

Optimisation énergétique par l'analyse des consommations de la régulation des systèmes techniques : cas de l'école

Auteur : Vandael, Justin

Promoteur(s) : Monfils, Stéphane; 2770

Faculté : Faculté des Sciences

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

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/26532>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement
UNI.LU – Faculty of Science, Technology and Medicine

**OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE PAR L'ANALYSE DES
CONSOMMATIONS ET L'AMÉLIORATION DE LA RÉGULATION
DES SYSTÈMES TECHNIQUES : CAS DE L'ÉCOLE
SAINTE-VÉRONIQUE À LIÈGE**

JUSTIN VANDAEI

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

ANNÉE ACADÉMIQUE 2025-2026

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE STÉPHANE MONFILS ET FRANK SCHOLZEN

COMITÉ DE LECTURE :
STÉPHANE MONFILS
FRANK SCHOLZEN
JONAS LAMBERT
JULIEN MERLO

Copyright

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

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

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : VANDAEL Justin
[vandaeljustin2805@gmail.com]

Remerciements

À la fin de ce mémoire, je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes, qu'elles soient directes ou indirectes, qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.

Tout d'abord, je souhaiterais remercier mes promoteurs, *Monsieur Stéphane Monfils* et *Monsieur Frank Scholzen*, pour leur orientation, leurs conseils et leur disponibilité tout au long de ce travail. Grâce à leurs commentaires et à leur expérience, j'ai été inspiré à approfondir mes réflexions pour améliorer la qualité de ce mémoire.

Je tiens à remercier toute l'équipe de *BEMS* pour son aide et son soutien dans ce projet. Je souhaite particulièrement remercier *Madame Elisabeth Davin*, *Monsieur Jonas Lambert* et *Monsieur Julien Merlo* pour le temps qu'ils ont consacré, leur assistance technique et leurs explications concernant les outils de simulation et le fonctionnement énergétique des bâtiments étudiés.

De plus, je voudrais remercier tout le personnel enseignant du *Campus d'Arlon*. De nombreux cours que j'ai suivis au fil des années m'ont permis de développer mes connaissances et ont renforcé mon intérêt pour les questions environnementales et énergétiques. Leur passion pour le domaine de l'environnement a été un tremplin pour mon désir d'en apprendre davantage et de continuer dans cette direction.

Je suis également reconnaissant envers l'entreprise *BE-Énergie*, qui m'a permis de découvrir concrètement le domaine de la *Performance Énergétique des Bâtiments*. Cette expérience m'a été d'une aide précieuse pour comprendre les enjeux abordés dans ce mémoire et pour rédiger certaines parties du travail.

Je souhaite également remercier tous mes camarades du *Master en Sciences et Gestion de l'Environnement*. Ces années d'études n'auraient certainement pas été vécues de la même manière sans leur présence, leur bonne humeur, leur soutien et les nombreux moments partagés tout au long du cursus. Les échanges, le travail accompli ensemble et le soutien mutuel quotidien ont grandement contribué à rendre cette expérience enrichissante, tant sur le plan académique que personnel.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour son soutien tout au long de mes études. Merci pour votre confiance, vos encouragements et votre présence lors des moments plus difficiles. Merci aussi pour les nombreuses discussions, conseils et remises en question qui m'ont permis de prendre du recul sur mes idées lorsque cela était nécessaire. Les valeurs qui m'ont été inculquées depuis l'enfance ont grandement contribué à mon intérêt pour les questions environnementales et à l'achèvement de ce parcours.

Résumé

Avec les problèmes actuels de transition énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, améliorer la performance énergétique des bâtiments constitue un levier clé. Les bâtiments scolaires représentent également une source majeure d'économies d'énergie potentielles, en raison de leur taille, de leurs périodes d'occupation spécifiques et du fait qu'une grande partie du parc immobilier est généralement plus ancienne.

Ce mémoire s'inscrit dans ce contexte et examine la performance énergétique d'une école située à Liège. La recherche vise d'abord à évaluer la performance énergétique des différents bâtiments sur le site, à identifier les sources de déperditions et à proposer des recommandations pour réduire la consommation sans compromettre le confort des occupants.

Tout d'abord, une revue de la littérature a été réalisée afin de présenter les principes de la performance énergétique des bâtiments, les méthodes d'évaluation actuelles, ainsi que les réglementations applicables pour le processus de certification *PEB*. Une attention particulière est portée aux limites des méthodes théoriques et, en particulier, sur l'intérêt croissant pour les méthodes d'utilisation et de suivi de l'énergie qui utilisent des données réelles.

La seconde partie du travail est basée sur des données énergétiques réelles provenant des relevés de consommation et d'une campagne de mesures menée dans plusieurs bâtiments de l'établissement. Les températures intérieures et l'humidité relative ont été analysées pour caractériser le fonctionnement des bâtiments et identifier d'éventuels dysfonctionnements.

Une modélisation énergétique dynamique a ensuite été développée à l'aide du logiciel *TRNSYS*. Cette modélisation a permis de simuler le comportement thermique des bâtiments étudiés et d'évaluer l'impact de différentes mesures d'amélioration. Plusieurs scénarios ont été examinés, y compris l'optimisation de la régulation du chauffage, l'adaptation des horaires de fonctionnement en fonction des périodes d'occupation, ainsi que différentes options de rénovation énergétique.

Les résultats indiquent qu'une part significative d'économies d'énergie peut être réalisée sans travaux majeurs. L'optimisation des consignes de chauffage et de la régulation apparaît comme une mesure particulièrement efficace.

Ce travail indique une tendance à intégrer l'analyse de données réelles, le suivi des bâtiments et la simulation énergétique pour orienter les décisions de gestion énergétique et de rénovation dans le contexte scolaire. Cela pose également une base méthodologique qui peut être reproduite dans d'autres établissements aux caractéristiques similaires.

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ	4
TABLE DES MATIÈRES.....	5
TABLE DES FIGURES	7
TABLE DES TABLEAUX.....	9
TABLE DES ÉQUATIONS.....	10
INTRODUCTION.....	11
ÉTAT DE L'ART	13
I. CONTEXTE ET ENJEUX DE LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS	13
II. CADRE RÉGLEMENTAIRE EUROPÉEN ET RÉGIONAL DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS .	14
III. SPÉCIFICITÉS DES BÂTIMENTS SCOLAIRES	15
IV. STRATÉGIES D'AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS ET LIMITES DES APPROCHES EXISTANTES	17
V. POSITIONNEMENT DU TRAVAIL	19
MÉTHODOLOGIE	21
PRÉSENTATION DU SITE ÉTUDIÉ.....	23
I. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SITE	23
II. DESCRIPTION DES BÂTIMENTS ÉTUDIÉS	24
III. CAMPAGNE DE MESURE ET DONNÉES DISPONIBLES	25
IV. SYSTÈMES TECHNIQUES ET RÉGULATION	26
V. INTÉRÊT DU CAS D'ÉTUDE.....	26
ANALYSE DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES	27
I. PRÉSENTATION DES DONNÉES ANALYSÉES.....	27
II. DONNÉES RÉCOLTÉES PAR BÂTIMENT.....	29
a. <i>Bâtiments 22</i>	30
b. <i>Bâtiment 24</i>	36
c. <i>Bâtiments 28 & 30</i>	42
d. <i>Comparaison avec les températures extérieures</i>	48
e. <i>Informations sur les données récoltées</i>	49
III. ANALYSE DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES.....	49
a. <i>Bâtiments 22</i>	49
b. <i>Bâtiment 24</i>	50
c. <i>Bâtiments 28 et 30</i>	51
IV. ANALYSE DE L'HUMIDITÉ RELATIVE	52
a. <i>Bâtiments 22</i>	52
b. <i>Bâtiment 24</i>	52
c. <i>Bâtiments 28 et 30</i>	53
V. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS PRINCIPALES	54
SIMULATIONS ÉNERGÉTIQUES.....	55
I. CONSTRUCTION DU MODÈLE ÉNERGÉTIQUE	55
II. ENCODAGE DES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE	56
III. DÉFINITION DES PROFILS D'OCCUPATION, DU CALENDRIER ANNUEL ET DES GAINS INTERNES	63
a. <i>Calendrier annuel</i>	63
b. <i>Profils d'occupation</i>	65
c. <i>Réfectoire</i>	66
d. <i>Salle des professeurs</i>	67

e.	<i>Salle de réunion</i>	68
f.	<i>Gains internes</i>	69
g.	<i>Infiltration</i>	71
IV.	MISE EN ŒUVRE DES SIMULATIONS DANS SIMULATION STUDIO	72
a.	<i>Structure générale du modèle</i>	72
b.	<i>Données météorologiques et orientation du modèle</i>	73
c.	<i>Variables analysées</i>	73
d.	<i>Traitement des résultats de simulation</i>	74
V.	DÉFINITION DES SCÉNARIOS SIMULÉS	75
a.	<i>Scénario de référence : chauffage permanent</i>	75
b.	<i>Scénario de référence : chauffage programmé</i>	75
c.	<i>Scénario d'optimisation 1 : régulation automatisée basée sur la température intérieure</i>	75
d.	<i>Scénario d'optimisation 2 : régulation automatisée et réduction de la période de chauffe</i>	76
e.	<i>Hypothèses conservées dans les scénarios d'optimisation</i>	77
VI.	RÉSULTATS DES SIMULATIONS	78
a.	<i>Consommations énergétiques annuelles</i>	78
b.	<i>Économies d'énergie réalisées</i>	81
c.	<i>Analyse des températures intérieures</i>	81
d.	<i>Comparaison avec les relevés sur site</i>	84
	OPTIMISATIONS NON QUANTIFIABLES À L'HEURE ACTUELLE	86
I.	OPTIMISATION BASÉE SUR L'OCCUPATION RÉELLE DES LOCAUX	86
II.	SENSIBILISATION DES OCCUPANTS À LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS	87
a.	<i>Exemples d'activités proposées</i>	88
III.	ADAPTATION DU CALENDRIER SCOLAIRE AUX ENJEUX ÉNERGÉTIQUES	90
	DISCUSSION	91
I.	APPORT DE L'ANALYSE DES DONNÉES DANS LA CONSTRUCTION DU MODÈLE	91
II.	ANALYSE CRITIQUE DES RÉSULTATS OBTENUS	91
III.	CHOIX DE L'OPTIMISATION LA PLUS PERTINENTE	92
IV.	LIMITES DE L'ÉTUDE	93
a.	<i>Limites liées à la littérature disponible</i>	93
b.	<i>Limites liées aux campagnes de mesure</i>	93
c.	<i>Limites liées à la caractérisation des bâtiments</i>	93
d.	<i>Limites liées aux données de mesure</i>	94
e.	<i>Limites liées à la modélisation</i>	94
f.	<i>Limites liées à l'économie</i>	94
V.	PERSPECTIVES DE L'ÉTUDE	95
	CONCLUSION	96
	BIBLIOGRAPHIE	98
	ANNEXES	102
I.	MODÈLE SIMULATION STUDIO	102
II.	ENCODAGE TRNBUILD	104
a.	<i>Chauffage</i>	104
b.	<i>Gains internes</i>	107
III.	FORMULES EXCEL UTILISÉES	111
a.	<i>Formules utilisées pour l'analyse de données de monitoring</i>	111
b.	<i>Formules utilisées pour le traitement des résultats de simulation</i>	114
IV.	RÉSUMÉ DU COURS SUR LA PEB	115
a.	<i>Chapitre 1 : Pourquoi l'énergie est devenue un enjeu majeur ?</i>	115
b.	<i>Chapitre 2 : Comprendre le fonctionnement d'un bâtiment</i>	115
c.	<i>Chapitre 3 : Comprendre un certificat PEB</i>	118
d.	<i>Chapitre 4 : Réduire les consommations d'énergie dans un bâtiment</i>	118

Table des figures

FIGURE 1 - VUE AÉRIENNE DE LA RUE RENNEQUIN SUALEM (RÉGION WALLONNE, S.D.)	23
FIGURE 2 - EXEMPLE DE DONNÉES RÉCOLTÉES PAR LES CAPTEURS	28
FIGURE 3 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 22 NOUVEAU & ANCIEN PENDANT LES VACANCES D'HIVER.....	31
FIGURE 4 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 22 NOUVEAU & ANCIEN PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL.....	33
FIGURE 5 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 22 NOUVEAU & ANCIEN EN PÉRIODES SCOLAIRES	35
FIGURE 6 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DU BÂTIMENT 24 PENDANT LES VACANCES D'HIVER 37	
FIGURE 7 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DU BÂTIMENT 24 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL	39
FIGURE 8 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DU BÂTIMENT 24 EN PÉRIODES SCOLAIRES.....	41
FIGURE 9 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES VACANCES D'HIVER.....	43
FIGURE 10 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL	45
FIGURE 11 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 28 & 30 EN PÉRIODES SCOLAIRES 47	
FIGURE 12 - MODÈLE TRIDIMENSIONNEL DU SITE RÉALISÉ SOUS SKETCHUP	55
FIGURE 13 - ZONES THERMIQUES ENCODÉES DANS TRNBUILD	56
FIGURE 14 - PARAMÉTRAGE DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE DES BÂTIMENTS 22.....	57
FIGURE 15 - PARAMÉTRAGE DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE ASSOCIÉ AUX BÂTIMENTS 24 ET 26.....	58
FIGURE 16 - PARAMÉTRAGE DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE DES BÂTIMENTS 28 ET 30	58
FIGURE 17 - EXEMPLE TIRÉ DES DONNÉES RÉCOLTÉES ILLUSTRANT LE FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES LES WEEK-ENDS.....	59
FIGURE 18 - DEUXIÈME EXEMPLE TIRÉ DES DONNÉES RÉCOLTÉES ILLUSTRANT LE FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES LES WEEK-ENDS.....	60
FIGURE 19 - PROGRAMMATION JOURNALIÈRE DU SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PERMANENT	60
FIGURE 20 - PROGRAMMATION HEBDOMADAIRE ASSOCIÉE AU SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PERMANENT	61
FIGURE 21 - PROGRAMMATION JOURNALIÈRE DU SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PROGRAMMÉ	62
FIGURE 22 - PROGRAMMATION HEBDOMADAIRE ASSOCIÉE AU SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PROGRAMMÉ	62
FIGURE 23 - CALENDRIER ANNUEL UTILISÉ DANS TRNBUILD	64
FIGURE 24 - PROFIL JOURNALIER D'OCCUPATION DES LOCAUX STANDARDS	65
FIGURE 25 - PROFIL HEBDOMADAIRE D'OCCUPATION DES LOCAUX STANDARDS	65
FIGURE 26 - PROFIL JOURNALIER D'OCCUPATION DU RÉFECTOIRE	66
FIGURE 27 - PROFIL HEBDOMADAIRE D'OCCUPATION DU RÉFECTOIRE	66
FIGURE 28 - PROFIL JOURNALIER D'OCCUPATION DE LA SALLE DES PROFESSEURS.....	67
FIGURE 29 - PROFIL HEBDOMADAIRE D'OCCUPATION DE LA SALLE DES PROFESSEURS.....	67
FIGURE 30 - PROFIL JOURNALIER D'OCCUPATION D'UNE SALLE DE RÉUNION.....	68
FIGURE 31 - PROFIL HEBDOMADAIRE D'OCCUPATION D'UNE SALLE DE RÉUNION	68
FIGURE 32 - STRUCTURE GÉNÉRALE DU MODÈLE DÉVELOPPÉ DANS SIMULATION STUDIO	72
FIGURE 33 - EXEMPLE DE TRAITEMENT DES RÉSULTATS DE SIMULATION DES VALEURS QHEAT, QELEQUIP ET QELIGHT	74
FIGURE 34 - EXEMPLE DE TRAITEMENT DES RÉSULTATS DE SIMULATION DES VALEURS TAIR ET TOP.....	74
FIGURE 35 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE POUR L'ENSEMBLE DES BÂTIMENTS POUR CHAQUE SIMULATION	78
FIGURE 36 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN SITUATION DE CHAUFFAGE PERMANENT	79
FIGURE 37 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN SITUATION DE CHAUFFAGE PROGRAMMÉ	79
FIGURE 38 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN SITUATION D'OPTIMISATION 1	80
FIGURE 39 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN SITUATION D'OPTIMISATION 2	80
FIGURE 40 - COMPARAISON DES CONSOMMATIONS RÉELLES DES DIFFÉRENTS BÂTIMENTS SUR PLUSIEURS ANNÉES84	
FIGURE 41 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE POUR L'ENSEMBLE DES BÂTIMENTS POUR CHAQUE SIMULATION ET DEUX ANNÉES	85
FIGURE 42 - EXEMPLE TIRÉ D'UN CERTIFICAT PEB TEST (VERSLYPE & VANDAE, CERTIFICAT PEB DE BASE POUR UN TRAVAIL DE FIN DE BACHELIER, 2023).....	88

FIGURE 43 - EXEMPLE TIRÉ D'UN CERTIFICAT PEB TEST (2) (VERSLYPE & VANDAELE, CERTIFICAT PEB DE RÉNOVATION NON ÉCOLOGIQUE POUR UN TRAVAIL DE FIN DE BACHELIER, 2023).....	88
FIGURE 44 - OÙ LA CHALEUR S'ÉCHAPPE-T-ELLE DANS UNE MAISON ? (OPENAI, 2026)	89
FIGURE 45 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 22 (PERMANENT)	104
FIGURE 46 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 22 (PROGRAMMÉ)	104
FIGURE 47 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 22 (OPTIMISATION 1).....	104
FIGURE 48 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 22 (OPTIMISATION 2).....	104
FIGURE 49 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 24 & 26 (PERMANENT).....	105
FIGURE 50 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 24 & 26 (PROGRAMMÉ)	105
FIGURE 51 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 24 & 26 (OPTIMISATION 1).....	105
FIGURE 52 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 24 & 26 (OPTIMISATION 2).....	105
FIGURE 53 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 28 & 30 (PERMANENT).....	106
FIGURE 54 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 28 & 30 (PROGRAMMÉ)	106
FIGURE 55 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENT 28 & 30 (OPTIMISATION 1).....	106
FIGURE 56 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 28 & 30 (OPTIMISATION 2).....	106
FIGURE 57 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UN BUREAU.....	107
FIGURE 58 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UNE CLASSE	107
FIGURE 59 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UN RÉFECTOIRE.....	107
FIGURE 60 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UNE SALLE DE RÉUNION.....	107
FIGURE 61 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UNE SALLE DES PROFS.....	107
FIGURE 62 - ENCODAGE DE L'ÉCLAIRAGE	108
FIGURE 63 - ENCODAGE DE L'ARMOIRE INFORMATIQUE	108
FIGURE 64 - ENCODAGE DU BOILER DE 10L	108
FIGURE 65 - ENCODAGE DU BOILER DE 180L	108
FIGURE 66 - ENCODAGE ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES D'UN BUREAU.....	109
FIGURE 67 - ENCODAGE ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES D'UNE CLASSE	109
FIGURE 68 - ENCODAGE ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES D'UNE CUISINE	109
FIGURE 69 - ENCODAGE ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES D'UNE SALLE DE RÉUNION.....	109
FIGURE 70 - ENCODAGE DE L'INFILTRATION DE L'AIR	110
FIGURE 71 - EXEMPLE DE FICHIER EXCEL AVEC LES DONNÉES DE RELEVÉS D'UN CAPTEUR.....	111
FIGURE 72 - SCHÉMA D'EXPLICATION DES PONTS THERMIQUES (OPENAI, 2026).....	116
FIGURE 73 - COMMENT CIRCULE L'AIR DANS LE LOGEMENT ? (OPENAI, 2026).....	116
FIGURE 74 - SCHÉMA RÉCAPITULATIF (OPENAI, 2026)	117
FIGURE 75 - LES BÂTIMENTS ET LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE (OPENAI, 2026).....	119

Table des tableaux

TABLEAU 1 - PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES BÂTIMENTS ÉTUDIÉS	24
TABLEAU 2 - SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES POUR L'ÉTUDE	25
TABLEAU 3 - LOCALISATION DES DIFFÉRENTS CAPTEURS.....	27
TABLEAU 4 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 22 PENDANT LES VACANCES D'HIVER	30
TABLEAU 5 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 22 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL	32
TABLEAU 6 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 22 PENDANT LES PÉRIODES HORS VACANCES	34
TABLEAU 7 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LE BÂTIMENT 24 PENDANT LES VACANCES D'HIVER	36
TABLEAU 8 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LE BÂTIMENT 24 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL	38
TABLEAU 9 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LE BÂTIMENT 24 PENDANT LES PÉRIODES HORS VACANCES	40
TABLEAU 10 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES VACANCES D'HIVER	42
TABLEAU 11 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL	44
TABLEAU 12 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES PÉRIODES HORS VACANCES	46
TABLEAU 13 - TEMPÉRATURES SUR LIÈGE PENDANT LA PÉRIODE DES VACANCES D'HIVER (MÉTÉOSTAT, S.D.).....	48
TABLEAU 14 - TEMPÉRATURES SUR LIÈGE PENDANT LA PÉRIODE DES VACANCES DE CARNAVAL (MÉTÉOSTAT, S.D.)	48
TABLEAU 15 - INFORMATIONS SUR LES DIFFÉRENTES CHAUDIÈRES.....	56
TABLEAU 16 - GAINS INTERNES LIÉS AUX OCCUPANTS ET AUX ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES.....	69
TABLEAU 17 - RÉPARTITION DES DIFFÉRENTS TYPES DE LOCAUX ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES	70
TABLEAU 18 - COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES DE CHAQUE SIMULATION PAR ZONES THERMIQUES	78
TABLEAU 19 - ÉCONOMIES RÉALISÉES ENTRE LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS SIMULÉS	81
TABLEAU 20 - STATISTIQUES ANNUELLES DES TEMPÉRATURES SIMULÉES POUR LE SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PERMANENT	82
TABLEAU 21 - STATISTIQUES ANNUELLES DES TEMPÉRATURES SIMULÉES POUR LE SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PROGRAMMÉ	82
TABLEAU 22 - STATISTIQUES ANNUELLES DES TEMPÉRATURES SIMULÉES POUR LE SCÉNARIO D'OPTIMISATION 1...	82
TABLEAU 23 - STATISTIQUES ANNUELLES DES TEMPÉRATURES SIMULÉES POUR LE SCÉNARIO D'OPTIMISATION 2...	82
TABLEAU 24 - RELEVÉ DES CONSOMMATIONS DE GAZ SUR PLUSIEURS ANNÉES	84
TABLEAU 25 - COMPARAISON DES DONNÉES DE RELEVÉS AVEC LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS POUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	85
TABLEAU 26 - EXEMPLE D'ACTIVITÉ POUR LE CHAPITRE 1	88
TABLEAU 27 - DESCRIPTION DES COMPOSANTS UTILISÉS DANS LE MODÈLE SIMULATION STUDIO	102
TABLEAU 28 - PROGRAMMATIONS DES CHAUDIÈRES DES BÂTIMENTS 22 POUR LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS..	104
TABLEAU 29 - PROGRAMMATIONS DES CHAUDIÈRES DES BÂTIMENTS 24 & 26 POUR LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS	105
TABLEAU 30 - PROGRAMMATIONS DES CHAUDIÈRES DES BÂTIMENTS 28 & 30 POUR LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS	106
TABLEAU 31 - ENCODAGES DES OCCUPATIONS POUR LES DIFFÉRENTS LOCAUX	107
TABLEAU 32 - ENCODAGES DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES POUR LES DIFFÉRENTS LOCAUX.....	108
TABLEAU 33 - ENCODAGES DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES POUR LES DIFFÉRENTS LOCAUX (SUITE)	109

Table des équations

ÉQUATION 1 - TEMPÉRATURE DE CONSIGNE POUR L'OPTIMISATION 1	76
ÉQUATION 2 - TEMPÉRATURE DE CONSIGNE POUR L'OPTIMISATION 2	76
ÉQUATION 3 - INDICHER SI LA DATE CORRESPOND À DES VACANCES OU À DES JOURS SCOLAIRES	111
ÉQUATION 4 - INDICHER "JOUR" OU "NUIT"	111
ÉQUATION 5 - NOMBRE D'HEURES SOUS 18°C	111
ÉQUATION 6 - NOMBRE D'HEURES AU-DESSUS DE 23°C.....	111
ÉQUATION 7 - POURCENTAGE DE MESURE SOUS 18°C	112
ÉQUATION 8 - POURCENTAGE DE MESURES SOUS 18°C EN PÉRIODE DE JOUR	112
ÉQUATION 9 - DATE TEMPÉRATURE MINIMALE	112
ÉQUATION 10 - DATE TEMPÉRATURE MAXIMALE.....	112
ÉQUATION 11 - TEMPÉRATURE MOYENNE EN JOURNÉE.....	112
ÉQUATION 12 - TEMPÉRATURE MOYENNE DE NUIT	112
ÉQUATION 13 - ÉCART DE TEMPÉRATURE JOUR/NUIT.....	112
ÉQUATION 14 - ÉCART-TYPE SUR LA PÉRIODE HORS VACANCES.....	113
ÉQUATION 15 - ÉCART-TYPE EN JOURNÉE SUR LA PÉRIODE HORS VACANCES.....	113
ÉQUATION 16 - ÉCART-TYPE LA NUIT SUR LA PÉRIODE HORS VACANCES	113
ÉQUATION 17 - SOMME DES BESOINS DE CHAUFFAGE.....	114
ÉQUATION 18 - CONVERSION D'UNITÉ	114
ÉQUATION 19 - MOYENNE DES TEMPÉRATURES.....	114
ÉQUATION 20 - TEMPÉRATURE MAXIMALE.....	114
ÉQUATION 21 - TEMPÉRATURE MINIMALE	114
ÉQUATION 22 - ÉCART-TYPE DES TEMPÉRATURES	114
ÉQUATION 23 - TEMPÉRATURE MÉDIANE.....	114

Introduction

La transition énergétique occupe aujourd'hui une place centrale dans les politiques climatiques européennes. Ces objectifs sont au cœur du secteur du bâtiment, qui représente une part importante de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. La Directive européenne 2024/1275 renforce cette orientation en visant l'amélioration progressive de la performance énergétique du parc immobilier et sa décarbonation d'ici 2050 (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024). En Wallonie, cette dynamique se manifeste par le développement de stratégies de rénovation et un intérêt croissant pour les bâtiments publics, tels que les écoles.

Les écoles sont des bâtiments particuliers. Elles accueillent chaque jour un grand nombre d'élèves, d'enseignants et de membres du personnel. Par conséquent, elles doivent offrir suffisamment de confort tout en limitant leur consommation d'énergie. Cependant, leur fonctionnement est intermittent. Ces bâtiments sont principalement utilisés pendant la journée, durant les heures de classe. La nuit, les week-ends et les vacances, il est beaucoup moins occupé. Cette organisation crée un potentiel d'optimisation important, à condition que les systèmes techniques soient correctement adaptés aux besoins réels du bâtiment.

De nombreux établissements ont une consommation qui n'est pas uniquement liée à l'isolation ou à l'âge du bâtiment. Le fonctionnement quotidien des installations joue également un rôle. Un système de chauffage qui fonctionne trop longtemps, un redémarrage mal programmé ou une régulation inadéquate peuvent entraîner un chauffage inutile. Les campagnes de mesures menées dans le cadre du projet *CERTEB_OPT* ont identifié plusieurs problèmes de contrôle dans les bâtiments scolaires, notamment des températures excessivement élevées, un chauffage maintenu pendant les périodes non occupées ou des redémarrages mal configurés après les vacances (Merlo & Thomas, 2025). Cela démontre l'importance d'analyser ce type d'informations issues du terrain.

L'analyse des consommations énergétiques permet de comprendre le comportement d'un site scolaire et d'identifier les périodes de surconsommation, les écarts entre les périodes scolaires et de vacances, ainsi que tout problème lié aux installations. Les rénovations majeures dans les écoles peuvent également être particulièrement difficiles à mettre en œuvre rapidement. Cette approche est particulièrement utile car les budgets sont limités et les travaux doivent être organisés en fonction du calendrier scolaire. Dans ce contexte, une piste intéressante serait l'amélioration de la régulation. À ce stade, cela peut aider à réduire la consommation en diminuant l'utilisation sans intervenir physiquement sur l'enveloppe du bâtiment.

Ce mémoire s'inscrit dans cette logique. Il se concentre sur l'étude énergétique menée sur un site scolaire, l'école *Sainte-Véronique* à Liège. L'objectif est d'analyser les consommations et le fonctionnement des installations afin d'identifier des pistes d'optimisation à faible coût. La question principale de ce travail est la suivante : « **Dans quelle mesure l'analyse des consommations énergétiques et l'optimisation de la régulation des systèmes techniques peuvent-elles permettre de réduire les consommations énergétiques d'un site scolaire d'au moins 15 %, sans nécessiter de rénovations lourdes ?** ».

Pour relever ce défi, le travail utilise deux approches complémentaires. L'une est l'analyse des données disponibles. Une attention particulière est portée à la distinction entre les périodes scolaires et les périodes de vacances, afin de mieux évaluer l'effet de l'occupation sur la consommation. Elle permet de représenter le comportement thermique des bâtiments et d'évaluer différentes options d'optimisation avant leur mise en œuvre. Les simulations sont donc essentielles pour analyser l'impact possible d'une amélioration de la régulation.

Parallèlement à l'analyse technique, un accompagnement pédagogique axé sur la *Performance Énergétique des Bâtiments* a été développé. Il n'a pas pour objectif d'être intégré entièrement dans ce mémoire. Il vise à expliquer les enjeux liés à l'énergie dans les bâtiments, à la PEB et aux gestes permettant de limiter les consommations. La dimension éducative fait partie de la logique du projet *CERTEB_OPT*, qui vise également à mieux familiariser les étudiants et les acteurs scolaires avec les problèmes énergétiques (Université de Liège, 2025).

Le mémoire est divisé en plusieurs sections. La première fournit le contexte général et la conceptualisation de la performance énergétique des bâtiments scolaires. La deuxième décrit le site étudié et les méthodes employées pour préparer les données et construire les simulations. À partir de là, une analyse des consommations et des mesures effectuées est ensuite proposée. Enfin, les premières simulations et scénarios d'optimisation sont analysés pour déterminer le potentiel réel de réduction de la consommation d'énergie du site.

État de l'art

I. Contexte et enjeux de la rénovation énergétique des bâtiments

Le secteur du bâtiment occupe une place centrale dans les politiques énergétiques et climatiques européennes. Il représente une part importante de la consommation finale d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, ce qui en fait un levier prioritaire pour atteindre les objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050. Les bâtiments représentent environ 40% de la consommation finale d'énergie et 36% des émissions de CO₂ liées à l'énergie au niveau de l'Union européenne (European Commission, 2020). À l'échelle mondiale, l'*Agence Internationale de l'Énergie* identifie également le secteur du bâtiment comme l'une des principales ressources impliquées dans la réduction de la demande énergétique et dans l'atteinte des objectifs climatiques dans le cadre d'accords internationaux conjoints (International Energy Agency, 2023). Le secteur du bâtiment est également reconnu comme un élément clé pour les objectifs de décarbonisation à travers le monde dans le rapport du Programme des Nations Unies pour l'environnement (United Nations Environment Programme, 2022).

Cette situation s'explique en grande partie par l'âge du parc immobilier. Une proportion significative des bâtiments actuels a été construite avant l'introduction de réglementations énergétiques strictes, ce qui entraîne de faibles niveaux d'isolation, des systèmes techniques vieillissants et une forte dépendance aux combustibles fossiles pour le chauffage et l'eau chaude. En Wallonie, une partie importante de l'immobilier présente encore une performance énergétique limitée, avec une consommation élevée et une utilisation prédominante du gaz et du pétrole à des fins techniques (Service public de Wallonie, 2025). Les travaux de Clermont (Clermont, 2015) soulignent également que les bâtiments institutionnels et publics ont souvent une consommation élevée en raison d'enveloppes inefficaces et de systèmes techniques vieillissants.

Face à ce constat, la rénovation énergétique est perçue comme un outil essentiel pour réduire durablement la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Elle répond également à certains des grands défis sociaux et économiques tels que la précarité énergétique, l'amélioration du confort thermique et la résilience aux fluctuations des prix de l'énergie. Améliorer la performance énergétique des bâtiments pourrait ainsi réduire les dépenses liées à l'énergie tout en permettant des conditions de vie plus confortables et en minimisant les effets sur la santé causés par des environnements intérieurs inadéquats.

La rénovation énergétique, au-delà de ses bénéfices environnementaux et sociaux, est également un enjeu économique structurant. Elle mobilise un large éventail d'acteurs, allant des entreprises de construction aux bureaux d'études, ainsi que les institutions publiques et les organismes de formation. Investir dans ce domaine crée des emplois locaux et non délocalisables, et stimule l'innovation dans les méthodes de construction et les systèmes énergétiques.

Le rythme actuel de rénovation reste insuffisant pour atteindre les objectifs fixés au niveau européen. Le taux moyen de rénovation énergétique du parc immobilier européen est d'environ 1% par an, les rénovations profondes ne représentent qu'une petite proportion des projets réalisés (European Commission, 2020). Le *Programme Environnemental des Nations Unies* (2022) montre également que le rythme des rénovations et des améliorations de l'efficacité énergétique ne permet pas d'atteindre les objectifs climatiques internationaux. Ces contraintes soulignent l'urgence de renforcer les politiques publiques, d'adapter les mécanismes de financement et de développer des approches adaptées aux contraintes techniques, économiques et organisationnelles du parc existant.

Dans ce contexte, la transition vers un parc immobilier à haute performance énergétique ne peut se limiter à des interventions ponctuelles ou à des solutions standardisées. Cette transition constitue un processus de long terme pour le secteur du bâtiment, en commençant par de grands projets et en

terminant par des plans judicieux qui tiennent compte des contraintes budgétaires, techniques et opérationnelles de multiples acteurs.

II. Cadre réglementaire européen et régional de la performance énergétique des bâtiments

La rénovation énergétique des bâtiments s'inscrit dans un cadre réglementaire européen en constante évolution. Dans le cadre du Pacte vert pour l'Europe, l'Union européenne s'est engagée à devenir totalement neutre en carbone d'ici 2050 avec une réduction intermédiaire d'au moins 55% des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2030 (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024). L'industrie du bâtiment, en raison de son impact significatif sur la consommation d'énergie et les émissions associées, est un levier central pour atteindre ces objectifs. Cette dynamique s'aligne sur une stratégie plus large de l'UE, menée par la Commission européenne, notamment la « *Renovation Wave* », qui vise à accélérer la vitesse à laquelle la rénovation énergétique se déroule dans toute l'UE (Commission européenne, 2020).

Ainsi, la Directive (UE) 2024/1275 est un événement marquant dans la définition des politiques européennes de performance énergétique concernant les bâtiments. Cette directive remplace et renforce les cadres réglementaires précédents. Elle introduit une approche plus orientée vers la décarbonisation du secteur immobilier européen et cherche à réduire la consommation d'énergie à long terme (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024). Les États membres doivent élaborer des plans nationaux destinés à améliorer progressivement la performance énergétique des bâtiments.

Au cœur de cette directive se trouve la décarbonisation de l'ensemble du secteur immobilier européen d'ici 2050. À cette fin, elle contient un certain nombre de propositions, telles que l'établissement de bâtiments à zéro émission et le renforcement progressif des règles concernant les nouvelles constructions. La législation prend également en compte les normes nécessaires pour les bâtiments publics qui soulignent le rôle exemplaire que joue le secteur public dans la transition énergétique.

La directive accorde également une attention particulière aux types de bâtiments non résidentiels (y compris les écoles et autres organisations éducatives). Elle promeut également l'amélioration des bâtiments énergivores par les États membres à travers la rénovation nationale. Cependant, une telle approche continue de dépendre des modalités de transposition de chaque État membre et des futurs ajustements réglementaires locaux, ce qui aide à garder à l'esprit que les objectifs peuvent encore être locaux.

Outre les objectifs d'efficacité énergétique, la directive se concentre sur une décarbonisation accrue des systèmes techniques, notamment par une réduction progressive de la dépendance aux combustibles fossiles pour le chauffage et le développement de la production d'énergie renouvelable dans les bâtiments. Ces règles visent à réduire la dépendance énergétique et à diminuer les gaz à effet de serre créés par l'utilisation énergétique des bâtiments.

En Wallonie, ces directives européennes sont transposées dans des politiques et réglementations régionales spécifiques. La réglementation PEB est désormais le principal outil réglementaire pour encadrer la performance énergétique des bâtiments en Wallonie, et le Plan wallon de rénovation énergétique décrit une trajectoire de rénovation à plus long terme (Service public de Wallonie, 2025). Le Plan fait partie intégrante des politiques climatiques régionales et établit le cadre pour la transition énergétique du parc immobilier wallon, en tenant compte des aspects techniques, économiques et sociaux du territoire.

Le secteur public joue un rôle important dans ce plan régional. Les bâtiments administratifs, scolaires et sociaux doivent jouer un rôle exemplaire dans la transition énergétique. Dans un tel contexte, la certification énergétique des bâtiments publics est un outil important. *Le Protocole de Certification Énergétique de la Wallonie* met l'accent sur le suivi de la consommation, la collecte de données énergétiques et l'amélioration continue de la gestion des bâtiments publics (Service public de Wallonie, 2026).

Outre les exigences fixées par le gouvernement, ce cadre met l'accent sur le développement d'outils de suivi et de gestion de l'énergie, tels que des bases de données énergétiques, des outils de suivi et des observatoires de rénovation. Avec ces dispositifs, les gens peuvent comprendre ce qu'est réellement leur parc immobilier, suivre les tendances de consommation et utiliser les politiques publiques plus efficacement.

Ainsi, la structure réglementaire européenne et régionale est un dispositif structurel dans la transition énergétique des bâtiments. Elle élève ces normes élevées pour les objectifs tout en promouvant la recherche de solutions techniques et organisationnelles ancrées dans la réalité. Ainsi, les bâtiments scolaires sont des études de cas pertinentes car ils appartiennent au secteur public mais aussi parce qu'ils peuvent améliorer la performance énergétique.

III. Spécificités des bâtiments scolaires

Les bâtiments scolaires présentent plusieurs caractéristiques qui influencent directement leur performance énergétique et les stratégies d'optimisation envisageables. Bien que certaines de ces caractéristiques soient également observées pour d'autres bâtiments tertiaires, l'interaction entre les deux rend les écoles particulièrement intéressantes en ce qui concerne les études de performance énergétique.

Tout d'abord, l'infrastructure des bâtiments scolaires est assez ancienne. En raison de cela, de nombreux bâtiments ont été construits avant les réglementations des normes thermiques, et aujourd'hui encore, ils présentent encore une isolation thermique insuffisante et des systèmes techniques vieillissants. Cela entraîne une grande consommation de chauffage et une forte demande énergétique. Clermont (2015) a souligné que les anciens bâtiments institutionnels ont souvent tendance à souffrir d'une faible performance énergétique et d'une consommation élevée du système de chauffage.

De plus, les écoles diffèrent par leurs profils d'occupation. La plupart des bâtiments sont utilisés pendant la journée (pendant les heures de classe), tandis que le soir, la nuit, les week-ends et les vacances sont des moments où ils ne sont pas entièrement occupés. En plus de tout cela, il y a une volatilité spatiale considérable, certaines salles n'étant utilisées que très rarement tandis que d'autres sont occupées en permanence. Cette intermittence offre une opportunité extraordinaire pour l'optimisation énergétique mais est sensible à une régulation appropriée des systèmes techniques. En même temps, de grandes quantités d'utilisation sont généralement signalées en dehors des heures d'utilisation, indiquant que les caractéristiques fonctionnelles des installations ne sont pas synchronisées avec l'utilisation des bâtiments.

Le chauffage constitue généralement le principal poste de consommation énergétique dans les bâtiments scolaires. Cela peut être attribué non seulement à la durée significative de la saison de chauffage mais aussi au fonctionnement inefficace des installations et à un système énergétique de mauvaise qualité. Les chaudières et les systèmes de distribution fonctionnent souvent selon des horaires convenus ou avec une direction mal adaptée à l'occupation réelle. Ainsi, la régulation semble être un levier massif d'amélioration. La gestion des systèmes existants s'est avérée meilleure, et la réduction de la consommation a été démontrée par des études comme étant possible sans investir des sommes importantes dans les systèmes existants. Le projet *CERTEB_OPT* a également conduit à des campagnes de mesure qui ont significativement révélé des différences opérationnelles entre plusieurs bâtiments scolaires situés sur le même site (Merlo & Thomas, 2025).

Un autre facteur clé est l'hétérogénéité des bâtiments dans le même établissement scolaire. Un site peut être composé de bâtiments construits à différentes étapes et avec différents types de systèmes techniques. Certains bâtiments ont été installés récemment, mais d'autres ont encore des systèmes anciens avec moins d'options de régulation possibles. Cette diversité rend non seulement difficile le contrôle de la performance énergétique globale des établissements scolaires, mais constitue également un sujet d'étude intéressant dans la littérature scientifique. Les bâtiments avec diverses propriétés sur un même site permettent d'étudier l'enveloppe, les systèmes techniques ou les mécanismes de fonctionnement pour la performance énergétique observée.

De plus, il existe certains critères qui doivent être respectés pour le confort thermique des bâtiments scolaires. Si l'environnement d'apprentissage est adéquat et confortable, alors la température dans les espaces occupés doit respecter toutes les normes. En outre, différents facteurs, humidité, température radiante, voire mouvement de l'air, influencent la perception du confort par les occupants (Merlo & Thomas, 2025). Ces limitations peuvent entraîner une tendance non durable, et un effort doit être fait pour atteindre un point d'équilibre entre le confort et la sobriété énergétique.

Le secteur scolaire a également ses propres contraintes budgétaires. Les rénovations à grande échelle sont souvent difficiles à réaliser rapidement, les investissements majeurs et coûteux dans les infrastructures et les obstacles organisationnels freinent souvent leur mise en œuvre. Dans ce contexte, les stratégies d'optimisation à faible coût sont les plus immédiatement envisageables. Améliorer la supervision, modifier les horaires de fonctionnement, ou même surveiller l'utilisation peuvent être des mesures disponibles et rapidement applicables.

Enfin, les bâtiments scolaires revêtent une importance particulière dans les politiques publiques de transition énergétique. En tant que bâtiments publics, ils doivent jouer un rôle exemplaire. Ils sont également des terrains d'expérimentation fructueux pour développer de nouvelles façons de gérer l'énergie. Le projet *CERTEB_OPT* s'inscrit dans ce processus en fournissant des méthodes de suivi, d'analyse et d'optimisation énergétique utilisées sur de vrais bâtiments scolaires. Les campagnes de suivi sont essentielles pour détecter les anomalies opérationnelles, les problèmes de régulation, ou même les cas de surconsommation énergétique (Merlo & Thomas, 2025).

Ainsi, les bâtiments scolaires constituent des cas d'étude particulièrement pertinents dans le cadre des recherches sur l'optimisation énergétique. Leur potentiel d'amélioration est important, notamment à travers des actions ciblées sur la régulation, le suivi énergétique et l'adaptation du fonctionnement des systèmes aux usages réels des bâtiments.

IV. Stratégies d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments et limites des approches existantes

L'amélioration de la performance énergétique peut être abordée au moyen de plusieurs stratégies d'intervention, qui conduisent à une plus grande efficacité énergétique dans les bâtiments (Olofsson, Meier, & Lamberts, 2004). Ces méthodes diffèrent en fonction de l'objectif, des propriétés physiques des bâtiments, des ressources techniques ou financières disponibles, etc. Elles peuvent généralement être définies de deux manières principales : les interventions de rénovation majeure et les méthodes d'optimisation des systèmes en optimisant les systèmes existants.

Les rénovations énergétiques significatives sont des interventions sur un bâtiment. Il s'agit, par exemple, du renforcement de l'isolation thermique de l'enveloppe, du remplacement des systèmes de chauffage ou de l'introduction d'énergies renouvelables. Ces interventions peuvent générer des économies importantes, mais elles nécessitent souvent des investissements élevés.

Mais ces approches présentent quelques limitations. La plupart d'entre elles nécessitent des investissements substantiels et peuvent prendre du temps à être mises en œuvre. Ces contraintes sont particulièrement aiguës dans le cas des bâtiments scolaires. Les budgets disponibles sont souvent limités, et les travaux doivent être planifiés avec soin pour ne pas interférer avec le fonctionnement des institutions. Plusieurs études ont souligné que les contraintes tant économiques qu'organisationnelles figurent parmi les plus grands obstacles au moment de l'amélioration énergétique des bâtiments publics et scolaires (United Nations Environment Programme, 2022).

Dans ce contexte, les mesures à faible coût présentent un intérêt particulier. Elles visent à améliorer la performance énergétique sans modifier lourdement l'enveloppe du bâtiment. Ces pratiques dépendent principalement de l'utilisation optimale des systèmes déjà disponibles et d'une gestion précise de l'utilisation de l'énergie.

La régulation des systèmes de chauffage est un levier majeur d'amélioration parmi ces approches. Cela inclut l'ajustement des températures de consigne et des heures de fonctionnement en fonction de l'occupation réelle des bâtiments. Dans de nombreux cas, les installations fonctionnent encore selon des horaires fixes ou avec des paramètres mal adaptés à l'utilisation réelle. Cependant, un simple ajustement des réglages peut réduire considérablement la consommation d'énergie.

Les campagnes de mesure menées dans le cadre du projet *CERTEB_OPT* montrent notamment que certains bâtiments scolaires continuent d'être chauffés pendant les week-ends, les vacances ou les périodes de non-occupation (Merlo & Thomas, 2025). Ces analyses mettent également en évidence des problèmes de redémarrage du chauffage, des températures de consigne excessivement élevées ou des défauts de régulation dans certaines installations. Les recommandations proposées dans ces études montrent qu'une meilleure gestion des systèmes existants peut générer des économies d'énergie significatives sans nécessiter d'investissements lourds.

Les efforts d'optimisation tournent également autour de la surveillance énergétique. Le suivi de la consommation aide à mieux comprendre le fonctionnement réel des bâtiments et à identifier les anomalies ou les dérives énergétiques. L'analyse des données de consommation met notamment en évidence des périodes de surconsommation, des écarts de fonctionnement entre les bâtiments ou des problèmes liés aux systèmes techniques. Ces informations sont essentielles pour orienter les actions d'amélioration et évaluer leur efficacité (International Energy Agency, 2023).

Un autre levier important est la gestion des usages. Elle vise à adapter le fonctionnement des systèmes énergétiques aux besoins réels des occupants. Dans les bâtiments scolaires, les longues périodes de non-occupation représentent un potentiel significatif de réduction de la consommation. Une meilleure coordination entre les horaires d'occupation et la gestion des installations peut donc conduire à des économies importantes.

À la fin, il devient possible d'appliquer la performance des bâtiments pour explorer davantage le fonctionnement d'un bâtiment avec des outils de modélisation et de simulation énergétique. Ces outils offrent un moyen de modéliser différents paramètres opérationnels ou réglementaires sans intervenir directement sur le bâtiment réel. Plus précisément, grâce à eux, les effets des changements dans les réglages de chauffage, l'analyse de différents profils d'occupation ou la comparaison d'alternatives peuvent être examinés. Le travail de *Rouchier*, en particulier, souligne la nécessité des approches de modélisation statistique pour comprendre le comportement réel des bâtiments et améliorer les stratégies de gestion énergétique (Rouchier, 2022).

Bien qu'une variété de stratégies aient été développées et employées pour améliorer la performance énergétique des structures, il existe encore de nombreuses limitations. Bien que passionnantes, les méthodes à faible coût dépendent fortement de la qualité des données existantes et de la maîtrise des systèmes techniques. Les données énergétiques dans de nombreux bâtiments sont encore incomplètes ou difficiles à exploiter. Certaines d'entre elles sont anciennes, mal documentées ou sont des applications empiriques de systèmes de régulation. En attendant, trouver les origines spécifiques de la surconsommation est plus difficile, et parfois les effets contre-productifs sont moins évidents.

Les observations issues du projet *CERTEB_OPT* montrent des comportements très différents entre bâtiments d'un même site scolaire. Certains présentent des problèmes de régulation, des températures de consigne excessivement élevées ou fonctionnent en déplacement pendant les périodes de pause. Les résultats démontrent ainsi que la performance réelle des bâtiments est principalement une fonction des méthodes de gestion et du contrôle des systèmes technologiques.

De plus, la performance énergétique varie considérablement d'un bâtiment à l'autre en fonction de nombreux facteurs, y compris l'année de construction, l'isolation, les systèmes installés et ce que les occupants ont fait ou n'ont pas utilisé. Cette variabilité pose des défis pour généraliser les résultats rapportés dans la littérature scientifique. L'absence d'études pratiques avec de vrais bâtiments scolaires, notamment comment la consommation d'énergie est modifiée par les approches de régulation et de surveillance, est davantage soulignée par un certain nombre d'études (United Nations Environment Programme, 2022).

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de développer des approches plus concrètes, basées sur des données réelles et adaptées aux contraintes spécifiques des bâtiments scolaires. L'analyse détaillée des consommations et du fonctionnement des installations permet d'identifier des pistes d'amélioration directement applicables, même dans des contextes budgétaires limités.

V. Positionnement du travail

La performance énergétique des bâtiments est un sujet de grande recherche, mais une telle méthode reste déficiente dans de nombreuses directions. Bien que la littérature scientifique propose un certain nombre de méthodologies pour l'évaluation et l'optimisation énergétique, peu d'études pertinentes sont appliquées à l'exploitation quotidienne des installations techniques des bâtiments scolaires et à l'impact des stratégies de régulation sur la consommation d'énergie.

Par ailleurs, les approches existantes reposent souvent sur des modèles théoriques et des relevés globaux de consommation. Bien que ces méthodes offrent une perspective générale de la performance énergétique, elles ne représentent pas entièrement le comportement réel des bâtiments existants. En effet, un certain nombre d'études montrent des résultats différents. L'écart entre la performance théorique et la consommation réelle peut être important, voire proche, car l'utilisation, le système de gestion, les réglementations imposées par l'utilisation ou la planification des bâtiments, est un grand facteur (Rouchier, 2022).

Les bâtiments scolaires sont donc des études de cas particulièrement intéressantes à cet égard. Leur fonctionnement dépend étroitement des caractéristiques d'occupation, de l'agencement des activités éducatives et du fonctionnement des installations techniques. Si les systèmes de chauffage peuvent intégrer correctement ces variations d'utilisation dans les paramètres, de grandes économies potentielles peuvent être réalisées en matière de consommation d'énergie lors de longues pauses ou de longues périodes telles que les soirées, les week-ends ou les vacances scolaires lorsque aucun travail ne peut être effectué. Cependant, de nombreuses institutions ont des installations obsolètes ou un système de régulation mal adapté qui entraîne une consommation inutile lorsque les locaux sont très petits ou vides. Compte tenu de ces caractéristiques, les bâtiments scolaires peuvent être particulièrement pertinents sur la base de la surveillance, de la régulation et de l'adaptation des heures de fonctionnement, où des stratégies d'optimisation énergétique à faible coût peuvent être discutées pour des mises en œuvre efficaces. À cet égard, une approche basée sur la surveillance et les données semble particulièrement liée en ce qui concerne l'explication de la cause de la consommation excessive et ses voies d'amélioration directe.

Ce mémoire s'inscrit dans cette logique et dans le contexte du projet européen *CERTEB_OPT*. Du point de vue de la surveillance, de l'analyse énergétique et des approches d'optimisation de la consommation, ce projet prend des mesures pour comprendre plus pleinement les performances des bâtiments scolaires et résidentiels à un niveau énergétique plus durable. L'étude devrait impliquer l'analyse de modèles thermodynamiques et de certificats énergétiques capables de mieux les exploiter afin de concevoir des améliorations mieux adaptées aux bâtiments existants (Université de Liège, 2025).

Dans ce contexte, plusieurs campagnes de mesure ont été menées dans des bâtiments scolaires réels du projet *ELMA* de Marche-en-Famenne. Ces campagnes reposent largement sur des capteurs de température et d'humidité pour étudier le comportement thermique réel des bâtiments et le fonctionnement des systèmes de chauffage. Ces analyses soulignent certains des problèmes de régulation, à savoir la température de consigne très élevée, l'entretien du chauffage pendant les périodes non opérationnelles ou les redémarrages mal ajustés après les vacances scolaires (Merlo & Thomas, 2025).

L'objectif de cet exercice est d'étudier le fonctionnement énergétique d'un établissement scolaire existant, l'école *Sainte-Véronique* située à Liège, sur la base de l'analyse de la consommation et des données de surveillance et d'établir des voies d'optimisation à faible coût. Une attention particulière doit être accordée au fonctionnement du système de chauffage pour contrôler la régulation de l'équipement de chauffage et à l'adaptation de l'installation aux conditions réelles d'occupation. À cet égard, le fonctionnement est modifié en fonction des besoins réels d'occupation des bâtiments.

Ce mémoire cherche ainsi à répondre à la question suivante : « Dans quelle mesure l'analyse des consommations énergétiques et l'optimisation de la régulation des systèmes techniques peuvent-elles permettre de réduire les consommations énergétiques d'un site scolaire d'au moins 15 % sans nécessiter de rénovations lourdes ? ».

Ainsi, ce travail s'inscrit dans une démarche appliquée, basée sur des données réelles et orientée vers des solutions directement exploitables dans le contexte des bâtiments scolaires.

Méthodologie

Ce mémoire se concentre sur un cadre d'analyse et d'optimisation énergétique mis en œuvre dans un bâtiment scolaire existant. Pour l'étude de cas principale, l'accent est mis sur le site de l'école secondaire *Sainte-Véronique* à Liège, choisi en raison de la diversité des bâtiments présents ainsi que des systèmes techniques installés sur un site pertinent. Le but du travail est d'évaluer comment réduire la consommation du site sans nécessiter de rénovations majeures, en utilisant une meilleure compréhension de la consommation énergétique et l'optimisation de la régulation.

La première étape du travail consiste à réaliser l'analyse bibliographique. Cela a également permis de comprendre les problèmes de performance énergétique des bâtiments scolaires et d'établir les méthodes d'analyse et d'optimisation développées dans la littérature. Une attention particulière est accordée aux approches à faible coût comme l'amélioration de la régulation, le développement d'horaires de fonctionnement spécifiques ou l'optimisation de l'exploitation des installations techniques. Cette phase a donné une base théorique pour analyser le site et interpréter les résultats.

L'analyse se poursuit par l'exploitation de données de suivi énergétique disponibles sur le site étudié. Des capteurs et des systèmes de mesure ont été installés dans le cadre du projet *CERTEB_OPT* du groupe *BEMS* de l'Université de Liège. Ces données peuvent être dérivées des relevés de consommation d'énergie, des températures et d'autres mesures concernant le fonctionnement des installations techniques. Au cours de la première étape, ces données sont triées, vérifiées et structurées pour leur cohérence et leur exploitation correcte pendant le processus de travail.

Une analyse détaillée des consommations énergétiques est ensuite réalisée. Elle se concentre sur la compréhension des profils de consommation du site et sur le fonctionnement pratique des installations de chauffage. La consommation est étudiée à différentes échelles de temps, principalement quotidienne, hebdomadaire et saisonnière. Une attention particulière est portée à la distinction entre les périodes scolaires et les périodes de vacances. Cette séparation est également utile pour mieux comprendre l'impact réel de l'occupation sur la consommation d'énergie du site. Elle montre également quelques consommations inutiles ou activités déviantes en l'absence d'occupation.

L'analyse des données est une partie très importante du travail. Elle ne sert pas seulement à surveiller la consommation du site, mais aussi à comprendre le fonctionnement réel des bâtiments et des systèmes techniques. Les informations obtenues permettent d'évaluer les stratégies de régulation appliquées ainsi que certaines frictions opérationnelles. Ces observations sont ensuite utilisées pour assembler une simulation énergétique, simulant comment le fonctionnement réel de ce site pourrait se dérouler. Le but n'est pas de créer un cadre purement théorique mais de tenter d'imiter au mieux le comportement à partir des données de surveillance.

Le site étudié présente également un intérêt particulier puisqu'il est composé de plusieurs bâtiments voisins utilisant des systèmes de chauffage différents. Il existe donc plusieurs modes de fonctionnement sur le terrain, pouvant être comparés entre eux dans des conditions relativement similaires. Ainsi, il est visé d'identifier les systèmes ou la stratégie de régulation les plus efficaces dans le scénario étudié.

En complément de l'analyse des données, une modélisation énergétique dynamique des bâtiments est réalisée à l'aide des logiciels *TRNBuild*¹ et *Simulation Studio*². Ces outils offrent la possibilité de modéliser le comportement thermique des bâtiments, en se concentrant sur les caractéristiques de construction de l'enveloppe, les schémas d'occupation, les gains internes, les conditions climatiques et

¹ « TRNBuild est une interface permettant de créer et d'éditer toutes les informations non géométriques requises par le modèle de construction TRNSYS. TRNBuild offre à l'utilisateur une grande flexibilité pour modifier les propriétés des matériaux des murs et des couches, créer des profils de ventilation et d'infiltration, ajouter des gains, définir les plafonds et sols radiants, et positionner les occupants pour les calculs de confort. » (TRNSYS, 2019)

² « Modélisation des systèmes énergétiques. En plus des bâtiments, les composants permettent la modélisation des systèmes énergétiques, qu'ils soient conventionnels, à base d'énergies renouvelables ou innovants. » (IZUBA énergies, 2026)

les systèmes techniques dans l'environnement. Les simulations sont générées à partir des données de terrain, ainsi que des informations techniques disponibles et de l'analyse des données de surveillance énergétique, notamment lors de la conception de scénarios de chauffage, de l'enregistrement des périodes d'occupation et de la vérification que les simulations s'exécutent en synchronisation avec les données.

Une simulation énergétique initiale est d'abord réalisée afin de reproduire le fonctionnement actuel du site. Les résultats simulés sont ensuite comparés aux données réelles de consommation afin de vérifier la cohérence du modèle développé et d'ajuster certaines hypothèses si nécessaire. Cette étape permet de disposer d'un modèle représentatif du comportement énergétique réel des bâtiments avant de tester différents scénarios d'optimisation.

Ensuite, divers mécanismes d'amélioration sont étudiés par simulation. L'accent est mis sur les solutions à faible coût, telles que l'optimisation des horaires de chauffage, le réglage des consignes de température ou l'amélioration de la régulation pour les conditions intérieures et les périodes d'occupation. Chaque scénario a été évalué selon plusieurs critères, tels que la capacité à économiser de l'énergie, la faisabilité de mise en œuvre et le coût de sa modification appropriée. Des considérations particulières sont accordées aux solutions permettant une réduction substantielle de la consommation d'énergie tout en ayant un lien avec les conditions technologiques et financières du site étudié.

Enfin, les résultats sont interprétés et discutés pour identifier les meilleures stratégies, en termes de leur application dans le contexte du site étudié. Cette dernière analyse permet d'examiner les améliorations énergétiques potentielles sur une période de temps qui pourraient être réalisées sans une rénovation sérieuse et d'exposer également les limitations du travail.

Présentation du site étudié

I. Présentation générale du site

Le cas d'étude retenu dans le cadre de ce mémoire est l'école secondaire *Sainte-Véronique*, située *Rue Rennequin Sualem* à Liège. Le site étudié comprend plusieurs bâtiments scolaires voisins, répartis entre les numéros 22 et 30 de la rue. Cet ensemble constitue un terrain d'étude particulièrement intéressant en raison de la diversité des bâtiments présents ainsi que des différences observées au niveau des systèmes techniques et des modes de fonctionnement.

Cette étude fait partie de plusieurs projets dans le cadre du projet européen *CERTEB_OPT* visant à améliorer les connaissances sur la performance énergétique des bâtiments scolaires, à travers le suivi, l'analyse de la consommation et l'optimisation des systèmes techniques. Ce projet dépend fortement de l'utilisation de données réelles pour formuler des politiques d'optimisation adaptées aux établissements existants. (Université de Liège, 2025)

Dans ce contexte, l'école *Sainte-Véronique* constitue une zone d'étude pertinente, car ses bâtiments varient considérablement, tout comme leurs systèmes techniques et leurs modes de fonctionnement. Grâce au projet, les campagnes de suivi ont permis de collecter les données réelles concernant le comportement thermique des bâtiments étudiés. Ces données ont servi de base à l'analyse présentée dans ce mémoire ainsi qu'au développement des scénarios de simulation et d'optimisation énergétique.



FIGURE 1 - VUE AÉRIENNE DE LA RUE RENNEQUIN SUALEM (RÉGION WALLONNE, S.D.)

II. Description des bâtiments étudiés

Le site d'étude se compose de plusieurs bâtiments scolaires adjacents aux caractéristiques variées. Cette diversité est remarquable par rapport à cette étude car elle permet la comparaison des différents comportements d'exploitation énergétique et des divers modes de systèmes de chauffage dans des conditions relativement similaires.

Les bâtiments étudiés accueillent principalement des activités scolaires traditionnelles. Ce sont des salles de classe, des bureaux administratifs et de nombreuses installations supplémentaires destinées au personnel enseignant. Les périodes d'occupation sont principalement les jours de semaine et les périodes scolaires. En revanche, les bâtiments sont moins occupés la nuit, le week-end et pendant les vacances scolaires.

Cette grande variabilité d'occupation aura un impact direct sur les besoins énergétiques du site. Une mauvaise planification de l'équipement de chauffage pendant ces périodes, notamment lorsque les installations restent actives pendant de longues périodes de non-occupation, peut entraîner une consommation inutile.

L'intérêt du site est également fonction des divers systèmes techniques, selon les bâtiments. Cette configuration permet l'application de plusieurs stratégies opérationnelles et compare leurs effets sur la consommation énergétique observée.

TABLEAU 1 - PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES BÂTIMENTS ÉTUDIÉS

Bâtiment	Type de locaux	Système de chauffage	Régulation décrite pour l'établissement	Occupation principale	Présence de capteurs
Bâtiments 22 Nouveau & Ancien	Salle de cours et bureaux	Chauffage central	Régulation avec sondes extérieures et vannes thermostatiques dépendant des actions de l'ouvrier de maintenance	Périodes scolaires en journée	Oui
Bâtiment 24	Bureaux				Oui
Bâtiment 26	Bureaux				Non
Bâtiment 28	Salle de cours				Oui
Bâtiment 30	Salles de cours et bureaux				Oui

III. Campagne de mesure et données disponibles

Le travail repose principalement sur l'exploitation des données d'une campagne de mesure menée sur le site étudié. Cette campagne a été réalisée à l'aide de capteurs mesurant la température, l'humidité relative et le point de rosée dans diverses pièces représentatives des bâtiments. Les mesures ont été enregistrées toutes les quinze minutes entre le 16 décembre 2025 et le 25 mars 2026.

Les capteurs ont été installés dans plusieurs types de locaux, notamment :

- Des salles de classe,
- Des bureaux,
- Des salles de professeurs.

L'objectif principal de cette campagne de mesure vise à déterminer les caractéristiques de confort thermique dans les bâtiments ainsi qu'à évaluer le fonctionnement interne et le contrôle des systèmes de chauffage. La différence de température entre le temps d'occupation et l'absence d'occupation est recherchée pour détecter précocement des signaux de possibles dysfonctionnements ou comportements énergétiques anormaux.

En complément des mesures de température et d'humidité, différentes données de consommation énergétique ont également été exploitées dans le cadre du mémoire. Ces données permettent d'étudier le comportement énergétique global du site ainsi que l'évolution des consommations au cours du temps.

TABLEAU 2 - SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES POUR L'ÉTUDE

Type de données	Unité	Fréquence des mesures	Période étudiée	Source / Localisation	Utilisation dans le travail
Température intérieure	°C ³	15 minutes	16/12/25 au 25/03/26	Capteurs placés dans différents locaux des bâtiments <i>Sainte-Véronique</i>	Analyse du confort thermique et du fonctionnement du chauffage
Humidité relative ⁴	%	15 minutes	16/12/25 au 25/03/26	Capteurs placés dans différents locaux	Analyse des conditions intérieures et du confort
Point de rosée ⁵	°C	15 minutes	16/12/25 au 25/03/26	Capteurs placés dans différents locaux	Analyse complémentaire des conditions hygrothermiques
Consommations énergétiques	kWh ⁶	Variable selon les données disponibles	Année scolaire 2025-2026	Données fournies par l'équipe <i>BEMS</i>	Analyse des profils de consommation et des dérives énergétiques
Données d'occupation	-	Calendrier scolaire	Année scolaire 2025-2026	Calendrier de l'établissement	Distinction périodes

³ « Degré Celsius, unité de mesure de la température (symbole °C), égale à la centième partie de l'écart entre la température de fusion de la glace (0°C) et la température d'ébullition de l'eau (100°C) sous pression atmosphérique normale. » (Larousse, s.d.)

⁴ « Humidité relative, rapport, en pourcents, de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale (saturante). » (Larousse, s.d.)

⁵ « Point de rosée, température pour laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air, en un lieu donnée et à une pression donnée constante, devient saturante. » (Larousse, s.d.)

⁶ « Kilowattheure, unité d'énergie ou de travail (symbole kWh) équivalant au travail exécuté pendant une heure par une machine dont la puissance est de 1 kilowatt. (1 kWh = 3,6.10⁶J.) » (Larousse, s.d.)

					scolaires / vacances
Données climatiques extérieures	°C	Horaire	Période étudiée	Données météorologiques	Analyse de l'influence des conditions extérieures
Informations techniques des bâtiments	-	Données fixes	Durant l'étude	Plans, relevés techniques et observations terrain	Construction des modèles de simulation
Informations sur les systèmes HVAC ⁷	-	Données fixes	Durant l'étude	Chaudières, régulation, sondes extérieures ⁸	Paramétrage et analyse des simulations

IV. Systèmes techniques et régulation

Les bâtiments étudiés sont principalement chauffés par des chaudières alimentées par du gaz naturel provenant du réseau de distribution urbain. Comme certains bâtiments partagent des installations de chauffage, le site constitue un cas d'étude intéressant. Notamment, les bâtiments 22 ancien et 22 nouveau sont alimentés par la même chaudière. Les bâtiments aux numéros 28 et 30 sont également reliés par une installation commune. Cela offre également l'opportunité d'analyser l'influence de la même production de chaleur sur plusieurs bâtiments ayant des usages, ou comportements, différents en place.

Les installations sont basées sur des systèmes de chauffage central avec des radiateurs et des vannes thermostatiques. Les chaudières sont équipées de capteurs de température extérieure qui permettent d'ajuster la température de départ du circuit de chauffage en fonction des conditions climatiques. Mais les installations sont largement contrôlées par un programme, les dates de début et d'arrêt sont dans les paramètres temporels et sur site.

La logique de programmation observée pendant l'étude est la suivante :

- ➔ Démarrage des chaudières le 27/09,
- ➔ En mi-saison, les chaudières fonctionnent de 7h15 à 13h
- ➔ En saison froide, les chaudières fonctionnent de 7h15 à 18h

V. Intérêt du cas d'étude

Le site de Sainte-Véronique constitue un cas d'étude particulièrement intéressant dans le cadre de ce travail. Il combine plusieurs éléments favorables à une analyse énergétique détaillée :

- La présence de données de monitoring réelles,
- Plusieurs bâtiments présentant des comportements différents,
- Des systèmes techniques variés,
- Des périodes d'occupation clairement identifiables,

⁷ « HVAC est un acronyme anglais qui signifie chauffage ("heating"), ventilation et climatisation. Bien que les systèmes de Chauffage-Ventilation-Climatisation varient considérablement d'un système à l'autre, le terme fait généralement référence à tous les composants liés qui se rapportent à la régulation de la température et de la qualité de l'air intérieur. Les conduits, les événements et les dispositifs de filtration de l'air font partie du système de Chauffage-Ventilation-Climatisation, tout comme les thermostats et les autres commandes connectées à l'installation. Utilisé de manière plus large, le terme est aussi parfois utilisé pour inclure les appareils portables individuels qui répondent aux besoins de chauffage, de refroidissement et de ventilation. » (Naoemie, s.d.)

⁸ « Une sonde extérieure permet au chauffage de s'adapter automatiquement aux variations météorologiques. Elle enregistre constamment la température extérieure et envoie l'information au régulateur de la chaudière. Le régulateur applique ensuite une loi d'eau, une relation entre la température extérieure et la température de l'eau qui est envoyée dans le circuit de chauffage. Lorsque la température extérieure diminue, la température de l'eau de chauffage augmente pour compenser les pertes de chaleur du bâtiment. Inversement, lorsque les conditions extérieures sont plus clémentes, la température de l'eau est réduite. Une telle régulation augmente non seulement le confort thermique du bâtiment, mais réduit également la consommation d'énergie en l'adaptant mieux aux besoins réels du bâtiment. » (Clémence, 2024)

- Des possibilités d'optimisation à faible coût.

L'objectif du mémoire n'est pas une rénovation majeure du site, mais plutôt de trouver des améliorations réalistes basées sur une meilleure compréhension du fonctionnement réel des bâtiments et de leurs installations techniques. Cette méthode fait partie des initiatives actuelles de gestion de l'énergie dans les bâtiments scolaires, qui visent à optimiser la performance énergétique avec une analyse de la consommation, le suivi et l'optimisation de la régulation.

Analyse des consommations énergétiques

I. Présentation des données analysées

L'analyse de la consommation d'énergie est une étape essentielle de ce mémoire. Les données disponibles permettent de mieux comprendre la performance des bâtiments étudiés, ainsi que du fonctionnement des systèmes de chauffage sur le site. La source de données de cette approche provient de la campagne de surveillance à l'école *Sainte-Véronique* à Liège.

TABLEAU 3 - LOCALISATION DES DIFFÉRENTS CAPTEURS

Numéro du capteur	Localisation	Numéro du bâtiment
BEMS 9	Classe 1 ^{er} arrière	22 Nouveau
BEMS 16	Classe 1 ^{er} avant droit	22 Ancien
BEMS 17	Local 3M (4 ^{ème} – classe arrière)	30
BEMS 30	Local 3K (3 ^{ème} – classe arrière)	28
BEMS 32	Bureau d'accueil	30
ADAPT 6	Salle des profs arrière	22 Ancien
ADAPT 7	Local D16 (1 ^{er} – bureau éducateurs)	30
ADAPT 8	Bureau Mme Leyen	30
ADAPT 9	Salle des profs rez-de-chaussée avant	24
ADAPT 10	Clear desk (2 ^{ème})	24

Un examen préliminaire de la qualité des données a été effectué avant l'analyse. La série de mesures a été vérifiée afin de détecter d'éventuelles valeurs aberrantes ou défaillances de capteurs. Les données collectées ne présentaient pas d'anomalies notables. Par conséquent, les valeurs observées ont été incluses dans leur intégralité pour une analyse détaillée. Cependant, les résultats différaient parfois, ce qui nécessitait une interprétation prudente, notamment pour un capteur installé dans la salle Clear Desk +2, qui était placé près d'une fenêtre.

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, les données ont été séparées en trois catégories :

- 1) Les vacances d'hiver (du 22/12/25 au 04/01/26),
- 2) Les vacances de Carnaval (du 16/02/26 au 01/03/26),
- 3) Les périodes hors vacances.

Cette distinction permet d'évaluer l'impact réel de l'occupation sur les températures intérieures et le fonctionnement des systèmes de chauffage. Elle permet également de mettre en évidence certaines consommations inutiles ou certaines stratégies de régulation peu adaptées.

File Version	Model			Hardware Type	Data Logger Name	Serial Number	Sample Rate	Total Alarms	
2	EL-SIE-2				2 ADAPT 08	2428e50663f	900	0	
Channel Num	Channel Name			Channel Type					
1	Temperature			1					
2	Humidity			2					
3	Dew Point			4					
Channel Num	Channel Name			Alarm Type	High Threshold	Low Threshold	Delay	Hold	
Reading	Date / Time (UTC)			Température (°C)	Humidité (%)	Dew Point (°C)	T - D.P. (°C)		
1	16-12-25 06:00	06:00:00	Nuit	16,18	54,2	6,92	9,26	Normal	Scolaire
2	16-12-25 06:15	06:15:00	Nuit	16,19	54,3	6,95	9,24	Normal	Scolaire
3	16-12-25 06:30	06:30:00	Nuit	16,15	54,5	6,97	9,18	Normal	Scolaire
4	16-12-25 06:45	06:45:00	Nuit	16,16	54,6	7	9,16	Normal	Scolaire
5	16-12-25 07:00	07:00:00	Nuit	16,18	54,9	7,1	9,08	Normal	Scolaire
6	16-12-25 07:15	07:15:00	Jour	16,22	55	7,17	9,05	Normal	Scolaire
7	16-12-25 07:30	07:30:00	Jour	16,26	55	7,2	9,06	Normal	Scolaire
8	16-12-25 07:45	07:45:00	Jour	16,23	55,3	7,25	8,98	Normal	Scolaire
9	16-12-25 08:00	08:00:00	Jour	16,14	55,7	7,28	8,86	Normal	Scolaire
10	16-12-25 08:15	08:15:00	Jour	16,11	55,8	7,28	8,83	Normal	Scolaire
11	16-12-25 08:30	08:30:00	Jour	16,18	56,5	7,52	8,66	Normal	Scolaire
12	16-12-25 08:45	08:45:00	Jour	16,02	52,7	6,36	9,66	Normal	Scolaire
13	16-12-25 09:00	09:00:00	Jour	15,82	56,4	7,16	8,66	Normal	Scolaire
14	16-12-25 09:15	09:15:00	Jour	16,52	59,9	8,7	7,82	Normal	Scolaire
15	16-12-25 09:30	09:30:00	Jour	17,16	59,2	9,13	8,03	Normal	Scolaire
16	16-12-25 09:45	09:45:00	Jour	17,57	59,8	9,66	7,91	Normal	Scolaire
17	16-12-25 10:00	10:00:00	Jour	18	58,6	9,77	8,23	Normal	Scolaire
18	16-12-25 10:15	10:15:00	Jour	20,19	49,9	9,41	10,78	Air sec	Scolaire
19	16-12-25 10:30	10:30:00	Jour	20,34	48,9	9,24	11,1	Air sec	Scolaire
20	16-12-25 10:45	10:45:00	Jour	20,41	48,1	9,06	11,35	Air sec	Scolaire
21	16-12-25 11:00	11:00:00	Jour	20,41	47,8	8,97	11,44	Air sec	Scolaire
22	16-12-25 11:15	11:15:00	Jour	20,44	48,6	9,24	11,2	Air sec	Scolaire
23	16-12-25 11:30	11:30:00	Jour	20,47	47,6	8,96	11,51	Air sec	Scolaire
24	16-12-25 11:45	11:45:00	Jour	20,47	47,4	8,9	11,57	Air sec	Scolaire
25	16-12-25 12:00	12:00:00	Jour	20,51	47,2	8,87	11,64	Air sec	Scolaire
26	16-12-25 12:15	12:15:00	Jour	20,55	47	8,85	11,7	Air sec	Scolaire
27	16-12-25 12:30	12:30:00	Jour	20,6	46,9	8,86	11,74	Air sec	Scolaire
28	16-12-25 12:45	12:45:00	Jour	20,6	46,8	8,83	11,77	Air sec	Scolaire
29	16-12-25 13:00	13:00:00	Jour	20,61	46,7	8,81	11,8	Air sec	Scolaire
30	16-12-25 13:15	13:15:00	Jour	20,6	46,7	8,8	11,8	Air sec	Scolaire
31	16-12-25 13:30	13:30:00	Jour	20,61	46,7	8,81	11,8	Air sec	Scolaire
32	16-12-25 13:45	13:45:00	Jour	20,67	46,6	8,83	11,84	Air sec	Scolaire
33	16-12-25 14:00	14:00:00	Jour	20,68	46,5	8,81	11,87	Air sec	Scolaire

FIGURE 2 - EXEMPLE DE DONNÉES RÉCOLTÉES PAR LES CAPTEURS

II. Données récoltées par bâtiment

La préparation des données doit être effectuée avant de commencer l'analyse des différents bâtiments. Les données de la campagne de mesure ont été publiées sous deux formats.

L'équipe *BEMS* a fourni un fichier *Excel* qui inclut des informations générales sur le site, y compris l'emplacement des capteurs, ainsi que d'autres informations sur les bâtiments. En revanche, les observations de chacun des capteurs ont été transmises séparément, sous forme de fichiers CSV⁹ distincts, stockant les données de température, d'humidité relative et de point de rosée, enregistrées toutes les quinze minutes. (Figure 2)

La préparation des données a consisté à regrouper les fichiers CSV par bâtiment et à organiser les données dans *Microsoft Excel*. Une fois cette base de données construite, des indicateurs individuels pour chaque capteur respectif ont été générés. Les températures et l'humidité, maximales, minimales et moyennes ont été trouvées, ainsi que d'autres informations pouvant être utilisées pour expliquer et interpréter le caractère thermique des bâtiments. De plus, une séparation a été faite entre les périodes scolaires, les vacances d'hiver et les vacances de Carnaval afin de mieux comprendre le rôle de l'occupation des bâtiments sur l'environnement intérieur.

D'autres calculs ont été appliqués pour comparer les données quotidiennes entre 7h et 18h (en journée) et entre 18h et 7h (la nuit). Cette analyse a permis une évaluation indirecte de la performance des systèmes de chauffage et de l'efficacité de la réduction du chauffage nocturne dans divers bâtiments.

Les résultats ont été interprétés à l'aide de multiples indicateurs complémentaires. En détail, une attention particulière a été accordée aux températures inférieures à 18°C qui avaient généralement été conclues comme causant un inconfort thermique dans les locaux éducatifs, et aux températures supérieures à 23°C qui suggéraient une surchauffe ou un chauffage excessif. L'analyse des températures effectuée pendant les nuits, les week-ends et les périodes de vacances a également identifié un potentiel de maintien des températures des bâtiments dans les pièces inoccupées. Ces observations sont des indicateurs indirects de la qualité des systèmes de chauffage et de leur adéquation par rapport aux besoins de leurs occupants.

Les formules pour déterminer les indicateurs sont incluses en annexe pour garantir la traçabilité et la reproductibilité des résultats. (Formules utilisées pour l'analyse de données de monitoring)

⁹ « Le fichier CSV (pour Comma-Separated Values, ou valeurs séparées par des virgules) est un format texte simple utilisé pour stocker et échanger des données tabulaires. Chaque ligne du fichier représente un enregistrement, et chaque colonne est séparée par une virgule ou un point-virgule. Ce format léger et universel permet d'importer et d'exporter des données entre différents logiciels : Excel, Google Sheets, Outlook, OpenOffice, ou encore des outils de gestion de contacts et de bases de données. » (Adobe, 2026)

a. Bâtiments 22

➔ Vacances d'hiver

TABLEAU 4 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 22 PENDANT LES VACANCES D'HIVER

	Salle des profs arrière	Classe 1^{er} arrière	Classe 1^{er} avant droit
Température maximale (°C)	20,79	19	20
Date température maximale	23/12/25	22/12/25	23/12/25
Température minimale (°C)	9,85	7,50	5
Date température minimale	04/01/26	04/01/26	04/01/26
Température moyenne (°C)	13,40	12,22	9,15
Nombre d'heures sous 18°C	301,75	313	329,50
Nombre d'heures au-dessus de 23°C	0	0	0
Température moyenne entre 7h et 18h	13,46	12,20	9,26
Température moyenne entre 18h et 7h	13,35	12,24	9,06
Écart de température entre le jour et la nuit	0,11	-0,04	0,19
Humidité maximale (%)	47,90	55,50	61,50
Date humidité maximale	02/01/26	01/01/26	01/01/26
Humidité minimale (%)	29,40	33	42
Date humidité minimale	25/12/25	25/12/25	23/12/25
Humidité moyenne (%)	40,02	44,64	52,82
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	7,75	0	0
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	0	0	28,75
Humidité moyenne entre 7h et 18h	39,79	44,50	52,53
Humidité moyenne entre 18h et 7h	40,22	44,75	53,08
Écart d'humidité entre le jour et la nuit	-0,44	-0,25	-0,55

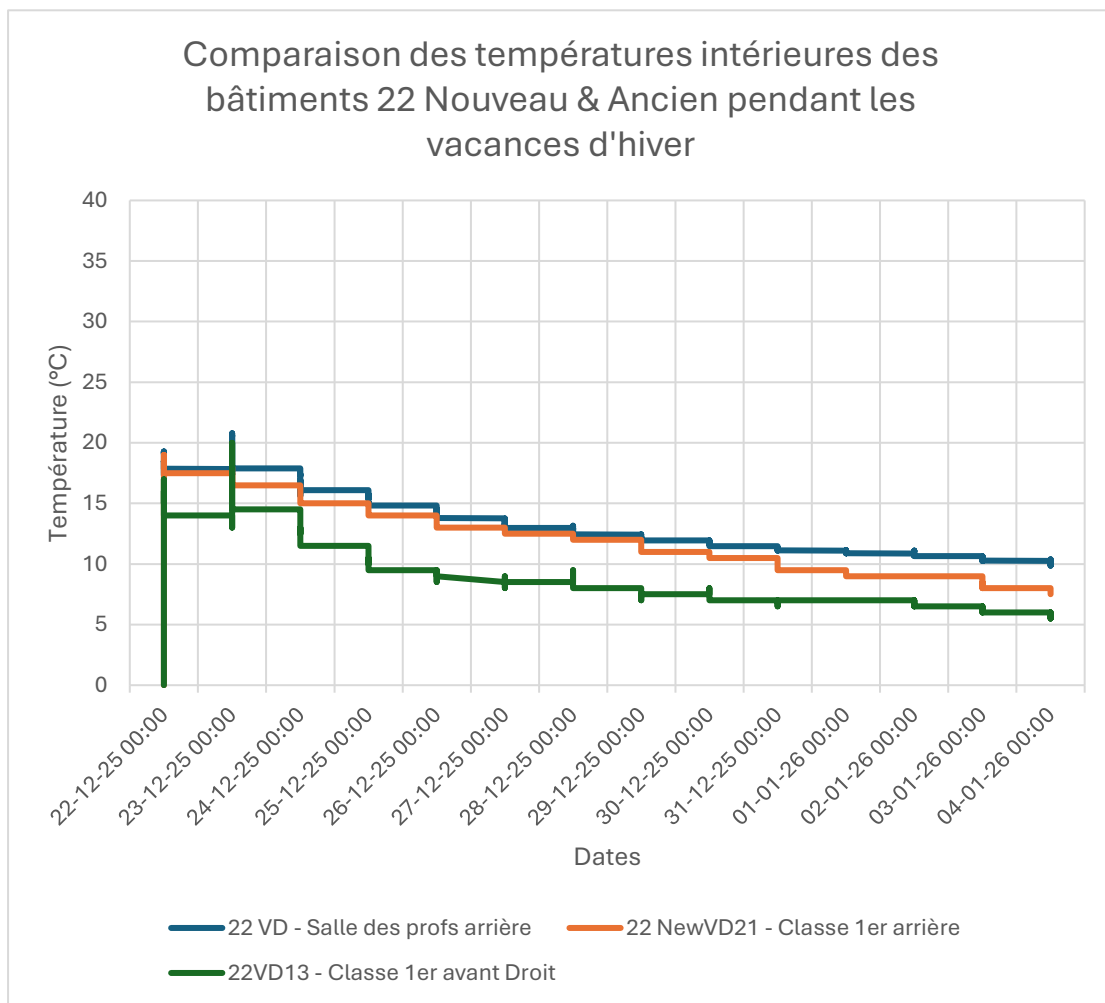


FIGURE 3 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 22 NOUVEAU & ANCIEN PENDANT LES VACANCES D'HIVER

La Figure 3 montre la lente baisse de température parmi les trois salles observées pendant les vacances d'hiver, suggérant un manque ou une réduction substantielle du chauffage dans ces pièces. Les températures dans le Nouveau Bâtiment 22 et la salle des professeurs dans l'Ancien Bâtiment 22 suivent une tendance relativement similaire, passant d'environ 18°C à 10°C à la fin des vacances. La première salle de classe à droite à l'avant dans l'Ancien Bâtiment 22, en revanche, montre constamment des températures plus basses, atteignant presque 6°C à la fin de la période. De telles différences indiquent que cette salle a un comportement thermique moins favorable, possiblement lié à son exposition ou à ses caractéristiques de construction. Pourtant, les trois courbes montrent que les bâtiments conservent une partie de la chaleur accumulée grâce à leur inertie thermique, même si les niveaux d'occupation sont faibles.

➔ Vacances de Carnaval

TABEAU 5 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 22 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL

	Salle des profs arrière	Classe 1^{er} arrière	Classe 1^{er} avant droit
Température maximale (°C)	24,22	20	24,50
Date température maximale	01/03/26	16/02/26	27/02/26
Température minimale (°C)	14,90	14,50	6,50
Date température minimale	21/02/26	23/02/26	18/02/26
Température moyenne (°C)	18,13	16,81	14,78
Nombre d'heures sous 18°C	195,50	215	246,50
Nombre d'heures au-dessus de 23°C	39,25	0	50,50
Température moyenne entre 7h et 18h	18,26	16,81	14,94
Température moyenne entre 18h et 7h	18,02	16,81	14,65
Écart de température entre le jour et la nuit	0,24	0	0,28
Humidité maximale (%)	61,90	70,50	71,50
Date humidité maximale	24/02/26	25/02/26	24/02/26
Humidité minimale (%)	27	36	34
Date humidité minimale	16/02/26	16/02/26	16/02/26
Humidité moyenne (%)	46	52,48	57,24
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	3	0	0
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	323,50	112	140,50
Humidité moyenne entre 7h et 18h	45,95	52,58	57,02
Humidité moyenne entre 18h et 7h	46,04	52,40	57,43
Écart d'humidité entre le jour et la nuit	-0,09	0,19	-0,41

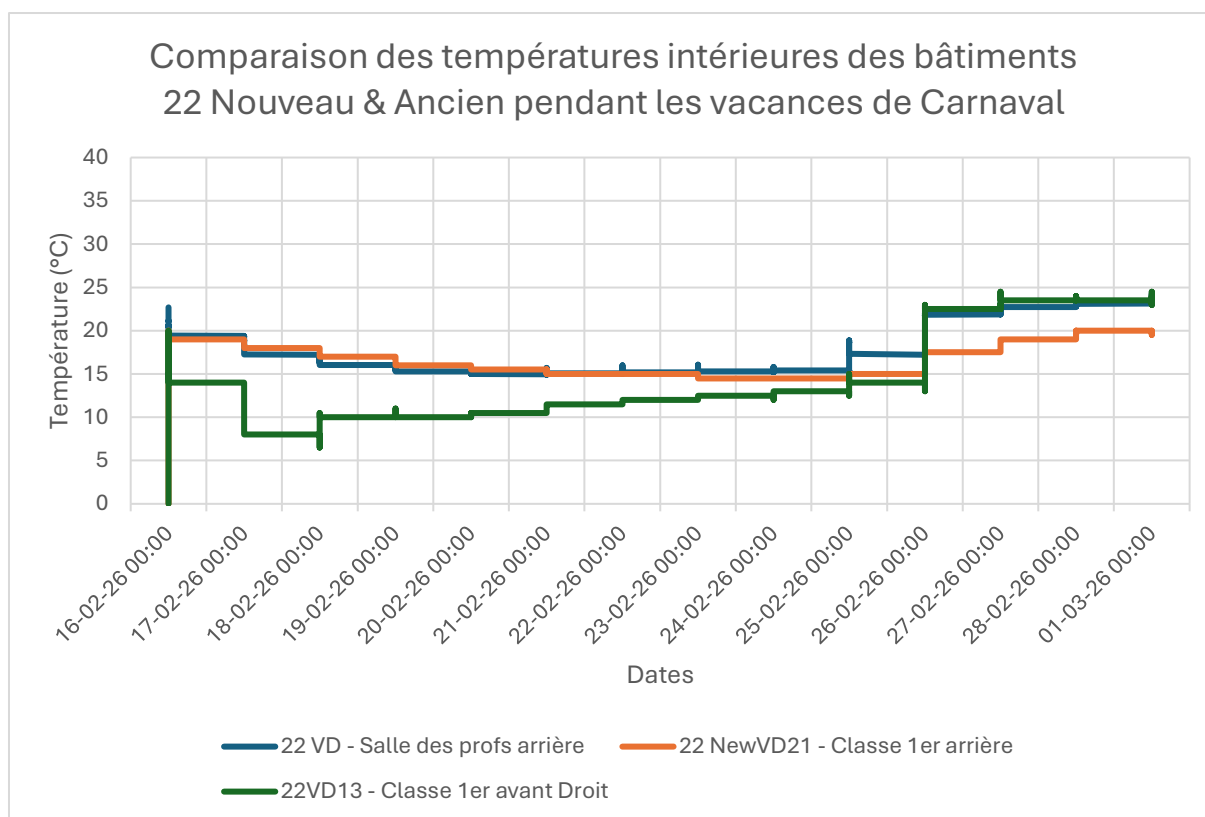


FIGURE 4 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 22 NOUVEAU & ANCIEN PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL

La Figure 4 illustre une tendance différente de celle observée pendant les vacances d'hiver. Les trois salles ont montré une baisse initiale des températures pendant les premiers jours des vacances, suivie d'une augmentation progressive à partir du 18 février, et d'une augmentation plus marquée à la fin de la période. Une tendance de ce type est particulièrement évidente pour la première classe avant droite du bâtiment 22 Ancien, où la température passe d'environ 8°C à plus de 23°C. De telles augmentations de température, couplées à des températures extérieures encore basses, suggèrent un redémarrage du système de chauffage avant le retour des classes et/ou une régulation moins stricte à ce moment-là. Ces différences entre les salles soutiennent également une certaine hétérogénéité du comportement thermique dans les bâtiments examinés.

➔ Périodes hors vacances

TABLEAU 6 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 22 PENDANT LES PÉRIODES HORS VACANCES

	Salle des profs arrière	Classe 1 ^{er} arrière	Classe 1 ^{er} avant droit
Température maximale (°C)	25,69	24,50	25,50
Date température maximale	03/03/26	13/01/26	02/03/26
Température minimale (°C)	9,71	7	4,50
Date température minimale	05/01/26	05/01/26	05/01/26
Température moyenne (°C)	21,92	20,49	20,25
Nombre d'heures sous 18°C en journée	15,5	38,25	49
Nombre d'heures au- dessus de 23°C en journée	297,5	15,50	71,25
Nombre d'heures au- dessus de 23°C la nuit	80,5	0	13,75
Température moyenne entre 7h et 18h	22,39	20,79	21,01
Température moyenne entre 18h et 7h	21,53	20,24	19,59
Écart de température entre le jour et la nuit	0,87	0,54	1,42
Écart-type ¹⁰ sur la période	1,635	1,877	2,255
Écart-type pendant la journée	1,517	1,823	2,014
Écart-type pendant la nuit	1,626	1,886	2,245
Humidité maximale (%)	62,60	67,50	64,50
Date humidité maximale	19/12/25	12/02/26	12/02/26
Humidité minimale (%)	22,40	33,50	27
Date humidité minimale	15/02/26	15/02/26	15/02/26
Humidité moyenne (%)	37,96	45,17	44,45
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	128,25	0	20,25
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	0,25	43,50	5,25
Humidité moyenne entre 7h et 18h	38,82	47,03	44,57

¹⁰ « L'écart-type d'une série statistique ou d'une variable aléatoire est la racine carrée positive de la variance. Il mesure la dispersion des valeurs autour de la moyenne. Un écart-type petit signifie que les valeurs sont concentrées autour de la moyenne. Un écart-type grand signifie qu'elles sont dispersées. » (L., 2025)

Humidité moyenne entre 18h et 7h	37,23	43,57	44,36
Écart d'humidité entre le jour et le nuit	1,59	3,47	0,21

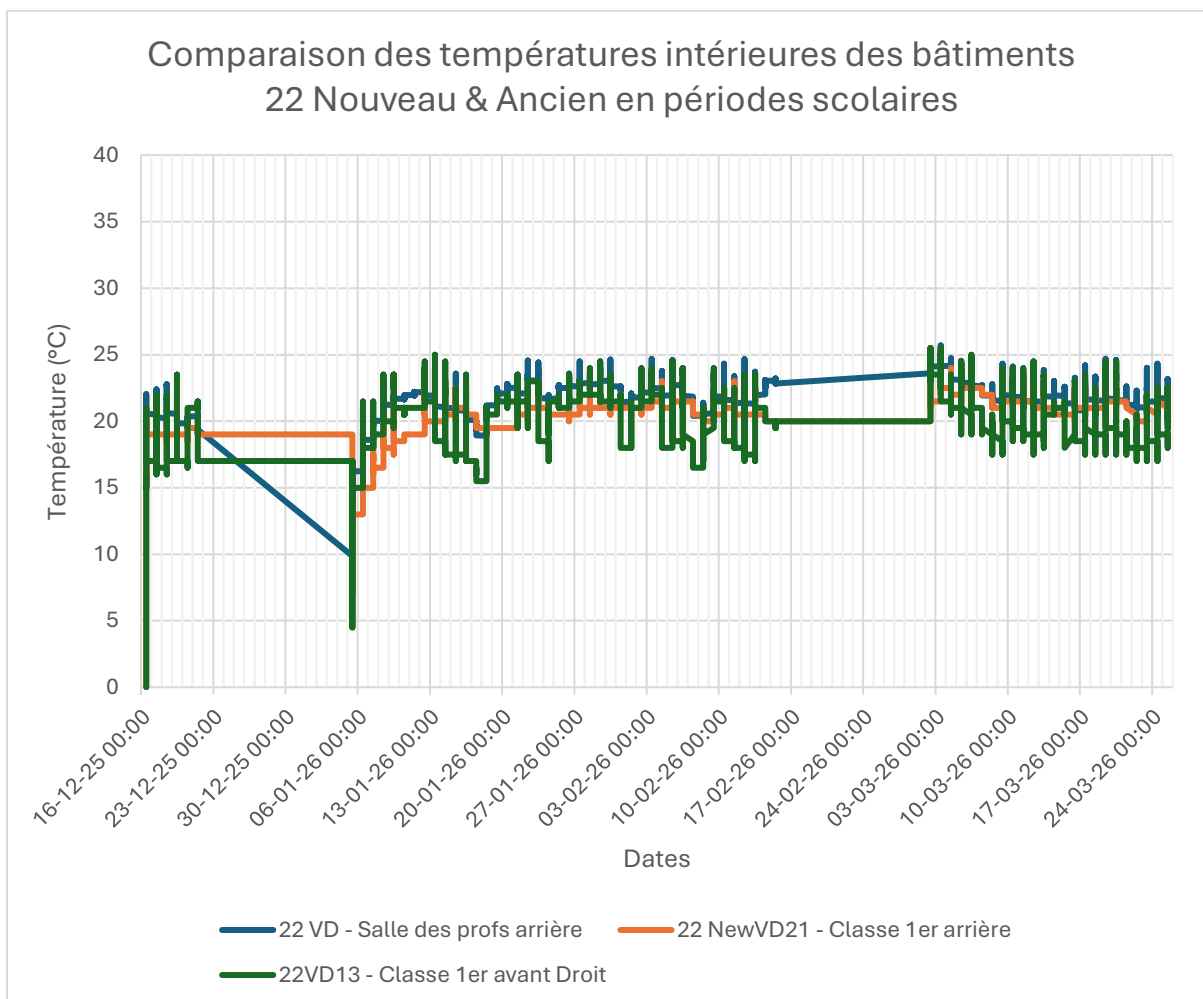


FIGURE 5 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 22 NOUVEAU & ANCIEN EN PÉRIODES SCOLAIRES

La Figure 5 met en évidence des températures globalement comprises entre 18 et 24°C durant les périodes scolaires, traduisant le maintien d'un niveau de confort thermique satisfaisant dans les locaux occupés. La salle des professeurs arrière du bâtiment 22 Ancien présente les températures les plus stables, tandis que la classe 1er arrière du bâtiment 22 Nouveau suit une évolution similaire avec des variations limitées. La classe 1er avant droit du bâtiment 22 Ancien se distingue par des fluctuations plus importantes et des températures parfois inférieures à 18°C, indiquant ainsi une régulation moins uniforme ou des caractéristiques thermiques différentes. Les baisses observées pendant les périodes de vacances sont rapidement compensées par une hausse des températures lorsque les activités scolaires reprennent, montrant l'influence directe de l'occupation et du fonctionnement du chauffage sur les conditions intérieures.

b. Bâtiment 24

➔ Vacances d'hiver

TABLEAU 7 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LE BÂTIMENT 24 PENDANT LES VACANCES D'HIVER

	Salle des profs	Clear Desk +2
Température maximale (°C)	19,63	17,72
Date température maximale	22/12/25	22/12/25
Température minimale (°C)	10,12	6,85
Date température minimale	04/01/26	04/01/26
Température moyenne (°C)	12,97	9,51
Nombre d'heures sous 18°C	321,5	336
Nombre d'heures au-dessus de 23°C	0	0
Température moyenne entre 7h et 18h	12,96	9,46
Température moyenne entre 18h et 7h	12,99	9,54
Écart de température entre le jour et la nuit	-0,03	-0,08
Humidité maximale (%)	46,70	59,30
Date humidité maximale	02/01/26	01/01/26
Humidité minimale (%)	31,80	43,80
Date humidité minimale	25/12/25	22/12/25
Humidité moyenne (%)	41,09	52,90
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	0	0
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	0	0
Humidité moyenne entre 7h et 18h	41	53,16
Humidité moyenne entre 18h et 7h	41,17	52,69
Écart d'humidité entre le jour et la nuit	-0,17	0,47

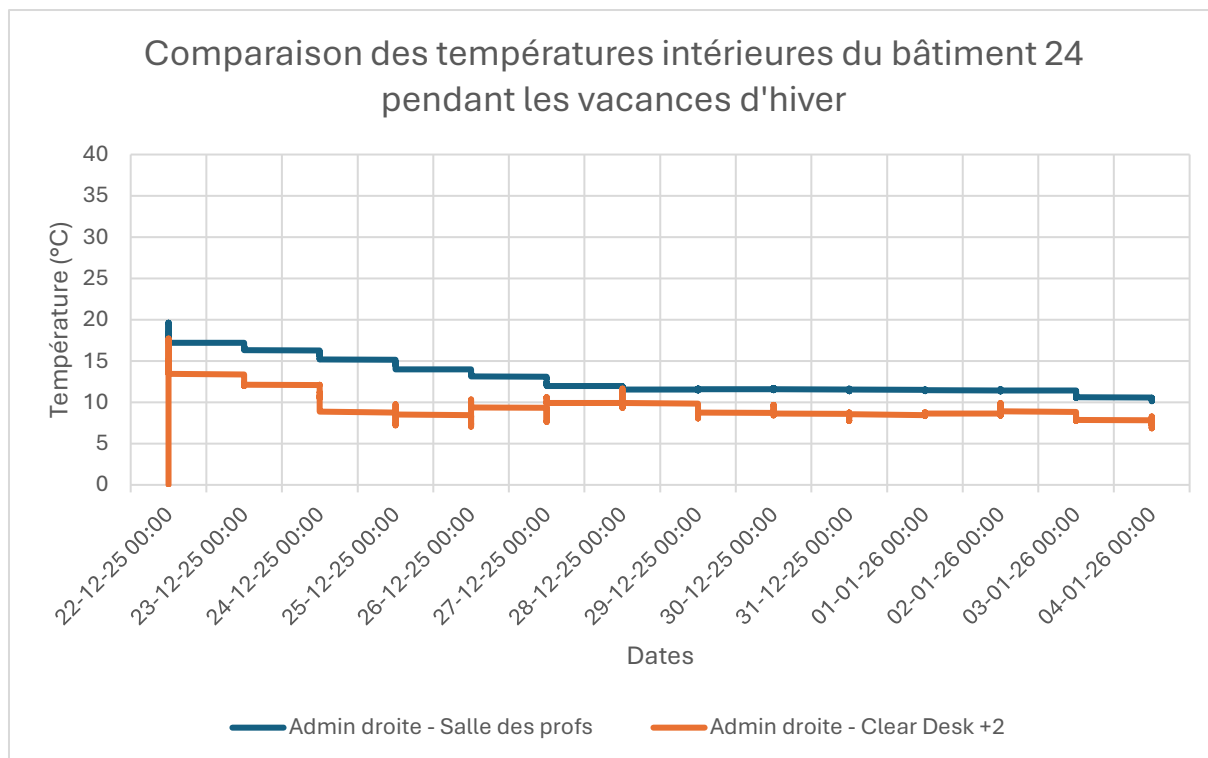


FIGURE 6 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DU BÂTIMENT 24 PENDANT LES VACANCES D'HIVER

Comme le montre la Figure 6, il y a une diminution progressive des températures dans les deux pièces du bâtiment 24 pendant les vacances d'hiver, ce qui signifie une réduction significative ou un arrêt du chauffage pendant cette période. En fait, pendant toute la période, la salle des profs maintient des températures plus élevées que la salle Clear Desk +2, qui reste au-dessus de 10°C tout au long de la période étudiée. En revanche, la salle Clear Desk +2 approche des températures proches de 8°C dès les premiers jours des vacances et montre des valeurs plus basses tout au long de la période. Cette différence témoigne d'une différence entre le comportement thermique des deux pièces. Le capteur dans la salle Clear Desk +2 est placé près d'une fenêtre, ce qui peut partiellement influencer les températures sur ce capteur également, les rendant plus basses.

➔ Vacances de Carnaval

TABLEAU 8 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LE BÂTIMENT 24 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL

	Salle des profs	Clear Desk +2
Température maximale (°C)	22,14	26,05
Date température maximale	01/03/26	25/02/26
Température minimale (°C)	12,49	8,42
Date température minimale	20/02/26	20/02/26
Température moyenne (°C)	16,62	15,18
Nombre d'heures sous 18°C	217,25	249,50
Nombre d'heures au-dessus de 23°C	0	17,75
Température moyenne entre 7h et 18h	16,65	15,64
Température moyenne entre 18h et 7h	16,59	14,80
Écart de température entre le jour et la nuit	0,06	0,84
Humidité maximale (%)	61,40	72,30
Date humidité maximale	24/02/26	22/02/26
Humidité minimale (%)	35,40	36
Date humidité minimale	16/02/26	01/03/26
Humidité moyenne (%)	49,36	54,83
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	0	0
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	320	236,25
Humidité moyenne entre 7h et 18h	49,48	54,09
Humidité moyenne entre 18h et 7h	49,26	55,45
Écart d'humidité entre le jour et la nuit	0,22	-1,36

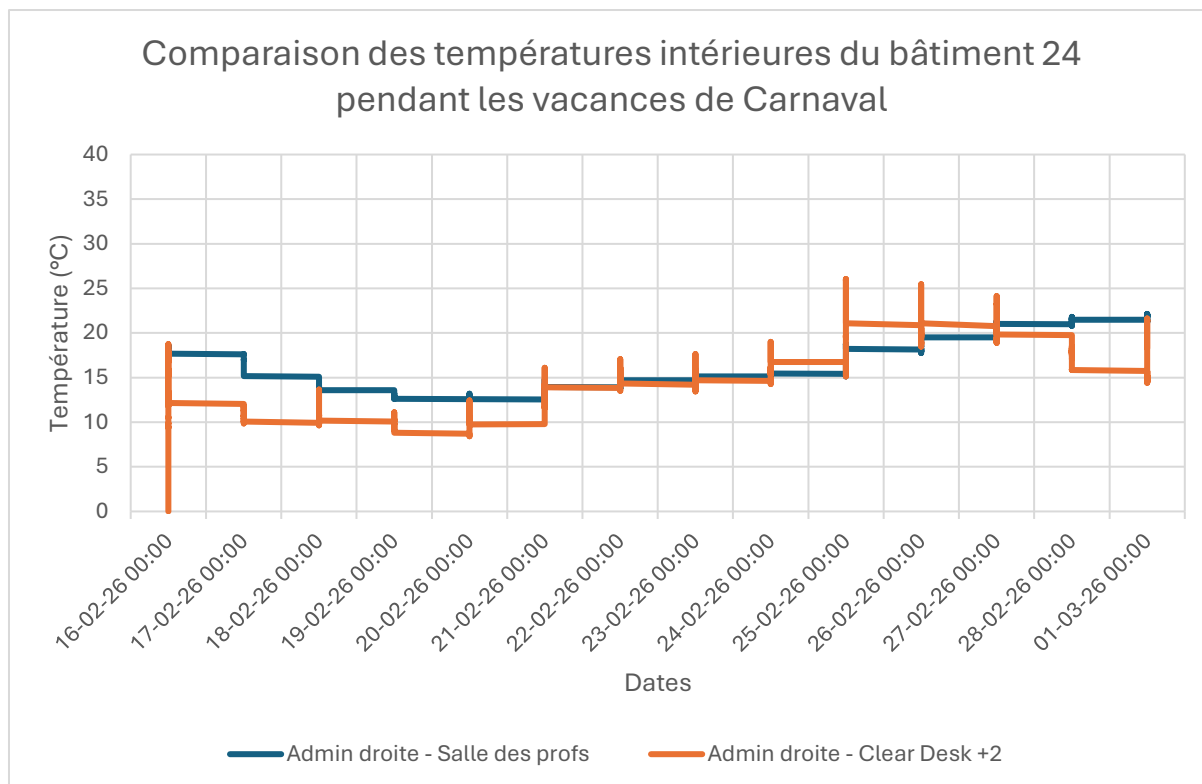


FIGURE 7 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DU BÂTIMENT 24 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL

La Figure 7 montre une tendance similaire dans les deux salles du bâtiment 24 pendant les vacances de Carnaval. Après une baisse des températures au début de la période, une augmentation progressive est observée à partir du 21 février, suivie d'une hausse plus marquée à la fin des vacances. Les deux courbes convergent vers des températures comprises entre 20 et 22°C, indiquant que le chauffage a été rallumé avant la reprise des activités. Cependant, la salle Clear Desk +2 montre des variations plus significatives que la salle des enseignants, avec plusieurs pics de température dépassant occasionnellement 25°C.

➔ Périodes hors vacances

TABLEAU 9 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LE BÂTIMENT 24 PENDANT LES PÉRIODES HORS VACANCES

	Salle des profs	Clear Desk +2
Température maximale (°C)	22,44	27,32
Date température maximale	05/03/26	18/03/26
Température minimale (°C)	10,06	6,06
Date température minimale	05/01/26	07/01/26
Température moyenne (°C)	20,31	17,32
Nombre d'heures sous 18°C en journée	46,75	385
Nombre d'heures au-dessus de 23°C en journée	0	76,75
Nombre d'heures au-dessus de 23°C la nuit	0	54,25
Température moyenne entre 7h et 18h	20,39	17,66
Température moyenne entre 18h et 7h	20,24	17,04
Écart de température entre le jour et la nuit	0,15	0,62
Écart-type sur la période	1,615	4,024
Écart-type pendant la journée	1,540	4,126
Écart-type pendant la nuit	1,673	3,913
Humidité maximale (%)	55,20	63,30
Date humidité maximale	16/12/25	08/01/26
Humidité minimale (%)	30,30	25,40
Date humidité minimale	15/02/26	18/03/26
Humidité moyenne (%)	40,36	44,14
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	0	27,50
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	0	17,75
Humidité moyenne entre 7h et 18h	41,38	44,13
Humidité moyenne entre 18h et 7h	39,49	44,16

Écart d'humidité entre le jour et le nuit	1,89	-0,03
---	------	-------

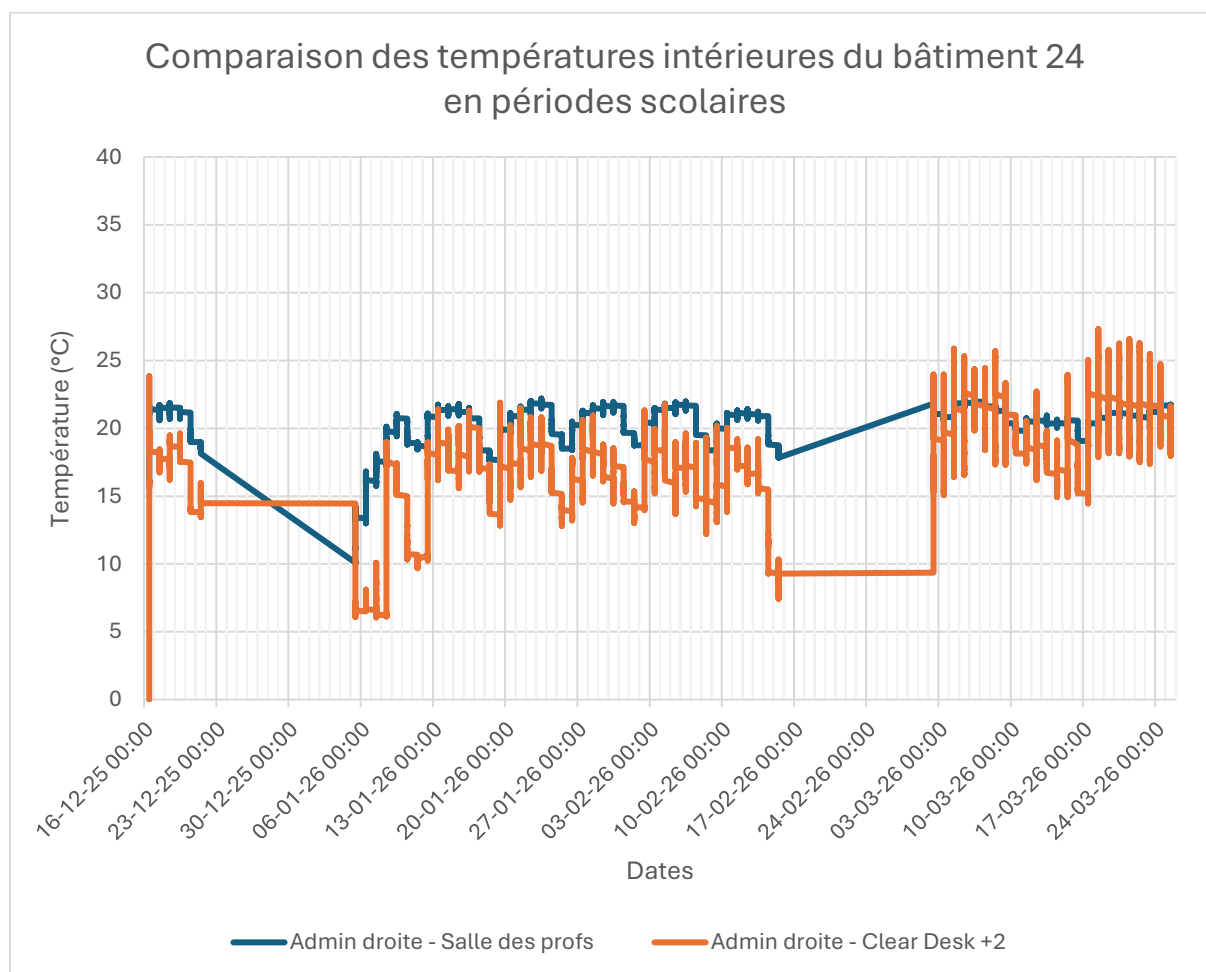


FIGURE 8 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DU BÂTIMENT 24 EN PÉRIODES SCOLAIRES

La Figure 8 présente les grands contrastes de température qui caractérisent les deux salles du bâtiment 24 pendant les périodes scolaires. La salle des professeurs a des températures relativement stables et plates, généralement entre 18 et 22°C, indiquant un niveau de confort thermique satisfaisant. En revanche, la salle Clear Desk +2 a connu de grandes variations de température, avec des fluctuations allant d'environ 6°C à plus de 25°C selon les périodes. Il y a eu plusieurs périodes où des températures inférieures à 18°C ont été enregistrées en janvier et février, et des pics de température en mars. Ces grandes variations pourraient indiquer une régulation de chauffage moins uniforme dans la salle, bien qu'il ne soit pas impossible de spéculer sur l'emplacement du capteur près de la fenêtre. Les caractéristiques de la température de cette salle montrent clairement des conditions plus variables que celles de la salle des professeurs et le comportement observé le prouve.

c. Bâtiments 28 & 30

➔ Vacances d'hiver

TABLEAU 10 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES VACANCES D'HIVER

	Local D16	Bureau Leyen	Local 3M	Local 3K	Bureau Accueil
Température maximale (°C)	22,54	18,27	19,50	21,50	23,50
Date température maximale	28/12/25	22/12/25	24/12/25	28/12/25	23/12/25
Température minimale (°C)	14,94	13,97	9	12,50	18
Date température minimale	04/01/26	04/01/26	04/01/26	03/01/26	29/12/25
Température moyenne (°C)	16,51	14,99	13,47	14,71	19,23
Nombre d'heures sous 18°C	292,75	333,75	280	319,75	0
Nombre d'heures au-dessus de 23°C	0	0	0	0	3,75
Température moyenne entre 7h et 18h	16,76	15,14	13,60	15,14	19,28
Température moyenne entre 18h et 7h	16,30	14,86	13,37	14,35	19,19
Écart de température entre le jour et la nuit	0,46	0,28	0,23	0,79	0,09
Humidité maximale (%)	48,90	49,90	55,50	55,50	50,50
Date humidité maximale	22/12/25	23/12/25	22/12/25	22/12/25	22/12/25
Humidité minimale (%)	20,90	32,20	38,50	35	34,50
Date humidité minimale	25/12/25	25/12/25	25/12/25	26/12/25	24/12/25
Humidité moyenne (%)	33,09	38,71	45,77	42,88	41,98
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	88,75	0	0	0	0
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	0	0	0	0	0
Humidité moyenne entre 7h et 18h	32,69	38,67	45,75	42,30	41,70
Humidité moyenne entre 18h et 7h	33,43	38,74	45,78	43,37	42,22
Écart d'humidité entre le jour et la nuit	-0,74	-0,06	-0,03	-1,07	-0,52

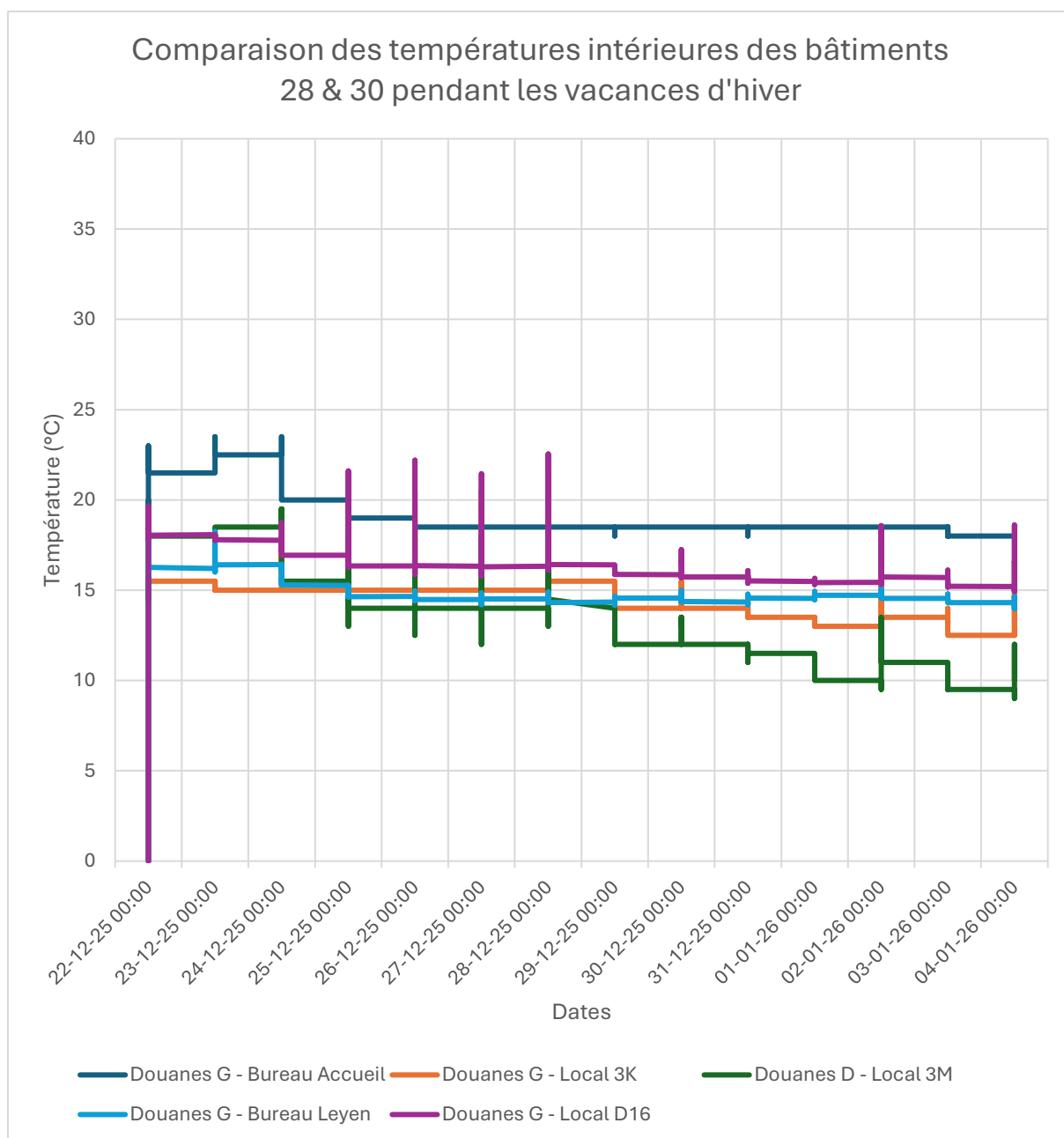


FIGURE 9 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES VACANCES D'HIVER

Comme on peut le voir à la Figure 9, les températures dans les bâtiments 28 et 30 pendant les vacances d'hiver diminuent lentement, indiquant que les niveaux de chauffage diminuent pendant cette période de vacance. Les températures les plus élevées sont maintenues par le bureau d'accueil, qui reste proche de 18°C pendant la majeure partie des vacances, tandis que le local 3M montre des températures minimales, atteignant environ 10°C à la fin. Le bureau Leyen et le local 3K suivent des comportements similaires, avec des températures allant de 13 à 16°C. Ces différences de comportement thermique des pièces reflètent des comportements thermiques variés au sein des bâtiments et pourraient résulter de leur utilisation, de leur exposition ou de leur niveau d'isolation. Avec ce taux global de température réduit, cependant, les températures sont plus élevées que dans certaines pièces des bâtiments 22 et 24, ce qui signifie qu'il y a une meilleure rétention de chaleur ou peut-être une régulation de chauffage différente.

➔ Vacances de Carnaval

TABLEAU 11 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL

	Local D16	Bureau Leyen	Local 3M	Local 3K	Bureau Accueil
Température maximale (°C)	32,87	23,88	23,50	28	34
Date température maximale	25/02/26	25/02/26	26/02/26	27/02/26	23/02/26
Température minimale (°C)	15,22	13,41	10,50	14	15,50
Date température minimale	16/02/26	16/02/26	16/02/26	16/02/26	16/02/26
Température moyenne (°C)	21,52	18,81	15,81	18,98	21,86
Nombre d'heures sous 18°C	59	154,75	229	185	15
Nombre d'heures au-dessus de 23°C	128,50	10,75	1,50	28,75	149,25
Température moyenne entre 7h et 18h	21,73	19,03	15,81	19,39	22,39
Température moyenne entre 18h et 7h	21,33	18,62	15,81	18,63	21,42
Écart de température entre le jour et la nuit	0,40	0,41	0	0,76	0,97
Humidité maximale (%)	50,70	54,20	69,50	59,50	52,50
Date humidité maximale	17/02/26	24/02/26	24/02/26	19/02/26	22/02/26
Humidité minimale (%)	28,40	37	42	30	33
Date humidité minimale	01/03/26	18/02/26	01/03/26	01/03/26	23/02/26
Humidité moyenne (%)	39,88	44,40	55,45	46,50	45,74
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	0,75	0	0	0	0
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	336	336	80,75	0	0
Humidité moyenne entre 7h et 18h	39,73	44,63	55,95	46,27	45,18
Humidité moyenne entre 18h et 7h	40,01	44,20	55,04	46,69	46,22
Écart d'humidité entre le jour et la nuit	-0,28	0,43	0,91	-0,42	-1,04

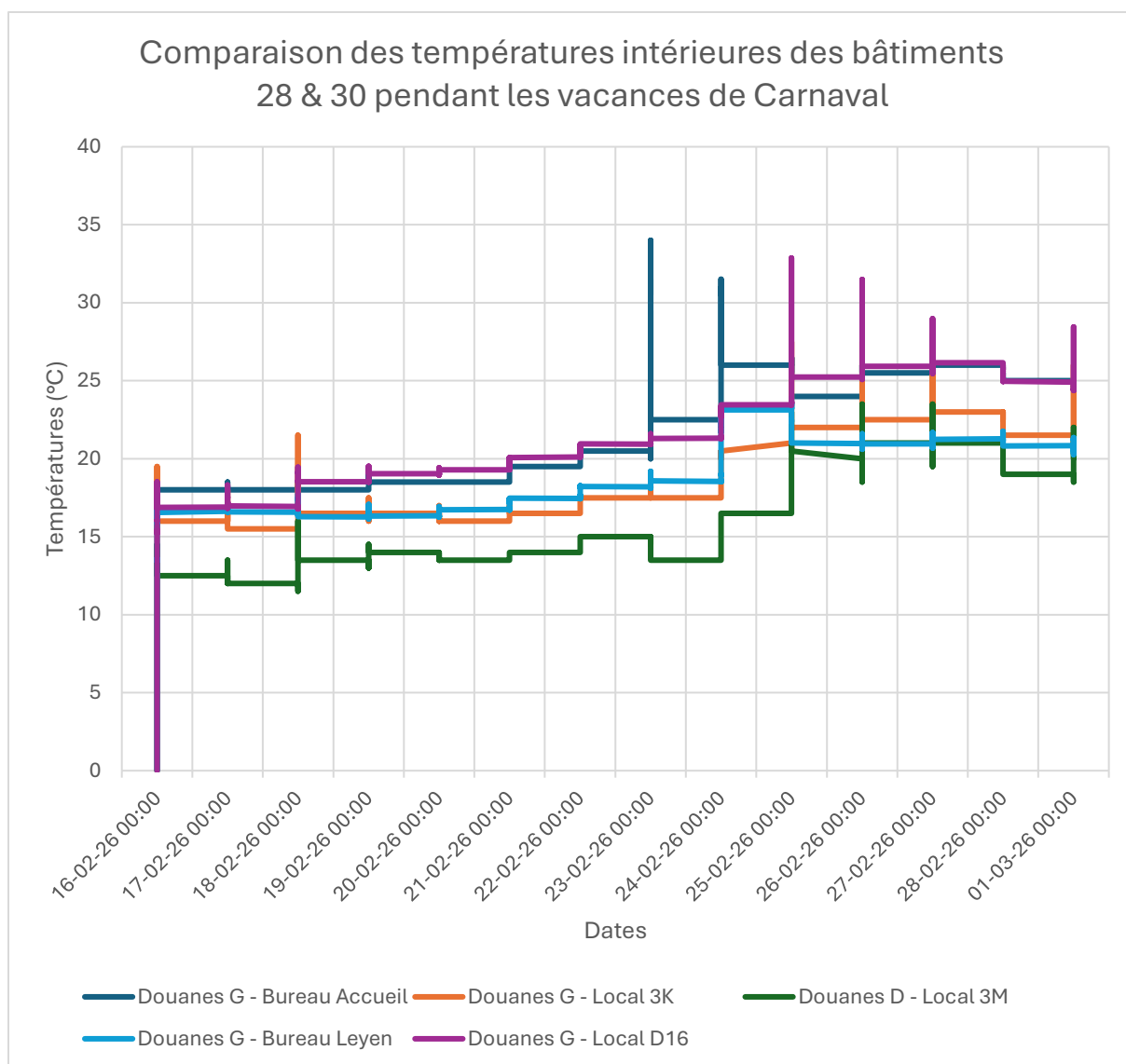


FIGURE 10 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES VACANCES DE CARNAVAL

La Figure 10 montre une augmentation progressive des températures dans l'ensemble des locaux des bâtiments 28 et 30 pendant les vacances de Carnaval. La période de 12 à 18°C est suivie d'une augmentation significative à partir du 23 février, avec plusieurs salles atteignant ou dépassant 25°C à la fin des vacances. Cette tendance est interprétée comme une indication que le chauffage a été rétabli avant la reprise des cours. Parmi les salles avec les températures les plus élevées figurent D16 et le bureau d'accueil, tandis que le local 3M reste constamment plus froide que les autres. Les écarts observés entre les salles confirment une hétérogénéité thermique dans les bâtiments, mais toutes les courbes montrent clairement une reprise du chauffage alors que les bâtiments sont encore inoccupés. Cela peut être dû à un problème de chaudière que ces deux bâtiments ont rencontré autour des vacances de Carnaval, ce qui ne peut être complètement exclu.

➔ Périodes hors vacances

TABEAU 12 - COMPARAISON DES DONNÉES RÉCOLTÉES POUR LES BÂTIMENTS 28 & 30 PENDANT LES PÉRIODES HORS VACANCES

	Local D16	Bureau Leyen	Local 3M	Local 3K	Bureau Accueil
Température maximale (°C)	34,21	23,06	28,50	30	31
Date température maximale	02/03/26	04/03/26	05/03/26	08/03/26	06/02/26
Température minimale (°C)	14,81	13,59	9	12,50	15,50
Date température minimale	05/01/26	15/02/26	05/01/26	05/01/26	06/02/26
Température moyenne (°C)	23,28	19,29	19,91	20,52	23,70
Nombre d'heures sous 18°C en journée	14,5	136,75	90,25	99,5	18
Nombre d'heures au-dessus de 23°C en journée	557,5	0,50	90,75	206,75	559,25
Nombre d'heures au-dessus de 23°C la nuit	445,5	0	96,5	82,5	573
Température moyenne entre 7h et 18h	23,94	19,72	20,28	21,43	23,93
Température moyenne entre 18h et 7h	22,72	18,93	19,59	19,74	23,50
Écart de température entre le jour et la nuit	1,22	0,80	0,69	1,69	0,43
Écart-type sur la période	2,366	1,742	2,766	2,898	2,032
Écart-type pendant la journée	2,399	1,697	2,802	3,104	2,042
Écart-type pendant la nuit	2,186	1,697	2,694	2,453	2,004
Humidité maximale (%)	61,40	59,90	68,50	70,50	61
Date humidité maximale	16/12/25	16/12/25	12/02/26	19/12/25	12/12/25
Humidité minimale (%)	20,10	33,50	31	27	30
Date humidité minimale	15/03/26	11/01/26	24/03/26	21/03/26	06/02/26
Humidité moyenne (%)	32,79	40,59	44,54	43,32	39,95
Nombre d'heures avec une humidité sous 30%	606,25	0	0	16,50	0
Nombre d'heures avec une humidité au-dessus de 60%	0,25	0	15,50	24,50	0,25
Humidité moyenne entre 7h et 18h	32,93	40,64	45,93	44,04	39,61
Humidité moyenne entre 18h et 7h	32,67	40,55	43,36	42,71	40,24
Écart d'humidité entre le jour et la nuit	0,27	0,09	2,57	1,33	-0,63

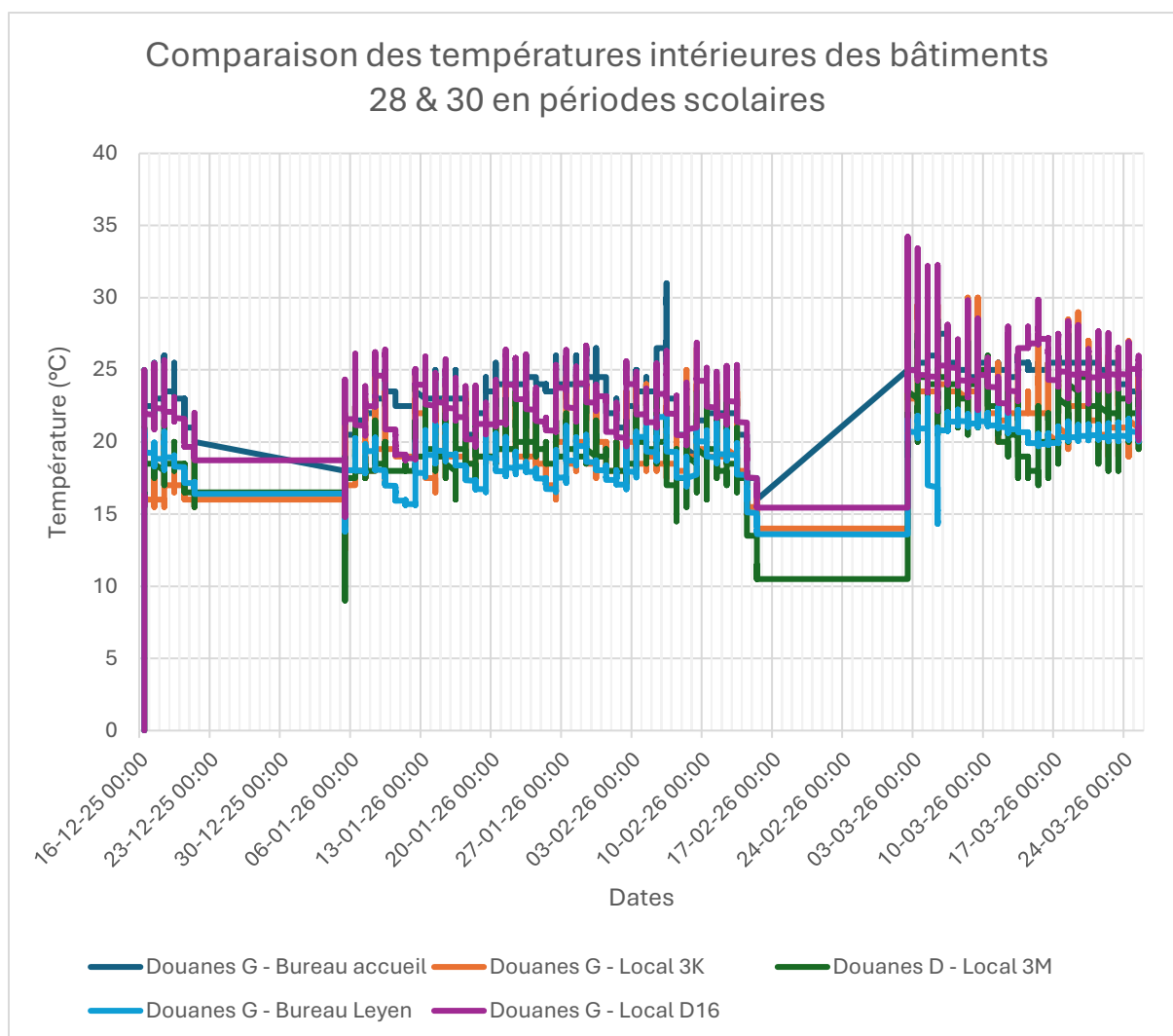


FIGURE 11 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DES BÂTIMENTS 28 & 30 EN PÉRIODES SCOLAIRES

La Figure 11 montre que les températures dans les différentes pièces des bâtiments 28 et 30 restent généralement entre 18 et 25°C pendant les périodes scolaires, indiquant des conditions de confort généralement satisfaisantes. Le local D16 présente les températures les plus élevées et les variations les plus significatives, avec plusieurs pics dépassant 30°C. À l'inverse, le local 3M est constamment plus froide que les autres pièces et connaît plusieurs épisodes en dessous de 18°C. Les bureaux d'accueil et de Leyen, ainsi que la salle 3K, affichent des comportements relativement similaires, avec des températures plus stables proches des valeurs recommandées pour les pièces occupées. Les baisses observées pendant les périodes de vacances sont rapidement compensées lorsque les activités reprennent.

d. Comparaison avec les températures extérieures

TABLEAU 13 - TEMPÉRATURES SUR LIÈGE PENDANT LA PÉRIODE DES VACANCES D'HIVER (MÉTÉOSTAT, S.D.)

Date	Température moyenne (°C)	Température minimale (°C)	Température maximales (°C)
22/12/2025	4,9	1	8
23/12/2025	3	0	4
24/12/2025	0	-3	4
25/12/2025	-3,3	-5	0
26/12/2025	-1,5	-5	4
27/12/2025	-0,3	-3	3
28/12/2025	2	-1	5
29/12/2025	-1,2	-5	2
30/12/2025	0,4	-2	3
31/12/2025	0,1	-4	2
01/01/2026	2,3	1	3
02/01/2026	1,2	-1	3
03/01/2026	-0,5	-2	1
04/01/2026	-1,6	-3	0

TABLEAU 14 - TEMPÉRATURES SUR LIÈGE PENDANT LA PÉRIODE DES VACANCES DE CARNAVAL (MÉTÉOSTAT, S.D.)

Date	Température moyenne (°C)	Température minimale (°C)	Température maximales (°C)
16/02/2026	4,1	1	7
17/02/2026	3,1	2	5
18/02/2026	2,6	0	6
19/02/2026	4,5	3	7
20/02/2026	5,5	3	8
21/02/2026	8,9	7	11
22/02/2026	11,2	10	12
23/02/2026	9,3	8	11
24/02/2026	10,7	8	12
25/02/2026	13,3	9	19
26/02/2026	13,6	11	18
27/02/2026	13,5	11	17
28/02/2026	9,2	5	12
01/03/2026	8	4	12

Les températures extérieures étaient même plus basses que celles à l'intérieur des bâtiments pendant les vacances d'hiver (Tableau 13) et de Carnaval (Tableau 14). Ainsi, toutes les fluctuations de température intérieure ne proviennent pas de l'apport thermique extérieur. Et certaines températures intérieures baissent légèrement pendant les vacances, et cette baisse est limitée compte tenu de la durée pendant laquelle les unités sont inoccupées. Même en tenant compte de l'inertie thermique et de l'isolation des bâtiments, certaines pièces maintiennent des températures élevées jusqu'à la fin des vacances et augmentent même légèrement lorsque la température extérieure ne le permet pas entièrement. Cela pourrait indiquer que le chauffage a fonctionné à au moins un certain niveau pendant toute la fermeture de l'établissement.

L'analyse des données montre que, pendant les périodes inoccupées, il peut également y avoir des températures très élevées possibles dans certaines zones. Certaines pièces sont également assez froides pendant les vacances scolaires. Il est essentiel de réduire la température pour s'assurer que la consommation d'énergie est minimisée lorsqu'elles ne sont pas occupées, mais de maintenir une situation qui devrait garantir que le bâtiment est préservé pour une utilisation future. Des températures trop basses pendant de longues périodes peuvent causer des problèmes d'humidité plus élevés lorsqu'elles sont associées à une humidité relative élevée. Cela peut également faire baisser la température et l'humidité à des niveaux très bas sur certaines surfaces froides, ce qui risquerait de provoquer de la condensation dans des environnements frais et l'apparition de moisissures ou de micro-organismes. Au fil du temps, cela peut entraîner une détérioration des matériaux de construction et de la qualité de l'environnement intérieur. Ainsi, une régulation efficace ne signifierait pas simplement réduire les températures pendant toute la saison des vacances, mais aussi équilibrer la conservation de l'énergie, la préservation structurelle et les conditions intérieures globales.

e. Informations sur les données récoltées

Les mesures sont automatiquement enregistrées toutes les quinze minutes. Par conséquent, chaque ligne de données correspond à un intervalle d'un quart d'heure. Ainsi, lors des calculs, certaines valeurs exprimées en heures peuvent apparaître sous forme décimale (0,25 ; 0,50 ; 0,75). Ces valeurs correspondent respectivement à quinze minutes, trente minutes et quarante-cinq minutes.

III. Analyse des températures intérieures

a. Bâtiments 22

L'analyse des températures mesurées dans les bâtiments 22 met en évidence des comportements thermiques différents selon les locaux étudiés. Les trois capteurs installés dans la salle des professeurs arrière, la classe du premier étage arrière ainsi que la classe du premier étage avant droit montrent une influence importante des périodes d'occupation sur les températures intérieures.

Pendant les vacances d'hiver, les températures moyennes restent relativement basses dans l'ensemble des locaux. La température moyenne de la salle des professeurs à l'arrière est de 13,40°C, la salle de classe à l'arrière du premier étage atteint 12,22°C. La température la plus basse de la salle de classe avant droite du premier étage est de 9,15°C. Cela indique que le chauffage diminue considérablement pendant cette période. La très faible différence entre la température de jour et la température de nuit indique que le fonctionnement des installations pendant les vacances est relativement stable. De plus, les trois salles présentent un nombre considérable d'heures en dessous de 18°C, confirmant une réduction importante du chauffage pendant cette période.

Les vacances de Carnaval présentent un comportement différent. Les températures moyennes dans les locaux augmentent à 18,13°C, 16,81°C et 14,78°C, respectivement. Certaines températures dépassent également occasionnellement 23°C, surtout dans la salle des professeurs à l'arrière et la salle de classe avant droite du premier étage. Ce réchauffement même pendant une période relativement inoccupée peut suggérer une stratégie de régulation relâchée ou des augmentations de chauffage plus élevées. Cela pourrait également être favorisé par un temps plus doux dans la seconde moitié des vacances de carnaval, pendant laquelle les températures extérieures moyennes ont progressivement dépassé 10°C.

Les périodes scolaires hors vacances présentent logiquement les températures les plus élevées. Dans les trois salles étudiées, les températures moyennes dépassent 20°C. La salle des professeurs à l'arrière a une moyenne de 21,92°C et dépasse plus de 378 heures au-dessus de 23°C, ce qui suggère que de nombreuses salles ont pu être chauffées à des températures comparativement plus élevées pendant les périodes d'occupation. Mais les variations jour et nuit semblent relativement faibles et peuvent simplement représenter une réduction mineure du chauffage nocturne.

Les différences entre les salles indiquent également une application non uniforme des installations. Par exemple, la salle de classe avant droite au premier étage du bâtiment est nettement plus froide que les autres salles, bien que, pendant les vacances d'hiver, elle fasse partie du même bâtiment. Ces différences peuvent être liées à l'exposition des salles, au fait de l'occupation des salles, à l'activité des émetteurs de chaleur et à la régulation locale.

Dans l'ensemble, le chauffage du bâtiment 22 est quelque peu compatible avec le temps d'occupation, mais il existe encore des possibilités d'amélioration. La faible réduction nocturne et les températures assez élevées observées pendant certaines périodes de vacances indiquent qu'il y a une possibilité d'optimisation de la régulation.

b. Bâtiment 24

Les mesures dans le bâtiment 24 concernent la salle des enseignants ainsi que la salle "Clear Desk +2". Les résultats indiquent des différences marquées entre ces deux salles, surtout pendant les périodes scolaires.

La température moyenne reste assez basse pendant les vacances d'hiver, dans la salle des professeurs autour de 12,97°C et dans la salle Clear Desk +2 environ 9,51°C. Pendant ces périodes, les deux salles sont presque en permanence en dessous de 18°C, donc pendant les vacances, il n'y a presque pas de chauffage. La quasi-absence de différence entre les températures diurnes et nocturnes suggère également un fonctionnement relativement stable de ces deux installations.

Les températures augmentent pendant les vacances de Carnaval. La salle des professeurs atteint en moyenne 16,62°C et la salle Clear Desk +2 atteint en moyenne 15,18°C. Il est également noté que la salle Clear Desk +2 se caractérise par des températures élevées, avec des températures maximales atteignant 26,05°C. Cela montre que certains des événements de chauffage les plus significatifs peuvent encore se produire avec une occupation relativement faible dans le bâtiment.

Les périodes scolaires ont un comportement plus différent. La température de la salle des professeurs est en moyenne de 20,31°C, ce qui est conforme à l'occupation typique de la salle. En revanche, la salle Clear Desk +2 a une température moyenne très basse, 17,32°C, et un grand nombre d'heures en dessous de 18°C. Une telle différence marquée entre deux salles au sein du même bâtiment révèle une configuration thermique très variable entre les deux salles du même bâtiment.

Cependant, comme déjà expliqué plus haut, le capteur de la salle Clear Desk +2 est situé très près d'une fenêtre. Cet emplacement peut influencer les températures mesurées, en particulier en cas de basses températures extérieures ou d'ouverture des fenêtres. Ainsi, certaines des divergences observées par rapport à la salle des professeurs pourraient en fait être le résultat de la position du capteur et non exclusivement du mode d'utilisation du système de chauffage ou des caractéristiques thermiques de la salle. Ainsi, les résultats de cette salle doivent être pris avec une bonne dose de prudence.

En général, les différences entre les températures diurnes et nocturnes des deux salles ne diffèrent pas beaucoup. Les résultats ont également indiqué que certaines salles affichent des températures relativement élevées malgré une diminution de l'occupation, il y a donc un potentiel d'amélioration de la régulation.

c. Bâtiments 28 et 30

Les bâtiments 28 et 30 présentent une variabilité considérable du comportement thermique en fonction des pièces étudiées. Les mesures couvrent un certain nombre d'espaces avec différents types d'utilisation, y compris des bureaux administratifs, des salles de classe et un bureau d'accueil.

Pour la plupart des pièces, les températures moyennes restent très basses pendant les vacances d'hiver. Les températures varient de 13,47°C dans la salle 3M à 19,23°C dans le bureau d'accueil. Ce dernier se distingue par des températures nettement plus élevées que les autres espaces, sans heures en dessous de 18°C pendant cette période. Cette situation peut indiquer un maintien plus important du chauffage dans cette pièce spécifique.

Les vacances de Carnaval ont entraîné une forte hausse des températures dans plusieurs pièces. La salle D16 atteint une température moyenne de 21,52°C avec des pics au-dessus de 32°C. À l'accueil, la température moyenne reste au-dessus de 21,86°C et de nombreuses heures au-dessus de 23°C. Les résultats suggèrent que certaines pièces sont encore très bien chauffées, malgré une occupation réduite du bâtiment.

Les périodes scolaires hors vacances présentent logiquement les températures les plus élevées. La salle D16 et le bureau d'accueil sont tous deux bien au-dessus de la température moyenne de 23°C, et affichent des heures excessives au-dessus de 23°C. En revanche, le bureau Leyen reste beaucoup plus frais avec une température moyenne de 19,29°C et plus de 400 heures en dessous de 18°C à des fins scolaires.

La différence de chaleur entre le jour et la nuit est très faible dans toutes ces pièces observées. Cela indique que la diminution du chauffage nocturne est modeste, même lorsqu'elles ne sont pas occupées. Les variations marquées entre les pièces suggèrent également que les installations ne sont pas appliquées de manière similaire même lorsqu'elles ont la même chaudière dans certains bâtiments.

Pour les bâtiments 28 et 30, l'analyse aboutit à peu d'améliorations potentielles. Certaines pièces semblent être maintenues à haute température pendant les heures de vacances, tandis que d'autres affichent des températures comparativement froides lors des événements scolaires. De telles observations démontrent la nécessité d'une optimisation plus fine des horaires de régulation et de fonctionnement des installations.

IV. Analyse de l'humidité relative

a. Bâtiments 22

L'analyse comparative de l'humidité relative dans les bâtiments 22 indique que les valeurs sont généralement conformes aux conditions de confort requises dans les bâtiments scolaires. Les moyennes rapportées se situent généralement entre 38% et 57% en fonction du moment et du cas.

Pendant les vacances d'hiver, l'humidité moyenne est relativement douce entre les trois sites avec cette analyse. La salle de classe au premier étage à l'avant droit, cependant, possède des valeurs légèrement plus élevées, avec une moyenne de 52,82% et plusieurs périodes au-dessus de 60%. Cela est dû au fait qu'il s'agit d'une pièce froide, ce qui augmenterait l'humidité relative.

L'humidité de tous les bâtiments est également plus élevée pendant les vacances de Carnaval. La salle des professeurs à l'arrière atteint notamment plus de 323 heures lorsque l'humidité relative est supérieure à 60%. Cette tendance est en accord avec les températures plus élevées observées pendant cette période, et avec les conditions météorologiques extérieures plus humides observées à la fin de l'hiver.

Il y a une humidité relative significativement plus basse dans la plupart des locaux pendant les heures de classe. En moyenne, cependant, elles étaient différentes selon les espaces étudiés. Par exemple, dans la salle des professeurs à l'arrière, l'humidité moyenne est de 37,96%, dans les deux autres salles de classe, elle est presque de 45%. Ces différences indiquent que le comportement hygrothermique est significativement influencé par l'utilisation de la propriété, sa ventilation et son chauffage.

Les périodes de jour et de nuit entre elles font encore une très petite différence à travers les trois locaux, ce qui indique un comportement relativement stable de l'humidité relative au cours de la journée.

b. Bâtiment 24

L'humidité relative du bâtiment 24 dans les deux pièces étudiées est relativement stable. Les valeurs moyennes se situent dans une fourchette de 40% à 55% selon les types de périodes étudiées.

Dans l'ensemble, la salle des professeurs a une humidité moyenne de 41,09% pendant les vacances d'hiver et la salle Clear Desk +2 est à 52,90%. Ainsi, cette deuxième salle semble plus humide, ce qui est probablement lié à une température plus basse pendant la même période.

Augmentation générale de l'humidité relative dans les deux pièces pendant les vacances de Carnaval. Des périodes plus fréquentes avec une humidité supérieure à 60%, comme dans la salle Clear Desk +2. Cette tendance reflète les observations météorologiques de cette période de l'année.

L'humidité relative diminue peu pendant les heures de classe. Mais dans certains cas, les valeurs restent relativement élevées. Les différences entre le jour et la nuit sont minimales, ce qui suggère donc un développement relativement stable des conditions intérieures.

Dans l'ensemble, cependant, les données obtenues pour le bâtiment 24 ne révèlent pas de problèmes majeurs liés à l'humidité. Certaines différences, cependant, indiquent que les températures intérieures et le processus de chauffage ont un impact significatif sur les conditions hygrothermiques des pièces.

c. Bâtiments 28 et 30

Les bâtiments 28 et 30 affichent un comportement variable en matière d'humidité relative. Bien que les moyennes se situent largement dans les zones raisonnables de confort des occupants.

L'humidité moyenne varie de 33% dans la salle D16 à environ 46% dans la salle 3M pendant la période des vacances d'hiver. Cependant, ces valeurs sont assez stables et seuls quelques périodes dépassent 60% d'humidité relative.

Les vacances de Carnaval montrent une approche différente de ces comportements. Quelques salles présentent des heures très élevées au-dessus de 60%, comme la salle D16 et le bureau Leyen. Cela pourrait être dû à des températures élevées, une faible occupation des salles et un renouvellement d'air limité pendant la période.

En revanche, pendant les périodes scolaires, il y a une baisse typique de l'humidité relative dans un certain nombre de salles. Notamment, la salle D16 démontre une humidité moyenne relativement basse, 32,79%, et plusieurs heures en dessous de 30% dans des conditions de faible humidité. Une telle condition d'air peut refléter un environnement interne relativement sec probablement associé à des températures élevées et un chauffage important dans la salle.

Les différences d'humidité entre le jour et la nuit restent globalement inchangées dans tous les bâtiments étudiés. Mais cette variation a révélé que les conditions intérieures sont fortement influencées par l'utilisation des salles, le niveau de chauffage et l'environnement extérieur.

En général, l'analyse de l'humidité relative complète les observations de température intérieure. Bien qu'il n'y ait pas de problème critique à signaler, certaines conditions sont présentes dans certaines salles pour être améliorées.

Bien que l'humidité relative soit une mesure importante du confort intérieur et de la qualité de l'air, son applicabilité aux solutions optimales proposées reste limitée. Étant donné qu'aucun système de ventilation mécanique n'a été identifié sur le site étudié lors de cette étude, ses possibilités d'action directe sur ce paramètre sont limitées. Les schémas d'optimisation proposés dans ce mémoire sont principalement axés sur la régulation du chauffage, car elle a un effet indirect sur l'humidité relative. Néanmoins, les résultats obtenus renforcent l'importance de surveiller ce facteur pour maintenir des environnements confortables pour les occupants. Cet aspect pourrait être davantage pris en compte dans le cadre d'une régulation plus avancée intégrant des capteurs ambiants et des stratégies de contrôle combinant température et qualité de l'air intérieur.

V. Synthèse des observations principales

L'analyse des températures et de l'humidité relative met en évidence des différences marquées entre les bâtiments et les locaux étudiés. Cela indique que le fonctionnement du système de chauffage n'est pas standardisé sur le site et que certaines stratégies de régulation doivent encore être optimisées.

Les températures les plus élevées sont logiquement évidentes pendant les périodes scolaires. Mais de nombreuses pièces peuvent encore être extrêmement chaudes pendant les vacances, atteignant parfois des températures supérieures à 20°C malgré une occupation très limitée. Ces résultats montrent qu'il y a une marge considérable pour affiner les installations et les règlements de programmation.

De plus, dans de nombreux bâtiments, la réduction du chauffage nocturne semble être limitée, les petites différences intertemporelles entre les périodes diurnes et nocturnes suggèrent une faible réduction de la chaleur pendant la nuit. Dans certaines pièces, il y a un nombre considérable d'heures pendant lesquelles la température dépasse 23°C, bien que ce ne soit pas un seuil normatif pour la surchauffe, il a été considéré dans cette étude comme une indication de confort thermique. Ces résultats soulèvent la possibilité d'ajuster la régulation pour limiter les températures anormalement élevées dans certaines pièces.

L'analyse indique également d'énormes différences entre les bâtiments et entre les pièces au sein d'un même bâtiment. Quelques espaces restent un peu froids pendant longtemps, tandis que d'autres sont chauds pendant presque toute leur durée de vie. Toutes ces différences mettent en évidence la nécessité d'une stratégie basée sur les données, pour mieux comprendre quand les installations techniques fonctionnent réellement.

Enfin, les résultats fournissent une base significative pour les efforts futurs. Ils fournissent des connaissances sur la façon dont la véritable performance thermique des bâtiments agit et contribuent directement au développement de modèles de simulation énergétique construits dans les chapitres suivants.

Simulations énergétiques

I. Construction du modèle énergétique

Pour évaluer l'influence de diverses solutions réglementaires sur la consommation d'énergie du site étudié, une simulation énergétique dynamique a été réalisée avec le logiciel *TRNSYS*¹¹. Cette étape est un élément central du travail car elle permet de reproduire le comportement thermique des bâtiments sous différentes conditions d'exploitation et d'estimer le bénéfice de ces mesures proposées.

Le modèle a été construit avec l'aide de l'équipe *BEMS*. Le modèle géométrique tridimensionnel du site avait déjà été construit dans *SketchUp* avec l'aide du plugin *TRNSYS3D*¹², et les différentes zones thermiques et caractéristiques des murs avaient été encodées dans *TRNBuild*. Cette première phase a permis de définir la géométrie générale des bâtiments, les surfaces d'échange et les propriétés thermiques des éléments constituant l'enveloppe.

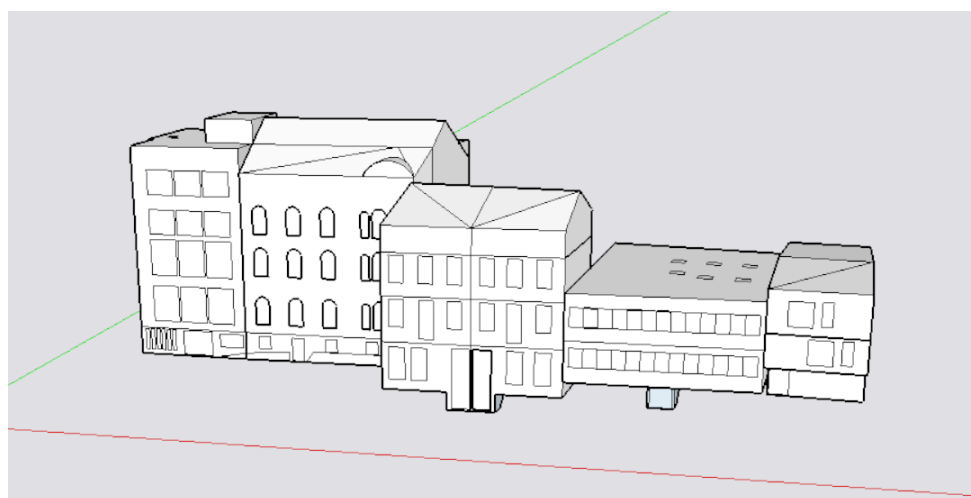


FIGURE 12 - MODÈLE TRIDIMENSIONNEL DU SITE RÉALISÉ SOUS SKETCHUP

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire consistait à créer ce modèle pour simuler aussi fidèlement que possible la nature opérationnelle du site. Dans le cadre de cette étape, il a fallu l'analyser au sein des systèmes techniques existants, des profils d'occupation, de l'encodage des gains internes et de la configuration de différents scénarios de fonctionnement du chauffage.

Une attention particulière a été portée à l'utilisation des données collectées au cours de la campagne de mesure. Contrairement à une approche purement théorique, les observations sur le terrain ont permis d'adapter certains paramètres du modèle pour les rendre plus représentatifs du comportement réel des bâtiments. Plus précisément, les périodes scolaires, les vacances et les week-ends ont été utilisés pour définir les hypothèses opérationnelles du système de chauffage en fonction de la température mesurée.

Cette méthode est particulièrement importante pour les bâtiments existants. En effet, le comportement des occupants, le fonctionnement des installations et l'utilisation réelle des réglages peuvent s'écarter considérablement des hypothèses utilisées dans un modèle standard. Par conséquent, la première analyse des données préliminaires a été une étape importante qui a conduit à un modèle satisfaisant pour le site analysé lui-même.

¹¹ « TRNSYS (prononcé « tran-sis ») est un environnement logiciel graphiquement extrêmement flexible utilisé pour simuler le comportement des systèmes transitoires. Alors que la grande majorité des simulations visent à évaluer la performance des systèmes thermiques et électriques, TRNSYS peut tout aussi bien être utilisé pour modéliser d'autres systèmes dynamiques tels que le flux de trafic ou les processus biologiques. » (TRNSYS, 2019)

¹² « TRNSYS inclut TRNSYS3D – un plugin pour SketchUp™ qui permet à l'utilisateur de dessiner des bâtiments multizones et d'importer la géométrie (y compris l'ombrage automatique des bâtiments et les facteurs de vue internes pour l'échange de rayonnements) directement depuis la puissante interface SketchUp dans l'environnement du bâtiment TRNSYS (TRNBuild). » (TRNSYS, 2019)

La construction du modèle énergétique s'est poursuivie avec *TRNBuild*, où les différents systèmes ont été intégrés et connectés aux zones thermiques. Cette étape a permis de représenter le comportement de la chaudière, les contributions intérieures, les profils d'occupation et les différents scénarios de régulations étudiés.

Le site étudié est divisé en plusieurs zones thermiques distinctes qui sont encodées dans *TRNBuild*.



FIGURE 13 - ZONES THERMIQUES ENCODÉES DANS TRNBUILD

Les zones n'ont pas exactement le même nom que les bâtiments eux-mêmes. La zone « ADMIN » correspond aux bâtiments 24 et 26, la zone « 22 » correspond au bâtiment 22 Ancien, la zone « 889942 » correspond au bâtiment 22 Nouveau, la zone « Douane_28 » correspond au bâtiment 28 et pour terminer, la zone « Douane_30 » fait référence au bâtiment 30.

II. Encodage des systèmes de chauffage

Une fois les différentes zones thermiques déterminées, l'étape suivante consistait à intégrer les systèmes de chauffage dans *TRNBuild*. L'objectif de cette modélisation était de tenter de reproduire fidèlement le comportement thermique observé sur le site, afin de fournir une base fiable pour la comparaison avec les scénarios d'optimisation qui ont ensuite été développés.

Quatre chaudières alimentées au gaz naturel ont été identifiées pour les installations présentes sur le campus de *Sainte-Véronique*. Le bâtiment Sualem 22 est équipé d'une chaudière *Remeha GAS 210 ECO PRO 80*. Les bâtiments Sualem 24 et Sualem 26 disposent chacun d'une chaudière indépendante *Remeha Quinta 45*. Enfin, les bâtiments Sualem 28 et Sualem 30 sont alimentés par une chaudière commune de type *Remeha GAS 210 ECO PRO 120*.

TABLEAU 15 - INFORMATIONS SUR LES DIFFÉRENTES CHAUDIÈRES

Bâtiment alimenté	Chaudière encodée	Énergie	Puissance relevée	Remarque
Bâtiments 22	Remeha GAS 210 ECO PRO 80	Gaz naturel	80 kW	Chaudière commune au 22 Ancien et au 22 Nouveau
Bâtiment 24	Remeha Quinta 45	Gaz naturel	45 kW	Chaudière propre au bâtiment
Bâtiment 26	Remeha Quinta 45	Gaz naturel	45 kW	Chaudière propre au bâtiment
Bâtiments 28 et 30	Remeha GAS 210 ECO PRO 120	Gaz naturel	120 kW	Chaudière commune aux deux bâtiments

Dans le modèle *TRNBuild*, les bâtiments Sualem 24 et Sualem 26 ont été regroupés dans la même zone administrative. Afin d'assurer une vue d'ensemble des installations mises en œuvre, les deux chaudières *Remeha Quinta 45* ont été modélisées en utilisant un seul système de chauffage dont la puissance est égale à la puissance combinée de tous les équipements sur site. Cette simplification permet de réduire la complexité du modèle, tout en conservant la puissance de chauffage pour le bâtiment examiné.

Les systèmes sont définis avec le module "*Heating Type Manager*" de *TRNBuild*. De cette manière, il est possible d'évaluer la contribution thermique du système de chauffage dans chaque zone sans avoir à modéliser tout le réseau hydraulique. Chaque installation implique une puissance maximale et une température de consigne qui est gérée par des profils horaires.

Les puissances maximales ont été déterminées selon les caractéristiques techniques des chaudières identifiées sur le site. Le bâtiment Sualem 22 a une puissance de 288 000 kJ/h. La zone administrative regroupant les bâtiments Sualem 24 et Sualem 26 a une puissance maximale de 324 000 kJ/h. Enfin, les bâtiments Sualem 28 et Sualem 30 ont également été équipés d'un système de chauffage avec une puissance maximale de 432 000 kJ/h. Les puissances en kJ/h sont simplement les puissances en kW multipliées par 3600.

Heating Type Manager

"Heating Type" Manager

heating type: Chaudiere_Sualem22

Room Temperature Control

set temperature: 5: 10*ChauffagePermanent+10 °C

Sensible heating power

☐ unlimited

☒ limited 288000 kJ / h

☒ absolute power ☐ power related to reference floor area

radiative fraction: 0.7

Electric Power Fraction

fraction of actual sensible power: 0

Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance.

Humidification

☒ off ☐ on

FIGURE 14 - PARAMÉTRAGE DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE DES BÂTIMENTS 22

Heating Type Manager

"Heating Type" Manager

heating type:

Room Temperature Control

set temperature: °C

Sensible heating power

☐ unlimited
☒ limited kJ / h

☒ absolute power ☐ power related to reference floor area

radiative fraction:

Electric Power Fraction

fraction of actual sensible power:

Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance.

Humidification

☒ off
☐ on

FIGURE 15 - PARAMÉTRAGE DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE ASSOCIÉ AUX BÂTIMENTS 24 ET 26

Heating Type Manager

"Heating Type" Manager

heating type:

Room Temperature Control

set temperature: °C

Sensible heating power

☐ unlimited
☒ limited kJ / h

☒ absolute power ☐ power related to reference floor area

radiative fraction:

Electric Power Fraction

fraction of actual sensible power:

Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance.

Humidification

☒ off
☐ on

FIGURE 16 - PARAMÉTRAGE DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE DES BÂTIMENTS 28 ET 30

Les paramétrages représentés Figure 14, Figure 15 et Figure 16 correspondent aux encodages d'une des situations initiales expliquée plus tard.

Une fraction radiative de 70% a été sélectionnée pour tous les systèmes de chauffage. Cette valeur représente la portion de chaleur qui est transmise aux surfaces des locaux et est ensuite redistribuée à l'air intérieur. Les 30% restants correspondent à la chaleur qui est directement transférée à l'air ambiant par convection. Cette hypothèse est largement utilisée pour modéliser le comportement thermique des émetteurs (radiateurs) dans les bâtiments scolaires.

L'un des principaux objectifs de ce travail était de reproduire aussi fidèlement que possible le fonctionnement réel sur le site. En observant les données de surveillance, un comportement particulier des installations a été révélé. Les températures observées dans plusieurs salles indiquent que le chauffage reste allumé pendant les nuits, les week-ends et certaines périodes de vacances scolaires. Cela a conduit à la construction d'un premier scénario de référence relatif au fonctionnement permanent du chauffage afin de simuler le « pire » scénario qui pourrait se produire, tout en montrant aussi que la programmation théorique fournie par l'école n'est pas exactement mise en place à l'heure actuelle.

Dans ce premier scénario, appelé « chauffage permanent », considère que les chaudières sont opérationnelles de manière constante pendant la période de chauffage. Le chauffage fonctionne donc vingt-quatre heures sur vingt-quatre, sept jours sur sept, sans distinction entre les périodes d'occupation et de non-occupation, à l'exception des vacances scolaires et de l'été, du 1er juin au 26 septembre.

Afin de montrer que le chauffage n'est pas totalement indisponible le week-end, l'exemple fourni est celui du week-end des 20 et 21 décembre 2025 (Figure 17), qui peut être étudié à l'aide des capteurs dans la salle "22VD13 – Classe 1er devant à droite". À 23h45 le vendredi 19, la température intérieure de la salle est de 17°C. Une température de 15,5°C est enregistrée le lundi 22 à 7h, mais le week-end, elle varie assez bien, atteignant 21,5°C à plusieurs reprises.

21-12-25 03:00	21
21-12-25 03:15	21
21-12-25 03:30	21
21-12-25 03:45	21.5
21-12-25 04:00	21.5
21-12-25 04:15	21.5
21-12-25 04:30	21
21-12-25 04:45	21
21-12-25 05:00	21
21-12-25 05:15	21
21-12-25 05:30	21
21-12-25 05:45	21
21-12-25 06:00	21
21-12-25 06:15	21.5
21-12-25 06:30	21.5
21-12-25 06:45	21.5
21-12-25 07:00	21.5
21-12-25 07:15	21.5
21-12-25 07:30	21.5
21-12-25 07:45	21.5
21-12-25 08:00	21.5
21-12-25 08:15	21.5
21-12-25 08:30	21.5
21-12-25 08:45	21.5
21-12-25 09:00	21.5
21-12-25 09:15	21.5
21-12-25 09:30	21.5
21-12-25 09:45	21.5
21-12-25 10:00	21.5

FIGURE 17 - EXEMPLE TIRÉ DES DONNÉES RÉCOLTÉES ILLUSTRANT LE FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES LES WEEK-ENDS

Il en va de même pour d'autres bâtiments, comme ici dans le bâtiment 24, dans la salle "Admin right – Salle des professeurs" où le système de chauffage ne s'arrête pas complètement. Voici un exemple du week-end des 10 et 11 janvier 2026 (Figure 18). Les températures intérieures ne continuent pas à augmenter pendant le week-end, mais elles se stabilisent assez bien. Elles ont tendance à augmenter légèrement avant de diminuer à nouveau légèrement, ce qui pourrait suggérer que le système de chauffage essaie de maintenir une certaine température intérieure.

10-01-26 17:00	17:00:00	Jour	19.19
10-01-26 17:15	17:15:00	Jour	19.13
10-01-26 17:30	17:30:00	Jour	19.09
10-01-26 17:45	17:45:00	Jour	19.03
10-01-26 18:00	18:00:00	Jour	19.03
10-01-26 18:15	18:15:00	Nuit	19.07
10-01-26 18:30	18:30:00	Nuit	19.13
10-01-26 18:45	18:45:00	Nuit	19.13
10-01-26 19:00	19:00:00	Nuit	19.09
10-01-26 19:15	19:15:00	Nuit	19.06
10-01-26 19:30	19:30:00	Nuit	19.02
10-01-26 19:45	19:45:00	Nuit	18.98
10-01-26 20:00	20:00:00	Nuit	18.93
10-01-26 20:15	20:15:00	Nuit	18.92
10-01-26 20:30	20:30:00	Nuit	18.95
10-01-26 20:45	20:45:00	Nuit	19.09
10-01-26 21:00	21:00:00	Nuit	19.07
10-01-26 21:15	21:15:00	Nuit	19.05
10-01-26 21:30	21:30:00	Nuit	19.02
10-01-26 21:45	21:45:00	Nuit	18.96
10-01-26 22:00	22:00:00	Nuit	18.92
10-01-26 22:15	22:15:00	Nuit	18.88
10-01-26 22:30	22:30:00	Nuit	18.8
10-01-26 22:45	22:45:00	Nuit	18.83
10-01-26 23:00	23:00:00	Nuit	18.98

FIGURE 18 - DEUXIÈME EXEMPLE TIRÉ DES DONNÉES RÉCOLTÉES ILLUSTRANT LE FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES LES WEEK-ENDS

Bien évidemment, ces dysfonctionnements de la programmation du chauffage ne sont pas forcément présents tout au long de l'année, c'est bien pour cela que ce travail montre les deux façons et les compare.

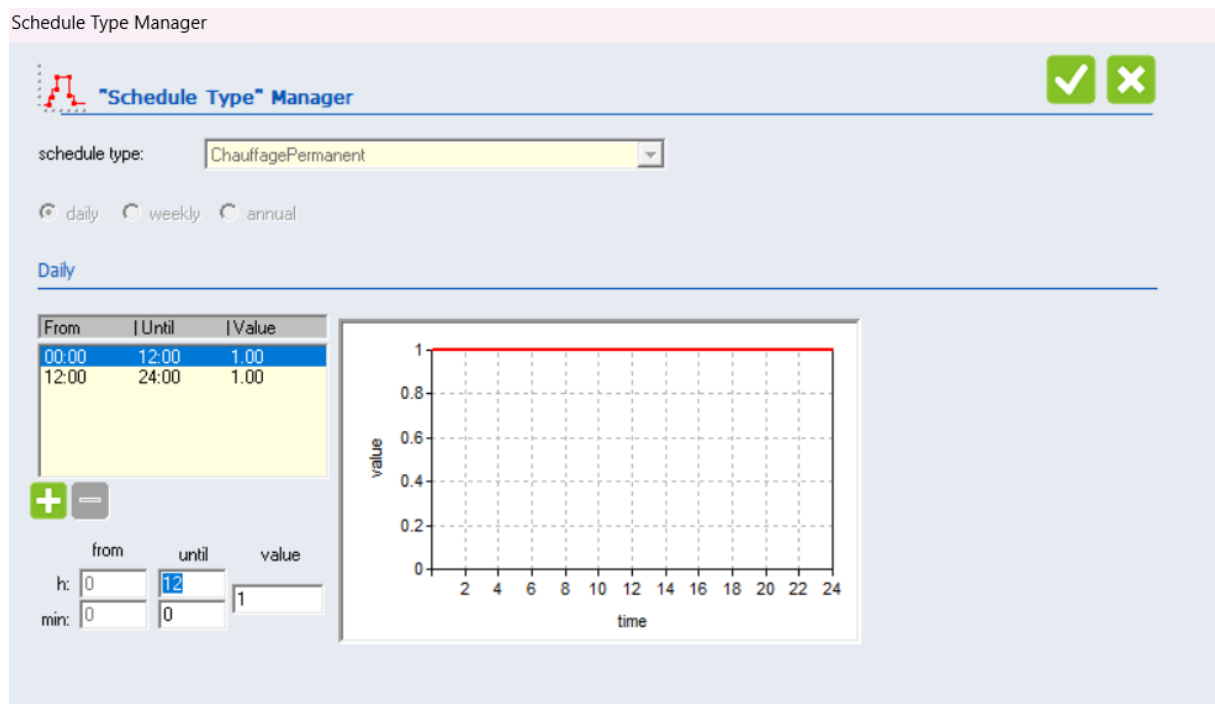


FIGURE 19 - PROGRAMMATION JOURNALIÈRE DU SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PERMANENT

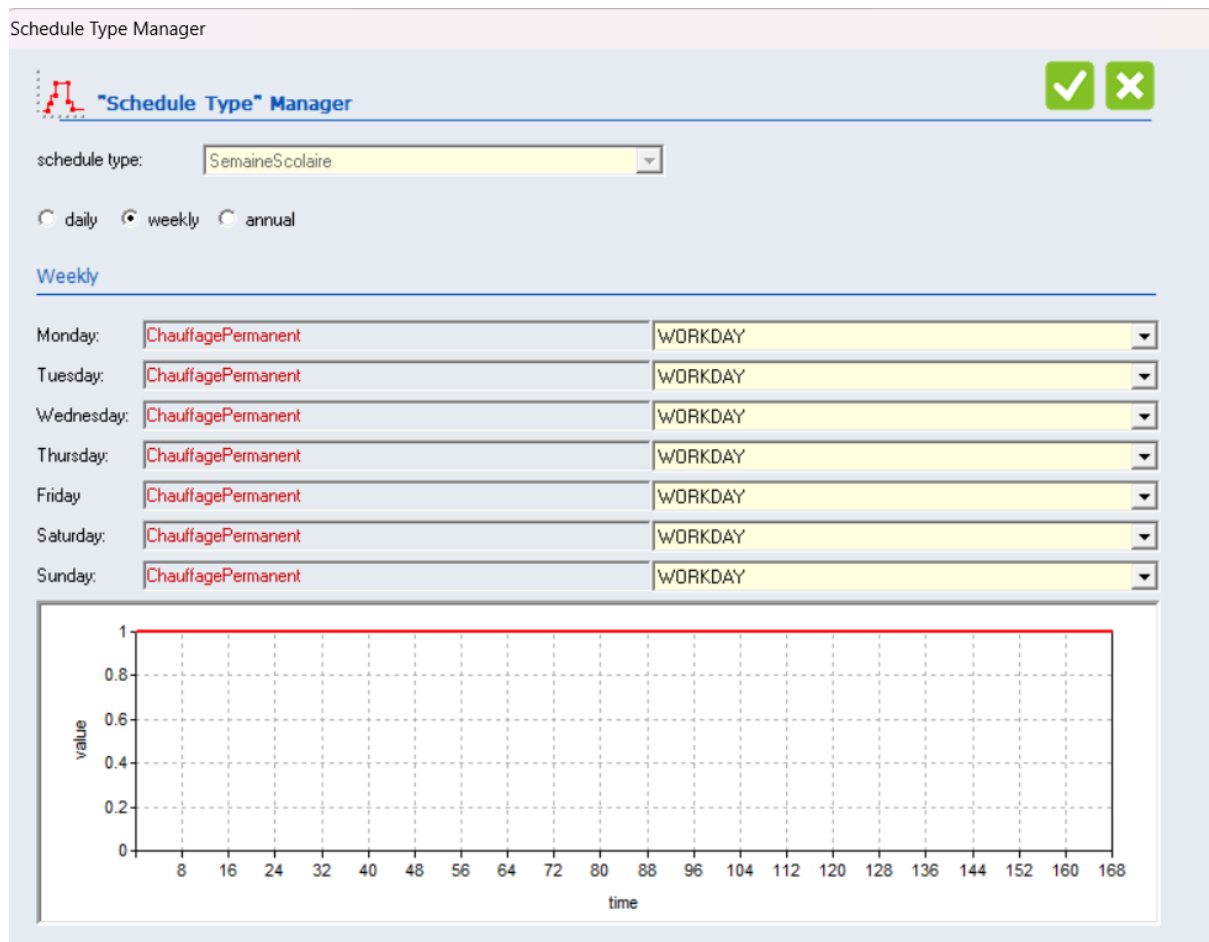


FIGURE 20 - PROGRAMMATION HEBDOMADAIRE ASSOCIÉE AU SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PERMANENT

Comme le montre la Figure 20, le chauffage reste actif tout au long de la semaine, y compris le samedi et le dimanche.

Un deuxième scénario a ensuite été développé pour évaluer l'impact d'une régulation plus adaptée aux besoins réels de l'établissement. Dans cette configuration, le chauffage n'est autorisé que pendant les périodes normales d'occupation du site. Le démarrage est prévu à 7h15 tandis que l'arrêt se produit à 18h00. Les week-ends sont exclus du fonctionnement normal des chaudières.

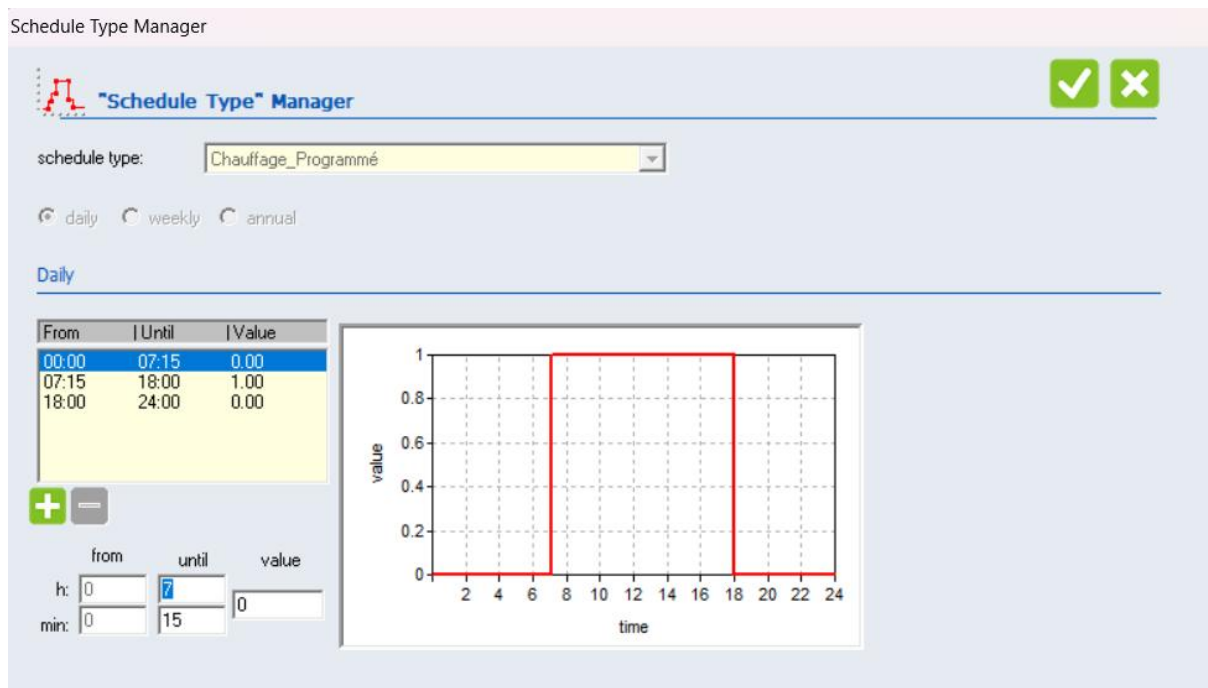


FIGURE 21 - PROGRAMMATION JOURNALIÈRE DU SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PROGRAMMÉ

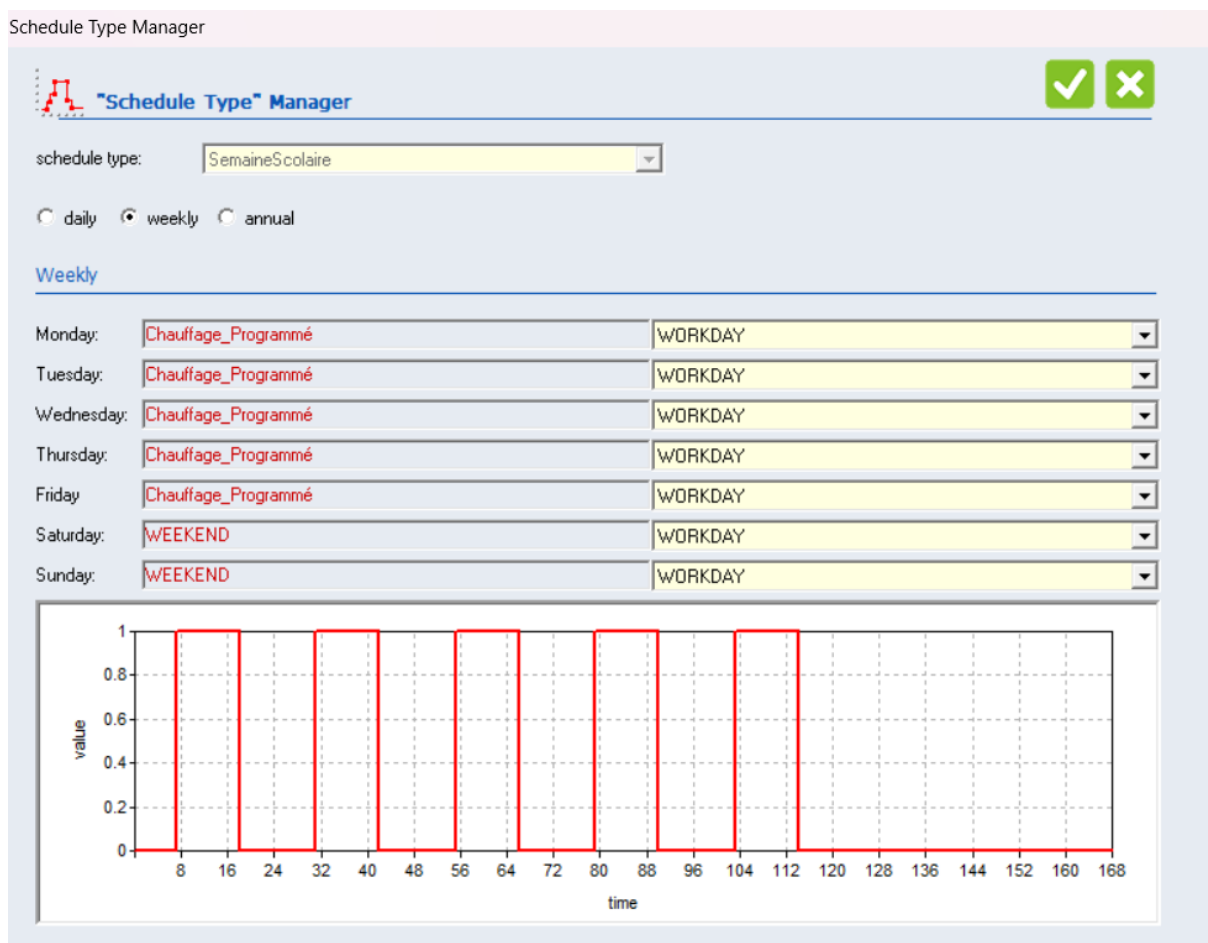


FIGURE 22 - PROGRAMMATION HEBDOMADAIRE ASSOCIÉE AU SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PROGRAMMÉ

Ce scénario représente la première étape de l'analyse étudiée. Ce scénario représente la programmation théorique que l'école a discutée suite à l'enquête menée sur place. Les résultats obtenus seront comparés à ceux du scénario de chauffage permanent afin d'estimer les économies d'énergie pouvant être réalisées grâce à une amélioration de la régulation existante.

La définition de ces différents scénarios constitue la base de toutes les simulations réalisées dans ce travail. Cependant, le comportement thermique d'un bâtiment ne dépend pas uniquement du système de chauffage. Les profils d'occupation, les périodes d'exploitation du site, ainsi que les gains internes liés aux occupants et aux équipements influencent également fortement la consommation d'énergie.

III. Définition des profils d'occupation, du calendrier annuel et des gains internes

La qualité des résultats obtenus dans une simulation énergétique dépend largement de la représentativité des hypothèses utilisées. Au-delà des caractéristiques de l'enveloppe et des systèmes techniques, l'occupation des locaux, les périodes d'utilisation du bâtiment et les gains internes influencent directement les besoins en chauffage. Par conséquent, une attention particulière a été accordée à la description de ces paramètres afin de reproduire aussi fidèlement que possible le fonctionnement réel du site de *Sainte-Véronique*.

Les profils présentés dans cette section ont tous été spécifiquement développés dans le cadre de ce travail. Les horaires ont été tirés du calendrier académique 2025, des informations fournies par l'institution et des observations faites lors de l'analyse des données de suivi. Cette approche a permis de construire un modèle aligné avec les usages réels du site au lieu d'utiliser des profils génériques couramment utilisés dans les simulations énergétiques.

a. Calendrier annuel

La première étape a consisté à configurer un calendrier annuel, qui séparait les périodes d'occupation des périodes où l'établissement était fermé. Ce calendrier sert de base opérationnelle pour tous les horaires utilisés dans le modèle.

Ce calendrier décrit les principales périodes de vacances scolaires pour l'année académique 2025, du 1^{er} janvier 2025 au 31 décembre 2025, par exemple les vacances d'hiver et les vacances de carnaval. La fermeture estivale a également eu lieu du 1^{er} juin au 27 septembre. Cela est basé sur les informations fournies par l'établissement concernant le fonctionnement normal des installations de chauffage pendant cette période. Aucune période de grèves n'a eu lieu pendant la période monitorée.

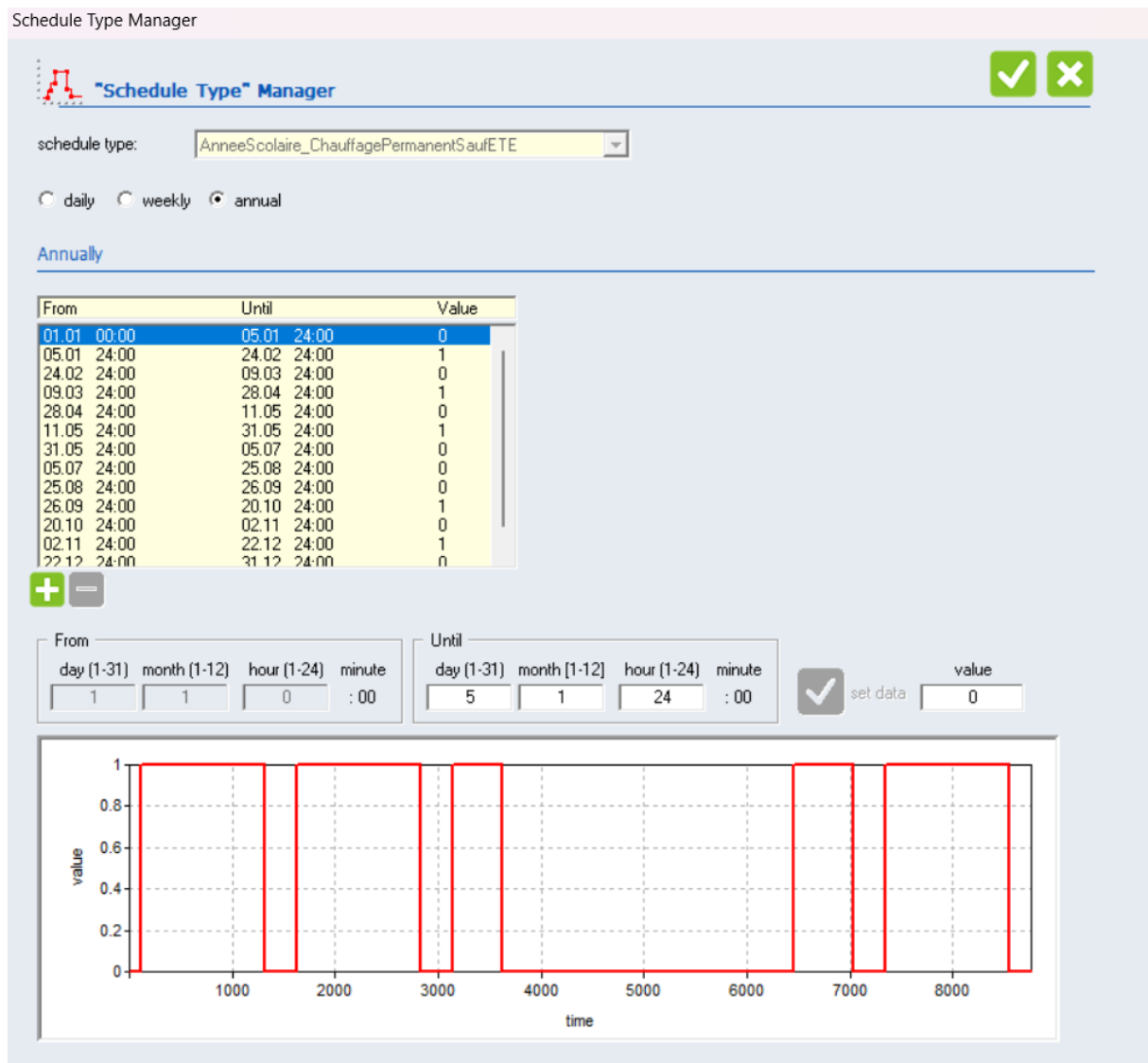


FIGURE 23 - CALENDRIER ANNUEL UTILISÉ DANS TRNBUILD

Le calendrier montre les périodes pendant lesquelles les bâtiments sont désignés comme occupés ou inoccupés. Cette distinction permet l'activation ou la désactivation de plusieurs profils d'occupation et de chauffage utilisés dans les simulations.

b. Profils d'occupation

Après avoir défini le calendrier annuel, plusieurs profils d'occupation ont été créés pour résumer les différents usages présents sur le site. L'objectif ici était de prendre en compte les spécificités de chaque type d'espace plutôt que le scénario « même horaire » qui peut être appliqué à tous les bâtiments.

Pour les salles de classe et les bureaux administratifs, un profil standard a été sélectionné. Les locaux sont considérés comme occupés en semaine entre 7h et 18h. En revanche, les week-ends sont considérés comme inoccupés.

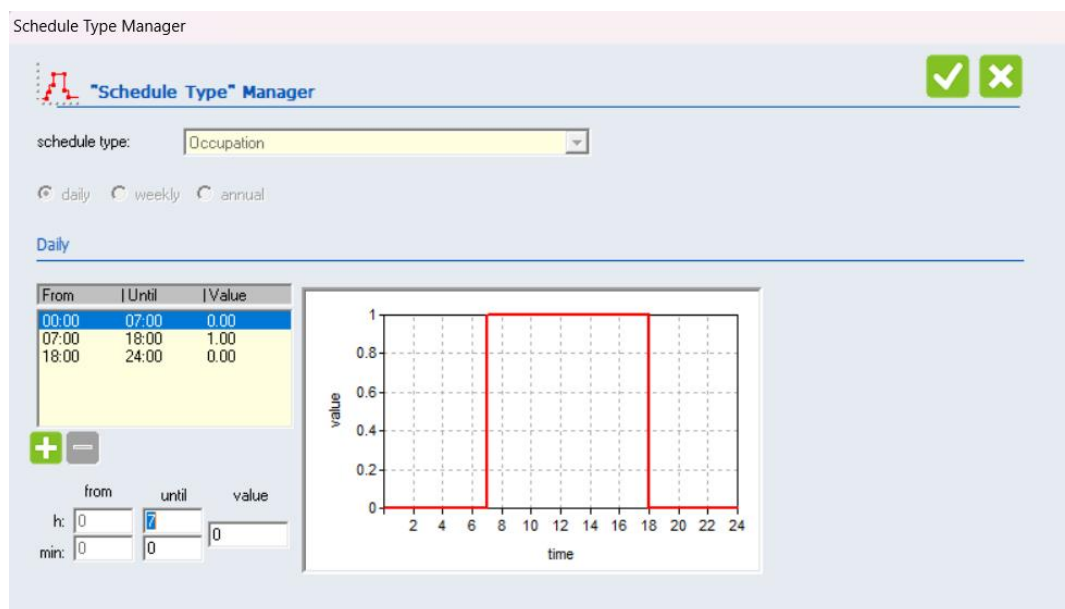


FIGURE 24 - PROFIL JOURNALIER D'OCCUPATION DES LOCAUX STANDARDS

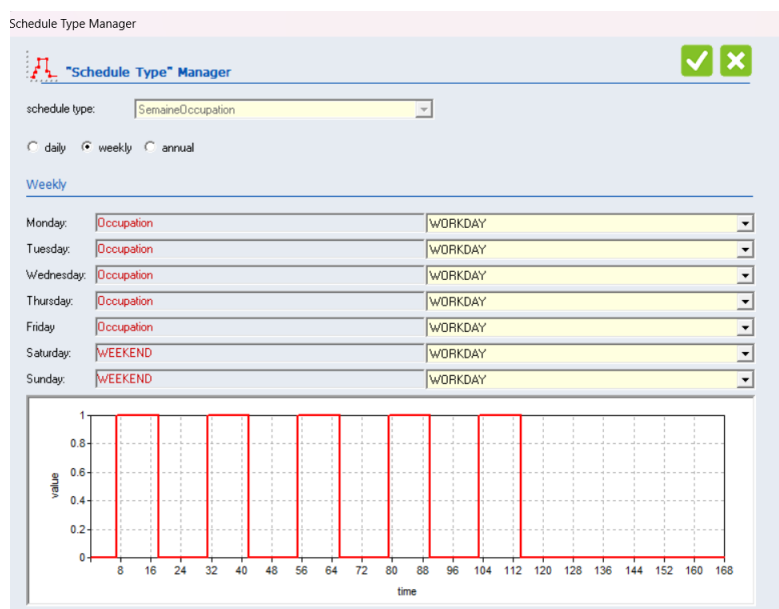


FIGURE 25 - PROFIL HEBDOMADAIRE D'OCCUPATION DES LOCAUX STANDARDS

Ce profil correspond aux périodes normales de présence des étudiants, du personnel enseignant et du personnel administratif. Il sert de profil de référence utilisé pour la majorité des locaux dans le modèle.

Des profils spécifiques ont ensuite été développés pour certains espaces dont l'utilisation diffère du fonctionnement classique d'une salle de classe ou d'un bureau.

c. Réfectoire

Le réfectoire est un exemple d'espace dont l'occupation diffère sensiblement de celle d'une salle de classe typique. Bien que sa superficie soit comparable à celle d'une salle de classe, son utilisation est concentrée pendant les heures de repas. Par conséquent, un profil spécifique a été créé pour reproduire cette occupation occasionnelle. L'espace est considéré comme occupé pendant deux heures par jour, correspondant aux heures de repas des étudiants. Aucune utilisation n'a été prévue pour le mercredi, en raison de l'organisation habituelle des activités scolaires.

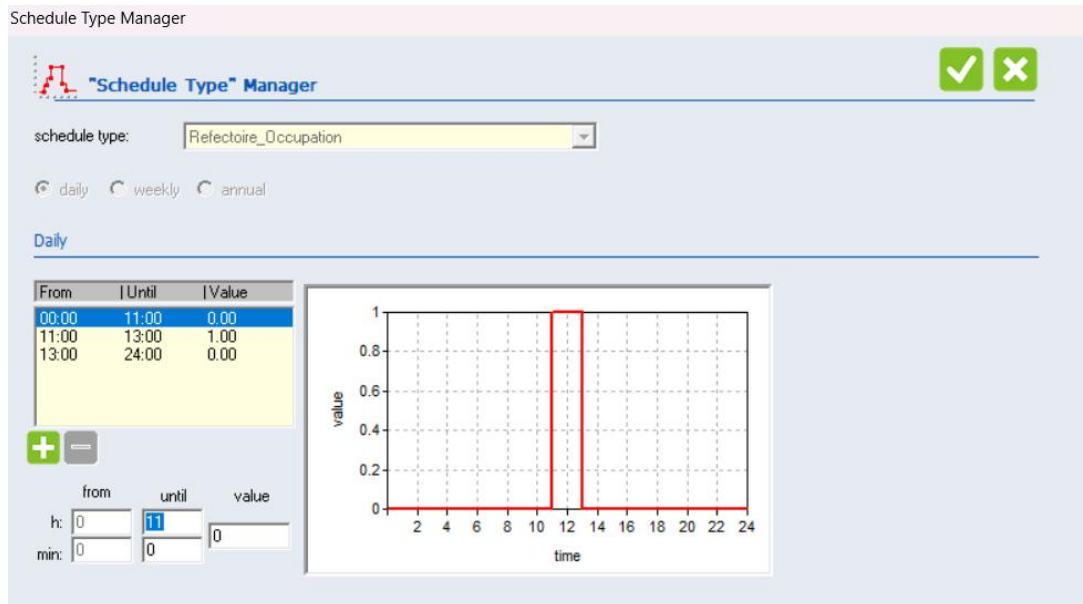


FIGURE 26 - PROFIL JOURNALIER D'OCCUPATION DU RÉFECTOIRE

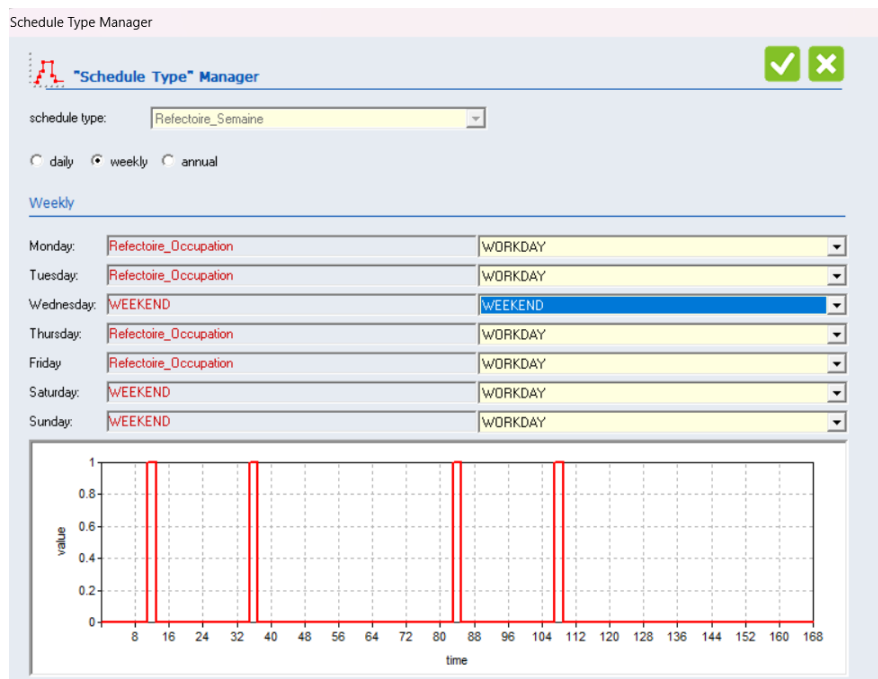


FIGURE 27 - PROFIL HEBDOMADAIRE D'OCCUPATION DU RÉFECTOIRE

d. Salle des professeurs

La salle des professeurs a également reçu une attention particulière. Contrairement aux salles de classe, cet espace est utilisé de manière plus diffuse tout au long de la journée. Les enseignants s'y rendent généralement pendant les périodes de préparation, les pauses et les transitions d'une classe à l'autre. Le profil correspondant à cette occupation, qui est de six adultes en moyenne pendant cinq heures par jour, a été sélectionné.

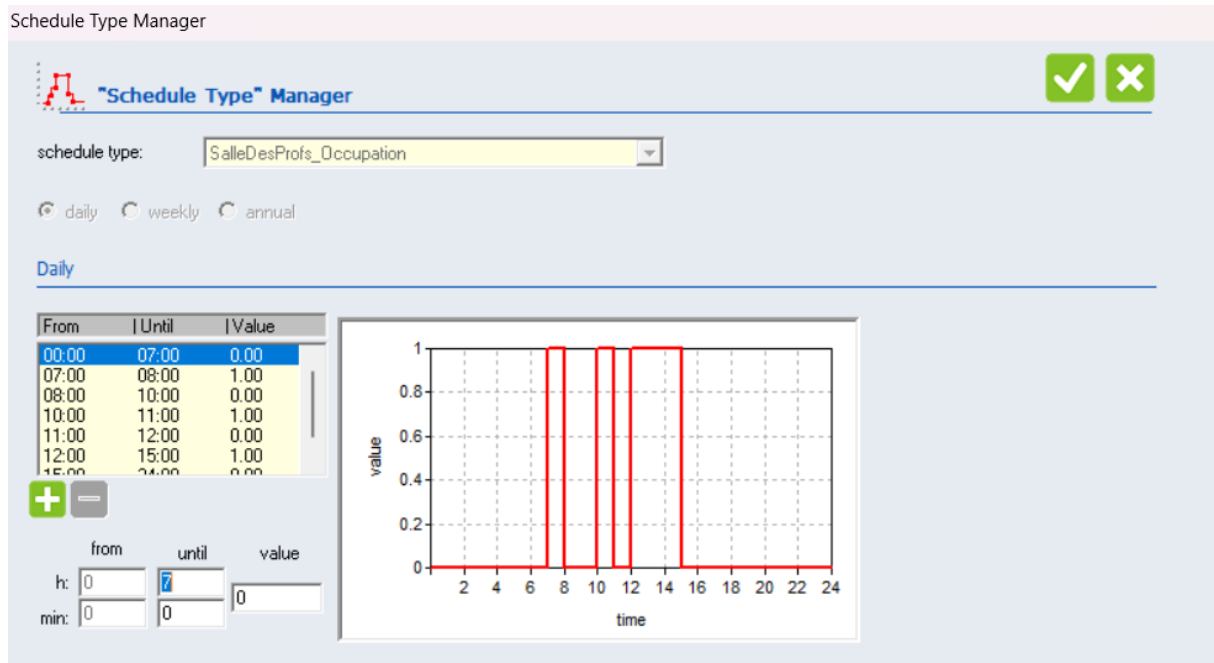


FIGURE 28 - PROFIL JOURNALIER D'OCCUPATION DE LA SALLE DES PROFESSEURS

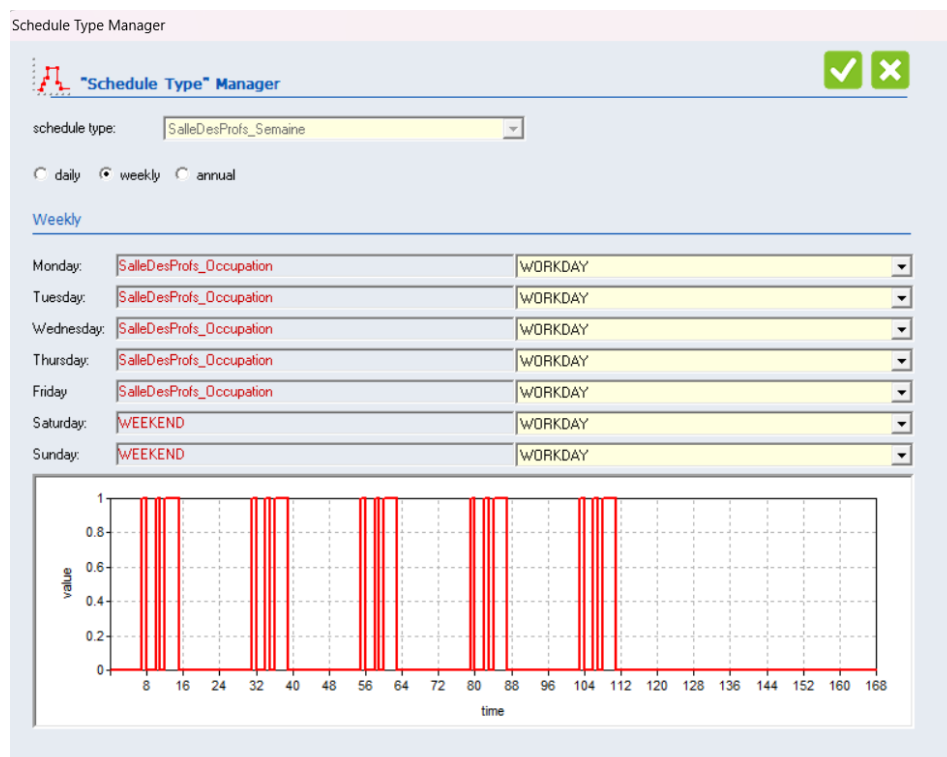


FIGURE 29 - PROFIL HEBDOMADAIRE D'OCCUPATION DE LA SALLE DES PROFESSEURS

e. Salle de réunion

Les salles de réunion fonctionnent également différemment du reste du bâtiment. En général, elles sont utilisées uniquement pendant des périodes définies et non toute la journée. Une occupation de six adultes pendant trois heures par jour a été utilisée pour cette simulation. Cette hypothèse permet de représenter les réunions administratives et éducatives qui peuvent être organisées au sein de l'institution.

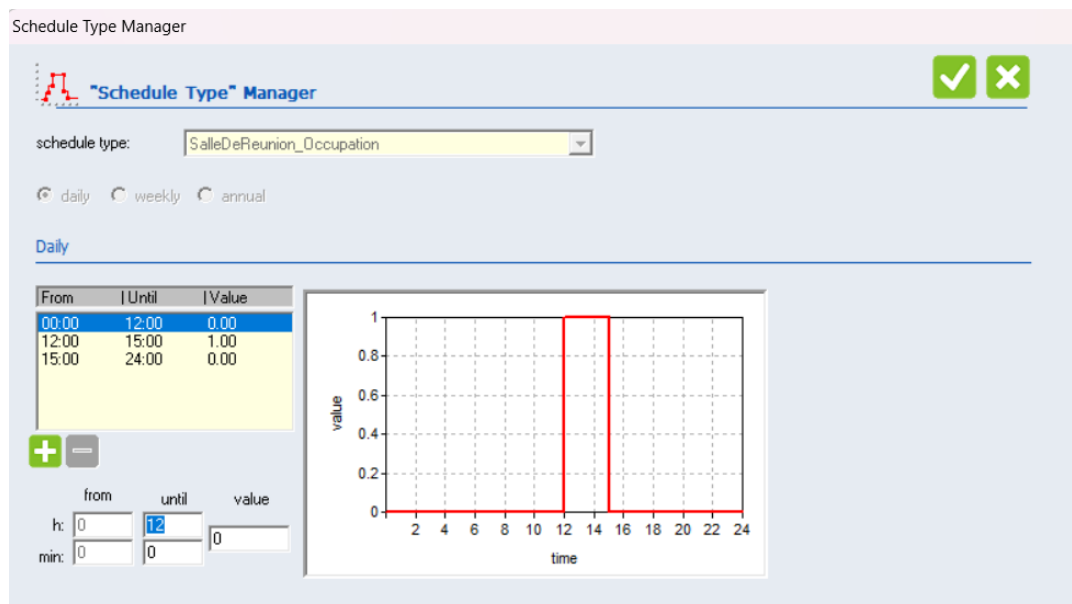


FIGURE 30 - PROFIL JOURNALIER D'OCCUPATION D'UNE SALLE DE RÉUNION

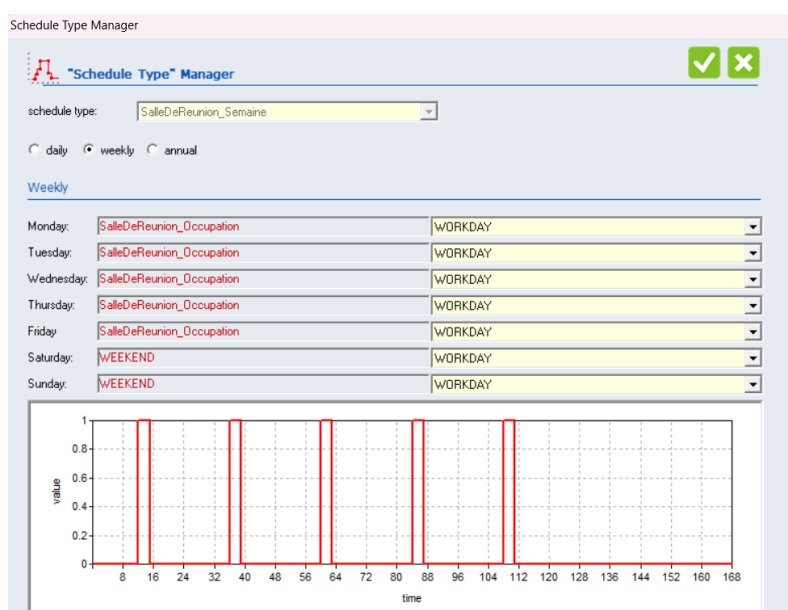


FIGURE 31 - PROFIL HEBDOMADAIRE D'OCCUPATION D'UNE SALLE DE RÉUNION

Cette diversité dans les profils d'occupation augmente considérablement la représentativité du modèle énergétique. Les gains internes produits par les occupants dépendent énormément de l'utilisation des locaux et sont directement liés aux besoins de chauffage. Une modélisation unique de tous les espaces aurait entraîné des évaluations moins précises du fonctionnement réel du site. Ces profils d'occupation ne contrôlent que les gains internes, pas les périodes de chauffe.

f. Gains internes

Outre les profils d'occupation, les diverses contributions internes présentes dans les bâtiments ont été incluses dans le modèle. Ces gains comprennent principalement la chaleur dérivée des occupants, l'éclairage, les équipements électriques et certains équipements spécifiques présents dans les bâtiments.

Les valeurs calculées ont été identifiées et définies sur la base de données littéraires et adaptées aux caractéristiques du site analysé. Il y a une distinction entre les différents types de locaux afin de refléter leurs utilisations spécifiques. Oui, en effet, les salles de classe, les bureaux, les salles de réunion, les salles des professeurs et les réfectoires ont des niveaux d'occupation et d'équipement différents et donc des gains thermiques générés à l'intérieur des bâtiments.

TABLEAU 16 - GAINS INTERNES LIÉS AUX OCCUPANTS ET AUX ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES

Nom	Nombre	W	kJ/h	% radiatif	% convectif	Type
Adulte	1	100	360	75%	25%	Personne
Élève	1	75	270	75%	25%	Personne
Classe	1 adulte + 25 élèves	1975	7110	75%	25%	Personne
Bureau	2 adultes	200	720	75%	25%	Personne
Salle de réunion	6 adultes	600	2160	75%	25%	Personne
Salle des professeurs	6 adultes	600	2160	75%	25%	Personne
Réfectoire	30 élèves ¹³	2250	8100	75%	25%	Personne
Armoire info.	1	500	1800	15%	85%	Équipement électrique
Boiler 10L	1	15	54	15%	85%	Équipement électrique
Boiler 180 L	1	80	288	15%	85%	Équipement électrique
Éclairage	1	6	21,6	60%	40%	Lampes
Classe	1	8	28,8	20%	80%	Équipement électrique
Bureau	1	11	39,6	20%	80%	Équipement électrique
Cuisine	1	10	36	20%	80%	Équipement électrique
Salle de réunion	1	8	28,8	20%	80%	Équipement électrique

Pour ce qui est des gains internes pour les équipements électriques (éclairage, classe, bureau, cuisine et salle de réunion) ce sont des gains surfaciques, ce qui signifie qu'ils sont liés à la superficie du bâtiment.

¹³ Il s'agit bien d'une hypothèse posée sans certitude. Il s'agit peut-être aussi d'un local où ce sont les enseignants qui mangent.

Grâce aux différents plans des bâtiments, il a été possible de savoir les différentes fonctions des locaux dans les bâtiments.

TABLEAU 17 - RÉPARTITION DES DIFFÉRENTS TYPES DE LOCAUX ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES

	22 Nouveau	22 Ancien	24	26	28	30
Classe	5	6	0	0	14	7
Bureau	1	3	7	8	1	3
Salle de réunion	0	0	0	1	0	2
Salle des professeurs	0	1	1	0	0	0
Réfectoire	0	0	0	0	0	1
Cuisine	0	1	0	0	0	1
Armoire info.	0	0	0	1	0	0
Boiler 10L	0	0	1	0	1	0
Boiler 180L	0	0	0	0	1	0

L'inventaire des locaux révèle différentes fonctions selon les bâtiments. Alors que les bâtiments Sualem 24 et 26 sont principalement utilisés à des fins administratives, les bâtiments Sualem 28 et 30 abritent la majorité des salles de classe. Sualem 30 dispose également d'espaces spécifiques tels qu'une cafétéria et une cuisine. Ces différences fonctionnelles influencent directement les profils d'occupation, les gains internes et les besoins de chauffage des différentes zones thermiques.

➤ Gains liés aux occupants¹⁴

Les occupants, en particulier, sont la principale source de gains internes dans les bâtiments scolaires. Tant les besoins de chauffage interne que les apports de chaleur contribuent directement à l'augmentation des niveaux de température de l'air intérieur. Les élèves, les enseignants et le personnel administratif ajoutent à cette source de chaleur.

Les puissances unitaires divisées par ces occupants indiquent ces contributions thermiques dans ce modèle. Une puissance de 100W a été choisie pour un adulte et de 75W pour un élève. Ces deux valeurs sont associées aux activités sédentaires effectuées pendant les heures scolaires et les tâches administratives.

La chaleur produite par les occupants a été répartie en composants radiatifs et convectifs, avec 75% de l'énergie totale générée par la puissance dans le composant radiatif et 25% de la chaleur étant celle donnée par le composant convectif. Ce schéma de distribution permet de générer différentes sources de transfert de chaleur vers la région intérieure

À partir de ces valeurs unitaires, les gains internes pour chaque type de pièce ont été calculés en fonction du nombre d'occupants pris en compte dans le modèle. Les salles de classe ont été considérées comme ayant vingt-cinq élèves et un enseignant. Deux adultes étaient présents dans les bureaux. Les salles de réunion et salles des professeurs étaient utilisées pour accueillir six adultes, et une cafétéria spacieuse était maintenue pour trente élèves mangeant pendant l'heure du repas.

¹⁴ Voir « Occupation » dans les Annexes.

➤ Gains liés à l'éclairage et aux équipements électriques¹⁵

Outre les occupants, les équipements présents dans les bâtiments génèrent également des apports thermiques qui contribuent au bilan énergétique global. La température intérieure augmente en raison de l'éclairage, des ordinateurs, des écrans et de divers appareils électriques présents dans les locaux.

La puissance d'éclairage sélectionnée était de 6W/m² pour tous les locaux du modèle. Cette puissance a été répartie entre une composante radiative de 60% et une composante convective de 40%. Cette hypothèse facilite la représentation du comportement thermique typiquement observé dans les systèmes d'éclairage installés dans les bâtiments scolaires.

Les gains liés aux équipements électriques ont été ajustés en fonction de l'utilisation des différents locaux. Les bureaux, avec des ordinateurs et des équipements administratifs en place, ont naturellement une puissance plus élevée. Les salles de classe, les salles de réunion, les salles du personnel, ainsi que la cafétéria, en revanche, ont été associées à des niveaux de puissance inférieurs qui reflètent leur niveau d'équipement.

➤ Équipements spécifiques

Quelques équipements spécifiques sur le site ont été explicitement codés en raison de leurs opérations particulières.

Plus précisément, une armoire informatique a été intégrée dans le bâtiment 26. Cet équipement particulier est considéré comme fonctionnant en continu (contrairement à d'autres équipements électriques). Cette hypothèse permet de représenter la maintenance des équipements informatiques et de l'infrastructure réseau en dehors des périodes d'occupation du bâtiment.

Le modèle prend également en compte trois boilers électriques utilisées pour la production d'eau chaude sanitaire. Un boiler de 10 litres a été associée au bâtiment 24, tandis que le bâtiment 28 dispose d'un boiler de 180 litres et d'un boiler de 10 litres. Bien que leur influence sur la consommation globale reste limitée, leur intégration contribue à améliorer la représentativité du modèle énergétique.

Ces différents équipements spécifiques ont été intégrés comme des gains internes permanents ou dépendants de l'occupation selon leur mode de fonctionnement réel.

g. Infiltration¹⁶

Les infiltrations d'air jouent également un rôle important dans les pertes thermiques des bâtiments. Elles correspondent à des échanges d'air non contrôlés entre l'intérieur et l'extérieur à travers les défauts d'étanchéité de l'enveloppe.

En raison de l'absence de mesures précises de perméabilité à l'air pour les différents bâtiments étudiés, un taux d'infiltration constant de 0,6 renouvellements d'air par heure a été appliqué à toutes les zones thermiques du modèle.

Cette valeur constitue une hypothèse représentative pour les bâtiments existants de différents types et époques. Elle permet de prendre en compte les pertes de chaleur liées au renouvellement d'air parasite tout en maintenant un niveau de complexité compatible avec les objectifs de cette étude.

Toutes les hypothèses relatives aux gains internes et aux infiltrations présentées dans cette section complètent la définition du modèle énergétique développé dans *TRNBuild*. Une fois ces paramètres définis, le modèle a pu être exporté vers *Simulation Studio* pour réaliser les différentes simulations énergétiques étudiées dans ce travail.

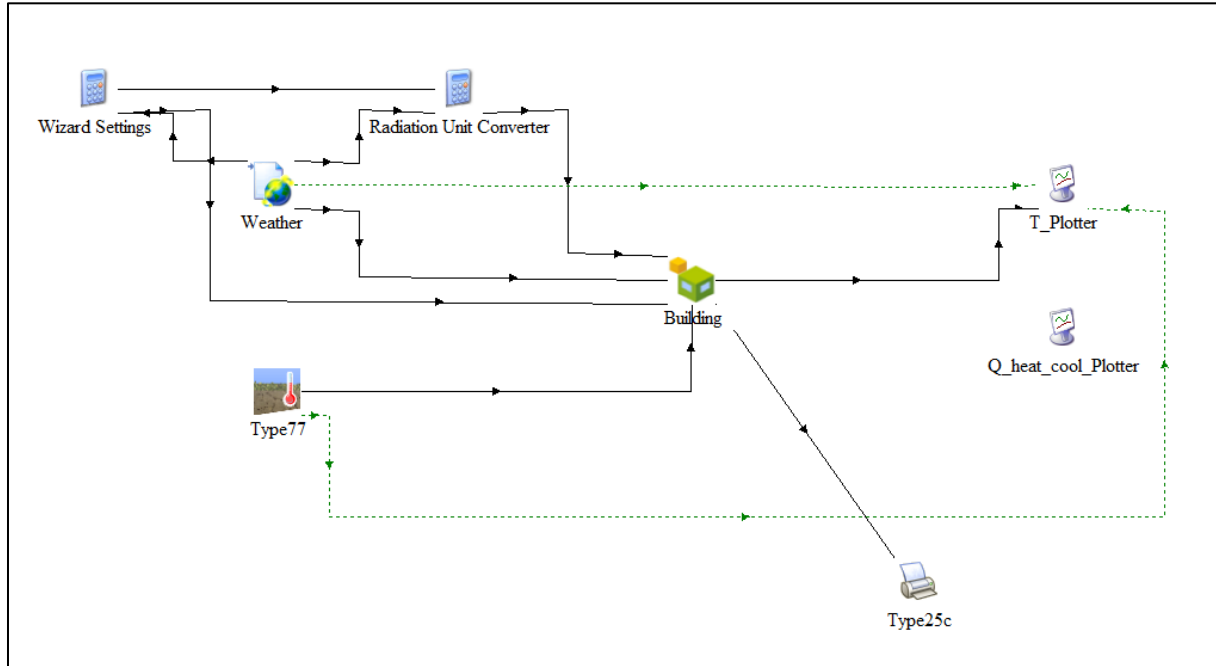
¹⁵ Voir « Équipements électriques » dans les Annexes.

¹⁶ Voir « Infiltration » dans les Annexes.

IV. Mise en œuvre des simulations dans Simulation Studio

a. Structure générale du modèle

Une fois les paramètres ont été définis dans *TRNBuild*, le modèle énergétique a été exporté vers *Simulation Studio* afin de réaliser les simulations dynamiques. Cette méthode permet l'intégration du modèle thermique du bâtiment avec des données météorologiques externes et la gamme de paramètres de simulation impliqués pour le calcul des besoins énergétiques.



17

FIGURE 32 - STRUCTURE GÉNÉRALE DU MODÈLE DÉVELOPPÉ DANS SIMULATION STUDIO

La Figure 32 montre également l'architecture globale du modèle appliquée dans ce travail. Le modèle thermique du bâtiment, en tant que *Type 56*, est le composant clé ici. Cela comprend toutes les zones thermiques enregistrées dans *TRNBuild* et les propriétés des murs, des systèmes de chauffage, des profils d'occupation, des gains internes et des infiltrations.

Le composant « *Weather* » lit le fichier climatique applicable à la simulation, fournissant au modèle des informations météorologiques. Tout d'abord, les données de rayonnement solaire sont prétraitées par le composant « *Radiation Unit Converter* », qui traduit les unités nécessaires pour le bon fonctionnement du modèle thermique.

La partie « *Wizard Settings* » définit les paramètres généraux de simulation tels que la durée, le pas de temps et les fichiers à utiliser pour le calcul des paramètres. Ensuite, les sorties du modèle et ces résultats sont distribués à différents modules de visualisation afin que les résultats puissent être analysés.

Pour l'étape finale, le composant *Type25c* est utilisé pour exporter les résultats sous forme de fichiers pour une utilisation externe en dehors de *Simulation Studio*. Cette fonctionnalité aide à obtenir l'utilisation du chauffage et les températures simulées pour ces analyses présentées dans la suite de ce travail.

¹⁷ Pour plus d'informations concernant les composants de Figure 32, voir « Modèle Simulation Studio ».

b. Données météorologiques et orientation du modèle

Les conditions climatiques ont une influence significative sur les besoins énergétiques d'un bâtiment. Ainsi, une importance particulière a été accordée à la sélection du fichier météorologique utilisé lors des simulations.

Comme il n'existe pas de fichier météorologique spécifique pour la ville de Liège, la station météorologique d'Uccle a été choisie. Cette station est l'une des références climatiques les plus largement appliquées en Belgique et sert de précieuse source de données horaires pour la simulation énergétique dynamique. Les caractéristiques météorologiques à Uccle étaient également relativement similaires à celles du site étudié.

L'orientation du bâtiment a également été prise en compte dans le modèle. Lors du travail sur le terrain, une orientation de 45° a été relevé sur place. Il convient de mentionner, cependant, que *Simulation Studio* adopte une norme spécifique pour définir les orientations dans l'hémisphère nord. La correction de 180° a ensuite été appliquée lors de l'encodage pour fournir une représentation correcte de l'exposition solaire externe des façades. Ce qui donne une orientation de 225° encodée dans *Simulation Studio*.

Les données météorologiques et les aspects d'orientation garantissent de reproduire l'influence des environnements externes sur la réponse thermique du bâtiment au fil du temps (tels que les gains solaires, les pertes de chaleur, les différences de température externe à différents points et moments de l'année).

c. Variables analysées

Les simulations utilisées dans ce travail visent à évaluer l'effet de différentes méthodes de régulation sur l'utilisation de l'énergie et le confort thermique des bâtiments étudiés. Pour faciliter cette étude, plusieurs variables de sortie ont été sélectionnées et exportées du modèle *TRNSYS*.

Les résultats ont été obtenus avec un pas de temps horaire sur toute la durée de la simulation, du 1er janvier au 31 décembre. Cette résolution temporelle permet de mesurer avec précision le cycle des besoins énergétiques et de la température intérieure tout au long de l'année.

Pour chacune des zones thermiques du modèle, les variables suivantes ont été enregistrées :

- ➔ QHeat : énergie de chauffage fournie à la zone afin de maintenir la température de consigne,
- ➔ QEIEquip : gains thermiques générés par les équipements électriques,
- ➔ QEILight : gains thermiques liés à l'éclairage,
- ➔ TAir : température de l'air intérieur de la zone,
- ➔ TOp : température opérative¹⁸ de la zone, intégrant à la fois la température de l'air et l'influence des surfaces environnantes.

Par conséquent, une telle analyse de diverses variables permet non seulement d'examiner l'utilisation du chauffage, mais garantit également la stabilité du modèle thermique et l'effet des améliorations internes sur le fonctionnement énergétique des bâtiments.

Les données exportées ont ensuite été traitées dans *Microsoft Excel* pour calculer la consommation annuelle et comparer les scénarios.

¹⁸ « La température opérative est une moyenne pondérée de la température de l'air T_a et de la température radiante T_r : $T_{op} = aT_a + (1 - a)T_r$ où $a = 0,5 + 0,25v$ v étant la vitesse relative de l'air. » (Roulet, 2024)

d. Traitement des résultats de simulation

Dans le cadre de cette étude, les résultats produits par Simulation Studio ont été exportés sous forme de fichiers texte (.txt) comprenant les valeurs horaires des divers paramètres sélectionnés pour chacune des zones thermiques du modèle. Ces fichiers sont les données brutes collectées à partir de la simulation dynamique.

Pour convertir ces résultats en une sortie utilisable, les données ont été traitées via *Microsoft Excel*. La transformation des données brutes générées par *TRNSYS* en variables énergétiques et thermiques pour l'analyse dans divers cas a été réalisée par cette étape. Tout d'abord, les fichiers texte créés par *Simulation Studio* ont été importés dans *Excel* avec l'outil *Power Query*.

- 1) Importer les résultats texte produits par *Simulation Studio* en utilisant *Power Query*.
- 2) Éliminer les transformations automatiques appliquées lors de l'importation pour préserver les données dans leur format original.
- 3) Convertir les données numériques en utilisant la locale « Anglais (États-Unis) » et le type de données « Nombre décimal ». Cela est crucial dans *Excel* pour une bonne compréhension du séparateur décimal utilisé par *TRNSYS*.
- 4) Chargement des données converties dans Excel.
- 5) Pour la consommation annuelle, additionner les valeurs horaires de QHeat, QEIEquip et QEILight tout au long de l'année simulée pour obtenir un chiffre total. Les résultats en kJ/h ont été divisés par 3600 pour obtenir une sortie annuelle en kWh
- 6) Calculs des températures TAir et TOp. Les moyennes, minimums, maximums, écarts-types et médianes¹⁹ ont été calculés par zone thermique.

8748	0	83907.216	2813.25312
8749	0	92815.85088	2813.25312
8750	0	92815.85088	2813.25312
8751	0	92815.85088	2813.25312
8752	0	83907.216	2813.25312
8753	0	83907.216	2813.25312
8754	0	83907.216	2813.25312
8755	67446.40389	1800	0
8756	195388.052	1800	0
8757	133700.965	1800	0
8758	147512.0548	1800	0
8759	142249.9233	1800	0
8760	143509.4958	1800	0
	435260602	358948497.9	11295211.28
	120905.7228	99707.91607	3137.558688

FIGURE 33 - EXEMPLE DE TRAITEMENT DES RÉSULTATS DE SIMULATION DES VALEURS QHEAT, QELEQUIP ET QELLIGHT

21.9917281	20.1124369	23.030569
21.519375	19.7820875	22.725696
21.0395739	19.4192241	22.430779
20.9645518	19.3158232	22.451119
20.414283	18.7590183	21.168782
20	19.5142139	20
20	19.2719336	20
20	19.3809426	20
20	19.3764445	20
20	19.3959368	20
22.40557	21.43164	22.48771
35.2026711	33.006466	32.24373
19.7694605	17.9102604	19.285557
3.16914787	2.70008264	2.7681485
20.8036345	20.1742366	21.718457

FIGURE 34 - EXEMPLE DE TRAITEMENT DES RÉSULTATS DE SIMULATION DES VALEURS TAIR ET TOP

¹⁹ « La médiane (notée Me ou Méd) est l'indicateur de tendance centrale qui partage une série statistique ordonnée en deux groupes d'effectifs égaux. Autrement dit : 50 % des valeurs sont inférieures ou égales à la médiane, et 50 % lui sont supérieures ou égales. » (Kabbaj, 2026)

Ces traitements ont permis d'obtenir les indicateurs énergétiques et thermiques utilisés dans l'analyse des différents scénarios présentés dans la suite de ce travail.

V. Définition des scénarios simulés

a. Scénario de référence : chauffage permanent

Un autre objectif de ce travail était de reproduire aussi fidèlement que possible le fonctionnement réel du site. L'analyse des données de surveillance a indiqué que les chaudières restent actives pendant les nuits, les week-ends et certaines périodes de vacances scolaires, parfois pas nécessairement de manière continue.

Une approche conceptuelle a ensuite été adoptée pour illustrer cette situation. Dans ce cas, connu sous le nom de « chauffage permanent », les chaudières sont présumées être opérationnelles en continu tout au long de la phase de chauffage. Le chauffage est donc en principe vingt-quatre heures sur vingt-quatre, sept jours sur sept, sans distinction entre les périodes d'occupation et les périodes de non-occupation, sauf pour les vacances scolaires et la période entre le 1er juin et le 26 septembre.

Ce scénario est utilisé comme cas de référence pour comparer toutes les optimisations étudiées par la suite.

b. Scénario de référence : chauffage programmé

Un deuxième scénario a été conçu en testant un emploi du temps adapté aux besoins réels de l'établissement.

Dans cette configuration, le chauffage ne peut avoir lieu que pendant les heures normales d'occupation. Le démarrage est prévu à 7h15 et l'arrêt à 18h00. Les week-ends sont exclus du fonctionnement normal des chaudières. Les vacances scolaires et les mois d'été sont également pris en compte grâce au calendrier annuel mis en œuvre par *TRNBuild*. (Voir le point « Encodage des systèmes de chauffage »)

Cette simulation a pour but de montrer ce qui se passerait si les paramètres de programmation étaient exécutés automatiquement, et non par l'agent de maintenance, comme c'est actuellement le cas.

c. Scénario d'optimisation 1 : régulation automatisée basée sur la température intérieure

À titre d'exemple, les analyses menées dans ce travail ont révélé que le processus d'exploitation actuel des installations repose fortement sur l'intervention humaine. Les occupants ajustent régulièrement les vannes thermostatiques, et la gestion des chaudières dépend principalement des actions de l'équipe de maintenance. Cela peut à son tour créer un écart considérable entre les besoins réels des bâtiments et le fonctionnement effectif des systèmes de chauffage.

L'objectif de cette première optimisation est donc de minimiser le facteur humain affectant la régulation thermique du site. Pour atteindre cet objectif, les vannes thermostatiques doivent être verrouillées dans une position prédéfinie afin que les occupants ne les ajustent pas continuellement. Simultanément, des capteurs de température intérieure seraient placés dans les bâtiments pour réguler automatiquement les chaudières. Idéalement, chaque pièce posséderait son propre capteur. Mais afin de minimiser les investissements, un placement « stratégique » serait envisageable pour couvrir le plus d'espace possible avec un petit nombre de capteurs.

Le principe de fonctionnement est la régulation automatique du chauffage par la température intérieure mesurée. La température dans les bâtiments occupés est maintenue à 18°C, mais en dehors des périodes, une température minimale de 12°C est maintenue pour assurer un refroidissement limité des locaux, réduire l'exposition du bâtiment à l'humidité ou aux dommages dus à la dégradation du bâtiment. La

température de 18°C a été retenue comme compromis entre le confort thermique des occupants et la réduction des consommations énergétiques.

TRNBuild interprète cette logique dans la relation suivante :

ÉQUATION 1 - TEMPÉRATURE DE CONSIGNE POUR L'OPTIMISATION 1

$$T_{consigne} = 6 * Schedule_{chauffage} + 12$$

Dans le programme de chauffage actif (égal à 1), la température de consigne reste à 18°C. Elle maintient la température à 12°C lorsqu'elle ne fonctionne pas (0).

Cette optimisation vise à réduire les consommations énergétiques tout en conservant des conditions thermiques compatibles avec l'occupation des bâtiments.

d. Scénario d'optimisation 2 : régulation automatisée et réduction de la période de chauffe

La deuxième optimisation repose sur le même principe général que la première. Les vannes thermostatiques sont verrouillées et la régulation est automatiquement gérée en fonction des températures intérieures mesurées par des capteurs installés dans les bâtiments.

La principale différence réside dans la durée de fonctionnement du chauffage. Une analyse des horaires d'occupation a montré que certaines pièces n'ont pas besoin de chauffage après 18h. Par conséquent, une réduction de la période de chauffage a été testée pour évaluer son impact sur la consommation d'énergie.

Dans ce scénario, le chauffage est autorisé entre 7h15 et 16h les jours ouvrables. En dehors de cette période, seule la température minimale de maintenance est maintenue.

La température de consigne est définie selon la relation suivante :

ÉQUATION 2 - TEMPÉRATURE DE CONSIGNE POUR L'OPTIMISATION 2

$$T_{consigne} = 5 * Schedule_{chauffage} + 12$$

Lorsque l'horaire est actif, la température de consigne atteint 17°C. Lorsque le chauffage est inactif, la température minimale reste fixée à 12°C.

Cette optimisation représente une approche plus ambitieuse visant à maximiser les économies d'énergie tout en maintenant des conditions d'utilisation compatibles avec le fonctionnement de l'établissement. Les résultats obtenus permettront d'évaluer si la réduction supplémentaire de la température de consigne et de la durée de chauffage reste acceptable du point de vue du confort thermique des occupants.

e. Hypothèses conservées dans les scénarios d'optimisation

Conformément aux différentes simulations, les gains internes établis lors de la construction du modèle étaient identiques pour tous les scénarios évalués. Par conséquent, les hypothèses concernant l'occupation des locaux, l'éclairage et les équipements électriques n'ont pas été modifiées.

Cela est dû au fait que l'on souhaite analyser pleinement l'effet de la régulation du système de chauffage sur la consommation d'énergie sur le site. Si les gains internes avaient été modifiés, des variations supplémentaires seraient apparues, rendant les conclusions plus compliquées.

Il en est de même pour les hypothèses des gains solaires. La localisation des bâtiments, leur orientation et la période simulée restent les mêmes.

De plus, dans un cadre scolaire, certaines hypothèses peuvent être difficiles à mettre en œuvre. Il n'est pas possible de réduire la consommation d'énergie en diminuant le nombre d'élèves ou en limitant l'utilisation de certains outils pédagogiques dans une salle de classe. Cependant, les ordinateurs, imprimantes ou autres équipements nécessaires au fonctionnement quotidien de l'établissement ne peuvent être remis en question sans nuire à la qualité des activités dans les bâtiments.

L'optimisation dans le travail concerne donc uniquement la gestion du chauffage. Elle présente également l'avantage de cibler un domaine énergétique important sans avoir à interférer avec les usages normaux des occupants. Ainsi, les économies observées ne peuvent être attribuées qu'aux changements dans la régulation des chaudières, et non à des changements de comportement ou d'occupation des locaux.

VI. Résultats des simulations

a. Consommations énergétiques annuelles

Les quatre scénarios de cette étude montrent des consommations d'énergie très différentes. Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'effet de la régulation du système de chauffage sur les besoins énergétiques du site étudié.

Pour plus de clarté, un code couleur a été accordé à chaque simulation : **Chauffage_Permanent**, **Chauffage_Programmé**, **Optimisation 1** et **Optimisation 2**.

TABLEAU 18 - COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES DE CHAQUE SIMULATION PAR ZONES THERMIQUES

Zones thermiques	QHeat (kWh)	QHeat (kWh)	QHeat (kWh)	QHeat (kWh)	QEIEquip (kWh)	QEILight (kWh)
Admin	120905,723	30812,467	30003,62	27377,471	99707,916	3137,559
22	109656,118	22230,317	14054,011	11872,015	106512,798	6657,049
88992	9806,600	4255,718	1863,012	1069,554	19307,660	2271,489
Douane_28	147434,272	48811,261	39799,42	35336,648	67185,616	3258,741
Douane_30	143038,728	77894,34	64388,066	55762,878	35306,633	2049,461
Total	530841,44	184004,1	150108,13	131418,57	328020,623	17374,301

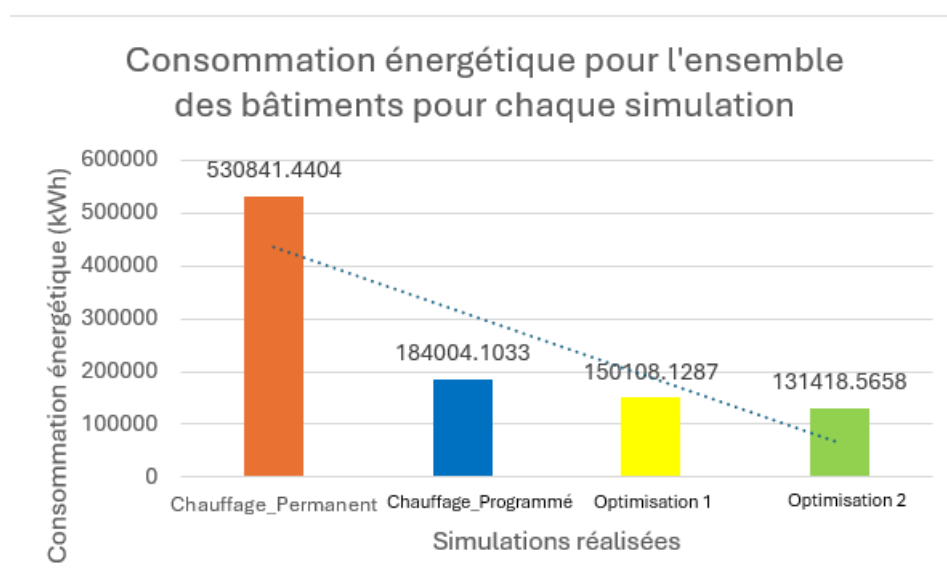


FIGURE 35 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE POUR L'ENSEMBLE DES BÂTIMENTS POUR CHAQUE SIMULATION

La première réalisation des données révèle la pertinence du mode de régulation des installations de chauffage. Le scénario de chauffage permanent a la consommation d'énergie la plus élevée, 530 841 kWh/an. Même une programmation horaire de base peut réduire considérablement les besoins en chauffage. Ensuite, la consommation annuelle chute à 184 004 kWh, ce qui équivaut à une diminution de plus de 346 MWh par an. Cette réduction s'effectue sans modifier les équipements existants ni même perturber l'enveloppe du bâtiment. Les scénarios d'optimisation permettent encore plus de réductions.

La première optimisation conduit à une consommation annuelle de 150 108 kWh, la seconde à 131 419 kWh. Ces résultats révèlent que des améliorations supplémentaires peuvent être réalisées dans la performance énergétique du site lorsqu'il y a une meilleure régulation des températures intérieures et une réduction ciblée de la durée de chauffage.

Toutes ces conclusions valident que la régulation actuellement utilisée est l'un des principaux moteurs pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments étudiés.

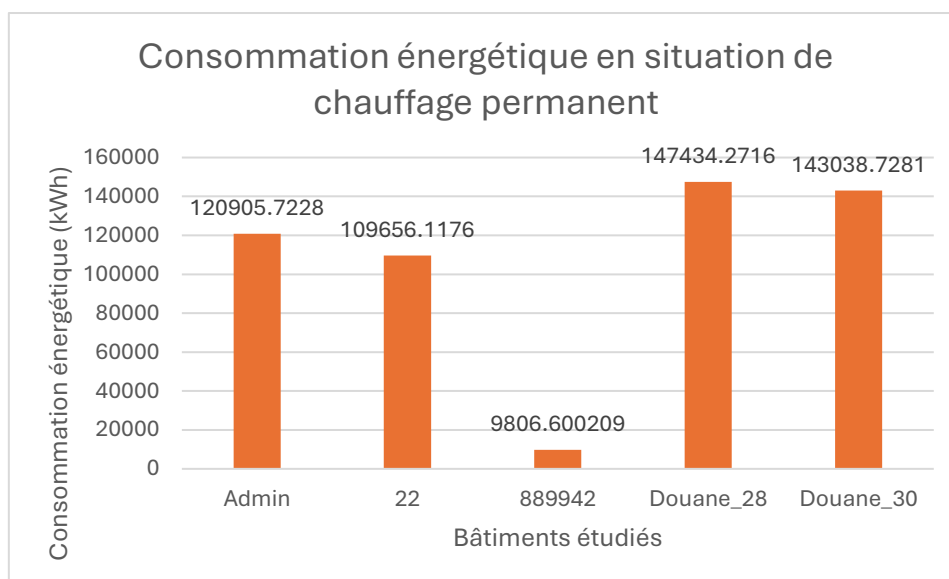


FIGURE 36 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN SITUATION DE CHAUFFAGE PERMANENT

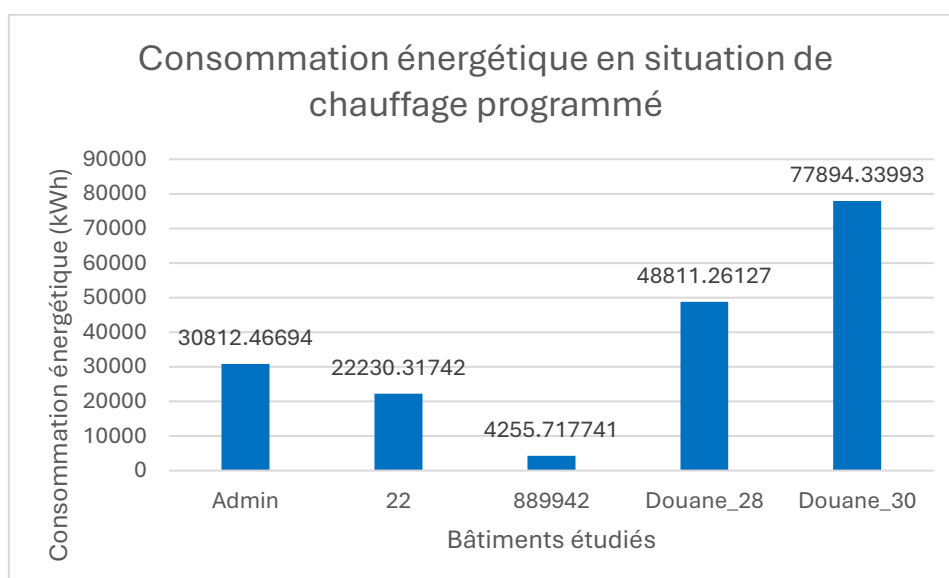


FIGURE 37 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN SITUATION DE CHAUFFAGE PROGRAMMÉ

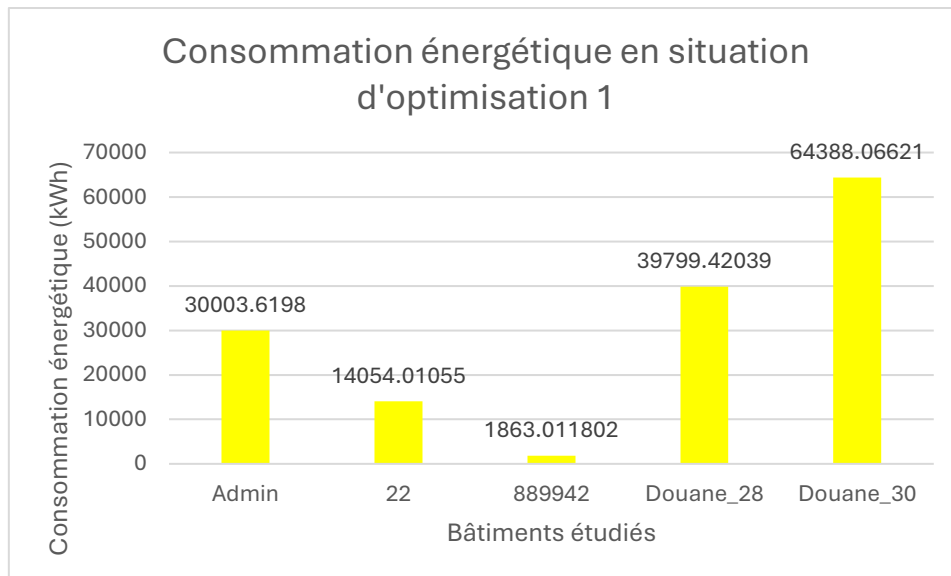


FIGURE 38 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN SITUATION D'OPTIMISATION 1

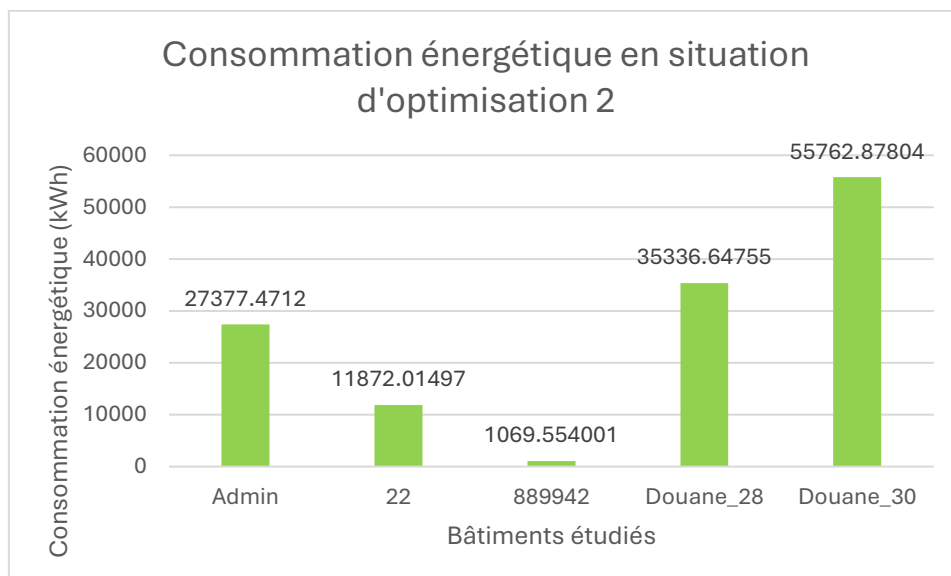


FIGURE 39 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EN SITUATION D'OPTIMISATION 2

Les analyses approfondies montrent clairement que la consommation n'est pas répartie de manière égale entre chaque bâtiment. Le constat est que les bâtiments Sualem 28 et Sualem 30 ont constamment des besoins de chauffage maximaux. Cette situation est principalement due à leur espace chauffé plus grand et à la présence d'un grand nombre de salles de classe qui accueillent quotidiennement des étudiants.

Malgré une occupation régulière, la zone administrative, comprenant les bâtiments Sualem 24 et Sualem 26, montre une consommation plus faible. La raison de cette différence est largement attribuée à des espaces chauffés plus petits et à une configuration des locaux qui s'oriente davantage vers des activités administratives.

En revanche, la performance du bâtiment Sualem 22 est intermédiaire entre les zones administratives et les bâtiments exclusivement dédiés à l'enseignement.

Les mêmes tendances sont observées pour tous les scénarios étudiés. Les optimisations mises en œuvre permettent des économies d'énergie pour chaque bâtiment tout en maintenant le schéma de hiérarchie observé entre les différentes zones thermiques.

b. Économies d'énergie réalisées

Afin de quantifier l'impact des différentes stratégies de régulation étudiées, les consommations annuelles obtenues pour chaque scénario ont été comparées entre elles.

TABEAU 19 - ÉCONOMIES RÉALISÉES ENTRE LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS SIMULÉS

Comparaison	Économie réalisée
Chauffage permanent → Chauffage programmé	65,34%
Chauffage permanent → Optimisation 1	71,72%
Chauffage permanent → Optimisation 2	75,24%
Chauffage programmé → Optimisation 1	18,42%
Chauffage programmé → Optimisation 2	28,58%
Optimisation 1 → Optimisation 2	12,45%

Les données indiquent que la configuration programmable du chauffage elle-même est capable de générer des économies significatives. La consommation annuelle diminue de 65,34 % par rapport au fonctionnement observé lors de la simulation en chauffage permanent. Cette diminution indique que les périodes où le chauffage n'est pas nécessaire, selon l'analyse des données, constituent un gaspillage énergétique de haut niveau.

L'optimisation 1 va encore plus loin et établit une politique de régulation basée sur la température intérieure du bâtiment. En fixant la température de maintenance à 12°C en dehors des périodes d'occupation, les besoins en chauffage sont encore réduits de 18,42% par rapport à l'approche programmée, l'amélioration s'élève à 71,72% par rapport à la situation de chauffage permanent.

L'optimisation 2 est le meilleur scénario de performance énergétique étudié. La réduction de la durée quotidienne de chauffage ainsi que la diminution de la température de consigne entraînent une économie supplémentaire de 12,45 % par rapport à l'optimisation 1. Dans l'ensemble, cette approche peut réaliser une diminution de 75,24 % des besoins en chauffage par rapport au fonctionnement observé avec la simulation du chauffage permanent.

Ces résultats illustrent l'importance de la régulation des bâtiments scolaires. Les économies réalisées sont particulièrement importantes malgré l'absence d'intervention en termes d'enveloppe du bâtiment ou d'équipement de chauffage en tant que tel.

c. Analyse des températures intérieures

La réduction des consommations énergétiques ne peut être considérée comme pertinente que si elle permet de maintenir des conditions de confort acceptables pour les occupants. Les températures de l'air intérieur (TAir) et les températures opératives (TOp) ont donc été analysées pour chacun des scénarios simulés.

TABLEAU 20 - STATISTIQUES ANNUELLES DES TEMPÉRATURES SIMULÉES POUR LE SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PERMANENT

	Admin		22		889942		Douane_28		Douane_30		Moyenne des bâtiments	
Températures (°C)	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative
Moyenne	22.40556983	21.43163584	22.48771217	21.7621973	25.4121903	25.5454803	22.1584137	21.6978866	21.495449	21.0314469	22.791867	22.2937294
Maximum	35.20267113	33.00646602	32.24372991	30.2127772	38.0288512	37.5097529	34.1999127	32.7244844	33.0970873	32.4826505	34.5544504	33.1872262
Minimum	19.76946047	17.91026039	19.28555694	18.3966155	20	19.9093771	20	18.6783863	20	18.6374301	19.8110035	18.7064139
Écart-type	3.169147873	2.700082636	2.768148525	2.17805076	4.64637499	4.53516746	2.82444288	2.51331198	2.37189163	2.4202674	3.15600118	2.86937605
Médiane	20.80363452	20.17423661	21.71845673	21.0714267	24.074926	24.1208432	20.8117208	20.5418176	20	19.8302759	21.4817476	21.14772

TABLEAU 21 - STATISTIQUES ANNUELLES DES TEMPÉRATURES SIMULÉES POUR LE SCÉNARIO DE CHAUFFAGE PROGRAMMÉ

	Admin		22		889942		Douane_28		Douane_30		Moyenne des bâtiments	
Températures (°C)	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative
Moyenne	18.97932567	18.18247911	19.58287352	18.9842753	24.1188685	24.2412482	19.0769373	18.7124884	18.7716926	18.416495	20.1059395	19.7073972
Maximum	35.19579027	32.99914787	32.23060036	30.2000573	38.002036	37.4818665	34.190123	32.7140325	33.0884621	32.4739722	34.5414024	33.1738153
Minimum	10	9.974163583	10	10.5820623	13.7240986	14.4834268	10	10.232852	10	9.64361998	10.7448197	10.9832249
Écart-type	5.655445856	4.923426571	4.764511989	4.06583442	5.7632555	5.66109305	5.16411754	4.64052628	4.72953353	4.56743875	5.21537288	4.77166381
Médiane	20	17.95154816	20	18.6298811	23.135032	23.4003185	20	18.6800204	20	18.9232976	20.6270064	19.5170131

TABLEAU 22 - STATISTIQUES ANNUELLES DES TEMPÉRATURES SIMULÉES POUR LE SCÉNARIO D'OPTIMISATION 1

	Admin		22		889942		Douane_28		Douane_30		Moyenne des bâtiments	
Températures (°C)	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative
Moyenne	18.92552822	18.12869307	19.31636233	18.7287986	23.7294653	23.8484119	18.7749814	18.4167056	18.2724045	17.9372779	19.8037484	19.4119774
Maximum	35.19579027	32.99914787	32.23060036	30.2000573	38.002036	37.4818665	34.190123	32.7140325	33.0884621	32.4739722	34.5414024	33.1738153
Minimum	12	11.74259334	12	12.179716	12.3016099	12.9979827	12	11.9965936	12	11.4869206	12.060322	12.0807613
Écart-type	5.343260278	4.731507341	4.798483075	4.17885085	6.16019807	6.07537928	5.0304934	4.62291805	4.60389146	4.52369069	5.18726526	4.82646924
Médiane	18.38074905	17.3062851	19.05248259	18.2733755	23.1107844	23.3738334	18.122843	17.4911634	18	17.2305553	19.3333718	18.7350425

TABLEAU 23 - STATISTIQUES ANNUELLES DES TEMPÉRATURES SIMULÉES POUR LE SCÉNARIO D'OPTIMISATION 2

	Admin		22		889942		Douane_28		Douane_30		Moyenne des bâtiments	
Températures (°C)	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative	Air	Opérative
Moyenne	18.82260508	18.03072174	19.23989318	18.6553274	23.6035028	23.7213758	18.6131801	18.2572674	17.9581198	17.6355138	19.6474602	19.2600412
Maximum	35.19579027	32.99914787	32.23060036	30.2000573	38.002036	37.4818665	34.190123	32.7140325	33.0884621	32.4739722	34.5414024	33.1738153
Minimum	12	11.69409076	12	12.1435639	12	12.5211765	12	11.9424076	12	11.4542896	12	11.9511057
Écart-type	5.371122414	4.786060687	4.830506181	4.22849678	6.30199909	6.22268734	5.0845997	4.70926027	4.71261968	4.66061026	5.26016941	4.92142307
Médiane	18.16751984	17.23217799	18.94746748	18.225638	23.1057183	23.3710637	17.8671501	17.3526723	17	16.4263256	19.0175711	18.5215755

L'analyse des températures moyennes montre une diminution progressive des températures intérieures lorsque les stratégies de régulation deviennent plus restrictives.

Dans le scénario de chauffage permanent, il génère une température moyenne de l'air de 22,79°C pour tous les bâtiments. La température opérative moyenne par jour typique est de 22,29°C. Les valeurs sont élevées pour les bâtiments scolaires et démontrent un fonctionnement normal du chauffage même lorsque les bâtiments ne sont pas occupés.

L'application de l'horaire journalier réduit la température moyenne de l'air à 20,11°C ainsi que la température opérative moyenne à 19,71°C. Cependant, bien que cette valeur diminue d'environ 2,7°C, les bâtiments ont des températures suffisamment cohérentes avec l'utilisation quotidienne. Cette baisse explique en grande partie les économies observées précédemment.

L'optimisation 1 réduit encore un peu plus les températures moyennes. Les températures sont de 19,80°C et 19,41°C pour l'air et la température opérative respectivement. Bien que cette réduction soit encore relativement faible, les économies d'énergie continuent d'augmenter de manière drastique.

Enfin, la température la plus basse est trouvée dans l'optimisation 2, avec une température moyenne de l'air de 19,65°C, tandis que la température opérative moyenne est de 19,26°C. Malgré cette nouvelle diminution, les températures restent proches des valeurs généralement recommandées dans les locaux d'enseignement.

Il est également intéressant d'étudier les températures minimales. Dans les scénarios optimisés, un certain nombre de bâtiments approchent parfois des températures autour de 12°C, donc la température minimale de maintenance qui sous-tend les hypothèses de simulation. Ces résultats valident l'utilisation efficace de la stratégie de régulation adoptée.

Les écarts types des deux scénarios sont proches l'un de l'autre, ce qui suggère que les optimisations induisent peu d'instabilité thermique dans les bâtiments. Ainsi, quelle que soit la réduction de consommation atteinte, les fluctuations de température sont contrôlées.

Dans l'ensemble, il semble qu'il soit possible de réduire considérablement les besoins énergétiques du site, tout en maintenant des conditions thermiques cohérentes avec l'occupation des bâtiments. Comme pour l'optimisation 1, la comparaison entre les différents scénarios démontre un compromis fascinant entre confort et consommation, où des économies substantielles peuvent être réalisées sans abaisser trop drastiquement la température intérieure dans les deux cas.

d. Comparaison avec les relevés sur site

➤ Comparaison des consommations énergétiques

Le relevé sur site a permis de connaître les consommations de gaz, en kWh, de chaque bâtiment sur plusieurs années. Pour cela, les consommations en m³ étaient fournies et il a fallu les multiplier par 11,6 étant donné que le gaz de la ville de Liège est un gaz de type H, un gaz riche en pouvoir calorifique. (SPF Économie, 2025)

TABLEAU 24 - RELEVÉ DES CONSOMMATIONS DE GAZ SUR PLUSIEURS ANNÉES

	Sualement 22	Sualement 24	Sualement 26	Sualement 28 - 30	Total (kWh)
2017 – 2018	154 270,604	28 613,14		151 079,212	333 962,956
2018 – 2019	174 396,14	32 537,304	51 195,092	212 431,264	470 559,8
2019 – 2020	362 779,676	40 505,576	43 527,028	152 032,616	598 844,896
2020 – 2021	181 506,824	48 828,576	62 080,532	264 122,488	556 538,42
2021 – 2022 ²⁰	235 008,924	35 068,54	42 888,1	270 772,884	545 138,448
2022 – 2023	241 482,768	30 361,492	40 095,748	215 389,96	527 329,968
2023 – 2024	281 102,452	30 238,416	36 820,372	31 651,572 ²¹	379 812,812

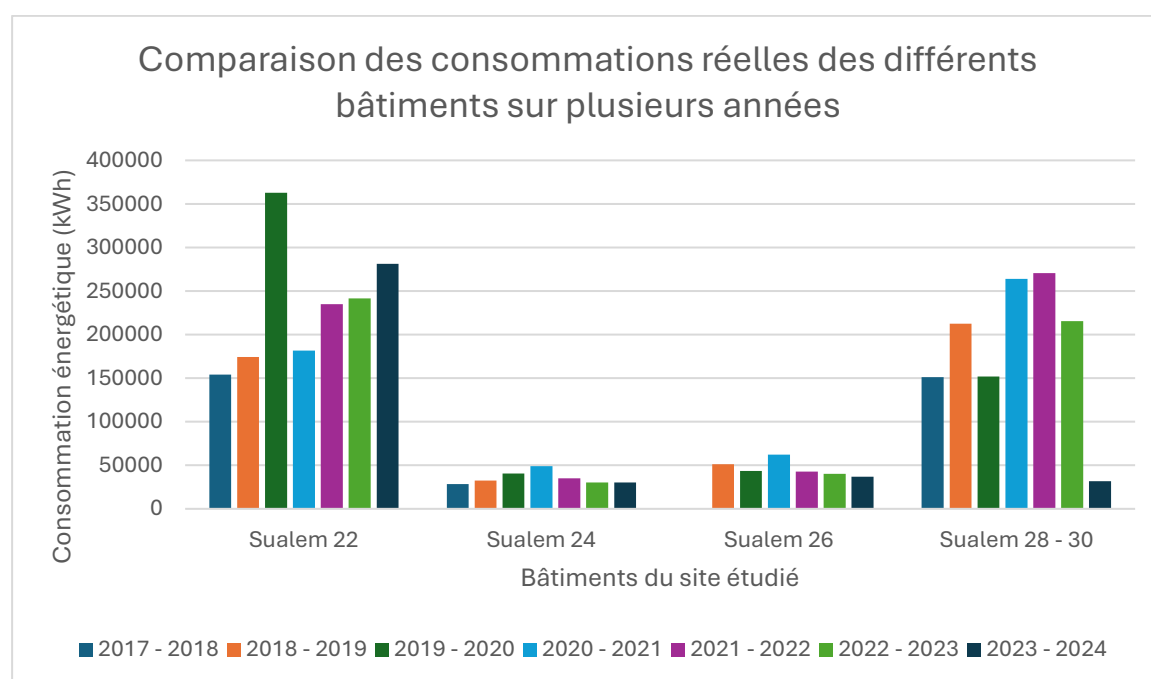


FIGURE 40 - COMPARAISON DES CONSOMMATIONS RÉELLES DES DIFFÉRENTS BÂTIMENTS SUR PLUSIEURS ANNÉES

²⁰ Les années scolaires 2020-2021 et 2021-2022 sont les deux années touchées par le confinement lié au coronavirus.

²¹ Il y a eu un changement de chaudière cette année là.

Il est donc possible de comparer les scénarios de simulation avec les données des consommations des différentes années.

TABEAU 25 - COMPARAISON DES DONNÉES DE RELEVÉS AVEC LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS POUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

	2022 - 2023	2023 - 2024	Chauffage permanent	Chauffage programmé	Optimisation 1	Optimisation 2
Sualement 22	241 482,768	281 102,452	119 462,718	26 486,035	15 917,023	12 941,569
Sualement 24	30 361,492	30 238,416	60 452,861	15 406,233	15 001,81	13 688,735
Sualement 26	40 095,748	36 820,372	60 452,861	15 406,233	15 001,81	13 688,735
Sualement 28 – 30	215 389,96	31 651,572	290 473	126 705,601	104 187,486	91 099,526
Total	527 329,968	379 812,812	530 841,44	184 004,1	150 108,13	131 418,57

Pour être en mesure de comparé les données relevées et les données des simulations, les données des bâtiments simulées ont du être exposées différemment. Pour Sualement 22, les données de la zone « 22 » et de la zone « 889942 » ont été additionnées, pour Sualement 24 et Sualement 26, les données de la zone « Admin » ont été divisées par deux et pour Sualement 28 – 30, les données des zones « Douane_28 » et « Douane_30 » ont été additionnées.

Grâce au Tableau 25, il est possible de voir que la simulation « chauffage permanent » se rapproche assez bien de la consommation énergétique de l’année 2022 – 2023. Et la programmation théorique donnée par l’établissement, « chauffage programmé », reste assez loin de la consommation énergétique des années précédentes. Cette simulation est quasiment la moitié de la consommation énergétique de l’année 2023 – 2024. Les deux optimisations proposées permettent donc de faire diminuer les consommations énergétiques de tous les bâtiments étudiés. L’optimisation 1 permet une réduction de 71,5% par rapport à l’année 2022 – 2023 et de 60,5% par rapport à l’année 2023 – 2024, alors que l’optimisation 2 permet une réduction de 75,1% et 65,4% pour les mêmes années.

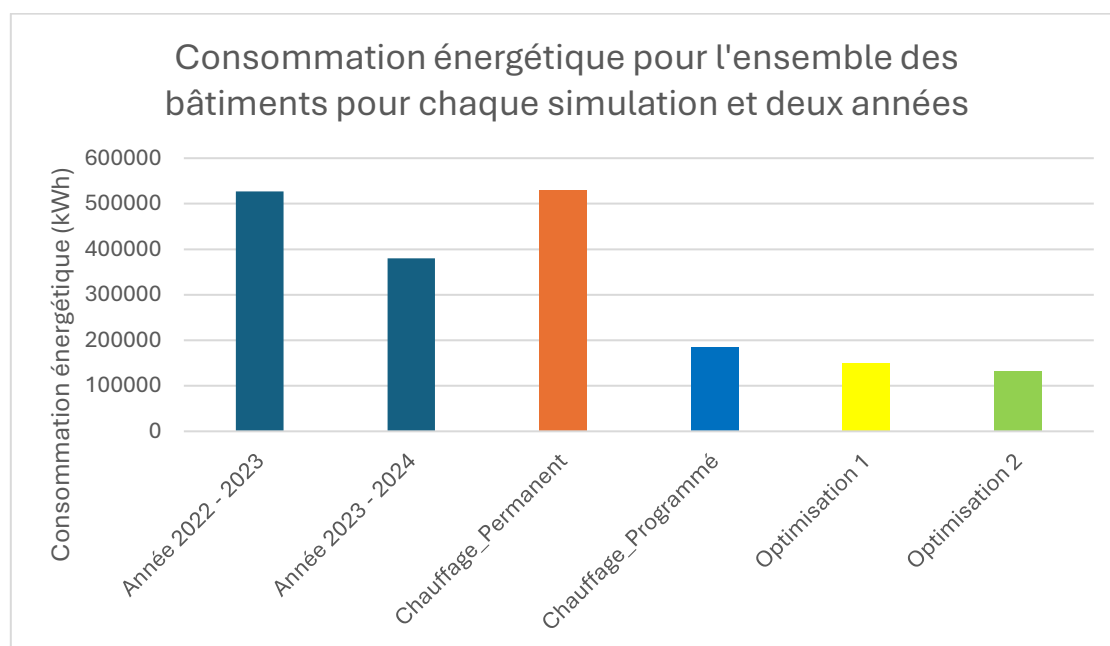


FIGURE 41 - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE POUR L'ENSEMBLE DES BÂTIMENTS POUR CHAQUE SIMULATION ET DEUX ANNÉES

Optimisations non quantifiables à l'heure actuelle

I. Optimisation basée sur l'occupation réelle des locaux

Sur la base de l'analyse des données et des résultats de simulation, la régulation du chauffage est un levier important pour réduire la consommation d'énergie. Cependant, les optimisations étudiées ci-dessus traitaient encore chaque bâtiment comme un bâtiment homogène unique, alors que le niveau de demande peut varier considérablement en fonction de son occupation dans les différentes unités.

Une autre possibilité est de déployer une gestion intelligente du chauffage en fonction de l'occupation réelle des pièces. Cette amélioration dépendrait de l'emploi du temps officiel de l'établissement pour reconnaître automatiquement les pièces utilisées dans la journée. Il pourrait y avoir des informations de planification intégrées dans le logiciel de gestion lié aux installations techniques du bâtiment.

Chaque pièce aurait une vanne thermostatique motorisée et contrôlée automatiquement. Lorsque cet emploi du temps suggère qu'une pièce est occupée, le chauffage serait activé pour atteindre la température de confort requise avant l'entrée des occupants. À l'inverse, les locaux inoccupés resteraient en température réduite afin de limiter les consommations inutiles.

Cette stratégie est particulièrement importante dans les bâtiments scolaires, où certaines salles peuvent être occupées seulement quelques heures par semaine et d'autres pas du tout.

Afin de maintenir ce niveau de flexibilité, l'agent de maintenance devrait également avoir la possibilité de fournir une pièce chaude de temps en temps si l'emploi du temps changeait de manière inattendue. Cela pourrait potentiellement être fait à plus long terme avec des détecteurs de présence, ou une plateforme de gestion de bâtiment, pour fournir des instructions de chauffage automatiquement en fonction de l'utilisation réelle du site.

Bien qu'aucune quantification n'ait pu être réalisée dans le cadre de ce mémoire, mais ce processus pourrait réduire considérablement la consommation d'énergie tout en préservant les niveaux de confort thermique des occupants.

II. Sensibilisation des occupants à la performance énergétique des bâtiments

Les simulations menées pour ce travail indiquent que la régulation du chauffage pourrait considérablement réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments étudiés. Cependant, la performance réelle d'un bâtiment est également largement déterminée par les actions de ses occupants. Une approche technique de haute performance devient quelque peu inefficace si les utilisateurs manquent de sensibilisation aux problèmes de consommation d'énergie ou adoptent un comportement inapproprié.

Dans ce contexte, un matériel éducatif sur la *Performance Énergétique des Bâtiments* (PEB) a été rédigé dans le cadre de ce mémoire. L'objectif de cet exercice est d'accroître l'attention des étudiants sur l'énergie dans les bâtiments et d'illustrer l'effet tangible sur leur consommation d'énergie des décisions prises chaque jour. (Vandael, 2026)

Le support pédagogique regroupe les notions essentielles liées à la PEB, à l'isolation thermique, à la ventilation, aux systèmes techniques et aux comportements des occupants. De plus, divers exemples concrets des bâtiments discutés sont également inclus pour relier la théorie aux conditions authentiques observées dans l'école et dans ses bâtiments.

En outre, certaines activités interactives ont été incluses pour impliquer davantage les étudiants dans la ressource éducative. Ces activités comprennent des analyses de bâtiments, des études de cas, des jeux et un quiz de synthèse.

Ce type d'action pourrait également être possible lors d'une journée de sensibilisation, ou pourrait être introduit dans des cours spécifiques de sciences, d'environnement ou de développement durable. Cela pourrait être une leçon animée par un éducateur expert dans ces sujets, un conseiller PEB ou un intervenant travaillant dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments

À l'avenir, cela contribuerait à un changement à long terme du comportement des occupants qui soit durable. Les étudiants qui émergent aujourd'hui seront les propriétaires, locataires, gestionnaires ou décideurs de demain. Par conséquent, la diffusion de ces connaissances peut bénéficier à des bâtiments au-delà de ceux couverts dans cette étude.

Le cours serait divisé en quatre grands chapitres²² :

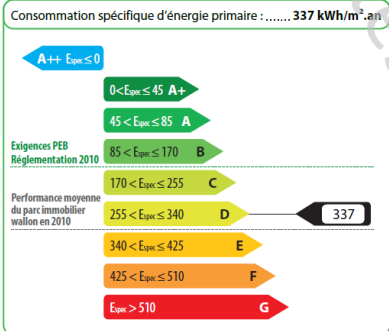
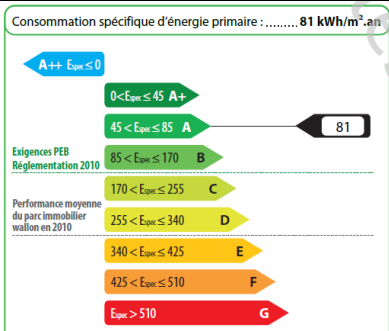
- 1) Pourquoi l'énergie est devenue un enjeu majeur ?
- 2) Comprendre le fonctionnement d'un bâtiment
- 3) Comprendre un certificat PEB
- 4) Réduire les consommations d'énergie dans un bâtiment

²² Un résumé du cours est disponible en Annexe, voir « Résumé du cours sur la PEB »

a. Exemples d'activités proposées

➤ Chapitre 1

TABLEAU 26 - EXEMPLE D'ACTIVITÉ POUR LE CHAPITRE 1

Situations	Laquelle consommera le plus d'énergie ?	Dans laquelle préféreriez-vous vivre ?	Laquelle coûtera probablement le plus cher à chauffer ?	Pourquoi les banques ou les acheteurs regardent-ils de plus en plus la PEB ?
Consommation spécifique d'énergie primaire : 337 kWh/m².an  FIGURE 42 - EXEMPLE TIRÉ D'UN CERTIFICAT PEB TEST (VERSLYPE & VANDAELE, CERTIFICAT PEB DE BASE POUR UN TRAVAIL DE FIN DE BACHELIER, 2023)				
Consommation spécifique d'énergie primaire : 81 kWh/m².an  FIGURE 43 - EXEMPLE TIRÉ D'UN CERTIFICAT PEB TEST (2) (VERSLYPE & VANDAELE, CERTIFICAT PEB DE RÉNOVATION NON ÉCOLOGIQUE POUR UN TRAVAIL DE FIN DE BACHELIER, 2023)				

➤ Chapitre 2

Observer le schéma d'une maison et essayer d'identifier les endroits où la chaleur risque de s'échapper le plus rapidement. Demander ensuite aux élèves d'expliquer pourquoi certaines zones perdent davantage de chaleur que d'autres.

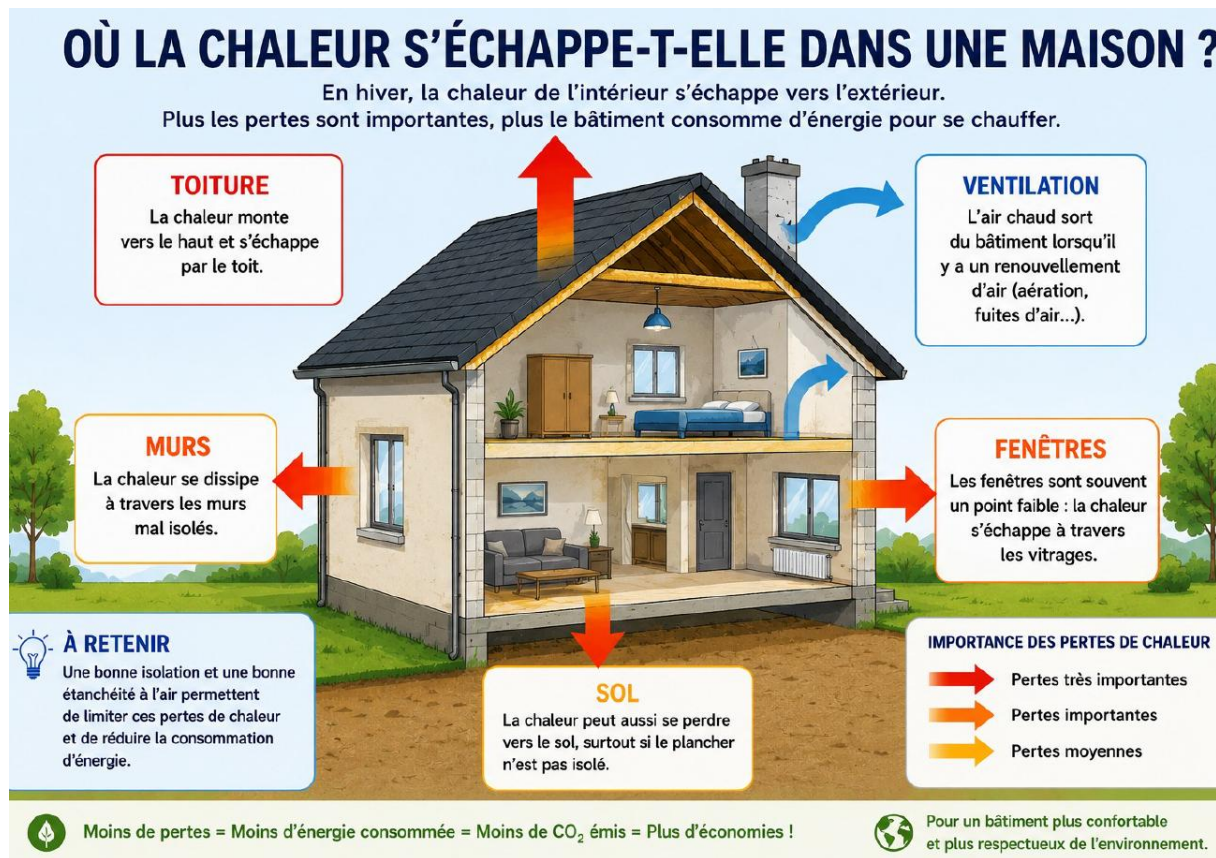


FIGURE 44 - OÙ LA CHALEUR S'ÉCHAPPE-T-ELLE DANS UNE MAISON ? (OPENAI, 2026)

➤ Chapitre 3

Observer la première page du certificat PEB et essayer d'identifier les informations suivantes :

1. La classe énergétique
2. La consommation du bâtiment
3. Le type de logement
4. Les systèmes énergétiques mentionnés dans le certificat.

➤ Chapitre 4

Les élèves travaillent en groupe sur un bâtiment fictif présenté par le professeur. À partir des informations données (type de fenêtres, isolation, chauffage, ventilation...), ils doivent :

- Identifier les points faibles du bâtiment,
- Proposer plusieurs améliorations,
- Expliquer quelles solutions auront le plus grand impact sur la consommation énergétique.

III. Adaptation du calendrier scolaire aux enjeux énergétiques

Une troisième ligne de pensée tournée vers l'avenir concerne la manière même dont le calendrier scolaire est structuré. Les résultats obtenus dans ce travail démontrent que le chauffage doit être considéré comme une grande partie des besoins énergétiques des bâtiments scolaires. Cependant, les longues vacances d'été correspondent exactement à la période de l'année où les besoins en chauffage sont les plus faibles.

Dans un monde caractérisé par le changement climatique, il pourrait être utile de revoir plus complètement l'année scolaire pour mieux répondre aux besoins énergétiques futurs. Une alternative serait de prolonger les périodes de vacances lorsque la température devient très froide et de raccourcir un peu les vacances d'été. Cependant, le changement de calendrier académique ne relève pas du pouvoir décisionnel de chaque école, mais plutôt de la *Fédération Wallonie – Bruxelles*, et même d'une décision nationale ou européenne en fonction de l'ampleur que cette modification aurait.

Ce type d'organisation réduirait théoriquement les besoins en chauffage à des moments où les bâtiments sont vides. Cela pourrait également atténuer certains défis liés aux événements météorologiques hivernaux extrêmes, comme les fortes chutes de neige ou les vagues de froid qui pourraient entraver l'accès aux installations scolaires.

Cette approche présente néanmoins plusieurs limites. Les températures estivales étant appelées à augmenter au cours des prochaines décennies, une occupation plus importante des bâtiments en été pourrait accroître les risques de surchauffe. Certains locaux pourraient alors nécessiter des stratégies de refroidissement passif ou actif afin de garantir des conditions de confort acceptables.

Bien que cette évolution dépasse largement le cadre de la gestion d'une seule école, elle reflète la nécessité d'intégrer la dimension énergétique dans l'aménagement global d'une société. Les modifications du calendrier académique récentes montrent bien que son adaptation est possible lorsqu'il est possible de justifier des objectifs sociétaux et pédagogiques.

Discussion

I. Apport de l'analyse des données dans la construction du modèle

L'une des caractéristiques originales de cette étude est l'utilisation des données comme point de départ pour la modélisation énergétique. Non limitée à la théorie de théorie, et non fournie par les informations des questionnaires de bâtiments, l'approche est directement liée à l'observation sur le terrain elle-même.

L'examen des données collectées a mis en évidence plusieurs éléments qui n'auraient pas pu être identifiés sans cette phase d'analyse. Les températures enregistrées pendant les nuits, les week-ends et les vacances scolaires ont notamment révélé que certains bâtiments étaient encore chauffés même lorsqu'ils étaient vides. Ces réflexions ont soulevé la question du fonctionnement théorique des installations et ont servi de base pour définir un scénario de chauffage permanent.

Les périodes de fonctionnement de jour (7h-18h) et de nuit (18h-7h) ont également apporté un éclairage supplémentaire sur le fonctionnement des installations. Les différences relativement faibles entre la température moyenne de jour et de nuit dans quelques pièces, au moins, indiquent que le chauffage nocturne est peu réduit. À l'inverse, des variations plus importantes pourraient démontrer une meilleure adéquation des performances de chauffage avec les heures réelles d'occupation.

Au cours de cette période d'analyse, un autre aperçu de l'état des différents bâtiments sur le site a également été fourni. Les niveaux de température observés ont montré certaines différences entre les bâtiments exploités mais aussi au sein d'un même bâtiment. Cette information a été utilisée pour construire des profils d'occupation relativement représentatifs parallèlement à l'élaboration d'hypothèses cohérentes sur les périodes de fonctionnement des systèmes de chauffage.

Par conséquent, l'analyse des données est une partie significative du travail effectué. Elle a permis de relier les observations de terrain à la modélisation énergétique et d'assurer une meilleure cohérence entre les observations de terrain et les hypothèses utilisées dans les simulations. Cela a permis d'identifier les principaux leviers qui pourraient être améliorés même avant que les simulations énergétiques ne soient lancées dans le programme pour cette phase de conception.

II. Analyse critique des résultats obtenus

Les simulations effectuées soulignent l'effet de la régulation sur la consommation d'énergie dans ces bâtiments. Le scénario de chauffage permanent génère donc 530 841 kWh de consommation énergétique annuelle, tandis qu'avec le scénario de chauffage programmé, sa valeur est réduite à 184 004 kWh. Ainsi, la modification de base de la régulation dans un tel cas entraînera une réduction de 65,34% de la consommation de chauffage.

À première vue, cette réduction peut sembler très importante, mais elle correspond aux observations issues de l'analyse des données. Les données révèlent que le chauffage était actif pendant de longues périodes lorsque les bâtiments étaient peu ou pas occupés. L'élimination de ces périodes de chauffage excessives explique généralement les économies réalisées.

Les deux scénarios d'optimisation entraînent des réductions supplémentaires. Pour l'optimisation n°1, la consommation annuelle est de 150 108 kWh, tandis que pour l'optimisation n°2, la consommation annuelle est réduite à 131 419 kWh. Ces résultats démontrent que la régulation en fonction de la température intérieure et la réduction de la température pendant les périodes non occupées sont des voies d'amélioration particulièrement propices.

Cependant, ces résultats doivent être considérés avec la plus grande prudence. Les économies calculées sont conformes aux attentes compte tenu des hypothèses du modèle de simulation. La consommation simulée est affectée par certaines hypothèses telles que le taux d'infiltration, les profils d'occupation, les gains internes, etc. Ainsi, cela doit être traité comme une estimation du potentiel d'amélioration des performances, et non comme une prédiction de la consommation future.

Une grande partie de la consommation énergétique actuelle est liée à la gestion du chauffage plutôt qu'aux caractéristiques inhérentes des bâtiments. Cela est particulièrement intéressant alors que certaines rénovations importantes nécessitent généralement de gros investissements en capital et sont un processus long à mettre en œuvre.

III. Choix de l'optimisation la plus pertinente

Parmi les scénarios étudiés, l'optimisation 2 est la plus performante sur le plan énergétique avec un besoin de chauffage inférieur de 75,24% par rapport au scénario de chauffage permanent. Mais le seul critère énergétique ne peut pas suffire à sélectionner la bonne solution. Le confort des occupants, la facilité d'exécution et l'acceptation des mesures proposées doivent également être pris en compte.

L'analyse de leurs températures intérieures indique que dans les deux scénarios d'optimisation, des conditions thermiques raisonnables sont maintenues et restent globalement compatibles avec l'occupation des bâtiments. Cependant, l'optimisation 2 entraîne des températures plus basses et une période de chauffage plus courte pour la journée. De cette façon, les occupants doivent s'adapter un peu plus à ce processus.

D'un autre côté, l'optimisation 1 est déjà capable de réaliser une réduction de consommation de 71,72% tout en maintenant la température moyenne à près de 20°C à l'intérieur des bâtiments. Ce scénario semble particulièrement intéressant comme compromis entre confort thermique et performance énergétique.

L'optimisation 2 pourrait être envisagée à long terme, à condition que sa mise en œuvre soit accompagnée d'un processus de sensibilisation des occupants. Cette approche se rapproche du principe, l'« opération pull », qui met l'accent sur l'adaptation vestimentaire plutôt que sur l'augmentation progressive du chauffage. Une telle stratégie implique cependant un changement progressif des habitudes et un engagement des utilisateurs envers les objectifs énergétiques visés.

D'après les résultats observés, l'optimisation 1 est la solution la plus appropriée pour le site analysé. Elle permettrait de réaliser d'importantes économies d'énergie tout en imposant des contraintes limitées aux occupants.

IV. Limites de l'étude

Comme tout travail de modélisation et d'analyse, cette étude présente plusieurs limites qui doivent être prises en considération lors de l'interprétation des résultats obtenus.

a. Limites liées à la littérature disponible

L'identification des références bibliographiques avec une approche similaire à celle développée dans ce mémoire a été l'une des premières difficultés rencontrées au cours de ce travail. Alors que divers travaux étudient la performance énergétique dans les bâtiments, la simulation thermique dynamique ou l'analyse des données de suivi, peu de travaux abordant ces facteurs ensemble dans un contexte scolaire ont pu être identifiés lors de la recherche bibliographique menée.

La situation n'implique pas nécessairement qu'aucun de ces travaux n'existe. Au contraire, elle indique que le nombre de références directement comparables à l'approche développée dans cette étude n'était pas significatif. L'absence de comparaison restreint ainsi les possibilités de comparer directement les résultats obtenus avec ceux d'autres travaux similaires.

b. Limites liées aux campagnes de mesure

Les résultats présentés dans ce mémoire sont en partie basés sur les mesures effectuées lors de la campagne de mesures menée sur le site étudié. Bien que ces mesures aient permis d'avoir une bonne vue d'ensemble du fonctionnement des bâtiments, quelques lacunes doivent être mentionnées.

Les durées de mesure sont relativement limitées au regard de tous les phénomènes pouvant influencer le comportement thermique d'un bâtiment. Une année entière de suivi permettrait d'observer toutes les saisons et d'obtenir une image plus complète du fonctionnement réel des installations.

Un temps d'étude plus long aurait également permis une meilleure caractérisation de certains comportements spécifiques détectés lors de l'analyse des données, notamment pendant les périodes de transition entre les saisons ou lors d'événements climatiques exceptionnels.

De plus, le nombre et la répartition des capteurs disponibles affectent la précision de l'analyse. Plus de capteurs installés ou maintenus pendant une durée plus longue pourraient mieux décrire le comportement thermique des différents bâtiments.

c. Limites liées à la caractérisation des bâtiments

En fait, la qualité d'un modèle énergétique peut souvent dépendre grandement de la précision des données à partir desquelles le bâtiment étudié est décrit. Dans ce travail, des mesures spécifiques n'ont pas été obtenues, et certains attributs ont dû être estimés.

Le taux d'infiltration en est un cas typique. En l'absence de mesures d'étanchéité à l'air, un taux constant de 0,6 renouvellements d'air par heure a été utilisé pour tous les bâtiments. Bien que cette hypothèse soit cohérente, elle ne reflète pas nécessairement le comportement réel de chaque bâtiment.

Un test d'infiltrométrie, de type « *Blower Door Test* », aurait également permis une détection plus précise des infiltrations d'air et amélioré la fiabilité du modèle. En général, des campagnes de caractérisation supplémentaires des bâtiments seraient importantes afin de réduire les incertitudes associées aux simulations effectuées.

d. Limites liées aux données de mesure

Les analyses effectuées dans ce travail proviennent des données de plusieurs capteurs appliqués sur ce site. Mais malgré leur niveau de détail élevé, ces instruments ne sont pas exempts d'incertitudes.

Certains changements peu fréquents de la température enregistrée sont susceptibles de correspondre à des phénomènes réels, y compris une fenêtre ouverte, l'occupation inhabituelle d'une pièce ou des modifications de la régulation. Cependant, il ne peut être totalement exclu que des erreurs de mesure ou des valeurs aberrantes soient produites par les capteurs.

Comme tous les systèmes de surveillance, l'équipement utilisé a une précision limitée et peut être affecté par l'endroit où il est monté, son étalonnage ou par des perturbations de l'environnement. Ces incertitudes doivent être prises en compte lors de l'interprétation des résultats.

e. Limites liées à la modélisation

Le modèle développé dans *TRNBuild* repose sur un ensemble d'hypothèses nécessaires à la réalisation des simulations. Certaines simplifications ont été introduites pour maintenir un niveau de complexité compatible avec les objectifs de l'étude.

Les profils d'occupation, les gains internes et les comportements des occupants ont été définis sur la base des informations disponibles et des observations faites sur le site. Ces hypothèses permettent une représentation cohérente du fonctionnement du bâtiment mais ne peuvent pas reproduire parfaitement la diversité des comportements réels observés quotidiennement.

De plus, les simulations ont été réalisées en utilisant des données météorologiques de la station d'Uccle. Bien que cette station soit une référence couramment utilisée en Belgique, elle ne reflète pas parfaitement les conditions climatiques locales rencontrées à Liège. Par conséquent, certaines différences peuvent exister entre les conditions simulées et les conditions réelles observées sur le site étudié.

Enfin, les bâtiments Sualem 24 et Sualem 26 ont été regroupés dans la même zone thermique lors de la modélisation. Cette simplification aide à limiter la complexité du modèle mais réduit la précision de l'analyse qui peut être menée à l'échelle de chacun de ces bâtiments.

f. Limites liées à l'économie

De plus, l'étude réalisée dans ce mémoire se concentre principalement sur l'évaluation énergétique des bâtiments, afin d'identifier et d'évaluer les possibilités de progrès. Les solutions proposées n'ont pas pu faire l'objet d'une analyse économique approfondie. Pour développer une estimation des coûts sur une régulation plus intelligente des systèmes de chauffage, un chauffagiste a été contacté. Cependant, il n'y avait pas eu de réponse lors de la rédaction de ce mémoire. Par conséquent, le montant des investissements nécessaires n'a pas pu être mesuré précisément, ni le temps de retour sur investissement des différentes mesures calculé.

V. Perspectives de l'étude

Les résultats obtenus de ce travail démontrent que la régulation du chauffage est un levier important pour réduire la consommation d'énergie sur le site étudié. Néanmoins, certains mécanismes d'amélioration supplémentaires doivent être explorés pour améliorer les résultats obtenus.

La première perspective concerne une validation des scénarios simulés dans un cadre expérimental. La mise en œuvre sur le terrain de l'optimisation 1 peut aider à comparer les économies estimés par le modèle énergétique développé.

Une deuxième perspective est de fournir une meilleure caractérisation des bâtiments. Plus de mesures pourraient être effectuées, par exemple tester l'étanchéité à l'air ou exécuter une campagne de surveillance d'un an, ce qui affinera les hypothèses du modèle et permettra des simulations plus précises.

Enfin, les optimisations non quantifiables fournies sont également des pistes prometteuses pour prolonger cette réflexion. La gestion intelligente pièce par pièce, la sensibilisation des occupants par le biais du cours PEB, ainsi que l'adaptation du calendrier scolaire sont des sujets que des études spécifiques peuvent explorer pour évaluer plus précisément leur impact énergétique potentiel.

Conclusion

Ce mémoire propose d'évaluer si l'analyse de la consommation d'énergie et l'optimisation de la régulation des systèmes techniques pourraient réduire la consommation d'énergie d'un site scolaire d'au moins 15%, sans rénovations majeures. Pour contrer cela, une étude a été réalisée sur plusieurs bâtiments de l'école *Sainte-Véronique* à Liège dans le cadre du projet européen *CERTEB_OPT*.

Les données de l'étude proviennent d'une campagne de mesures menée de décembre 2025 à mars 2026. L'analyse de la température et de l'humidité relative de diverses salles a fourni une indication précise du comportement thermique réel des bâtiments et de plusieurs défaillances de régulation du chauffage. Les résultats ont particulièrement souligné le maintien des salles à des températures élevées pendant les nuits, les week-ends et les vacances scolaires. Des observations, il peut être déduit que les installations ne correspondent pas toujours à la demande existante, ce qui pourrait être amélioré, il faut également souligner qu'il y a des domaines à améliorer dans la gestion des systèmes techniques.

Ces données ont été utilisées pour développer un modèle de simulation énergétique dynamique dans *TRNBuild*. Cela signifiait que l'encodage des systèmes de chauffage, des profils d'occupation et des gains internes a été effectué, permettant une description cohérente du fonctionnement sur le terrain. Cette méthodologie, fondée sur des données empiriques, est l'une des principales contributions de ce travail et aide à s'écarter des hypothèses purement théoriques souvent trouvées dans les études énergétiques.

Les simulations effectuées montrent qu'en améliorant la régulation des chaudières et les horaires de fonctionnement, la consommation d'énergie pour l'ensemble du site pourrait diminuer de manière significative. Les résultats des simulations indiquent que l'objectif de réduction de 15% est atteignable sans intervention lourde sur l'enveloppe du bâtiment. Les gains potentiels sont principalement dus à une meilleure adéquation entre le fonctionnement des installations et l'occupation des locaux.

La comparaison entre les consommations simulées et les consommations historiques du site a également confirmé les hypothèses faites pour la modélisation. Les résultats indiquent que le scénario de référence basé sur le chauffage permanent se rapproche des consommations réelles observées au cours de l'année 2022 – 2023. En revanche, le scénario de chauffage programmé selon les horaires théoriques fournis par l'établissement a entraîné une consommation nettement inférieure à celle effectivement enregistrée. Cet écart corrobore l'observation de l'analyse de suivi qui souligne le fonctionnement du chauffage pendant certaines périodes non occupées. Il met également en évidence la nécessité de fonder les modèles énergétiques sur des données réelles qui décrivent fidèlement le fonctionnement réel des bâtiments.

En plus des économies d'énergie, cette étude indique l'intérêt de la surveillance énergétique pour la prise de décision. Les analyses ont permis de repérer des situations qui n'auraient pas été détectées simplement à partir de dossiers papier ou de programmations théoriques. Elle illustre en outre la nécessité d'une gestion active des bâtiments scolaires, où les opérations exercent fréquemment un impact profond sur la consommation finale.

Mais il y a aussi des inconvénients qui doivent être mentionnés. Les simulations reposent sur plusieurs hypothèses liées à l'occupation des salles, aux gains internes ou au comportement des occupants. De plus, le temps de mesure qui a été testé est limité dans le temps et n'inclut pas une année complète de fonctionnement. Les résultats représentent donc une approximation du potentiel d'amélioration, et pas plus qu'une prévision directe de la demande future.

Enfin, ce travail introduit également des perspectives intéressantes. Une surveillance sur une période plus longue améliorerait les modèles proposés et validerait les véritables économies dérivées de la mise en œuvre des améliorations proposées. L'incorporation de régulations selon la température intérieure, l'ajustement des horaires de chauffage pour l'occupation réelle des bâtiments, ou des actions de sensibilisation parmi les occupants sont également des moyens prometteurs pour réduire encore la consommation d'énergie sur le site.

De cette manière, ce mémoire montre que l'exploitation de données réelles et la simulation énergétique dynamique sont des moyens valables pour améliorer la performance énergétique des bâtiments scolaires existants. Avant de nécessiter des rénovations coûteuses, une meilleure compréhension du fonctionnement des installations et une optimisation de leur régulation peuvent déjà réduire considérablement la consommation d'énergie.

Bibliographie

- Adobe. (2026). *Qu'est-ce qu'un fichier CSV ?* Consulté le Juin 3, 2026, sur Adobe: <https://www.adobe.com/fr/acrobat/resources/document-files/text-files/csv-file.html?msockid=0bd8f3f6b92661b018a7e701b86e6013>
- Cassilde, S. (2019). *Performance énergétique du parc de bâtiments résidentiels en Wallonie*. Charleroi: Centre d'Études en Habitat Durable de Wallonie (CEHD). Consulté le Mai 2026, sur <https://shs.hal.science/halshs-02909052v1>
- Clémence, R. W. (2024, Juin 7). *A quoi sert une sonde extérieure ?* Consulté le Juin 1, 2026, sur izi by edf: <https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/a-quoi-sert-une-sonde-exterieure>
- Clermont, A. (2015). *Contribution des bâtiments institutionnels dans l'atteinte de l'indépendance énergétique du Québec et dans la lutte contre les changements climatiques*. Centre universitaire de formation en environnement et développement durable. Sherbrooke: Université de Sherbrooke. Consulté le Mai 2026
- Cyx, W., Renders, N., Van Holm, M., & Verbeke, S. (2011). *IEE TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*. Mol: VITO.
- Dias Pereira, L., Raimondo, D., Corngati, S., & Gameiro da Silva, M. (2014, Août). Energy consumption in schools – A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 911-922.
- Enseignement Catholique. (2025, Janvier 30). Gestion des infrastructures. Marche-en-Famenne.
- Équipe BEMS. (2026, Mars 1). Relevé consommation Sainte-Véronique. Liège, Liège, Belgique: Université de Liège. Consulté le 2026
- European Commission. (2019). *Directive (EU) 2019/944 on common rules for the internal market for electricity*.
- European Commission. (2020). *A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*. Récupéré sur https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en
- European Commission. (2020). *Assessment of the Member States' progress in implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. Publications Office of the European Union.
- Fontaine² architectes. (2019, Septembre 19). Bâtiments des douanes . *F25.00 V0 - Plans Bâtiment 22 - Douanes - Fontaine*, 1-8. Liège, Liège, Belgique: SC SPRL Fontaine² architectes BCE.
- Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique. (2023). *Évaluation ex ante du Plan de Relance de la Wallonie au regard des Objectifs de développement durable*. IWEPS.
- International Energy Agency. (2023). *Buildings – Tracking Clean Energy Progress*. Récupéré sur <https://www.iea.org/reports/buildings>
- ISO. (2017). *ISO 13790: Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling*. International Organization for Standardization.
- IZUBA énergies. (2026). *TRNSYS*. Récupéré sur IZUBA énergies: <https://www.izuba.fr/logiciels/outils-logiciels/trnsys/>
- Kabbaj, M. (2026, Mai). *Calculer la médiane — Formule, méthodes et calculatrice en ligne*. Consulté le Juin 3, 2026, sur Macalculatrice: <https://macalculatriceenligne.com/maths/statistiques/calculer-mediane/>

- L., Z. (2025, Mai 1). *Écart-type (1ère) : Cours, Propriétés et Exercices*. Consulté le Juin 3, 2026, sur Excellence Maths: <https://www.excellence-maths.fr/ressource/ecart-type/>
- Larousse. (s.d.). *degré*. Récupéré sur Larousse: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/degre%c3%a9/22909#11043059>
- Larousse. (s.d.). *humidité*. Récupéré sur Larousse: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/humidite%c3%a9/40650#162966>
- Larousse. (s.d.). *kilowattheure*. Récupéré sur Larousse: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/kilowattheure/45541>
- Larousse. (s.d.). *rosée*. Récupéré sur Larousse: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/ros%c3%a9e/69888#159157>
- Litmaps. (s.d.). *Litmaps – Your Literature Review Assistant*. Récupéré sur Litmaps: <https://app.litmaps.com/>
- Mandallena, C., Lagièrre, P., & Puiggali, J. (2007). Évaluation et amélioration des performances environnementales d'un bâtiment tertiaire en exploitation. *25e rencontres de l'AUGC* (pp. 1-8). Bordeaux: AUGC. Consulté le Mai 2026
- Merlo, J., & Thomas, S. (2025). *Projet CERTEB_OPT : Campagne de mesure dans les écoles ELMA avec des capteurs de température et d'humidité LASCAR*. Université de Liège. CERTEB_OPT.
- Météostat. (s.d.). Consulté le Mai 31, 2026, sur Météostat: <https://meteostat.net/fr/place/be/liege?s=06478&t=2026-02-16/2026-03-01>
- Naoemie, L. (s.d.). *Que signifie le terme "HVAC" ?* Consulté le Juin 3, 2026, sur VMC2FLUX: <https://www.vmc2flux.fr/blog/definition-hvac.php>
- Olofsson, T., Meier, A., & Lamberts, R. (2004, Décembre). Rating the energy performance of buildings. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 3, pp. 1-19. Consulté le Mai 2026, sur <https://escholarship.org/uc/item/52j7d39x>
- OpenAI. (2026, Mai). *Assistance à la correction de formules Excel pour l'analyse des données et correction de l'orthographe*. Récupéré sur OpenAI: <https://chat.openai.com/>
- OpenAI. (2026). *ChatGPT - Aide à la création de schéma explicatif pour le cours sur la PEB*. Récupéré sur OpenAI: <https://chat.openai.com/>
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2024). *Directive (UE) 2024/1275 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte)*. Journal officiel de l'Union européenne. Récupéré sur <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- Région wallonne. (s.d.). *Comptabilité énergétique : Pourquoi ? Comment ?* Namur, Namur, Belgique: DGTRE.
- Région wallonne. (2007, Avril 19). *Décret du 19 avril 2007 relatif à la performance énergétique des bâtiments*. Récupéré sur Moniteur belge: https://wallex.wallonie.be/files/pdfs/18/3214_D%C3%A9cret-cadre_modifiant_le_Code_wallon_de_l'Am%C3%A9nagement_du_Territoire%2C_de_l'Urbanisme_et_du_Patrimoine_en_vue_de_promouvoir_la_performance_%C3%A9nerg%C3%A9tique_des_b%C3%A2timents_29-05-2007-14-09-2
- Région wallonne. (2008, Avril 17). *Arrêté du Gouvernement wallon du 17 avril 2008 portant exécution du décret du 19 avril 2007 relatif à la performance énergétique des bâtiments*. Récupéré sur

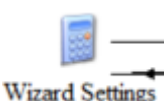
- Moniteur belge:
<https://wallex.wallonie.be/eli/arrete/2008/04/17/2008027079/2008/09/01?doc=11238&rev=10633-15204>
- Région wallonne. (s.d.). *WalOnMap | Géoportail de la Wallonie*. Consulté le Mai 4, 2026, sur WalOnMap:
<https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=234285.14002785177,234704.77003377842,147338.89034792368,147505.31359743682>
- Remeha. (2014). *Gas 210 ECO PRO - Informations techniques*. Grâce-Hollogne. Consulté le Mai 2026
- Remeha. (s.d.). *Fiche technique - Remeha Quinta 45 -115*. Consulté le Mai 2026
- Rouchier, S. (2022). *Modélisation statistique pour la performance énergétique des bâtiments*. Université Savoie Mont Blanc. Le Bourget-du-Lac: Université Savoie Mont Blanc. doi:tel-04845644
- Roulet, C.-A. (2024, Novembre 16). *Température opérative*. Consulté le Juin 3, 2026, sur La langue française: <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/temperature-operative>
- Service public de Wallonie. (2025). *Plan wallon de rénovation énergétique des bâtiments*. Namur: SPW Énergie.
- Service public de Wallonie. (2026). *Certification énergétique des bâtiments public : Protocole de collecte de données*. Service public de Wallonie - Énergie. Namur: Service public de Wallonie.
- SketchUp. (2023). SketchUp Pro [Logiciel].
- SPF Économie. (2025, Mars 26). *Conversion du gaz pauvre en gaz riche*. Récupéré sur economie: <https://economie.fgov.be/fr/themes/energie/sources-et-vecteurs-denergie/gaz-naturel/conversion-du-gaz-pauvre-en>
- Ste - Véronique. (2017, Juin 8). Plan - Bâtiment 5 Vingt-Deux (VD). *F40.11 - 5 - Plan Vingt-Deux*, 1 - 3. Liège, Liège, Belgique.
- Ste - Véronique. (2017, Juin 12). Plan 4 - Bloc Administratif. *F25.00 V0 - Plans - 24 Bloc administratif administratif*, 1 - 4. Liège, Liège, Belgique.
- TRNSYS. (2019). *Caractéristiques*. Consulté le Juin 3, 2026, sur TRNSYS: <https://www.trnsys.com/features/suite-of-tools.php.html>
- TRNSYS. (2023). A Transient System Simulation Program [Logiciel]. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin–Madison.
- Union européenne. (2018). *Directive (UE) 2018/844 modifiant la directive 2010/31/UE*. Récupéré sur Journal officiel de l'Union européenne: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0844>
- United Nations Environment Programme. (2022). *2022 global status report for buildings and construction*. Récupéré sur <https://globalabc.org/news/globalabc-releases-2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- Université de Liège. (2025). *CERTEB_OPT : Comprenons les certificats énergétiques des bâtiments scolaires et résidentiels en Grande Région et optimisons la gestion énergétique*.
- Université de Liège. (2025). *Work Package 3 - ULiège School1 - ELMA : Building Documentation*. CERTEB_OPT. Liège: Université de Liège.

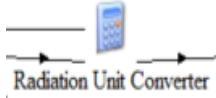
- Université de Liège. (2026). *Projet CERTEB_OPT – Sensibilisation à la consommation énergétique dans les écoles*. Université de Liège.
- Vandael, J. (2026). *Cours sur la Performance Énergétique des Bâtiments*. Cours , Awans.
- Verslype, E., & Vandael, J. (2023). *Certificat PEB de base pour un travail de fin de bachelier*. Gembloux: Certinergie.
- Verslype, E., & Vandael, J. (2023). *Certificat PEB de rénovation non écologique pour un travail de fin de bachelier*. Gembloux: Certinergie.

Annexes

I. Modèle Simulation Studio

TABLEAU 27 - DESCRIPTION DES COMPOSANTS UTILISÉS DANS LE MODÈLE SIMULATION STUDIO

Image	Nom	Fonction	Rôle dans ce mémoire
	Type 56 – Building (TRNBuild)	Composant principal de la simulation thermique dynamique. Il applique le modèle créé dans TRNBuild pour calculer, à chaque pas de temps, les températures intérieures, les besoins en chauffage et en refroidissement, ainsi que l'influence des conditions météorologiques, des gains internes et des systèmes techniques sur le comportement thermique du bâtiment.	Cette partie décrit tous les bâtiments étudiés et constitue le cœur du modèle de simulation. À ce niveau, toutes les données d'entrée (météo, chauffage, occupation, gains internes, infiltration, etc.) sont prises en compte pour calculer les variables à analyser ultérieurement.
	Type 25c - Printer	Composant appliqué pour l'enregistrement des résultats de la simulation sous forme de texte. Il permet d'exporter les variables choisies (températures, puissances de chauffage, gains internes, etc.) et de les utiliser plus tard dans un programme externe tel qu'Excel pour le traitement et l'analyse des données.	Cette partie a été utilisée pour enregistrer les variables de sortie du modèle sur une année complète avec un pas de temps horaire. Les fichiers texte ont été importés dans Excel, qui ont été utilisés pour évaluer à la fois la quantité annuelle d'énergie consommée et les indicateurs statistiques de température.
	Type 77 – Online Plotter	Composant de visualisation qui permet de visualiser l'évolution d'une ou plusieurs variables pendant l'exécution de la simulation. Il facilite le suivi du bon fonctionnement du modèle et la vérification des résultats obtenus en temps réel.	Ce composant n'a été utilisé que comme outil de vérification lors de la construction du modèle. Les graphiques générés dans Simulation Studio n'ont pas été utilisés pour l'analyse finale des résultats. Toutes les données ont été exportées vers Excel pour effectuer le traitement statistique et les représentations graphiques présentées dans ce mémoire.
	Type 15 – Weather Data Reader	Un composant est responsable de la lecture des données météorologiques à partir d'un fichier climatique et de leur envoi au modèle de simulation. Il fournit, en particulier, la température extérieure, le rayonnement solaire, l'humidité relative, la vitesse du vent et d'autres paramètres nécessaires au calcul du comportement thermique du bâtiment.	La station d'Uccle, choisie comme station de référence en raison de sa proximité avec la ville de Liège et de la disponibilité de données climatiques compatibles avec TRNSYS, a été utilisée comme source pour importer les données météorologiques. Ces conditions météorologiques ont donc servi de données d'entrée pour toutes les simulations.
	Wizard Settings	Partie générale de la configuration du projet TRNSYS. Elle spécifie les caractéristiques globales de la simulation, par exemple la période d'étude, le pas de temps, les unités employées et certains paramètres généraux nécessaires pour assurer le fonctionnement du modèle.	Ce composant servait à définir les paramètres généraux de toutes les simulations effectuées sur une année complète, du 1er janvier au 31 décembre, avec un pas de temps horaire. C'était le point central de configuration du projet et le calcul cohérent des résultats du modèle à partir de tous ses composants.

	Radiation Unit Converter	Composant pour transformer les unités de rayonnement solaire à partir du fichier météo, afin qu'elles puissent être intégrées avec les unités requises par le modèle thermique. Cela garantit un transfert correct des informations de rayonnement à la structure simulée.	Ce composant a été utilisé pour modifier les données de rayonnement solaire de la station météorologique et les envoyer ensuite au modèle TRNBuild. Cette conversion assure la cohérence des unités utilisées dans la simulation et permet de prendre correctement en compte les gains solaires dans le calcul du comportement thermique des bâtiments.
	Q_heat_cool_Plotter	Composant de visualisation graphique qui permet de suivre l'évolution des besoins de chauffage et/ou de refroidissement calculés par le modèle pendant la simulation. Il offre un contrôle rapide de la cohérence des résultats générés.	Ce composant n'a été utilisé que comme outil de vérification lors du développement et de la validation du modèle. Les graphiques produits dans <i>Simulation Studio</i> n'ont pas été utilisés pour l'analyse finale. Les résultats ont été exportés vers <i>Excel</i> pour effectuer le traitement statistique et les représentations graphiques présentées dans ce mémoire.
	T_Plotter	Composant de visualisation graphique pour représenter le changement de température construit par le modèle calculé à travers la simulation pour les données visuelles. Il permet la vérification du comportement thermique des zones simulées et la détection d'anomalies dans les résultats de la simulation.	Ce composant a été utilisé uniquement à des fins de contrôle lors du développement du modèle. Il a permis une vérification rapide des changements de température intérieure simulés et la détection de toute erreur de paramétrage. Cependant, les résultats présentés dans ce rapport proviennent de données exportées vers <i>Excel</i> et non des graphiques générés directement dans <i>Simulation Studio</i> .

II. Encodage TRNBuild

a. Chauffage

TABLEAU 28 - PROGRAMMATIONS DES CHAUDIÈRES DES BÂTIMENTS 22 POUR LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS

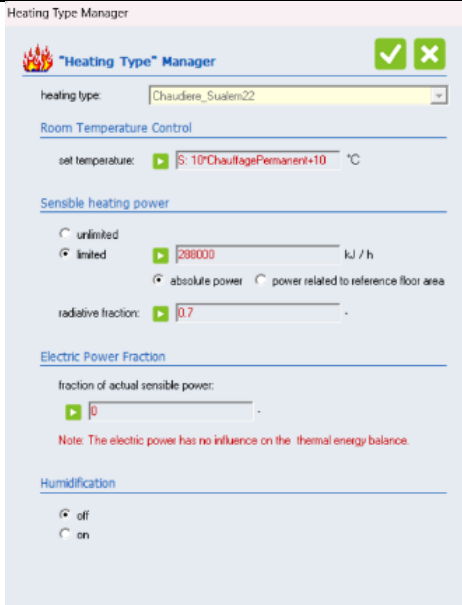
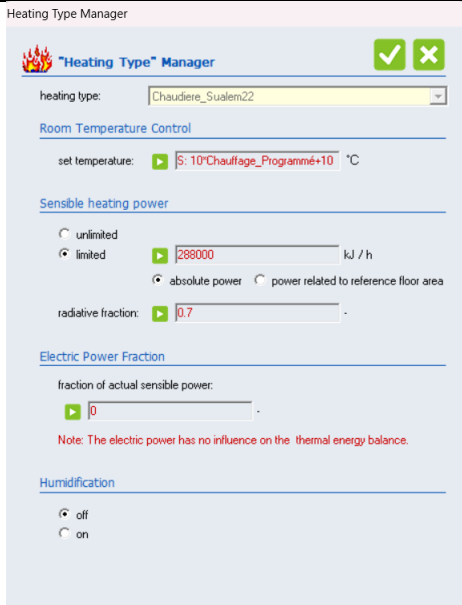
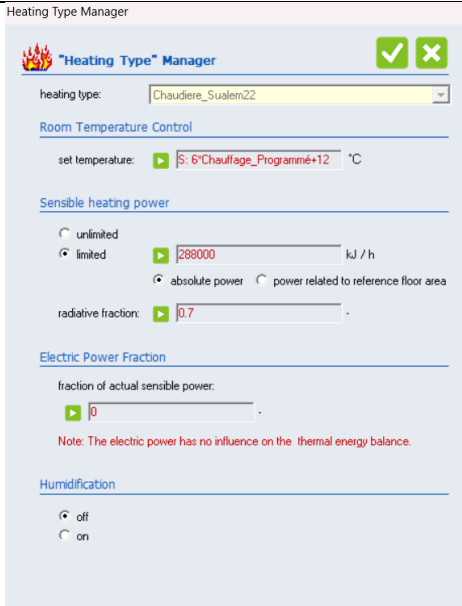
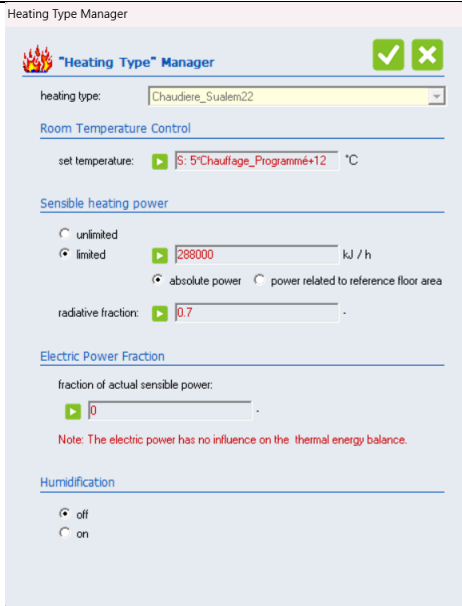
Bâtiments 22	
	
FIGURE 45 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 22 (PERMANENT)	FIGURE 46 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 22 (PROGRAMMÉ)
	
FIGURE 47 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 22 (OPTIMISATION 1)	FIGURE 48 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 22 (OPTIMISATION 2)

TABLEAU 29 - PROGRAMMATIONS DES CHAUDIÈRES DES BÂTIMENTS 24 & 26 POUR LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS

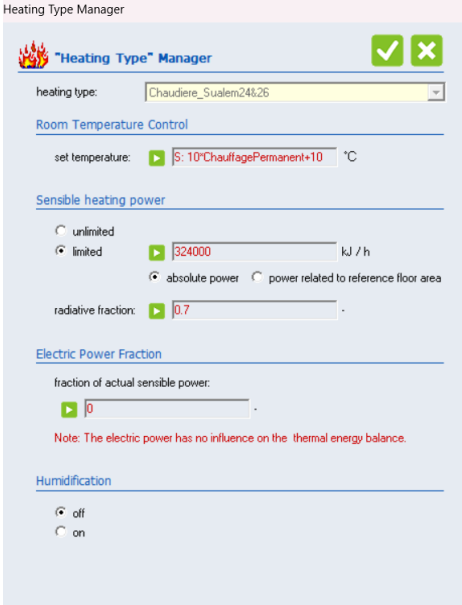
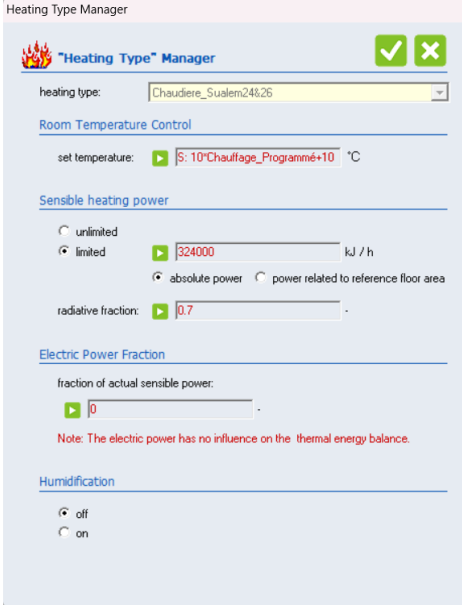
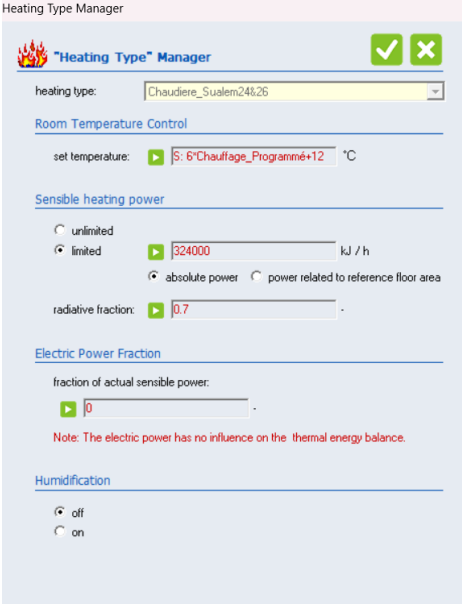
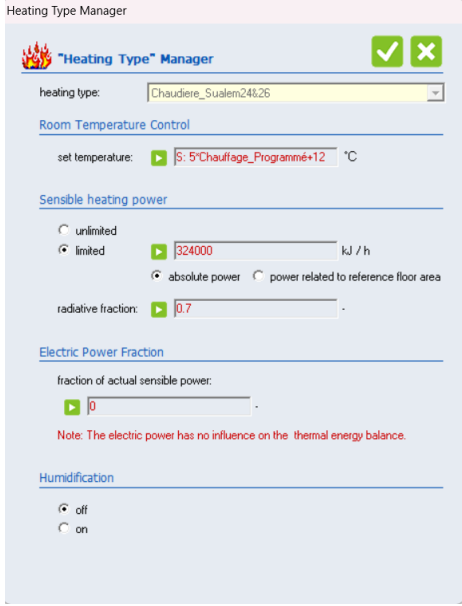
Bâtiments 24 & 26	
	
FIGURE 49 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 24 & 26 (PERMANENT)	FIGURE 50 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 24 & 26 (PROGRAMMÉ)
	
FIGURE 51 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 24 & 26 (OPTIMISATION 1)	FIGURE 52 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 24 & 26 (OPTIMISATION 2)

TABLEAU 30 - PROGRAMMATIONS DES CHAUDIÈRES DES BÂTIMENTS 28 & 30 POUR LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS

Bâtiments 28 & 30	
FIGURE 53 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 28 & 30 (PERMANENT)	FIGURE 54 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 28 & 30 (PROGRAMMÉ)
FIGURE 55 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENT 28 & 30 (OPTIMISATION 1)	FIGURE 56 - ENCODAGE CHAUDIÈRE BÂTIMENTS 28 & 30 (OPTIMISATION 2)

b. Gains internes

➤ Occupation

TABLEAU 31 - ENCODAGES DES OCCUPATIONS POUR LES DIFFÉRENTS LOCAUX

Occupations des locaux	
Gain/loss Type Manager "Gain/loss Type" Manager Gain/loss type name: Bureau_Occupation Gain/loss Category: people ☒ absolute gain/loss ☐ gain/loss related to reference floor area Radiative: 5400Occupation kJ / h Convective: 1800Occupation kJ / h Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 0 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 0.14Occupation kg / hr	Gain/loss Type Manager "Gain/loss Type" Manager Gain/loss type name: Classe_Occupation Gain/loss Category: people ☒ absolute gain/loss ☐ gain/loss related to reference floor area Radiative: 5332.50Occupation kJ / h Convective: 1777.50Occupation kJ / h Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 0 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 1.30Occupation kg / hr
Gain/loss Type Manager "Gain/loss Type" Manager Gain/loss type name: Refectoire_Occupation Gain/loss Category: people ☒ absolute gain/loss ☐ gain/loss related to reference floor area Radiative: 6075Refectoire_Occupation kJ / h Convective: 2025Refectoire_Occupation kJ / h Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 0 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 1.5Refectoire_Occupation kg / hr	Gain/loss Type Manager "Gain/loss Type" Manager Gain/loss type name: SalleDeReunion_Occupation Gain/loss Category: people ☒ absolute gain/loss ☐ gain/loss related to reference floor area Radiative: 1520SalleDeReunion_Occupation kJ / h Convective: 540SalleDeReunion_Occupation kJ / h Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 0 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 0.42SalleDeReunion_Occupation kg / hr
Gain/loss Type Manager "Gain/loss Type" Manager Gain/loss type name: SalleDesProfs_Occupation Gain/loss Category: people ☒ absolute gain/loss ☐ gain/loss related to reference floor area Radiative: 1620SalleDesProfs_Occupation kJ / h Convective: 540SalleDesProfs_Occupation kJ / h Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 0 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 0.42SalleDesProfs_Occupation kg / hr	

FIGURE 57 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UN BUREAU

FIGURE 58 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UNE CLASSE

FIGURE 59 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UN RÉFECTOIRE

FIGURE 60 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UNE SALLE DE RÉUNION

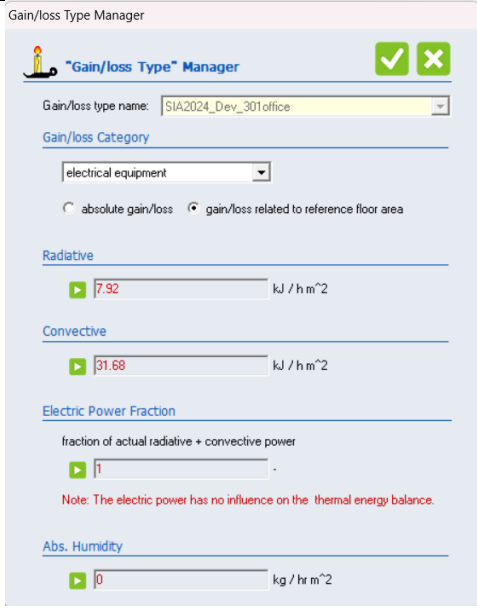
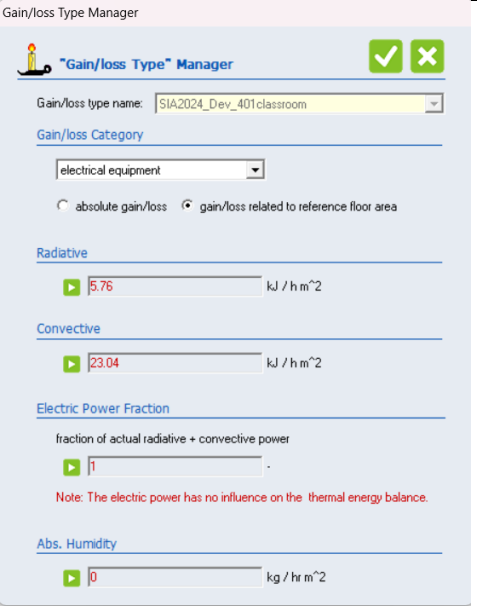
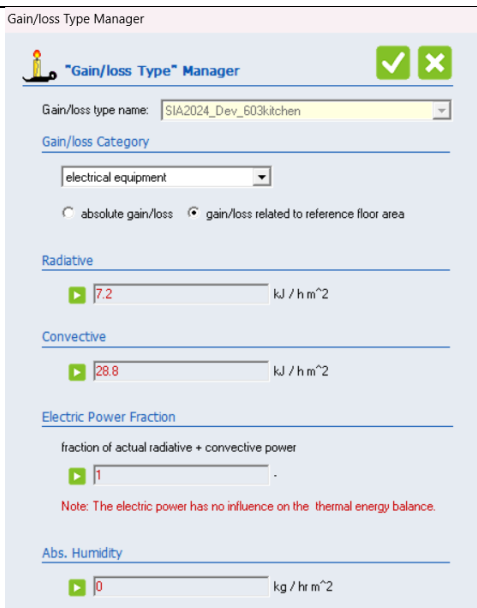
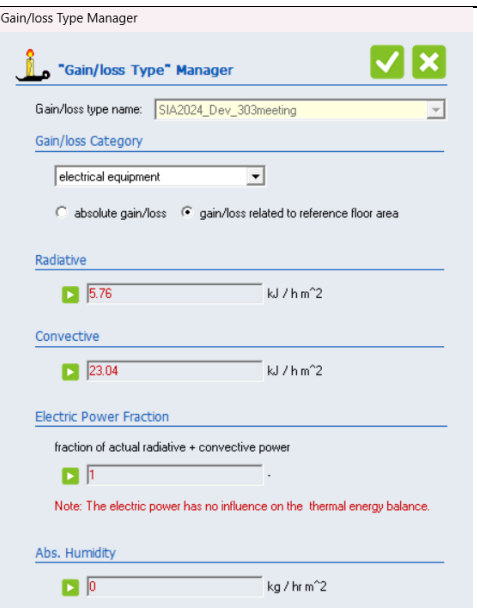
FIGURE 61 - ENCODAGE OCCUPATION DANS UNE SALLE DES PROFS

➤ Équipements électriques

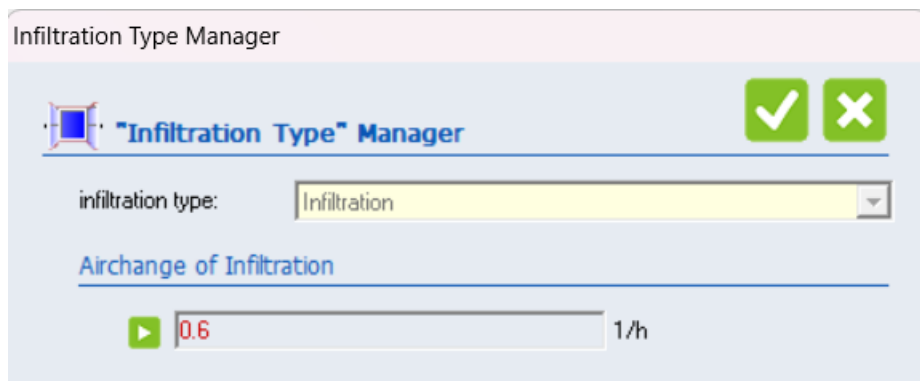
TABEAU 32 - ENCODAGES DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES POUR LES DIFFÉRENTS LOCAUX

Équipements électriques et éclairage			
FIGURE 62 - ENCODAGE DE L'ÉCLAIRAGE		FIGURE 63 - ENCODAGE DE L'ARMOIRE INFORMATIQUE	
FIGURE 64 - ENCODAGE DU BOILER DE 10L		FIGURE 65 - ENCODAGE DU BOILER DE 180L	

TABLEAU 33 - ENCODAGES DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES POUR LES DIFFÉRENTS LOCAUX (SUITE)

 Gain/loss Type Manager Gain/loss type name: SIA2024_Dev_301office Gain/loss Category: electrical equipment ☐ absolute gain/loss ☒ gain/loss related to reference floor area Radiative: 7.92 kJ / h m² Convective: 31.68 kJ / h m² Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 1 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 0 kg / hr m²	 Gain/loss Type Manager Gain/loss type name: SIA2024_Dev_401classroom Gain/loss Category: electrical equipment ☐ absolute gain/loss ☒ gain/loss related to reference floor area Radiative: 5.76 kJ / h m² Convective: 23.04 kJ / h m² Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 1 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 0 kg / hr m²
FIGURE 66 - ENCODAGE ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES D'UN BUREAU	FIGURE 67 - ENCODAGE ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES D'UNE CLASSE
 Gain/loss Type Manager Gain/loss type name: SIA2024_Dev_603kitchen Gain/loss Category: electrical equipment ☐ absolute gain/loss ☒ gain/loss related to reference floor area Radiative: 7.2 kJ / h m² Convective: 28.8 kJ / h m² Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 1 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 0 kg / hr m²	 Gain/loss Type Manager Gain/loss type name: SIA2024_Dev_303meeting Gain/loss Category: electrical equipment ☐ absolute gain/loss ☒ gain/loss related to reference floor area Radiative: 5.76 kJ / h m² Convective: 23.04 kJ / h m² Electric Power Fraction: fraction of actual radiative + convective power: 1 Note: The electric power has no influence on the thermal energy balance. Abs. Humidity: 0 kg / hr m²
FIGURE 68 - ENCODAGE ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES D'UNE CUISINE	FIGURE 69 - ENCODAGE ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES D'UNE SALLE DE RÉUNION

➤ *Infiltration*



Infiltration Type Manager

"Infiltration Type" Manager

infiltration type: Infiltration

Airchange of Infiltration

0.6 1/h

FIGURE 70 - ENCODAGE DE L'INFILTRATION DE L'AIR

III. Formules Excel utilisées

a. Formules utilisées pour l'analyse de données de monitoring

Reading	Date / Time (UTC)			Température	Humidité (%)	Dew Point (°C T - D.P. (°C))			
1	16-12-25 06:00	06:00:00	Nuit	16.06	51.6	6.09	9.97	Normal	Scolaire
2	16-12-25 06:15	06:15:00	Nuit	16.05	51.7	6.11	9.94	Normal	Scolaire
3	16-12-25 06:30	06:30:00	Nuit	16.03	51.8	6.12	9.91	Normal	Scolaire
4	16-12-25 06:45	06:45:00	Nuit	16.02	51.9	6.14	9.88	Normal	Scolaire
5	16-12-25 07:00	07:00:00	Nuit	16.06	52	6.2	9.86	Normal	Scolaire
6	16-12-25 07:15	07:15:00	Jour	16.09	52.2	6.29	9.8	Normal	Scolaire
7	16-12-25 07:30	07:30:00	Jour	16.13	52.3	6.35	9.78	Normal	Scolaire
8	16-12-25 07:45	07:45:00	Jour	16.12	52.6	6.42	9.7	Normal	Scolaire
9	16-12-25 08:00	08:00:00	Jour	16.06	52.9	6.45	9.61	Normal	Scolaire
10	16-12-25 08:15	08:15:00	Jour	16.02	53	6.44	9.58	Normal	Scolaire
11	16-12-25 08:30	08:30:00	Jour	16.17	54	6.85	9.32	Normal	Scolaire
12	16-12-25 08:45	08:45:00	Jour	16.12	53.3	6.62	9.5	Normal	Scolaire
13	16-12-25 09:00	09:00:00	Jour	16.1	53.3	6.6	9.5	Normal	Scolaire
14	16-12-25 09:15	09:15:00	Jour	16.82	55	7.72	9.1	Normal	Scolaire
15	16-12-25 09:30	09:30:00	Jour	17.4	55.2	8.32	9.08	Normal	Scolaire
16	16-12-25 09:45	09:45:00	Jour	17.76	55	8.6	9.16	Normal	Scolaire
17	16-12-25 10:00	10:00:00	Jour	18.12	54.8	8.88	9.24	Normal	Scolaire
18	16-12-25 10:15	10:15:00	Jour	19.41	53.2	9.64	9.77	Normal	Scolaire
19	16-12-25 10:30	10:30:00	Jour	19.67	52.2	9.6	10.07	Air sec	Scolaire
20	16-12-25 10:45	10:45:00	Jour	20.14	51.9	9.95	10.19	Air sec	Scolaire

FIGURE 71 - EXEMPLE DE FICHIER EXCEL AVEC LES DONNÉES DE RELEVÉS D'UN CAPTEUR

➤ Distinction périodes de vacances des périodes scolaires

ÉQUATION 3 - INDIQUER SI LA DATE CORRESPOND À DES VACANCES OU À DES JOURS SCOLAIRES

$$SI(OU(ET(LIGNE() \geq 564; LIGNE() \leq 1907); ET(LIGNE() \geq 5940; LIGNE() \leq 7283)); "Vacances"; "Scolaire")$$

Cette formule permet de distinguer automatiquement les périodes de vacances scolaires des périodes scolaires au sein des données récoltées par les capteurs.

➤ Distinction jour et nuit

ÉQUATION 4 - INDIQUER "JOUR" OU "NUIT"

$$SI(ET(C12 \geq TEMPS(7; 0; 0); C12 \leq TEMPS(18; 0; 0)); "Jour"; "Nuit")$$

Cette formule permet de classer automatiquement chaque mesure en période de jour ou de nuit en fonction de l'heure d'enregistrement.

➤ Nombre d'heures sous 18°C

ÉQUATION 5 - NOMBRE D'HEURES SOUS 18°C

$$NB.SI(E564: E1907; "< 18") * 0.25$$

Cette formule permet de calculer le nombre d'heures durant lesquelles la température intérieure est restée inférieure à 18 °C sur la période analysée.

➤ Nombre d'heures au-dessus de 23°C

ÉQUATION 6 - NOMBRE D'HEURES AU-DESSUS DE 23°C

$$NB.SI(E564: E1907; "> 23") * 0.25$$

Calculer le nombre d'heures durant lesquelles la température intérieure a dépassé le seuil de confort de 23°C.

➤ *Pourcentage de mesures sous 18°C*

ÉQUATION 7 - POURCENTAGE DE MESURE SOUS 18°C

$$NB.SI(E564:E1907;" < 18")/NB(E564:E1907)$$

Déterminer la proportion de mesures pour lesquelles la température intérieure est inférieure à 18°C.

➤ *Pourcentage de mesures sous 18°C en période de jour*

ÉQUATION 8 - POURCENTAGE DE MESURES SOUS 18°C EN PÉRIODE DE JOUR

$$\begin{aligned} NB.SI.ENS(E564:E1907;" < 18"; C564:C1907;" >= "&TEMP(7; 0; 0); C564:C1907;" < \\ &= "&TEMP(18; 0; 0)))/ NB.SI.ENS(C564:C1907;" > \\ &= "&TEMP(7; 0; 0); C564:C1907;" <= "&TEMP(18; 0; 0)) \end{aligned}$$

Déterminer la proportion de mesures inférieures à 18 °C pendant les heures de présence potentielles des occupants.

➤ *Date de la température minimale*

ÉQUATION 9 - DATE TEMPÉRATURE MINIMALE

$$INDEX(B564:B1907;EQUIV(MIN(E564:E1907);E564:E1907;0))$$

Identifier la date à laquelle la température minimale a été enregistrée.

➤ *Date de la température maximale*

ÉQUATION 10 - DATE TEMPÉRATURE MAXIMALE

$$INDEX(B564:B1907;EQUIV(MAX(E564:E1907);E564:E1907;0))$$

Identifier la date à laquelle la température maximale a été enregistrée.

➤ *Température moyenne en période de jour*

ÉQUATION 11 - TEMPÉRATURE MOYENNE EN JOURNÉE

$$MOYENNE.SI(D564:D1907;"Jour";E564:E1907)$$

Calculer la température moyenne entre 7 h et 18 h.

➤ *Température moyenne en période de nuit*

ÉQUATION 12 - TEMPÉRATURE MOYENNE DE NUIT

$$MOYENNE.SI(D564:D1907;"Nuit";E564:E1907)$$

Calculer la température moyenne entre 18 h et 7 h.

➤ *Écart de température entre le jour et la nuit*

ÉQUATION 13 - ÉCART DE TEMPÉRATURE JOUR/NUIT

$$L37 - L38$$

Comparer les températures moyennes observées durant la journée et durant la nuit.

Les mêmes formules ont été appliquées aux colonnes d'humidité relative.

➤ *Écart-type sur la période hors vacances*

ÉQUATION 14 - ÉCART-TYPE SUR LA PÉRIODE HORS VACANCES

$$ECARTYPE(FILTRE(C: C; (M: M = "Scolaire")))$$

Cette formule calcule l'écart-type des températures mesurées durant les périodes scolaires. Elle permet d'évaluer la variabilité des températures autour de la moyenne et donc la stabilité thermique du local étudié.

➤ *Écart-type en journée sur la période hors vacances*

ÉQUATION 15 - ÉCART-TYPE EN JOURNÉE SUR LA PÉRIODE HORS VACANCES

$$ECARTYPE(FILTRE(C: C; (L: L = "Jour") * (M: M = "Scolaire")))$$

Cette formule calcule l'écart-type des températures enregistrées durant les périodes scolaires entre 7 h et 18 h. Elle permet d'évaluer la stabilité thermique du local pendant les heures d'occupation.

➤ *Écart-type la nuit sur la période hors vacances*

ÉQUATION 16 - ÉCART-TYPE LA NUIT SUR LA PÉRIODE HORS VACANCES

$$ECARTYPE(FILTRE(C: C; (L: L = "Nuit") * (M: M = "Scolaire")))$$

Cette formule calcule l'écart-type des températures enregistrées durant les périodes scolaires entre 18 h et 7 h. Elle permet d'évaluer l'amplitude des variations thermiques lorsque les bâtiments sont peu ou pas occupés.

b. Formules utilisées pour le traitement des résultats de simulation

➤ Somme des besoins de chauffage

ÉQUATION 17 - SOMME DES BESOINS DE CHAUFFAGE

$$SOUS.TOTAL(109; [QHEAT_ADMIN])$$

Cette formule permet de calculer la somme des besoins de chauffage (QHeat) du bâtiment Administration sur l'ensemble de la période étudiée tout en tenant compte des éventuels filtres appliqués dans le tableau Excel.

La formule étant la même pour calculer QEIEquip et QEILight pour chaque zone thermique.

➤ Conversion des kJ/h en kWh

ÉQUATION 18 - CONVERSION D'UNITÉ

$$SOUS.TOTAL(109; [QHEAT_ADMIN])/3600$$

Cette formule permet de calculer directement la consommation annuelle de chauffage du bâtiment Administration en kWh à partir des résultats bruts issus de la simulation.

➤ Moyenne des température

ÉQUATION 19 - MOYENNE DES TEMPÉRATURES

$$MOYENNE(R2: R8762)$$

Cette formule permet de calculer la température moyenne annuelle d'un local ou d'un bâtiment à partir des valeurs horaires obtenues lors de la simulation.

➤ Température maximale

ÉQUATION 20 - TEMPÉRATURE MAXIMALE

$$MAX(R2: R8762)$$

Cette formule permet de déterminer la température maximale atteinte dans un local ou un bâtiment au cours de la période simulée.

➤ Température minimale

ÉQUATION 21 - TEMPÉRATURE MINIMALE

$$MIN(R2: R8762)$$

Cette formule permet de déterminer la température minimale observée dans un local ou un bâtiment au cours de la période simulée.

➤ Écart-type

ÉQUATION 22 - ÉCART-TYPE DES TEMPÉRATURES

$$ECARTYPE(R2: R8762)$$

Cette formule permet de calculer l'écart-type des températures simulées.

➤ Médiane

ÉQUATION 23 - TEMPÉRATURE MÉDIANE

$$MEDIANE(R2: R8762)$$

Cette formule permet de calculer la température médiane observée au cours de la période simulée.

IV. Résumé du cours sur la PEB

Le cours sur la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) a été conçu comme une campagne de sensibilisation destinée aux élèves du secondaire. Il vise à les informer sur les défis énergétiques actuels dans les bâtiments, leur fonctionnement énergétique, et l'impact des réglementations PEB pour gérer les processus de transition énergétique.

Le cours est structuré en quatre chapitres principaux.

a. Chapitre 1 : Pourquoi l'énergie est devenue un enjeu majeur ?

Cette section introduit les enjeux énergétiques actuels. Les étudiants apprennent le rôle de l'énergie dans la vie quotidienne et à quel point notre société dépend de l'électricité, du chauffage et des combustibles fossiles.

Certains des thèmes clés abordés incluent :

- L'augmentation de la consommation énergétique mondiale
- Les conséquences économiques des récentes crises énergétiques
- La hausse des prix du gaz et de l'électricité
- Les impacts environnementaux liés aux émissions de gaz à effet de serre
- Le rôle du secteur du bâtiment dans la consommation énergétique
- Les liens entre la consommation énergétique, le confort des occupants et la qualité de vie.

Cela souligne l'importance de réduire la consommation énergétique pour diminuer les coûts, limiter les émissions de CO₂ et améliorer le confort intérieur.

b. Chapitre 2 : Comprendre le fonctionnement d'un bâtiment

Cette partie présente les principes physiques qui influencent les performances énergétiques d'un bâtiment.

Les notions développées sont :

1. Les transferts de chaleur
 - a. Conduction,
 - b. Convection,
 - c. Rayonnement.

Les élèves apprennent comment la chaleur se déplace naturellement d'une zone chaude vers une zone froide et comment ces phénomènes influencent les besoins de chauffage.

2. L'isolation thermique
 - a. Le rôle de l'isolation,
 - b. L'influence de la toiture, des murs et du sol,
 - c. Les performances des différents types de vitrage,
 - d. Les pertes thermiques dans les bâtiments.
3. Les ponts thermiques et l'étanchéité à l'air
 - a. Pont thermique,
 - b. Infiltration d'air,
 - c. Condensation,
 - d. Moisissures

sont présentées afin de comprendre leurs impacts sur le confort et les consommations énergétiques.

EXEMPLE DE PONT THERMIQUE : UN BALCON EN BÉTON

Un balcon en béton qui traverse l'isolation du bâtiment crée une zone de déperdition de chaleur.

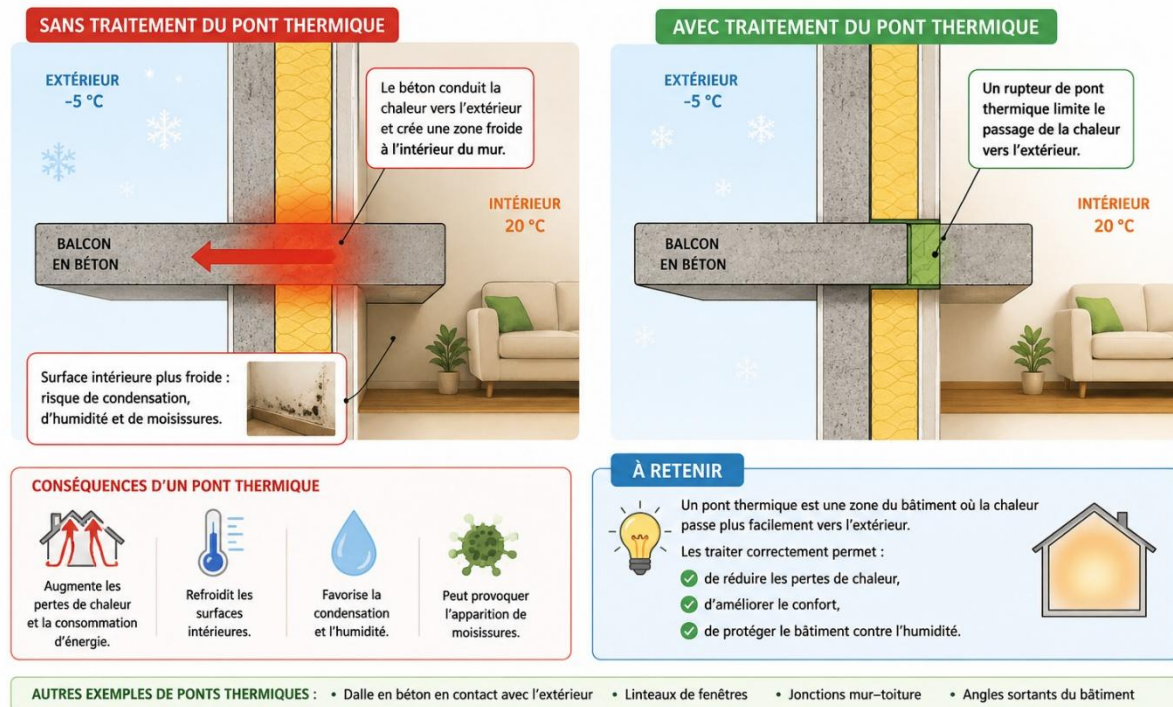


FIGURE 72 - SCHÉMA D'EXPLICATION DES PONTS THERMIQUES (OPENAI, 2026)

4. La ventilation

- Système A,
- Système B,
- Système C,
- Système D.

Le rôle de la ventilation dans la qualité de l'air intérieur, la gestion de l'humidité et la réduction du CO₂ est expliqué.

COMMENT CIRCULE L'AIR DANS LE LOGEMENT ?

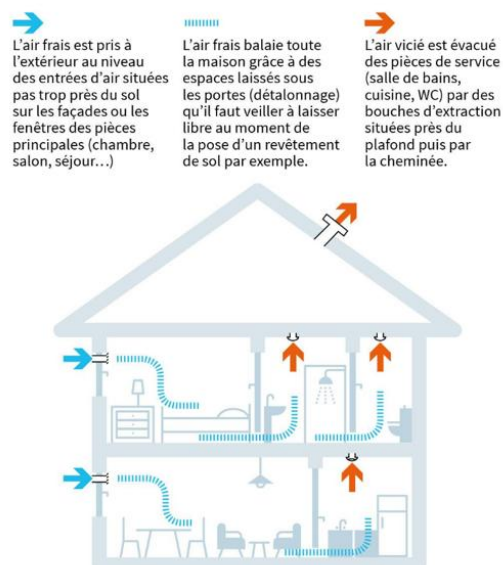


FIGURE 73 - COMMENT CIRCULE L'AIR DANS LE LOGEMENT ? (OPENAI, 2026)

5. Les systèmes techniques
 - a. Les chaudières,
 - b. Les radiateurs,
 - c. Les planchers chauffants,
 - d. Les pompes à chaleur,
 - e. Les systèmes de régulation.

Les élèves découvrent comment les équipements techniques influencent les consommations énergétiques d'un bâtiment.

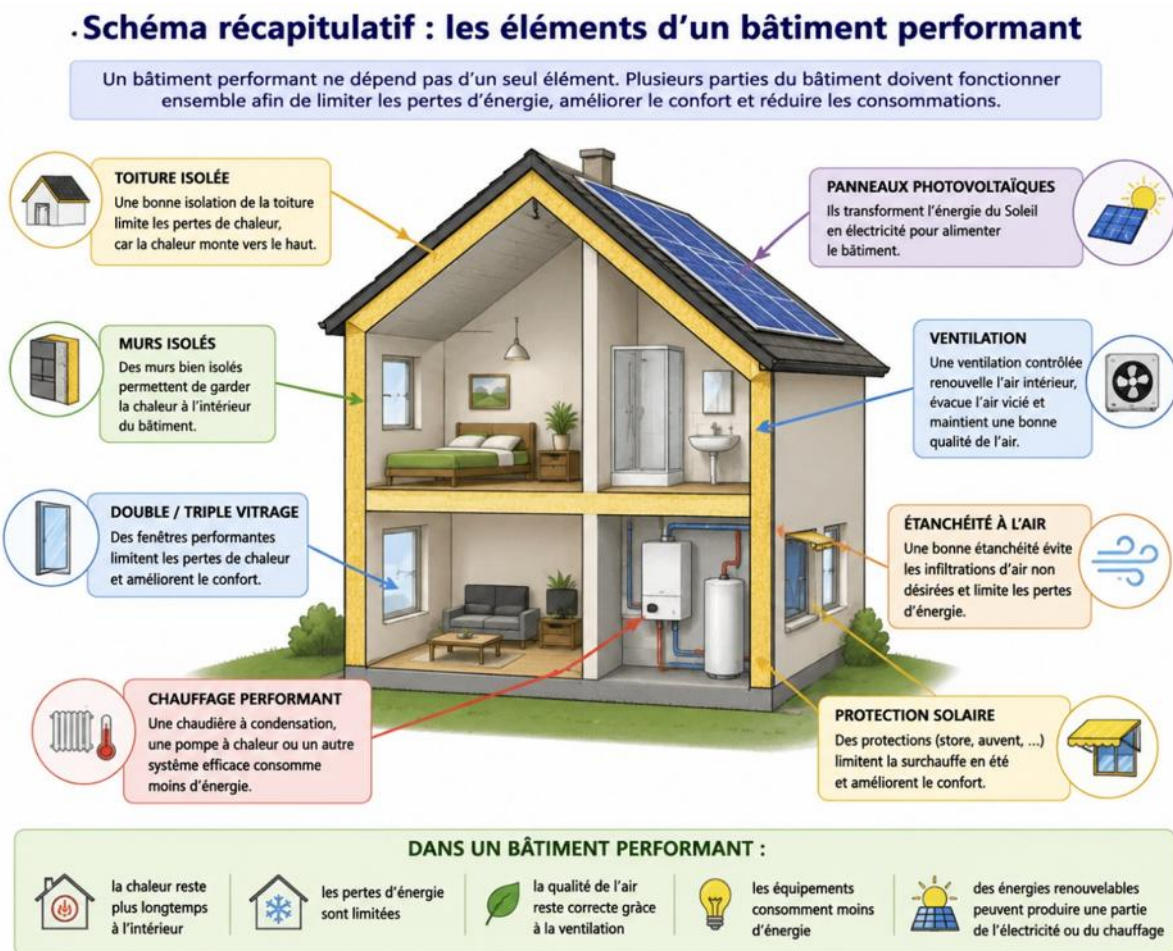


FIGURE 74 - SCHÉMA RÉCAPITULATIF (OPENAI, 2026)

c. Chapitre 3 : Comprendre un certificat PEB

Ce chapitre porte sur le certificat PEB, qui est actuellement le principal outil utilisé pour déterminer la performance énergétique des bâtiments en Wallonie. Les étudiants découvrent le rôle du certificat PEB, les informations qu'il contient et son utilité lors de la vente ou de la location d'un bâtiment. À travers l'analyse d'un certificat réel, ils apprennent à identifier les principaux indicateurs énergétiques et à se faire une idée de la manière dont ceux-ci sont calculés.

Une attention particulière est portée à l'échelle des classes énergétiques qui va de A à G. Tous les étudiants en viennent à interpréter ces classes et à les relier à des facteurs du bâtiment (isolation, qualité des fenêtres, systèmes de chauffage, ventilation, etc.). La consommation spécifique exprimée en kWh/m².an est également décrite afin de permettre des comparaisons objectives entre des bâtiments de tailles différentes.

Plusieurs aspects d'un certificat PEB sont ensuite discutés tout au long du chapitre. Un examen approfondi des murs, vitrages, systèmes de chauffage, production d'eau chaude sanitaire, ventilation et éventuelles énergies renouvelables est effectué pour déterminer leur impact sur la performance énergétique globale d'un bâtiment. Analyse des recommandations d'amélioration telles que décrites dans le certificat.

Les étudiants apprennent comment ces recommandations les guident dans le choix des travaux les plus pertinents pour réduire la consommation d'énergie et augmenter le confort des occupants. Enfin, le chapitre abordera les émissions de CO₂ liées à la consommation énergétique des bâtiments ainsi que les limites du certificat PEB, puisqu'il est basé sur des conditions standardisées et que la consommation réelle varie en fonction des habitudes des occupants.

d. Chapitre 4 : Réduire les consommations d'énergie dans un bâtiment

Le dernier chapitre aborde les solutions pour améliorer la performance énergétique des bâtiments et réduire la consommation d'énergie. Pour contrôler la consommation d'énergie, les étudiants apprennent d'abord l'importance des comportements quotidiens. La prise en compte de l'utilisation du chauffage, de l'éclairage, des appareils électriques et de la gestion de la ventilation illustre que ce sont les occupants qui économisent l'énergie dans son ensemble.

Ensuite, le cours commence par les principaux travaux de rénovation énergétique que l'on peut effectuer sur le bâtiment existant. Le toit, les murs et les sols sont isolés, les fenêtres remplacées, l'étanchéité améliorée, et les systèmes techniques mis à jour, et les principales implications de ceux-ci pour les besoins énergétiques du bâtiment sont abordées en détail.

Une section spécifique au secteur de l'énergie se concentre également sur les énergies renouvelables. Les étudiants apprennent comment fonctionnent les panneaux photovoltaïques, les panneaux solaires thermiques, les pompes à chaleur et certaines solutions issues de la biomasse. Cette section montre qu'il est important de considérer l'intégration de ces technologies après avoir réduit la demande énergétique des bâtiments grâce à une meilleure isolation et à une diminution des pertes de chaleur.

Le chapitre se termine par une application au contexte scolaire. Les spécificités énergétiques des écoles sont décrites en relation avec le chauffage, la ventilation, l'éclairage et la qualité de l'air intérieur. Une étude de cas à la fin offre aux étudiants un moyen d'utiliser leurs connaissances théoriques apprises en classe pour analyser, identifier et proposer des stratégies d'amélioration pertinentes pour un bâtiment.

LES BÂTIMENTS ET LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

La chaleur s'échappe d'un bâtiment par différentes zones.

Mieux comprendre ces pertes permet de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer le confort.

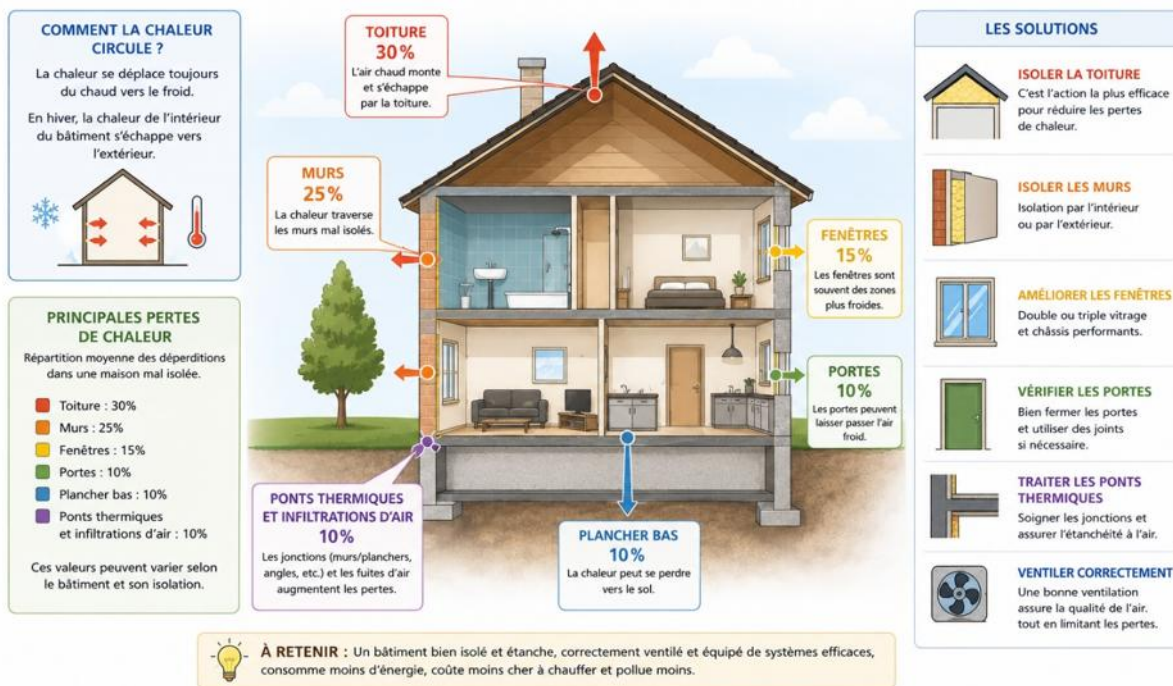


FIGURE 75 - LES BÂTIMENTS ET LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE (OPENAI, 2026)