

---

**Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Impacts de l'intégration de dispositifs HVAC low tech dans les bâtiments tertiaires. Cartographie des dispositifs low tech pour la HVAC et simulation numérique de dispositifs HVAC sur des bureaux en Belgique**

**Auteur :** Verdureau, Vivien

**Promoteur(s) :** Courard, Luc

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

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

**Année académique :** 2024-2025

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/23185>

---

*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.*

---

**Impacts de l'intégration de dispositifs HVAC low tech  
dans les bâtiments tertiaires.  
Cartographie des dispositifs low tech pour la HVAC et simulation  
numérique de dispositifs HVAC sur des bureaux en Belgique**

---

**VERDUREAU Vivien**

**Promoteur : COURARD Luc**

**Jury : MERTENS Audrey, LEROY Mathieu, LEMORT Vincent**

**Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :  
Ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie  
architecturale et urbaine**

**Année académique : 2024 – 2025**



# Remerciements

La réalisation de ce mémoire est le fruit d'un travail de plusieurs mois durant lesquels j'ai pu bénéficier de l'accompagnement, du soutien et de l'aide de nombreuses personnes auxquelles je tiens à adresser mes sincères remerciements ici.

Je remercie mon promoteur académique Luc Courard pour ses remarques toujours constructives et pertinentes qui m'ont permis d'améliorer mon approche du sujet et de comprendre la méthodologie à suivre dans un tel travail.

J'adresse la marque de ma gratitude et remercie tout particulièrement Audrey Mertens pour son soutien infaillible depuis les prémices de ce mémoire. Je la remercie pour son accompagnement pendant ce TFE, de l'émergence des premières idées de sujet jusqu'à la rédaction des dernières phrases de ce dernier.

Je tiens également à partager ma reconnaissance et mes remerciements envers Jérémy Balon et Mathieu Leroy qui m'ont suivi et aidé sur de nombreux sujets techniques et qui m'ont permis de comprendre et d'apprendre de leurs expertises sur les techniques spéciales. Merci à vous de m'avoir accueilli et d'avoir toujours trouvé le temps pour répondre à mes interrogations et pour m'accompagner.

Je voudrais aussi remercier Romain Ravenel pour son aide précieuse sur le logiciel IES-VE, il m'a permis de me former rapidement au logiciel et de m'aiguiller sur les bonnes pratiques de modélisation afin de gagner en temps et en précision. Je le remercie pour l'engagement qu'il a pris dans ce mémoire et le temps qu'il m'a consacré.

J'adresse mes remerciements à Bastien Mercenier, sans qui ce TFE n'aurait pas vu le jour, pour son accueil au sein de Greisch et son aide tout au long du mémoire. Il m'a ouvert les portes du bâtiment pour que je prenne connaissance de l'ensemble des spécificités de ce dernier et de toute la technique associée au système HVAC. Je le remercie également de m'avoir fourni toutes les données qui m'ont été nécessaires pour la bonne réalisation de l'étude de cas.

Je tiens enfin à remercier l'ensemble de l'équipe techniques spéciales de Greisch pour leur accueil. Mes remerciements s'adressent particulièrement à Christophe Hick et à Sarah Fransen pour leur aide et leur partage durant le TFE. Je remercie également Stéphane Marville pour son accueil et sa collaboration dans la mise en place du TFE entre Greisch et l'université de Liège.



# Résumé

Le secteur de la construction est un contributeur majeur aux émissions de gaz à effet de serre dans le monde en cumulant 39 % des émissions mondiales. La phase d'utilisation des bâtiments, et particulièrement les systèmes HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), représente la part la plus significative de l'impact environnemental des bâtiments sur leur cycle de vie. Pour atteindre les objectifs de décarbonation, il faut réduire considérablement la consommation d'énergie des bâtiments. Ce mémoire se penche sur l'intégration de dispositifs HVAC low tech comme moyen d'améliorer la performance énergétique des bâtiments tertiaires en Belgique.

La méthodologie comprend la réalisation d'une revue de la littérature des systèmes HVAC low tech. Par la suite, une étude de cas a été réalisée sur un bâtiment de bureaux en Belgique, plus précisément le bâtiment du bureau d'études Greisch. Un modèle numérique de ce bâtiment a été créé grâce au logiciel IES-VE. Puis, l'intégration d'un système de night-cooling a été étudiée. Les performances et les impacts du système mécanique actuel ont été simulés numériquement et comparés à ceux du système low-tech.

Les résultats de la revue de littérature ont permis de cartographier onze dispositifs et de confirmer leur adéquation avec l'approche low tech. L'étude de cas a montré que l'intégration du night-cooling dans le bâtiment étudié permettait de réaliser une économie de 20 % sur la consommation de climatisation. L'installation du night-cooling se rentabilise en 13 ans et génère des économies d'environ 62 000 € après 25 ans. L'analyse environnementale a montré que le night-cooling permet d'économiser 28 tonnes de CO<sub>2</sub>-équ. après 25 ans. Le test de robustesse a démontré que le night-cooling reste efficace face à un climat futur plus chaud.

Ce mémoire met en lumière que l'intégration de systèmes HVAC low tech peut améliorer la performance énergétique des bâtiments tertiaires, tout en permettant de réaliser des économies économiques et environnementales. Cependant, l'efficacité de ces systèmes dépend surtout des caractéristiques spécifiques de chaque bâtiment et de son contexte, ce qui complique la généralisation des résultats à une échelle large. On peut souligner que même si les dispositifs low tech aident à réduire la consommation des systèmes HVAC mécaniques, remplacer complètement ces derniers dans les bâtiments existants nécessite une conception architecturale sur mesure dès la conception.

# Abstract

The construction sector is a major contributor to greenhouse gas emissions worldwide, accounting for 39% of global emissions. The use phase of buildings, and particularly HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems, represents the most significant part of the environmental impact of buildings over their lifecycle. To meet decarbonization targets, the energy consumption of buildings needs to be significantly reduced. This master thesis examines the integration of low-tech HVAC systems as a means of improving the energy performance of tertiary buildings in Belgium.

The methodology included a literature review to map low-tech HVAC systems. This was followed by a case study of an office building in Belgium, specifically the Greisch office building. A digital model of the building was created using IES-VE software. Then, the integration of a night-cooling system was studied. The performance and impact of the existing mechanical system were numerically simulated and compared with those of the low-tech system.

The results of the literature review were used to map eleven devices and confirm their suitability for the low-tech approach. The case study showed that the integration of night-cooling in the building studied resulted in a 20% saving on cooling consumption. The installation of night-cooling pays for itself in 13 years, generating savings of around €62,000 after 25 years. The environmental analysis showed that night-cooling saves 28 tons of CO<sub>2</sub>-eq. after 25 years. The robustness test demonstrated that night-cooling remains effective in a warmer future climate.

This master thesis highlights the fact that the integration of low-tech HVAC systems can improve the energy performance of commercial buildings, while at the same time generating economic and environmental savings. However, the effectiveness of these systems depends above all on the specific characteristics of each building and its context, making it difficult to generalize the results on a large scale. It should be emphasized that even if low-tech devices help to reduce the consumption of mechanical HVAC systems, completely replacing the latter in existing buildings requires customized architectural design from the outset.

# Table des matières

1. Introduction.....	12
1.1. Contexte actuel du secteur de la construction .....	12
1.2. Objectifs à atteindre .....	13
1.3. Apport de ce TFE .....	15
1.3.1. Objectifs du TFE .....	15
1.3.2. Question de recherche abordée.....	15
1.3.3. Rôles de l'ULiège et de Greisch .....	15
2. État de l'art.....	17
2.1. Problématique et contexte .....	17
2.1.1. Bâtiments résidentiels et tertiaires.....	17
2.1.2. Phases de vie d'un bâtiment .....	17
2.1.3. Techniques spéciales et HVAC .....	19
2.1.4. Contexte normatif sur la HVAC.....	21
2.2. Concepts .....	27
2.2.1. Analyse du cycle de vie.....	27
2.2.2. Simulation des performances des bâtiments .....	29
2.2.3. Low tech.....	32
2.2.4. Performance et robustesse .....	36
2.2.5. Ventilation naturelle .....	37
3. Méthodologies.....	47
3.1. Cartographie des dispositifs HVAC low tech .....	48
3.1.1. Méthodologie de sélection des articles scientifiques .....	48
3.1.2. Attribution d'une note low tech .....	50
3.2. Étude de cas d'un bâtiment .....	52
3.2.1. Calibration, validation et vérification d'un modèle numérique .....	52
3.2.2. Choix des dispositifs HVAC low tech étudiés .....	57
3.2.3. Comparaison des systèmes HVAC .....	58
4. Cartographie des dispositifs HVAC low tech .....	62
4.1. Rôles des dispositifs .....	75
4.2. Stratégies utilisées par les dispositifs .....	75
4.3. Notes low tech des dispositifs .....	76
4.4. Cartographie des dispositifs .....	77
5. Présentation de l'objet de l'étude de cas.....	78
5.1. Localisation et climat .....	79
5.2. Géométrie du bâtiment .....	81
5.3. Enveloppe du bâtiment.....	83

5.4.	Gains internes .....	85
6.	Résultats de l'étude de cas .....	90
6.1.	Modèle avec un système HVAC mécanique : système A .....	90
6.1.1.	Description du système A .....	90
6.1.2.	Vérification du modèle .....	92
6.2.	Modèle avec ajout d'un dispositif HVAC low tech : système B .....	93
6.2.1.	Choix du dispositif .....	93
6.2.2.	Hypothèse d'intégration du dispositif low tech dans le bâtiment .....	96
6.3.	Comparaison des systèmes HVAC .....	103
6.3.1.	Consommations liées au chauffage et à la climatisation.....	103
6.3.2.	Puissance maximale du groupe froid .....	104
6.3.3.	Différences de températures intérieures .....	104
6.4.	Projections à l'horizon 2050 .....	109
6.4.1.	Consommations liées au chauffage et à la climatisation.....	109
6.4.2.	Puissance maximale du groupe froid .....	110
6.4.3.	Différences de températures intérieures .....	110
6.5.	Comparaison des impacts des systèmes .....	112
6.5.1.	Impact environnemental .....	112
6.5.2.	Impact économique .....	114
7.	Discussions .....	117
7.1.	Faisabilité de systèmes HVAC zéro énergie .....	117
7.2.	Contexte normatif.....	118
7.3.	Performance énergétique liée à l'intégration de dispositifs HVAC low tech .....	119
7.4.	Impacts économiques et environnementaux.....	120
7.5.	Concordance entre la revue de littérature et l'étude de cas.....	121
7.6.	Conception du bâtiment des bureaux de Greisch .....	122
8.	Limites et perspectives.....	123
8.1.	Complexité de généralisation dans le cas de la HVAC.....	123
8.2.	Exhaustivité des dispositifs étudiés.....	123
8.3.	Hypothèses posées dans la modélisation.....	124
8.4.	Fiabilité de la simulation numérique .....	124
8.5.	Intégration architecturale de dispositifs low tech.....	125
8.6.	Notion de confort .....	126
9.	Conclusion .....	127
	Bibliographie.....	i
	Webographie .....	ix
	Normes et standards .....	xi

## Liste des figures

Figure 1 : Lien entre le GWP des phases de construction et d'utilisation et le type de conception (Schlegl et al., 2019, p.343) .....	18
Figure 2 : Expression du calcul de la condition de pression selon l'annexe C3 de la PEB (Gouvernement Wallon, 2014, p.6).....	23
Figure 3 : Les étapes du cycle de vie définies par la norme NBN EN 15978 (INIES, 2023)..	28
Figure 4 : Liste des 18 indicateurs environnementaux étudiés dans la méthode MMG (Mouton, Allacker, et al., 2023, p.9) .....	29
Figure 5 : Évolution du nombre de publications sur Scopus de 2000 à 2024 avec la recherche TITLE-ABS-KEY ( "building performance simulation" ) (Scopus).....	30
Figure 6 : Frise chronologique des dates de sortie de logiciels de simulation de bâtiment (production personnelle) .....	30
Figure 7 : Comportements des modèles white box, grey box et black box (Amara et al., 2015, p.97).....	32
Figure 8 : Illustration d'une définition d'un système low tech (Donadio & Deville, 2023) .....	33
Figure 9 : Illustration d'une définition d'une démarche low tech (Keller & Bournigal, 2022)	34
Figure 10 : Représentation schématique des effets des tirages thermique et éolien (XPair, 2023) .....	38
Figure 11 : Effet du vent sur un bâtiment en coupe et en plan (Bai, 2021, p.9).....	39
Figure 12 : Le gradient de pression et les schémas de flux d'air des tirages combinés : (a) tirage thermique seul et (b) tirages éolien et thermique combinés (Mao et al., 2015, p.544).....	41
Figure 13 : Le gradient de pression et les schémas de flux d'air des tirages combinés : (a) tirages éolien et thermique de même intensité et (b) tirage éolien plus fort que tirage thermique (Zhang et al., 2021, p.8).....	41
Figure 14 : Panel de systèmes pour les bâtiments d'un niveau ou niveau haut (Envirobat Grand Est, 2022) .....	42
Figure 15 : Panel de systèmes pour les bâtiments au niveau bas ou intermédiaire (Envirobat Grand Est, 2022) .....	43
Figure 16 : Coût global, selon le mode de ventilation, sur une période de 30 ans (Hauglustaine & Simon, 2018, p.47) .....	46
Figure 17 : Processus de notation d'un dispositif low tech, (production personnelle) .....	51
Figure 18 : Géométrie du Bestest Case 600 (Integrated Environmental Solutions, 2010, p.5)	55
Figure 19 : Explication des scénarios climatiques du GIEC (Calvin et al., 2023, p.10).....	59
Figure 20 : Rôles des différents dispositifs étudiés (production personnelle) .....	75
Figure 21 : Stratégies de ventilation représentées dans la revue de littérature (production personnelle) .....	75
Figure 22 : Notes low tech des dispositifs étudiés (production personnelle).....	76
Figure 23 : Notes low tech détaillées pour chaque dispositif (production personnelle) .....	76
Figure 24 : Cartographie des dispositifs low tech de HVAC étudiés (production personnelle) .....	77
Figure 25 : Vue satellite de 2023 du bâtiment (WalOnMap).....	79
Figure 26: Vue en drone du bâtiment de 2008 avant l'installation des panneaux photovoltaïques (photo-daylight.com).....	80
Figure 27 : Vue de IES-VE du contexte autour du bâtiment (production personnelle) .....	81
Figure 28 : Plans du R-1 (à gauche) et du RDC (à droite) du bâtiment (Greisch).....	81
Figure 29 : Coupes du bâtiment (Greisch) .....	82

Figure 30 : Maquette simplifiée du bâtiment dans SketchUp avant export vers IES-VE (production personnelle) .....	82
Figure 31 : Vue de IES-VE du bâtiment dans son contexte (production personnelle) .....	83
Figure 32 : Tableau B.3 de la norme NBN EN ISO 8996, 2004.....	87
Figure 33 : Synthèse du fonctionnement de la HVAC dans le bâtiment (production personnelle) .....	91
Figure 34 : Tableau des différentes spécificités de chaque groupe pour la ventilation, le chauffage et la climatisation (production personnelle) .....	91
Figure 35 : Système HVAC modélisé dans le module Apache HVAC .....	92
Figure 36 : Bruit des axes routiers (WalOnMap, 2012).....	93
Figure 37 : Statistiques mensuelles de la direction et la force du vent (Windfinder.com, s. d.) .....	94
Figure 38 : Répartition mensuelle de la direction et de la force du vent (Windfinder.com, s. d.) .....	94
Figure 39 : Processus de sélection des dispositifs HVAC low tech.....	96
Figure 40 : Zones de night-cooling au R-1 avec les entrées d'air aménageables .....	98
Figure 41 : Zones de night-cooling au RDC avec les entrées d'air aménageables.....	99
Figure 42 : Zones de night-cooling en coupe avec les entrées et les sorties d'air.....	99
Figure 43 : Calcul de la surface disponible d'un ouvrant (Greisch) .....	100
Figure 44 : Calculs des surfaces disponibles en entrée et en sortie pour les scénarios 1 (à gauche) et 2 (à droite) .....	101
Figure 45 : Comparaison des consommations en climatisation avec et sans night-cooling ..	104
Figure 46 : Localisation du local choisi par zone étudiée .....	105
Figure 47 : Évolution des températures extérieures et intérieures dans la zone 2.....	106
Figure 48 : Évolution des températures extérieures et intérieures dans la zone 3.....	106
Figure 49 : Élévation de la façade Sud (Greisch).....	107
Figure 50 : Gains et climatisation d'une salle de réunion sur une journée d'été.....	107
Figure 51 : Évolution des températures extérieures et intérieures dans la zone 5.....	108
Figure 52 : Évolution des températures extérieures et intérieures dans la zone 9.....	108
Figure 53 : Evolution des températures extérieures et intérieures dans les zones étudiées en 2050 pour quatre zones NC : night-cooling, SNC : sans night-cooling.....	111
Figure 54 : Économies (kgCO <sub>2</sub> -équ) réalisées grâce à l'intégration du night-cooling .....	114
Figure 55 : Économies (€) réalisées grâce à l'intégration du night-cooling.....	116
Figure 56 : Synthèse des logiciels et outils utilisés selon la tâche effectuée dans la revue de littérature effectuée par Vera-Piazzini & Scarpa (2024, p. 9).....	125

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs minimales à appliquer pour le calcul du débit de ventilation selon le tableau 1 de l'annexe C3 de la PEB .....	22
Tableau 2 : Synthèse des tableaux B.9 et B.10 de la norme NBN EN 16798-1 .....	23
Tableau 3 : Synthèse des tableaux B.2 et B.5 de la norme NBN EN 16798-1 .....	24
Tableau 4 : Synthèse du contexte normatif sur la HVAC en Wallonie.....	25
Tableau 5 : Classification des 51 critères en 8 catégories permettant de décrire le concept low-tech (Martin et al., 2022, p.148).....	34
Tableau 6 : Relevés des mentions de chaque dispositif dans les références de Zhang et al. (2021) .....	49
Tableau 7 : Description des tests proposés par Judkoff et al. pour la vérification analytique (Judkoff et al., 2008, p.59) .....	55
Tableau 8 : Détail des compositions de parois pour le BESTEST Case 600 (Struck et al., 2009, p.11).....	56
Tableau 9 : Caractéristiques des vitrages pour le BESTEST Case 600 (Integrated Environmental Solutions, 2010, p.7) .....	56
Tableau 10 : Restitution des données récoltées lors de la revue de littérature sur onze dispositifs low tech de HVAC .....	63
Tableau 11 : Caractéristiques thermiques des éléments du bâtiment (production personnelle) .....	84
Tableau 12 : Caractéristiques thermiques des vitrages du bâtiment (production personnelle) .....	85
Tableau 13 : Attribution des différents locaux dans les 10 zones .....	86
Tableau 14 : Résultats des valeurs d'occupation par zone (production personnelle) .....	88
Tableau 15 : Puissance de différents équipements (production personnelle) .....	88
Tableau 16 : Résultats des puissances des équipements par zone (production personnelle) ...	89
Tableau 17 : Résultats de la vérification du modèle selon le BESTEST Case 600 .....	92
Tableau 18 : Points forts et points d'attention des locaux à potentiel de dispositif HVAC low tech .....	94
Tableau 19 : Dimensionnement du night-cooling pour les deux scénarios.....	100
Tableau 20 : Consommations liées au chauffage et à la climatisation sur une année à l'échelle du bâtiment.....	103
Tableau 21 : Synthèse des économies annuelles liées à l'intégration du night-cooling .....	103
Tableau 22 : Puissance maximale délivrée par le groupe froid.....	104
Tableau 23 : Consommations liées au chauffage et à la climatisation sur une année à l'échelle du bâtiment dans le RCP 8.5 2050 .....	109
Tableau 24 : Synthèse des économies annuelles liées à l'intégration du night-cooling selon le RCP 8.5 2050 .....	110
Tableau 25 : Puissance maximale délivrée par le groupe froid selon le RCP 8.5 2050.....	110
Tableau 26 : GWP de trois châssis à ouvrants motorisés.....	112
Tableau 27 : Synthèse des châssis à installer pour l'intégration du night-cooling .....	112
Tableau 28 : Économies (kgCO <sub>2</sub> -équ) réalisées grâce à l'intégration du night-cooling .....	113
Tableau 29 : Économies (€) réalisées grâce à l'intégration du night-cooling.....	115
Tableau 30 : Caractéristiques des différentes études sur le night-cooling et leur résultat .....	121
Tableau 31 : Synthèse de l'atteinte des objectifs du TFE .....	127





# 1. Introduction

## 1.1. Contexte actuel du secteur de la construction

Les derniers rapports scientifiques affirment que la planète fait face à un dérèglement climatique important causé par les activités humaines (Calvin et al., 2023). Ce dérèglement s'accroît année après année et de plus en plus de catastrophes naturelles peuvent être observées aux quatre coins du monde (Calvin et al., 2023). En cause, un mode de vie trop gourmand en ressources et trop polluant des pays à hauts revenus qui, conjugué à une mondialisation croissante, provoque une surconsommation des ressources disponibles (Calvin et al., 2023). Le *European Topic Centre on Biodiversity and Ecosystems* mentionne, dans son rapport de 2024 sur les facteurs sociétaux permettant d'enrayer et d'inverser la perte et la modification de la biodiversité, que les pays à hauts revenus détenaient en 2010 74 % du PIB (Produit Intérieur Brut) mondial alors qu'ils représentaient 18 % de la population globale (Galli et al., 2024). Ces pays ont dominé la période de la grande accélération qui fut une période de croissance sans précédent de la population, de la production économique et de l'utilisation des ressources à partir du milieu du XX<sup>e</sup> siècle (Galli et al., 2024). À titre d'exemple, l'empreinte écologique par habitant d'un Belge est de 7,2 hag (hectare global) : c'est-à-dire que la Terre devrait être 7,2 fois plus grande que ce qu'elle est pour produire autant que ce qu'un habitant belge consomme. Ce score est de 3,5 hag pour un Chinois et de 7,8 hag pour un Américain (*Open Data Platform*, s. d.).

De plus, il s'avère que la consommation de l'humanité en ressources ne cesse d'augmenter. En effet, le Jour du Dépassement de la Terre, soit la date à laquelle toutes les ressources générées par la planète en un an ont été consommées, était le 25 décembre en 1971, et a été atteint le 1<sup>er</sup> août en 2024 (*Progression du Jour du Dépassement de la Terre au fil des années - Earth Overshoot Day*, s. d.).

Il semble donc nécessaire de se mobiliser pour relever ce défi environnemental et de tenter d'apporter des solutions pour endiguer ce phénomène, ou du moins le ralentir.

La responsabilité du secteur de la construction dans le dérèglement climatique a été démontrée par de nombreuses instances. Le rapport pour les bâtiments et la construction élaboré par le GlobalABC (Global Alliance for Buildings and Construction) en 2023 affirme que le domaine de la construction est la cause de 36 % de l'énergie utilisée mondialement et de 39 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) (United Nations Environment Program, 2024).

Cela représente 9,7 gigatonnes de CO<sub>2</sub> relâchées dans l'atmosphère et 125 exajoules d'énergie consommée en un an. La consommation d'énergie et l'émission de GES sont en augmentation, ceci s'explique notamment par la construction de nouveaux bâtiments chaque année (augmentation de 23 % de la surface construite entre 2010 et 2018 et de 7 % de l'émission de GES sur la même période) (United Nations Environment Program, 2019).

### 1.2. Objectifs à atteindre

On observe la mise en place de politiques pour le climat à différentes échelles. À l'échelle mondiale, les accords de Paris ratifiés par 196 pays le 12 décembre 2015 ont pour objectif de limiter la hausse de température à 1,5°C avant la fin du siècle (UNFCCC, 2015).

La décarbonation et la transition écologique du secteur du bâtiment sont donc de plus en plus au centre de la table, avec par exemple à l'échelle européenne la mise en place du pacte vert pour l'Europe approuvé en 2020 qui vise une réduction d'au moins 50 % des émissions de GES de l'Union européenne d'ici 2030 (Commission Européenne, 2019). On peut également citer la directive européenne EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) qui fixe pour objectifs de n'émettre aucune émission pour les bâtiments neufs d'ici 2030 et de ne plus recourir aux chaudières à combustibles fossiles d'ici 2040 (Parlement Européen, 2024).

À l'échelle nationale, les pays peuvent mettre en place des réglementations pour s'aligner avec les objectifs globaux. Pour rappel, les gouvernements signataires des accords de Paris sont censés renforcer leurs engagements pour le climat tous les cinq ans à travers leurs NDCs (Nationally Determined Contributions), soit l'ensemble des normes, lois et règlements. Le GlobalABC recense, en 2023, 81 codes de construction pour les bâtiments résidentiels et 77 pour les bâtiments tertiaires, dont 80 % sont obligatoirement à respecter pour obtenir un permis de construire (United Nations Environment Program, 2024).

Parallèlement, la recherche sur l'efficacité énergétique des bâtiments et le développement de nouvelles solutions pour atteindre des objectifs de sobriété énergétique s'accélèrent (Mouton, Trigaux, et al., 2023). En effet, les grands acteurs de la construction orientent leurs actions et leurs recherches dans le but de mieux respecter l'environnement. Cette évolution peut être interprétée comme le résultat des mécanismes de valorisation institutionnelle des projets intégrant des critères environnementaux, à travers la mise en place de certifications et labels écologiques (tels que BREEAM, HQE, etc.) ainsi que par l'instauration de dispositifs incitatifs tels que les bonus écologiques. Il n'empêche que la fin en vaut les moyens et que de plus en plus d'entreprises changent leurs manières de construire pour entamer leur transition écologique (Lepretre, 2022).

L'UNEP (United Nations Environment Program) constate néanmoins que les progrès de décarbonation ne sont pas suffisants pour s'aligner avec le scénario de zéro émission nette (NZE). Nous sommes en retard par rapport à ce qui avait été fixé pour respecter les accords de Paris en 2015. Il faut maintenant atteindre une réduction de 10 % d'émissions de CO<sub>2</sub> par an jusqu'à 2030 pour redresser le cap et revenir dans ce scénario. L'énergie consommée doit également être réduite annuellement pour atteindre 96 kWh/m<sup>2</sup> en 2030 (United Nations Environment Program, 2024). Nous étions à une consommation de 145,3 kWh/m<sup>2</sup> en 2022, 15 % au-dessus de la cible à atteindre à cette date. L'utilisation d'énergie renouvelable dans le secteur du bâtiment était en 2022 de 6 %, cette proportion doit augmenter à 18 % en 2030 (United Nations Environment Program, 2024).

La dépollution du secteur de la construction est un enjeu à la fois technique et sociétal. Les moyens pour y parvenir sont multiples et doivent être mobilisés simultanément pour respecter les engagements fixés, malgré le retard accumulé.

L'UNEP recommande de se concentrer sur cinq grandes directions (United Nations Environment Program, 2024, pages xiv à xvi) :

1. **L'amélioration de la productivité** du secteur de la construction grâce à des innovations dans les business models des rénovations et des bâtiments passifs. La standardisation des meilleures pratiques ainsi que la digitalisation des chantiers doivent permettre une meilleure productivité. Le Passive House Institute définit un bâtiment passif comme un bâtiment respectant des conditions sur sa consommation d'énergie pour le chauffage et le rafraîchissement, son utilisation d'énergies renouvelables, son étanchéité à l'air et son confort thermique (Passive House Institute, 2023). Ce sont des bâtiments qui allient confort thermique et consommation d'énergie minimale (Passive House Institute, 2023).
2. **Le développement de solutions biosourcées et de designs biophiliques** afin de respecter les écosystèmes, améliorer la qualité de l'air et de l'eau et réduire les îlots de chaleur urbains.
3. **La mise en place d'outils et de guides** pour aider les gouvernements à élaborer des feuilles de route pour l'action climatique dans le domaine de la construction et des bâtiments.
4. **La promotion de solutions durables et de technologies propres, abordables et accessibles** partout dans le monde par l'intermédiaire de l'initiative du Buildings Breakthrough. Cette initiative a été lancée lors de la COP28 en 2023 et est menée par les gouvernements français et marocains (GlobalABC, s. d.). L'objectif est encore une fois d'avoir des bâtiments passifs et résilients d'ici 2030.
5. **Le changement des méthodes de construction** vers des méthodes plus résilientes et adaptatives. Le dérèglement climatique provoque des phénomènes naturels extrêmes (sécheresses, inondations, canicules, tempêtes, etc.) auxquels les constructions doivent faire face. Il faut donc révolutionner les méthodes constructives pour que les bâtiments de demain soient toujours habitables. De nombreux bâtiments actuels sont propices à des surchauffes et/ou consomment énormément d'énergie pour maintenir des températures confortables. Il faut introduire des solutions plus durables et passives pour réduire les coûts économiques et environnementaux de ces bâtiments.

C'est dans ce contexte à forts enjeux que ce mémoire s'inscrit afin d'étudier plus en détail cette dernière recommandation de l'UNEP qu'est le changement des méthodes de construction. Le mémoire vise à explorer quelle(s) voie(s) emprunter pour aboutir à des bâtiments habitables qui utilisent le moins d'énergie possible.

### 1.3. Apport de ce TFE

#### 1.3.1. Objectifs du TFE

Ce mémoire vise à proposer une manière différente d'aborder le sujet de la performance énergétique des bâtiments. Les objectifs détaillés dans cette partie reflètent les différentes étapes réalisées pour déterminer si des dispositifs *low tech* liés aux techniques spéciales de HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) ou CVC (Chauffage Ventilation Climatisation) peuvent mener à une meilleure performance énergétique.

Les objectifs du mémoire sont les suivants :

- Définir les concepts relatifs à la low tech dans le bâtiment
- Etablir une cartographie de dispositifs low tech en HVAC
- Créer un modèle numérique inspiré d'un cas réel
- Concevoir un(plusieurs) dispositif(s) HVAC low tech
- Modéliser numériquement un(des) dispositif(s) HVAC low tech
- Comparer les impacts du système HVAC inspiré du cas réel et du dispositif HVAC low tech conçu
- Montrer l'efficacité ou non d'une telle démarche (économiquement, environnementalement)

#### 1.3.2. Question de recherche abordée

Les enjeux soulevés dans ce mémoire invitent à se pencher sur la question de la conception des techniques spéciales des bâtiments tertiaires dans le contexte belge (climat et réglementations spécifiques). Le mémoire propose d'étudier les systèmes HVAC de ces bâtiments et les options qui s'offrent aux concepteurs, avec un accent porté sur des dispositifs *low tech*. La question de recherche qui guidera l'ensemble de ce TFE est la suivante :

L'intégration de dispositifs HVAC low-tech dans les bâtiments tertiaires en Belgique permet-elle d'atteindre une meilleure performance énergétique et quels sont les impacts économiques et environnementaux qui en découlent ?

#### 1.3.3. Rôles de l'ULiège et de Greisch

Ce travail de fin d'études repose sur une collaboration entre l'Université de Liège (ULiège) et le bureau d'études Greisch, chacun jouant un rôle complémentaire dans le cadre du mémoire.

L'Université de Liège, à travers son encadrement académique et ses ressources scientifiques, intervient principalement sur les aspects méthodologiques et théoriques du mémoire (état de l'art, méthodologie, revue de littérature, construction et structure du TFE). Elle permet d'avoir accès aux ressources universitaires (bibliothèque, articles scientifiques, publications spécialisées) et de vérifier la rigueur scientifique du TFE vis-à-vis de la méthodologie adoptée.

Le bureau d'études Greisch, en tant que partenaire professionnel, apporte une contribution concrète et appliquée au projet. Son implication permet d'ancrer le TFE dans la réalité du terrain. Le bureau d'études met notamment à disposition l'ensemble des données techniques nécessaires à l'étude de cas réalisée dans ce mémoire (plans, informations techniques sur les systèmes installés, données de consommation énergétique, conditions d'occupation, etc.). Greisch met également à disposition l'ensemble de l'expertise de ses équipes ainsi que certains de ses outils de travail (logiciel de simulation énergétique IES-VE, données sur les prix, etc.). Enfin, il permet de valider la faisabilité technique et normative des propositions abordées par la suite.

## 2. État de l'art

Afin de comprendre pourquoi ce mémoire aborde ce sujet, un état de l'art récapitulant la problématique et le contexte liés au sujet, ainsi que les principaux concepts abordés est réalisé. Cette partie permet d'établir le socle de la littérature scientifique sur lequel se base la suite du TFE.

### 2.1. Problématique et contexte

#### 2.1.1. Bâtiments résidentiels et tertiaires

Les bâtiments occupent différentes fonctions selon leur type. On distingue les bâtiments résidentiels et les bâtiments non résidentiels parce qu'ils ne fonctionnent pas de la même manière, ne sont pas conçus selon les mêmes normes et n'ont pas les mêmes impacts environnementaux. Les recherches de Ramon (2021) rappellent que les bâtiments non résidentiels en Europe sont 40 % plus énergivores que les bâtiments résidentiels. De plus, ils représentent 25 % de la surface construite en Europe selon un rapport de la BPIE (Buildings Performance Institute Europe) (BPIE, 2011).

De plus, Ramon (2021) démontre que les bâtiments de bureaux sont plus susceptibles de surchauffe pendant les périodes de forte chaleur, notamment à cause de gains internes plus importants par rapport aux autres bâtiments pendant ces périodes. Les bureaux sont aussi plus vitrés que la moyenne, ce qui augmente les gains solaires dans le bâtiment et favorise cette prédisposition à la surchauffe. Ramon (2021) souligne que la surchauffe entraîne une baisse de productivité des employés, causant donc de l'inconfort, une surconsommation énergétique et une perte de rentabilité. L'enjeu n'est donc pas seulement environnemental, mais également économique et social. En effet, le facteur humain n'est pas à négliger dans les bâtiments. De Simone & Fajilla (2019) indiquent que le comportement des utilisateurs est un facteur déterminant de l'impact environnemental d'un bâtiment. Les comportements des occupants d'un bureau sont l'une des principales causes de sa sous-performance énergétique (De Simone & Fajilla, 2019). Donadio & Deville (2023) insistent sur le fait que ce sont les usagers qui doivent être le moteur du changement d'utilisation du bâtiment, dans le cas résidentiel comme le cas tertiaire.

Il est donc pertinent de s'intéresser aux bâtiments tertiaires, surtout les bureaux, pour comprendre comment ils fonctionnent et trouver des moyens de réduire leur impact sur l'environnement tout en garantissant le confort des employés.

#### 2.1.2. Phases de vie d'un bâtiment

Les techniques spéciales sont les organes d'un bâtiment, elles le rendent utilisable et surtout confortable. Leurs impacts se manifestent pendant la durée d'utilisation du bâtiment, soit la plus longue période de sa vie.

Une revue de la littérature nous permet de comprendre quelles phases de la vie d'un bâtiment sont les plus impactantes.

Rucińska et al. (2020) ont réalisé une analyse du cycle de vie (ACV) de onze bâtiments de bureaux en Pologne et démontrent que l'énergie liée à l'utilisation (phase B6) représente 79 à 93 % du GWP (Global Warming Potential) total. Une étude sur la consommation énergétique des bâtiments résidentiels chinois révèle que la phase d'utilisation représente 75 à 87 % de l'énergie totale consommée par le bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie (50 ans) (Chang et al., 2013). Cette part diminue fortement mais reste significative dans deux bâtiments de bureaux passifs étudiés par Mouton, Trigaux, et al. (2023), elle représente 23 à 39 % du GWP sur l'ensemble du cycle de vie (Mouton, Trigaux, et al., 2023).

Ces études et d'autres encore (Ramesh et al., 2010, Azari, 2014, Saade et al., 2020, Rabani et al., 2021) indiquent que la phase d'utilisation du bâtiment est la plus impactante. Cela s'explique à la fois par la durée importante de cette phase, qui représente la plus grande partie de la vie du bâtiment, et par une conception souvent peu optimisée en termes de performance énergétique.

Grâce à la méthode normalisée de l'ACV, le rôle des techniques spéciales dans la décarbonation des bâtiments peut être mis en avant (Rabani et al., 2021). Ceci indique que la remise en question de certains principes ancrés dans les conceptions de bâtiments de bureaux peut avoir un potentiel à étudier.

Schlegl et al. (2019) proposent également d'investir plus dans la construction des bâtiments pour réduire drastiquement le coût environnemental de leur utilisation. Ceci permettrait de diviser le GWP final par deux (Figure 1).

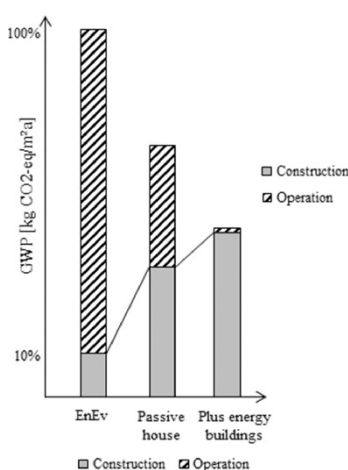


Figure 1 : Lien entre le GWP des phases de construction et d'utilisation et le type de conception (Schlegl et al., 2019, p.343)

### 2.1.3. Techniques spéciales et HVAC

#### 2.1.3.1. Contexte historique

La HVAC est un sujet incontournable dans la conception d'un bâtiment. La question au cœur du sujet de ce mémoire est la confrontation entre les deux points de vue suivants : d'une part le choix de techniciser les bâtiments et d'utiliser l'innovation technologique pour les optimiser dans une logique technocentriste, d'autre part la promotion de la frugalité qui remet en cause une logique de croissance économique et technicienne et invite à trouver des systèmes à basse technologie pour décarboner les bâtiments (Neuwels, 2023).

Un bâtiment a pour objectif d'être confortable. La notion de confort a évolué au fil des années avec l'évolution des bâtiments et des sociétés. Au XV<sup>e</sup> siècle, les châteaux étaient construits avec des cheminées à foyer ouvert dans chaque pièce pour apporter de la chaleur au détriment de la qualité de l'air, les baies étaient petites et la ventilation exclusivement naturelle par tirage de la cheminée (Envirobat Grand Est, 2022). Par la suite, les immeubles haussmanniens étaient conçus sans isolation et avec du simple vitrage, on trouvait encore des cheminées à foyer ouvert dans les pièces de vie. La ventilation se faisait par tirage de la cheminée et l'humidité était régulée par la condensation sur le simple vitrage (Envirobat Grand Est, 2022). C'est avec l'apparition du chauffage central à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que le problème de la pollution de l'air intérieur se résout, cependant, les cheminées sont rebouchées et la ventilation en est altérée (Envirobat Grand Est, 2022). En effet, dans les pays occidentaux, le sujet de la qualité de l'air dans les bâtiments a pris de l'importance à partir du XIX<sup>e</sup> siècle, avec notamment le développement du courant de l'hygiénisme (Neuwels, 2023).

Le moment de bascule est l'invention de l'air conditionné par Willis Carrier en 1902, la première appellation de cette technologie était « Man made weather » (une traduction possible serait « Climat créé par l'Homme ») et qui donnera par la suite « Air Conditioning » (« air conditionné ») (PCA-STREAM, 2024). C'est ensuite Le Corbusier qui publie en 1932 un texte intitulé « La respiration exacte ». Il expose ce concept pour renouveler l'air dans l'architecture nouvelle contre l'air pollué de la ville et de ses industries (PCA-STREAM, 2024).

Emmanuel Doutriaux définit la respiration exacte comme ceci : « La respiration exacte, c'est faire en sorte que l'appareil technique, la machine à air de l'immeuble dans son entier puisse satisfaire de manière parfaite les conditions de respirabilité de ses habitants usagers sans qu'ils n'aient eux-mêmes à agir ou interagir sur leur rapport à l'environnement extérieur. C'est donc une façade réputée protectrice et complètement hermétique et c'est la possibilité [...] de générer une prise en charge commandée par un agent central de l'ensemble de ce système respiratoire de l'immeuble. » (PCA-STREAM, 2024, timecode 14'49").

Puis dans le courant du XX<sup>e</sup> siècle, l'isolation thermique et le double vitrage vont améliorer l'étanchéité à l'air des bâtiments et amener la mise en place de ventilation mécaniquement contrôlée (VMC) pour pallier ces innovations et conserver la qualité de l'air. Depuis, de nombreuses améliorations ont vu le jour et les systèmes de ventilation sont de plus en plus performants (Envirobat Grand Est, 2022). En effet, depuis deux décennies, les systèmes de ventilation mécanique connaissent un essor fulgurant et sont devenus la réponse quasiment



systématique des concepteurs pour répondre aux nouvelles exigences des bâtiments à haute performance énergétique : étanchéité à l'air, qualité de l'air maîtrisée, débits entrants et sortants contrôlés, température intérieure fixée, récupération de chaleur, etc (Neuwels, 2023). De plus, les politiques de performance énergétique des bâtiments poussent à leur technicisation (Neuwels, 2023).

### *2.1.3.2. Situation actuelle*

Les installations HVAC sont consommatrices en énergie dans les bâtiments, aussi bien résidentiels que non résidentiels. Les systèmes HVAC permettent le chauffage, la ventilation et le rafraîchissement du bâtiment ; ils assurent le confort thermique et la bonne qualité de l'air. Ces installations ont un impact environnemental non négligeable car le chauffage et la climatisation des bâtiments sont l'une des plus grosses sources d'émissions de GES en Europe selon le dernier rapport de la BPIE « EU Buildings Climate Tracker » (BPIE, 2024).

Hoxha et al. (2021) ont calculé l'influence des différents équipements techniques et électriques des bâtiments et concluent que 38 % du GWP total est lié aux techniques spéciales, dont la moitié est liée à la HVAC.

Dans les bureaux, la HVAC est responsable d'un peu moins de 50 % de l'énergie utilisée par l'ensemble des techniques spéciales tandis que l'éclairage représente une vingtaine de pourcents (Pérez-Lombard et al., 2008). Rabani et al. (2021) étudient deux systèmes d'HVAC différents dans un bâtiment de bureaux en Norvège. L'étude montre que la part de l'énergie consommée pendant l'utilisation peut baisser de 77 % à 43-46 % de l'ensemble des émissions en CO<sub>2</sub>-équ du bâtiment selon le scénario choisi. L'analyse du cycle de vie du bâtiment existant montre que le système HVAC possède une énergie grise importante, l'énergie grise liée à la maintenance et au renouvellement est similaire à celle liée à la production et l'installation des systèmes. Il s'agit ici d'un chauffe-eau électrique, de radiateurs et d'une VMC à débits constants (CAV).

Rabani et al. (2021) évoquent également d'autres articles qui démontrent le poids environnemental de la HVAC dans les bâtiments :

García-Sanz-Calcedo et al. (2021) ont quantifié l'énergie grise des systèmes HVAC installés dans les centres de soins de la région d'Estrémadure, en Espagne. Les résultats ont montré que l'émission grise, si l'on considère une durée de vie de 15 ans des installations HVAC, est d'environ 48,95 kg CO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup>. Ylmén et al., (2019) ont étudié les émissions grises et opérationnelles des systèmes HVAC dans un immeuble de bureaux en Suède et les résultats ont montré que 38 kg CO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup> étaient émis pendant la phase de production et 100 kg CO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup> pendant la phase d'utilisation. Chen (2011) a analysé les émissions grises associées à trois installations HVAC différentes, notamment un système VAV (Variable Air Volume), un système de poutres froides et un système de distribution d'air par le sol (Underground Air Distribution) dans un immeuble de bureaux en Australie. Les émissions grises totales étaient respectivement de 21,01 kg CO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup>, 42,70 kg CO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup> et 9,2 kg CO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup>. Kiamili et al. (2020) ont réalisé une ACV détaillée pour les systèmes HVAC sur la base d'un modèle BIM d'un immeuble de bureaux construit en Suisse. Les résultats indiquent que l'énergie grise des

systèmes HVAC est comprise entre 15 et 36 % de l'énergie grise totale de l'immeuble de bureaux.

Dans ce mémoire, nous choisissons donc de nous concentrer sur la HVAC pour rechercher la performance énergétique. L'objectif de bâtiments zéro énergie est réalisable si et seulement si des solutions de ventilation, de chauffage et de rafraîchissement neutres en carbone sont mises en place.

En effet, certains architectes et ingénieurs rejettent l'option de la ventilation mécaniquement contrôlée (VMC) et promeuvent des stratégies de ventilation naturelle tout en garantissant des bâtiments énergétiquement performants. L'objectif est de mettre en avant d'autres solutions, dites low techs, et d'utiliser l'innovation et la créativité pour développer des systèmes plus simples et durables (Neuwels, 2023).

Il ne s'agit pas de rejeter systématiquement les avancées technologiques mais de remettre en question la justification environnementale de leur utilisation, parfois paradoxale. Concernant le recours à la VMC : « il s'agit de faire entrer et sortir de l'air par des machines qui, bien entendu, consomment une quantité non négligeable d'électricité, dont les modes de fabrication impliquent eux aussi une consommation d'énergie et de ressources, qui ont de facto une durée de vie limitée et mettent encore un peu plus à distance l'humain de la nature. » (Neuwels, 2023, p.3).

De plus, nombre d'acteurs de la construction s'inscrivant dans ces idées mettent en cause des normes trop peu adaptées à l'usage des bâtiments. On peut citer notamment des architectes, des urbanistes et des ingénieurs comme Jean-Luc Collet, Dominique Gauzin-Müller, Alain Bornarel ou Philippe Madec ainsi que les 17 000 signataires du manifeste pour une frugalité heureuse et créative. Selon eux, les normes devraient s'adapter aux bâtiments et non l'inverse. Pour exemple, les normes demandent des débits minimums de ventilation selon le type de local, qu'il soit utilisé deux heures par jour ou vingt-quatre heures sur vingt-quatre. Plus globalement, ces acteurs militent pour une frugalité en énergie, en matière, en technicité et pour le territoire.

### 2.1.4. Contexte normatif sur la HVAC

Un grand enjeu relié à la ventilation naturelle des bâtiments est l'inclusion de celle-ci dans les normes et lois relatives aux bâtiments. Les bâtiments doivent respecter un certain nombre d'exigences pour pouvoir accueillir des usagers. Ces exigences sont de l'ordre sécuritaire (structure, accessibilité, sécurité incendie ...) ainsi que sanitaire (toxicité des matériaux, ventilation, eau sanitaire ...). Des arrêtés, lois et normes répertorient l'ensemble de ces prérequis.

Voici une liste des textes de loi et des normes afférant à la ventilation et/ou la température des bâtiments non résidentiels en Wallonie :

- Annexe C3 de la PEB 2019 : Dispositifs de ventilation des immeubles non résidentiels
- NBN EN 15251 publiée en 2007 remplacée depuis 2019 par NBN EN 16798-1
- NBN EN 16798-1 : Performance énergétique des bâtiments – Ventilation des bâtiments
- NBN EN 13779 publiée en 2007 remplacée depuis 2017 par NBN EN 16798-3

- NBN EN 16798-3 : Ventilation et qualité de l'air dans les bâtiments non résidentiels
- Le Règlement général pour la protection du travail (RGPT) remplacé progressivement par le Code du bien-être au travail (chapitres IV et V du livre III, titre Ier)

### *2.1.4.1. Annexe C3 de la PEB (Gouvernement Wallon, 2014)*

#### **a) Ventilation :**

- Qualité d'air minimale correspondant à la catégorie "INT3" de la norme NBN EN 13779 qui est maintenant la catégorie QAI<sub>III</sub> de la norme NBN EN 16798-1.
- Débit minimal de ventilation de 22 m<sup>3</sup>/h par personne pour les zones non-fumeurs.
- Le débit de conception minimal dans les toilettes est de 25 m<sup>3</sup>/h par WC (y compris les urinoirs) ou 15 m<sup>3</sup>/h par m<sup>2</sup> de surface au sol si le nombre de WC n'est pas connu au moment du dimensionnement du système de ventilation. Dans les salles de douches et les salles de bains, le débit de conception minimal est de 5 m<sup>3</sup>/h par m<sup>2</sup> de surface au sol, avec un minimum de 50 m<sup>3</sup>/h par espace.
- Les débits doivent être adaptés en fonction de l'occupation et de l'affectation des locaux. Pour les bureaux, l'annexe fournit les valeurs suivantes :

*Tableau 1 : Valeurs minimales à appliquer pour le calcul du débit de ventilation selon le tableau 1 de l'annexe C3 de la PEB*

<i>Types d'espaces</i>	<i>Surface au sol par personne [m<sup>2</sup>/personne]</i>
<i>Bureau</i>	15
<i>Local de réception, réception, salle polyvalente</i>	3,5
<i>Entrée principale</i>	10

#### **b) Température :**

- Les conditions de température intérieure doivent assurer le confort des occupants, sans spécifier de valeurs précises.

#### **c) Conditions de pression :**

- Donne des valeurs de pression dans les locaux afin de maîtriser le sens du flux par une différence entre les débits de pulsion et d'extraction.
- Les conditions de pression (PC) provoquées dans le bâtiment par le déséquilibre entre les débits d'air fourni ( $q_{v, \text{supply}}$ ) et les débits d'air repris ( $q_{v, \text{extract}}$ ) ne peuvent pas être inférieures à – 5 Pa ou supérieures à 10 Pa. Cette condition de pression doit être remplie dans chaque zone de ventilation, quel que soit le type de système de ventilation (mécanique ou naturel).

$$\text{Eq. 1} \quad PC = \text{sign}(Q_{v,\text{supply}} - Q_{v,\text{extract}}) \times \left( \frac{\text{abs}(Q_{v,\text{supply}} - Q_{v,\text{extract}})}{\dot{V}_{50}} \right)^{\frac{1}{0,65}} \times 50 \quad \text{Pa}$$

où :

$Q_{v,\text{supply}}$  le débit d'air fourni, en m<sup>3</sup>/h ;

$Q_{v,\text{extract}}$  le débit d'air repris, en m<sup>3</sup>/h ;

&  
 $\dot{V}_{50}$

le débit de fuite d'air du bâtiment ou d'une partie du bâtiment à 50 Pa, déterminé conformément à la norme NBN EN 13829, en m<sup>3</sup>/h.

Figure 2 : Expression du calcul de la condition de pression selon l'annexe C3 de la PEB (Gouvernement Wallon, 2014, p.6)

#### 2.1.4.2. Normes

##### 1. NBN EN 16798-1 (Comité Européen de Normalisation, 2019)

###### a) Ventilation :

- Propose des catégories de qualité d'ambiance intérieure (QAI) allant de QAI<sub>I</sub> (meilleure qualité) à QAI<sub>IV</sub> (pire qualité) en fonction des niveaux de qualité d'air souhaités.

Tableau 2 : Synthèse des tableaux B.9 et B.10 de la norme NBN EN 16798-1

QAI	Niveau de qualité	Débit minimal d'air		Concentration de CO <sub>2</sub> [ppm]
		[m <sup>3</sup> /h/personne]	[m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> ]	
QAI <sub>I</sub>	Haute	72	7,2	550
QAI <sub>II</sub>	Moyenne	50	5,0	800
QAI <sub>III</sub>	Modérée	29	2,9	1350
QAI <sub>IV</sub>	Faible	20	2,0	1350

- La valeur ne peut jamais être en dessous de 4 L/s par personne (14,4 m<sup>3</sup>/h/personne) selon l'annexe B, avec des ajustements selon l'activité et l'occupation.

- La catégorie minimale acceptable est la catégorie QAI<sub>III</sub> selon cette norme.

###### b) Température :

- Définit des valeurs de dimensionnement par défaut pour les températures de fonctionnement intérieur dans des bâtiments ayant des systèmes de chauffage actif en fonctionnement pendant la saison hivernale et des systèmes de refroidissement actif pendant la saison estivale.

- Définit des plages de température intérieure pour le confort thermique, variant selon la catégorie d'ambiance (QAI) choisie et le type d'activité.

Tableau 3 : Synthèse des tableaux B.2 et B.5 de la norme NBN EN 16798-1

<i><b>QAI</b></i>	<i><b>Température de fonctionnement [°C]</b></i>		<i><b>Plage de température intérieure [°C]</b></i>	
	<i>En été (0,5 clo et ~1,2 met)</i>	<i>En hiver (1,0 clo et ~1,2 met)</i>	<i>En été (0,5 clo et ~1,2 met)</i>	<i>En hiver (1,0 clo et ~1,2 met)</i>
<i><b>QAI<sub>I</sub></b></i>	25,5	21,0	23,5 – 25,5	21,0 – 23,0
<i><b>QAI<sub>II</sub></b></i>	26,0	20,0	23,0 – 26,0	20,0 – 24,0
<i><b>QAI<sub>III</sub></b></i>	27,0	19,0	22,0 – 27,0	19,0 – 25,0
<i><b>QAI<sub>IV</sub></b></i>	28,0	18,0	21,0 – 28,0	17,0 – 25,0

**c) Autres :**

La norme donne également des indications sur l'humidité relative, les nuisances sonores et l'éclairage.

**2. NBN EN 16798-3 (Comité Européen de Normalisation, 2017)**

**a) Ventilation :**

- Spécifie les exigences de performance pour les systèmes de ventilation et de climatisation dans les bâtiments non résidentiels.
- Met l'accent sur l'efficacité énergétique et la qualité de l'air intérieur.

**b) Température :**

- Prend en compte la régulation de la température et de l'humidité pour assurer des conditions de confort optimales.

**2.1.4.3. Code du bien-être au travail (SPF Emploi, Travail et Concertation sociale, 2017)**

**a) Ventilation : Chapitre IV du livre III, titre Ier**

- Les lieux de travail doivent être suffisamment aérés, soit par ventilation naturelle, soit par ventilation mécanique.
- Les installations de ventilation doivent être maintenues en bon état de fonctionnement et faire l'objet de contrôles réguliers.
- Les systèmes de ventilation ne doivent pas provoquer de courants d'air gênants pour les travailleurs.
- Les locaux de travail doivent avoir une concentration de CO<sub>2</sub> généralement inférieure à 900 ppm ou avoir un débit minimal de ventilation de 40 m<sup>3</sup>/h/personne. Une dérogation peut être faite pour avoir au maximum 1200 ppm de concentration de CO<sub>2</sub> ou un débit minimal de 25 m<sup>3</sup>/h/personne selon certaines conditions (Art. III.1-34-§3).

## b) Température : Chapitre V du livre III, titre Ier

- La température dans les locaux de travail doit être adéquate pendant le temps de travail, en fonction des méthodes de travail appliquées et des exigences physiques imposées aux travailleurs.
- Les locaux de travail doivent disposer d'une température adaptée à l'organisme humain pendant le temps de travail, compte tenu des méthodes de travail et des efforts physiques déployés par les travailleurs.

### 2.1.4.4. Synthèse

Le Tableau 4 synthétise l'ensemble du contexte normatif wallon sur la HVAC :

Tableau 4 : Synthèse du contexte normatif sur la HVAC en Wallonie

<i>Sujet</i>	<i>Norme ou texte de loi</i>	<i>Exigence</i>
<i>Ventilation</i>	<b>Annexe C3 de la PEB</b>	Définit une qualité d'air minimale correspondant à la catégorie "INT3" de la norme NBN EN 13779 (qui est maintenant la catégorie QAI <sub>III</sub> de la norme NBN EN 16798-1).
		Prescrit un débit minimal de ventilation de 22 m <sup>3</sup> /h/personne pour les zones non-fumeurs.
		Les débits doivent être adaptés en fonction de l'occupation et de l'affectation des locaux.
	<b>NBN EN 16798-1</b>	Propose des catégories de QAI allant de QAI <sub>I</sub> (meilleure qualité) à QAI <sub>IV</sub> (pire qualité) en fonction des niveaux de qualité d'air souhaités.
		La valeur du débit minimal d'air ne peut jamais être en dessous de 4 L/s/personne (14,4 m <sup>3</sup> /h/personne).
		La catégorie minimale acceptable est la catégorie QAI <sub>III</sub> .
	<b>Code du bien-être au travail</b>	Les locaux de travail doivent avoir une concentration de CO <sub>2</sub> généralement inférieure à 900 ppm ou avoir un débit minimal de ventilation de 40 m <sup>3</sup> /h/personne.
		Une dérogation peut être faite pour avoir au maximum 1200 ppm de concentration de CO <sub>2</sub> ou un débit minimal de 25 m <sup>3</sup> /h/personne selon certaines conditions (Art. III.1-34-§3).

		<p>Les lieux de travail doivent être suffisamment aérés, soit par ventilation naturelle, soit par ventilation mécanique.</p> <p>Les systèmes de ventilation ne doivent pas provoquer de courants d'air gênants pour les travailleurs.</p>
<i>Température</i>	<b>Annexe C3 de la PEB</b>	Les conditions de température intérieure doivent assurer le confort des occupants, sans spécifier de valeurs précises.
	<b>NBN EN 16798-1</b>	Définit des valeurs de dimensionnement par défaut pour les températures de fonctionnement intérieure en hiver (chauffage actif) et en été (refroidissement actif).
	<b>Code du bien-être au travail</b>	<p>Définit des plages de température intérieure pour le confort thermique, variant selon la catégorie de QAI choisie et le type d'activité.</p> <p>La température dans les locaux de travail doit être adéquate pendant le temps de travail, en fonction des méthodes de travail appliquées et des exigences physiques imposées aux travailleurs.</p>
<i>Conditions de pression</i>	<b>Annexe C3 de la PEB</b>	Les conditions de pression ne peuvent pas être inférieures à –5 Pa ou supérieures à 10 Pa dans chaque zone de ventilation, quel que soit le type de système.
<i>Autres</i>	<b>NBN EN 16798-1</b>	La norme donne également des indications sur l'humidité relative, les nuisances sonores et l'éclairage.

## 2.2. Concepts

### 2.2.1. Analyse du cycle de vie

Afin de mesurer l'impact environnemental des bâtiments et d'initier la décarbonation de ces derniers, la méthode de l'analyse du cycle de vie peut être mise en place.

L'analyse du cycle de vie (ACV), Life Cycle Assessment (LCA) en anglais, est une méthode normalisée qui permet de traiter les aspects environnementaux et les impacts environnementaux potentiels sur tout le cycle de vie d'un produit. Elle prend ainsi en compte différentes phases dans la vie d'un produit. Les quatre phases du cycle de vie sont les suivantes : la production, la construction, l'utilisation et la fin de vie (Reiter, 2023).

La méthode d'ACV est standardisée au niveau européen depuis 2006 et est normalisée par les normes ISO 14040 et ISO 14044. Ces normes expliquent la méthode d'ACV d'une part sur base des principes et du cadre à respecter et d'autre part sur base des exigences et des lignes directrices (Reiter, 2023).

Cette méthode adopte donc une démarche « Cradle to Grave » (du berceau à la tombe) qui est la démarche la plus commune dans le marché actuel. Un nouveau genre de consommation se développe actuellement avec la démarche « Cradle to Cradle » (C2C) qui promeut un mode de production plus sain pour l'environnement, s'inspirant davantage des cycles vertueux de la nature que des cycles polluants de l'industrie (McDonough & Braungart, 2011). Le C2C affirme que les déchets n'existent plus s'ils sont à 100% revalorisés et réintroduits dans le cycle. Les produits nourrissent des cycles biologiques ou des cycles techniques au sein desquels ils circulent indéfiniment (McDonough & Braungart, 2011).

Les deux normes ISO 14040 et ISO 14044 définissent l'ACV comme « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie » (ISO 14040, 2006, Art. 3.2 ; ISO 14044, 2006, Art. 3.2). Cette méthode semble donc parfaitement adaptée à l'analyse de l'impact environnemental d'un bâtiment en prenant en compte l'ensemble de ses consommations, tant matériellement qu'énergétiquement.

En effet, une norme européenne a été publiée en 2012 pour normaliser l'ACV d'un bâtiment. Il s'agit de la norme NBN EN 15978 qui fournit la méthode de calcul de l'ACV. Elle permet d'évaluer la performance environnementale d'un bâtiment et indique comment élaborer le rapport et communiquer le résultat de cette évaluation. Elle s'applique aux bâtiments neufs et existants, ainsi qu'aux projets de réhabilitation (Comité Européen de Normalisation, 2012).

En réalité, l'ACV d'un bâtiment se compose de la somme des ACV des différents produits de construction le constituant, réalisées à partir des informations contenues dans les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) et les profils environnementaux produits (PEP), auxquelles viennent s'ajouter les impacts des consommations d'eau et d'énergie pendant l'exploitation ainsi que les impacts liés au chantier (INIES, 2023). La norme NBN EN 15978 subdivise en plusieurs modules les quatre phases du cycle de vie mentionnées Figure 3. Elle propose l'ajout d'une cinquième phase intitulée « Bénéfices et charges au-delà du cycle de vie »



qui permet de prendre en compte l'impact du bâtiment s'il est introduit dans un nouveau cycle de vie (recyclage, réutilisation, réemploi).

Il est défini cinq phases et seize modules représentant l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment : les modules A1 à A3 pour la phase de production, les modules A4 et A5 pour la phase de construction, les modules B1 à B7 pour la phase d'utilisation, les modules C1 à C4 pour la phase de fin de vie et la phase D après la fin de vie. Le détail est repris dans la Figure 3 ci-dessous :

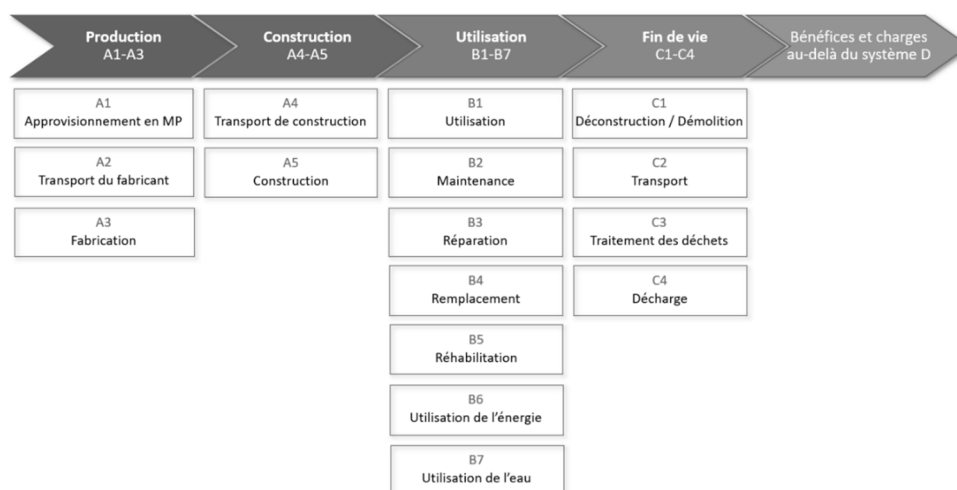


Figure 3 : Les étapes du cycle de vie définies par la norme NBN EN 15978 (INIES, 2023)

L'ACV d'un bâtiment permet donc de prendre en compte la globalité de l'impact environnemental d'un bâtiment. Elle considère les contributions des composants du bâtiment, de l'énergie utilisée, de l'eau consommée et de la phase de chantier (INIES, 2023).

La méthode d'ACV permet donc de comparer des systèmes entre eux sur l'entièreté de leur cycle de vie ou uniquement sur certaines phases de celui-ci. Elle permet également de comparer un système à une référence ou à différentes alternatives. (Reiter, 2010) L'ACV a donc une utilité primordiale car elle aide à identifier facilement les possibilités d'amélioration des systèmes à certaines phases de leur vie pour réduire leur impact environnemental (Reiter, 2010).

Une autre méthode, respectant les normes, mais évaluant un spectre plus large d'impacts a été développée par l'université KU Leuven. La méthodologie utilisée par Mouton, Allacker, et al. (2023) est une méthode d'analyse du cycle de vie belge appelée MMG (Milieugerelateerde Materiaalimpact van Gebouw (element) en ou impact matériel des éléments de construction sur l'environnement). Cette méthode est adaptée au secteur de la construction en Belgique (Mouton, Trigaux, et al., 2023). On ne regarde plus seulement l'impact environnemental pur en termes de rejet de CO<sub>2</sub> équivalent, mais 18 indicateurs environnementaux présentés Figure 4.

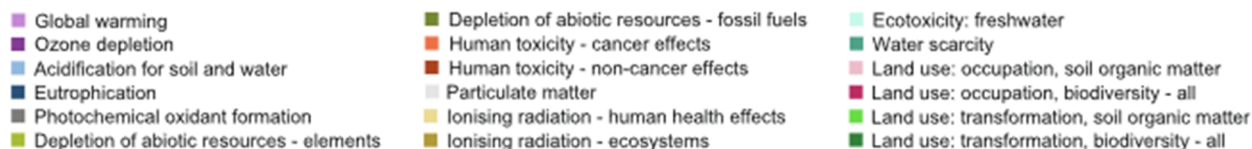


Figure 4 : Liste des 18 indicateurs environnementaux étudiés dans la méthode MMG (Mouton, Allacker, et al., 2023, p.9)

La méthode MMG permet donc d'évaluer chaque module du cycle de vie selon différents impacts comme le GWP, mais aussi la toxicité vis-à-vis des usagers, le potentiel d'eutrophisation ou le relâchement de particules par exemple (Mouton, Trigaux, et al., 2023).

### 2.2.2. Simulation des performances des bâtiments

Pieter de Wilde (2017) propose une définition du concept de « performance d'un bâtiment » :

« La performance des bâtiments est un concept qui décrit, de manière quantifiable, la manière dont un bâtiment et ses systèmes remplissent les tâches et les fonctions attendues de ce bâtiment. Les exigences peuvent découler de trois points de vue principaux : une vision technique des bâtiments en tant qu'objet, une vision des processus de construction en tant qu'activité de construction, et une vision artistique où la performance implique les notions de forme et d'appréciation. Les exigences de performance importantes dans la perspective de l'ingénierie concernent la qualité du bâtiment, les économies de ressources, la capacité de charge de travail, le respect des délais et l'état de préparation. » (De Wilde, 2017, p. 1025, traduit de l'anglais).

Ce concept clé permet donc de déterminer si un bâtiment est plus ou moins en phase avec les fonctions qu'il doit remplir selon différents points de vue. La quantification de la performance d'un bâtiment peut être réalisée de quatre manières différentes selon De Wilde (2017):

1. mesures physiques *in situ*
2. simulation de bâtiments
3. jugement d'experts
4. évaluation par l'utilisateur.

La simulation de bâtiments consiste à créer une maquette numérique d'un bâtiment (son jumeau numérique), avant ou après sa construction, et à modéliser autour de cette maquette le contexte environnemental réel. La maquette peut ensuite subir une série de tests divers tels que des tests acoustiques, de flux d'air, de transfert de chaleur et d'humidité, d'éclairage, de mouvement des occupants et d'évacuation, de comportement thermique et structurel, etc. Il est ainsi possible d'anticiper le comportement du bâtiment selon différentes hypothèses.

Cette méthode permet d'étudier et d'optimiser la conception d'un bâtiment en réduisant fortement les coûts, en effet, sans la simulation des performances d'un bâtiment, il est quasiment impossible d'optimiser les coûts et les consommations énergétiques. L'investissement initial dans la modélisation et la simulation permet d'éviter des surcoûts par la suite.

La simulation des performances d'un bâtiment, ou Building Performance Simulation (BPS) en anglais, est un domaine d'études en plein essor qui se développe depuis les années 1960 où le premier logiciel BRIS a été développé, comme le montrent la Figure 5 et la Figure 6.

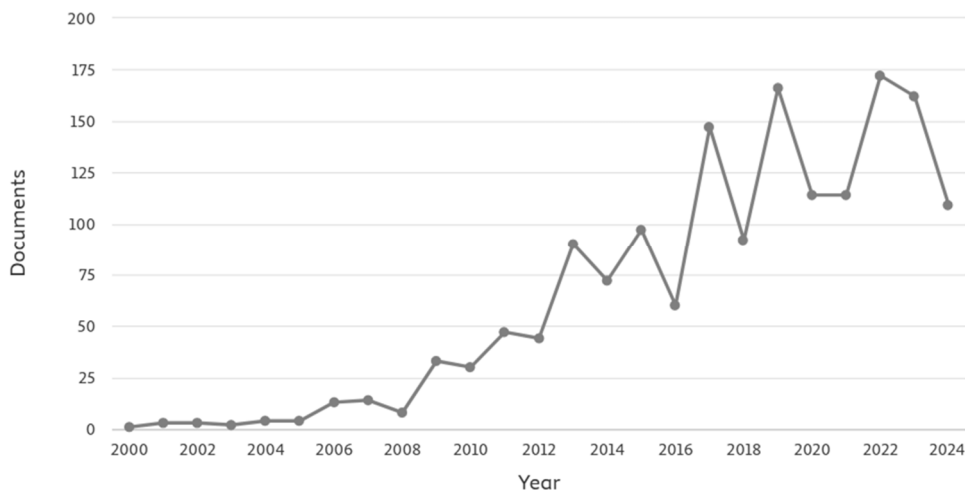


Figure 5 : Évolution du nombre de publications sur Scopus de 2000 à 2024 avec la recherche TITLE-ABS-KEY ( "building performance simulation" ) (Scopus)

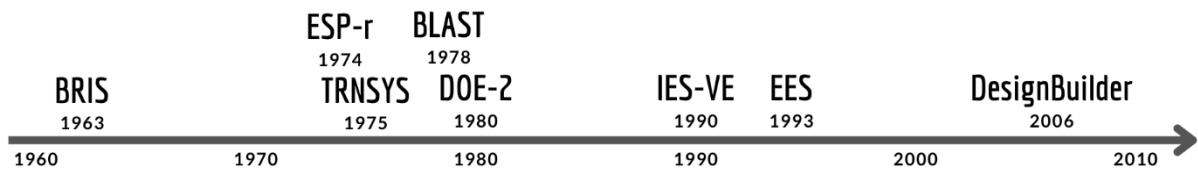


Figure 6 : Frise chronologique des dates de sortie de logiciels de simulation de bâtiment (production personnelle)

BRIS est un logiciel développé par le Royal Institute of Technology à Stockholm. Il permet de calculer les variations de température d'une pièce en se basant sur des systèmes de bilans thermiques résolus avec une méthode finie et itérative (Brown, 1990).

L'apparition de plusieurs logiciels dans les années 1970 s'explique par le premier choc pétrolier ayant eu lieu à partir de 1973 qui a éveillé les consciences sur l'énergie. C'est dans ce contexte que ESP-r, BLAST, DOE-2 et TRNSYS voient le jour, ces logiciels sont plus puissants que BRIS, ils utilisent des méthodes de calcul qui réduisent les simplifications et améliorent donc la précision (H. Wang & Zhai, 2016).

IES-VE (Virtual Environment) est un logiciel développé par IES (Integrated Environmental Solutions). Le logiciel contient un ensemble d'outils d'analyse pour la conception et la modernisation des bâtiments. Cela permet d'intégrer l'analyse de l'énergie et de la performance au cœur du processus de conception et tout au long du cycle de vie du bâtiment en tenant également compte du confort des occupants. ModelIt est le module permettant de créer la géométrie d'un bâtiment, SunCast permet de réaliser des études sur les gains solaires, ApacheSim et ApacheHVAC sont les modules dédiés à la modélisation des techniques spéciales. MacroFlo est utilisé pour modéliser la ventilation naturelle et gérer les ouvertures des fenêtres. MicroFlo permet de réaliser des analyses CFD (Computational Fluid Dynamics) avec l'effet du vent et du contexte du bâtiment.

EES (Engineering Equation Solver) est un logiciel permettant de résoudre des systèmes d'équations non linéaires, il est utilisé pour étudier des problèmes de thermodynamique et de transfert de chaleur (*EES: Engineering Equation Solver | F-Chart Software: Engineering Software*, s. d.). Ce logiciel permet d'insérer directement les équations et n'est pas spécifiquement conçu pour la BPS.

DesignBuilder est un autre logiciel spécifiquement développé pour l'étude des bâtiments. Il s'agit ici d'une interface graphique développée pour le moteur EnergyPlus. Au même titre que les autres logiciels, il permet de réaliser des simulations sur la consommation d'énergie des bâtiments (*DesignBuilder Software Ltd - Product Overview*, s. d.). EnergyPlus est un programme de simulation énergétique pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'éclairage, les charges de processus et l'utilisation de l'eau dans les bâtiments (*EnergyPlus*, s. d.).

La simulation des performances d'un bâtiment est donc réalisée par des logiciels. Ces logiciels comprennent une interface graphique pour l'utilisateur ainsi qu'un moteur de simulation qui réalise les calculs. Si le choix de l'interface graphique détermine la facilité d'utilisation d'un programme de simulation, c'est en fin de compte le moteur qui détermine la fiabilité des résultats de la simulation. Par exemple, DesignBuilder est une interface graphique qui utilise le moteur EnergyPlus pour réaliser ses simulations (Attia, 2024a) et IES-VE intègre le moteur ApacheSim pour réaliser ses simulations.

Il existe trois catégories de logiciels de simulation plus ou moins transparents et permissifs vis-à-vis des calculs et des simulations effectués :

- Les modèles white box sont utilisés lorsque l'on dispose de suffisamment de connaissances pour décrire les paramètres à l'aide de principes physiques fondamentaux. Par conséquent, les modèles white box peuvent être définis par un système d'équations (ex. modèle EnergyPlus, EES, TRNSYS) (Attia, 2024a).
- Les modèles black box sont des modèles statistiques qui sont détachés de la réalité physique des paramètres qu'ils utilisent. Ces modèles sont nettement plus faciles à utiliser que les modèles white box car il n'est pas nécessaire de connaître le fonctionnement interne du système. Les modèles black box ne permettent pas d'optimiser les bâtiments mais plutôt de corriger des erreurs de conception (Amara et al., 2015).
- Les modèles grey box sont des formes mixtes des modèles black box et white box. Dans ce cas-là, les paramètres utilisés sont à la fois empiriques et ont une signification physique, ils peuvent également provenir de mesures réelles d'un système. Ces modèles sont particulièrement utiles dans trois situations. D'abord, quand les informations détaillées sur les phénomènes thermiques du bâtiment (murs, sol, plafond, air ambiant) sont insuffisantes. Ensuite, lorsque le comportement des occupants est incertain. Enfin, quand les moyens de calcul et d'expérimentation sont limités. Dans ces cas, la modélisation grey box permet d'optimiser la gestion énergétique des systèmes comme la HVAC (Amara et al., 2015).

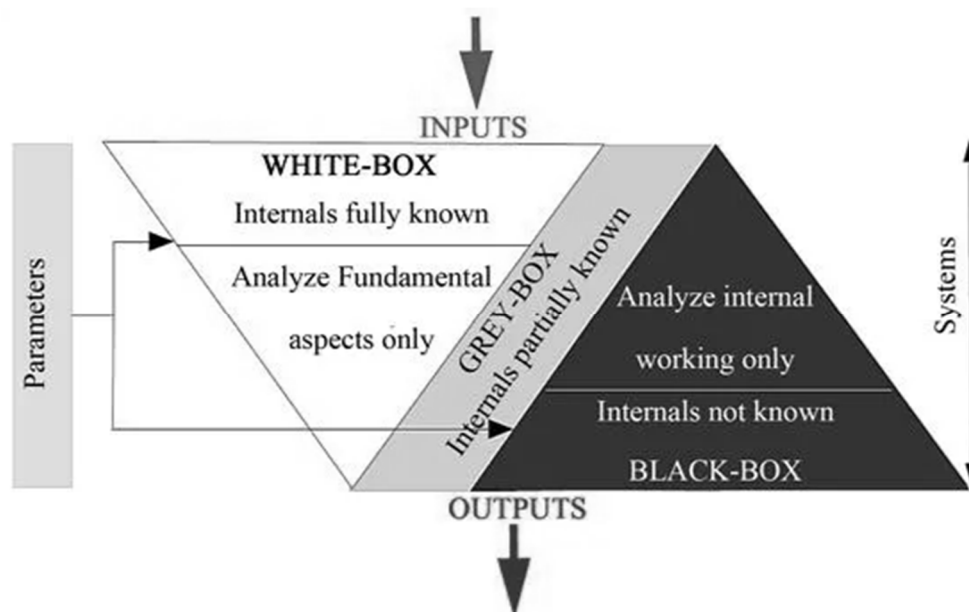


Figure 7 : Comportements des modèles white box, grey box et black box (Amara et al., 2015, p.97)

La simulation des performances des bâtiments semble donc être un domaine propice à l'optimisation des consommations énergétiques des bâtiments car il permet de tester différentes techniques et de les comparer en maîtrisant un grand nombre de paramètres. Il est donc intéressant d'utiliser la simulation des performances des bâtiments pour étudier des techniques qui ne sont pas présentes dans un bâtiment et de les comparer aux techniques existantes.

### 2.2.3. Low tech

Nous pouvons trouver dans la littérature plusieurs définitions de la low tech. Il serait inexact de restreindre les low tech à l'opposé des high tech, le terme étant créé en antinomie avec ce dernier. En effet, retenir cette définition à une opposition à la high tech semble être trop vague et large pour s'en satisfaire (Bloquel et al., 2022). Pour certains chercheurs (Mouton, Trigaux, et al., 2023), la low tech consiste à réduire les impacts environnementaux globaux en réduisant la complexité et l'utilisation de technologies gourmandes en énergie et/ou en ressources. Pour d'autres (Khalil et al., 2018), une low tech serait une technologie simple, qui ne nécessite pas ou très peu de ressources pour être mise en place et qui peut être construite et utilisée par n'importe qui.

Comme l'énonce très clairement Gilabert (2020): « Il n'existe aucune définition officielle et vraiment précise de la low tech. S'il y a bien un consensus général autour de cette notion, l'ensemble des éléments qui fondent le concept ne sont pas clairement établis. Malgré des tentatives, la diversité des champs qu'elle recouvre – à la fois techniques, culturels et philosophiques – rend son appropriation laborieuse. ». Plusieurs définitions plus ou moins détaillées de la low tech coexistent et permettent de garder la définition des low tech « ouverte, malléable et adaptable » (Bloquel et al., 2022, p.4).

Cette terminologie relativement récente (on commence à parler de low tech dans les années 1970 (Bihouix et al., 2019; Bloquel et al., 2022)) peut paraître trompeuse car on retrouve

beaucoup de systèmes dits low tech dans les anciennes voire très anciennes constructions, pour ne pas dire depuis toujours.

Il existe plusieurs terminologies associées aux low tech comme le système low tech et la démarche low tech. On parle de système pour désigner « un produit, procédé, service, ou organisation qui assure une ou plusieurs fonctions bien définies » (Bloquel et al., 2022, p.9). La démarche low tech permet d'inclure à la notion de système le contexte dans lequel ce dernier est pensé, c'est-à-dire l'inclusion des enjeux environnementaux et sociétaux derrière l'élaboration de systèmes low tech (Bloquel et al., 2022).

L'ADEME (Bloquel et al., 2022, p.11-15) propose de définir un système low tech par différentes caractéristiques qu'il possède : l'utilité, l'accessibilité, l'accès à l'autonomie, la durabilité et la localité. Un système low tech répond donc à des besoins réels et communs (utilité), il est facilement compréhensible, simple d'utilisation et abordable financièrement (accessibilité), il favorise l'autonomie de ses utilisateurs (accès à l'autonomie), il a un faible impact environnemental, mobilise peu de ressources naturelles et est pérenne (durabilité) et il est conçu avec des ressources locales (localité).

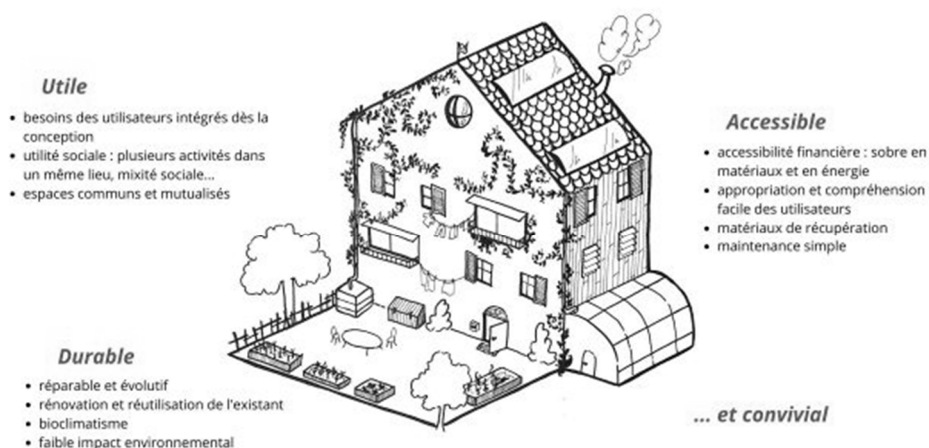


Figure 8 : Illustration d'une définition d'un système low tech (Donadio & Deville, 2023)

Keller & Bournigal (2022) proposent une définition de démarche low tech selon différents critères similaires à ceux proposés par l'ADEME en y incluant une dimension culturelle (Figure 9). On comprend alors mieux la différence entre démarche et système : la démarche low tech a une dimension culturelle tandis que le système low tech reste surtout technique.

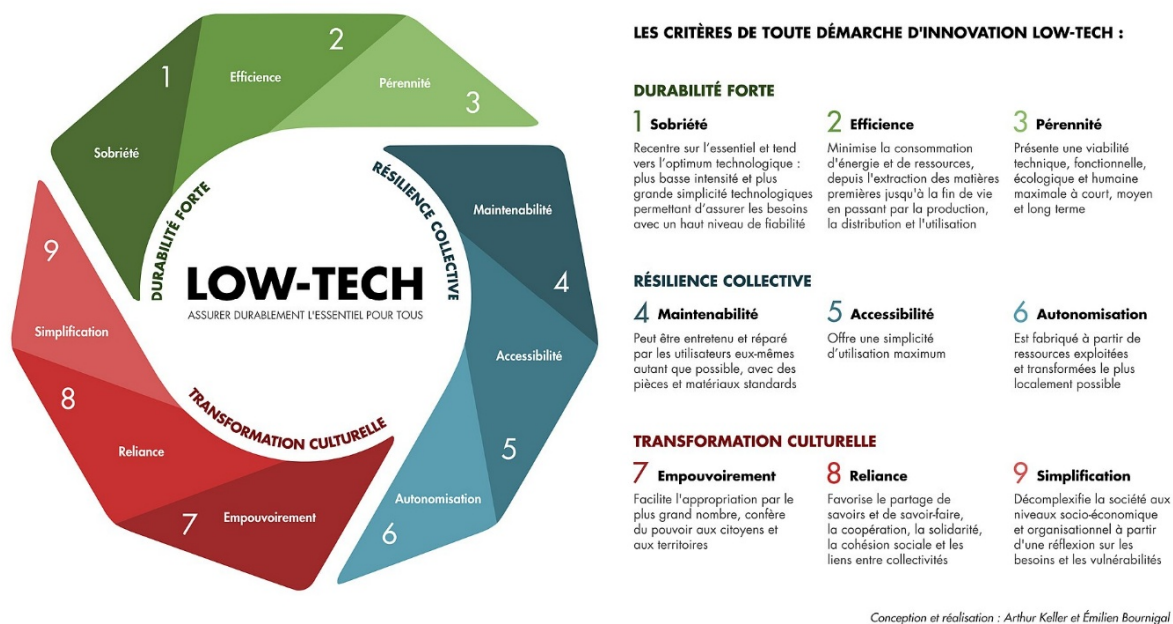


Figure 9 : Illustration d'une définition d'une démarche low tech (Keller & Bournigal, 2022)

Martin et al. (2022) parlent de concept low tech et ont proposé une cartographie de ce dernier afin d'établir un ensemble de 51 critères classés dans 8 catégories décrivant le concept low tech (Tableau 5).

Tableau 5 : Classification des 51 critères en 8 catégories permettant de décrire le concept low-tech (Martin et al., 2022, p.148)

Catégories	Définitions	Critères
Techniquement soutenable	A l'impact le moins négatif possible sur l'environnement en proposant une réponse technique modérée.	Écologique - Ne produit pas massivement des déchets - Recyclable - Soutenable - Respecte les limites planétaires - Réutilisable - Sobre en énergie - Résilient - Robuste - Réparable - Contraire à la logique d'exploitation - Conception sobre - Peu complexe - Sobre en matériaux - Modulaire - Répond à une conception sous contraintes
Psychologiquement transformateur	Génère des changements psychologiques.	Propose une vision du monde - Propose de nouveaux imaginaires - Suscite un mode de vie simplifié - Génère des usages sobres - Permet une réflexivité sur les conséquences sociales - Donne du sens - Produit du bien être
Critique	Questionne les pratiques techniques et sociales dominantes.	Alternatif aux modèles économiques - Alternatif aux modèles sociétaux - En rupture avec le mode actuel de consommation - Redéfinit nos modes de production - Remet en cause des modèles culturels - Militant
Local	Répond aux problèmes spécifiques à un territoire et utilise des ressources locales.	Interstitial - Réparable localement - Produit localement - Adaptable localement - Décentralisé
Autonomisant/Émancipant	Donne du pouvoir d'agir, développe les capacités et permet l'épanouissement.	Inclusif - S'inscrit dans la notion de "communs" - Collaboratif - Libre - Contrôlable - Reproductible - Simple à utiliser - Fabrication accessible - Permet de se réapproprier démocratiquement des outils de production
Radicalement utile	Les fonctions répondent à des besoins prioritaires.	Questionne le degré d'utilité - Fonctionnel - Efficace - Polyvalent
Conception renouvelée	Interroge les pratiques de conception.	Ingénieux - Met en œuvre de nouvelles méthodes de conception
Démécanisé	Favorise l'énergie manuelle tout en étant le moins automatisé possible.	Intense en main d'œuvre - S'inspire de techniques et de savoir-faire anciens

Appliquée au domaine de la construction, la démarche low tech consiste à mieux réfléchir les bâtiments (leurs utilisations et leurs besoins) et tirer parti de cette réflexion pour viser à réduire drastiquement les consommations énergétiques inhérentes à la construction, à l'utilisation et au démantèlement possible de ces derniers, c'est-à-dire de mener une réflexion à l'échelle du cycle de vie du bâtiment (Mouton, Trigaux, et al., 2023).

On peut proposer une autre définition de démarche low tech qui se résumerait en une démarche qui vise la protection des ressources naturelles par l'utilisation de matériaux recyclés ou de réemploi, la minimisation de la consommation d'énergie, le rallongement du temps d'utilisation ou de la durée de vie des bâtiments et la minimisation des distances de transports (Khalil et al., 2018).

Entre autres, cette démarche propose donc de tirer parti de l'environnement direct d'un bâtiment : gains solaires, ventilation naturelle et tout autre phénomène naturel « gratuit » que les bâtiments conventionnels cherchent à repousser (Mouton, Trigaux, et al., 2023). Cette optimisation de l'énergie disponible provoque une diminution de la consommation énergétique pour atteindre un confort similaire que dans un bâtiment classique, où l'on utilisera un chauffage au gaz et une ventilation mécaniquement contrôlée par exemple (Mouton, Trigaux, et al., 2023).

L'utilisation de systèmes low tech peut demander des innovations par retrait (Goulet, 2008) qui nécessitent parfois davantage d'efforts de recherche que d'améliorer des systèmes techniques existants. Le contexte actuel technocentré des bâtiments ne facilite pas le développement d'autres manières de faire : « faire sans pour faire mieux » (Neuwels, 2023, p.2). Le concept de technocentrisme est un concept qui « accorde la primauté au monde de l'ingénieur et contribue à propager cette illusion que seule la technique peut résoudre les problèmes de nos sociétés énergivores » (Beslay et al., 2015, p.1). L'affirmation qui en résulte est que la seule solution envisagée pour répondre à des problèmes techniques est l'utilisation de la technique.

Le but d'une démarche low tech n'est pas de retirer les techniques des bâtiments ou de réadopter des méthodes constructives ancestrales mais de proposer des systèmes libérés de technologies subsidiaires et qui fonctionnent en synergie, c'est-à-dire qui forment des « alliances fécondes » (Neuwels, 2023, p.5) entre les systèmes.

De plus, il existe une lacune d'études sur les performances environnementales du cycle de vie de bâtiments passifs et low tech, alors que l'on constate de nombreuses études sur ce sujet sur des bâtiments à haute efficacité énergétique et high tech (Mouton, Trigaux, et al., 2023). Plus globalement, les recherches sur le low-tech sont rares, faute de financements suffisants (Martin et al., 2022).

Bloquel et al., (2022) ont réalisé un rapport de 48 pages pour l'ADEME documenté par une étude bibliographique, une analyse sectorielle et une trentaine d'entretiens avec des acteurs de l'écosystème des low tech.

Il en résulte que la low tech « s'applique[nt] avant tout à une démarche d'innovation sous contrainte environnementale, intégrant des éléments sociaux et environnementaux, qui peut



s'utiliser tout à la fois pour des objets, des services ou des systèmes. » (Bloquel et al., 2022, p.6).

Le rapport souligne également que la low tech est freinée dans leur déploiement à grande échelle par des obstacles culturels, réglementaires et financiers. Il appelle les pouvoirs publics à lever ces freins et à faciliter le développement des low tech (Bloquel et al., 2022).

Dans la suite de ce travail, nous utiliserons le terme de dispositif low tech. Selon Latzko-Toth (2015), un dispositif est une articulation, une mise en relation, de plusieurs artefacts. Herbert Simon, auteur de *The Sciences of the Artificial*, définit en 1969 un artefact comme « une entité d'origine humaine conçue dans le but de répondre à un besoin » (Latzko-Toth, 2015, p. 182). Le dispositif est alors compris comme un objet technique.

Nous considérerons alors qu'un dispositif low tech est un objet technique répondant aux principes low tech et fonctionnant de manière autonome, c'est-à-dire indépendamment de tout autre système. Ces dispositifs peuvent porter sur la ventilation, le chauffage et/ou la climatisation d'un bâtiment et nous nous intéressons ici à ceux-ci.

### 2.2.4. Performance et robustesse

La performance et la robustesse sont deux concepts clés à connaître pour envisager, entre autres, la transition environnementale des bâtiments.

Le XXI<sup>e</sup> siècle est caractérisé par des fluctuations croissantes, des pénuries de ressources, des événements climatiques extrêmes, des conflits sociaux et des tensions géopolitiques (Hamant, 2024a). Face à ce monde instable, le modèle dominant actuel, axé sur la performance, est remis en question par certains chercheurs tels que Olivier Hamant (Hamant, 2024b; Rochas-Parrot & Haonfaure, 2024).

Dans la société actuelle, la performance est omniprésente et constitue un de ses moteurs clés (Hamant, 2024a). La recherche de performance se décline dans tous les domaines privés et professionnels : performances économiques, performances énergétiques, performances opérationnelles, performances sociétales, performances environnementales, performances sportives, performances intellectuelles, etc.

La performance est définie comme la somme de l'efficacité et de l'efficience (Hamant, 2024b). L'efficacité consiste à atteindre son objectif et l'efficience consiste à atteindre cet objectif avec le moins de moyens possible (Prémillieu, 2025). Historiquement, la performance a pris son sens contemporain avec la révolution industrielle, visant à « per-former les choses » selon le philosophe Bernard Stiegler, c'est-à-dire optimiser la transformation en l'accélérant (Prémillieu, 2025).

Hamant (2024a) présente quatre arguments systémiques expliquant pourquoi la performance, ou son excès, ne fonctionne pas et contribue aux crises actuelles :

1. Chercher constamment l'optimisation rend les systèmes fragiles.
2. Les gains d'efficience, souvent associés à la performance, peuvent induire une augmentation globale de la consommation ou de l'usage.

3. Mettre un indicateur de performance quelque part a tendance à le rendre toxique selon la loi de Goodhart, qui stipule que quand une mesure devient une cible, elle cesse d'être fiable.
4. La performance a un coût, qui est payé par les écosystèmes, et les crises actuelles (crise climatique, effondrement de la biodiversité, pollution globale, pénuries de ressources) sont le produit de notre performance.

De ces observations résulte la mise en avant de la robustesse plutôt que de la performance pour résoudre les crises climatiques actuelles et s'adapter aux changements.

La robustesse est définie comme la capacité à maintenir un système stable (à court terme) et viable (à long terme) malgré les fluctuations (Hamant, 2024b; Rochas-Parrot & Haonfaure, 2024). Elle s'inspire en grande partie des êtres vivants, en effet, les êtres vivants vivent dans un monde fluctuant depuis des millions d'années et survivent en s'adaptant continuellement. Contrairement à la performance, la robustesse des êtres vivants n'est pas construite sur l'efficacité ou l'optimisation, elle est construite en allant contre la performance (Hamant, 2024a, 2024b).

Le passage de la performance à la robustesse est un changement de paradigme nécessaire dans un monde fluctuant selon Hamant. Ce changement est déjà enclenché dans certains domaines, notamment au travers des démarches low tech, de l'habitat partagé ou de la permaculture. Cependant, le passage à la robustesse n'implique pas d'abandonner complètement la performance, mais de faire basculer l'équilibre vers la robustesse plutôt que la performance.

Pour évaluer la robustesse d'un système en plus de sa performance, il faut réaliser des tests de robustesse qui sont des outils dynamiques qui consistent à faire fluctuer un paramètre pour voir comment le système répond (Hamant, 2024b).

Ce mémoire entreprend une recherche sur la performance énergétique des dispositifs HVAC low tech. Cependant, il semble indispensable de mesurer également la robustesse des solutions envisagées afin de se faire un avis global et conscient. Évaluer la robustesse des systèmes HVAC low tech et mécaniques permet d'apporter une réponse supplémentaire aux questionnements traités dans le TFE.

### 2.2.5. Ventilation naturelle

La ventilation des bâtiments est une obligation légale et une composante indispensable à l'obtention du confort. Ventiler permet de renouveler l'air intérieur par de l'air extérieur qui, contrairement à ce que l'on pourrait penser, est souvent moins pollué que l'air intérieur (production de monoxyde et de dioxyde de carbone en intérieur et d'autres polluants domestiques). Le but de la ventilation est donc d'introduire de l'air extérieur à l'intérieur du bâtiment et d'extraire l'air intérieur chargé en polluants vers l'extérieur afin de maintenir une qualité de l'air satisfaisante (Cao & Feng, 2021).

La ventilation peut également servir à chauffer et à rafraîchir un espace en insufflant un air dont la température est maîtrisée, réchauffée ou refroidie. En effet, la ventilation constitue un bon vecteur d'un point de vue low tech afin de réguler la température et l'humidité relative d'un volume. C'est donc sur ce vecteur-ci que nous nous focaliserons dans cette étude car la ventilation permet de transporter la chaleur et le froid tout en renouvelant l'air. Ainsi, la HVAC

peut être assurée avec un seul fluide (l'air) qui est caloporteur et utile. Nous retrouvons donc dans cette méthode la définition low tech décrite précédemment Figure 8 : utilité, accessibilité et durabilité.

Ce mémoire focalisera ainsi l'étude de la HVAC au travers de la ventilation comme vecteur privilégié pour le chauffage et la climatisation.

### 2.2.5.1. Principes physiques

Il existe de nombreuses méthodes différentes pour ventiler un bâtiment, ces méthodes peuvent tout de même être triées en trois catégories : la ventilation mécanique, la ventilation naturelle et la ventilation hybride (Cao & Feng, 2021). Nous nous intéresserons dans ce travail à la ventilation naturelle et à ses principes de fonctionnement car cette catégorie ne fonctionne qu'avec des ressources gratuites et disponibles immédiatement sur site (soleil et vent principalement).

La ventilation naturelle utilise l'environnement extérieur pour gérer des courants d'air sans utiliser d'équipements mécaniques. Elle tire profit du tirage éolien créé par des différences de pressions induites par le vent, et du tirage thermique créé par des différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur. En effet, la ventilation naturelle fonctionne grâce au différentiel de pression entre les différentes ouvertures d'un bâtiment causé par le vent, la différence de température ou bien les deux en même temps (Cao & Feng, 2021).

On peut ainsi diviser la ventilation naturelle en deux principes : le tirage éolien et le tirage thermique, qui créent au sein d'un bâtiment des flux d'air de nature et de directions différentes comme illustré Figure 10.

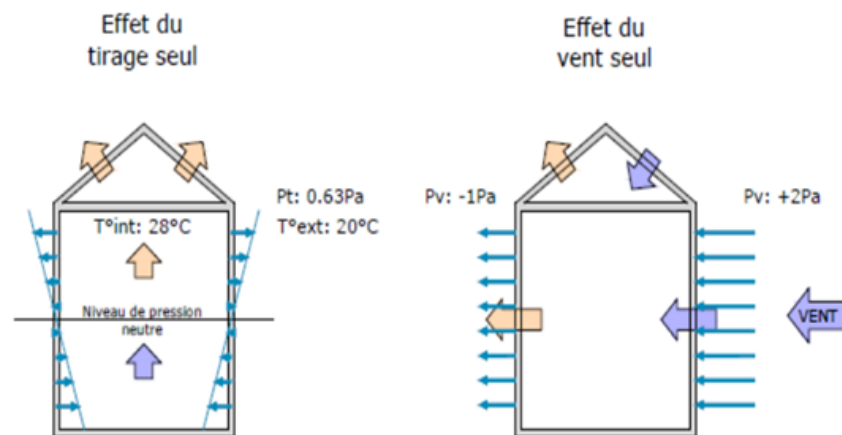


Figure 10 : Représentation schématique des effets des tirages thermique et éolien (XPair, 2023)

- **Tirage éolien :**

Les bâtiments forment des obstacles au vent, lorsque le vent heurte la façade d'une construction, une surpression se forme sur cette dernière et généralement, sur la façade opposée se crée une dépression, comme le montre la Figure 11.

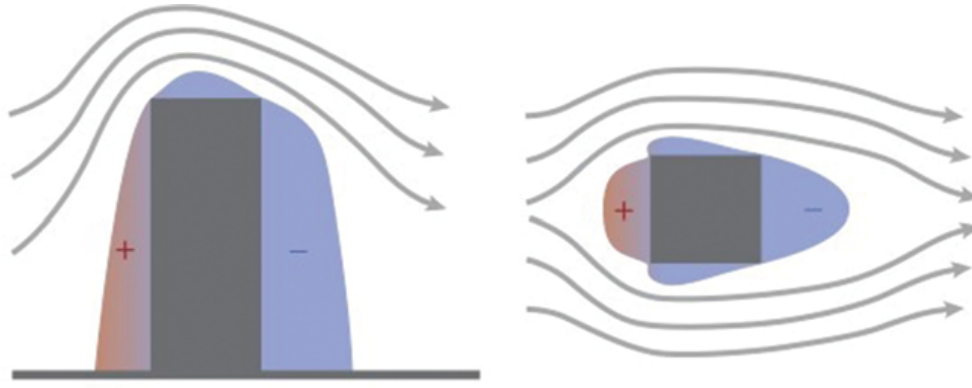


Figure 11 : Effet du vent sur un bâtiment en coupe et en plan (Bai, 2021, p.9)

Dans une zone en surpression, l'air cherchera à s'échapper et inversement dans une zone en dépression. Il est ainsi possible de créer des mouvements d'air transversaux grâce à l'effet du vent, en choisissant stratégiquement les emplacements des ouvertures mettant en lien le bâtiment avec l'extérieur (fenêtres, grilles de ventilation, bouches d'aération ...). Cet effet nécessite une bonne maîtrise de conception car la contribution du vent dépend autant de sa vitesse que de son orientation. Elle est donc dépendante de l'orientation du bâtiment vis-à-vis des vents dominants, qui sont eux-mêmes dépendants de la localisation du bâtiment.

Il est possible de calculer la pression motrice due au vent avec la formule suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho v^2 C_p$$

$P_m$  la pression motrice (Pa)

$\rho$  la masse volumique de l'air à température ambiante ( $kg.m^{-3}$ )

$v$  la vitesse du vent ( $m.s^{-1}$ )

$C_p$  le coefficient de pression en fonction de la position sur la façade (dépend de la direction du vent et de la forme du bâtiment)

De manière générale, l'ouverture avec la plus forte pression de vent sera l'entrée d'air et celle avec la plus faible pression de vent sera la sortie d'air (Yao & Xiong, 2021).

Le débit de ventilation par tirage éolien  $q_w$  peut être calculé avec la formule suivante (Yao & Xiong, 2021, p.183):

$$q_w = (C_d A) \sqrt{\frac{2(P_{fa} - P_{fb})}{\rho_i}}$$

$C_d$  le coefficient de décharge

$A$  l'aire ventilée ( $m^2$ )

$P_{fa}$  et  $P_{fb}$  les pressions du vent d'entrée et de sortie (Pa)

$\rho_i$  la masse volumique de l'air dans le bâtiment ( $kg.m^{-3}$ )

Yao & Xiong (2021) précisent que le tirage éolien ne peut pas être envisagé en tant que mécanisme principal de ventilation, car le débit est négligeable par rapport aux autres techniques de ventilation.

- **Tirage thermique :**

Les températures intérieures et extérieures sont souvent différentes, surtout en hiver et en été où les bâtiments protègent les usagers du froid et du chaud. Par exemple, en condition hivernale, l'air chauffé est moins dense et tend à s'élever dans le bâtiment (par une cheminée par exemple) tandis que l'air extérieur, plus froid et plus dense, rentre par les ouvertures basses et tend à remplacer l'air chaud chassé vers le haut. Il en résulte une ventilation verticale naturelle. Nous pouvons mesurer la pression motrice créée grâce à une formule faisant intervenir la hauteur du conduit de ventilation ainsi que les températures de l'intérieur et de l'extérieur (AVEMS, 2010, p.16).

$$P_m = \rho g H \frac{\Delta T}{T_m}$$

$P_m$  la pression motrice (Pa)

$\rho$  la masse volumique de l'air à température ambiante ( $kg.m^{-3}$ )

$g$  la pesanteur terrestre ( $m.s^{-2}$ )

$H$  la hauteur entre les points d'entrée et de sortie (m)

$\Delta T = T_{int} - T_{ext}$  la différence entre les températures extérieure et intérieure ( $^{\circ}K$ )

$T_m = \frac{T_{int} + T_{ext}}{2}$  la température moyenne ( $^{\circ}K$ )

Selon les principes de mécanique des fluides, le débit de ventilation par tirage thermique  $q_s$  peut être calculé avec la formule suivante (Yao & Xiong, 2021, p.185):

$$q_s = (C_d A) \sqrt{\frac{2gH(T_{ext} - T_{int})}{T_{int}}}$$

$C_d$  le coefficient de décharge

$A$  la surface de cheminée ( $m^2$ )

- **Plan de pression neutre :**

Le plan de pression neutre (PPN) est une notion permettant de comprendre la répartition de la pression de l'air dans une enceinte (Hauglustaine & Simon, 2018). La température et la pression de l'air étant liées, on observe une différence de pression de l'air dans n'importe quel local au même titre qu'on y observe une différence de température. La notion de PPN s'explique par le même phénomène que celui du tirage thermique selon lequel l'air froid est en partie basse et l'air chaud en partie haute d'un local (Hauglustaine & Simon, 2018).

Le PPN est un plan fictif horizontal situé à la hauteur à laquelle la pression est la même à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, lorsqu'il n'y a pas ou presque pas de vent. Au-dessous du PPN, on constate une dépression du bâtiment par rapport à l'extérieur (l'air s'engouffre à l'intérieur), au-dessus du PPN, on constate une surpression du bâtiment par rapport à l'extérieur (l'air s'échappe vers l'extérieur) (Hauglustaine & Simon, 2018).

L'existence du PPN est donc à prendre en compte dans les cas où un tirage thermique non négligeable est réalisé, mais n'impacte pas le tirage éolien qui se fait souvent de manière transversale.

- **Combinaison des deux tirages :**

En réalité, la ventilation naturelle résulte d'une combinaison du tirage éolien et du tirage thermique. Selon les caractéristiques du vent (force, direction) et celles de la température (différence entre température intérieure et extérieure), les deux tirages peuvent s'additionner ou se neutraliser. Les illustrations Figure 12 et Figure 13 permettent de comprendre les effets de la différence de pression sur la nature des flux (entrant ou sortant) et leur intensité (Zhang et al., 2021). Le débit de ventilation naturelle résultant a été étudié par Mao et al. (2015) selon différents changements de paramètres (direction du vent, vitesse du vent, différence de température, position du local dans un bâtiment).

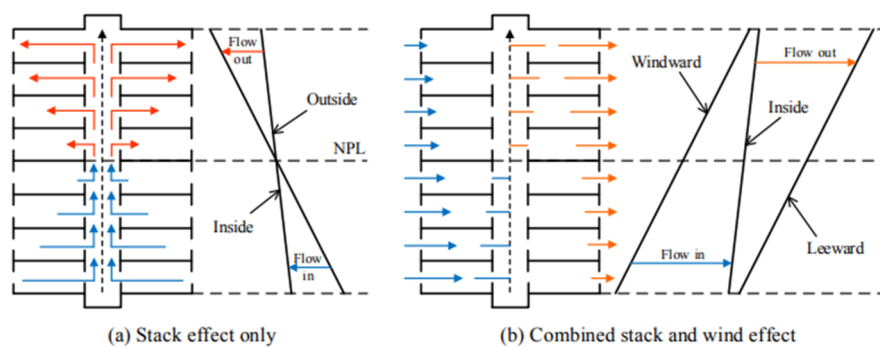


Figure 12 : Le gradient de pression et les schémas de flux d'air des tirages combinés : (a) tirage thermique seul et (b) tirages éolien et thermique combinés (Mao et al., 2015, p.544)

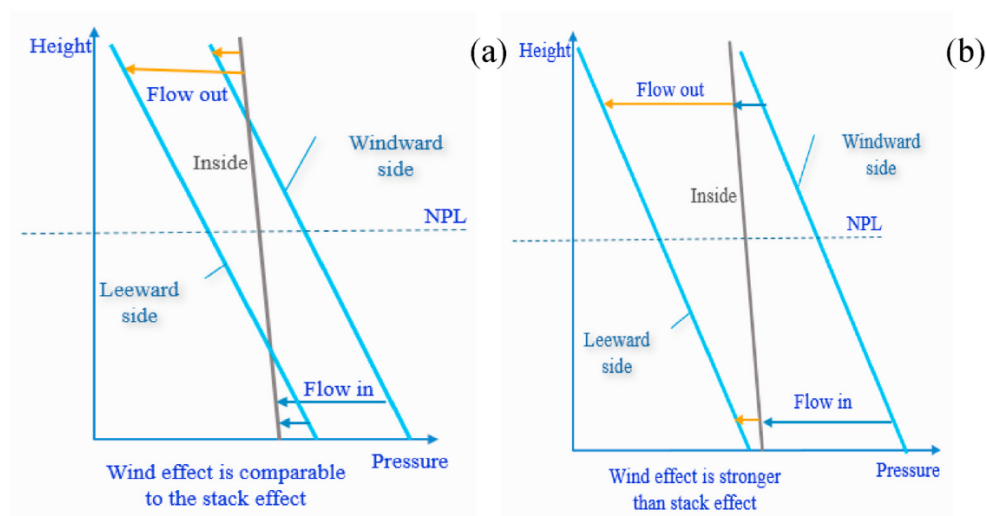


Figure 13 : Le gradient de pression et les schémas de flux d'air des tirages combinés : (a) tirages éolien et thermique de même intensité et (b) tirage éolien plus fort que tirage thermique (Zhang et al., 2021, p.8)

Le schéma (b) Figure 13 permet de montrer qu'en cas de tirage éolien dominant, la face du bâtiment opposée au vent (leeward side) en partie basse reste en surpression par rapport à l'extérieur. De même, la face du bâtiment face au vent (windward side) en partie haute reste en dépression par rapport à l'extérieur.

### 2.2.5.2. Application au bâtiment

Afin de tirer profit de ces deux principes de ventilation, différents systèmes de ventilation naturelle existent. Le positionnement des ouvertures, les circulations, les bouches d'entrée et de sortie sont des facteurs permettant de former un système de ventilation naturelle. Les deux figures présentées ci-dessous résument l'ensemble des systèmes de ventilation naturelle qui peuvent être mis en place dans un bâtiment avec la mise en évidence de l'écoulement de l'air (Envirobat Grand Est, 2022).

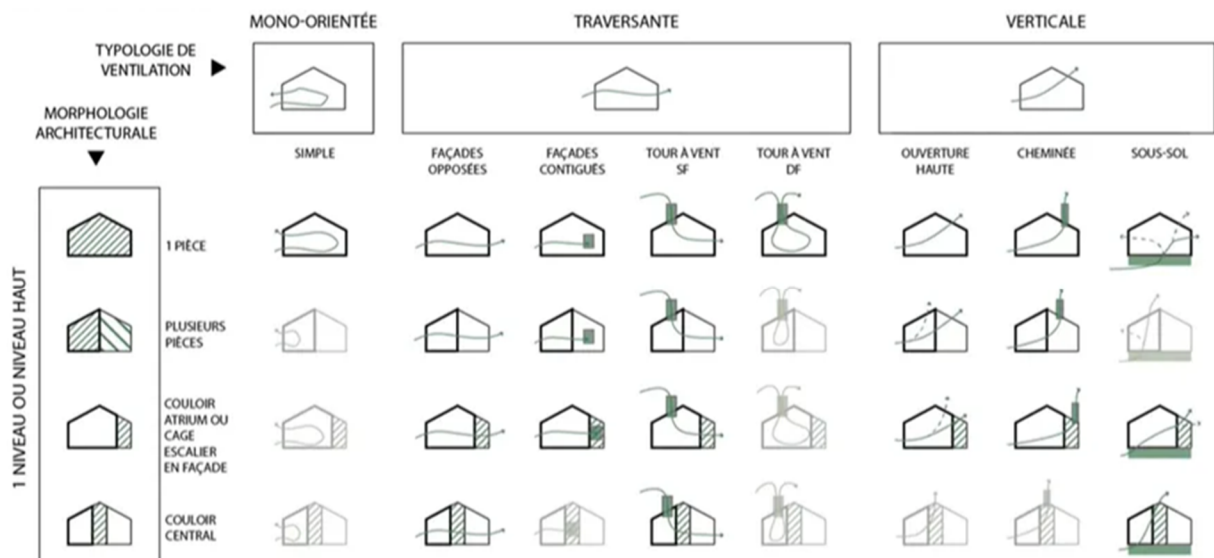


Figure 14 : Panel de systèmes pour les bâtiments d'un niveau ou niveau haut (Envirobat Grand Est, 2022)

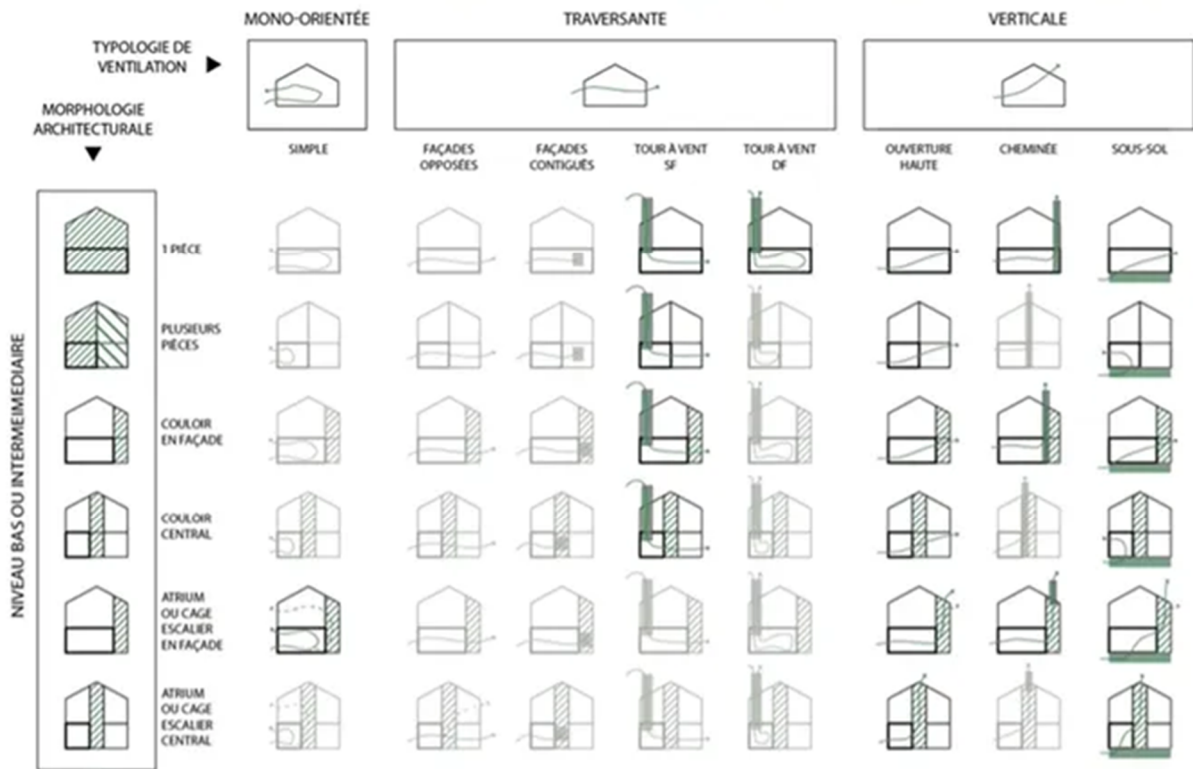


Figure 15 : Panel de systèmes pour les bâtiments au niveau bas ou intermédiaire (Envirobot Grand Est, 2022)

#### a) Efficacité de la ventilation naturelle :

Certains pays au climat chaud ont développé des systèmes de ventilation efficaces permettant de rafraîchir et de ventiler les bâtiments naturellement depuis des siècles. Les bâtiments tirent profit des principes physiques du tirage thermique, de l'évapotranspiration et de l'inertie des matériaux, à l'image notamment des badgir iraniens ou des riads marocains (Neuwels, 2023). En effet, au même titre que le tirage thermique généré par un gradient de température, l'évapotranspiration génère un flux d'air grâce au gradient d'humidité de l'air. Plus l'air est humide, plus il est léger à température sèche égale et plus il s'élève. Un brassage de l'air peut ainsi être réalisé à l'aide d'une variation de l'humidité de l'air.

Dorénavant, la ventilation naturelle peut être instaurée dans quasiment tous les types de climat pour réduire les consommations des bâtiments où qu'ils se trouvent. La littérature citée ci-dessous montre que des systèmes de ventilation naturelle sont efficaces et parfois meilleurs que des systèmes de ventilation mécanique. De plus, les études citées mettent en lumière le fait que la ventilation naturelle peut être mise en œuvre dans des climats tempérés comme ce mémoire propose de le faire.

Sakiyama et al., (2020) ont effectué une revue de littérature portant sur les bâtiments ventilés naturellement, en se concentrant sur trois aspects : le confort thermique, l'efficacité énergétique et la qualité de l'air intérieur. Les auteurs soulignent le fait que la plupart des études se concentrent sur des climats chauds et humides ou tropicaux, mais que la ventilation naturelle a également un potentiel dans les climats tempérés comme en Belgique.



Pour quantifier le potentiel de la ventilation naturelle selon les conditions climatiques locales d'une ville, Y. Chen et al., (2017) ont créé un indicateur appelé « NV hour ». Il est défini comme le nombre d'heures d'une année type (sur 8760 h) pendant lesquelles les conditions météorologiques extérieures (par exemple, la vitesse du vent, la température, l'humidité) sont propices à l'utilisation de la ventilation naturelle. Les auteurs ont calculé la NV hour de 1854 villes sur tous les continents et concluent que le climat tempéré d'une grande partie de l'Europe, notamment la Belgique, a une moyenne de 3000 heures de ventilation naturelle par an (Bruxelles : 2978 h, Genève : 3065 h, Paris : 3451 h). Ces données rejoignent celles de Sakiyama et al. (2020) et justifient la pertinence d'étudier la mise en œuvre des solutions de ventilation naturelle dans un bâtiment en Belgique.

Y. Chen et al., (2017) concluent que les climats subtropicaux affichent le nombre le plus important de NV hours en raison d'un climat doux tout au long de l'année comme Mexico (7161 h), Nairobi (8435 h) ou Bahir Dar (8136 h). Les pires climats pour la ventilation naturelle sont les climats du Sud-Est de l'Asie où le climat est trop chaud et humide pour avoir une ventilation naturelle de qualité suffisante (Singapour : 0 h, Kuala Lumpur : 0 h, Bangkok : 606 h). Ceci montre également les limites géographiques de cette approche.

La particularité d'étudier un bâtiment de bureaux a également un intérêt précis. En effet, Costanzo & Donn, (2017) ont montré grâce à des milliers de simulations numériques dans différentes villes en Europe et aux États-Unis que la ventilation naturelle représentait une solution réelle pour améliorer le confort dans des bâtiments de bureaux existants. Ils ont également pu montrer que le débit de renouvellement d'air par heure avec la ventilation naturelle s'avère toujours suffisant pour fournir assez d'air frais aux pièces, tout en n'augmentant que légèrement les concentrations de CO<sub>2</sub> par rapport aux cas de référence.

Raji et al., (2020) ont étudié le potentiel de six stratégies de ventilation naturelle pour réduire la demande d'énergie pour le refroidissement et la ventilation mécanique d'un immeuble de bureaux situé à Delft aux Pays-Bas. L'étude a montré que les stratégies de ventilation naturelle peuvent fournir un confort thermique et de l'air frais jusqu'à 90 % du temps d'occupation en été et peuvent donc économiser l'énergie généralement nécessaire au fonctionnement des systèmes traditionnels de ventilation mécanique et de climatisation. Ce type de recherche montre concrètement les économies d'énergie réalisables dans des climats comparables à celui de la Belgique.

De plus, l'approche low tech est aussi une manière de chercher à se passer de la ventilation mécanique superflue. Par exemple, Oropeza-Perez & Østergaard (2014) présentent une analyse de la faisabilité de l'utilisation de la ventilation naturelle comme méthode de refroidissement des bâtiments lors des périodes de surchauffe dans une maison passive située au Danemark. L'étude montre qu'avec une utilisation correcte de la ventilation naturelle, il y a une réduction potentielle en termes de temps de 90 % de l'utilisation de la ventilation mécanique pendant l'été dans le cas d'étude présenté. La conception architecturale est également une solution intéressante dans ce contexte. Naili et al. (2023) étudient l'impact d'une façade double peau en zigzag sur un étage d'une tour de vingt-deux étages. La façade orientée est composée de vitrage sur un pan du zigzag et d'une matière opaque sur l'autre. Les vitrages s'ouvrent et se ferment à différents degrés pour permettre la ventilation du plateau. L'étude menée montre que cette

façade associée à une automatisation des ouvertures permet de réaliser 40 % d'économie d'énergie par rapport à une ventilation mécanique.

Enfin, un autre sujet déjà évoqué est le facteur humain et l'impact du comportement des usagers sur un bâtiment. Manga & Allen (2022) montrent que permettre l'ouverture des fenêtres par les usagers dans des bureaux en Afrique du Sud améliore la qualité de l'air. La rénovation des fenêtres pour y ajouter des ouvrants alors que le bâtiment ne fonctionnait qu'avec un système de ventilation mécanique a permis aux usagers d'avoir la main sur l'aération et les mesures réalisées ont montré que la qualité de l'air avait été améliorée par cette rénovation. Dans ce cas d'étude, la ventilation du bâtiment reste complètement mécanique et non naturelle.

En résumé, ces études confirment que la ventilation naturelle constitue une solution possible et efficace dans des climats tempérés et dans des bâtiments tertiaires. L'intégration de la ventilation naturelle dans des bâtiments de bureaux en Belgique semble donc être une piste de réflexion à suivre dans une démarche low tech.

### **b) Comparaison des coûts entre ventilation naturelle et ventilation mécanique :**

Un facteur déterminant du secteur de la construction est le coût économique des composants d'un projet. L'analyse du cycle de vie permet maintenant aux constructeurs d'intégrer le coût environnemental de ces mêmes composants. Il est donc intéressant de se demander quelles différences de coûts existent entre la ventilation naturelle et la ventilation mécanique.

La plupart du poids environnemental de la HVAC est dû à la maintenance et au remplacement de pièces pendant la durée de vie du bâtiment. La ventilation naturelle, dépourvue de machines, est donc moins coûteuse environnementalement. C'est ce qu'ont étudié Rabani et al. (2024) sur un bâtiment de bureaux en Norvège. Ils ont montré que, pour des systèmes de chauffage et de climatisation similaires, un système de ventilation mécanique représente 130 kgCO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup> sur son cycle de vie tandis qu'un système de ventilation hybride représente 80 kgCO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup>, soit une baisse de 38 % des émissions de GES.

Dans la même intention, Flourentzou et al. (2017) ont comparé un système de ventilation naturelle à un système de ventilation mécanique avec récupération de chaleur dans un gymnase scolaire en Suisse. Leurs conclusions confirment que la ventilation naturelle offre une qualité d'air supérieure, un meilleur confort et un impact environnemental plus faible par rapport aux systèmes mécaniques, particulièrement pour les grands espaces. L'article conclut qu'il y a une réduction approximative de 23 % des émissions de CO<sub>2</sub> entre la ventilation mécanique et la ventilation naturelle, le coût environnemental de la ventilation naturelle est donc plus faible que celui de la ventilation mécanique.

D'un autre côté, Hauglustaine & Simon (2018) affirment que malgré un investissement inférieur pour la ventilation naturelle comparée à une ventilation double flux avec récupération de chaleur, la VMC double flux avec récupération de chaleur voit son investissement rapidement s'amortir. Leur recommandation est de privilégier la ventilation mécanique en Belgique car celle-ci assure un débit de ventilation plus constant que celui de la ventilation naturelle.

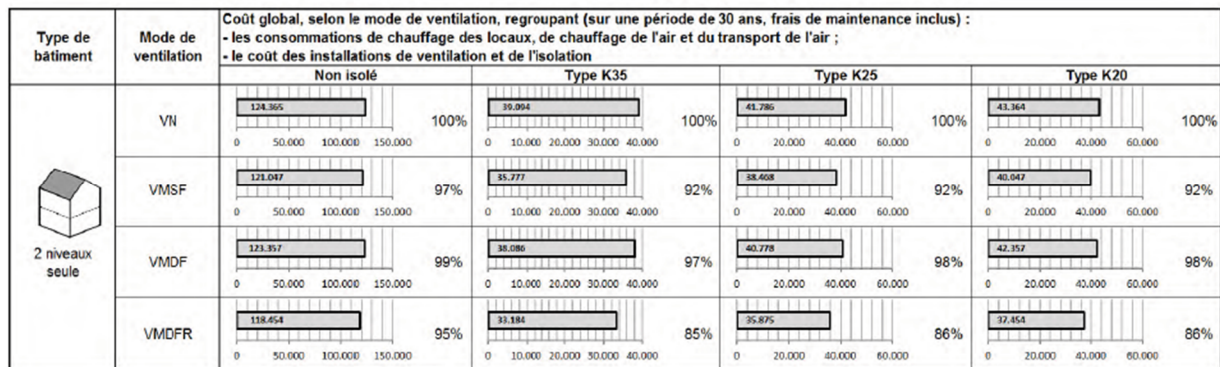


Figure 16 : Coût global, selon le mode de ventilation, sur une période de 30 ans (Hauglustaine & Simon, 2018, p.47)

En résumé, la ventilation mécanique et la ventilation naturelle ont des coûts économiques sensiblement proches sur le long terme (Hauglustaine & Simon, 2018) mais l'impact environnemental de la ventilation naturelle est inférieur à celui de la ventilation mécanique (Rabani et al., 2024, Flourentzou et al., 2017).

### 3. Méthodologies

La méthodologie de ce mémoire s'inspire de la méthodologie appliquée par le projet VNAT mené par le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) en partenariat avec le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) et MEDIECO Conseil entre 2018 et 2021 qui visait « à développer une méthodologie d'évaluation du renouvellement d'air des systèmes de ventilation naturelle et hybride et leur capacité à évacuer les polluants pour répondre aux besoins d'une occupation normale du logement et au fonctionnement des équipements » (Moujalled et al., 2022, p.4).

Le mémoire propose dans un premier temps d'établir une cartographie des dispositifs HVAC low tech à l'aide d'une revue de littérature, puis de réaliser une étude comparative d'un bâtiment test avec et sans dispositif low tech afin d'observer les impacts de l'intégration de ce dispositif sur la performance énergétique.

La méthodologie, adaptée à ce mémoire, s'articule comme suit :

1. **Revue de littérature** : état des lieux des connaissances actuelles sur les dispositifs HVAC low tech
  - a) Cartographie des dispositifs HVAC low tech, identification des verrous techniques et réglementaires sur une liste non exhaustive de dispositifs
2. **Etude de cas** : modélisation numérique d'un bâtiment test avec et sans l'intégration d'un dispositif low tech
  - a) Présentation du bâtiment test
  - b) Modélisation du bâtiment test avec les simplifications justifiées
  - c) Vérification du modèle à l'aide de la norme *ASHRAE 140*
  - d) Proposition d'intégration d'un dispositif HVAC low tech et modélisation de ce dernier
  - e) Comparaison des deux solutions selon des indicateurs de la performance énergétique

Le mémoire reprend cette organisation afin de chercher des résultats existants dans la littérature scientifique et d'apporter un nouveau résultat par l'expérience menée sur un bâtiment réel.

## 3.1. Cartographie des dispositifs HVAC low tech

### 3.1.1. Méthodologie de sélection des articles scientifiques

Le processus de sélection des dispositifs low tech à étudier dans le cadre de cet état de l'art a été décomposé en plusieurs étapes afin de toucher le spectre le plus large possible de techniques.

Réaliser une revue sur un sujet aussi vaste que la HVAC exige une méthodologie rigoureuse pour sélectionner les données pertinentes et un objectif clair quant à leur utilisation.

Dans cette section, nous réaliserons une cartographie de différents dispositifs low tech principaux et de repérer les verrous techniques et réglementaires à leur mise en œuvre.

Pour chaque dispositif étudié, il est essentiel de connaître son principe de fonctionnement (stratégie de ventilation et rôle dans le bâtiment), son efficacité énergétique, ses avantages et inconvénients, sa capacité à être utilisé dans des bâtiments résidentiels ou tertiaires, ainsi que sa note low tech, c'est-à-dire son échelle de concordance avec les principes low tech (la méthode de notation est expliquée ci-après).

La première étape a consisté à établir un point de départ en recherchant des revues de littérature existantes sur le sujet. Pour ce faire, une recherche Scopus a été effectuée avec la requête suivante : TITLE-ABS-KEY(review AND "natural ventilation"). Cette recherche a permis de sélectionner une étude critique des différents systèmes de ventilation naturelle de Zhang et al. (2021) ainsi qu'une revue des différents systèmes de chauffage et de climatisation passifs des bâtiments de Gupta & Tiwari (2016). Le premier article a permis de recenser treize dispositifs. Le second a permis d'en recenser deux supplémentaires (puits climatique et serre), étant donné qu'il citait également les mêmes dispositifs que ceux dans le premier article.

Ensuite, l'article de Zhang et al. (2021) s'étant révélé pertinent et riche en informations utiles, les données synthétisées ont été complétées en examinant les 363 articles cités dans cet article.

Des recherches approfondies ont été menées sur chaque dispositif mentionné dans l'article, en examinant les publications référencées. Cette approche a permis de sélectionner des études détaillant le fonctionnement de ces dispositifs et d'évaluer leur popularité en fonction du nombre d'articles traitant de leur cas (cf. Tableau 6). À partir de ces informations, un premier tri a pu être effectué : les dispositifs ayant moins de 5 % de mentions ou étant systématiquement cités en association d'autres dispositifs ont été écartés. Ce tri a retiré **six dispositifs** (mur solaire, fenestration, wing walls, turbine à vent, évent de toit et "wind cowl").

Tableau 6 : Relevés des mentions de chaque dispositif dans les références de Zhang et al. (2021)

<i>Dispositif</i>	<i>Nombre d'articles mentionnant le dispositif parmi les références de Zhang et al. (2021)</i>	<i>Résultat en % de mentions</i>
<i>Cheminée solaire</i>	151	42
<i>Mur trombe</i>	85	23
<i>Tour à vent</i>	83	23
<i>Façade double peau</i>	73	20
<i>Mur solaire</i>	64	18
<i>Atrium</i>	61	17
<i>Attrape vent</i>	46	13
<i>Night-cooling</i>	18	5
<i>Fenestration</i>	14	4
<i>Wing walls</i>	13	4
<i>Turbine à vent</i>	8	2
<i>Évent de toit</i>	8	2
<i>Wind cowl</i>	1	0

Pour ouvrir davantage le spectre, des recherches supplémentaires sur des dispositifs HVAC low tech ont été réalisées sur Scopus afin de trouver des dispositifs de chauffage et de rafraîchissements passifs plus récents et/ou moins populaires à l'aide de la requête TITLE-ABS-KEY(("passive heating system" OR "passive cooling" OR "radiative cooling") AND ("building" OR "housing")).

Ces recherches ont permis de sélectionner deux nouveaux dispositifs :

- Paroi pariétodynamique (Hajji et al., 2023)
- Thermosiphon (Porta-Gándara et al., 2020; Zhao et al., 2017)

Afin de garantir des informations justes et vérifiées, seuls les dispositifs pour lesquels des articles existent dans la littérature scientifique ont été retenus. C'est pourquoi deux dispositifs ont été ajoutés à la revue de littérature : les parois pariétodynamiques et le thermosiphon.

La méthodologie de sélection des articles a ainsi permis de recenser 11 dispositifs parmi lesquels figurent des dispositifs low tech de ventilation, chauffage et climatisation.

Afin de compléter les informations désirées sur chaque dispositif, des recherches complémentaires d'articles ont été effectuées pour étayer les connaissances qui pouvaient manquer. Pour ce faire, une recherche Scopus avec le nom de chaque dispositif retenu a été

effectuée associée aux termes “review” ou “performance”. La requête était de la forme : TITLE-ABS-KEY(“nom du dispositif” AND review OR performance). Il a ainsi été possible d’obtenir de plus amples informations sur les économies énergétiques ou les verrous techniques.

### 3.1.2. Attribution d'une note low tech

Pour évaluer l'adéquation de chaque dispositif avec la démarche low tech, nous établissons une grille de notation. Cette note permettra de classer les dispositifs de manière objectivée.

Comme présenté dans l'état de l'art (cf. 2.2.3), nous pouvons établir les différentes caractéristiques d'un dispositif low tech selon trois points de vue.

- **Première méthode :**

Une note reprenant les caractères utile, accessible et durable du dispositif. Cette définition est simple à utiliser car elle définit un système low tech selon trois critères globaux et non une démarche low tech. De plus, elle est adaptée pour un système low tech appliqué au bâtiment.

- **Deuxième méthode :**

Une note reprenant les caractères de durabilité forte, de résilience collective et de transformation culturelle du dispositif.

Cette définition est plus détaillée que la première en retenant neuf critères à évaluer et définit une démarche low tech. Il semble donc plus judicieux de choisir celle-ci malgré la possible difficulté d'évaluer certains critères avec précision. De plus, cette définition est globale et non centrée sur le bâtiment.

- **Troisième méthode :**

Une note reprenant les 51 caractères définis dans l'article de Martin et al. (2022) repris dans le Tableau 5.

Cette définition est la plus complète et la plus large car elle définit le concept low tech. Cependant, sa mise en place semble être trop compliquée pour en tirer un résultat utilisable par la suite.

La deuxième méthode est donc retenue car elle est un bon compromis : elle s'intéresse à davantage de critères que la première et permet ainsi de cerner la démarche low tech derrière chaque dispositif low tech mais ne s'étend pas dans trop de critères comme la troisième définition et sera donc plus facilement appropriable.

La méthode de notation adoptée la suivante : chaque critère a la même pondération dans la note globale et est noté entre 0 et 1, 1 correspondant à une adéquation parfaite avec le critère et 0 au non-respect du critère. La note globale est la somme des notes de chaque critère, c'est donc une note sur 9. De plus, si un dispositif obtient la note de 0 pour une des trois catégories, il obtient alors la note globale de 0 car il est jugé comme en dehors de la démarche low tech. La méthode de notation est schématisée Figure 17.

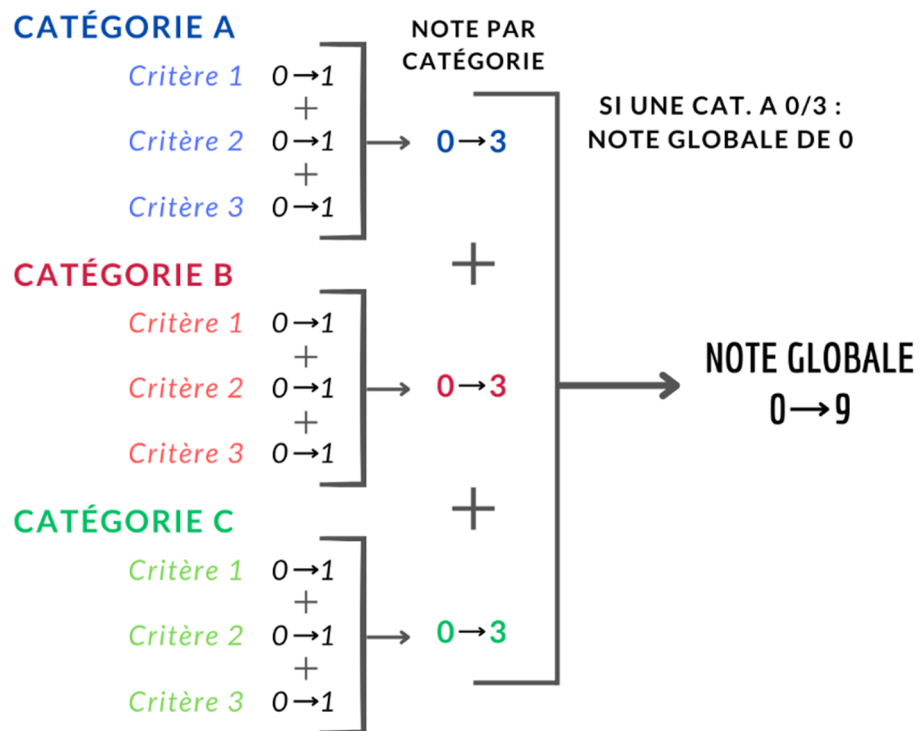


Figure 17 : Processus de notation d'un dispositif low tech, (production personnelle)

Il est important de noter que la notation attribuée est arbitraire et repose sur l'interprétation d'informations. Par conséquent, la note attribuée à chaque dispositif est subjective et manque de précision.

Le résultat de cette revue de littérature est donné dans la partie 4.



## 3.2. Étude de cas d'un bâtiment

### 3.2.1. Calibration, validation et vérification d'un modèle numérique

Différents chercheurs (Chong et al., 2021; Mustafaraj et al., 2014; Vera-Piazzini & Scarpa, 2024) abordent la calibration, la validation et la vérification des modèles de BPS et les méthodologies à appliquer pour réaliser cela.

Les termes de calibration, de validation et de vérification sont utilisés pour désigner la cohérence entre les simulations d'un modèle et les mesures de la réalité (Chong et al., 2021). On peut trouver des définitions de ces termes qui sont utilisés par plusieurs études (Chong et al., 2021; Vera-Piazzini & Scarpa, 2024) et qui proviennent du American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) et du US Department of Energy's Advanced Simulation and Computing (ASC) (Chong et al., 2021; Vera-Piazzini & Scarpa, 2024) :

- **Calibration** : Processus d'ajustement des paramètres numériques ou physiques dans le modèle numérique dans le but d'améliorer la concordance avec les données expérimentales.
- **Validation** : Processus consistant à déterminer dans quelle mesure un modèle est une représentation exacte du monde réel du point de vue de l'utilisation prévue du modèle.
- **Vérification** : Processus consistant à déterminer que le modèle numérique représente fidèlement la description conceptuelle du modèle faite par le développeur et la solution au modèle.

Les modèles de simulation énergétique des bâtiments sont réalisés pour répondre à des besoins spécifiques déterminés en amont de la modélisation. Chong et al. précisent que « l'idée de la validation n'est pas d'établir la vérité d'une théorie scientifique mais d'évaluer et de quantifier si le modèle est acceptable pour l'objectif visé. » (Chong et al., 2021, p.2, traduit de l'anglais).

La méthodologie pour la calibration s'inspire de celle utilisée dans un article de Mustafaraj et al. (2014). Dans cet article, les auteurs étudient un bâtiment existant et réalisent un jumeau numérique qu'ils calibrent afin d'identifier des améliorations en termes de consommation d'énergie.

Mustafaraj et al. (2014) expliquent selon quels paramètres modéliser le jumeau numérique (architecture, gains internes, HVAC). Ils donnent ensuite une méthodologie de calibration du modèle en deux étapes. Enfin, ils réalisent des simulations en faisant varier certains paramètres pour réduire la consommation énergétique du bâtiment.

Pour Mustafaraj et al. (2014), la simulation numérique est la meilleure approche afin d'analyser la performance d'un bâtiment tertiaire. Cependant, pour obtenir des données fiables, il est indispensable, selon eux, de calibrer le modèle avant de traiter les résultats des simulations.

La calibration d'un bâtiment nécessite de jouer sur un grand nombre de données et n'a pas d'unique solution (Kaplan et al., 1990). De plus, l'utilisation d'un logiciel black box tel que IES-VE ne permet pas de comprendre certains problèmes de calibration.

Une méthode de calibration reconnue est la calibration manuelle utilisée dans 74 % des cas par les experts du domaine pour calibrer un modèle (Coakley et al., 2014). Cette méthode basée sur l'essai et l'erreur consiste à ajuster manuellement des données d'entrées pour satisfaire les conditions de calibration qui sont détaillées ci-après (Mustafaraj et al., 2014).

Mustafaraj et al. (2014) proposent une méthodologie de calibration en deux niveaux de détails basée sur d'autres études similaires de la littérature scientifique (Bertagnolio, 2012; Raftery et al., 2011). Le premier niveau consiste à utiliser toutes les informations accessibles sur le bâtiment (plans, schémas de fonctionnement HVAC, fiches techniques des équipements, fichier météo, etc.) et d'introduire toutes ces données dans le modèle numérique (Mustafaraj et al., 2014).

Le second niveau nécessite l'analyse approfondie des données récupérées *in situ*. Il s'agit des données de monitoring du bâtiment (données mesurées par des sondes, données des GTC (Gestion Technique Centralisée)) ainsi que les données des compteurs (consommation des groupes de ventilation, du groupe de froid et de la chaudière, etc.). La calibration dépend alors de la précision des valeurs mesurées (Mustafaraj et al., 2014).

Comme expliqué par Mustafaraj et al. (2014): « Le premier niveau est utilisé pour effectuer une première étape de simulation et la précision du processus d'étalonnage au cours de cette étape peut être insatisfaisante. Le processus d'étalonnage au second niveau est une étape plus avancée qui consiste en un processus itératif visant à identifier les paramètres les plus influents. Après avoir identifié un paramètre critique, la valeur du paramètre concerné doit être estimée/affinée. » (Mustafaraj et al., 2014, p.78, traduit de l'anglais).

Pour estimer qu'un modèle est calibré, deux indicateurs statistiques peuvent être utilisés : MBE (Mean Bias Error) et CV(RMSE) (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error) calculés pour des périodes horaires et mensuelles selon les équations suivantes (Coakley et al., 2014, p.126):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} M_i}$$

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} ((M_i - S_i)^2 / N_p)}}{\overline{M}_p}$$

$$\text{avec } \overline{M}_p = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} M_i}{N_p}$$

L'utilisation de ces indicateurs est recommandée par le standard international ASHRAE dans la *Guideline 14* (ASHRAE Inc., 2023a). Ce standard indique qu'il faut atteindre certaines valeurs pour estimer que le modèle est calibré (ASHRAE Inc., 2023a, p.34):

$$-10\% \leq MBE_{hourly} \leq 10\% \text{ et } CV(RMSE)_{hourly} \leq 30\%$$

$$-5\% \leq MBE_{monthly} \leq 5\% \text{ et } CV(RMSE)_{monthly} \leq 15\%$$

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) est une organisation internationale qui établit les normes (standards) et les lignes directrices (guideline) pour la conception et l'exploitation des systèmes HVAC, la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique. L'organisation publie des recommandations à appliquer et notamment des recommandations liées à la calibration des modèles numériques dans la *Guideline 14*. Les recommandations de la *Guideline 14* ont été validées par une étude menée sur plus de 20 000 calibrations réalisées selon les standards de la guideline (Garrett & New, 2016) et sont utilisées dans de nombreuses études (Mustafaraj et al., 2014; Tomrukçu et al., 2024).

Dans les cas où la calibration selon la ASHRAE *Guideline 14* n'est pas réalisable, il est tout de même possible de vérifier la validité d'un modèle, c'est-à-dire s'assurer que le comportement du modèle se rapproche d'une fidèle représentation du monde réel. En effet, la calibration d'un modèle numérique peut être compliquée, voire irréalisable, lorsque les données réelles manquent (informations sur l'enveloppe, l'occupation, les systèmes HVAC, etc.).

La calibration peut aussi ne pas être effectuée pour des raisons de complexité d'un bâtiment. En effet, dans les grands bâtiments, il faut avoir plusieurs capteurs pour enregistrer les données dans les différentes zones du bâtiment sur une période prolongée (Tomrukçu et al., 2024). Or le bâtiment n'a pas un fonctionnement constant sur toute la période à cause de différents facteurs comme l'occupation, la météo ou l'utilisation des équipements (Tomrukçu et al., 2024). Tomrukçu et al. (2024, p.5, traduit de l'anglais) expliquent que « ces variations compliquent la modélisation et la simulation précises de la consommation d'énergie ».

Pour valider un modèle non calibré, Judkoff et al. (2008) proposent une méthodologie complète autour de trois techniques.

### **a) Etude comparative**

L'étude comparative est basée sur la comparaison des résultats d'au moins deux modèles numériques ayant les mêmes paramètres d'entrées. Cette technique est efficace pour quantifier la sensibilité de certains paramètres d'entrées car elle permet d'isoler certains facteurs en gardant inchangés tous les autres (Judkoff et al., 2008). Cette technique ne nécessite pas de connaître des données réelles. Il n'est donc pas possible de confronter les résultats obtenus à la réalité. Une possibilité évoquée par Judkoff et al. (2008) pour pallier cet inconvénient est d'associer l'étude comparative à la vérification analytique et/ou à la validation empirique.

### **b) Vérification analytique**

La vérification analytique consiste à mettre en place des cas test simples, dont le comportement peut être facilement calculé analytiquement, dans un modèle pour vérifier les comportements thermiques fondamentaux comme les transferts de chaleur par convection, radiation et conduction (Judkoff et al., 2008).

Judkoff et al. (2008) proposent huit tests selon deux modèles types (A et B) pour procéder à la vérification analytique, ces tests sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Description des tests proposés par Judkoff et al. pour la vérification analytique (Judkoff et al., 2008, p.59)

Test	Weather and Building Type	Purpose
Low mass decay and steady-state loss	A	Tests steady-state load/temperature rise and decay
Glazing	A	Determines UA of glazings
Conservation	A	Checks building responses caused by changes in overall UA
Infiltration	A	Checks building responses caused by variations in infiltration rate
High mass	A	Checks building responses caused by variations in thermal mass
Low-mass solar charging + window $\tau$	B	Tests window transmissivity and temperature response of thermal mass caused by solar radiation
Glazing $\tau$	B	Tests window transmissivity for single and triple glazings
High-mass charging	B	Checks temperature response of thermal mass caused by solar radiation as mass is varied

Il est aussi possible d'utiliser la norme *ANSI/ASHRAE 140-2007*. Cette norme définit une série de tests pour les programmes de simulation énergétique des bâtiments. Les tests se répartissent en deux catégories : les tests de charge de l'enveloppe et de la structure du bâtiment et les tests de performance des équipements HVAC. Les tests de la norme *ASHRAE 140* constituent une référence précieuse permettant de comparer les prévisions d'un programme de simulation avec celles de ses pairs, afin d'établir un degré de confiance dans l'exactitude de ses algorithmes et de leur mise en œuvre. L'avantage d'utiliser cette vérification analytique est qu'elle est normée et standardisée, contrairement à la méthode de Judkoff et al. (2008).

La norme *ANSI/ASHRAE 140-2023* prévoit d'utiliser le « BESTEST Case 600 standardisé » pour la vérification des modèles.

Ce modèle de test est un bâtiment rectangulaire sans cloisons intérieures, de dimensions 8m x 6m x 2,7m avec deux fenêtres sur la façade sud de 16m<sup>2</sup> avec un ratio fenêtre/mur de 55%, un toit et un étage adjacent au sol (Figure 18). Toutes les surfaces sont exposées aux intempéries et au rayonnement solaire. Ce bâtiment est situé à Denver, Colorado et le fichier météo intitulé "DRYCOLD" est fourni par la norme.

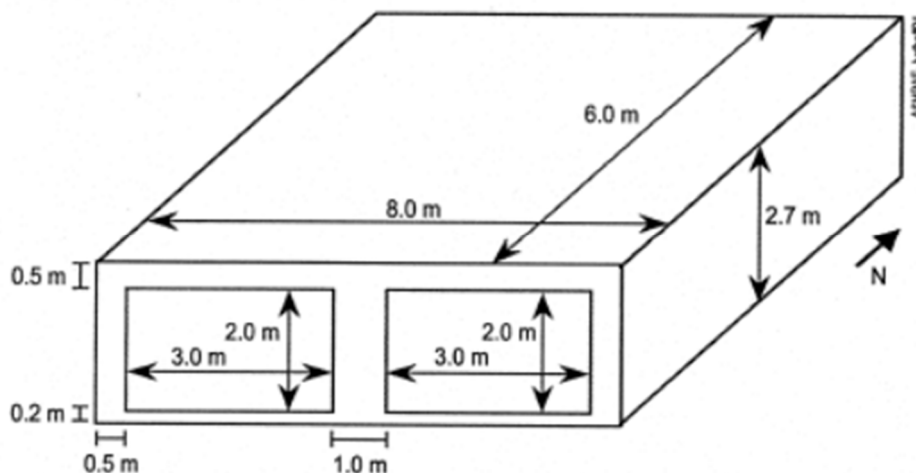


Figure 18 : Géométrie du Bestest Case 600 (Integrated Environmental Solutions, 2010, p.5)

La simulation est réalisée sur une année et les résultats horaires et annuels sont calculés afin de vérifier la validité du modèle avec les résultats de BESTEST Case 600 en contrôlant la demande énergétique annuelle et les charges de pointe pour le chauffage et la climatisation.

Le BESTEST Case 600 représente un bâtiment léger. Les points de consigne de l'installation permettent de chauffer l'espace à 18°C et de le refroidir à 27°C. Le taux d'infiltration de l'air est fixé à 0,5 ach et des gains internes de 200 W sont produits. La période d'occupation et de fonctionnement de l'installation est continue (24h/24 7j/7) (Integrated Environmental Solutions, 2010).

Les compositions de parois pour le BESTEST Case 600 ainsi que les caractéristiques des vitrages sont données par la norme :

Tableau 8 : Détail des compositions de parois pour le BESTEST Case 600 (Struck et al., 2009, p.11)

	<i>Élément</i>	<i>Valeur U [W/m.K.]</i>	<i>Épaisseur [mm]</i>
<i>Mur</i>	Plasterboard	0,16	12
	Fiberglas quilt	0,04	66
	Wood siding	0,14	9
<i>Dalle</i>	Timber flooring	0,14	25
	Insulation	0,04	1003
<i>Toit</i>	Plasterboard	0,16	10
	Fiberglas quilt	0,04	111,8
	Roof deck	0,14	19

Tableau 9 : Caractéristiques des vitrages pour le BESTEST Case 600 (Integrated Environmental Solutions, 2010, p.7)

<i>Cas</i>	<i>Orientation</i>	<i>Émissivité</i>	<i>Absorption</i>
<i>BESTEST Case 600</i>	Sud	0,9	0,6

Il est demandé de comparer le modèle aux résultats BESTEST en fonction des quatre valeurs suivantes :

- Demande annuelle d'énergie pour le chauffage (MWh)
- Charge horaire maximale de chauffage (kW)
- Demande annuelle d'énergie pour le refroidissement (MWh)
- Charge horaire maximale de refroidissement (kW)

La norme indique que les valeurs simulées doivent avoir une marge d'erreur inférieure ou égale à 5 % des valeurs cibles (ASHRAE Inc., 2023b).

### c) Validation empirique

La validation empirique nécessite d'avoir des données de mesures réelles d'un bâtiment et de les comparer aux résultats du modèle numérique. Elle est divisée en trois classes (A, B et C)

selon le degré de contrôle désiré (Judkoff et al., 2008). La validation empirique de classe A est très chronophage et chère. Il faut en effet, selon Judkoff et al. (2008), utiliser en moyenne 200 capteurs et réaliser des campagnes de mesures dans un bâtiment vide pour éliminer les erreurs d'origines extérieures. Les validations de classes B et C sont moins exigeantes et ne nécessitent pas de vider le bâtiment pendant les acquisitions de données, la classe B nécessite une collecte horaire des données et la classe C se base sur des consommations énergétiques mensuelles (Judkoff et al., 2008). Cette technique n'est pas réalisable dans le cas de ce mémoire pour lesquels les moyens financiers et temporels sont limités.

### 3.2.2. Choix des dispositifs HVAC low tech étudiés

La méthodologie de détermination du dispositif low tech étudié dans l'étude de cas repose sur deux points : l'analyse des potentiels existants du cas d'étude et la mise en relation de cette analyse avec la cartographie de dispositifs réalisée dans ce mémoire.

La mise en place de stratégies de ventilation naturelle et de dispositifs HVAC low tech requiert une prise en compte indispensable du contexte environnant.

Dans un premier lieu, il est donc nécessaire de réaliser une analyse des potentiels. Cela se traduit par l'établissement d'une liste *la plus exhaustive possible*<sup>1</sup> des différentes caractéristiques architecturales du bâtiment étudié.

L'analyse du potentiel de ventilation naturelle est aussi à effectuer en se renseignant sur le contexte du site. On peut se renseigner sur le potentiel de ventilation naturelle d'un site, les caractéristiques du vent, la qualité de l'air extérieur, les nuisances sonores extérieures éventuelles (trafic routier, ferroviaire ...). Cela permet de valider ou d'invalidier la possibilité de réaliser de la ventilation naturelle, du tirage thermique ou du tirage éolien dans le cas étudié.

Dans un second temps, il est possible de mettre en relation l'analyse de potentiels avec la cartographie des dispositifs low tech HVAC réalisée. L'analyse de potentiels permet de discriminer les dispositifs qui ne fonctionneraient pas dans les caractéristiques du cas étudié. La cartographie permet par la suite de choisir le dispositif en fonction des besoins (ventilation, chauffage, rafraîchissement), de l'économie d'énergie espérée et de la note low tech.

L'ordre dans lequel les dispositifs sont discriminés est le suivant :

- Type de bâtiment : tertiaire ou résidentiel
- Type de tirage réalisable : éolien, thermique ou les deux
- Lien avec les potentiels architecturaux : aucun lien (dispositif rejeté), lien possible ou lien existant (dispositif conservé)
- Rôle du dispositif HVAC : ventilation, chauffage, climatisation

---

<sup>1</sup> Nous sommes conscients ici que cette liste ne sera pas parfaitement exhaustive.

- Prise en compte de la note low tech et des économies d'énergie : meilleur dispositif conservé

### 3.2.3. Comparaison des systèmes HVAC

Dans ce mémoire, le corps de la recherche est la comparaison de deux systèmes HVAC :

- Système A : basé sur un système HVAC mécanique
- Système B : basé sur des dispositifs HVAC low tech associés au système A

#### 3.2.3.1. *Etude comparative selon plusieurs indicateurs*

L'étude comparative des deux systèmes HVAC se réalise selon plusieurs indicateurs. Ces indicateurs permettent de déterminer les impacts de l'installation du système low tech sur le bâtiment et sont listés ci-dessous.

- **Consommations liées au chauffage et à la climatisation à l'échelle du bâtiment sur une année :**

Cet indicateur permet d'avoir une vision globale de l'impact du dispositif low tech sur la consommation énergétique du bâtiment. Il permet également de confronter l'étude de cas à la revue de littérature réalisée en amont car cet indicateur y est également recherché. Les consommations sont exprimées en mégawattheures [MWh] mensuellement et pour l'année entière. Les consommations liées au chauffage et à la climatisation sont séparées. Pour évaluer la consommation globale du bâtiment pour le chauffage et la climatisation, il conviendra de l'exprimer en énergie primaire, en mégawattheures également. Les résultats prendront la forme d'un tableau récapitulatif.

- **Puissance maximale délivrée :**

Cet indicateur permet de savoir à quel degré le dispositif low tech soulage ou alourdit le système HVAC. Il est également utile de suivre cet indicateur pour voir si le dispositif low tech permet de réduire la puissance du système HVAC ou pour évaluer le moment où il sera nécessaire d'ajouter de la puissance au système HVAC dans le contexte du changement climatique. La puissance maximale est exprimée en kilowatts [kW] et constitue la plus forte puissance délivrée par le système HVAC dans l'année simulée. Les résultats prendront la forme d'un tableau récapitulatif.

- **Différences de températures intérieures dans les locaux sur une semaine :**

Cet indicateur apporte des informations à l'échelle locale, permettant de visualiser les impacts liés à l'intégration du dispositif low tech et son impact sur la température dans un local. L'analyse se concentre sur la semaine (du lundi au vendredi) la plus représentative de son rôle : la plus chaude en cas de rôle de climatisation, ou la plus froide si le dispositif vise le chauffage. En raison du nombre important de locaux, l'étude peut être limitée à un local par zone du bâtiment. Enfin, pour évaluer précisément l'efficacité du dispositif, seules les zones où il est censé produire un effet doivent être prises en compte. Les températures sont exprimées en

degrés Celsius [°C] et sont comparées entre elles heure par heure sur l'ensemble de la semaine étudiée. Un graphe reprenant la température extérieure et les températures intérieures des systèmes comparés permettra de visualiser les variations de température.

### 3.2.3.2. Évaluation de la robustesse vis-à-vis du changement climatique

Dans le contexte du changement climatique, il est intéressant de ne pas simplement observer les résultats actuels mais d'étudier également les projections à un horizon plus lointain. La réalisation d'un test de robustesse est justifiée et même nécessaire dans le contexte de la recherche (cf. partie 2.2.4). L'avantage de la simulation sur ordinateur est qu'il est possible de changer certains paramètres en conservant la même maquette à évaluer. En changeant le fichier météorologique du climat actuel à un climat futur, il est donc possible de simuler le comportement du bâtiment dans un autre climat.

Le GIEC a publié dans son sixième rapport d'évaluation (Calvin et al., 2023) des projections climatiques fondées sur plusieurs hypothèses et directions prises en matière de développement durable et d'émissions de GES. Ces projections reposent sur diverses hypothèses (socio-économiques, technologiques, politiques...) mais ne sont ni des prédictions ni des prévisions. Ils ont été synthétisés par trois groupes de travail (WGI, WGII et WGIII) qui ont étudié les projections selon différents outils et leur travail est résumé dans la Figure 19.

Le GIEC utilise notamment les scénarios dénommés SSPs (Shared Socioeconomic Pathway) et RCPs (Representative Concentration Pathways). Les SSPs prennent en compte des contextes socio-économiques différents qui aboutiraient à 5 projections climatiques tandis que les RCPs se basent sur différentes quantités de GES émises sur la période 2000-2100 pour aboutir à 3 projections climatiques (Figure 19). La différence entre ces deux types de scénarios est expliquée par Calvin et al. (2023) comme ceci : « Les scénarios SSP couvrent un éventail plus large de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques que les RCP. Ils sont similaires mais pas identiques, avec des différences dans les trajectoires de concentration. » (Calvin et al., 2023, p.9, traduit de l'anglais).

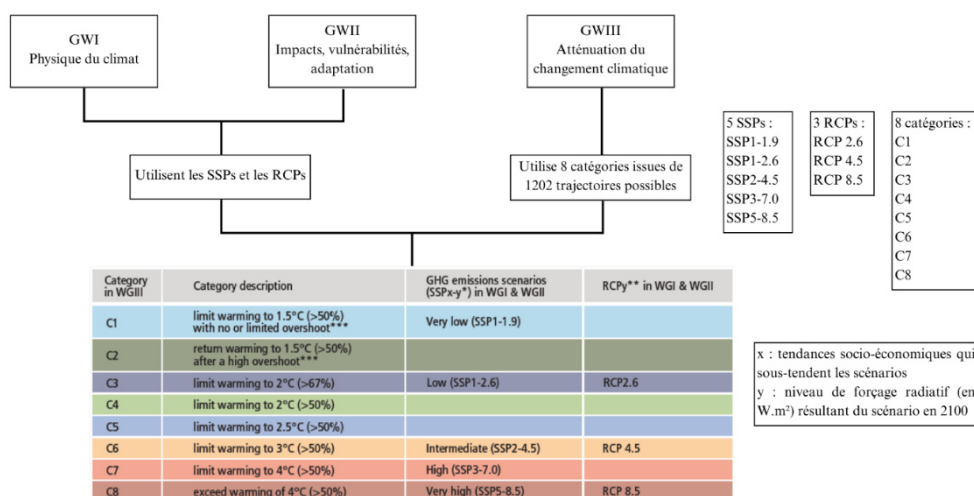


Figure 19 : Explication des scénarios climatiques du GIEC (Calvin et al., 2023, p.10)



Les fichiers météorologiques disponibles auprès de l'entreprise Greisch sont des fichiers suivant les trois scénarios RCPs. Pour déterminer lequel des trois utiliser, il est possible de se référer aux labels de certifications tels que BREEAM qui exigent dans leurs processus de labélisation une prévision selon le scénario A1B. Le scénario A1B fait partie des anciennes dénominations de projections climatiques du GIEC établies dans le quatrième rapport d'évaluation (Bernstein et al., 2008). Ce scénario correspond à une hausse de la température jusqu'à 4,4 °C en 2090-2099 (Bernstein et al., 2008) et serait associé au scénario RCP 8.5. Le scénario RCP 8.5 est donc choisi comme scénario utilisé pour l'étude des projections climatiques. De plus, bien que le scénario RCP 8.5 soit le plus pessimiste avec un réchauffement de plus de 4 °C en 2100, il s'agit du scénario qui est le plus proche des émissions de GES actuelles (SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, s. d.).

Il est également possible de choisir la date de projection du fichier météorologique entre 2030 et 2100. La durée de vie d'un système HVAC est d'une vingtaine d'années, on peut donc envisager d'étudier le bâtiment à cette échéance en 2050.

Le scénario RCP 8.5 dans 25 ans est donc choisi pour étudier la robustesse des systèmes HVAC vis-à-vis du changement climatique. Les mêmes indicateurs que ceux mentionnés auparavant sont à évaluer afin de pouvoir mener à la fois une étude comparative avec et sans l'intégration du dispositif low tech dans le climat de 2050 et une étude comparative entre le climat actuel et le climat de 2050.

Les résultats des projections en 2050 permettront également d'établir les temps de retour sur investissement économique et environnemental de l'intégration du dispositif low tech au système HVAC. Il faut pour cela estimer les coûts des systèmes.

### ***3.2.3.3. Comparaison des impacts des systèmes***

Le calcul des impacts des systèmes se divise en deux volets, l'impact environnemental exprimé en kgCO<sub>2</sub>-équ et qui représente le GWP et l'impact économique exprimé en €.

- **Impact environnemental :**

Afin de calculer l'impact environnemental, il faut délimiter les frontières du système calculé et réaliser l'ACV des deux systèmes HVAC comparés. Nous nous focalisons ici sur les systèmes HVAC, les phases de production, de construction et de fin de vie des équipements déjà présents dans le cas d'étude ne sont pas comptées dans l'ACV car elles sont identiques pour les deux systèmes étudiés et s'annulent donc. Seulement la phase d'utilisation des équipements déjà présents est à prendre en compte étant donné les possibles différences de consommations d'énergie dans les deux systèmes. L'impact environnemental de l'électricité consommée est à prendre sur le site internet Electricity Maps (*CO<sub>2</sub> emissions of electricity consumption*, 2024) qui recense les impacts environnementaux de la production d'électricité de chaque pays par année selon son mix énergétique, on utilisera les chiffres de l'année 2024.

À cela s'additionnent tous les éléments ajoutés à un système durant son cycle de vie fixé précédemment à 25 ans. Il s'agira donc de réaliser l'ACV du dispositif low tech intégré ou de toute autre modification dans les systèmes HVAC étudiés. Pour ce faire, une étude du marché

doit être réalisée pour recenser des produits existants sur le marché et à installer dans le bâtiment. Ces produits doivent avoir fait l'objet d'une ACV et disposer d'une EPD (Environmental Product Declaration) ou d'une FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire). Ces documents sont élaborés par les entreprises, vérifiés par des organismes indépendants et encadrés par des normes. Ils permettent de donner des indications sur l'ACV d'un produit et permettent, dans le cadre de ce travail, d'estimer l'impact environnemental de ces-derniers.

Le calcul de l'impact environnemental sera ensuite réalisé en additionnant les impacts environnementaux que représentent les consommations d'énergie avec les impacts environnementaux des éléments ajoutés au système HVAC (par exemple le dispositif low tech).

- **Impact économique :**

De la même manière, l'impact économique calculé comprendra les coûts de l'énergie consommée par les systèmes HVAC ainsi que les coûts liés à l'intégration du dispositif low tech ou de toute autre modification dans les systèmes HVAC étudiés. Le coût économique de l'énergie consommée est à prendre dans le rapport de la Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG) pour l'année 2024.

L'estimation des coûts liés à l'intégration du dispositif low tech ou de toute autre modification dans les systèmes HVAC sera faite avec l'aide de l'entreprise Greisch qui dispose de l'expertise et des données nécessaires à l'élaboration d'estimatifs de ce type.

Le calcul de l'impact économique sera ensuite réalisé en additionnant les coûts économiques que représentent les consommations d'énergie avec les coûts économiques des éléments ajoutés au système HVAC (par exemple le dispositif low tech).

- **Temps de retour sur investissement :**

Les calculs des impacts permettront de calculer le temps de retour sur investissement, s'il existe, de l'intégration d'un dispositif low tech ainsi que les économies réalisées à l'issue du cycle de vie du système en 2050. Les temps de retour sur investissement seront donnés vis-à-vis de l'investissement environnemental et économique.

## 4. Cartographie des dispositifs HVAC low tech

Le résultat de la revue de littérature est donné sous la forme d'un tableau reprenant l'ensemble des caractéristiques de chaque dispositif étudié.

### Guide de lecture du tableau :

Chaque dispositif est traité sur une ligne où l'on retrouve les différentes caractéristiques relevées lors de la revue de littérature, à savoir :

1. Stratégie : Verticale (tirage thermique), Transversale (tirage éolien), Mono-orientée ou VNAC (Ventilation Naturelle Assistée Contrôlée)
2. Utilité : CH (chauffage), CL (climatisation) et/ou VE (ventilation)
3. Description : une brève description du fonctionnement du dispositif
4. Verrou technique : l'ensemble des facteurs de bon fonctionnement et des points d'attention
5. Verrou réglementaire : les points d'attention concernant des normes ou des règlements
6. Économie d'énergie (%) : résultats d'économie d'énergie des dispositifs selon les études citées
7. Avantages : liste non exhaustive des avantages que présente le dispositif
8. Inconvénients : liste non exhaustive des inconvénients que présente le dispositif
9. Résidentiel : mise en place dans un cadre résidentiel : O (oui) M (moyen) N (non)
10. Tertiaire : mise en place dans un cadre tertiaire : O (oui) M (moyen) N (non)
11. Note LT : note low tech attribuée selon la méthodologie exposée en 3.1

Tableau 10 : Restitution des données récoltées lors de la revue de littérature sur onze dispositifs low tech de HVAC

<b>Dispositif</b>	<b>Stratégie</b>	<b>Utilité</b>	<b>Description</b>	<b>Verrou technique</b>	<b>Verrou réglementaire</b>	<b>Économie d'énergie (%)</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Résidentiel</b>	<b>Terminaire</b>	<b>Note LT</b>
Night-cooling	Verticale Traverse VNAC	CL VE	Ouverture automatisée des fenêtres la nuit pour rafraichir un bâtiment.	Moins efficace en milieu urbain à cause de l'effet d'îlot de chaleur, des vents moins rapides et de la pollution de l'air extérieur (Pollet & Renson, 2008) Procure au minimum 20 W/m² avec un taux d'ouvertures des fenêtres de 5 % (Pollet & Renson, 2008) Deux possibilités, air neuf dans le plénum ou dans le local (Guo et al., 2021)	Peu mis en avant dans les normes, empêche donc de prendre en compte l'impact du night-cooling (Pollet & Renson, 2008)	26 à 29 % (Guo et al., 2021)	Système autonome Installation facile et à tout moment du cycle du bâtiment Réduit les besoins de climatisation Permet d'avoir très peu d'heures d'inconfort en été (moins de 3%) (Pollet & Renson, 2008) Parfaitement adapté aux horaires de bureaux / écoles	Acoustique réduite si l'utilisateur dort dans le bâtiment (pas applicable pour le tertiaire) Augmente l'inconfort malgré une économie d'énergie (Guo et al., 2021) Utile seulement en été (Pollet & Renson, 2008) Doit être associé à une ventilation mécanique	M	O	7

<i>Dispositif</i>	<i>Stratégie</i>	<i>Utilité</i>	<i>Description</i>	<i>Verron technique</i>	<i>Verron réglementaire</i>	<i>Économie d'énergie (%)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Résidentiel</i>	<i>Terminaire</i>	<i>Note LT</i>
<i>Mur trombe</i>	Verticale	CH	Mur à forte inertie orienté vers le Sud avec une lame d'air et un vitrage permettant de piéger les gains solaires. Les quatre facteurs déterminants sont le matériau dans le mur, l'épaisseur du mur, le ratio de mur trombe / tous les murs et le nombre de vitrages (Modirrousta & Boostani, 2016)	Inversion du gradient de température en cas de ciel nuageux (Bevilacqua et al., 2019, Saadatian et al., 2012): nécessite des ouvertures réglables selon la météo Mur orienté au sud Optimum du ratio mur trombe / murs est de 37% (Saadatian et al., 2012)	Lumière naturelle dans les pièces	30 à 80 (Zhang et al., 2021), 18,2% de chauffage en moins en hiver et de 42,4% de climatisation en été à Copenhague (Bevilacqua et al., 2012)	Ne rejette aucun COV Peu d'entretien Est utile même sans rayonnement solaire (Bevilacqua et al., 2019) Réduit l'humidité (Saadatian et al., 2012) Apporte du confort thermique dans l'espace lié au mur mais aussi dans les pièces adjacentes (Saadatian et al., 2012)	Pas de réglages possibles Peu de lumière naturelle sur une façade Résistance thermique faible, la nuit ou avec un ciel couvert, le transfert de chaleur s'inverse et refroidit l'intérieur. (Saadatian et al., 2012) Esthétiquement questionnable (Saadatian et al., 2012)	O	M	7,5
		CL VE									

<i>Dispositif</i>	<i>Stratégie</i>	<i>Utilité</i>	<i>Description</i>	<i>Verrou technique</i>	<i>Verrou réglementaire</i>	<i>Économie d'énergie (%)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Résidentiel</i>	<i>Terminaire</i>	<i>Note LT</i>
<i>Façade double peau</i>	Verticale	VE	Façade souvent conçue en deux épaisseurs, une épaisseur permettant de bloquer ou de faire entrer les rayons solaires et une autre épaisseur vitrée. L'air se déplace entre les deux peaux.	En l'absence de soleil, grande dépendance à la direction du vent (20 vol/h si vent opposé et 92 vol/h si vent à 90°) (Gratia & De Herde, 2004) Plus d'incertitude si domination du tirage éolien (entre 20 et 110 vol/h) que si domination du tirage thermique (entre 90 et 135 vol/h) Fonctionnement en hiver à vérifier (pas d'études menées)	Pas de verrou réglementaire détecté	14 à 75 (Zhang et al., 2021)	Réglable selon la météo Peut être utilisé dans de nombreux cas, orienté au nord ou au sud selon le contexte (Gratia & De Herde, 2004)	Fort investissement de départ Ouvertures dans la façade compliquées Grande proportion de vitrage par mur	M	O	3,5

<i>Dispositif</i>	<i>Stratégie</i>	<i>Utilité</i>	<i>Description</i>	<i>Verrou technique</i>	<i>Verrou réglementaire</i>	<i>Économie d'énergie (%)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Résidentiel</i>	<i>Terminaire</i>	<i>Note LT</i>
<i>Cheminée solaire</i>	Verticale	CH	Cheminée exposée aux rayons solaires qui réchauffe l'air qu'elle contient et provoque ainsi un tirage thermique. Facteurs déterminants : rayonnement solaire, hauteur de la cavité, hauteur de l'entrée d'air (bas de la cheminée), hauteur de la fenêtre opposée (Q. Wang et al., 2020)	Vent à 0° entre 1 et 5 m/s : aide fortement la circulation d'air dans la cheminée (Q. Wang et al., 2020) Pas vent anguleux ET rayonnement solaire > 1000 W/m². (Q. Wang et al., 2020) Si le rayonnement est > à 700 W/m², le vent est négligeable (Shi et al., 2018) Cheminée solaire peut ne pas être conçue selon le vent car facteur trop aléatoire qui sous-évalue la performance réelle (Shi et al., 2018)	Pas de verrou réglementaire détecté	12 à 50 (Zhang et al., 2021)	Peut être associé à du night-cooling si on stocke la chaleur pour la nuit. (Shi et al., 2018) Fonctionne avec peu de ressources : ventilation d'une petite maison avec un rayonnement de 50 W/m² (Shi et al., 2018)	Fort impact architectural Dépend très fortement des conditions climatiques du site Performance proportionnel le au rayonnement solaire (Q. Wang et al., 2020), différence de 38 % entre 200 et 600 /m² (Shi et al., 2018)	O	O	7
<i>Attrium</i>	Verticale	CH	Grand volume sur plusieurs niveaux souvent positionné au centre d'un bâtiment et facilitant les flux	Pas de tirage thermique si T <sub>ext</sub> et T <sub>int</sub> proches (Moosavi et al., 2014, Modirrousta & Boostani, 2016) Possibilité d'inversion du flux si instabilité du	Comparatif incendie	40 à 80 (Zhang et al., 2021)	Apport important de lumière naturelle au centre du bâtiment Permet de créer un effet de serre pour	Grand volume d'air à chauffer Sensation de froid facilitée Demande beaucoup d'espace	O	O	6,5
		CL VE									

d'air entre les niveaux. Facteurs extérieurs : vent, rayonnement solaire et température (Moosavi et al., 2014) Facteurs internes : besoin d'air neuf, confort attendu, gains internes (Moosavi et al., 2014)	vent (Moosavi et al., 2014) Nécessite un contrôle intelligent des entrées d'air car débits peuvent être trop importants (Moosavi et al., 2014) Vent à 0° meilleur, renouvellement proportionnel à la vitesse du vent et aux nombres d'entrées (Horan & Finn, 2008) Entrée d'air en bas du bâtiment et sortie d'air au point haut (Modirrousta & Boostani, 2016)	chauffer l'intérieur Endosse plusieurs rôles utiles : ventilation, renouveler l'air, ventiler l'air stationnaire, réchauffer l'espace, évacuer l'air chaud (Modirrousta & Boostani, 2016) Sous de nombreuses formes dans l'architecture, offre des vides de qualité	Surchauffe possible
--	--	---	---------------------



<i>Dispositif</i>	<i>Stratégie</i>	<i>Utilité</i>	<i>Description</i>	<i>Verrou technique</i>	<i>Verrou réglementaire</i>	<i>Économie d'énergie (%)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Résidentiel</i>	<i>Terminé</i>	<i>Note LT</i>
<i>Tour à vent</i>	Traverse	CL VE	Air chaud ambiant est capturé dans la tour à vent en journée. Les murs de la tour stockent cette chaleur rafraichissant l'air le jour et restituent cette chaleur la nuit. (Gupta & Tiwari, 2016)	Vent quelconque direction > 1 m/s, rayonnement solaire pas utile (mais peut l'être si ventilateur solaire) Réflecteur solaire pour accentuer le tirage thermique dans zones peu venteuses (Khan et al., 2008)	Pas de verrou réglementaire détecté	43 à 60 pour la climatisation, 90 pour la ventilation (Zhang et al., 2021)	Faible investissement Ouvertures dans toutes les directions permet de capter le vent quel que soit sa direction (Hughes et al., 2012) Possibilité d'installer des colonnes rafraichissantes dans la tour pour améliorer la climatisation (Khan et al., 2008, Gupta & Tiwari, 2016)	Fort impact architectural Vent nécessaire au fonctionnement Courants d'air gênants en hiver Adapté aux climats chauds et secs	O	O	7,5

<i>Dispositif</i>	<i>Stratégie</i>	<i>Utilité</i>	<i>Description</i>	<i>Verrou technique</i>	<i>Verrou réglementaire</i>	<i>Économie d'énergie (%)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Résidentiel</i>	<i>Terminaire</i>	<i>Note LT</i>
<i>Attrape vent</i>	Transversante	VE	Cheminée qui redirige le vent capté en hauteur vers l'intérieur du bâtiment. 3 facteurs déterminants : vitesse du vent extérieur, $\Delta T$ entre intérieur et extérieur, utilisation des ouvertures (Khan et al., 2008)	Renouvellement d'air proportionnel à la vitesse du vent extérieur et à sa direction (meilleur à $0^\circ$ si vent $< 4$ m/s, sinon meilleur à $15^\circ$ ) (Khan et al., 2008)	Pas de verrou réglementaire détecté	Pas de résultat trouvé	/	Fort impact architectural Vent nécessaire au fonctionnement Fonctionne très mal si les fenêtres sont fermées (Khan et al., 2008) Adapté aux climats chauds et secs	O	O	7,5

<i>Dispo sitif</i>	<i>Stratégie</i>	<i>Utilité</i>	<i>Description</i>	<i>Verrou technique</i>	<i>Verrou réglem entaire</i>	<i>Économie d'énergie (%)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénient s</i>	<i>Rési dent iel</i>	<i>Ter ritai re</i>	<i>Note LT</i>
<i>Puits climat ique</i>	Verticale VNAC	CH CL	Espace enterré qui permet un refroidissement ou un chauffage partiel de l'air neuf avant d'être introduit à l'intérieur. Facteurs déterminants : profondeur de la conduite, rayon de la conduite, longueur de la conduite, débit dans la conduite (Yang et al., 2016)	ΔT entre entrée et sortie du puits de 7°C maximum (Yang et al., 2016) Optimum de rayon entre 40 et 50 cm (Yang et al., 2016) Arbitrage du débit dans la conduite pour maximiser le ΔT (plus débit lent, plus ΔT grand) et optimiser la capacité de chauffage ou climatisation (plus débit grand, plus capacité grande) : capacité proportionnelle au produit du débit par ΔT (Yang et al., 2016) Performance du puits climatique meilleure en été qu'en hiver (D'Agostino et al., 2020) Performance peut être améliorée de 73 % et de 11 % pour la climatisation et le	Excavat ion des sols	9 % de chauffage et 23 % de climatisation (D'Agostino et al., 2020), peut monter à 29 % de climatisation	Permet le refroidissement estival naturel et allège le chauffage en hiver Conserve la qualité d'air extérieur (Envirobat Grand Est, 2022) Peut être couplé avec de très nombreux dispositifs : mur trombe, paroi pariétodynami que, cheminée solaire, échangeur de chaleur air- air, etc.	Nécessite d'être couplé à une VMC (Envirobat Grand Est, 2022) Doit être pensé dès la conception	O	O	4,5

# Cartographie

[illegible]

<i>Dispositif</i>	<i>Stratégie</i>	<i>Utilité</i>	<i>Description</i>	<i>Verrou technique</i>	<i>Verrou réglementaire</i>	<i>Économie d'énergie (%)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Résidentiel</i>	<i>Terminaire</i>	<i>Note LT</i>
<i>Pariétodynamique</i>	Traverse nte Mono-orientée	CH	Pariol dont le vitrage est équipé d'ouvertures permettant à l'air extérieur et à l'air intérieur de circuler dans la lame d'air entre les vitrages.	U <sub>w</sub> des fenêtres parietodynamiques difficile à calculer car dynamique et non statique. (Envirobat Grand Est, 2022)	Pas de verrou réglementaire détecté	12 % pour le chauffage et 25 % pour la climatisation (Hajji et al., 2023)	Plusieurs modes de fonctionnement et donc utilisables à toutes les saisons. Permet de chauffer, ventiler et climatiser. Nécessite seulement de changer les châssis en rénovation : intervention possible à tout moment du cycle de vie Facilement utilisable par l'usager, pas besoin d'ouvrir ou de fermer manuellement les fenêtres (Envirobat Grand Est, 2022) Échange grâce à faible pression qui permet un renouvellement	Manque d'études sur le sujet Ne peut fonctionner qu'avec une dépression intérieure de l'ordre de 1 à 2 Pa (Envirobat Grand Est, 2022) → pas associable à une VMC	O	O	7

[illegible]

<i>Dispositif</i>	<i>Stratégie</i>	<i>Utilité</i>	<i>Description</i>	<i>Verrouteur technique</i>	<i>Verrouteur réglementation</i>	<i>Économie d'énergie (%)</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Résidentiel</i>	<i>Terminé</i>	<i>Note LT</i>
<i>Thermosiphon</i>	Verticale VNAC	CL	Système passif qui fait circuler un fluide en utilisant les différences de température et la convection pour rafraîchir ou chauffer des espaces sans moteur ni électricité. Facteurs importants : le ratio entre la surface du panneau et la capacité du réservoir : augmenter ce ratio augmente le $\Delta T$ , le diamètre du tube reliant le réservoir au panneau : un tube trop petit ( $< 0,013$ m) ne permet pas d'avoir un débit suffisant le matin et un tube plus gros permet d'observer une baisse de la température de l'eau plus rapide ( $> 0,0254$ m).	Très dépendant de la météo : si le ciel est couvert, le refroidissement radiatif est bloqué par les nuages et la capacité de refroidissement est grandement diminuée. (Zhao et al., 2017) Fonctionne avec un rayonnement nocturne entre 37 et 150 W/m <sup>2</sup> (Zhao et al., 2017)	Pas de verrou réglementaire détecté	Capacité de refroidissement en 24h de 350 MJ (97 kWh) au Mexique (Porta-Gándara et al., 2020)	Fonctionne sans électricité et continuellement (24h/7d) (Zhao et al., 2017) Plusieurs thermosiphons peuvent être utilisés pour cumuler l'énergie (comme les panneaux solaires) (Zhao et al., 2017) L'eau est refroidie la nuit pour rafraîchir l'air le jour. L'eau rafraîchit peut-être stockée dans un réservoir isotherme. (Porta-Gándara et al., 2020)	Ne suffit pas à assurer les besoins de climatisation du bâtiment (Zhao et al., 2017) Utilisable pour refroidir de petits logements. (Porta-Gándara et al., 2020)	O	M	9

## 4.1. Rôles des dispositifs

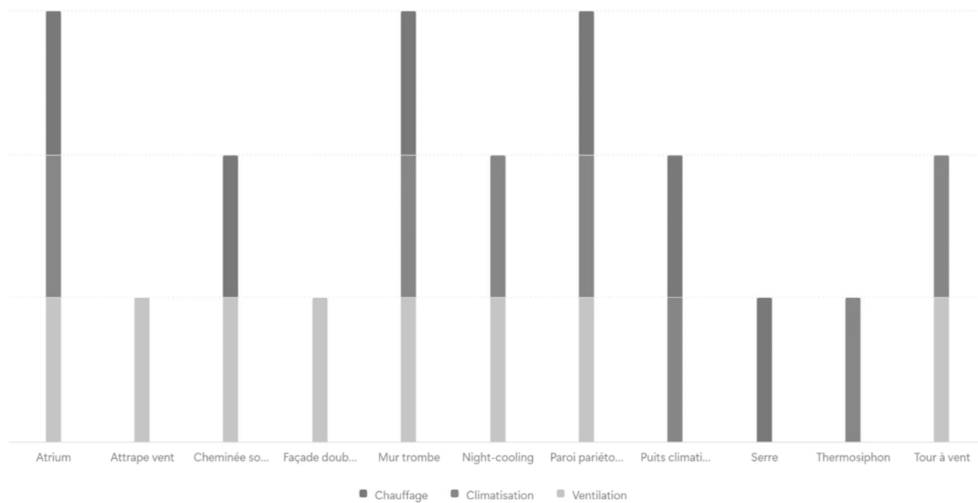


Figure 20 : Rôles des différents dispositifs étudiés (production personnelle)

On peut remarquer que les dispositifs ne jouent pas toujours les mêmes rôles dans un bâtiment, certains permettent uniquement à ventiler (attrape vent ou façade double peau) alors que d'autres permettent de chauffer, de refroidir et de ventiler (mur trombe ou atrium). Il est donc intéressant de noter que selon le dispositif choisi dans un bâtiment, ce dernier ne sera pas forcément en mesure de répondre à tous les besoins en HVAC, l'utilisation de plusieurs dispositifs serait alors nécessaire.

## 4.2. Stratégies utilisées par les dispositifs



Figure 21 : Stratégies de ventilation représentées dans la revue de littérature (production personnelle)

Les deux principales stratégies de ventilation naturelle qui sortent de cette revue de littérature sont le tirage thermique (ventilation verticale) et le tirage éolien (ventilation traversante). Ceci s'explique par l'utilisation privilégiée de ressources naturelles et gratuites dans les dispositifs low tech telles que l'énergie solaire et le vent.



### 4.3. Notes low tech des dispositifs

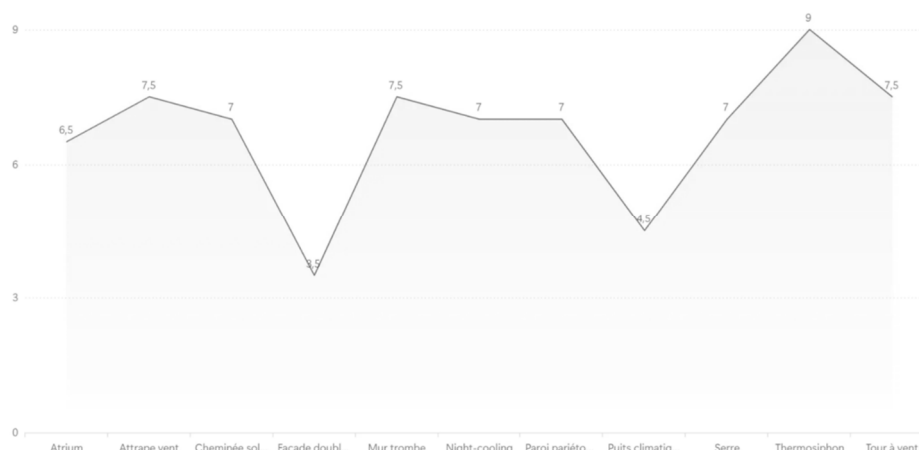


Figure 22 : Notes low tech des dispositifs étudiés (production personnelle)

Catégories	Durabilité forte				Résilience collective				Transformation culturelle				Note LT (/9)
Dispositifs	Sobriété	Efficience	Pérennité	Total (/3)	Maintenabilité	Accessibilité	Autonomisation	Total (/3)	Empouvoirement	Reliance	Simplification	Total (/3)	
Night-cooling	0,5	1	1	2,5	1	1	1	3	0	0,5	1	1,5	7
Mur trombe	1	1	1	3	1	1	1	3	0	0,5	1	1,5	7,5
Façade double-peau	0,5	0,5	0,5	1,5	0	0,5	1	1,5	0	0	0,5	0,5	3,5
Cheminée solaire	1	1	1	3	0,5	1	1	2,5	0	0,5	1	1,5	7
Atrium	0	0,5	1	1,5	1	1	1	3	0,5	1	0,5	2	6,5
Tour à vent	1	1	1	3	1	1	1	3	0,5	0,5	0,5	1,5	7,5
Attrape vent	1	1	1	3	1	1	1	3	0,5	0,5	0,5	1,5	7,5
Puits climatique	0,5	1	1	2,5	0,5	0,5	0	1	0	0,5	0,5	1	4,5
Serre	1	1	1	3	1	1	0,5	2,5	0,5	0,5	0,5	1,5	7
Paroi pariétodynamique	1	1	1	3	1	1	0,5	2,5	0,5	0,5	0,5	1,5	7
Thermosiphon	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	9
	8,5	10	10,5	2,6	9	10	9	2,5	3,5	6	7,5	1,5	6,7

Figure 23 : Notes low tech détaillées pour chaque dispositif (production personnelle)

La revue de littérature des onze dispositifs HVAC low tech est validée par leurs bonnes notes, avec une moyenne de 6,7/9. Ce résultat confirme que les dispositifs sélectionnés s'inscrivent bien dans une démarche low tech. L'écart type de 1,4 démontre une bonne homogénéité, indiquant que les dispositifs se situent globalement au même niveau.

On constate tout de même que la façade double peau et le puits climatique sont des dispositifs jugés moins low tech alors que le thermosiphon coche toutes les cases. En effet, en retirant ces trois dispositifs, on obtient alors un écart type de 0,33 et une moyenne de 7,1/9, ce qui montre encore plus l'homogénéité des huit autres dispositifs du point de vue low tech.

De plus, on constate que ces dispositifs sont dans l'ensemble bien accordés avec les concepts low tech de durabilité forte et de résilience collective (moyennes respectives de 2,6/3 et de 2,5/3) mais jouent un rôle moindre dans la transformation culturelle (moyenne de 1,5/3) et notamment dans l'empouvoirement de ses utilisateurs.

## 4.4. Cartographie des dispositifs

Ainsi, cette revue de littérature permet d'avoir une meilleure vision des dispositifs low tech de HVAC existant et de leurs caractéristiques. Une cartographie des dispositifs étudiés est représentée Figure 24 afin de comprendre les rôles de chacun ainsi que leurs capacités à réaliser des économies d'énergie.

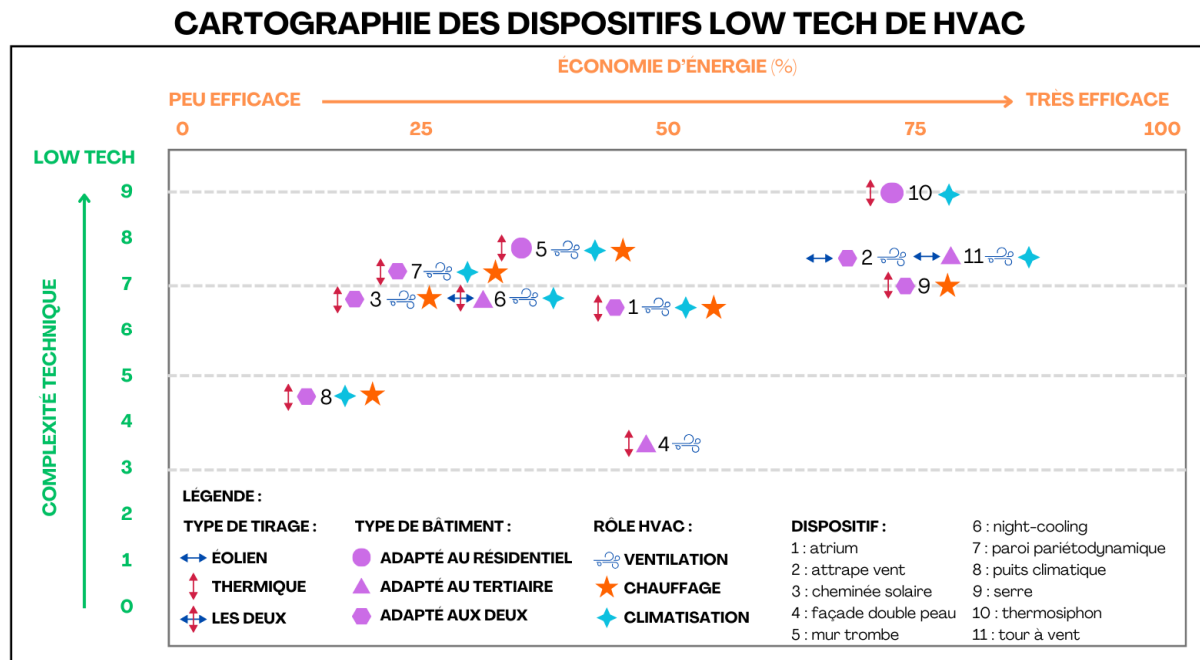


Figure 24 : Cartographie des dispositifs low tech de HVAC étudiés (production personnelle)

La cartographie permet de visualiser pour chaque dispositif son type de fonctionnement (type de tirage, rôle HVAC) et son contexte de fonctionnement (type de bâtiment), le placement sur la carte permet ensuite de connaître l'efficacité du dispositif vis-à-vis des économies d'énergie qu'il permet et sa note low tech.

Les quatre dispositifs les plus efficaces (dispositifs 2, 9, 10 et 11) de cette cartographie ont des spécificités différentes (différents types de tirage, différents rôles HVAC, différents types de bâtiment). Ceci appuie le fait que les dispositifs HVAC low tech peuvent être utilisés dans de très nombreux contextes différents et qu'il existe probablement au moins un dispositif HVAC low tech applicable à chaque cas rencontré.

Plus globalement, les onze dispositifs étudiés balayent un éventail de mise en application très large. Pour le résidentiel comme pour le tertiaire, pour la ventilation, le chauffage ou la climatisation, par un tirage thermique ou éolien, chaque cas peut trouver un dispositif adapté à ses spécificités.

La cartographie permet de désigner le thermosiphon comme étant le dispositif au potentiel le plus intéressant, alliant des économies d'énergie de 75 % et une note low tech de 9/9.

## 5. Présentation de l'objet de l'étude de cas

Dans le cadre de l'étude de cas proposée, le modèle numérique doit avoir une base commune de paramètres afin de comparer les systèmes HVAC de manière égale. Pour créer cette base commune, le bâtiment hébergeant les bureaux de l'entreprise Greisch a été choisi. En effet, ce bâtiment est un exemple avec de nombreux enjeux à relever en termes de HVAC : présence de bureaux paysagés et de bureaux cloisonnés, bâtiment sur deux niveaux avec stratification de la température, gestion des surchauffes en été car fort taux de vitrages dans la partie récente (gains solaires importants), occupation variable et peu prévisible, grands volumes ouverts, etc. Ce bâtiment est donc un cas d'étude intéressant avec de nombreux facteurs à intégrer dans la conception HVAC. Comme nous allons le voir, les techniques HVAC existantes dans le bâtiment reflètent la complexité des enjeux évoqués.

Le bâtiment étudié regorge de techniques et pourrait donc être qualifié de « high tech ». Par exemple, chaque salle de réunion est dotée d'un smartphone permettant de visualiser sa disponibilité et de la réserver si elle est disponible. Le bâtiment produit de l'électricité grâce à sa toiture recouverte de 1080 mètres carrés de panneaux photovoltaïques installés en 2023. Enfin, plusieurs sondes positionnées dans le bâtiment suivent l'évolution des températures, du taux de CO<sub>2</sub> ou de l'humidité relative et sont reliées au système de ventilation. Le système de ventilation est également domotisé avec un pilotage qui se fait via une GTC (Gestion Technique Centralisée), il s'agit d'un moniteur de contrôle qui permet de renseigner les consignes de ventilation, de chauffage et de climatisation mais aussi de contrôler la production d'eau chaude sanitaire ou le réglage des vitrages à teinte variable. L'intégration de dispositifs low tech dans ce genre de bâtiments se révèle alors être un défi.

Une calibration du modèle, bien que jugée pertinente dans une logique de prédiction ou d'optimisation du fonctionnement réel (Carlucci et al., 2018; Cheng et al., 2024; Chong et al., 2021; Vera-Piazzini & Scarpa, 2024) est difficilement réalisable dans ce cas précis.

En effet, la faisabilité d'une calibration est rendue compliquée étant donné qu'une collecte de données sur une longue période et encadrée par une méthodologie dédiée serait nécessaire (Cheng et al., 2024; Chong et al., 2021; Judkoff et al., 2008; Tomrukcu et al., 2024; Vera-Piazzini & Scarpa, 2024). En réalité, des données de mesures dans le bâtiment sont disponibles mais ces données sont éparses et de ce fait non traitables.

Cependant, il reste nécessaire de vérifier le modèle pour s'assurer de sa bonne représentativité de la réalité. La méthodologie appliquée dans ce mémoire pour l'étude de cas est donc la méthodologie de validation proposée par Judkoff et al. (2008).

Nous réalisons donc dans ce mémoire une étude comparative (Judkoff et al., 2008) avec comme hypothèse retenue que, en maintenant constants tous les autres paramètres (enveloppe, occupation, conditions climatiques, etc.), la comparaison entre système A et système B est valide.

Pour les mêmes raisons que celles qui ne permettent pas la calibration, la validation empirique n'est pas réalisable dans notre cas. En outre, la vérification analytique est possible selon la norme *ASHRAE 140-2023* et est donc effectuée avec le BESTEST Case 600 (cf. partie 3.2.1).

Concernant l'étude comparative, le bâtiment du cas d'étude permet de réaliser le modèle de référence sur la base duquel deux systèmes HVAC seront évalués. Ce modèle regroupe donc la géométrie, les gains internes (occupation, équipements et luminaires) et l'enveloppe.

Pour le choix du système A, il est nécessaire de créer un système dimensionné au bâtiment. Il paraît alors logique de répliquer le système HVAC existant du bâtiment en tant que système A de l'étude.

Pour le choix du système B, la revue de littérature, la mise en valeur des atouts du bâtiment et de son contexte ainsi que des prédimensionnements sont nécessaires.

Les deux solutions peuvent ensuite être comparées et leurs avantages et inconvénients évalués (cf. partie 3.2.3). Le but est de déterminer les différences de consommation énergétique des deux systèmes et les différences de températures intérieures dans le bâtiment mais aussi d'encourager l'utilisation de dispositifs low tech afin de minimiser l'utilisation des systèmes mécaniques de HVAC.

### 5.1. Localisation et climat

L'étude de cas proposée porte sur un bâtiment de bureaux situé à proximité de la forêt du Sart-Tilman, à Allée des Noisetiers, 25. Le bâtiment a été construit en 1994 et a subi des modifications depuis comme une extension et des changements de châssis. Le bâtiment abrite depuis sa construction les bureaux du bureau d'études Greisch ainsi que de l'agence d'architecture Canevas.



Figure 25 : Vue satellite de 2023 du bâtiment (WalOnMap)

Le bâtiment profite d'une exposition nord-sud qui lui permet d'exploiter les gains solaires et la pente naturelle du terrain en sa faveur. Un parking d'une centaine de places se situe au sud et sépare la route du bâtiment. La forêt du Sart Tilman entoure le reste du site et offre un ombrage et une fraîcheur naturelle.



Figure 26: Vue en drone du bâtiment de 2008 avant l'installation des panneaux photovoltaïques (photo-daylight.com)

Le choix du fichier météo a été fait avec l'aide de Greisch. Le bureau dispose d'un fichier météo TMY (Typical Meteorological Year) de Liège. Il s'agit d'une année météorologique typique qui est réalisée à l'aide des données météo des dix à vingt dernières années (température, humidité relative, rayonnement solaire ...).

Dans les fichiers TMY, les événements météorologiques rares et extrêmes sont donc discriminés car peu fréquents, ce type de fichier est utilisé pour étudier le comportement des bâtiments dans des conditions météorologiques classiques (Attia, 2024b). Les fichiers TMY sont généralement élaborés avec des anciennetés de 30 ans de données météorologiques, ils contiennent des valeurs heure par heure pour une année entière et sont spécifiquement destinés à la simulation énergétique des bâtiments, notamment pour comparer différents systèmes dans un bâtiment (Attia, 2024b).

Dans IES-VE, les bâtiments alentour et la végétation ont été modélisés pour rendre compte de l'impact possible de l'ombre portée et la caducité des arbres a également été modélisée en ajustant selon le mois de l'année le facteur de transmissivité. Les coordonnées exactes du bâtiment ont été renseignées ainsi que l'orientation du bâtiment.



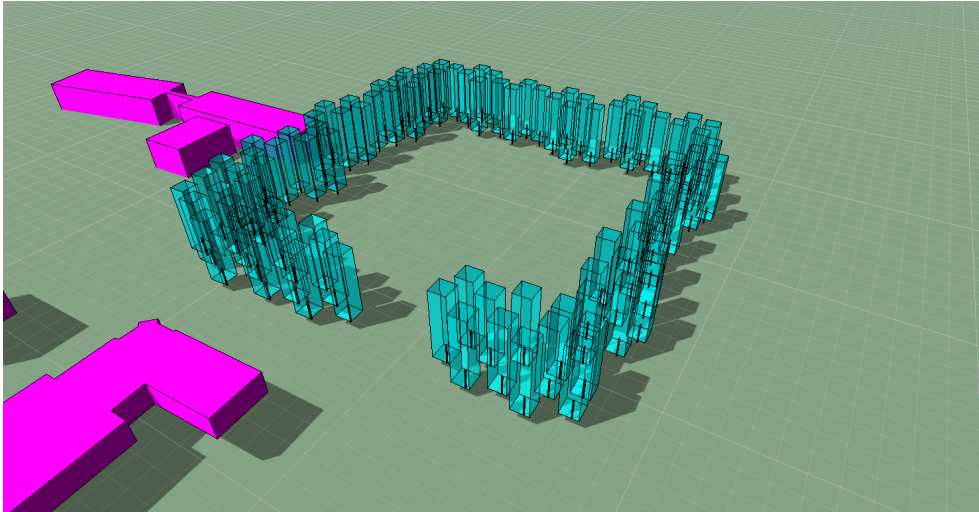


Figure 27 : Vue de IES-VE du contexte autour du bâtiment (production personnelle)

Une fois ces éléments intégrés au modèle, il est possible de débiter à modéliser la géométrie du bâtiment.

### 5.2. Géométrie du bâtiment

Le bâtiment initial contient le volume principal sur deux niveaux de 2000 m<sup>2</sup> de plancher. En 2008, une extension au nord a été réalisée avec la construction d'un atrium sur deux niveaux et d'un volume secondaire composé de deux plateaux de 320 m<sup>2</sup> chacun.

Dans sa conception, le bâtiment est modulable avec une structure poteau poutre en trames régulières de 4,80 m et un plan libre sur les deux niveaux (Figure 28). On y retrouve des bureaux paysagés organisés par domaines (énergie, électricité, techniques spéciales, structure ...) et des salles de réunions au sud. Les espaces techniques se situent en sous-sol et dans les combles. En effet, le bâtiment profite de la pente du terrain pour avoir une partie de ses locaux enterrés (Figure 29).

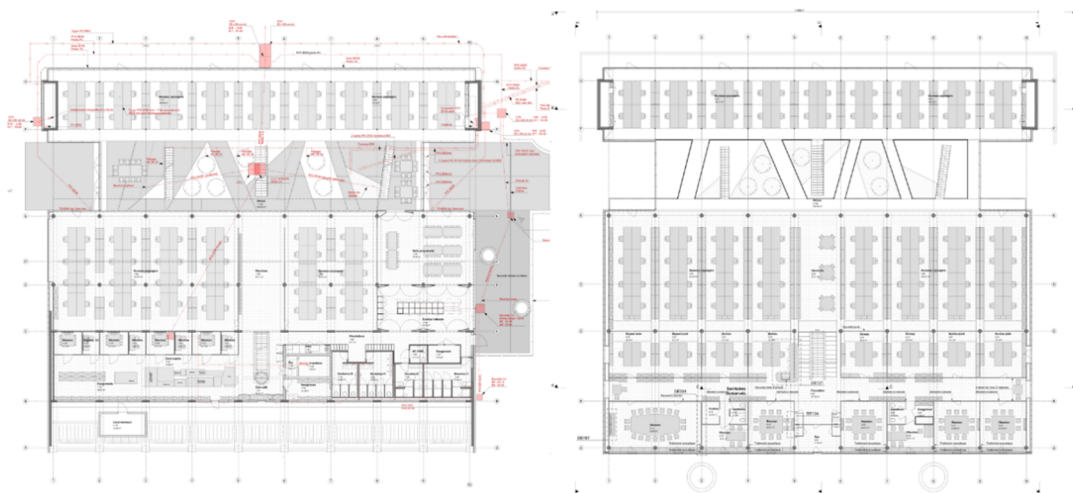


Figure 28 : Plans du R-1 (à gauche) et du RDC (à droite) du bâtiment (Greisch)

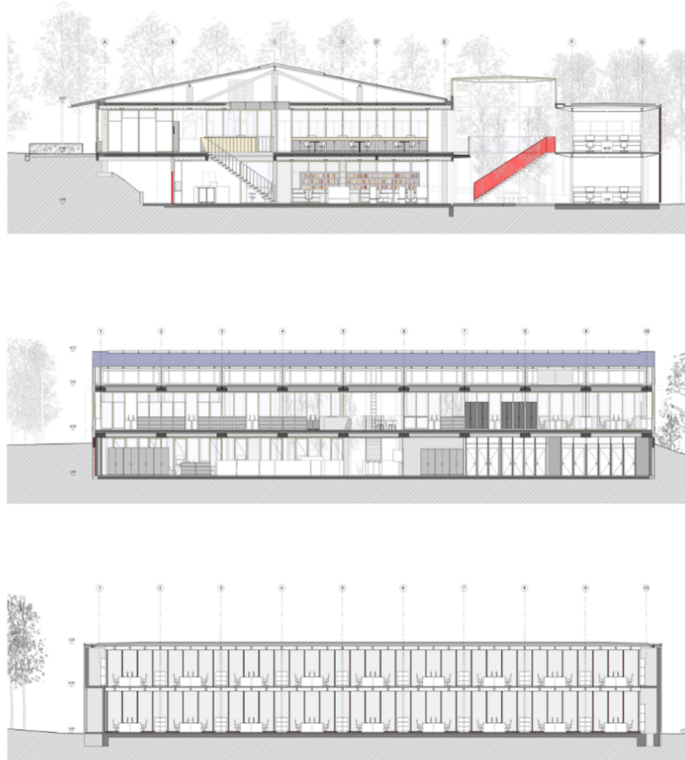


Figure 29 : Coupes du bâtiment (Greisch)

Dans IES-VE, nous nous intéressons au comportement énergétique du bâtiment, il n'est donc pas nécessaire de reproduire le système structural et les épaisseurs de parois. Les particularités de chaque élément peuvent être renseignées par la suite dans le logiciel, mais la représentation dans le logiciel reste toujours une surface plane. La géométrie du bâtiment a donc été simplifiée puis modélisée dans un premier temps sur SketchUp, puis transférée vers IES-VE. Les éléments modélisés sont les murs extérieurs, les dalles, les toits, les vitrages et les casquettes solaires (Figure 30). Une fois importé dans IES-VE, le modèle peut être découpé en différentes pièces, le découpage suit les plans du bâtiment existant. Les vitrages ont également été découpés par châssis (Figure 31).

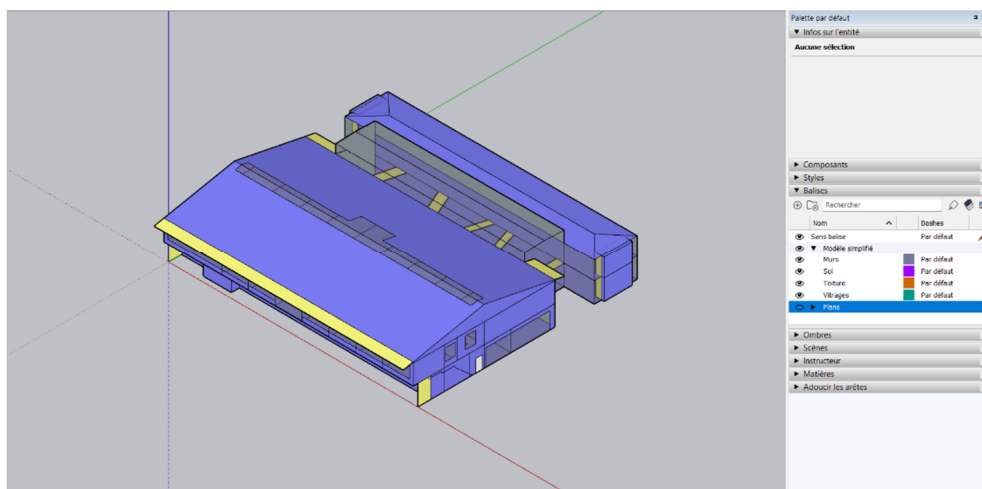


Figure 30 : Maquette simplifiée du bâtiment dans SketchUp avant export vers IES-VE (production personnelle)

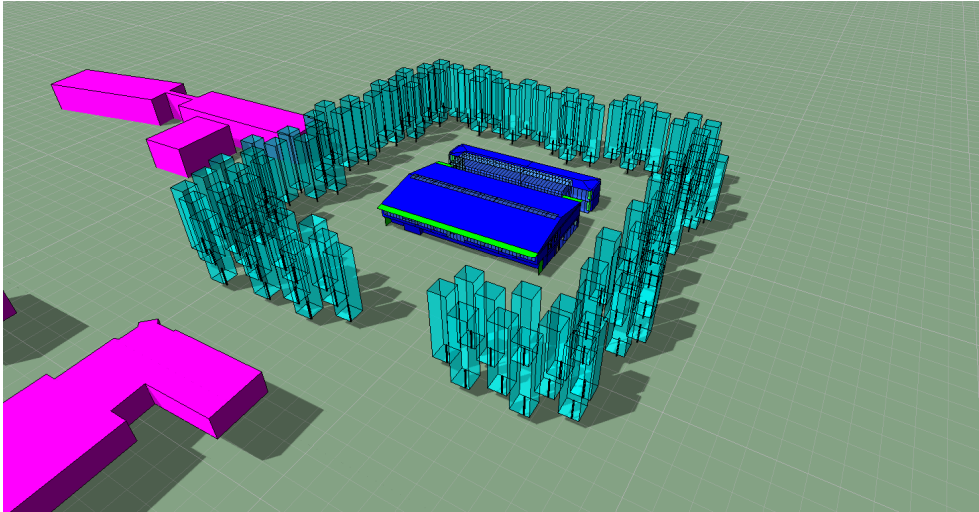


Figure 31 : Vue de IES-VE du bâtiment dans son contexte (production personnelle)

Afin de mieux prendre en compte l'effet de stratification de la chaleur dans les grands volumes comme celui de l'atrium, ce dernier a été découpé en quatre zones qui permettront de faire la différence entre la température dans la zone occupée (au niveau du sol) et dans les zones supérieures.

La modélisation de la géométrie est terminée et il faut maintenant renseigner les informations concernant les matériaux présents dans le bâtiment.

### 5.3. Enveloppe du bâtiment

Le bâtiment initial est en structure béton et a une forte inertie tandis que l'extension est en structure métallique et a une faible inertie car elle est fortement vitrée, au même titre que l'atrium.

La recherche des compositions de parois des différentes parties du bâtiment a été menée en recherchant les différents plans réalisés au fil du temps et des travaux opérés. Une synthèse des différentes compositions et des différents vitrages mis en œuvre a été réalisée (cf. annexe A).

La valeur la plus importante d'une composition de paroi dans ce travail est son coefficient de transmission thermique  $U$  exprimé en  $W/m^2.K$ . Cette valeur dépend des matériaux mis en œuvre dans la paroi, notamment des isolants choisis, ainsi que de leurs épaisseurs. Inverse de la résistance thermique de la paroi, plus le  $U$  est faible, plus l'isolation thermique de la paroi est efficace.

On retrouve dans le Tableau 11 la liste des épaisseurs et des valeurs  $U$  calculées sur IES-VE à partir des compositions de parois données en annexe A pour l'ensemble des éléments du bâtiment.



Tableau 11 : Caractéristiques thermiques des éléments du bâtiment (production personnelle)

	<i>Elément</i>	<i>Valeur U [W/m².K]</i>	<i>Epaisseur [mm]</i>
<i>Bâtiment initial</i>	Murs extérieurs	0,26	370
	Toit	0,23	216
	Dalle sur sol	0,54	510
	Dalle intermédiaire	0,49	290
<i>Atrium</i>	Dalle sur sol	1,19	530
<i>Extension</i>	Murs extérieurs	0,36	340
	Toit	0,18	361
	Dalle sur sol	1,01	680
	Dalle intermédiaire	0,49	290

Concernant les vitrages, la modélisation de la géométrie du bâtiment permet de calculer les taux de vitrages du bâtiment pour mettre en lumière les différences entre le bâtiment initial, l'atrium et l'extension. Le bâtiment initial a un ratio de vitrages de 24 %, l'atrium est complètement vitré et a donc un ratio de 100 %, l'extension est fortement vitrée avec un ratio de vitrages de 84 %.

Une rénovation des vitrages a été réalisée en 2018, avec le changement de certains châssis et l'installation de vitrages à teintes variables dans l'atrium. Ces vitrages high tech possèdent des cellules électrochromes sur la face intérieure du vitrage extérieur qui s'obscurcissent selon le courant électrique qu'elles reçoivent. Deux luxmètres, reliés au système de commande des vitrages, sont installés sur la toiture et mesurent le taux d'ensoleillement. Ils permettent de moduler la teinte des vitrages selon la luminosité intérieure désirée. Les vitrages atteignent, en mode sombre, une transmission lumineuse de 1 % et un facteur solaire  $g$  de 0,04. En mode clair, la transmission lumineuse est de 54 % et le facteur solaire égal à 0,37.

Le facteur solaire du vitrage est le rapport entre le rayonnement solaire qui pénètre effectivement dans le bâtiment et le rayonnement solaire qui atteint la surface extérieure de la vitre pièce (Energie Plus, 2007). Les gains solaires se composent donc du rayonnement directement transmis à travers la fenêtre et du rayonnement absorbé par la fenêtre et réémis à l'intérieur de la pièce (Energie Plus, 2007). Ainsi, plus un vitrage a un facteur solaire élevé, plus il augmente les gains solaires de la pièce où il se trouve. La transmission lumineuse est le taux de lumière transmis à l'intérieur du bâtiment, l'autre partie de la lumière étant réfléchi ou absorbée par le vitrage pièce (Energie Plus, 2007). Un vitrage teinté a une transmission lumineuse plus faible qu'un vitrage transparent.

Les valeurs  $U$  sont tout aussi importantes que pour les parois car les vitrages constituent un point de faiblesse thermique des bâtiments (déperditions thermiques par les châssis et les

vitrages) (Energie Plus, 2007). Les valeurs  $U$  d'un vitrage se décomposent en deux valeurs : le coefficient de transmission thermique de la partie vitrée  $U_g$  et celui de la fenêtre entière (châssis et vitres)  $U_w$  pièce (Energie Plus, 2007).

Le bâtiment a connu des rénovations dans sa vie et on retrouve donc différents types de vitrages. Par manque d'informations sur les vitrages, on suppose que les vitrages installés en 2000 ont des valeurs des standards de l'époque qui étaient de  $2,4 \text{ W/m}^2.\text{K}$ . Pour les vitrages plus récents, on dispose des fiches techniques et on peut donc encoder dans IES-VE les valeurs réelles. Le Tableau 12 résume les différents vitrages dans le bâtiment.

Tableau 12 : Caractéristiques thermiques des vitrages du bâtiment (production personnelle)

<i>Vitrage</i>	<i><math>U_w [\text{W/m}^2.\text{K}]</math></i>	<i><math>U_g [\text{W/m}^2.\text{K}]</math></i>	<i>Facteur solaire <math>g</math></i>
2000	2,53	2,40	0,5
2008	1,50	1,25	0,4
2018	1,36	1,05	0,4
<i>Atrium : teinte variable</i>	1,34	1,10	0,37 à 0,04
<i>Atrium : vitrage solaire</i>	1,30	1,01	0,27
<i>Panneaux polycarbonate</i>	1,39	1,11	0,38

Les différents éléments peuvent être créés dans IES-VE et appliqués aux géométries correspondantes.

### 5.4. Gains internes

Afin de représenter l'activité du bâtiment dans IES-VE, il est primordial de renseigner les gains internes de chaque pièce. Les gains internes représentent l'ensemble de la production de chaleur provoquée par le fonctionnement d'équipements dans une pièce, la présence de personnes ou encore les luminaires. Il s'agit donc de sources de chaleur présentes dans la pièce et qui ne sont pas destinées à chauffer l'espace en premier lieu.

Le bâtiment contient de nombreux espaces aux usages différents. Afin de représenter fidèlement les différentes fonctions des pièces, on peut les regrouper par zones. Ceci permet d'encoder dans le logiciel les apports internes selon les locaux et simplifie le modèle de 67 locaux en 10 zones pour cette tâche.

Tableau 13 : Attribution des différents locaux dans les 10 zones

<b>ZONE 1</b>	<b>ZONE 2</b>	<b>ZONE 3</b>	<b>ZONE 4</b>	<b>ZONE 5</b>	<b>ZONE 6</b>	<b>ZONE 7</b>	<b>ZONE 8</b>	<b>ZONE 9</b>	<b>ZONE 10</b>
<b>Bureaux isoles</b>	<b>Bureaux open space</b>	<b>Bureaux extensio n</b>	<b>Réunion interne</b>	<b>Réunion</b>	<b>Espace partage</b>	<b>Espace cuisine</b>	<b>Sanitaires</b>	<b>Atrium</b>	<b>Autres</b>
1_Bureau isole 1	0_Bureaux 1	0_Bureaux extension archi	0_Reunio n 1	1_Reunio n 10	0_Circulati ons	0_Cuisine	0_Douche s F	0_Atrium	0_Chauffage rie
1_Bureau isole 2	0_Bureaux 2	0_Bureaux extension metal	0_Reunio n 2	1_Reunio n 11	0_Salle polyvalent e	1_Cuisine	0_Douche s H		0_Couloir technique
1_Bureau isole 3	1_Bureaux 10	1_Bureaux extension Est	0_Reunio n 3	1_Reunio n 12	0_Zone imprimant es		0_Sanitaires F		0_Data
1_Bureau isole 4	1_Bureaux 3	1_Bureaux extension Ouest	0_Reunio n 4	1_Reunio n 13	0_Travee centrale		0_Sanitaires H		0_Local Serveurs
1_Bureau isole 5	1_Bureaux 4		0_Reunio n 5	1_Reunio n 14	1_Circulati ons		0_Sanitaires PMR		0_Rangem ent 1
1_Bureau isole 6	1_Bureaux 5		0_Reunio n 6	1_Reunio n 15	1_Entree		1_Sanitaire e F		0_Rangem ent 2
1_Bureau isole 7	1_Bureaux 6		0_Reunio n 7	1_Reunio n 16	1_Travee centrale		1_Sanitaire e H		0_Rangem ent Relieuse
1_Bureau isole 8	1_Bureaux 7		0_Reunio n 8				1_Sanitaires mixte		1_Gaine technique
	1_Bureaux 8								1_Local rangemen t 1
	1_Bureaux 9								1_Local rangemen t 2
									1_Rangem ent
									2_Comble s

Le bâtiment est ainsi séparé en différentes zones représentant les pièces dédiées à telle ou telle activité. La détermination des gains internes repose sur des hypothèses et des observations du fonctionnement du bureau. On peut diviser les gains internes en trois types de gains : l'occupation, les équipements et l'éclairage. Pour chaque gain, il faut déterminer la puissance générée et le profil horaire selon lequel cette puissance est générée.

### a) Occupation :

Les gains liés à l'occupation correspondent aux gains issus de la chaleur dégagée par les personnes, cette chaleur dépend du taux métabolique, qui dépend de la morphologie d'une personne, et de son activité (au repos, en train de fournir un effort intense ...).

La valeur de la chaleur émise par une personne retenue est la moyenne entre le taux métabolique d'un homme adulte et d'une femme adulte. Le bureau étant composé d'une part environ similaire de femmes et d'hommes, cette moyenne peut être utilisée. La norme NBN EN ISO

8996 (2004) donne des valeurs de puissance surfacique selon l'activité comme présenté dans le tableau B.3 de la norme (Figure 32).

**Tableau B.3 — Métabolisme pour des activités spécifiques**

Activités	W.m <sup>-2</sup>
Sommeil	40
Allongé	45
Au repos, assis	55
Au repos, debout	70
Marche sur un terrain plat, régulier et dur	
1. sans charge à 2 km.h <sup>-1</sup>	110
à 3 km.h <sup>-1</sup>	140
à 4 km.h <sup>-1</sup>	165
à 5 km.h <sup>-1</sup>	200
2. avec charge 10 kg, à 4 km.h <sup>-1</sup>	185
30 kg, à 4 km.h <sup>-1</sup>	250
Marche en montant sur un terrain régulier et dur	
1. sans charge pente de 5°, à 4 km.h <sup>-1</sup>	180
pente de 15°, à 3 km.h <sup>-1</sup>	210
pente de 25°, à 3 km.h <sup>-1</sup>	300
2. avec une charge de 20 kg pente de 15°, à 4 km.h <sup>-1</sup>	270
pente de 25°, à 4 km.h <sup>-1</sup>	410
Marche en descendant à 5 km.h <sup>-1</sup> , sans charge pente de 5°	135
pente de 15°	140
pente de 25°	180
Monter à une échelle inclinée à 70° à une vitesse de 11,2 m.min <sup>-1</sup>	
sans charge	290
avec une charge de 20 kg	360
Pousser ou tirer un wagonnet à bascule, à 3,6 km.h <sup>-1</sup> , sur un terrain régulier et dur	
force de poussée: 12 kg	290
force de traction: 16 kg	375
Pousser une brouette sur un terrain régulier, à 4,5 km.h <sup>-1</sup> , roues à bandage en caoutchouc, charge de 100 kg	230
Limage de fer 42 coups de lime/min	100
60 coups de lime/min	190
Travail au marteau, 2 mains, poids du marteau 4,4 kg, 15 coups/min	290
Travail de menuiserie sciage à la main	220
sciage à la machine	100
planage à la main	300
Pose de briques, 5 briques/min	170
Visser	100
Creuser une tranchée	290
Activité sédentaire (bureau, habitation, école, laboratoire)	70
Activité légère debout (magasin, laboratoire, industrie légère)	95
Activité modérée debout (vendeur, travaux domestiques, travail à la machine)	115
Travail avec machine-outil	
léger (réglage, assemblage)	100
moyen (chargement)	140
intense	210
Travail avec outil à main	
léger (polissage léger)	100
moyen (polissage)	160
intense (perçage intense)	230

Figure 32 : Tableau B.3 de la norme NBN EN ISO 8996, 2004

La surface corporelle peut être calculée à l'aide de la formule de Dubois :

$$A_{Du} = 0,202. W_b^{0,425} \times H_b^{0,725}$$

Avec  $W_b$  le poids de la personne en kilogrammes et  $H_b$  la taille de la personne en centimètres. En prenant les valeurs moyennes du poids et de la taille d'un homme et d'une femme adulte en

Belgique, on peut obtenir la puissance totale dégagée par un individu qui est égale à 129 W/personne pour une personne au repos et assise. Cette puissance se décompose en une partie sensible de 80 W et une partie latente de 49 W, rappelons ici que seule la partie sensible influe sur la température.

Le nombre d'occupants par pièce a été déterminé en comptant le nombre de postes de travail disponibles pour les bureaux paysagés et les bureaux cloisonnés. Pour les salles de réunions, c'est le nombre de places disponibles dans la salle qui a été retenu. Dans les sanitaires et les locaux techniques, l'occupation a été supposée nulle.

L'occupation s'exprime en m<sup>2</sup> par personne, il faut donc la calculer avec les surfaces de chaque pièce qui sont données par IES-VE. La moyenne des occupations de pièces est calculée pour chaque zone et peut être renseignée dans IES-VE. Afin de valider le zonage précédemment effectué, l'écart type de l'occupation est calculé pour s'assurer de l'homogénéité des pièces d'une zone.

Tableau 14 : Résultats des valeurs d'occupation par zone (production personnelle)

Zone	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Moyenne [m <sup>2</sup> /pers]	11,9	7,6	5,3	2,1	3,1	1,7	4,6	/	/	/
Écart-type [m <sup>2</sup> /pers]	0,8	0,7	0,2	0,2	0,5	/	0,4	/	/	/

### b) Équipements :

Les gains internes associés aux équipements sont liés à la puissance de consommation des équipements. Le bureau Greisch a mené une campagne de mesures de puissance consommée sur différents équipements : tour de contrôle d'un poste d'ingénieur, tour de contrôle d'un poste de dessinateur, écran moniteur, ordinateur portable, photocopieur professionnel, vidéoprojecteur, télévision. D'autres équipements ont dû être ajoutés comme un réfrigérateur ou un micro-ondes et sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Puissance de différents équipements (production personnelle)

Équipement	Photocopieur	UC Dessinateur	UC Ingénieur	Ordinateur portable	Écran moniteur	Vidéoprojecteur	Télévision	Micro-ondes	Réfrigérateur
Puissance [W]	40	175	60	20	15	270	81	750	150

De la même manière que pour l'occupation, les différents équipements ont été comptés pour chaque poste de travail et dans les salles de réunions.

Les équipements s'expriment en watts par m<sup>2</sup> pour chaque pièce et la même méthode de calcul a été réalisée que pour l'occupation. Les valeurs selon les différentes zones sont présentées Tableau 16.

Tableau 16 : Résultats des puissances des équipements par zone (production personnelle)

Zone	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Moyenne [W/m <sup>2</sup> ]	9,3	7,9	14,4	19,5	10	1,2	211,9	/	/	/
Écart-type [W/m <sup>2</sup> ]	0,5	0,8	3,9	4,5	1,4	2,2	247,7	/	/	/

N.B. : la zone 7 a des gains internes en équipements significativement plus importants que les autres zones, il s'agit des espaces de cuisines où les employés peuvent préparer ou réchauffer des plats. De ce fait, de nombreux équipements énergivores sont présents dans ces locaux. L'écart-type est important car les deux cuisines du bâtiment ne sont pas de la même taille (13 m<sup>2</sup> pour la cuisine du RDC et 49 m<sup>2</sup> pour celle du R-1).

### c) Éclairage :

La dernière source de gain interne est l'éclairage. La norme NBN EN 15193 (2017) donne la consommation d'énergie liée à l'éclairage. Une approximation de la consommation moyenne d'énergie du bâtiment pour l'éclairage de 6 W/m<sup>2</sup> dans chaque pièce est recommandée par la norme et a donc été appliquée.

En supplément des puissances, il est nécessaire de renseigner les profils d'occupation, d'utilisation des équipements et d'éclairage. Ces profils sont différents selon les zones, par exemple, les espaces partagés sont d'avantage occupés sur le temps de midi, les bureaux sont plus remplis en milieu de journée qu'en début de matinée, les équipements des postes de travail suivent l'évolution de l'occupation de ces postes, etc. Afin de prendre cela en considération, des profils journaliers pour chaque zone ont été renseignés. De plus, les weekends et jours fériés sont des jours où le bureau est fermé, il est possible de renseigner ces informations dans IES-VE également. L'ensemble des profils est mis à disposition en annexe B.

## 6. Résultats de l'étude de cas

Les résultats des simulations permettent de quantifier l'impact de l'intégration du dispositif de night-cooling associé à l'atrium et de valider ou d'invalidier sa pertinence dans ce cas d'étude. Les différents indicateurs mentionnés dans la partie 3.2.3 sont comparés et expliqués ci-dessous.

### 6.1. Modèle avec un système HVAC mécanique : système A

Afin de modéliser un système HVAC réaliste et mécanique, le système existant du bâtiment a été pris comme référence. Nous savons que ce système est dimensionné aux besoins du bâtiment, sa reproduction la plus fidèle dans le modèle numérique permettra alors d'avoir un système HVAC fonctionnel et très proche de la réalité.

#### 6.1.1. Description du système A

Concernant la HVAC, le bâtiment fonctionne par ventilation mécanique double flux avec récupération de chaleur (à roue ou à plaques). Le chauffage est assuré par une chaudière à condensation d'une puissance de 160 kW et la climatisation par une machine frigorifique d'une puissance de 150 kW. La ventilation est effectuée en débits constants (CAV) ou variables (VAV) par trois groupes de pulsion et d'extraction (GPGE) différents ainsi qu'un groupe de pulsion (GP) auxiliaire dédié à l'atrium. Dans l'atrium, un système de recyclage de l'air et de brassage est mis en place afin d'éviter la stratification de l'air par température (niveau supérieur plus chaud que le niveau inférieur), cette technologie brevetée s'appelle Mix-Ind®. On peut synthétiser l'attribution de chaque système de ventilation, de chauffage et de climatisation dans les Figure 33 et Figure 34.

Lorsqu'on étudie le fonctionnement de la HVAC du bâtiment, il faut se rappeler l'histoire de celui-ci qui a été construit en deux temps avec l'ajout en 2008 de l'atrium et de l'extension. Cette intervention a nécessité l'ajout de trois groupes de ventilation (GPGE2, GPGE3 et GP1a) et l'adaptation des systèmes de chauffage et de climatisation.

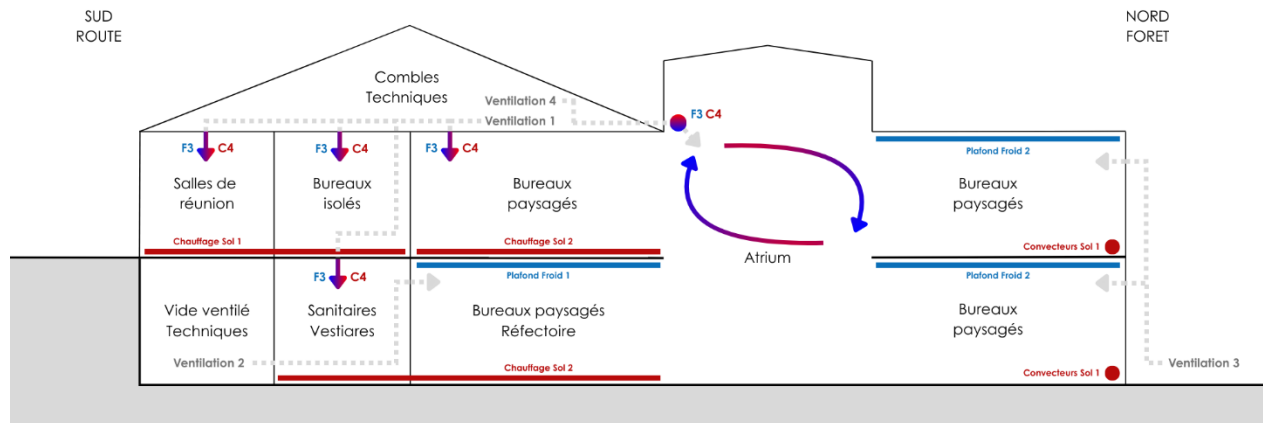


Figure 33 : Synthèse du fonctionnement de la HVAC dans le bâtiment (production personnelle)

Groupes	Ventilation	Chauffage	Climatisation
GPGE 1	Air neuf et recyclé - Roue de récupération de chaleur - CAV + VAV	C4 - Batterie chaude    C2 et C3 - Chauffage sol	F3 - Batterie froide
GPGE 2	Air neuf - Récupérateur à plaque CAV	/    C2 - Chauffage sol	F2 - Plafonds froids
GPGE 3	Air neuf - Récupérateur à plaque CAV	/    C1 - Convecteurs sol	F1 - Plafonds froids
GP1a	Air recyclé	C4 - Batterie chaude    /	F3 - Batterie froide

Figure 34 : Tableau des différentes spécificités de chaque groupe pour la ventilation, le chauffage et la climatisation (production personnelle)

L'encodage du système HVAC du bâtiment dans IES-VE est une étape délicate. Le module Apache HVAC disponible dans le logiciel permet de dessiner le système HVAC et d'y appliquer différentes consignes avec des possibilités de contrôles multiples (Figure 35). Le module permet de répliquer de nombreux modèles HVAC.

Les débits encodés sont les débits de consignes de chaque local qui sont effectivement pulsés et extraits. Les puissances de chauffage et de climatisation ont été calculées pour chaque local en fonction de la puissance disponible de chaque type d'élément (convecteur, chauffage sol et plafond froid) et de la superficie de chaque local. Enfin, les consignes du GTC ont été répliquées pour les seuils d'activation et d'arrêt des batteries chaudes et froides. L'ensemble de ces paramètres d'entrée et l'explication de la modélisation du fichier sont disponibles en annexe C.

Certaines simplifications ont été réalisées afin de rendre la modélisation moins complexe. Le GPGE2 qui alimente un bureau paysagé du R-1 a été incorporé dans le GPGE1 qui alimente tous les autres locaux du bâtiment initial. Les locaux ventilés en débits variables sont ventilés en débits constants. Les chauffages sols sont modélisés comme des apports de chaleurs directs au sein des locaux concernés. Ces simplifications ne compromettent pas l'obtention de résultats réalistes car les hypothèses posées pourraient être mises en place dans un cas réel.



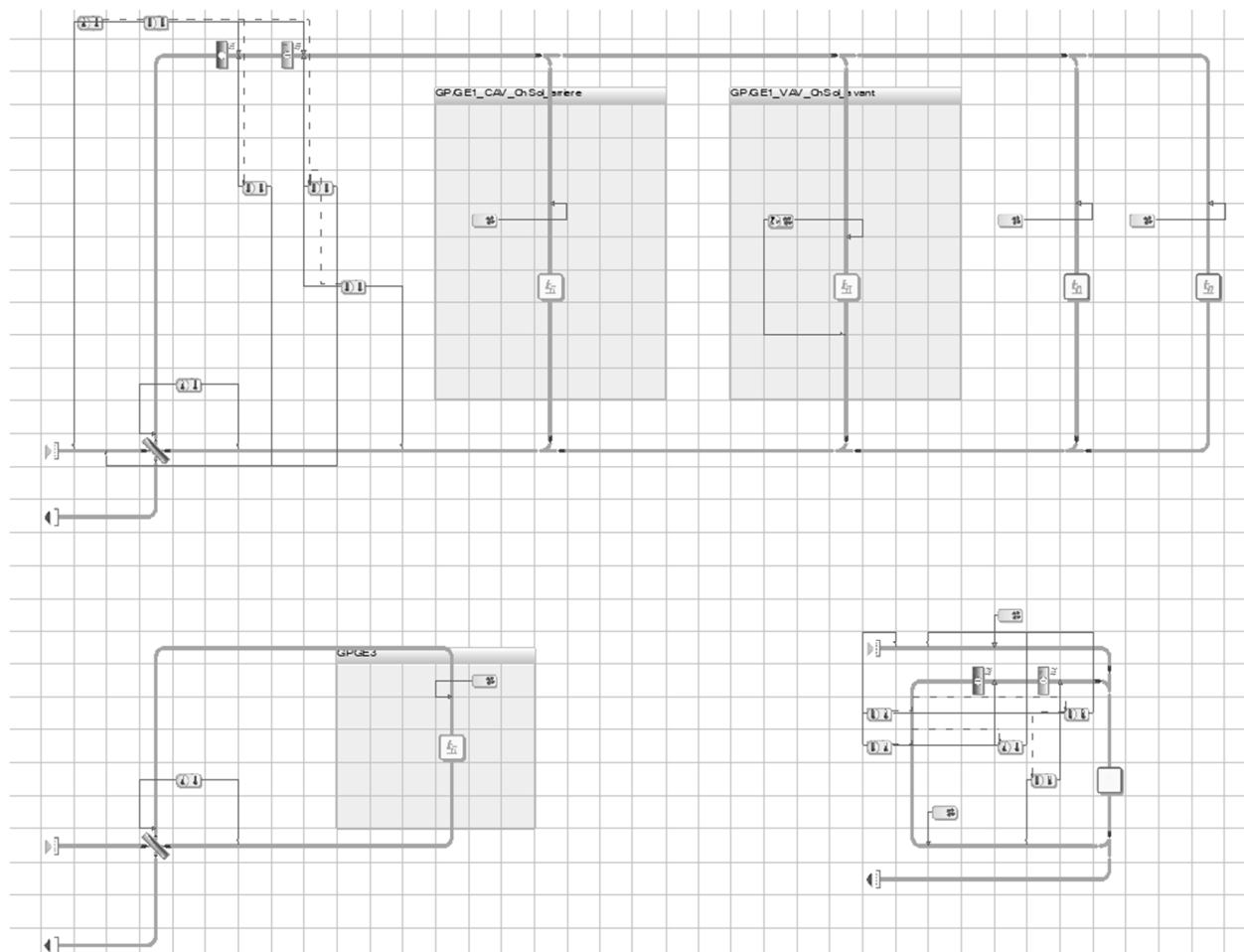


Figure 35 : Système HVAC modélisé dans le module Apache HVAC

## 6.1.2. Vérification du modèle

Pour vérifier le modèle, la méthodologie du BESTEST a été suivie et le BESTEST Case 600 a été modélisé dans le fichier du bâtiment (cf. 3.2.1). Puis une simulation a été lancée en changeant la localisation du projet de Liège à Denver, Colorado et le fichier météo. Les résultats obtenus et l'erreur relative entre les valeurs de la norme *ASHRAE 140-2023* (2023) et celles simulées sont présentés dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Résultats de la vérification du modèle selon le BESTEST Case 600

<b>BESTEST Case 600</b>	<b>Demande annuelle d'énergie pour le chauffage (MWh)</b>	<b>Charge horaire maximale de chauffage (kW)</b>	<b>Demande annuelle d'énergie pour le refroidissement (MWh)</b>	<b>Charge horaire maximale de refroidissement (kW)</b>
<i>ASHRAE 140-2023</i>	5,343	4,015	6,456	6,558
<i>Modèle IES-VE</i>	5,535	4,201	6,304	6,61
<i>Erreur relative (%)</i>	3,6%	4,6%	2,4%	0,8%

Les résultats de la simulation permettent de vérifier que le logiciel calcule correctement les valeurs de chaud et de froid. Le modèle est donc vérifié et obtient des résultats réalistes avec une erreur relative de 2,8 % en moyenne.

## 6.2. Modèle avec ajout d'un dispositif HVAC low tech : système B

### 6.2.1. Choix du dispositif

Le choix du dispositif à mettre en place suit la méthodologie proposée en 3.2.2.

#### a) Analyse du potentiel de ventilation naturelle :

##### Qualité de l'air :

L'air extérieur est de bonne qualité (milieu forestier) et il n'y a pas de nuisances sonores (Figure 36). Il n'y a donc aucune contre-indication à la mise en place de ventilation naturelle dans le bâtiment.



Figure 36 : Bruit des axes routiers (WalOnMap, 2012)

##### Vent sur le site :

Grâce aux données de la station de mesures de l'aéroport de Liège situé à 9 km du bâtiment, on constate que le vent dominant est un vent orienté vers le Sud-Ouest (direction moyenne orientée à 234°) avec une vitesse moyenne stable toute l'année entre 8 et 10 nœuds (moyenne annuelle de 8,8 kts). Cela représente un vent soufflant à une vitesse entre 4 et 5 m/s avec des rafales pouvant atteindre 16 m/s (Figure 37).

La majorité du temps (64 %), la vitesse du vent est entre 1 et 7 nœuds (3,6 m/s) et est rarement nulle (9 %). On constate que le vent est plus fort en hiver qu'en été (Figure 38).

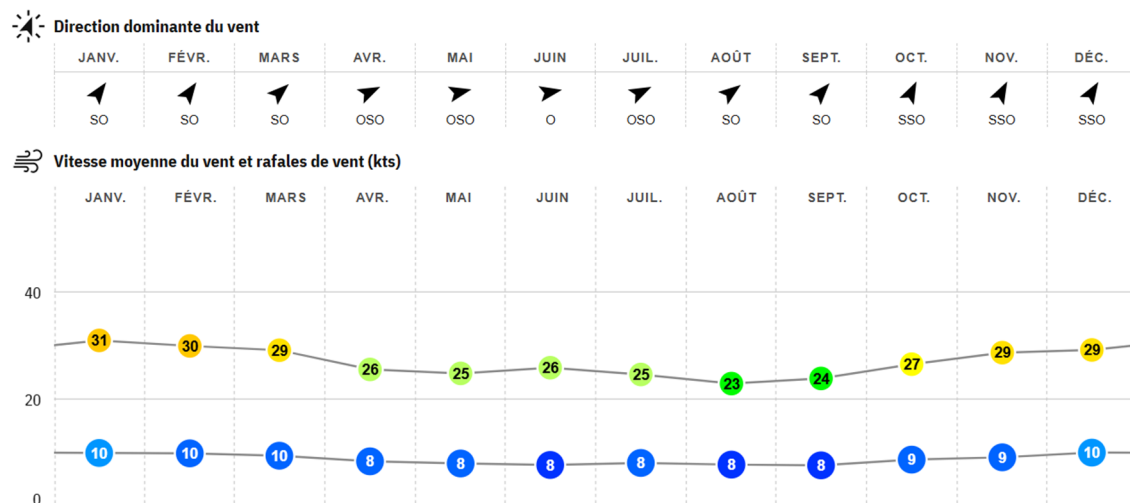


Figure 37 : Statistiques mensuelles de la direction et la force du vent (Windfinder.com, s. d.)

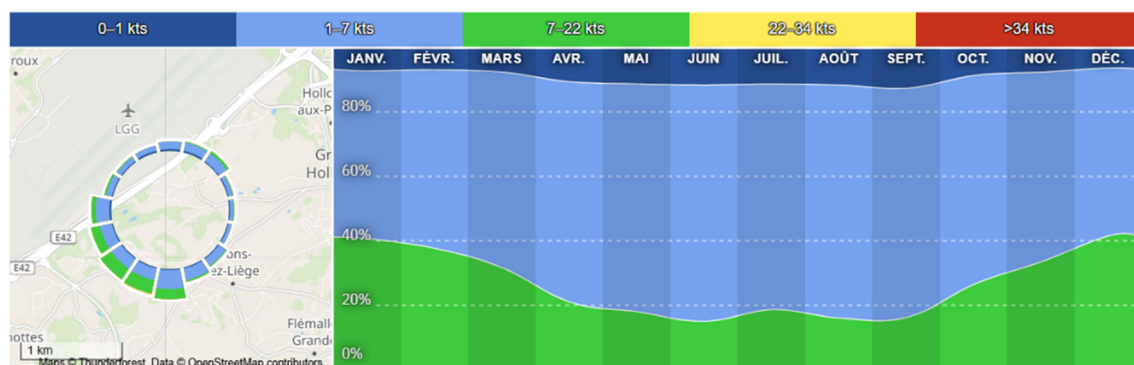


Figure 38 : Répartition mensuelle de la direction et de la force du vent (Windfinder.com, s. d.)

Cela rejoint les résultats de Y. Chen et al. (2017) qui ont montré que Bruxelles avait un potentiel de 2978 heures par an de ventilation naturelle. En effet, à climat équivalent entre Liège et Bruxelles, on peut supposer donc que le site étudié a un potentiel de ventilation naturelle.

Yao & Xiong (2021) précisent que le tirage éolien ne peut pas être envisagé en tant que mécanisme principal de ventilation car le débit est trop faible, nous nous focaliserons donc sur les dispositifs liés au tirage thermique.

## b) Analyse des potentiels du bâtiment :

Les points forts et les points d'attention de certains locaux du bâtiment sont récapitulés dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Points forts et points d'attention des locaux à potentiel de dispositif HVAC low tech

Local	Point fort	Point d'attention
Atrium	déjà présent, bien positionné au centre du bâtiment, traversant et dessert tous les bureaux paysagés directement, grande hauteur, apport	faible inertie, risques de surchauffe

	de lumière naturelle, combinaison avec du night cooling possible	
<i>Combles</i>	espace inoccupé en hauteur et relié directement aux locaux du RDC et à l'extérieur, bon pour le tirage thermique	
<i>Extension</i>	gains solaires importants, espace qui pourrait faire office de serre	orientation au nord, espace occupé et risques d'inconfort élevé, faible inertie
<i>Salles de réunion</i>	espace fortement vitré, gains solaires importants, espace qui pourrait faire office de serre	espace occupé, forte inertie, risques de surchauffe et d'inconfort élevé
<i>Bureaux paysagés</i>	ventilation naturelle traversante N-S et E-O possible, en lien avec l'atrium	courants d'air peuvent créer de l'inconfort
<i>Locaux semi-enterrés au R-1</i>	espace inoccupé et avec une température stable toute l'année, puits climatique envisageable	pas d'accès facile à une prise d'air, forte intervention nécessaire pour mettre en place le dispositif

## c) Mise en relation avec la revue de littérature :

Dans le cadre de ce mémoire, le but est d'intégrer des dispositifs low tech HVAC dans un bâtiment de bureaux. Grâce à la liste des potentiels du cas d'étude et de la cartographie établie en amont (Figure 24), nous pouvons déterminer quels dispositifs seraient les plus pertinents à simuler numériquement sur IES-VE.

Nous pouvons éliminer les dispositifs selon les différents critères mentionnés dans la méthodologie et les reporter sur la Figure 39 :

- Type de bâtiment : tertiaire ou résidentiel → tertiaire (rose)
- Type de tirage réalisable : éolien, thermique ou les deux → thermique (bleu)
- Lien avec les potentiels architecturaux : aucun lien (dispositif rejeté), lien possible ou lien existant (dispositif conservé) → (vert)
- Rôle HVAC voulu : ventilation, chauffage, climatisation → les trois rôles sont recherchés
- Prise en compte de la note low tech et des économies d'énergie : meilleurs dispositifs conservés (oranges retenus et rouges éliminés)

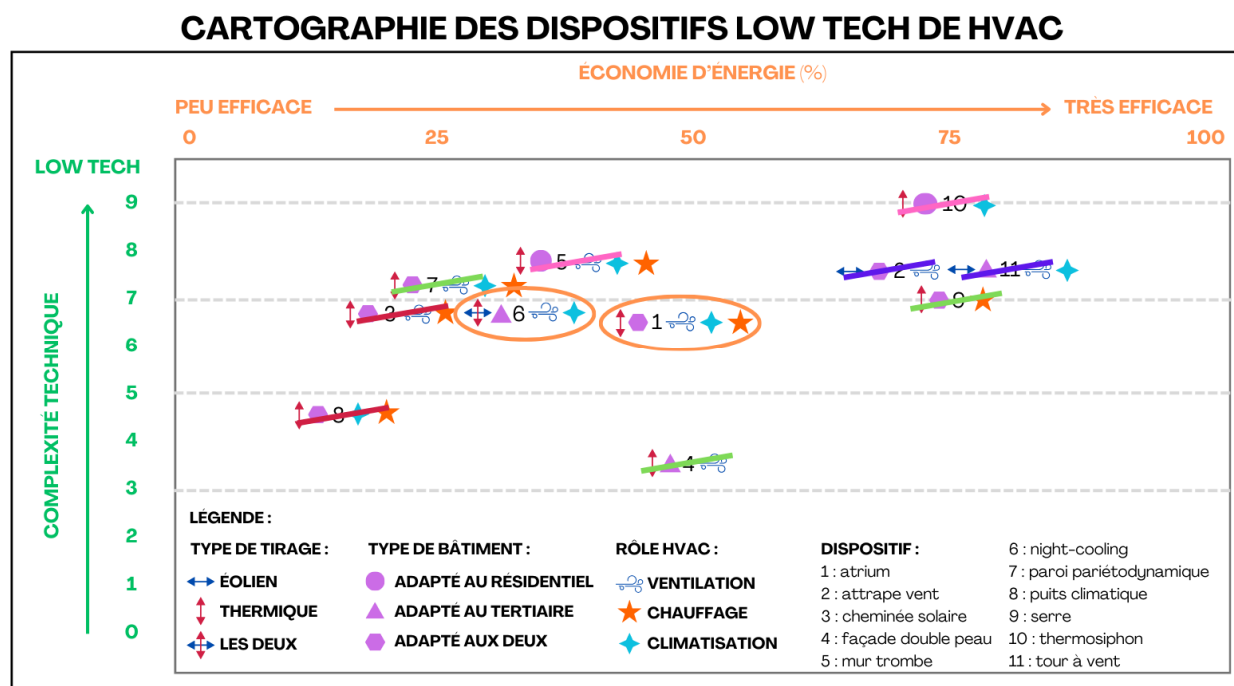


Figure 39 : Processus de sélection des dispositifs HVAC low tech

En appliquant la méthodologie proposée, le choix des dispositifs se porte donc sur l'étude du night-cooling associé à un atrium. En effet, l'atrium est déjà présent dans le bâtiment et représente donc un potentiel à valoriser. L'association du night-cooling avec l'atrium permet de gagner en efficacité (Moosavi et al., 2014). La hauteur disponible permet de gagner en débit et de renouveler d'avantage l'air. De plus, il semble réalisable, sans forte intervention, d'installer des systèmes permettant le night-cooling comme des châssis à ouvrant manuel ou motorisé et des grilles permettant à l'air de circuler.

### 6.2.2. Hypothèse d'intégration du dispositif low tech dans le bâtiment

Le rafraîchissement passif est une stratégie de contrôle de l'ambiance thermique des locaux qui minimise le recours à la production mécanique de froid. L'objectif principal est d'accumuler la nuit un maximum de fraîcheur dans les locaux et dans la masse du bâtiment, et de la restituer tout au long de la journée pour contrer les apports de chaleur.

Par ventilation intensive naturelle, on entend une stratégie de contrôle thermique basée sur un balayage du local par de l'air extérieur. L'objectif est de refroidir l'ambiance et la masse des locaux grâce à un air naturellement frais. Ce balayage est intensif, ce qui signifie que les taux de renouvellement d'air sont importants (typiquement, de 4 à 8 renouvellements d'air par heure) (Greisch). Enfin, on parle de ventilation naturelle car le déplacement d'air est assuré par des forces naturelles : le vent et le tirage thermique. La ventilation intensive peut être unilatérale, avec un air entrant et sortant par la même façade, ou traversante. Dans ce cas, le flux d'air pénètre d'un côté du bâtiment et en ressort par un autre.

Pour aménager le dispositif de night-cooling associé à l'atrium, il est nécessaire de réaliser un dimensionnement des besoins de renouvellement de l'air afin d'avoir des résultats satisfaisants. La ventilation intensive de nuit permet de remplacer l'air intérieur par de l'air extérieur plus frais en période estivale de mai à octobre et donc de réduire les besoins de climatisation en journée. La ventilation intensive de nuit doit avoir un débit suffisant pour atteindre un taux de renouvellement de 6 volumes par heure (Greisch).

Comme mentionné plus tôt, le tirage thermique est privilégié dans ce travail et nous nous intéresserons donc uniquement à celui-ci.

Le dimensionnement des organes d'ouvertures et de sorties est donc basé sur une ventilation naturelle intensive moyenne située de 6 volumes par heure durant la nuit avec un tirage thermique. Les hypothèses et résultats du dimensionnement du système de ventilation sont décrits ci-après.

### **a) Dimensionnement des besoins :**

Deux zones sont sujettes à l'intégration du night-cooling à la suite de l'analyse des potentiels du bâtiment : les bureaux paysagés (scénario 1 en bleu) et les salles de réunion du RDC (scénario 2 en orange) (Figure 40, Figure 41 et Figure 42).

Les entrées et les sorties d'air doivent être étudiées pour créer des flux d'air qui permettent le renouvellement des volumes de manière traversante.

### **Scénario 1 : bureaux paysagés**

Les portes de l'atrium peuvent être utilisées comme entrées d'air. Le problème de sécurité contre les intrusions est à résoudre cependant. Des grilles peuvent être installées mais diminuent la surface libre des ouvertures. Deux autres portes dans le bâtiment sont aménageables avec l'installation de grilles.

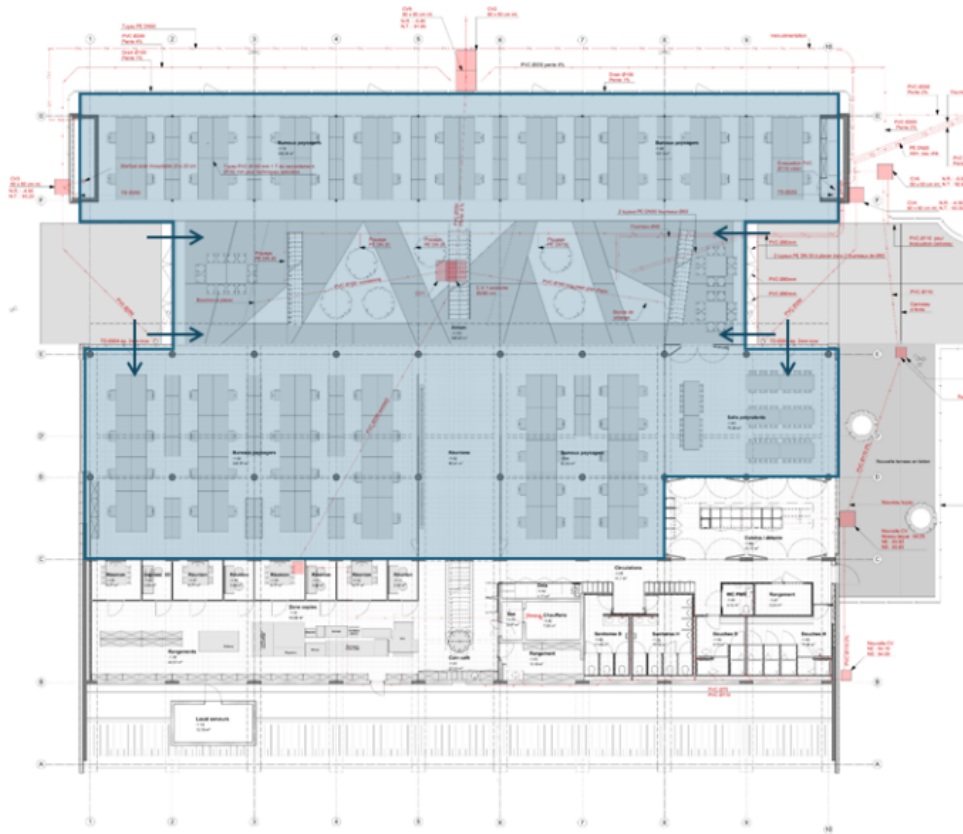


Figure 40 : Zones de night-cooling au R-1 avec les entrées d'air aménageables

## Scénario 2 : salles de réunions

Les impostes hautes dans les salles de réunion peuvent être transformées en ouvrants. Les impostes hautes de la circulation peuvent aussi être transformées. La circulation constitue la colonne vertébrale du niveau et communique avec tous les locaux de la zone jusqu'à l'atrium. Les portes entre les salles de réunions et la circulation doivent cependant être ouvertes la nuit pour permettre à l'air de circuler.

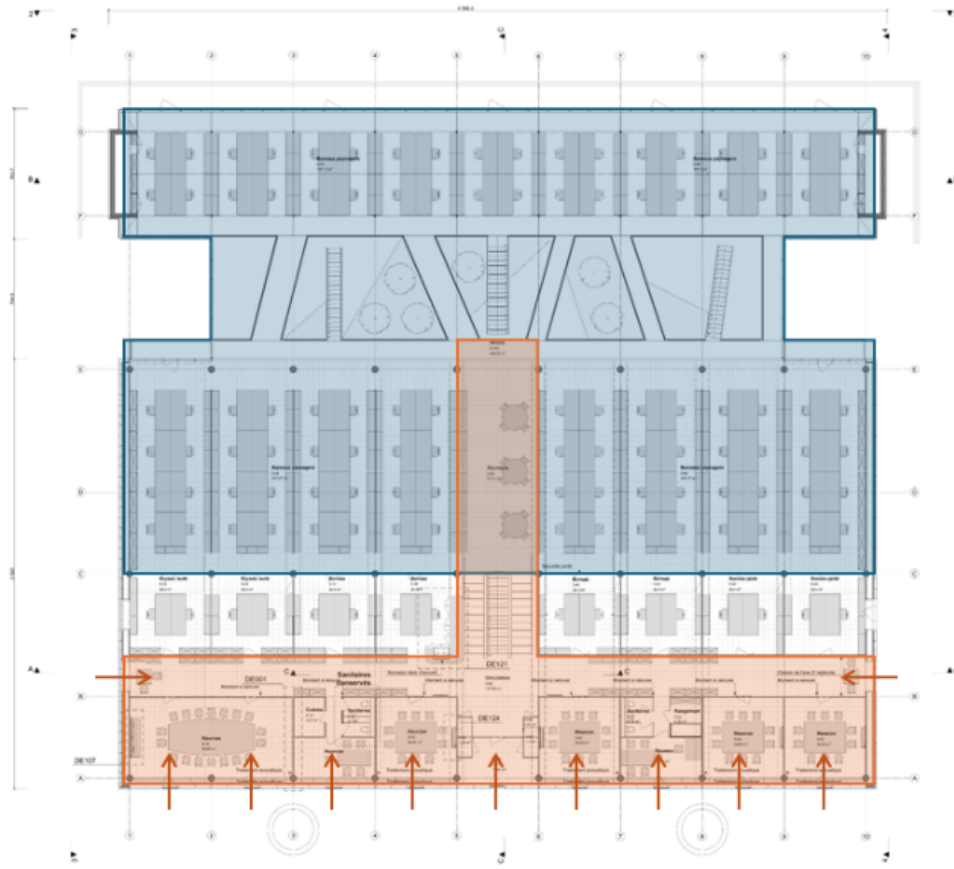


Figure 41 : Zones de night-cooling au RDC avec les entrées d'air aménageables

Des ouvrants motorisés sont déjà existants et fonctionnels en hauteur dans l'atrium. De plus, les ouvrants sont répartis sur toute la longueur de l'atrium ce qui permet un meilleur renouvellement de l'air (Horan & Finn, 2008).

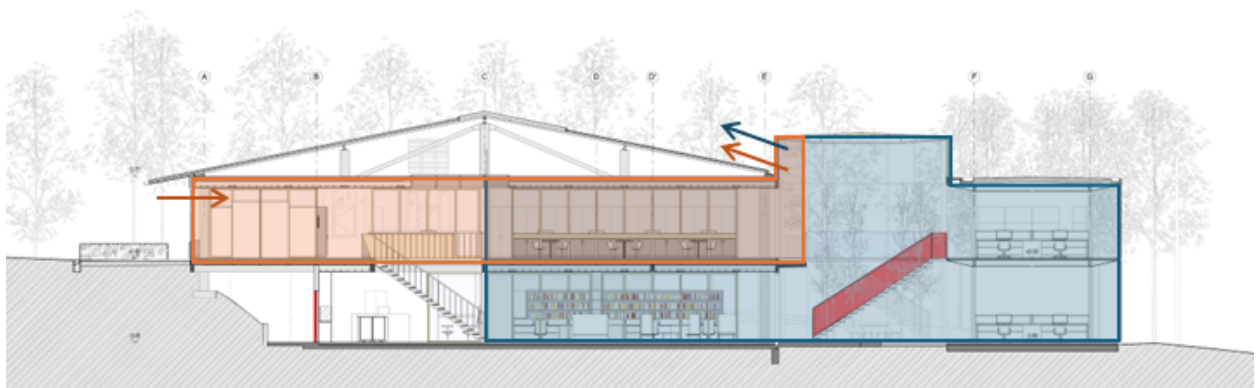


Figure 42 : Zones de night-cooling en coupe avec les entrées et les sorties d'air

Pour rappel, le débit de tirage thermique se calcule selon l'équation suivante (cf. partie 2.2.5.1) :

$$q_s = (C_d A) \sqrt{\frac{2gH(T_{ext} - T_{int})}{T_{int}}}$$



Les facteurs fixes sont le coefficient de décharge, fixé à 0,65, et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Pour dimensionner les besoins, des hypothèses sont posées sur la température moyenne intérieure et la température moyenne nocturne à 26 °C et 20 °C respectivement.

Les facteurs sur lesquels un dimensionnement est nécessaire sont donc sur la différence de hauteur entre les entrées et les sorties ainsi que sur la surface de ventilation. La différence de hauteur dépend du scénario étudié. On mesure une différence de hauteur de 7,5 mètres entre le R-1 et les fenêtres de l'atrium (scénario 1) et une différence de hauteur de 2,5 mètres entre les impostes hautes des fenêtres des salles de réunion et les fenêtres de l'atrium (scénario 2). L'ensemble de ces données est synthétisé dans le Tableau 19. Un calcul permet de déterminer l'aire nécessaire pour avoir le débit suffisant permettant de renouveler 6 volumes par heure de la zone concernée.

Tableau 19 : Dimensionnement du night-cooling pour les deux scénarios

Scénario	1 : bureaux paysagés	2 : salles de réunions
Volume des locaux [m3]	1200	7500
Taux de renouvellement [vol/h]	6	6
Débit nécessaire [m3/h]	7200	45000
Température intérieure de nuit [°C]	26	26
$\Delta T$ de nuit [°C]	6	6
$\Delta H$ [m]	2,5	7,5
<b>Surface d'ouverture nécessaire [m²]</b>	<b>3,10</b>	<b>11,19</b>

### b) Calcul des surfaces d'ouverture :

La surface d'ouverture d'un ouvrant n'est pas égale à la surface ouvrable (produit de la largeur et de la hauteur). Cette surface dépend également de l'angle d'ouverture de l'ouvrant ( $\varphi$ ) selon les formules définies Figure 43. Dans les cas où une grille est devant l'ouvrant, il faut également soustraire un certain pourcentage afin d'obtenir la surface libre d'ouverture.

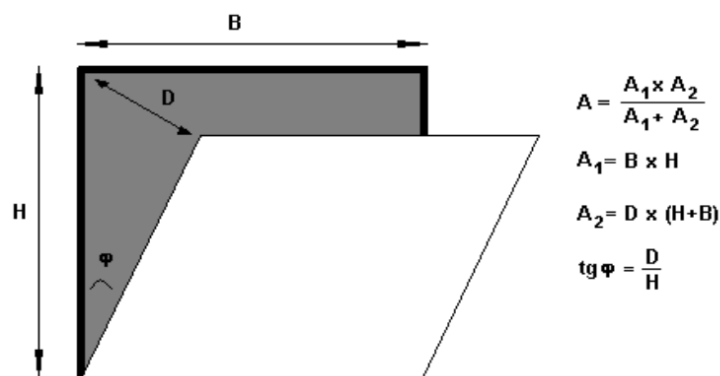


Figure 43 : Calcul de la surface disponible d'un ouvrant (Greisch)

Dans le cas étudié, différents ouvrants ont été repérés, les calculs de la surface disponible sont donc possibles. La liste des ouvrants est détaillée ci-après.

## Scénario 1 :

Portes-fenêtres dans l'atrium :

Utilisation de 4 portes-fenêtres existantes de 360 cm sur 117 cm avec un angle d'ouverture de 90°. Une grille doit être installée pour éviter les intrusions. La surface libre est de 60 %.

Portes au R-1 :

Utilisation des 2 portes existantes de 210 cm sur 96 cm avec un angle d'ouverture de 90°. Une grille doit être installée pour éviter les intrusions. La surface libre est de 60 %.

## Scénario 2 :

Fenêtres dans la circulation :

Remplacement des impostes hautes des 2 fenêtres par des ouvrants oscillants de 88 cm sur 73 cm avec un angle d'ouverture de 50°. La surface libre est de 60 %.

Fenêtres sur la façade sud :

Remplacement des impostes hautes des 9 fenêtres par des ouvrants oscillants de 84 cm sur 96 cm avec un angle d'ouverture de 50°. La surface libre est de 60 %.

## Scénarios 1 et 2 :

Fenêtres en hauteur dans l'atrium

Utilisation des 17 fenêtres existantes à ouvrants oscillants motorisés de 96 cm sur 150 cm avec un angle d'ouverture de 40°. La surface libre est de 90 %.

## Résultats des surfaces :

Les calculs des surfaces sont synthétisés dans la Figure 44 ci-dessous :

Surface disponible [m²]		
ENTREE		
Type	Nombre	Aire [m²]
Entrées portes atrium	4	10,09
Entrées portes R-1	2	2,42
Total		12,51
SORTIE		
Type	Nombre	Aire [m²]
Sorties fenêtres atrium	17	14,15
Débit réel [m³/h]	50278,24	
Taux de renouvellement réel [vol/h]	6,70	

Surface disponible [m²]		
ENTREE		
Type	Nombre	Aire [m²]
Entrées fenêtre façade Sud	9	3,01
Entrées fenêtre façades Est et Ouest	2	0,56
Total		3,57
SORTIE		
Type	Nombre	Aire [m²]
Sorties fenêtres atrium	17	14,15
Débit réel [m³/h]	8276,29	
Taux de renouvellement réel [vol/h]	6,90	

Figure 44 : Calculs des surfaces disponibles en entrée et en sortie pour les scénarios 1 (à gauche) et 2 (à droite)

Les aménagements proposés en aménageant certains ouvrants et en en créant de nouveaux permettent d'atteindre les surfaces nécessaires au fonctionnement du night-cooling. Les taux de renouvellement réels dépassent même le taux désiré de 6 vol/h avec 6,7 vol/h pour le scénario 1 et 6,9 vol/h pour le scénario 2.

### **c) Conditions d'ouvertures des entrées et sorties :**

Pour s'assurer du fonctionnement du night-cooling, des conditions d'ouverture des ouvrants sont à appliquer. Ces conditions nécessitent donc d'avoir des ouvrants motorisés ainsi que des capteurs qui suivent les évolutions des conditions météorologiques.

L'aspect low tech de ce suivi est discutable dans la mesure où les ouvrants accessibles pourraient être ouverts et fermés manuellement et l'utilisation de moteurs et de capteurs serait alors inutile. Cependant, un contrôle de l'ouverture des fenêtres permet d'éviter que le night-cooling crée des demandes de chauffage ou de climatisation, mais évite aussi d'avoir des dégradations à l'intérieur du bâtiment en cas de pluie ou de rafales de vent pendant la période d'ouverture des fenêtres. Les ouvrants motorisés et les capteurs peuvent donc faire partie intégrante de la démarche low tech (cf. partie 2.2.3).

Les conditions d'ouverture des fenêtres sont les suivantes :

- Il est entre 21h et 6h.
- La température intérieure du local est supérieure à 20°C.
- La température extérieure est supérieure à 12°C.
- La différence entre la température intérieure et la température extérieure est supérieure à 1°C, ceci permet de s'assurer qu'il n'y pas d'inversion du flux d'air.
- Il ne pleut pas.
- Le vent a une vitesse inférieure à 10 m/s.

### **d) Modélisation dans IES-VE :**

Le module MacroFlo permet d'intégrer les systèmes d'ouvrants selon les conditions énoncées pour réaliser le night-cooling sur les vitrages concernés.

## 6.3. Comparaison des systèmes HVAC

### 6.3.1. Consommations liées au chauffage et à la climatisation

Les données de consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation à l'échelle du bâtiment sont précieuses pour comprendre les besoins de ce dernier, le Tableau 20 renseigne ces données. On constate que le chauffage et la climatisation ne fonctionnent pas en simultanée, les périodes de chauffe sont d'octobre à avril et celles de climatisation de mai à septembre. L'intégration du dispositif de night-cooling ne concerne que la climatisation et est donc actif sur cette période exclusivement. On peut tout d'abord remarquer que le night-cooling n'influence aucunement la consommation de chauffage du bâtiment égale avec et sans night-cooling à 170,96 MWh.

Tableau 20 : Consommations liées au chauffage et à la climatisation sur une année à l'échelle du bâtiment

	Mois	Chauffage [MWh]		Climatisation [MWh]	
		Sans night-cooling	Avec night-cooling	Sans night-cooling	Avec night-cooling
	Janvier	34,09	34,09	0,00	0,00
	Février	29,63	29,63	0,00	0,00
	Mars	28,39	28,39	0,02	0,02
	Avril	16,74	16,74	0,10	0,10
<b>Night-cooling actif</b>	Mai	0,00	0,00	4,11	3,52
	Juin	0,00	0,00	7,97	6,64
	Juillet	0,00	0,00	10,65	8,20
	Août	0,00	0,00	10,16	7,64
	Septembre	0,00	0,00	3,01	2,63
	Octobre	7,75	7,75	0,33	0,32
	Novembre	27,15	27,15	0,00	0,00
	Décembre	27,21	27,21	0,00	0,00
	<b>Année</b>	<b>170,96</b>	<b>170,96</b>	<b>36,35</b>	<b>29,08</b>

Concernant la climatisation, l'intégration du dispositif low tech permet de réduire de 20 % la consommation avec une baisse de 7,27 MWh par rapport au système existant (Tableau 21). En considérant les chiffres donnés par la Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG) pour l'année 2024, le prix du MWh est de 243 € pour une PME (Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz, 2024). L'intensité carbone d'un kilowattheure d'électricité en Belgique en 2024 est de 153 gCO<sub>2</sub>-équ/kWh (*CO<sub>2</sub> emissions of electricity consumption*, 2024). Ces chiffres permettent de calculer les économies réalisées grâce au système HVAC low tech sur une année qui s'élèvent à 1766 € et 1112 kgCO<sub>2</sub>-équ économisés.

Tableau 21 : Synthèse des économies annuelles liées à l'intégration du night-cooling

<b>-20 % Consommation</b>
<b>-7,27 MWh</b>
<b>-1766,1 €</b>
<b>-1112,0 kgCO<sub>2</sub>-équ</b>

La Figure 45 permet de visualiser les différences de consommations entre les deux systèmes. On constate que le night-cooling permet de moins consommer durant tous les mois où il est actif, et ce de manière plus importante les mois de fortes chaleurs (-23 % en juillet, -25 % en août) que les mois plus doux (-14 % en mai, -12 % en septembre).

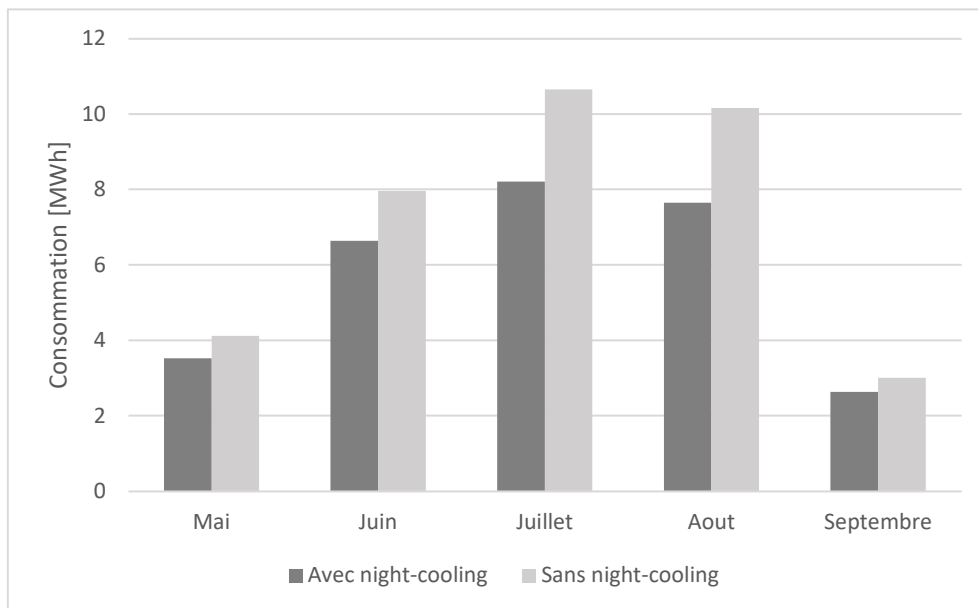


Figure 45 : Comparaison des consommations en climatisation avec et sans night-cooling

### 6.3.2. Puissance maximale du groupe froid

En plus de consommer moins, l'intégration du système HVAC low tech permet de réduire la puissance maximale du groupe froid. En effet, la puissance maximale délivrée par le groupe froid est diminuée de 3,1 % (Tableau 22).

Tableau 22 : Puissance maximale délivrée par le groupe froid

<i>Sans night-cooling [kW]</i>	<i>Avec night-cooling [kW]</i>
128,92	124,97

### 6.3.3. Différences de températures intérieures

Les données simulées sur la température intérieure des locaux permettent de visualiser l'impact direct de l'intégration du night-cooling et les différents comportements du bâtiment vis-à-vis de ce dispositif selon la zone dans laquelle on se situe. Ont été compilées ci-dessous les variations de températures intérieures lors de la semaine la plus chaude de l'année, du 8 août au 12 août, pour les quatre zones pour lesquelles le système a été dimensionné. Un local par zone a été choisi arbitrairement pour exporter les résultats (Figure 46).

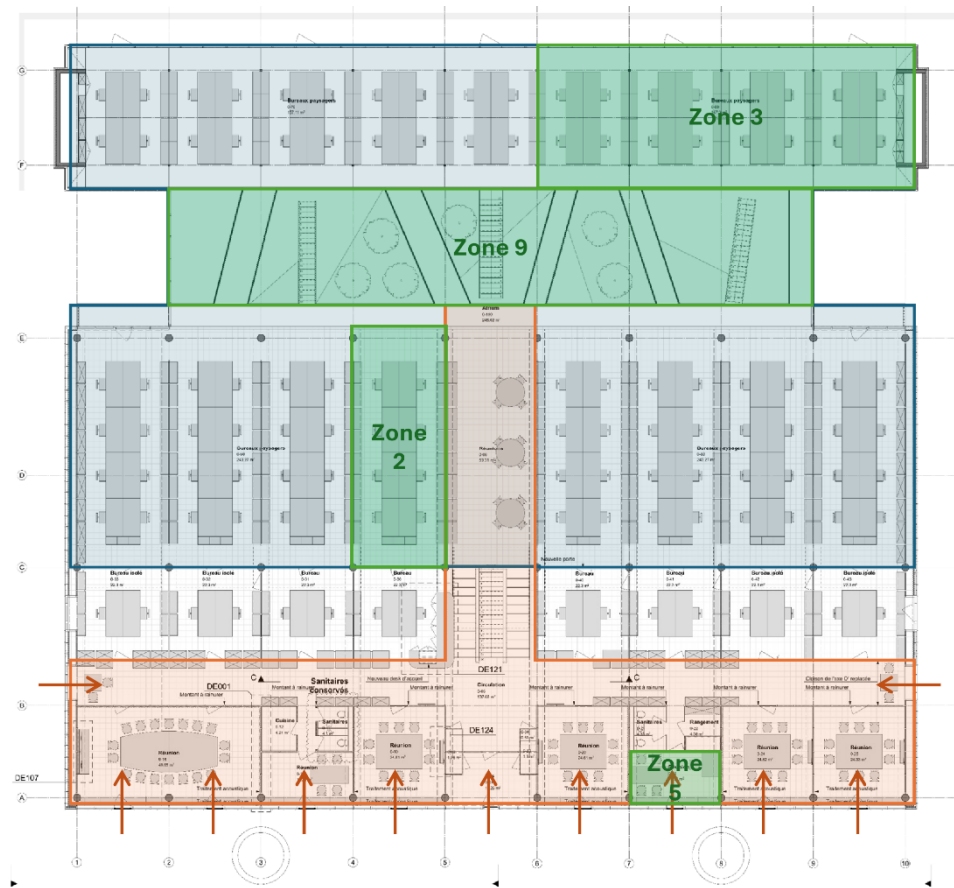


Figure 46 : Localisation du local choisi par zone étudiée

### 6.3.3.1. Zone 2

La zone 2 se situe dans le bâtiment initial, la climatisation s'effectue exclusivement par le soufflage d'air frais pour les bureaux paysagés du niveau supérieur. On constate sur la Figure 47 que l'intégration du night-cooling a un impact sur la température intérieure de cette zone. Avec le night-cooling, la température intérieure suit la chute de la température extérieure la nuit grâce à la ventilation intensive. Dans le système existant, la température intérieure baisse légèrement la nuit de 1 à 2 °C tandis que le système low tech permet une baisse de 4 à 5 °C. En journée, les variations de température dans les deux systèmes sont similaires, mais la chute de température nocturne grâce au night-cooling permet de conserver une température intérieure plus fraîche de plus ou moins 2 °C par rapport au système existant.

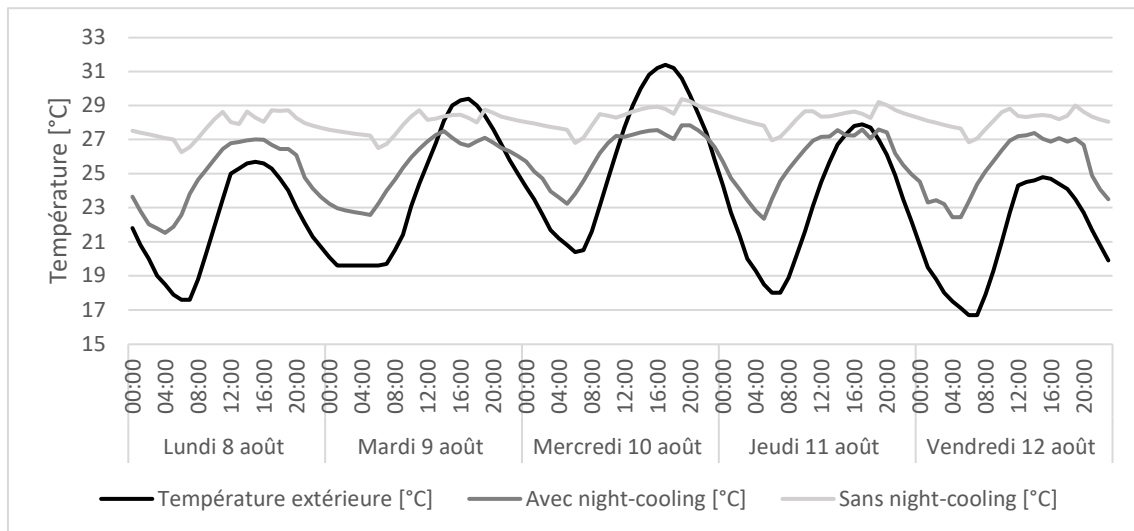


Figure 47 : Évolution des températures extérieures et intérieures dans la zone 2

### 6.3.3.2. Zone 3

La zone 3 se trouve dans l'extension, l'inertie de cette partie du bâtiment est faible étant donné son taux de vitrage élevé. Ceci se remarque distinctement sur les valeurs de la température intérieure (Figure 48). En effet, les températures intérieures avec et sans night-cooling sont sensiblement identiques en journée malgré une baisse plus importante des températures la nuit dans le cas du night-cooling. La faible inertie du bâtiment ne lui permet pas de conserver la fraîcheur de la nuit apportée par la ventilation intensive. Dans cette zone-ci, le night-cooling ne permet pas de réduire la température intérieure en journée.

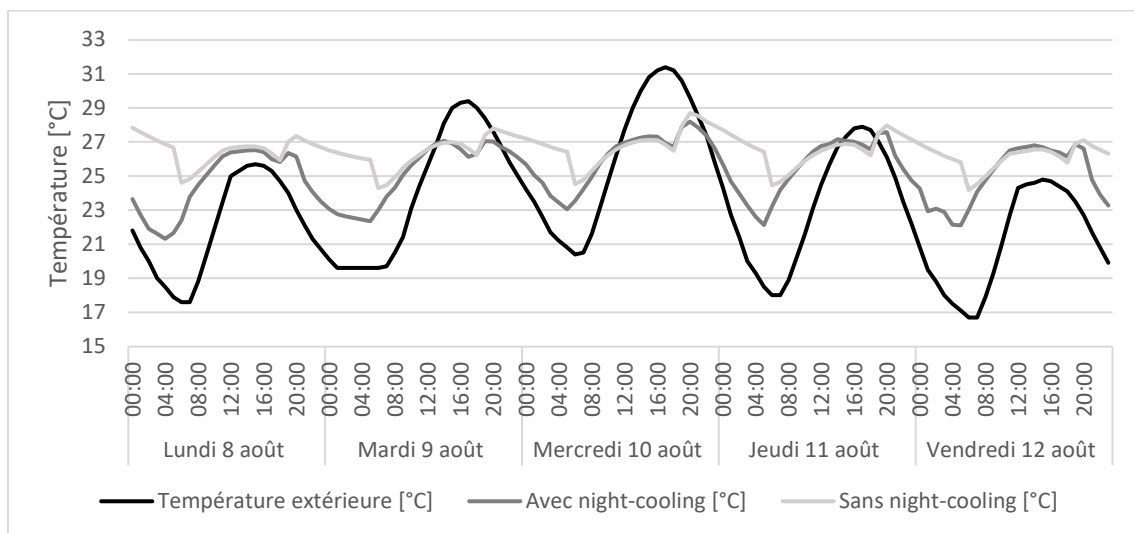


Figure 48 : Évolution des températures extérieures et intérieures dans la zone 3

### 6.3.3.3. Zone 5

La zone 5 comprend les salles de réunion situées le long de la façade Sud, ces salles sont exposées aux gains solaires continuellement avec un vitrage en bandeau sur toute la façade (Figure 49). Une casquette solaire permet de limiter ces gains.

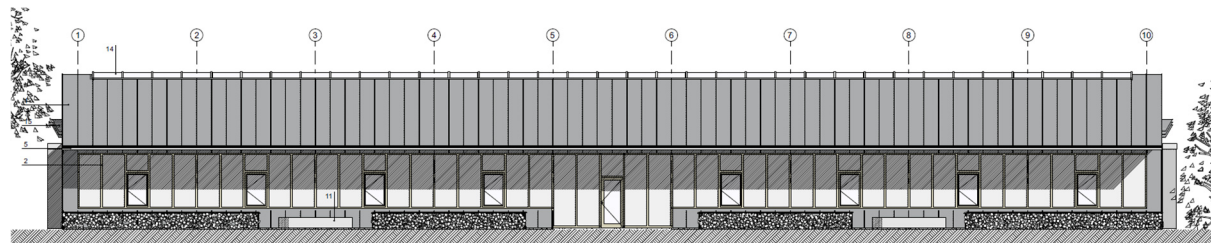


Figure 49 : Élévation de la façade Sud (Greisch)

Ces locaux sont refroidis par soufflage d'air frais exclusivement et sont cloisonnés pour garantir la tranquillité des réunions. Aux gains solaires s'ajoutent les gains internes qui entraînent des apports de chaleur importants au local et la climatisation peine à rafraîchir ces pièces comme le montre la Figure 50.

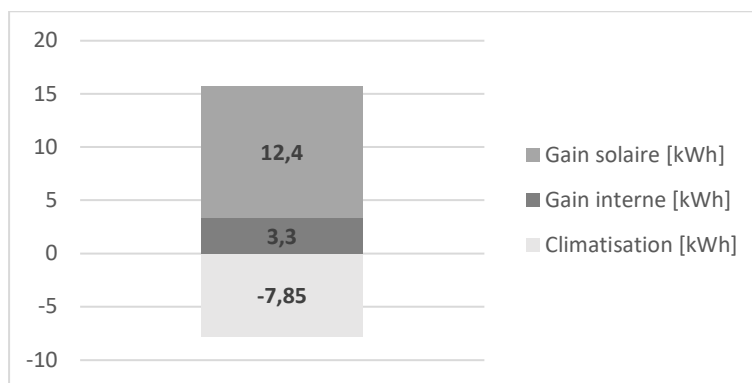


Figure 50 : Gains et climatisation d'une salle de réunion sur une journée d'été

Les risques de surchauffe sont donc élevés comme le montrent les valeurs de température Figure 51. On observe tout de même que le night-cooling permet de conserver une température intérieure légèrement plus faible que s'il n'était pas intégré (Figure 51).



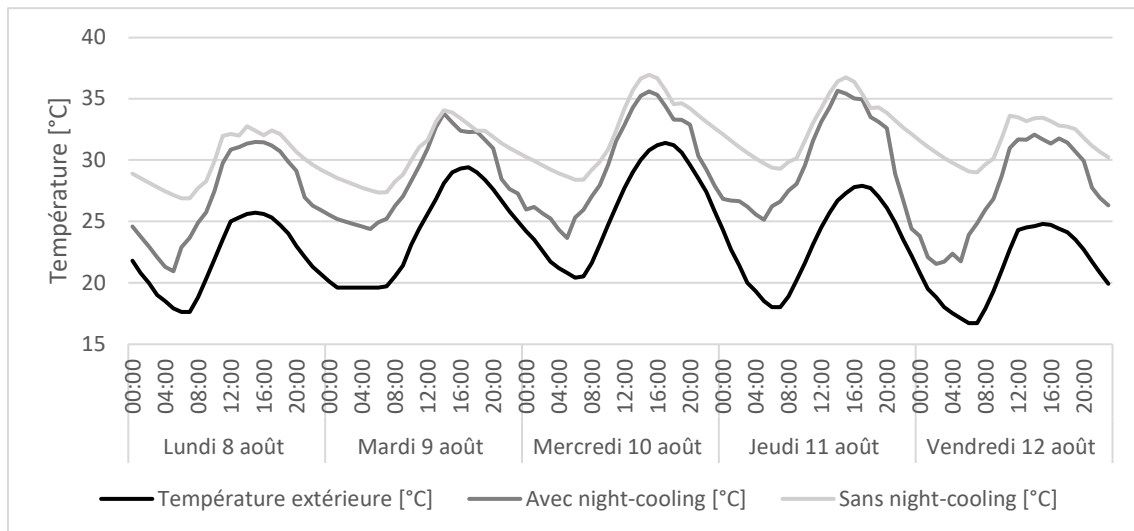


Figure 51 : Évolution des températures extérieures et intérieures dans la zone 5

## 6.3.3.4. Zone 9

L'atrium est l'élément central du night-cooling, il permet l'évacuation de l'air dans sa partie haute et est relié à tous les bureaux paysagés (zones 2 et 3). Les températures dans l'atrium données dans la Figure 52 sont mesurées au niveau du RDC. On observe que le night-cooling permet ici de réduire de plus ou moins 4 °C la température intérieure en journée (Figure 52).

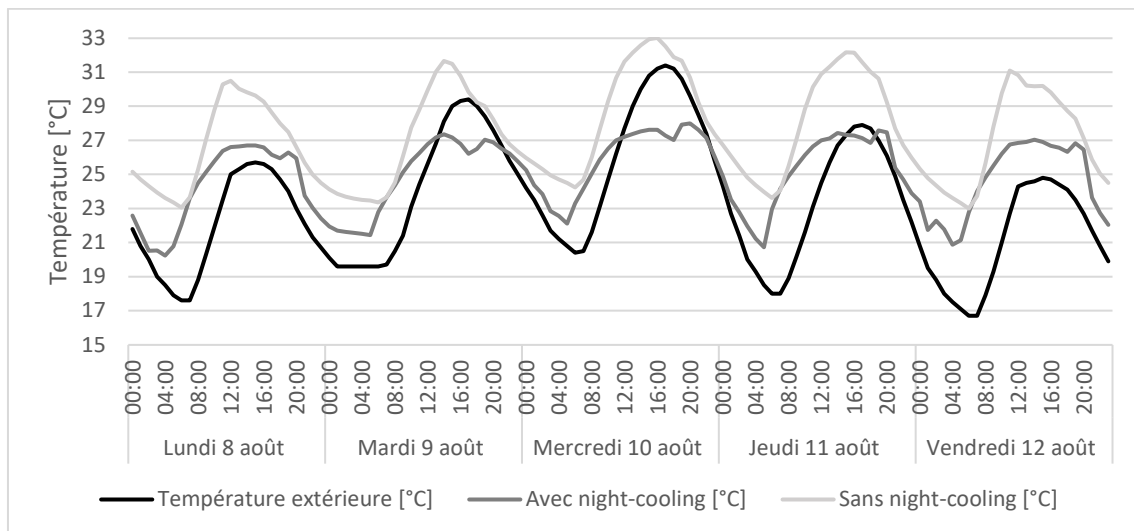


Figure 52 : Évolution des températures extérieures et intérieures dans la zone 9

## 6.4. Projections à l'horizon 2050

Le même modèle a été simulé avec et sans night-cooling en changeant le fichier météorologique par celui du scénario RCP 8.5 2050. Le but de cette partie est d'évaluer la robustesse des systèmes HVAC avec et sans l'intégration de dispositifs low tech. Les résultats présentés ci-dessous permettent de conforter l'idée que l'intégration du dispositif HVAC low tech est une solution pérenne et viable à long terme.

### 6.4.1. Consommations liées au chauffage et à la climatisation

Les consommations d'énergie évoluent avec une baisse de 7 % de la consommation de chauffage et une hausse de 47 % de la consommation de climatisation par rapport à 2025. Ceci s'explique par le réchauffement du climat qui entraîne une baisse des besoins de chauffage et une hausse des besoins de rafraîchissement. On note tout de même la forte hausse des consommations de climatisation (+17,83 MWh et +47 %) par rapport à la plus faible baisse des consommations de chauffage (-11,49 MWh et -7 %) (Tableau 20 et Tableau 23).

Afin de comparer ces deux types d'énergie (le chauffage est réalisé avec du gaz et la climatisation est réalisée avec de l'électricité), il est possible de convertir ces énergies en énergie primaire. En effet, l'énergie primaire est la première forme d'énergie directement disponible dans la nature sans subir aucune transformation. Parler en énergie primaire permet ainsi de comparer les différentes sources d'énergie, en prenant en compte les impacts énergétiques des éventuelles transformations nécessaires avant livraison au consommateur final.

On calcule la consommation en énergie primaire en appliquant un facteur de conversion à la consommation d'énergie finale par vecteur énergétique (gaz, électricité, fioul, bois, charbon, etc.). Le guide PEB du SPW (section 7.10) donne les valeurs de facteur de conversion en énergie primaire qui est de 1,00 pour le gaz et de 2,50 pour l'électricité (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2018). Ceci veut dire que la production d'un kilowattheure d'électricité nécessite la consommation de 2,5 kilowattheures d'énergie primaire.

On observe donc une consommation globale, exprimée en énergie primaire, qui augmente de +13 % (+33,07 MWh) entre 2025 et 2050.

Tableau 23 : Consommations liées au chauffage et à la climatisation sur une année à l'échelle du bâtiment dans le RCP 8.5 2050

	Mois	Chauffage [MWh]		Climatisation [MWh]	
		Sans night-cooling	Avec night-cooling	Sans night-cooling	Avec night-cooling
	Janvier	31,85	31,85	0,00	0,00
	Février	28,77	28,77	0,00	0,00
	Mars	26,44	26,44	0,03	0,03
	Avril	15,05	15,05	0,12	0,12
<b>Night-cooling actif</b>	Mai	0,00	0,00	5,45	4,42
	Juin	0,00	0,00	11,05	8,84
	Juillet	0,00	0,00	15,59	11,87
	Août	0,00	0,00	16,24	12,33
	Septembre	0,00	0,00	5,10	4,24

Octobre	6,97	6,97	0,59	0,56
Novembre	24,47	24,48	0,01	0,01
Décembre	25,92	25,92	0,00	0,00
<b>Somme</b>	<b>159,46</b>	<b>159,47</b>	<b>54,17</b>	<b>42,41</b>

On constate que le night-cooling est plus efficace en 2050 que dans le climat actuel, avec une baisse de la consommation de 22 %, soit -11,73 MWh (-20 % et -7,27 MWh en 2025). En tenant compte d'une inflation du prix de l'électricité fixée à 3 % et en gardant la même valeur d'intensité carbone que pour le scénario actuel, on obtient que le night-cooling associé à l'atrium permet, en 2050, d'économiser 5968 € et 1795 kgCO<sub>2</sub>-équ (Tableau 24).

Tableau 24 : Synthèse des économies annuelles liées à l'intégration du night-cooling selon le RCP 8.5 2050

<b>-22%</b>	<b>Consommation</b>
<b>-11,73</b>	<b>MWh</b>
<b>-5967,5</b>	<b>€</b>
<b>-1794,5</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>-équ</b>

#### 6.4.2. Puissance maximale du groupe froid

La puissance maximale délivrée par le groupe froid augmente de 9,4 % par rapport au scénario actuel. Le night-cooling permet toujours d'alléger la puissance délivrée, avec une baisse de 2,5 % (Tableau 25). On observe donc que la puissance installée dans le bâtiment de 150 kW satisfait encore les besoins en 2050 mais est proche de la saturation. L'ajout d'un groupe froid supplémentaire semble inévitable pour assurer le rafraîchissement du bâtiment.

Tableau 25 : Puissance maximale délivrée par le groupe froid selon le RCP 8.5 2050

<b>Sans night-cooling [kW]</b>	<b>Avec night-cooling [kW]</b>
141,00	137,43

#### 6.4.3. Différences de températures intérieures

Le suivi des différences de températures intérieures dans les quatre mêmes zones permet de voir les limites du night-cooling comme le montre la Figure 53. En effet, les différences de température en journée avec et sans night-cooling sont plus faibles en 2050 que pour le climat actuel. On peut expliquer cela notamment par le fait que les gains solaires projetés en 2050 sont plus importants et entraînent une plus forte hausse des températures intérieures en journée, malgré l'utilisation du night-cooling.

Les températures nocturnes avec night-cooling suivent toujours la baisse de température extérieure. On constate également toujours que la zone 5 est plus susceptible à la surchauffe. Les trois autres zones sont globalement à la même température en journée, ce qui s'explique par l'architecture du bâtiment où ces trois zones ne sont pas cloisonnées entre elles.

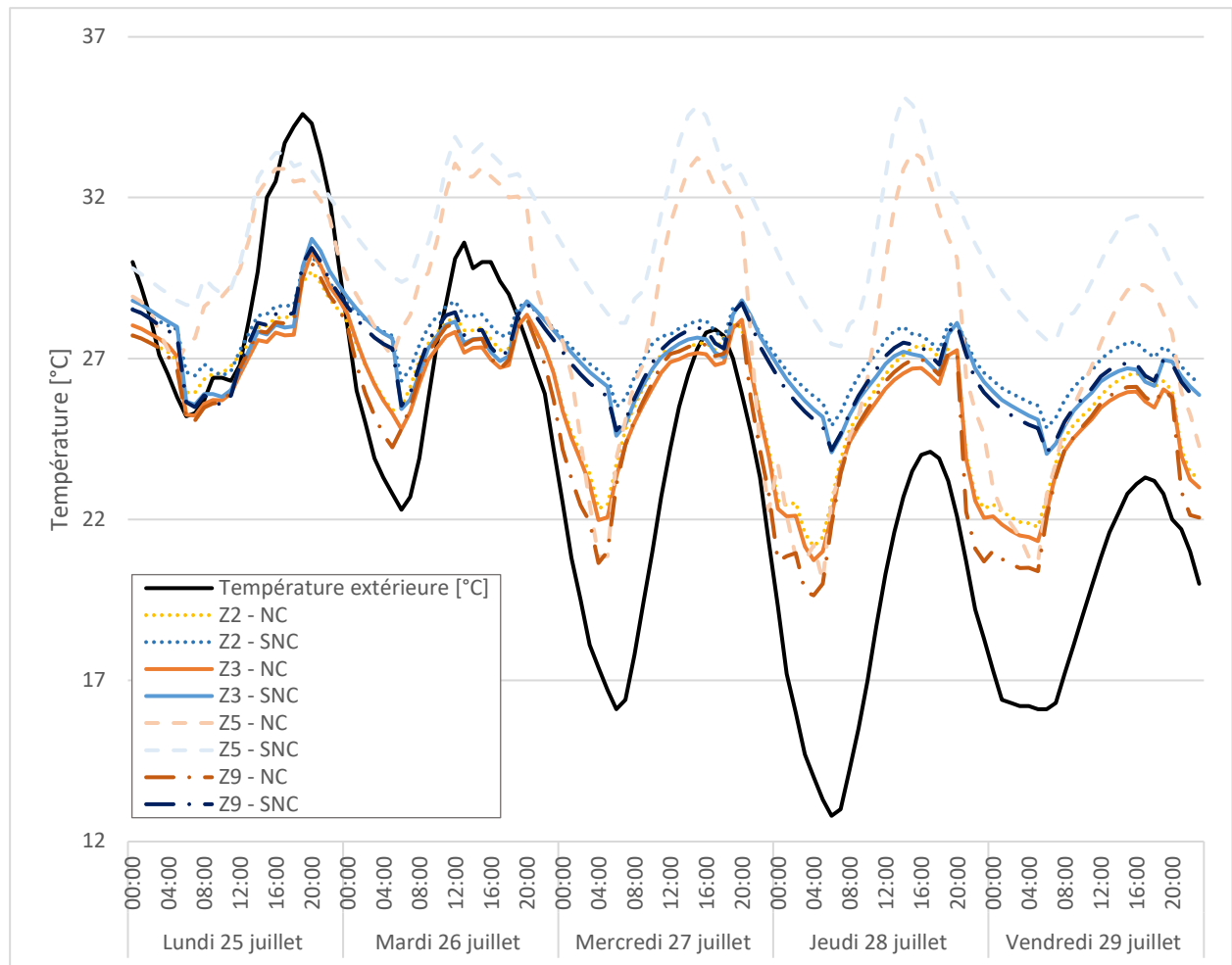


Figure 53 : Evolution des températures extérieures et intérieures dans les zones étudiées en 2050 pour quatre zones  
NC : night-cooling, SNC : sans night-cooling

## 6.5. Comparaison des impacts des systèmes

### 6.5.1. Impact environnemental

Afin de calculer l'impact environnemental de l'intégration du night-cooling dans le bâtiment, il est nécessaire de se renseigner sur l'impact environnemental des éléments à intégrer au bâtiment. Différents produits permettant le night-cooling existent sur le marché et disposent de EPD (Environmental Product Declaration) ou FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire). Ils permettent de donner des indications sur l'analyse du cycle de vie d'un produit et permettent dans le cadre de ce travail d'estimer l'impact environnemental de l'installation du night-cooling.

Trois FDES de trois produits ont été comparées afin d'obtenir une valeur moyenne de l'impact global des châssis à ouvrants motorisés (Tableau 26). La valeur de l'impact surfacique correspond au GWP total du produit sur l'ensemble de son cycle de vie.

Tableau 26 : GWP de trois châssis à ouvrants motorisés

<b>Produit</b>	<b>Impact surfacique [kgCO<sub>2</sub>-équ/m<sup>2</sup>]</b>
<i>Orivent 70 Smoke hatch - Kera Group Oy</i>	1,65E+02
<i>Kingspan ECOVISION VL, BC et OS</i>	4,90E+02
<i>Souchier Boullet OTF et Exubaie</i>	3,43E+02
<b>Moyenne des produits</b>	<b>3,33E+02</b>

Les surfaces des nouveaux châssis sont synthétisées dans le Tableau 27 à partir du dimensionnement présenté en section 6.2.2.

Tableau 27 : Synthèse des châssis à installer pour l'intégration du night-cooling

<b>Type</b>	<b>Nombre</b>	<b>Aire [m<sup>2</sup>]</b>
<i>Entrées portes atrium</i>	4	16,8
<i>Entrées portes R-1</i>	2	4,0
<i>Entrées fenêtre façade Sud</i>	9	7,3
<i>Entrées fenêtre façades Est et Ouest</i>	2	1,3

N.B. : les châssis de sortie dans l'atrium ne sont pas comptés étant donné qu'ils sont déjà présents.

À partir de ces informations, il est possible de calculer l'impact environnemental de l'installation du night-cooling dans le bâtiment. Cet investissement aurait un impact de **9786,36 kgCO<sub>2</sub>-équ.**

Or, l'intégration du night-cooling permet en contrepartie de réaliser des économies en termes de CO<sub>2</sub>-équ (Tableau 21 et Tableau 24). En linéarisant les économies réalisées en 2025 et en 2050 pour chaque année, il est possible de calculer les économies réalisées sur cette période (Tableau 28).

Tableau 28 : Économies (kgCO<sub>2</sub>-équ) réalisées grâce à l'intégration du night-cooling

<b>Economies réalisées [kgCO<sub>2</sub>-équ]</b>				
	<b>Année</b>	<b>Par an</b>	<b>Cumulées</b>	<b>Cumulées après investissement initial</b>
		0	0	9786
0	2025	-1112	-1112	8674
1	2026	-1139	-2251	7535
2	2027	-1167	-3418	6368
3	2028	-1194	-4612	5174
4	2029	-1221	-5833	3953
5	2030	-1249	-7082	2705
6	2031	-1276	-8357	1429
7	2032	-1303	-9661	126
8	2033	-1330	-10991	-1205
9	2034	-1358	-12349	-2562
10	2035	-1385	-13734	-3947
11	2036	-1412	-15146	-5360
12	2037	-1440	-16586	-6799
13	2038	-1467	-18053	-8266
14	2039	-1494	-19547	-9760
15	2040	-1522	-21068	-11282
16	2041	-1549	-22617	-12831
17	2042	-1576	-24193	-14407
18	2043	-1603	-25797	-16010
19	2044	-1631	-27427	-17641
20	2045	-1658	-29085	-19299
21	2046	-1685	-30771	-20984
22	2047	-1713	-32483	-22697
23	2048	-1740	-34223	-24437
24	2049	-1767	-35991	-26204
25	2050	-1795	-37785	-27999

En ajoutant l'investissement initial aux économies cumulées, il est possible de déterminer le temps de retour sur investissement ainsi que le montant économisé en 2050 (Figure 54).

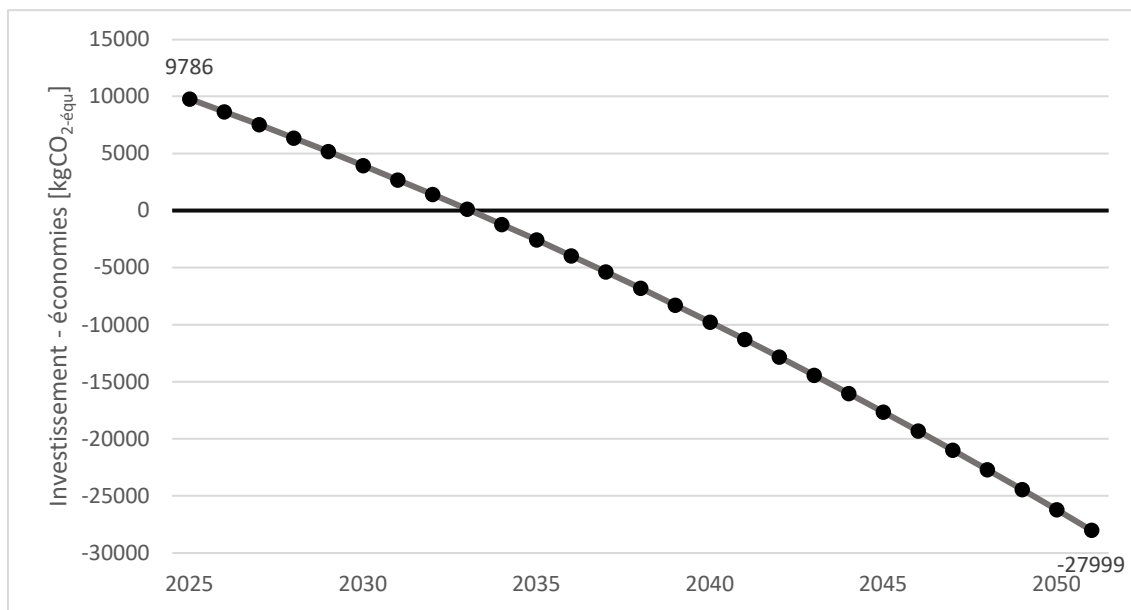


Figure 54 : Économies (kgCO<sub>2</sub>-équ) réalisées grâce à l'intégration du night-cooling

Dans le cas d'étude proposé, le night-cooling associé à l'atrium est amorti environnementalement **8 ans** après son installation et permet d'économiser quasiment **28 tonnes de CO<sub>2</sub>-équ** après **25 ans d'utilisation**.

### 6.5.2. Impact économique

Il est possible de réaliser une estimation du budget nécessaire à l'installation du dispositif de night-cooling dans le bâtiment. Les hypothèses suivantes ont été prises sur base des informations détenues par Greisch :

- Mur rideaux : 1150 €/m<sup>2</sup>
- Châssis classiques : 950 €/ m<sup>2</sup> (aluminium) / 700 € m<sup>2</sup> (bois)
- Supplément motorisation : environ 400 € par ouvrant (ratio rapporté à des motorisations de garages, de portes coulissantes, ...)

Il est alors possible de calculer le coût de l'installation du night-cooling dans le bâtiment détaillé en section 6.2.2. Les surfaces détaillées dans le Tableau 27 ont été utilisées pour calculer le coût de l'installation. L'investissement à réaliser est donc estimé à **38 120,88 €**.

Comme le montrent les Tableau 21 et Tableau 24, l'intégration du night-cooling permet des économies croissantes année après année que nous pouvons linéariser de 2025 à 2050 dans le Tableau 29.

Tableau 29 : Économies (€) réalisées grâce à l'intégration du night-cooling

<b>Economies réalisées [€]</b>				
	<b>Année</b>	<b>Par an</b>	<b>Cumulées</b>	<b>Cumulées après investissement initial</b>
		0 €	0 €	38 121 €
0	2025	-1 766 €	-1 766 €	36 355 €
1	2026	-1 934 €	-3 700 €	34 421 €
2	2027	-2 102 €	-5 803 €	32 318 €
3	2028	-2 270 €	-8 073 €	30 048 €
4	2029	-2 438 €	-10 511 €	27 610 €
5	2030	-2 606 €	-13 118 €	25 003 €
6	2031	-2 774 €	-15 892 €	22 229 €
7	2032	-2 943 €	-18 835 €	19 286 €
8	2033	-3 111 €	-21 945 €	16 176 €
9	2034	-3 279 €	-25 224 €	12 897 €
10	2035	-3 447 €	-28 671 €	9 450 €
11	2036	-3 615 €	-32 285 €	5 835 €
12	2037	-3 783 €	-36 068 €	2 053 €
13	2038	-3 951 €	-40 019 €	-1 898 €
14	2039	-4 119 €	-44 138 €	-6 017 €
15	2040	-4 287 €	-48 425 €	-10 304 €
16	2041	-4 455 €	-52 880 €	-14 759 €
17	2042	-4 623 €	-57 503 €	-19 382 €
18	2043	-4 791 €	-62 294 €	-24 173 €
19	2044	-4 959 €	-67 253 €	-29 133 €
20	2045	-5 127 €	-72 381 €	-34 260 €
21	2046	-5 295 €	-77 676 €	-39 555 €
22	2047	-5 463 €	-83 139 €	-45 018 €
23	2048	-5 631 €	-88 771 €	-50 650 €
24	2049	-5 799 €	-94 570 €	-56 449 €
25	2050	-5 968 €	-100 538 €	-62 417 €

En ajoutant l'investissement initial aux économies cumulées, il est possible de déterminer le temps de retour sur investissement ainsi que le montant économisé en 2050 (Figure 55).



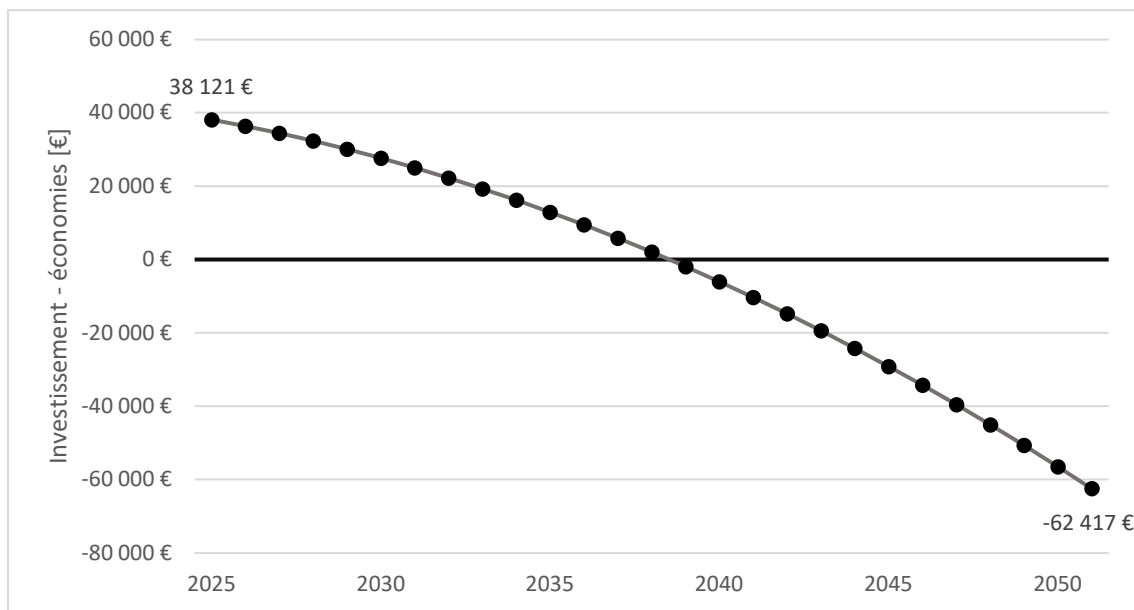


Figure 55 : Économies (€) réalisées grâce à l'intégration du night-cooling

Dans le cas d'étude proposé, le night-cooling associé à l'atrium est amorti économiquement **13 ans** après son installation et permet d'économiser **62 417 €** après **25 ans d'utilisation**.

## 7. Discussions

Dans ce mémoire, nous avons démontré que, théoriquement, l'intégration du night-cooling au bâtiment de Greisch permettrait d'abaisser les impacts économiques et environnementaux de l'utilisation du système HVAC tout en garantissant des températures intérieures plus fraîches en période estivale. La cartographie des dispositifs low tech de HVAC a également montré les différentes possibilités d'intégration de dispositifs selon les cas. Cette partie a pour but de revenir sur le travail réalisé dans ce mémoire, et de se positionner par rapport à ces résultats.

### 7.1. Faisabilité de systèmes HVAC zéro énergie

- Est-il possible de ventiler, chauffer et refroidir les bâtiments en utilisant des dispositifs presque sans consommation d'énergie ?

Le mémoire explore la possibilité d'atteindre des bâtiments zéro énergie en mettant en place des solutions de ventilation, de chauffage et de rafraîchissement sans consommations d'énergie. Cela implique notamment de rechercher la performance énergétique en se concentrant sur la HVAC par le biais d'une démarche low tech.

La démarche low tech vise la protection des ressources naturelles, la minimisation de la consommation d'énergie, le rallongement de la durée de vie des bâtiments et la minimisation des distances de transport (Bloquel et al., 2022; Khalil et al., 2018; Martin et al., 2022; Mouton, Trigaux, et al., 2023). Cette démarche propose de tirer parti de l'environnement direct du bâtiment, utilisant des phénomènes naturels « gratuits » comme les gains solaires ou la ventilation naturelle.

La littérature étudiée dans ce mémoire indique qu'il est possible, efficace et pertinent d'utiliser des dispositifs HVAC low tech. On remarque qu'ils sont très souvent basés sur des phénomènes naturels comme la ventilation naturelle, pour réduire considérablement la consommation énergétique des bâtiments, voire tendre vers des solutions quasiment gratuites en termes d'impacts opérationnels (coût économique nul) et environnementaux (impact environnemental nul). La sobriété de ces dispositifs provient notamment de la maintenance simplifiée de ces derniers.

Cependant, leur succès dépend d'une conception intégrée et d'une bonne compréhension des spécificités du bâtiment et de son environnement, ainsi que de l'acceptabilité par les occupants.

Des exemples concrets de cette approche montrent qu'elle fonctionne, y compris dans des climats tempérés comme celui de la Belgique et pour des bâtiments tertiaires (tels que 2226 de *Baumschlager eberle* en Autriche, Vertikal Nydalen de *Snøhetta* en Norvège ou la médiathèque James Baldwin d'*Associers* en France). De nombreuses agences d'architecture (telles que *Snøhetta*, *Associers*, *White Arkitekter* et beaucoup d'autres) se spécialisent dans les constructions passives voire à énergie positive avec des systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de ventilation à très faibles consommations d'énergie ou sans consommations d'énergie. Ces réalisations montrent qu'un tel objectif est techniquement atteignable, à condition d'une volonté affirmée en phase de conception et d'une approche globale du bâtiment.

Cependant, atteindre cet objectif de ne pas consommer d'énergie dans des bâtiments existants demande plus d'efforts. En effet, sans une conception expressément dédiée à l'objectif d'une HVAC qui ne consomme pas d'énergie, cette mission devient compliquée. Notre simulation a montré que l'intégration d'un dispositif HVAC low tech ne suffit pas à remplacer un système HVAC entier. Il permet de limiter sa consommation en climatisation mais pas de le substituer. Une transformation plus profonde du bâtiment permettrait de réduire encore les consommations d'énergie, sachant que ce mémoire n'a traité que des consommations de climatisation et que la consommation de chauffage peut aussi être réduite grâce à des dispositifs low tech (mur trombe, cheminée solaire, serre, puits climatique, paroi pariétodynamique). En fin de compte, le bâtiment étudié dans ce mémoire, même après intégration du night-cooling, reste un bâtiment fortement mécanisé avec des consommations énergétiques fortes (Tableau 20). De plus, il semble impossible, dans notre cas d'étude, d'élaborer un système HVAC à faibles consommations d'énergie qui remplacerait complètement le système mécanique existant sans transformer profondément l'architecture du bâtiment.

L'élaboration de systèmes hybrides mélangeant des dispositifs d'HVAC mécaniques avec des dispositifs low tech, comme réalisé dans ce mémoire, permettrait théoriquement d'avoir un impact déjà significatif à l'échelle du cycle de vie (-62 417 € et -28 tonnes de CO<sub>2</sub>-équ.). On peut donc insister sur le fait que même si la ventilation, le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments ne sont pas opérés complètement par la low tech, l'intégration de celle-ci dans un bâtiment produit un effet positif sur sa performance énergétique.

Ceci soulève un questionnement plus global quant à l'avenir du parc immobilier belge et mondial : faut-il plutôt construire des nouveaux bâtiments neutres en émissions de GES ou rénover des bâtiments existants énergivores et peu adaptés aux solutions techniques de demain ?

L'enjeu patrimonial et culturel des bâtiments entre dans l'équation. De plus, les objectifs de zéro artificialisation nette ne permettent pas de contourner la question en conservant les deux possibilités : il faudra détruire puis reconstruire du neuf ou rénover et réhabiliter l'existant. Autant d'enjeux différents qui s'agrègent à cette question montre toute la complexité de la réponse à apporter, en effet, il s'agit ici de concilier des enjeux économiques, environnementaux, sociaux et patrimoniaux (et donc culturels et sociétaux) pour aboutir à une solution durable et pérenne.

## 7.2. Contexte normatif

- Les normes actuelles facilitent elles l'installation de systèmes HVAC différents ? Si non comment les modifier ?

Le cadre normatif actuel constitue une limite importante à l'expérimentation de solutions innovantes, notamment pour les systèmes HVAC low tech. Les réglementations en vigueur sont très prescriptives, comme décrit en section 2.1.4. Elles limitent la possibilité de tester de nouvelles approches directement sur des bâtiments réels.

En effet, les normes actuelles demandent de respecter des débits de ventilation minimums, des plages de températures fixées, des taux d'humidité encadrés, des conditions de pression limitées. Le fait de réglementer les grandeurs physiques et non les conséquences de celles-ci sur le bâtiment (confort des occupants notamment) poussent à utiliser la ventilation mécanique au détriment d'autres solutions car c'est un type de ventilation qui permet de contrôler ces grandeurs physiques, ce qui n'est pas le cas pour les dispositifs HVAC low tech.

Réadapter les normes aux besoins des usagers d'un bâtiment serait une solution à envisager. Une manière de faire serait de déplacer le regard normatif de la technique vers l'occupant, en exigeant par exemple de respecter un confort minimum (des indicateurs comme le PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) ou le PMV (Predicted Mean Vote) existent pour quantifier le confort, ils sont définis par la norme EN ISO 7730:2005) plutôt qu'un débit minimum. Ce changement de prisme permettrait de ne pas limiter les solutions disponibles pour les concepteurs et d'encourager l'innovation et l'adaptation de solutions adaptées au cas par cas. La norme NBN EN 16798-1:2019 (Comité Européen de Normalisation, 2019) aborde la notion de confort au travers des PPD et PMV mais uniquement comme critère permettant de dimensionner le chauffage et/ou le refroidissement mécanique exclusivement.

Une piste de recherche supplémentaire est l'intégration de l'ACV dans le cadre normatif. En effet, fixer des limites de GWP sur les bâtiments et leurs composants à l'échelle de leur cycle de vie encouragerait fortement de privilégier des solutions low tech ou à faibles impacts. C'est ce que propose par exemple le programme FutureBuilt développé en Norvège et lancé en 2010 qui a fixé des contraintes supplémentaires en termes d'impact environnemental sur les projets pilotes du programme. Le programme propose une méthodologie complète et détaillée afin de calculer l'impact environnemental d'un bâtiment sur son cycle de vie (Resch et al., s. d.) ainsi que les critères à respecter pour faire partie du programme. Le but du programme est de réaliser 100 projets pilotes qui réduisent les émissions de carbone d'au moins 50 % par rapport à la réglementation actuelle et aux pratiques courantes (FutureBuilt, s. d.). A l'heure actuelle, 44 projets pilotes ont vu le jour en Norvège et 36 sont en cours d'exécution (FutureBuilt, s. d.). Le retour d'expérience est positif et encourageant : « Être un projet pilote n'est pas chose facile, mais ce n'est pas forcément difficile non plus. Grâce à FutureBuilt, les développeurs sont mis au défi de penser différemment et [...] tous les projets pilotes FutureBuilt ont contribué au développement d'une activité de construction bas carbone. » (FutureBuilt, s. d.).

Ce type d'initiative peut complètement se transposer en Belgique, dans le cas de FutureBuilt, le projet a été lancé à l'initiative de six municipalités norvégiennes, dont la capitale Oslo. En Belgique, il serait possible que des politiques publiques encouragent le développement de ce programme à l'échelle du pays entier ou de la région wallonne. La méthodologie proposée par Resch et al. (s. d.) est applicable en Belgique étant donné qu'elle s'appuie sur les phases normalisées de l'ACV présentées en section 2.2.1.

Un réexamen des normes, se focalisant sur le confort des usagers ou le GWP des bâtiments à l'échelle de leur cycle de vie, permettrait alors de recentrer le sujet sur la performance énergétique des bâtiments et d'encourager la conception de projets frugaux et novateurs.

### **7.3. Performance énergétique liée à l'intégration de dispositifs HVAC low tech**

- L'intégration de dispositifs HVAC low-tech dans les bâtiments tertiaires en Belgique permet-elle d'atteindre une meilleure performance énergétique ?

L'étude de cas a montré que l'intégration de dispositifs HVAC low-tech dans un bâtiment tertiaire en Belgique permet d'atteindre une meilleure performance énergétique. La généralisation de ce résultat peut s'appuyer sur la littérature scientifique qui a mené d'autres études dont les conclusions vont dans le même sens (Mouton, Trigaux, et al., 2023; Naili et al.,

2023; Oropeza-Perez & Østergaard, 2014; Raji et al., 2020; Sakiyama et al., 2020) (cf. section 2.2.5.2).

Le mémoire suggère ainsi que l'intégration de dispositifs HVAC low-tech, en particulier des stratégies de ventilation naturelle comme le night-cooling, dans des bâtiments tertiaires en Belgique permet d'améliorer leur performance énergétique en réduisant significativement la consommation d'énergie pour le rafraîchissement (-20 % en 2025 et -22 % en 2050), tout en offrant des avantages économiques et environnementaux.

Cependant, l'efficacité de ces dispositifs dépend fortement des caractéristiques spécifiques du bâtiment et de son environnement, ce qui rend la généralisation complexe. Leur intégration nécessite une compréhension approfondie et une conception architecturale réfléchie. Comme mentionné précédemment, dans notre cas, il a plutôt s'agit de coupler un tel dispositif à un système mécanique existant que de remplacer le système mécanique par un système low tech autonome.

### 7.4. Impacts économiques et environnementaux

- Quels sont les impacts économiques et environnementaux de l'intégration de dispositifs HVAC low tech dans les bâtiments tertiaires en Belgique ?

Le mémoire a étudié l'intégration d'un dispositif low-tech spécifique, le night-cooling associé à l'atrium, dans un bâtiment de bureaux existant en Belgique (le bâtiment Greisch).

Les simulations numériques montrent que l'intégration du night-cooling permet de réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation. Dans le scénario climatique actuel (2025), une économie de 20 % sur la consommation de climatisation a été observée. Cette économie représente une réduction annuelle de 7,27 MWh d'électricité, soit 18,18 MWh d'énergie primaire. Ces économies énergétiques se traduisent par des économies monétaires (1766 € par an) et environnementales (1112 kgCO<sub>2</sub>-équ par an). Le night-cooling permet également de réduire la puissance maximale délivrée par le groupe froid.

Projeté à l'horizon 2050 (scénario RCP 8.5), bien que la consommation globale (chauffage et climatisation) du bâtiment augmente en raison du réchauffement climatique, le night-cooling intégré permet toujours une réduction significative de la consommation pour la climatisation de 22 % par rapport au scénario sans night-cooling en 2050. Les économies monétaires (5967,5 € par an) et environnementales (1794,5 kgCO<sub>2</sub>-équ par an) sont encore plus importantes dans ce scénario projeté.

L'investissement initial dans le night-cooling pour le bâtiment Greisch (estimé à 38 120 €) a un temps de retour sur investissement économique de 13 ans et génère des économies de 62 417 € sur 25 ans. Le retour sur investissement environnemental est encore plus rapide en 8 ans d'utilisation et permet d'économiser 28 tonnes de CO<sub>2</sub>-équ sur 25 ans.

## 7.5. Concordance entre la revue de littérature et l'étude de cas

- La littérature scientifique étudiée et l'étude de cas se rejoignent-elles sur les conclusions à tirer de l'intégration de dispositifs HVAC low tech ?

La mise en parallèle de la revue de la littérature et de l'étude de cas permet de rendre compte de la concordance qui existe entre les résultats obtenus par la littérature scientifique exposés en partie 4 et ceux obtenus dans ce TFE. Concernant le dispositif HVAC low tech étudié (le night-cooling), la littérature scientifique affirme que ce dispositif permet d'observer une économie d'énergie de 26 à 29 % sur la consommation de la climatisation (Guo et al., 2021). L'étude de cas montre qu'une économie de 20 % sur la consommation de la climatisation est réalisée.

Cette différence entre la littérature scientifique et les résultats de ce TFE peut s'expliquer premièrement par les différences de modalités de l'expérience menée dans la recherche de Guo et al. (2021) et celle menée dans l'étude de cas (Tableau 30). En effet, Guo et al. (2021) étudient l'effet du night-cooling sur une seule pièce et optimisent l'ensemble des paramètres via un programme Matlab afin d'atteindre les valeurs de 26 et 29 %. Leurs premiers résultats avec des consignes de base économisent 9 à 18 % d'énergie (Guo et al., 2021). Il est possible d'envisager qu'avec une optimisation du night-cooling dans le cas d'étude, la consommation observée serait augmentée vers les valeurs obtenues par les chercheurs de l'étude.

Tableau 30 : Caractéristiques des différentes études sur le night-cooling et leur résultat

<i>Etude</i>	<i>Caractéristiques de l'étude</i>	<i>Economies d'énergie observées</i>
<i>Etude de cas du TFE</i>	Night-cooling de 80 % du bâtiment sans optimisation des ouvertures / fermetures Localisation : Liège	-20 %
<i>Guo et al. (2021)</i>	Night-cooling d'une pièce dans un bâtiment de bureaux situé à un étage intermédiaire sans optimisation des ouvertures / fermetures. Localisation : Copenhague	Entre -8,6 % et -18,0 %
<i>Guo et al. (2021)</i>	Night-cooling d'une pièce dans un bâtiment de bureaux situé à un étage intermédiaire avec optimisation des ouvertures / fermetures Localisation : Copenhague	Entre -25,7 % et -29 %

Une autre possibilité de la divergence des observations peut résider dans les caractéristiques du cas d'étude. En effet, la masse du bâtiment étudié est faible dans l'extension et l'atrium et donc l'effet du night cooling est réduit car les variations de températures sont plus rapides. La composition du bâtiment ne lui permet pas de stocker la fraîcheur de la nuit et ceci peut

expliquer que le night-cooling ne permet pas de réaliser autant d'économies que ce que la littérature observe.

### 7.6. Conception du bâtiment des bureaux de Greisch

- Pourquoi le bâtiment n'a-t-il pas été conçu de cette manière initialement ?

La forme actuelle du bâtiment résulte d'un processus de transformation étalé dans le temps. Comme décrit en partie 5, un bâtiment principal a d'abord été érigé, avant d'être complété par un atrium et une extension. Chacune de ces étapes a mobilisé des choix constructifs et techniques propres à son temps, notamment en matière de HVAC. Il en résulte aujourd'hui la coexistence de plusieurs systèmes HVAC, difficilement harmonisables (Figure 33). On peut constater la volonté chez les différents architectes du bâtiment d'offrir une bonne qualité de vie à ses usagers, en offrant notamment de nombreuses vues vers la végétation environnante et en amenant beaucoup de lumière naturelle vers les postes de travail. Ces partis pris des architectes entraînent des conséquences sur la performance énergétique du bâtiment. Comme nous l'avons vu, le bâtiment a un fort taux de vitrage et une faible inertie, ce qui diminue les effets du night-cooling (cf. section 6.3.3.3). Ceci appuie une nouvelle fois le fait que le choix d'intégrer des systèmes low tech doit être fait dès la conception d'un projet architectural. On peut supposer que la priorité à l'époque de la construction du bâtiment n'était pas donnée à la sobriété énergétique mais plutôt au confort apporté par la HVAC mécanique.

Néanmoins, certaines tentatives d'intégration de stratégies low tech ont été expérimentées par le passé sans être poursuivies. C'est le cas d'une tentative d'intégration de night-cooling. Cette stratégie mise en œuvre à l'époque est différente de celle proposée dans ce mémoire ; elle reposait sur une ventilation mécanique intensive par ventilateurs durant la nuit. Malheureusement, cette solution a été abandonnée après quelques mois de fonctionnement, mais pas pour les raisons auxquelles on pourrait penser. C'est en raison de problèmes de confort et de maintenance (le bruit généré par les ventilateurs était jugé inacceptable par les occupants et l'intrusion de feuilles mortes dans le bâtiment par les ventilateurs salissait les bureaux) que la solution a été écartée. Cet exemple illustre non seulement les difficultés associées à la mise en œuvre de solutions low tech dans un bâtiment existant, mais aussi l'importance des aspects d'usage et d'acceptabilité dans la réussite de telles stratégies.

Ce mémoire, à travers l'étude du bâtiment de Greisch, souligne que la conception de dispositifs HVAC low tech est trop souvent écartée au détriment de la conception de ventilation mécanique alors même que des solutions low tech existent et peuvent fonctionner.

## 8. Limites et perspectives

La réalisation de ce TFE a permis d'obtenir de nouveaux résultats vis-à-vis des dispositifs HVAC low tech et de leurs impacts sur les bâtiments tertiaires. Tout au long de ce mémoire, la recherche menée s'est heurtée à des limites qui sont explicitées dans cette partie. Néanmoins, ces limites ne constituent pas des obstacles à la recherche mais permettent plutôt de définir des perspectives pour des travaux futurs.

### 8.1. Complexité de généralisation dans le cas de la HVAC

L'une des principales limites identifiée dans ce mémoire concerne la difficulté de généralisation des dispositifs HVAC low tech d'un bâtiment à un autre. En effet, chaque bâtiment présente des caractéristiques propres en termes de géométrie, d'orientation, d'implantation ou de contexte climatique qui influencent fortement le comportement des dispositifs. Un dispositif efficace dans un contexte donné peut ainsi se révéler inadapté, voire contre-productif, dans un autre.

Cette variabilité rend nécessaire, pour les concepteurs, d'acquérir une compréhension du fonctionnement physique qui régit l'utilisation des dispositifs étudiés (ventilation naturelle, inertie thermique, physique du bâtiment etc.). Elle demande également de connaître les dispositifs existants, afin de pouvoir identifier, pour chaque projet, les dispositifs les plus pertinents à adapter ou à combiner.

Dans cette perspective, un prolongement utile de ce mémoire consisterait à poursuivre et enrichir la revue de littérature réalisée, en y intégrant davantage de cas d'étude documentés et de données de fonctionnement. L'objectif serait de constituer une base de connaissances accessible aux concepteurs, leur permettant de mieux situer les conditions de réussite de chaque dispositif.

À terme, cela pourrait conduire à l'élaboration d'un guide méthodologique pour la conception de systèmes HVAC low tech. Ce guide n'aurait pas vocation à proposer des solutions pré-faites, mais plutôt à fournir des méthodes d'analyse et des outils d'aide à la décision, pour accompagner l'intégration d'un dispositif HVAC low tech à un contexte spécifique.

### 8.2. Exhaustivité des dispositifs étudiés

Une autre limite de ce travail réside dans le nombre restreint de dispositifs qui ont été analysés. Le mémoire s'est concentré sur un ensemble de 11 dispositifs low tech. Toutefois, il existe plusieurs dizaines, voire des centaines de dispositifs, développés dans des contextes variés, parfois peu documentés ou encore méconnus. On peut notamment citer les dispositifs qui ont été écartés de la revue de littérature en 3.1.

Au-delà de leur grand nombre, ces dispositifs peuvent également être combinés de différentes façons, ce qui multiplie encore les configurations possibles (Zhang et al., 2021). Or, c'est aussi dans ces logiques de combinaisons que réside le potentiel de performance des approches low



tech. Ce pan des dispositifs HVAC low tech n'a pas pu être explorée de manière exhaustive dans le cadre de ce mémoire.

En termes de perspectives, il serait donc pertinent, au même titre que pour la partie précédente (8.1), de poursuivre et d'élargir la revue de littérature. Il serait également cohérent d'intégrer d'autres concepts passifs peu abordés dans ce TFE, tels que le slow heating, dans une logique de démarche low tech qui ne passe pas par les systèmes HVAC.

### 8.3. Hypothèses posées dans la modélisation

L'étude de cas réalisée dans ce mémoire s'est appuyée sur des hypothèses qui ont été posées tout au long de l'élaboration du modèle numérique. Ces hypothèses traitent de l'occupation des locaux, des gains fournis par les équipements, des horaires d'utilisation et d'occupation, des puissances des chauffages et climatiseurs, etc.

L'ensemble de ces hypothèses reposent sur des données observées dans la réalité du bureau (occupation, nombre d'équipements, horaires d'utilisation, etc.) et sur des données recueillies auprès de Greisch (puissances installées pour le chauffage et la climatisation, débits de pulsion et d'extraction des groupes, consignes de température, etc.). Elles sont donc recevables et cohérentes vis-à-vis de l'étude menée.

Comme expliqué en partie 5, la modélisation d'un jumeau numérique exact du cas d'étude représentait un défi qui dépasse les capacités de temps alloué à ce mémoire sans compromettre les autres objectifs fixés en section 1.3. Le choix a donc été de simplifier le cas d'étude en posant un certain nombre d'hypothèses en restant le plus proche possible de la réalité. En effet, malgré la volonté de répliquer le plus fidèlement et exactement la réalité du fonctionnement du bâtiment, certaines hypothèses éloignent inévitablement l'étude de cas de cette réalité. Ces simplifications, exposées en section 6.1.1, soulignent le fait que cette étude ne peut pas être considérée comme l'élaboration d'un jumeau numérique d'un bâtiment mais plutôt comme la création d'un modèle réaliste et très inspiré d'un bâtiment existant. De plus, malgré la vérification du modèle en section 6.1.2, il n'est pas possible, sans calibration du modèle, d'affirmer que les résultats obtenus seront également obtenus dans la réalité.

Ceci pose donc la question du degré de réalisme des résultats obtenus auquel il est difficile de donner une réponse précise.

### 8.4. Fiabilité de la simulation numérique

La fiabilité de la simulation numérique constitue une autre limite de ce mémoire. Le modèle numérique du bâtiment a été élaboré et vérifié dans le logiciel IES-VE, mais aucune calibration n'a été menée pour les raisons évoquées en partie 5. Cette absence de calibration peut conduire à des écarts entre les résultats simulés et le comportement réel du bâtiment. De plus, il s'avère que le logiciel utilisé dans ce mémoire est peu utilisé par les chercheurs, et n'est pas du tout utilisé pour la calibration de modèle (Vera-Piazzini & Scarpa, 2024) (Figure 56). Les raisons de cette faible popularité par rapport à d'autres logiciels tels que Energy Plus sont certainement liées au coût des licences (Energy Plus est un logiciel gratuit en open source).

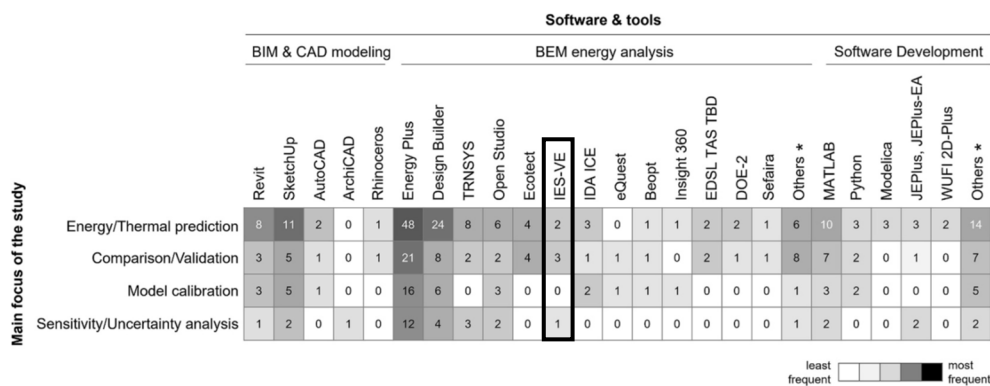


Figure 56 : Synthèse des logiciels et outils utilisés selon la tâche effectuée dans la revue de littérature effectuée par Vera-Piazzini & Scarpa (2024, p. 9)

De plus, des limitations propres au logiciel ont aussi été rencontrées, notamment des difficultés à modéliser certains systèmes comme les convecteurs ou les plafonds froids, ce qui a pu introduire des biais dans la représentation des systèmes HVAC. Certaines consignes n’étaient pas appliquées par le logiciel, ce qui entraînait de la destruction d’énergie (la climatisation et le chauffage qui fonctionne simultanément par exemple, on utilise donc de l’énergie inutilement pour conserver un statu quo).

En termes de perspectives, il serait alors pertinent de reprendre ce travail en menant une calibration rigoureuse du modèle, fondée sur des données mesurées *in situ*. Cela permettrait de vérifier les résultats obtenus et d’améliorer la précision des simulations. Dans cette démarche, l’utilisation d’un autre logiciel de simulation pourrait se justifier vis-à-vis des observations faites précédemment.

Dans le cas du bâtiment Greisch, cette démarche pourrait s’appuyer sur une campagne de mesures encadrée par une méthodologie spécifique. Ces mesures doivent couvrir plusieurs mois de fonctionnement (idéalement trois à quatre mois complets), avec un relevé horaire des températures intérieures dans les différentes zones du bâtiment et une collecte des données de consommation de gaz et d’électricité sur au moins trois années. La prise de mesures des données météorologiques extérieures sur une année entière permettrait également de disposer d’un fichier météo du site. Une telle base de données permettrait alors de réaliser une calibration fiable du modèle selon la ASHRAE *Guideline 14*.

## 8.5. Intégration architecturale de dispositifs low tech

L’intégration de dispositifs low tech, et notamment dans ce mémoire des ouvertures prévues pour le night-cooling, soulève plusieurs problèmes architecturaux. Ces ouvertures, bien qu’essentielles pour permettre une ventilation naturelle pendant la nuit, ont un impact indéniable sur l’architecture du bâtiment, en particulier sur ses façades. En effet, les châssis motorisés qui permettent la ventilation de nuit sont pourvus des grilles afin de prévenir les risques d’effraction et d’éviter l’entrée de nuisibles. Ces éléments modifient l’aspect visuel des façades et altèrent l’esthétisme de ces dernières.

Cet exemple montre que la mise en œuvre de solutions low tech ne se limite pas à des considérations techniques, mais implique une intégration réfléchie dans le projet architectural.

D'une manière plus générale, l'intégration de dispositifs HVAC low tech entraîne aussi leur intégration architecturale dans le bâtiment. Ces dispositifs peuvent être des atouts mis en valeurs par l'architecture mais peuvent également avoir un impact négatif sur l'esthétisme du bâtiment. C'est pourquoi il est préférable de réfléchir à ces dispositifs dès la conception d'un bâtiment pour qu'ils fassent partie intégrante du projet et qu'ils ne soient pas des pièces rajoutées des bâtiments. L'étude de l'intégration de dispositifs low tech d'un point de vue architectural et non technique serait intéressant pour poursuivre les recherches sur le sujet en se concentrant sur les enjeux esthétiques de ces dispositifs.

### 8.6. Notion de confort

Dans le contexte normatif actuel, les simulations numériques restent le principal outil de projection et d'évaluation de ces solutions alternatives. Elles permettent de tester des dispositifs, mais ne peuvent remplacer l'observation d'un fonctionnement réel, ni refléter pleinement les comportements réels des usagers.

Une perspective intéressante serait de prendre du recul sur le problème en questionnant la notion de confort telle qu'elle est actuellement définie. En effet, plusieurs travaux récents soulignent l'importance du facteur humain dans la performance des bâtiments (De Simone & Fajilla, 2019; Donadio & Deville, 2023; Manga & Allen, 2022). Ce mémoire ne questionne ni le confort requis actuellement dans le bâtiment ni l'adaptation du comportement des occupants. Cependant, il semble clair que si ces consignes étaient plus flexibles vis-à-vis des conditions extérieures ou que le comportement des usagers étaient différents (occupants plus vêtus par temps froid, ouverture et fermeture des fenêtres optimisées, etc.), alors les consommations énergétiques du bâtiment se verraient réduites.

Il serait alors pertinent d'étudier l'acceptabilité par les usagers d'un confort moins exigeant et plus sobre en ressources. Cela pourrait passer par des explications de ce que représente énergétiquement l'atteinte du confort actuel et des économies réalisables en acceptant davantage de flexibilité.

Dans cette optique, les livres *Heating People, Not Spaces* (De Decker, 2023) et *Slowheat : chauffer les corps, moins les logements* (De Grave et al., 2024) apportent des pistes de réflexion intéressantes sous le prisme d'une démarche low tech. Ils invitent à déplacer le regard vers des stratégies de confort localisé et personnalisé, plutôt que sur le maintien uniforme d'une température dans tout un volume.

## 9. Conclusion

Ce mémoire a étudié les impacts de l'intégration de dispositifs HVAC low tech dans des bâtiments tertiaires en Belgique. L'étude s'est déroulée en deux temps. La première étape a été consacrée à une revue de littérature de onze dispositifs HVAC low tech dont les principales caractéristiques ont été identifiées puis synthétisées dans une cartographie. La seconde étape a consisté en l'étude de cas d'un bâtiment tertiaire belge où l'intégration d'un dispositif HVAC low tech a été simulé numériquement grâce au logiciel IES-VE.

Le Tableau 31 récapitule les objectifs qui ont été fixés en début du mémoire (cf. section 1.3.1) et les associe aux sections remplissant ces différents objectifs.

Tableau 31 : Synthèse de l'atteinte des objectifs du TFE

<i><b>Objectifs du TFE</b></i>	<i><b>Section(s) remplissant l'objectif</b></i>
Définir les concepts relatifs à la low tech dans le bâtiment	2.2.3 et 0
Etablir une cartographie de dispositifs low tech en HVAC	3.1 et 4
Créer un modèle numérique inspiré d'un cas réel	3.2.1, 5 et 6.1
Concevoir un(plusieurs) dispositif(s) HVAC low tech	3.2.2 et 6.2
Modéliser numériquement un(des) dispositif(s) HVAC low tech	3.2.2 et 6.2
Comparer les impacts du système HVAC inspiré du cas réel et du dispositif HVAC low tech conçu	3.2.3 et 6.3
Montrer l'efficacité ou non d'une telle démarche (économiquement, environnementalement)	6.3, 6.4 et 6.5

Il résulte de ce travail de fin d'études que la littérature scientifique étudiée comme l'étude de cas réalisée valident le fait que l'intégration de dispositifs HVAC low tech dans un bâtiment a un impact positif sur sa consommation d'énergie et permet des économies monétaires et environnementales. Le cas d'étude a également montré que le remplacement complet d'un système HVAC mécanique n'était pas envisageable mais que le couplage d'un dispositif low tech à ce dernier permettait déjà d'améliorer la performance énergétique.

Plus globalement, dans le contexte du réchauffement climatique et du climat belge actuel, ce TFE permet de conclure que l'intégration de la low tech dans des systèmes HVAC mécaniques est une piste pour réduire les consommations énergétiques des bâtiments tertiaires dès aujourd'hui mais aussi dans le futur.

## Bibliographie

Amara, F., Agbossou, K., Cardenas, A., Dubé, Y., & Kelouwani, S. (2015). Comparison and Simulation of Building Thermal Models for Effective Energy Management. *Smart Grid and Renewable Energy*, 06(04), 95-112. <https://doi.org/10.4236/sgre.2015.64009>

Attia, S. (2024a, septembre). *Cours ARCH3272-1 : Building Performance Simulation and Monitoring : Module 1 – BPSM Overview*.

Attia, S. (2024b, septembre). *Cours ARCH3272-1 : Building Performance Simulation and Monitoring : Module 2 – Weather Conditions*.

AVEMS. (2010). *Guide de conception, de dimensionnement et de mise en place de la ventilation naturelle et hybride*. Association professionnelle des industriels français pour la valorisation en ventilation de l'extraction mécanique-statique ou statique. [https://www.effnergie.org/web/images/attach/base\\_doc/1362/Guide\\_de\\_la\\_ventilation\\_naturelle\\_et\\_hybride\\_VNHy\\_AVEMS.pdf](https://www.effnergie.org/web/images/attach/base_doc/1362/Guide_de_la_ventilation_naturelle_et_hybride_VNHy_AVEMS.pdf)

Azari, R. (2014). Integrated energy and environmental life cycle assessment of office building envelopes. *Energy and Buildings*, 82, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.041>

Bai, L. (2021). Ventilation definition and requirements. In *Handbook of Ventilation Technology for the Built Environment : Design, control and testing* (p. 7-38). Institution of Engineering and Technology. [https://digital-library.theiet.org/content/books/10.1049/pb-be001e\\_ch7](https://digital-library.theiet.org/content/books/10.1049/pb-be001e_ch7)

Bastien, D., & Athienitis, A. K. (2012). A Control Algorithm for Optimal Energy Performance of a Solarium/Greenhouse with Combined Interior and Exterior Motorized Shading. *Energy Procedia*, 30, 995-1005.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.112>

Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., Ogunlade Davidson, William Hare, Saleemul Huq, David Karoly, Vladimir Kattsov, Zbigniew Kundzewicz, Jian Liu, Ulrike Lohmann, Martin Manning, Taroh Matsuno, Bettina Menne, Bert Metz, Monirul Mirza, Neville Nicholls, ... Gary Yohe. (2008). *Climate Change 2007 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf)

Bertagnolio, S. (2012). *Evidence-Based Model Calibration for Efficient Building Energy Services* [Ph.D., Université de Liège (Belgium)].

<https://www.proquest.com/docview/3110356799/abstract/2C62A1A4275B415CPQ/1>

Beslay, C., Gournet, R., & Zélem, M.-C. (2015). Le " bâtiment économe " : Utopie technicienne et « résistance » des usages. In J. Boissonnade, *La ville durable controversée. Les dynamiques urbaines dans le mouvement critique* (Petra, p. 335-363).

<https://www.editionspeetra.fr/livres/la-ville-durable-controversee-les-dynamiques-urbaines-dans-le-mouvement-critique>

Bevilacqua, P., Benevento, F., Bruno, R., & Arcuri, N. (2019). Are Trombe walls suitable passive systems for the reduction of the yearly building energy requirements? *Energy*, 185, 554-566. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.003>

Bihouix, P., Baume de Brosse, E., Bonnifet, F., Darras, M., Désaunay, T., Gancille, J.-M., Garnier, A., Groussin, T., Guillerrou, T., Keller, A., Lapierre, C., Py, D., Roudaut, S., Sinaï, A., Soyer, M., Tassin, B., Vanhove, A., & Viel, D. (2019). *Vers des technologies sobres et résilientes – Pourquoi et comment et développer l'innovation « low-tech » ?* La Fabrique Ecologique. <https://www.lafabriqueecologique.fr/app/uploads/2019/04/Note-31-Low-Tech-VF-1.pdf>

Bloquel, M., Bonjean Anne-Charlotte, Fangeat Erwann, Marry Solène, Fustec Alan, Habe Camille, Jaeger Romain, Moiroud Loraine, Morales Eloïse, & Low-tech Lab. (2022). *État des lieux et perspectives des démarches « low-tech »*. Rapport.

BPIE. (2011). *Europe's buildings under the microscope* (p. 132). <https://www.bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope/>

BPIE. (2024). *EU Building Climate Tracker, 3rd edition: Transforming buildings, empowering Europe: A pathway to prosperity, equity and resilience*. (p. 79). <https://www.bpie.eu/publication/eu-buildings-climatetracker-3rd-edition/>

Brown, G. (1990). The BRIS simulation program for thermal design of buildings and their services. *Energy and Buildings*, 14(4), 385-400. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90100-W](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90100-W)

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (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* (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Cao, S.-J., & Feng, Z. (2021). *Handbook of ventilation technology for the built environment: Design, control and testing*. Institution of engineering and technology.

Carlucci, S., Hamdy, M., & Moazami, A. (2018). Challenges in the Modeling and Simulation of Green Buildings. In R. Wang & X. Zhai (Éds.), *Handbook of Energy Systems in Green Buildings* (p. 3-34). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49120-1\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49120-1_50)

Chang, Y., Ries, R. J., & Wang, Y. (2013). Life-cycle energy of residential buildings in China. *Energy Policy*, 62, 656-664. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.053>

Chen, S. (2011). *System dynamics based models for selecting HVAC systems for office buildings: A life cycle assessment from carbon emissions perspective* [Thèse, RMIT University]. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=System%20Dynamics%20Based%20Models%20for%20Selecting%20HVAC%20Systems%20for%20Office%20Buildings%3A%20A%20Life%20Cycle%20Assessment%20from%20Carbon%20Emissions%20Perspective%2C%20Master%20Thesi](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=System%20Dynamics%20Based%20Models%20for%20Selecting%20HVAC%20Systems%20for%20Office%20Buildings%3A%20A%20Life%20Cycle%20Assessment%20from%20Carbon%20Emissions%20Perspective%2C%20Master%20Thesi)

s&author=S.%20Chen&publication\_year=2011

Chen, Y., Tong, Z., & Malkawi, A. (2017). Investigating natural ventilation potentials across the globe : Regional and climatic variations. *Building and Environment*, 122, 386-396.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.026>

Cheng, S., Tekler, Z. D., Jia, H., Li, W., & Chong, A. (2024). Evaluating different levels of information on the calibration of building energy simulation models. *Building Simulation*, 17(4), 657-676.  
<https://doi.org/10.1007/s12273-024-1115-8>

Chong, A., Gu, Y., & Jia, H. (2021). Calibrating building energy simulation models : A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*, 253, 111533.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533>

Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123-141.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>

Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz. (2024). *Analyse semestrielle de l'évolution des prix de l'énergie – 2ème semestre 2024*.  
<https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Prices/EvolPrFR.pdf>

Costanzo, V., & Donn, M. (2017). Thermal and visual comfort assessment of natural ventilated office buildings in Europe and North America. *Energy and Buildings*, 140, 210-223.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.003>

D'Agostino, D., Marino, C., & Minichiello, F. (2020). Earth-to-Air Versus Air-to-Air

Heat Exchangers : A Numerical Study on the Energetic, Economic, and Environmental Performances for Italian Office Buildings. *Heat Transfer Engineering*, 41(12), 1040-1051.  
<https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1600864>

De Decker, K. (2023). *Heating people, not spaces*. Low-tech Magazine.

De Grave, D., Anciaux, A., Sobczak, J., & Wallenborn, G. (2024). *Slowheat : Chauffer les corps, moins les logements. Une recherche collective sur la sobriété de nos pratiques de chauffage*. Presses universitaires de Louvain.

De Simone, M., & Fajilla, G. (2019). Occupant Behavior : A « New » Factor in Energy Performance of Buildings -Methods for Its Detection in Houses and in Offices. *Journal of World Architecture*, 2.  
<https://doi.org/10.26689/jwa.v2i2.544>

De Wilde, P. (2017, août 7). *The Concept of Building Performance in Building Performance Simulation – a Critical Review*. 2017 Building Simulation Conference.  
<https://doi.org/10.26868/25222708.2017.270>

Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie. (2018). *Le guide PEB 2018*. <https://energie.wallonie.be/fr/guide-peb-2018.html?IDC=9652>

Flourentzou, F., Pantet, S., & Ritz, K. (2017). Design and performance of controlled natural ventilation in school gymnasiums. *International Journal of Ventilation*, 16(2), 112-123. Scopus.  
<https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1220202>

Galli, A., Sommerwerk, N., Mancini, M. S., & Pihlainen, S. (2024). *Exploring the societal factors enabling to halt and reverse the loss and change of biodiversity (ETC-*

BE Report 2024/2). Zenodo.  
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.14033732>

García-Sanz-Calcedo, J., de Sousa Neves, N., & Almeida Fernandes, J. P. (2021). Measurement of embodied carbon and energy of HVAC facilities in healthcare centers. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125151.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125151>

Garrett, A., & New, J. (2016). Suitability of ASHRAE Guideline 14 Metrics for Calibration. *ASHRAE Transactions*, 122(1), 469-477.

Goulet, F. (2008). *L'innovation par retrait : Reconfiguration des collectifs sociotechniques et de la nature dans le développement de techniques culturelles sans labour* (France) [Thesis, Université Pierre Mendès France].  
<https://agritrop.cirad.fr/548840/>

Goyal, V., Asati, A. K., & Garg, R. K. (2022). A Review on the Performance of Earth Air Heat Exchanger Coupled with Other Systems. In P. K. Chaurasiya, A. Singh, T. N. Verma, & U. Rajak (Éds.), *Technology Innovation in Mechanical Engineering* (p. 521-531). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7909-4\\_47](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7909-4_47)

Gratia, E., & De Herde, A. (2004). Natural ventilation in a double-skin facade. *Energy and Buildings*, 36(2), 137-146.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.10.008>

Guo, R., Hu, Y., Heiselberg, P., Johra, H., Zhang, C., & Peng, P. (2021). Simulation and optimization of night cooling with diffuse ceiling ventilation and mixing ventilation in a cold climate. *Renewable Energy*, 179, 488-501.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.077>

Gupta, N., & Tiwari, G. N. (2016). Review of passive heating/cooling systems of buildings. *Energy Science & Engineering*, 4(5), 305-333.  
<https://doi.org/10.1002/ese3.129>

Hajji, A., Ezaa, N., Laaroussi, N., Garoum, M., & Rhachi, M. (2023). Energy saving in the building by integration of a passive heating system by parietodynamic effect. *2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, 1-5.  
<https://doi.org/10.1109/ICECCME57830.2023.10253131>

Hauglustaine, J.-M., & Simon, F. (2018). *La ventilation et l'énergie—Guide pratique pour les architectes*. <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide-bleu-ventilation-optimize.pdf?IDR=41652>

Horan, J. M., & Finn, D. P. (2008). Sensitivity of air change rates in a naturally ventilated atrium space subject to variations in external wind speed and direction. *Energy and Buildings*, 40(8), 1577-1585.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.013>

Hoxha, E., Maierhofer, D., Saade, M. R. M., & Passer, A. (2021). Influence of technical and electrical equipment in life cycle assessments of buildings: Case of a laboratory and research building. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(5), 852-863.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-021-01919-9>

Hughes, B. R., Calautit, J. K., & Ghani, S. A. (2012). The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied Energy*, 92, 606-627.



<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>

Integrated Environmental Solutions. (2010, février). *Building Envelope and Fabric Load Tests performed on ApacheSim in accordance with ANSI/ASHRAE Standard 140-2007*.

[https://www.iesve.com/downloads/help/Thermal/Reference/ASHRAE140-2007ApacheSim-Sec5-2\\_Envelope.pdf](https://www.iesve.com/downloads/help/Thermal/Reference/ASHRAE140-2007ApacheSim-Sec5-2_Envelope.pdf)

Judkoff, R., Wortman, D., O'Doherty, B., & Burch, J. (2008). *Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations* (NREL/TP-550-42059, 928259; p. NREL/TP-550-42059, 928259). <https://doi.org/10.2172/928259>

Khalil, A.-A., Fikry, M., & Abdeaal, W. (2018). High technology or low technology for buildings envelopes in residential buildings in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 3779-3792. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.11.001>

Khan, N., Su, Y., & Riffat, S. B. (2008). A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings*, 40(8), 1586-1604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.015>

Kiamili, C., Hollberg, A., & Habert, G. (2020). Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Systems for a New Office Building Based on BIM. *Sustainability*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su12083372>

Latzko-Toth, G. (2015). Objet technique (artefact, instrument, machine, dispositif). In *Sciences, technologies et sociétés de A à Z* (Presses de l'Université de Montréal, p. 165-168). <https://doi.org/10.4000/books.pum.4334>

Manga, A., & Allen, C. (2022). *Implications of a natural ventilation retrofit of an office building*.

Mao, J., Yang, W., & Gao, N. (2015). The transport of gaseous pollutants due to stack and wind effect in high-rise residential buildings. *Building and Environment*, 94, 543-557.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.012>

Martin, A., Gaultier, A., & Colin, C. (2022, juillet). Cartographie du concept low-tech : Guider la conception vers des techniques soutenables. *Actes du 56ème Congrès de la SELF, Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement*. Genève, 6 au 8 juillet 2022.

McDonough, W., & Braungart, M. (2011). *Cradle to cradle : Créer et recycler à l'infini*. Gallimard.

Modirrousta, S., & Boostani, H. (2016). Analysis of Atrium Pattern, Trombe Wall and Solar Greenhouse on Energy Efficiency. *Procedia Engineering*, 145, 1549-1556. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.195>

Moosavi, L., Mahyuddin, N., Ab Ghafar, N., & Azzam Ismail, M. (2014). Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 654-670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.035>

Moujalled, B., Jobert, R., Guyot, G., Dufresne, M., Demouge, F., Rousseau, A., Coeudevez, C.-S., & MEDIECO. (2022). *Projet VNat : Évaluation des systèmes de ventilation naturelle ou hybride—Elaboration et mise en œuvre in situ d'une méthode d'évaluation performantielle*. 26.

Mouton, L., Allacker, K., & Röck, M. (2023). Bio-based building material solutions for environmental benefits over conventional construction products – Life cycle assessment of regenerative design

strategies (1/2). *Energy and Buildings*, 282, 112767.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112767>

Mouton, L., Trigaux, D., Allacker, K., & Röck, M. (2023). Low-tech passive solar design concepts and bio-based material solutions for reducing life cycle GHG emissions of buildings – Life cycle assessment of regenerative design strategies (2/2). *Energy and Buildings*, 282, 112678. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112678>

Mustafaraj, G., Marini, D., Costa, A., & Keane, M. (2014). Model calibration for building energy efficiency simulation. *Applied Energy*, 130, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.019>

Naili, B., Haber, I., & Kistelegdi, I. (2023). Natural ventilation in high-rise office building – Comfort and energy performance. *Pollack Periodica*, 18. <https://doi.org/10.1556/606.2023.00839>

Neuwels, J. (2023). *La Ventilation naturelle des bâtiments performants comme manifeste*.

Oropeza-Perez, I., & Østergaard, P. A. (2014). Potential of natural ventilation in temperate countries – A case study of Denmark. *Applied Energy*, 114, 520-530. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.008>

Passive House Institute. (2023, janvier 20). *Criteria for Buildings : Passive House – EnerPHit – PHI Low Energy Building*. [https://passiv.de/downloads/03\\_building\\_criteria\\_en.pdf](https://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf)

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>

Pollet, I., & Renson, P. (2008). Nightcooling-practical experiences in offices and the need for standard implementation into energy performance legislation. *International Journal of Ventilation*, 6(4), 359-366. Scopus. <https://doi.org/10.1080/14733315.2008.11683791>

Porta-Gándara, M. A., Fernández-Zayas, J. L., & Chargoy-del-Valle, N. (2020). Thermosiphon radiation capacity modelling for the cooling of dwellings. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100724. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100724>

Rabani, M., Madessa, H. B., Ljungström, M., Aamodt, L., Løvvold, S., & Nord, N. (2021). Life cycle analysis of GHG emissions from the building retrofitting : The case of a Norwegian office building. *Building and Environment*, 204, 108159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108159>

Rabani, M., Petersen, A. J., Steneng, C., Utstøl, S., & Halla, H. (2024). Hybrid Ventilation Systems for Reduced Lifetime Emissions in Cold Climates. *E3S Web of Conferences*, 562, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456202002>

Raftery, P., Keane, M., & Costa, A. (2011). Calibrating whole building energy models : Detailed case study using hourly measured data. *Energy and Buildings*, 43(12), 3666-3679. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.039>

Raji, B., Tenpierik, M. J., Bokel, R., & van den Dobbelaars, A. (2020). Natural summer ventilation strategies for energy-saving in high-rise buildings : A case study in the Netherlands. *International Journal of*

*Ventilation*, 19(1), 25-48.  
<https://doi.org/10.1080/14733315.2018.1524210>

Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592-1600.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>

Ramon, D. (2021). *Towards Future-Proof Buildings in Belgium: Climate and Life Cycle Modelling for Low-Impact Climate Robust Office Buildings* [KU Leuven].  
<https://www.researchportal.be/en/publication/towards-future-proof-buildings-belgium-climate-and-life-cycle-modelling-low-impact>

Reiter, S. (2010). Life Cycle Assessment of Buildings – a review. *ArcelorMittal International Network in Steel Construction, Sustainability Workshop and Third Plenary Meeting*.  
<https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/96541/1/Paper-Reiter-2010.pdf>

Reiter, S. (2023). *Cours ARCH2007-2: Conception architecturale et urbaine durable—Chapitre 5B sur l'ACV*.

Resch, E., Wiik, M. K., Tellnes, L. G., Andresen, I., Selvig, E., & Stoknes, S. (s. d.). *FutureBuilt Zero—A simplified dynamic LCA method with requirements for low carbon emissions from buildings*.  
<https://www.futurebuilt.no/content/download/35775/195267>

Rucińska, J., Komerska, A., & Kwiatkowski, J. (2020). Preliminary Study on the GWP Benchmark of Office Buildings in Poland Using the LCA Approach. *Energies*, 13(13), Article 13.  
<https://doi.org/10.3390/en13133298>

Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and

challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6340-6351.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.032>

Saade, M. R. M., Guest, G., & Amor, B. (2020). Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence? *Building and Environment*, 167, 106449.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106449>

Sakiyama, N. R. M., Carlo, J. C., Frick, J., & Garrecht, H. (2020). Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109933.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109933>

Schlegl, F., Gantner, J., Traunsperger, R., Albrecht, S., & Leistner, P. (2019). LCA of buildings in Germany: Proposal for a future benchmark based on existing databases. *Energy and Buildings*, 194, 342-350.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.038>

Shi, L., Zhang, G., Yang, W., Huang, D., Cheng, X., & Setunge, S. (2018). Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 223-238.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.033>

Struck, C., Kotek, P., & Hensen, J. L. (2009). On incorporating uncertainty analysis in abstract building performance simulation tools. *Journal of Building Physics*, 33(1), 5-27.  
<https://doi.org/10.1177/1744259109103345>

Tomrukcu, G., Kizildag, H., Avgan, G., Dal, O., Saglam, N. G., Ozdemir, E., & Ashrafian, T. (2024). A systematic approach to manual calibration and validation of building energy simulation.

*Smart and Sustainable Built Environment, ahead-of-print*(ahead-of-print).  
<https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2023-0296>

United Nations Environment Program. (2019). *2019 Global Status Report for Buildings and Construction Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector* (p. 41). United Nations Environment Program. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/3da9daf9-ef75-4a37-b3da-a09224e299dc/2019\\_Global\\_Status\\_Report\\_for\\_Buildings\\_and\\_Construction.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/3da9daf9-ef75-4a37-b3da-a09224e299dc/2019_Global_Status_Report_for_Buildings_and_Construction.pdf)

United Nations Environment Program. (2024). *2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. United Nations Environment Program. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>

Vera-Piazzini, O., & Scarpa, M. (2024). Building energy model calibration: A review of the state of the art in approaches, methods, and tools. *Journal of Building Engineering*, 86, 108287. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108287>

Wang, H., & Zhai, Z. (John). (2016). Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. *Energy and Buildings*, 128, 319-335. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.080>

Wang, Q., Zhang, G., Li, W., & Shi, L. (2020). External wind on the optimum designing parameters of a wall solar

chimney in building. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100842. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100842>

Yang, D., Guo, Y., & Zhang, J. (2016). Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) in a harmonic thermal environment. *Energy Conversion and Management*, 109, 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.050>

Yao, R., & Xiong, J. (2021). Air ventilation system: Air distribution in a natural ventilation system. In S.-J. Cao & Z. Feng (Éds.), *Handbook of Ventilation Technology for the Built Environment: Design, control and testing* (p. 181-224). Institution of Engineering and Technology. [https://doi.org/10.1049/PBBE001E\\_ch7](https://doi.org/10.1049/PBBE001E_ch7)

Ylmén, P., Peñaloza, D., & Mjörnell, K. (2019). Life Cycle Assessment of an Office Building Based on Site-Specific Data. *Energies*, 12(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en12132588>

Zhang, H., Yang, D., Tam, V. W. Y., Tao, Y., Zhang, G., Setunge, S., & Shi, L. (2021). A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110795>

Zhao, D., Martini, C. E., Jiang, S., Ma, Y., Zhai, Y., Tan, G., Yin, X., & Yang, R. (2017). Development of a single-phase thermosiphon for cold collection and storage of radiative cooling. *Applied Energy*, 205, 1260-1269. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.057>

## Webographie

*Buildings Breakthrough* | *GlobalABC*. (s. d.). Consulté 13 mars 2025, à l'adresse <https://globalabc.org/buildings-breakthrough>

*Climat.be*. (s. d.). *Klimaat* | *Climat*. Consulté 19 mai 2025, à l'adresse <https://climat.be>

*CO<sub>2</sub> emissions of electricity consumption*. (2024, janvier 1). *Electricity Maps*. Consulté 24 avril 2025, à l'adresse <https://app.electricitymaps.com/zone/BE/all/yearly>

Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz. (2024). *Analyse semestrielle de l'évolution des prix de l'énergie – 2ème semestre 2024*. Consulté 13 avril 2025, à l'adresse <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Prices/EvolPrFR.pdf>

*DesignBuilder Software Ltd—Product Overview*. (s. d.). Consulté 23 mai 2025, à l'adresse <https://designbuilder.co.uk/software/product-overview>

Donadio, E., & Deville, L. (2023, avril 4). *Mettre en œuvre les low-tech dans les bâtiments collectifs*. Inddigo, le blog. Consulté 24 avril 2024, à l'adresse <https://blog.inddigo.com/le-lab-inddigo/mettre-en-oeuvre-les-low-tech-dans-les-batiments-collectifs-2052/>

*EES: Engineering Equation Solver* | *F-Chart Software: Engineering Software*. (s. d.). Consulté 28 avril 2025, à l'adresse <https://fchartsoftware.com/ees/>

Energie Plus. (2007, septembre 25). *Choisir le vitrage : La performance énergétique et lumineuse du vitrage*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/fenetres2/choisir-le-vitrage/>

*EnergyPlus*. (s. d.). Consulté 23 mai 2025, à l'adresse <https://energyplus.net/>

Envirobat Grand Est (Réalisateur). (2022, octobre 26). *Conférence ventilation naturelle - une solution pour tous les bâtiments ? (06/10/2022)* [Enregistrement vidéo]. <https://www.youtube.com/watch?v=5BR8E1bwk94>

FutureBuilt. (s. d.). *What is FutureBuilt*. FutureBuilt. Consulté 26 mai 2025, à l'adresse <https://www.futurebuilt.no/English#!/English>

Gilabert, C. (2020, janvier 31). *Pourquoi l'alternative low-tech tarde à se généraliser* [Média]. Usbek & Rica. Consulté le 8 mai 2024, à l'adresse <https://usbeketrica.com/fr/article/pourquoi-alternative-low-tech-tarde-se-generaliser>

Hamant, O. (Réalisateur). (2024a, janvier 22). *La révolution de la robustesse | OLIVIER HAMANT | TEDxQuartierLatin* [Enregistrement vidéo]. [https://www.youtube.com/watch?v=Ql2\\_sO30ITY](https://www.youtube.com/watch?v=Ql2_sO30ITY)

Hamant, O. (Réalisateur). (2024b, juillet 3). *Conférence : La robustesse du vivant comme antidote au culte de la performance - Olivier Hamant* [Enregistrement vidéo].

<https://www.youtube.com/watch?v=DvU4jKnzTII>

INIES. (2023). *L'ACV bâtiment*. Inies. Consulté 24 novembre 2024, à l'adresse <https://www.inies.fr/inies-pour-le-batiment/lacv-batiment/>

Integrated Environmental Solutions. (2010, février). *Building Envelope and Fabric Load Tests performed on ApacheSim in accordance with ANSI/ASHRAE Standard 140-2007*. Consulté le 15 février 2025, à l'adresse [https://www.iesve.com/downloads/help/Thermal/Reference/ASHRAE140-2007ApacheSim-Sec5-2\\_Envelope.pdf](https://www.iesve.com/downloads/help/Thermal/Reference/ASHRAE140-2007ApacheSim-Sec5-2_Envelope.pdf)

Keller, A., & Bournigal, E. (2022). *Infographie « Low-tech : Assurer durablement l'essentiel pour tous » regroupant les critères de toute démarche d'innovation low-tech*. [Low-tech Nation.]. Consulté le 5 octobre 2024, à l'adresse <https://lowtechnation.com/low-tech/>

Lepretre, J. (2022, novembre 10). *BTP : état des lieux de la transition écologique et énergétique du secteur du bâtiment*. Big Media. Consulté le 8 mai 2024, à l'adresse <https://bigmedia.bpifrance.fr/decryptages/btp-etat-des-lieux-de-la-transition-ecologique-et-energetique-du-secteur-du-batiment>

*Open Data Platform*. (s. d.). Consulté 22 juin 2024, à l'adresse <https://data.footprintnetwork.org/#/>

PCA-STREAM (Réalisateur). (2024, août 12). Emmanuel Doutriaux—L'air en architecture (11) [Émission]. In *STREAM VOICES*. <https://pca-stream.com/en/explore/air-in-architecture/>

*Photo Daylight Website*. (s. d.). Consulté 5 avril 2025, à l'adresse <https://www.photo-daylight.com/home.html>

Prémillieu, A. (2025, janvier 23). *La notion de robustesse pour interroger le modèle de l'économie circulaire*. eclaira.org. <https://www.eclaira.org/articles/h/la-notion-de-robustesse-pour-interroger-le-modele-de-l-economie-circulaire.html>

*Progression du Jour du Dépassement de la Terre au fil des années—Earth Overshoot Day*. (s. d.). Consulté 22 juin 2024, à l'adresse <https://overshoot.footprintnetwork.org/newroom/dates-jour-depassement-terre/>

Rochas-Parrot, J.-F., & Haonfaure, R. (2024, janvier 31). Robustesse : Une infographie contre le culte de la performance ? *Les écolohumanistes*. <https://lesecolohumanistes.fr/robustesse/>

*The Paris Agreement | UNFCCC*. (s. d.). Consulté 22 juin 2024, à l'adresse <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

Windfinder.com. (s. d.). *Windfinder.com—Wind and weather statistic Aéroport de Liège*. Windfinder.com. Consulté 7 avril 2025, à l'adresse <https://www.windfinder.com/windstatistics/liege>

XPair. (2023, janvier 18). *Ventilation naturelle : Une réponse pertinente aux enjeux d'aujourd'hui ?* XPair. Consulté le 25 septembre 2024, à l'adresse [https://conseils.xpair.com/actualite\\_experts/v-entilation-naturelle-solution-enjeux.htm](https://conseils.xpair.com/actualite_experts/v-entilation-naturelle-solution-enjeux.htm)

## Normes et standards

Code du bien-être au travail, Livre III.- Lieux de travail, Titre 1er - Exigences de base relatives aux lieux de travail (2017). [https://www.ejustice.just.fgov.be/cgi\\_loi/article.pl?language=fr&sum\\_date=&pd\\_search=2017-06-02&numac\\_search=2017A10461&page=1&lg\\_txt=F&caller=list&2017A10461=0&tier=promulgation&view\\_numac=2022b30600fx1804032130fr&dt=CODE+DU+BIE+N+ETRE+AU+TRAVAIL&fr=f&choix1=ET#list-link-1](https://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/article.pl?language=fr&sum_date=&pd_search=2017-06-02&numac_search=2017A10461&page=1&lg_txt=F&caller=list&2017A10461=0&tier=promulgation&view_numac=2022b30600fx1804032130fr&dt=CODE+DU+BIE+N+ETRE+AU+TRAVAIL&fr=f&choix1=ET#list-link-1)

Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul, 15798:2012 NBN EN (2012). [https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40\\_id=242541&p40\\_language\\_code=fr&p40\\_detail\\_id=64769&lang=fr](https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=242541&p40_language_code=fr&p40_detail_id=64769&lang=fr)

Directive (UE) 2024/1275 du Parlement européen et du Conseil du 24 avril 2024 sur la performance énergétique des bâtiments (2024). [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L\\_202401275](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401275)

Dispositifs de ventilation des immeubles non résidentiels : Méthode de détermination et exigences, Arrêté du Gouvernement wallon portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments § Annexe C3 - Dispositifs de ventilation des immeubles non résidentiels (2014). <https://wallex.wallonie.be/eli/arrete/2014/05/15/2014027210>

Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate (ISO 8996:2004), 8996:2004 ISO (2004). [https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40\\_id=203046&p40\\_language\\_code=en&p40\\_detail\\_id=29189&session=12764892967375](https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40_id=203046&p40_language_code=en&p40_detail_id=29189&session=12764892967375)

Le pacte vert pour l'Europe (2019). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&qid=1742815592725>

Management Environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Principes et cadres, 14040:2006 ISO (2006). <https://www.iso.org/fr/standard/37456.html>

Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, 14044:2006 ISO (2006). <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html>

Measurement of energy, demand and water savings, Pub. L. No. ASHRAE Guideline 14-2023 (2023). [https://store.accuristech.com/standards/ashrae-guideline-14-2023-measurement-of-energy-demand-and-water-savings?product\\_id=2569793&srsId=AfmBOoqSWqzTsdTKIfGYOyXsPSYgEkk7C02034IjU6K3EmvXxdHiit2t#](https://store.accuristech.com/standards/ashrae-guideline-14-2023-measurement-of-energy-demand-and-water-savings?product_id=2569793&srsId=AfmBOoqSWqzTsdTKIfGYOyXsPSYgEkk7C02034IjU6K3EmvXxdHiit2t#)

Method of Test for Evaluating Building Performance Simulation Software, Pub. L. No. ANSI/ASHRAE Standard 140-2023 (2023). [https://store.accuristech.com/standards/ashrae-140-2023?product\\_id=2576552](https://store.accuristech.com/standards/ashrae-140-2023?product_id=2576552)

Performance énergétique des bâtiments - Exigences énergétiques pour l'éclairage - Partie 2: Explication et justification de l'EN 15193-1, Module M9, 15193-2:2017 CEN/TR (2017). [https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40\\_id=197384&p40\\_language\\_code=en&p40\\_detail\\_id=82040&session=30267879715109](https://edu.nbn.be/data/r/platform/eduportal/detail?p40_id=197384&p40_language_code=en&p40_detail_id=82040&session=30267879715109)

Performance énergétique des bâtiments -  
Ventilation des bâtiments - Partie 1 :  
Données d'entrées d'ambiance intérieure  
pour la conception et l'évaluation de la  
performance énergétique des bâtiments  
couvrant la qualité de l'air intérieur,  
l'ambiance thermique, l'éclairage et  
l'acoustique (Module M1-6), 16798-1:2019  
NBN EN (2019).  
[https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/  
detail?p40\\_id=197292&p40\\_language\\_cod  
e=fr&p40\\_detail\\_id=88832](https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=197292&p40_language_code=fr&p40_detail_id=88832)

Performance énergétique des bâtiments -  
Ventilation des bâtiments - Partie 3: Pour  
bâtiments non résidentiels - Exigences de  
performances pour les systèmes de  
ventilation et de climatisation (Modules  
M5-1, M5-4), 16798-3:2017 NBN EN  
(2017).  
[https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/  
detail?p40\\_id=197285&p40\\_language\\_cod  
e=fr&p40\\_detail\\_id=82687](https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=197285&p40_language_code=fr&p40_detail_id=82687)