filtre les scénarios en amont et désigne ceux qui méritent une simulation détaillée ou une étude des interactions. Cette complémentarité rejoint le rôle que la littérature attribue aux outils de décision amont (Attia et al., 2012 ; Østergård et al., 2016).

9.3 Limites liées au modèle PMV

La méthode hérite des limites du modèle sur lequel elle repose. Le PMV est un modèle stationnaire qui prédit un vote moyen et rend mal compte de l'adaptation comportementale, physiologique et psychologique des occupants ; sa capacité à prédire les sensations réellement observées est limitée (de Dear & Brager, 1998 ; Humphreys & Nicol, 2002 ; Cheung et al., 2019). Ce choix est assumé. Le PMV reste le modèle de référence de l'ISO 7730:2005 et le cadre d'évaluation du confort dans BREEAM Hea 04 (ISO, 2025) : une méthode compatible avec les exigences normatives devait s'appuyer sur lui. Elle produit donc un indicateur normatif de confort, pas une mesure directe du ressenti.

9.4 Limites liées au logiciel de simulation (IES VE)

L'outil de simulation ajoute ses propres limites. IES VE calcule le PMV à partir d'hypothèses de modélisation (géométrie, profils d'occupation, données météorologiques, paramètres de régulation) dont la qualité conditionne celle des résultats. Le traitement de l'isolation vestimentaire l'illustre : à chaque pas de temps, le logiciel retient une valeur de CLO dans une plage, et l'affichage agrégé peut ne pas refléter la valeur réellement appliquée au calcul.

La résolution du modèle et la représentativité du fichier climatique pèsent de la même façon. La méthode opère donc sur des sorties de simulation, elles-mêmes tributaires des hypothèses de l'outil, et l'interprétation des catégories doit en tenir compte.

9.5 Limites liées à l'approche paramétrique (OFAT)

La méthode a été construite de façon empirique et itérative, par une analyse « un facteur à la fois » (OFAT). Ce mode de conception est reconnu, surtout adossé à la simulation numérique (Thomke, 1998 ; Camburn et al., 2017), mais il a une conséquence directe : il n'explore pas l'espace complet des configurations. En faisant varier un paramètre à la fois, l'OFAT ne capte pas les interactions, alors que le confort résulte de leur action conjointe (Saltelli & Annoni, 2010 ; Nguyen & Reiter, 2015). La construction itérative implique aussi que certaines hypothèses, certains secteurs d'activité ou certaines combinaisons n'ont pas été couverts : les scénarios testés viennent d'un cheminement progressif, pas d'un plan d'expérience exhaustif. La méthode éclaire des tendances dominantes sur un sous-ensemble de situations, sans viser l'exhaustivité.

La méthode raisonne par analogie à une base de scénarios finie : sa fiabilité décroît à mesure que le cas étudié s'éloigne des lignes tabulées, ce qui borne son usage aux configurations couvertes par le cas d'instanciation.

Une conséquence directe de l'approche « un facteur à la fois » mérite d'être explicitée : la méthode identifie l'effet de chaque levier pris isolément, mais ne combine pas les paramètres individuellement favorables en un scénario unique optimisé. Chaque ligne du tableau correspond à une seule variation par rapport à la situation initiale ; elle ne représente pas une configuration où plusieurs réglages avantageux seraient appliqués simultanément. La recherche de la catégorie A (§8.11) constitue la seule exception : quelques combinaisons y ont été testées, mais de façon exploratoire et manuelle, sans démarche systématique d'optimisation. La méthode hiérarchise donc les leviers et signale les configurations à risque, sans prétendre déterminer le scénario globalement optimal, ce qui supposerait de croiser les paramètres et relèverait d'une analyse de sensibilité globale ou d'une optimisation (Saltelli & Annoni, 2010 ; Nguyen & Reiter, 2015).

9.6 Limites liées aux hypothèses d'usage : MET, CLO et humidité

Les paramètres personnels pèsent lourd dans l'incertitude. Le taux métabolique et l'isolation vestimentaire sont estimés à partir de valeurs normatives, non mesurés (ISO, 2007, 2021), or l'analyse les place parmi les leviers les plus influents : une erreur d'estimation se répercute directement sur la catégorie prédite. Faute d'humidification active dans le bâtiment, l'humidité relative a été traitée comme une hypothèse de référence plutôt que comme une variable pilotée. Ces choix sont explicites et traçables dans le tableau, ce qui permet d'en apprécier l'effet ; ils restent des hypothèses, et la lecture des catégories reste conditionnelle.

9.7 Périmètre : confort global et inconfort local

La méthode évalue le confort thermique global, exprimé par les indices PMV et PPD, et non l'inconfort local. Les phénomènes tels que les courants d'air, l'asymétrie de rayonnement, le gradient vertical de température ou une température de sol inadaptée ne sont pas couverts, alors qu'ils peuvent dégrader le confort réel même lorsque le confort global est satisfaisant (ISO, 2025). Ce périmètre, déjà signalé lors de la présentation des indicateurs, doit être rappelé ici : la méthode constitue une pré-évaluation du confort global et ne dispense pas d'une vérification de l'inconfort local lors des phases ultérieures de conception.

9.8 Validité et statut du cas d'étude

La portée des résultats se lit à trois niveaux.

La validité interne est établie sur le cas étudié. La méthode a été instanciée sur plusieurs simulations couvrant six zones typologiques et deux régimes de ventilation, et elle produit des classements cohérents : les mêmes leviers déclassent ou maintiennent la catégorie B de façon reproductible d'une zone à l'autre.

La validité externe n'est pas démontrée. L'étude repose sur un seul bâtiment, un seul climat et un seul moteur de simulation. Rien ne garantit que les hiérarchies de leviers se transposent à d'autres typologies, climats ou bâtiments sans nouvelle instanciation, ni qu'elles coïncideraient avec des mesures in situ. Cette limite tient largement au format d'un

travail de fin d'études : une généralisation robuste aurait demandé un échantillon plus large de bâtiments, une diversité de climats et une confrontation à des données mesurées.

La validité opérationnelle, c'est-à-dire l'utilité réelle pour un ingénieur en conception, reste à confirmer. Elle suppose un test auprès d'utilisateurs cibles, pour vérifier que le tableau filtrable est lisible, manipulable et utile à l'arbitrage. Cette évaluation d'usage, propre à la recherche par conception, n'a pas été menée ici.

S'appuyer sur un cas unique n'est pas pour autant une faiblesse. En recherche par conception, instancier une méthode sur un cas réel est un mode de démonstration légitime dès lors que l'artefact répond à un problème identifié et s'évalue dans un contexte concret (March & Smith, 1995 ; Hevner et al., 2004) ; l'étude de cas approfondie produit une connaissance transférable sous conditions, à condition d'en expliciter le périmètre (Flyvbjerg, 2006). Liège Airport n'est donc pas une preuve de généralisation, mais une première mise à l'épreuve opérationnelle de la méthode.

9.9 Perspectives

Plusieurs prolongements découlent de ces limites.

Le premier est d'appliquer la méthode à d'autres bâtiments tertiaires, d'autres systèmes de chauffage, de ventilation et de refroidissement, et d'autres climats, pour voir si les tendances observées tiennent. Une validation externe, par comparaison avec des mesures in situ ou des STD détaillées menées indépendamment, renforcerait la crédibilité de l'outil.

Sur le plan méthodologique, l'analyse « un facteur à la fois » pourrait être complétée, voire remplacée, par une analyse de sensibilité tenant compte des interactions entre paramètres ; on affinerait ainsi la hiérarchie des leviers et l'on repérerait les combinaisons les plus influentes (Saltelli & Annoni, 2010). Intégrer des fichiers climatiques projetés permettrait d'éprouver la robustesse de la méthode face à l'évolution du climat, dimension centrale du contexte de ce mémoire mais absente de l'application.

La composante technico-économique pourrait aussi être développée. Le tableau actuel n'intègre pas le coût de façon complète. On pourrait associer à chaque variante un ordre de

grandeur des équipements, pour arbitrer non seulement selon la catégorie de confort, mais aussi selon l'effort économique. Une analyse en coût global (Life Cycle Costing) offrirait une vision plus complète (ISO, 2017), au prix d'une lourdeur peu compatible avec une pré-évaluation amont ; l'objectif resterait ici une première indication économique, assez simple pour un usage rapide.

Enfin, le périmètre limité aux six zones typologiques relève du cas d'application, pas d'une faiblesse de fond : la démarche est extensible. Pour une nouvelle typologie (salle de sport, espace de restauration, local à forte occupation), il suffirait de simuler cette zone dans sa situation initiale, puis de lui appliquer la même analyse paramétrique. Elle viendrait enrichir la base de scénarios et le tableau sans toucher à la structure de la méthode. C'est l'un de ses intérêts : plus la base de zones s'élargit, plus l'évaluation de nouvelles variantes devient rapide. Le coût initial de construction est élevé, son coût marginal décroît. La méthode est ainsi un outil évolutif de pré-évaluation, qui gagne en robustesse et en utilité à mesure qu'il est appliqué à d'autres typologies, bâtiments et contextes.

10 Conclusion

Ce travail est né d'un problème concret de bureau d'études : la simulation thermique dynamique est indispensable pour évaluer le confort, mais trop lourde pour être relancée à chaque variante en phase amont. D'où la question : comment aider un ingénieur à anticiper la catégorie de confort probable d'un espace tertiaire sans relancer une simulation complète à chaque fois ?

La réponse n'a pas pris la forme d'un simple jeu de résultats chiffrés, mais d'une méthode. Conçue comme l'artefact d'une recherche par conception, cette méthodologie de pré-évaluation du confort thermique se construit en six étapes : délimiter le domaine d'application, formaliser les variables d'entrée, construire une matrice paramétrique, choisir les indicateurs et le critère de classement, puis élaborer un tableau filtrable et son protocole d'utilisation. Elle transforme des sorties de simulation en un outil de décision exploitable dès l'avant-projet.

Les objectifs spécifiques fixés au départ ont tous été atteints. Le domaine d'application a été ramené à six typologies tertiaires représentatives ; les variables d'entrée ont été formalisées ; une matrice paramétrique a été bâtie à partir d'une situation initiale ; les leviers déterminants ont été identifiés et hiérarchisés ; des indicateurs lisibles ont été retenus ; plusieurs scénarios de ventilation ont été réunis dans une grille commune ; enfin, un tableau filtrable et un protocole d'utilisation ont été produits. Les simulations menées sur les six zones établissent le fonctionnement de la méthode et en valident la cohérence interne.

La portée de cette contribution se lit à la lumière de la nature du travail. Le résultat est une méthode, pas un diagnostic du bâtiment : les chiffres servent à montrer qu'elle fonctionne, non à décrire Liège Airport. La méthode n'est pas généralisée. Construite et validée en interne sur un cas unique, elle aurait exigé, pour l'être, d'être appliquée à d'autres bâtiments, systèmes et climats, puis confrontée à des mesures. Un approfondissement hors de portée d'un travail de fin d'études. Elle hérite par ailleurs des limites du modèle PMV et de celles du logiciel de simulation, et sa construction itérative n'a couvert ni toutes les hypothèses ni

toutes les interactions possibles. Ces limites dessinent à la fois son domaine d'usage et ses prolongements : généralisation, validation externe, prise en compte des interactions entre paramètres et des scénarios climatiques futurs.

La contribution tient finalement en peu de mots : une méthode reproductible et transparente, qui structure la pré-évaluation du confort en phase amont, réduit le nombre de scénarios à simuler en détail et clarifie l'arbitrage de conception, sans remplacer la simulation thermique dynamique à laquelle revient la validation finale. En éprouvant cet artefact sur un cas réel, le mémoire montre qu'une démarche de recherche par conception peut, même à l'échelle d'un travail de fin d'études, produire un résultat à la fois scientifiquement fondé et directement utile à l'ingénierie du bâtiment.

11 Annexe

11.1 Annexe A : Données techniques du bâtiment cas d'étude.

Cette annexe rassemble les données techniques du bâtiment de Liège Airport et les hypothèses de modélisation. Elles proviennent du rapport d'étude PEB (réf. liege-PEB-DI, 06/01/2026), des plans d'esquisse (indice 02, 15/10/2025) et de la fiche technique de la pompe à chaleur, documents établis ou réunis dans le cadre du stage chez Six Consulting & Engineering. Conformément au rapport PEB, les parois sont décrites par leur épaisseur d'isolant et leur conductivité λD ; les valeurs U globales ne sont pas reproduites ici, le rapport ne les explicitant pas paroi par paroi.

11.1.1 A.1. Périmètre de l'étude

L'étude porte sur les espaces administratifs et tertiaires (partie « bureaux » au sens PEB), à l'exclusion du hall de fret. Ce dernier, considéré comme industriel non chauffé au sens de la PEB (puissance $< 15 \text{ W/m}^3$), est soumis à des consignes propres (minimum 18°C en hiver, maximum 23°C en été) et sort du champ de l'analyse de confort PMV/PPD.

Partie fonctionnelle (PEB)	Surface	Inclus dans l'étude
Bureaux (bureaux, sanitaires, réfectoire, circulation)	3 450 m ²	Oui
Vestiaires / sanitaires / douches	220 m ²	Oui
Locaux techniques	350 m ²	Non
Hall (stockage, industriel non chauffé)	voir plans	Non (hors PMV)

Le réfectoire est assimilé à la partie bureau au sens PEB, sa surface au sol étant inférieure à 250 m².

11.1.2 A.2. Zones typologiques étudiées

Six zones typologiques représentatives ont été retenues, en plus de la zone de référence (bureau individuel) servant à construire la matrice paramétrique. Les MET et CLO indiqués correspondent à la situation initiale, avant variation paramétrique.

Zone	Niveau	Usage	Occupation	MET	CLO
Vestiaires	R0	Changement de tenue	Intermittente	1,4	0,5–1,0
Bureau fermé 4 personnes	R+2	Travail de bureau	4 pers.	1,4	0,5–1,0
Open space paysager Est	R+2	Travail de bureau	Collective	1,4	0,5–1,0
Salle de réunion	R+2	Réunion	10–12 pers.	1,4	0,5–1,0
Réfectoire / cafétéria	R+4	Restauration	Intermittente	1,4	0,5–1,0
Espace formation	R+4	Formation	15 pers.	1,4	0,5–1,0

11.1.3 A.3. Enveloppe thermique (partie bureaux)

Compositions issues du rapport PEB (épaisseur d'isolant et conductivité λ_D) :

Paroi	Composition / isolant
Toiture plate (et couvrant ascenseur)	120 mm de PIR, $\lambda_D \leq 0,022 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Façade bardage sans coupure RF	160 mm de laine de verre, $\lambda_D \leq 0,032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Façade bardage avec coupure RF	140 mm de PIR, $\lambda_D \leq 0,022 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ + coupure RF
Dalle sur sol	100 mm de PUR projeté, $\lambda_D \leq 0,026 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Dalle sur extérieur (finition bardage)	120 mm de PIR, $\lambda_D \leq 0,022 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Mur mitoyen vers hall (double mur)	80 mm de PUR + bloc béton 9 cm
Menuiseries (châssis ALU)	$U_w \leq 1,50$; $U_f \leq 1,60 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Vitrage (double, solaire réduit)	$U_g \leq 1,10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$; $g \leq 40 \%$
Portes (ALU)	$U_d \leq 2,00 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

Vitrage à facteur solaire réduit ($g \leq 0,40$) retenu sur l'ensemble du projet pour limiter le risque de surchauffe. Nœuds constructifs traités selon l'option B (nœuds PEB conformes).

11.1.4 A.4. Gains internes

Source	Valeur
Équipements	100 W/personne

Source	Valeur
Chaleur sensible (occupants)	90 W/personne
Chaleur latente (occupants)	60 W/personne
Éclairage bureaux	6 W/m ²
Éclairage circulation / rangements	4 W/m ²
Éclairage sanitaires / réfectoire	3 W/m ²

11.1.5 A.5. Systèmes techniques

Élément	Caractéristique
Ventilation	CTA double flux (type D), récupération ≥ 75 %, < 0,5 W/m ³ pulsé et extrait
Débits	10 000 m ³ /h (landside) ; 5 500 m ³ /h (airside)
Régulation ventilation	Sonde CO ₂ (régulation automatique conseillée)
Chauffage / refroidissement	Bivalence : chaudière gaz 600 kW + PAC air/eau 2 × 278 kW
Performances PAC	Rendement à 55 °C ≥ 124 % ; SEER ≥ 3,7 ; régime 35–28 °C
Consigne chauffage	22 °C
Consigne refroidissement	25 °C
Humidification	Aucune (confirmé par Liège Airport)
ECS	Résistif électrique localisé ($\eta \geq 40\%$), pas de boucle ECS

11.1.6 A.6. Pompe à chaleur (fiche technique Aermec NRG1100)

Paramètre	Valeur
Type	Air/eau, réversible, capacité variable
Puissance calorifique nominale (Prated)	278 kW
Efficacité saisonnière chauffage (η_s)	124 %
COP à +7 °C / +2 °C / -7 °C	4,20 / 3,00 / 2,10

Paramètre	Valeur
Température de bivalence	-5 °C
Température limite de fonctionnement (TOL)	-15 °C
Température limite eau de chauffage (WTOL)	35 °C

11.1.7 A.7. Données de simulation

Paramètre	Valeur
Logiciel	IES VE (ModelIT, ApacheSim, VistaPro)
Version	IES VE 2025
Fichier météo	Liège, 2024 (climat actuel)
Plans de référence	Esquisse indice 02, 15/10/2025
Origine des données	Rapport PEB (liege-PEB-DI, 06/01/2026), plans, fiche PAC

11.2 Annexe B : Explication des hypothèses.

	Heating plant fraction (unlimited)	Cooling plant fraction (unlimited)	Heating set point (cst)	Cooling (cst)	Humidity	MET	CLO	Vitesse air	Occupation (nbre de pers.)
Situation initiale	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 1	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,5-1	0,2	2
Hypothèse 2	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,5-1	0,12	2
Hypothèse 3	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,5-1	0,14	2
Hypothèse 4	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,5-1	0,16	2
Hypothèse 5	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,5-0,7	0,1	2
Hypothèse 6	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,7-1	0,1	2
Hypothèse 7	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,3-0,5	0,1	2
Hypothèse 8	0,7	0,6	22	25	40-60	1,4	0,35-0,65	0,1	2
Hypothèse 9	0,7	0,6	22	25	30-70	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 10	0,7	0,6	22	25	50-80	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 11	0,7	0,6	22	25	75-90	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 12	0,7	0,6	22	25	de 10-25	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 13	0,7	0,6	22	25	40-60	1	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 14	0,7	0,6	22	25	40-60	1,6	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 15	0,7	0,6	22	25	40-60	2	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 16	0,7	0,6	22	25	40-60	1,2	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 17	0,7	0,6	22	26	40-60	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 18	0,7	0,6	21	25	40-60	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 19	0,7	0,6	20	25	40-60	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 20	0,7	0,6	19	25	40-60	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 21	0,7	0,6	22	No cooling	40-60	1,4	0,5-1	0,1	2
Hypothèse 22	0,7	0,6	No heating	25	40-60	1,4	0,5-1	0,1	2

Explication des hypothèses :

1. Augmentation de la vitesse de l'air à 0,10 m/s

La vitesse de l'air est fixée à 0,10 m/s, conformément aux limites imposées par le logiciel, soit entre 0,10 et 0,20 m/s.

2. Augmentation de la vitesse de l'air à 0,12 m/s

La vitesse de l'air est augmentée de 0,02 m/s par rapport à la valeur de référence, tout en restant dans la plage autorisée par le logiciel.

3. Augmentation de la vitesse de l'air à 0,14 m/s

La vitesse de l'air est augmentée de 0,04 m/s afin d'analyser son influence sur les résultats.

4. Augmentation de la vitesse de l'air à 0,16 m/s

La vitesse de l'air est augmentée de 0,06 m/s, tout en respectant les limites imposées par le logiciel.

5. Réduction de la plage de CLO de 0,5–1,0 à 0,5–0,7

La plage d'isolation vestimentaire est réduite afin d'étudier l'effet d'un niveau vestimentaire plus faible.

6. Réduction de la plage de CLO de 0,5–1,0 à 0,7–1,0

La plage d'isolation vestimentaire est réduite afin d'analyser l'effet d'un niveau vestimentaire plus élevé.

7. Réduction de la plage de CLO de 0,5–1,0 à 0,3–0,5

L'isolation vestimentaire est diminuée pour représenter une tenue plus légère.

8. Réduction de la plage de CLO de 0,5–1,0 à 0,35–0,65

La plage de CLO est resserrée autour de valeurs plus faibles afin d'évaluer l'impact d'une isolation vestimentaire réduite.

9. Modification de la plage d'humidité relative de 40–60 % à 30–70 %

La plage d'humidité relative est élargie afin d'évaluer l'impact d'une plus grande variation d'humidité.

10. Modification de la plage d'humidité relative de 40–60 % à 50–80 %

La plage d'humidité relative est déplacée vers des valeurs plus élevées afin d'étudier l'effet d'un environnement plus humide.

11. Modification de l'humidité relative de 40–60 % à 75–90 %

L'humidité relative est fortement augmentée afin de simuler un environnement très humide.

12. Modification de l'humidité relative de 40–60 % à 10–25 %

L'humidité relative est diminuée afin de simuler un environnement plus sec.

13. Hypothèse métabolique : MET = 1,0

Une valeur de 1,0 MET correspond à l'activité métabolique d'une personne assise et détendue. (ISO 8996:2021)

14. Hypothèse métabolique : MET = 1,6

Une valeur de 1,6 MET correspond à l'activité métabolique d'une personne exerçant une activité professionnelle légère. (ISO 8996:2021)

15. Hypothèse métabolique : MET = 2,0

Une valeur de 2,0 MET correspond à une activité debout d'intensité moyenne, comme un travail domestique ou une activité de vendeur. (ISO 8996:2021)

16. Hypothèse métabolique : MET = 1,2

Une valeur de 1,2 MET correspond à une personne debout au repos. (ISO 8996:2021)

17. Modification des bornes de température de 22–25 °C à 22–26 °C

La borne supérieure de température est augmentée afin d'analyser l'effet d'une température maximale plus élevée.

18. Modification des bornes de température de 22–25 °C à 21–25 °C

La borne inférieure de température est diminuée afin d'analyser l'effet d'une température minimale plus basse.

19. Modification des bornes de température de 22–25 °C à 20–25 °C

La plage de température est élargie vers le bas afin d'étudier l'impact d'un environnement plus frais.

20. Modification des bornes de température de 22–25 °C à 19–25 °C

La plage de température est davantage élargie vers le bas afin d'évaluer l'effet d'une température minimale plus faible.

21. Test sans climatisation

La climatisation est désactivée afin d'évaluer les résultats en l'absence de refroidissement actif.

22. Test sans chauffage

Le chauffage est désactivé afin d'évaluer les résultats en l'absence d'apport thermique actif.

11.3 Annexe C : Tableau filtrable

11.3.1 Les filtres

Température

-25

19-25

20-25

21-25

22-25

22-26

Catégorie

B

C

MET

1

1,2

1,4

1,6

2

Humidité

30-70

40-60

50-80

75-90

de 10-25

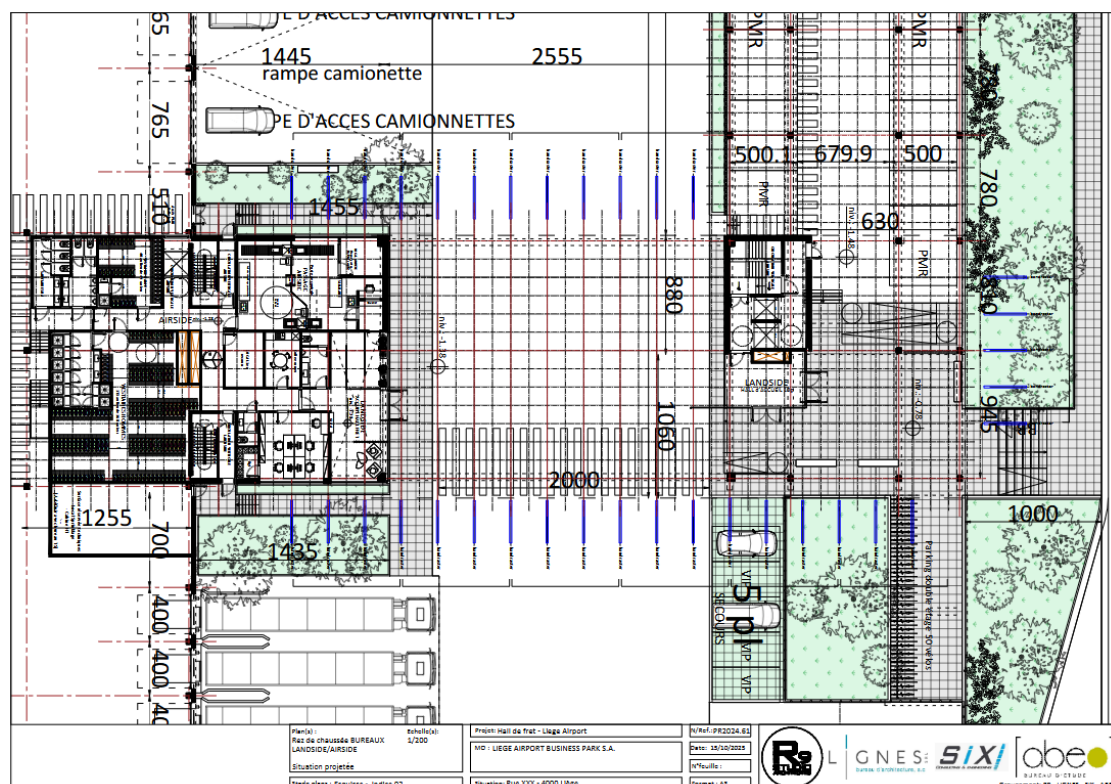
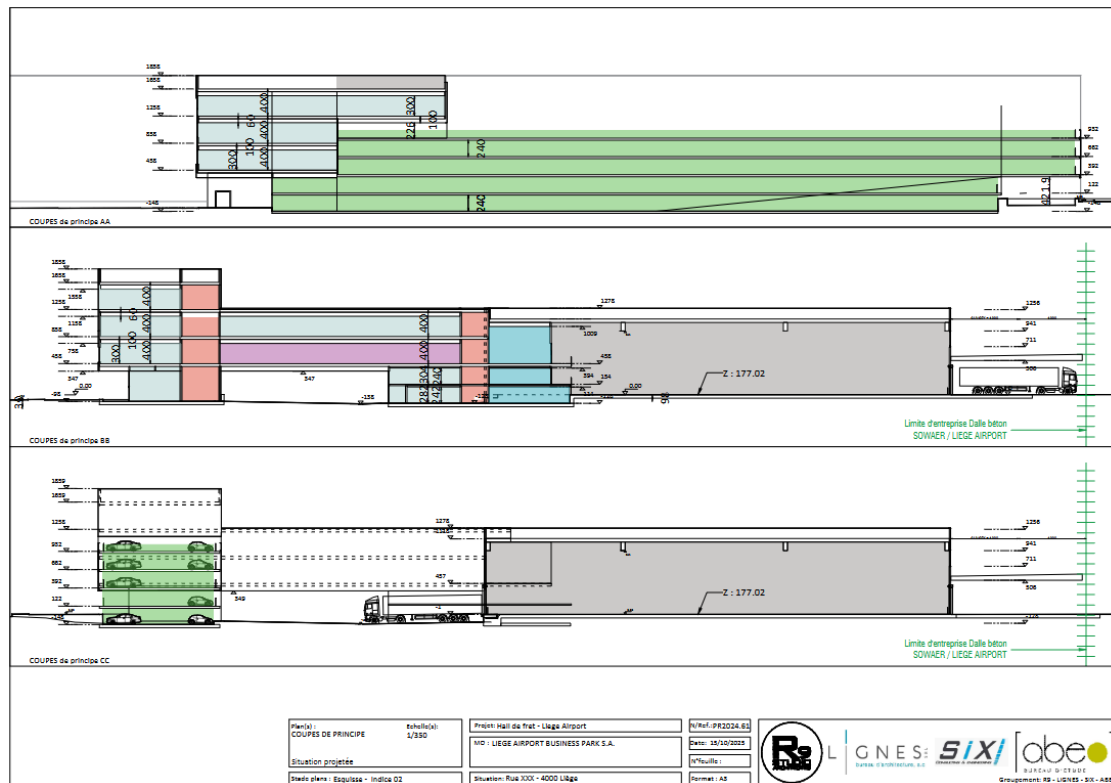
11.3.2 Le tableau

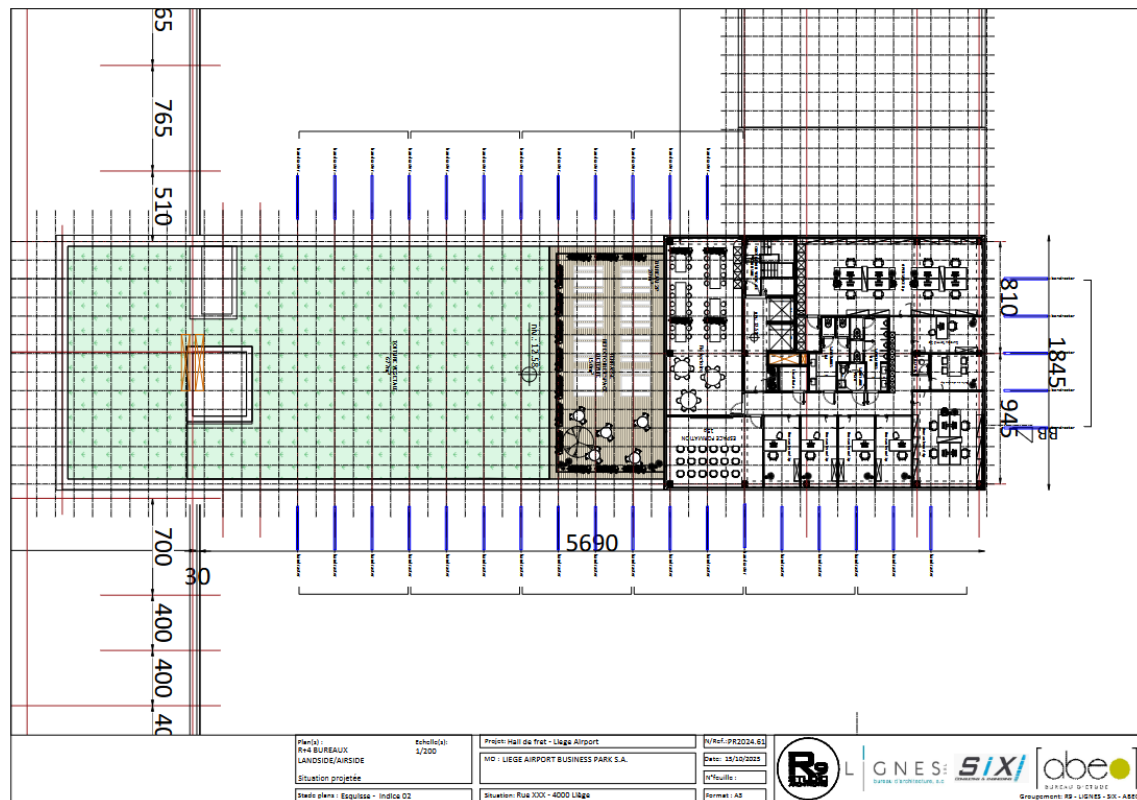
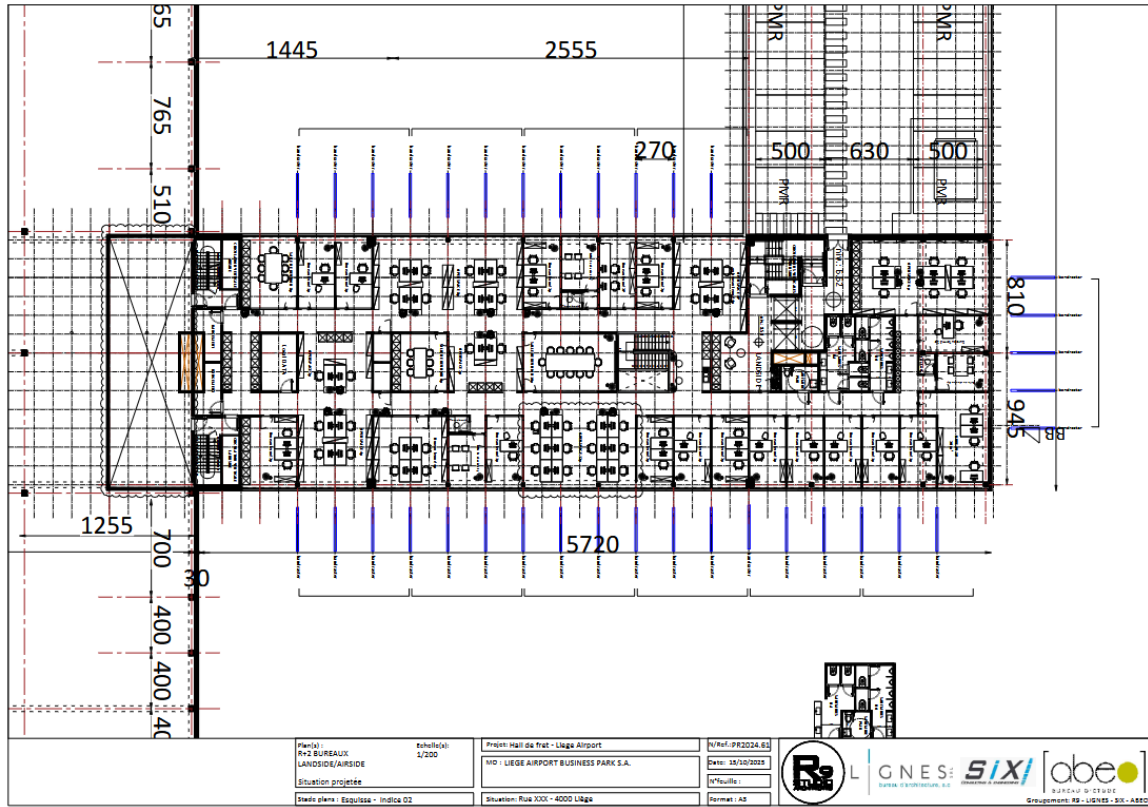
Hypothèses		Catégorie	Ventilation	Température	Humidité	MET	CLO	Vitesse de l'air (m/s)	Occupation (nbre de pers.)	Heating plant fraction (unlimited)	Cooling plant fraction (unlimited)	PMV MA	PMV MIN	PPD MIN	PPD MA
H1	C	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.5	-0.36	5	10.72	
H1	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.2		0.7	4	0.6	0.42	-0.41	5	8.97	
H2	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.12		0.7	4	0.6	0.45	-0.38	5	9.83	
H3	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.14		0.7	4	0.6	0.4	-0.4	5	8.76	
H4	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.16		0.7	4	0.6	0.4	-0.4	5	8.38	
H5	C	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.5-0.7	0.1		0.7	4	0.6	0.5	-0.17	5	10.72	
H6	C	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.7-1	0.1		0.7	4	0.6	0.76	-0.06	5	17.8	
H7	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.3-0.5	0.1		0.7	4	0.6	0.19	-0.41	5	7.89	
H8	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.35-0.65	0.1		0.7	4	0.6	0.27	-0.27	5	7.54	
H9	C	Bypass 14°C	22-25	30-70	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.55	-0.36	5	12.15	
H10	C	Bypass 14°C	22-25	50-80	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.6	-0.36	5	12.78	
H11	C	Bypass 14°C	22-25	75-90	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.62	-0.23	5	12.97	
H12	B	Bypass 14°C	22-25	de 10-25	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.35	-0.35	5	7.58	
H13	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.45	-0.45	5	9.29	
H14	C	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.6 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.74	-0.07	5	17.13	
H15	C	Bypass 14°C	22-25	40-60	2 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	1.13	0.44	9.55	32.78	
H16	B	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.2 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.41	-0.41	5	8.43	
H17	C	Bypass 14°C	22-26	40-60	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.75	-0.36	5	18.03	
H18	C	Bypass 14°C	21-25	40-60	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.5	-0.38	5	10.73	
H19	C	Bypass 14°C	20-25	40-60	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.5	-0.38	5	10.73	
H20	C	Bypass 14°C	19-25	40-60	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.5	-0.38	5	10.73	
H21	C	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	1.97	-0.36	5	60.23	
H22	C	Bypass 14°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.5	-1.05	5	10.73	
H23	A	Bypass 14°C	22-24	35-45	1.4 0.45-0.65	0.1		0.7	4	0.6	0.17	-0.17	5	5.58	
H24	A	Bypass 14°C	23-25	35-45	1.2 0.55-0.75	0.1		0.7	4	0.6	0.18	-0.17	5	5.64	
H25	B	Bypass 14°C	23-25	35-45	1 0.8-1.05	0.1		0.7	4	0.6	0.2	-0.2	5	5.83	
Cate-S1	C	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.52	-0.37	5	10.72	
Cate-H1	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.2		0.7	4	0.6	0.42	-0.41	5	8.94	
Cate-H2	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.12		0.7	4	0.6	0.47	-0.38	5	9.83	
Cate-H3	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.14		0.7	4	0.6	0.43	-0.4	5	8.76	
Cate-H4	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.5-1	0.16		0.7	4	0.6	0.4	-0.4	5	8.37	
Cate-H5	C	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.5-0.7	0.1		0.7	4	0.6	0.52	-0.17	5	10.72	
Cate-H6	C	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.7-1	0.1		0.7	4	0.6	0.78	-0.05	5	17.8	
Cate-H7	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.3-0.5	0.1		0.7	4	0.6	0.2	-0.4	5	7.89	
Cate-H8	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.4 0.35-0.65	0.1		0.7	4	0.6	0.29	-0.27	5	6.77	
Cate-H9	C	Constante à 21°C	22-25	30-70	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.58	-0.37	5	12.15	
Cate-H10	C	Constante à 21°C	22-25	50-80	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.61	-0.35	5	12.78	
Cate-H11	C	Constante à 21°C	22-25	75-90	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.62	-0.22	5	12.97	
Cate-H12	B	Constante à 21°C	22-25	de 10-25	1.4 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.35	-0.35	5	7.58	
Cate-H13	B	Constante à 21°C	22-25	40-60	1 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.45	-0.45	5	9.29	
Cate-H14	C	Constante à 21°C	22-25	40-60	1.6 0.5-1	0.1		0.7	4	0.6	0.76	-0.03	5	17.13	

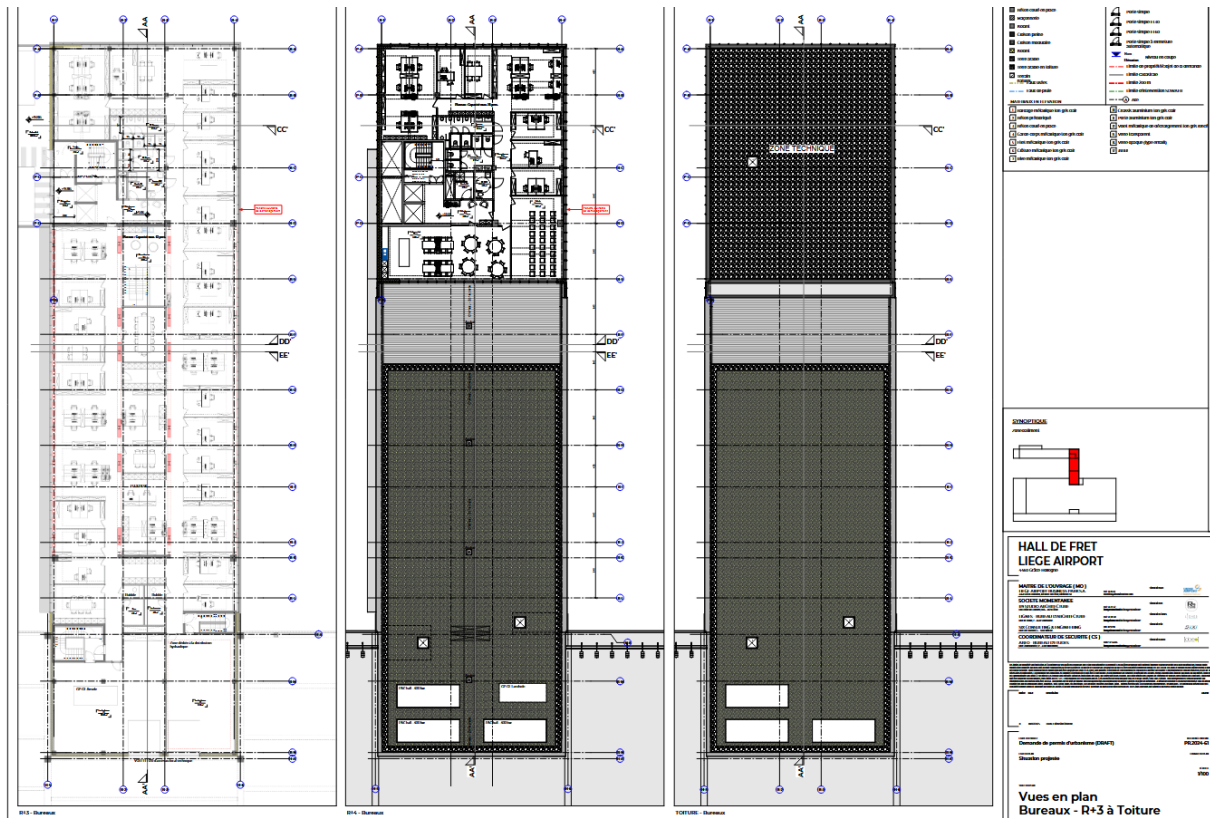
Ci-dessus, une capture d'écran de la partie du tableau pour le bureau de 4 personnes.

Les couleurs des lignes correspondent à celles-ci :		Catégorie
		A
		B
		C

11.4 Annexe D : Plan de l'aéroport de Liège







11.5 Annexe E : Démonstration de l'utilisation du CLO par IES VE.

Avant de construire la matrice paramétrique, une étape préalable s'est imposée : établir précisément comment le logiciel traite l'isolation vestimentaire (CLO). Ce paramètre se distingue des cinq autres variables du PMV par la manière dont il entre dans le calcul, et une mauvaise compréhension de ce traitement fausserait l'interprétation de l'ensemble des résultats. Cette étape illustre aussi la démarche générale du mémoire : maîtriser le comportement de l'outil avant de l'employer comme instrument de mesure.

11.5.1 Où le CLO intervient dans la formule de Fanger

Comme établi précédemment, le PMV s'écrit $PMV = [0,303 \cdot e^{-0,036} \cdot M + 0,028] \cdot L$, où la charge thermique L intègre les pertes par rayonnement et par convection :

$$L = \dots - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

L'isolation vestimentaire I_{cl} (exprimée en clo, avec 1 clo = 0,155 m²·K/W) n'apparaît pas directement dans cette écriture : elle agit *indirectement*, par l'intermédiaire de deux grandeurs. La première est le facteur de surface habillée f_{cl} , qui traduit l'augmentation de la surface d'échange due aux vêtements et que l'ISO 7730 définit par :

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} \quad (si \ I_{cl} \leq 0,078 \ m^2 \cdot K/W)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \quad (si \ I_{cl} > 0,078 \ m^2 \cdot K/W)$$

La seconde est la température de surface du vêtement t_{cl} , qui dépend elle-même de I_{cl} . Le CLO conditionne donc à la fois l'amplitude des pertes (via f_{cl}) et le niveau de température auquel elles s'opèrent (via t_{cl}).

11.5.2 Une équation implicite, résolue par itération

La température de surface du vêtement est solution d'une équation implicite, dans laquelle I_{cl} apparaît explicitement :

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - 0,155 \cdot I_{cl} \cdot \{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \}$$

Le coefficient d'échange convectif h_c dépend lui aussi de t_{cl} , l'ISO 7730 retenant la plus grande des deux valeurs suivantes selon que la convection est naturelle ou forcée :

$$h_c = \max (2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} ; 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}})$$

Comme t_{cl} figure des deux côtés de l'égalité et que h_c en dépend, le système ne peut être résolu analytiquement : il est résolu *par approximations successives*, en partant d'une estimation initiale de t_{cl} puis en recalculant h_c et les pertes jusqu'à convergence. ApacheSim (IES VE) exécute cette itération à chaque pas de temps horaire. Une conséquence directe en découle : la relation entre le CLO et le PMV est *non linéaire*, de sorte que deux valeurs de CLO ne produisent pas un décalage de PMV proportionnel. Ce qui rend l'analyse de sensibilité de ce paramètre plus délicate que pour les autres.

11.5.3 Une variable comportementale, non observable

À cette complexité mathématique s'ajoute une difficulté physique : contrairement à la température ou à l'humidité, l'isolation vestimentaire n'est pas mesurable en continu. Elle dépend du comportement des occupants, qui ajustent leur tenue selon la saison et le ressenti. Or son influence est importante : une variation de 0,5 clo peut décaler le PMV d'environ une unité (Fanger, 1970), soit potentiellement un changement de catégorie. Le logiciel doit donc recourir à une hypothèse de traitement, dont la nature doit être connue de l'utilisateur.

11.5.4 Affichage vs calcul : la valeur moyenne est trompeuse

Dans IES VE, le CLO est renseigné non par une valeur unique mais par une plage [min ; max]. Le logiciel affiche alors la moyenne arithmétique des bornes, aussi bien dans l'interface que dans les exports :

Plage CLO renseignée	CLO min	CLO max	Valeur affichée (= moyenne)
Bureau (standard)	0,5	1,0	0,75
Bureau (hiver)	0,7	1,2	0,95
Vestiaires	0,3	0,8	0,55

Cette moyenne n'est pas la valeur effectivement utilisée dans le calcul : ce n'est qu'une représentation d'interface de la plage.

11.5.5 La logique réelle : la méthode Min/Max

Selon la documentation technique d'IES VE (ApacheSim), la méthode Min/Max, comportement par défaut, procède à chaque pas de temps en résolvant le calcul complet (avec l'itération sur t_{cl} ci-dessus) pour la borne inférieure, puis pour la borne supérieure de la plage, et retient la valeur de CLO qui produit le PMV le plus proche de zéro :

$$CLO_{retenu} = CLO_{min} \text{ si } |PMV(CLO_{min})| < |PMV(CLO_{max})|, \text{ sinon } CLO_{max}$$

Cette logique simule un comportement adaptatif optimal : par temps chaud, l'occupant allège sa tenue (CLO bas) ; par temps froid, il la renforce (CLO élevé). Le moteur ne suppose donc pas un habillement figé, mais un ajustement rationnel. La valeur affichée (0,75 pour la plage 0,5–1,0) ne reflète donc pas les valeurs réellement employées à chaque heure.

11.5.6 Démonstration et conséquence pour la méthode

Des simulations comparatives confirment cette compréhension : une plage 0,5–1,0 en mode Min/Max produit systématiquement davantage d'heures en catégorie B qu'une valeur fixe de 0,75 (la moyenne affichée), car le moteur retient à chaque heure la tenue qui minimise l'écart au PMV nul. En moyenne annuelle, la méthode Min/Max produit donc un PMV plus proche de zéro qu'une valeur fixe intermédiaire, même égale à la moyenne des bornes. Tous les résultats de ce mémoire reposent sur ce mode, qui correspond au comportement par défaut du logiciel et au scénario le plus favorable aux occupants ; ils ne sont donc pas directement comparables à un scénario à CLO fixe.

Enfin, la norme ASHRAE 55-2023 introduit une correction d'isolation dynamique, intégrée automatiquement par ApacheSim lorsqu'un MET est renseigné :

$$I_{cl,dynamique} = I_{cl} \cdot (0,6 + 0,4 / MET)$$

Pour un occupant plus actif, l'isolation effective est réduite, ce qui atténue l'influence du vêtement sur le PMV et ajoute une interaction entre CLO et MET.

On comprend donc que le logiciel IES utilise soit 0,5, soit 1. Il ne va pas chercher une valeur optimale qui se situe à l'intérieure de la borne mais bien le minimum ou le maximum de la borne. Cette étape est importante pour comprendre le fonctionnement du logiciel. Et donc, d'arriver à créer les scénarios les plus optimaux pour la création du tableau final.

12 Bibliographie

- ASHRAE. (2023). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- Attia, S., Benzidane, C., Rahif, R., Amaripadath, D., Hamdy, M., Zhang, C., Dabirian, S., Tagliabue, L. C., Wang, F., Maïzia, M., Hawila, A. A.-W., Saber, E. M., Pernigotto, G., Iqbal, A., Causone, F., Carlucci, S., ... Levinson, R. (2023). Overheating calculation methods, criteria, and indicators in European regulation for residential buildings. *Energy and Buildings*, 292, 113170. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113170>
- Attia, S., Gratia, E., De Herde, A., & Hensen, J. L. M. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.028>
- Bergh, D. D., Boyd, B. K., Byron, K., Gove, S., & Ketchen, D. J. (2022). What constitutes a methodological contribution? *Journal of Management*, 48(7), 1835–1848. <https://doi.org/10.1177/01492063221088235>
- BRE Global. (2016). *BREEAM International New Construction 2016: Technical manual* (SD233). Building Research Establishment. <https://www.breeam.com/>
- BREEAM. (2019). *Hea 04 — Thermal comfort* [Base de connaissances BREEAM]. Building Research Establishment. Consulté le 30 mai 2026. <https://kb.breeam.com/section/new-construction/uk/2018/02-health-and-wellbeing-2018/hea-04-thermal-comfort-02-health-and-wellbeing-2018/>
- BREEAM. (2024). *Thermal comfort requirements for operational and storage areas* [Base de connaissances BREEAM]. Building Research Establishment. Consulté le 30 mai 2026. <https://kb.breeam.com/>
- Building Research Establishment. (n.d.). *Acceptable deviations – ISO 7730:2005 Category B*. BREEAM Knowledge Base. <https://kb.breeam.com/us/knowledgebase/acceptable-deviations-iso-77302005-category-b/>
- Camburn, B., Viswanathan, V., Linsey, J., Anderson, D., Jensen, D., Crawford, R., Otto, K., & Wood, K. (2017). Design prototyping methods: State of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, 3, e13. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.10>

- Carlucci, S., & Pagliano, L. (2012). A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy and Buildings*, 53, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.015>
- Cheung, T., Schiavon, S., Parkinson, T., Li, P., & Brager, G. (2019). Analysis of the accuracy on PMV–PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment*, 153, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>
- CIBSE. (2015). *AM11: Building performance modelling*. Chartered Institution of Building Services Engineers. <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/applications-manual-11-building-performance-modelling-2015>
- de Dear, R. J., & Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104(1), 145–167. <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
- European Committee for Standardization. (2019). *EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings — Ventilation for buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. CEN.
- European Committee for Standardization. (2019). *CEN 16798-2:2019 . Energy performance of buildings — Ventilation for buildings — Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1*. CEN.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press.
- Flyvbjerg, B. (2006). Five misunderstandings about case-study research. *Qualitative Inquiry*, 12(2), 219–245. <https://doi.org/10.1177/1077800405284363>
- Gregor, S., & Hevner, A. R. (2013). Positioning and presenting design science research for maximum impact. *MIS Quarterly*, 37(2), 337–355. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37.2.01>
- Hamdy, M., Carlucci, S., Hoes, P.-J., & Hensen, J. L. M. (2017). The impact of climate change on the overheating risk in dwellings — A Dutch case study. *Building and Environment*, 122, 307–323. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>
- Havenith, G., Kuklane, K., Fan, J., Hodder, S., Ouzzahra, Y., Lundgren Kownacki, K., Au, Y., & Loveday, D. (2015). A database of static clothing thermal insulation and vapor permeability values of non-Western ensembles for use in ASHRAE Standard 55, ISO 7730, and ISO 9920. *ASHRAE Transactions*, 121(1), 197–215. https://repository.lboro.ac.uk/articles/journal_contribution/9346430

- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Hopfe, C. J., & Hensen, J. L. M. (2011). *Uncertainty analysis in building performance simulation for design support*. *Energy and Buildings*, 43, 2798–2805
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811002830>
- Humphreys, M. A., & Nicol, J. F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34(6), 667–684.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X)
- Integrated Environmental Solutions. (2021). *Comfort analysis (VistaPro)* [Documentation IESVE 2021]. IES Ltd. https://help.iesve.com/ve2021/4__comfort_analysis.htm
- Integrated Environmental Solutions. (2021). *Comfort variables* [Documentation IESVE 2021]. IES Ltd. https://help.iesve.com/ve2021/comfort_variables.htm
- Integrated Environmental Solutions. (n.d.). *ApacheSim* [Module du logiciel IES Virtual Environment]. IES Ltd. Consulté le 30 mai 2026.
<https://www.iesve.com/software/virtual-environment/modules/apachesim>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- International Organization for Standardization. (2005). *ISO 7730:2005: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. ISO. <https://www.iso.org/standard/39155.html>
- International Organization for Standardization. (2007). *ISO 9920:2007. Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble*. <https://www.iso.org/standard/39257.html>
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing*.
<https://www.iso.org/standard/61148.html>

- International Organization for Standardization. (2021). *ISO 8996:2021. Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate*.
<https://www.iso.org/standard/74443.html>
- Organisation internationale de normalisation. (2025b). *ISO 7726:2025 — Ergonomie des ambiances thermiques — Appareils et méthodes de mesure et de surveillance des grandeurs physiques*. ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/78238.html>
- International Organization for Standardization. (2025a). *ISO 7730:2025: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. ISO. <https://www.iso.org/standard/85803.html>
- Lenzuni, P., Freda, D., & Del Gaudio, M. (2009). Classification of thermal environments for comfort assessment. *The Annals of Occupational Hygiene*, 53(4), 325–332.
<https://doi.org/10.1093/annhyg/mep012>
- March, S. T., & Smith, G. F. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, 15(4), 251–266.
[https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)00041-2](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2)
- Mendell, M. J., & Mirer, A. G. (2009). Indoor thermal factors and symptoms in office workers: Findings from the U.S. EPA BASE study. *Indoor Air*, 19(4), 291–302.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00592.x>
- Negendahl, K. (2015). Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Automation in Construction*, 54, 39–53.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.002>
- Nguyen, A.-T., & Reiter, S. (2015). A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models. *Building Simulation*, 8(6), 651–664.
<https://doi.org/10.1007/s12273-015-0245-4>
- Ochoa, C. E., & Capeluto, I. G. (2009). Advice tool for early design stages of intelligent facades based on energy and visual comfort approach. *Energy and Buildings*, 41(5), 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.015>
- Østergård, T., Jensen, R. L., & Maagaard, S. E. (2016). Building simulations supporting decision making in early design — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.045>
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>

- Porras-Salazar, J. A., Schiavon, S., Wargocki, P., Cheung, T., & Tham, K. W. (2021). Meta-analysis of 35 studies examining the effect of indoor temperature on office work performance. *Building and Environment*, 203, 108037.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108037>
- Rahif, R., Amaripadath, D., & Attia, S. (2021). Review on time-integrated overheating evaluation methods for residential buildings in temperate climates of Europe. *Energy and Buildings*, 252, 111463. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111463>
- Saltelli, A., & Annoni, P. (2010). How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1508–1517.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.012>
- Seppänen, O., Fisk, W. J., & Lei, Q. H. (2006). *Effect of temperature on task performance in office environment* (LBNL-60946) [Communication]. Cold Climate HVAC Conference, Moscou, Russie. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Tarantini, M., Pernigotto, G., & Gasparella, A. (2017). A co-citation analysis on thermal comfort and productivity aspects in production and office buildings. *Buildings*, 7(2), 36. <https://doi.org/10.3390/buildings7020036>
- Thomke, S. H. (1998). Managing experimentation in the design of new products. *Management Science*, 44(6), 743–762. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.6.743>
- van Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger’s model of thermal comfort: Comfort for all? *Indoor Air*, 18(3), 182–201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x>
- Verticchio, E., Martinelli, L., Gigliarelli, E., & Calcerano, F. (2024). Current practices and open issues on the whole-building dynamic simulation of historical buildings: A review of the literature case studies. *Building and Environment*, 258, 111621.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111621>

13 Iconographie

13.1 Figures

Figure 1 : Six Consulting. (2026, 15 avril). *Home - SIX Consulting & ; Engineering*. SIX Consulting & Engineering. <https://www.six-eng.eu/>

Figure 2 : *European summer 2025 - hot in the west and south, dry in the southeast*. (s. d.). Copernicus. <https://climate.copernicus.eu/european-summer-2025-hot-west-and-south-dry-southeast>

Figure 3 : *European summer 2025 - hot in the west and south, dry in the southeast*. (s. d.). Copernicus. <https://climate.copernicus.eu/european-summer-2025-hot-west-and-south-dry-southeast>

Figure 4 : Renaux, J. (2019). *Comment assurer le confort estival ? Formation Bâtiment Durable : Énergie : principes fondamentaux* [Présentation]. Bruxelles Environnement. https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/pres-191125-prfo-2-5-esti-fr.pdf

Figure 5 : Service public de Wallonie & Université de Liège. (2015). *Le Guide PEB : Réglementation à partir du 1er mai 2015..* <https://energie.wallonie.be/files/Fichiers%20test/le-guide-peb-2015.pdf>

Figure 6 : *Indice PMV – PPD de confort thermique* | Beswic. (2025b, janvier 12). <https://beswic.be/fr/themes/agents-physiques/ambiances-thermiques/indices-de-confort-et-de-contrainte-thermique/indice-pmv-ppd-de-confort-thermique>

Figure 7 : Création personnelle.

Figure 8 : Création personnelle.

Figure 8 : Création personnelle.

Figure 9 : Illustration venant du projet sur l'aéroport de Liège, créé par l'équipe SIX.

Figure 10 : Création personnelle.

Figure 11 : Création personnelle.

Figure 12 : Création personnelle.

Figure 13 : Création personnelle.

Figure 14 : Création personnelle.

Figure 15 : Création personnelle.

13.2 Tableaux

Tableau 1 : Création personnelle.

Tableau 2 : Martin, F. (2025, 2 juin). *Calculateur PMV et PPD pour le confort thermique (ISO 7730)*. Quadco Engineering. <https://www.quadco.engineering/fr/savoir-faire/cfd-calcul-pmv-et-ppd.htm>

Tableau 3 : Martin, F. (2025, 2 juin). *Calculateur PMV et PPD pour le confort thermique (ISO 7730)*. Quadco Engineering. <https://www.quadco.engineering/fr/savoir-faire/cfd-calcul-pmv-et-ppd.htm>

Tableau 4 : Création personnelle d'après ISO 7730:2025, EN 16798-1:2019 et ASHRAE 55-2023.

Tableau 5 : Création personnelle.

Tableau 6 : Creative, P. (2025, 17 juin). *Sustainable Portfolio Management : BREEAM In-Use | Longevity*. Longevity Partners. <https://longevity-partners.com/views/sustainable-portfolio-management-and-value-creation-with-breeam-in-use/>

Tableau 7 : Création personnelle via les données du certificat de PEB de SIX.

Tableau 8 : Création personnelle via les données du certificat de PEB de SIX.

Tableau 9 : Création personnelle.

Tableau 10 : Création personnelle.