



HAL
open science

Développement d'une approche holistique d'évaluation des projets de rénovation durable

Lara Ramadan

► **To cite this version:**

Lara Ramadan. Développement d'une approche holistique d'évaluation des projets de rénovation durable. Génie civil. Université de Lille; Université Libanaise, 2021. Français. NNT : 2021LILUN012 . tel-03561516

HAL Id: tel-03561516

<https://theses.hal.science/tel-03561516v1>

Submitted on 8 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

Soumise pour l'obtention du grade

DOCTEUR

UNIVERSITÉ DE LILLE

École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

UNIVERSITÉ LIBANAISE

École Doctorale de Sciences et Technologies

Discipline : Génie Civil

Présentée par :

Lara RAMADAN

Développement d'une Approche Holistique d'Évaluation des Projets de Rénovation Durable

Soutenue le 2 Novembre 2021 devant le jury composé de :

Mr. Hussein Mroueh , Prof., Université de Lille, France	Directeur
Mr. Fadi Hage Chehade , Prof., Université Libanaise, Liban	Directeur
Mr. Hani Azzedine , Prof., Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie	Rapporteur
Mr. Fouad Kaddah , Prof., Université Saint Joseph, Liban	Rapporteur
Mr. Isam Shahrour , Prof., Université de Lille, France	Examineur
Mr. Didier Defer , Prof., Université d'Artois, France	Examineur-Président
Mme. Jacqueline Saliba , Mcf, Université de Bordeaux, France	Examineur
Mme. Macole Sabat , Dr., Université de Balamand, Liban	Examineur

REMERCIEMENTS

Dieu nous a accordées pleines de grâces, pour en profiter et sans lesquelles personne ne pourra évoluer et atteindre ses ambitions.

Je remercie avant tout **Dieu** qui m'a donné le courage, la force, la volonté et la patience pour terminer ce travail de thèse.

Je remercie Pr. Didier DEFER de me faire l'honneur de présider le jury. Je remercie également les membres du jury d'avoir participé à la soutenance ainsi pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour leurs commentaires intéressants.

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements à mes directeurs de thèse Pr. Isam Shahrour, Pr. Hussein Mroueh et Pr. Fadi Hage Chehade. Leur disponibilité, leur persévérance, leurs conseils et commentaires m'ont aidé tout au long de mon parcours.

Je me sens chanceuse d'avoir été encadrée par Pr. Isam Shahrour et accueillie au sein de son équipe. Sans son aide et son implication dévouée à chaque étape, ce travail de thèse n'aurait jamais abouti. Je tiens à le remercier non seulement pour son soutien continu et sa motivation, mais aussi pour m'avoir traité dès le début comme un membre de ma famille et pour m'avoir offert de nombreuses opportunités. Je lui suis reconnaissante pour tout ce que j'ai appris à ses côtés.

Je désire grandement remercier le personnel, le corps professoral et mes collègues au laboratoire LGCgE pour leur sympathie, leur support technique et leur amitié. Ce groupe a été une source de bons conseils et de collaboration.

J'adresse de chaleureux remerciements à Madame Nivine ATTOUE, pour son attention durant la première phase de ma thèse.

Mon séjour en France a été rendu agréable en grande partie grâce aux nombreux amis qui sont devenus une partie de ma vie notamment Mohamad, Rania, Tariq et Ahmad.

Plus important encore, rien de tout cela n'aurait pu arriver sans ma famille. Les mots ne peuvent exprimer à quel point je suis reconnaissante envers mon père Hussein, ma mère Fatima, mon frère Ali et ma sœur Sarah pour tous les sacrifices qu'ils ont faits. Leur soutien a été inconditionnel toutes ces années. Ils ont chéri avec moi chaque grand moment et m'ont soutenu chaque fois que j'en avais besoin. Cette thèse témoigne de leur amour inconditionnel et de leurs encouragements. Je n'oublie pas la famille de ma mère qui était toujours présente à mes côtés, mes grands-parents, mes tantes et mon oncle.

Pour terminer, je remercie toutes les personnes qui m'ont aidées, m'ont soutenues et qui ont appréciées mon travail.

Merci à tous.

ABSTRACT

Reducing energy consumption is a priority in tackling climate change. The building sector is responsible for a large part of the global energy consumption and constitute an area of progress on the completion of this objective. The low renewal rate combined with the dilapidated state of the building stock have made the energy renovation of buildings a primary need for reducing greenhouse gaz emissions and saving energy.

The renovation of buildings lacks an evaluation process under real conditions of use. After the completion of the process, the involved actors will make little or no effort to assess the performance of the building during the post-occupancy phase. This assessment provides useful information for decision making in the design process. These actors are therefore deprived of feedback on the operation phase of their projects, which is considered a crucial aspect of the building's energy performance.

This Ph.D. work contributes to this subject. It consists of developing a holistic methodological approach for evaluating sustainable building renovation projects. The proposed methodology is primarily based on the identification of performance indicators from the planning phase of the projects. These indicators mainly cover the indoor comfort conditions of users as well as the building's services and consumption. The defined indicators will be informed later in order to assess the performances of the projects during the operation phase.

The methodology is applied to a project of renovation and extension of a research building at Lille University (ESPRIT). The users were an integral part in the evaluation of the indicators related to the services and comfort in this building. The consumptions were assessed on the basis of data collected from smart meters installed in the new building.

The results of this study confirm the need for post-occupancy evaluation of renovation projects. This evaluation provides improvement tracks for building managers and feedback for improving the performance of future projects.

Keywords: Sustainable renovation, evaluation, performance, indoor comfort, services, consumption.

RÉSUMÉ

La réduction de la consommation énergétique est une priorité dans la lutte contre le changement climatique. Le secteur des bâtiments est responsable d'une part importante des consommations énergétiques mondiales et constitue un axe de progrès sur le plan de réalisation de cet objectif. Le faible taux de renouvellement combiné à l'état vétuste du parc immobilier a fait de la rénovation énergétique des bâtiments un besoin primordial pour la réduction des émissions des gaz à effet de serre et l'économie de l'énergie.

Le processus de rénovation manque d'une démarche d'évaluation en conditions réelles d'utilisation. Après l'achèvement du processus, les acteurs impliqués feront peu ou pas d'efforts pour évaluer les performances du bâtiment lors de la phase post-occupation. Cette évaluation permet de fournir des informations utiles pour la prise de décision dans le processus de conception. Les acteurs sont donc privés d'un retour d'expérience sur la phase d'exploitation de leurs projets, considéré comme un aspect crucial de la performance énergétique du bâtiment.

Ce travail de thèse contribue à ce sujet. Il consiste à développer une approche méthodologique holistique d'évaluation des projets de rénovation durable des bâtiments. La méthodologie proposée est basée essentiellement sur l'identification des indicateurs de performance d'après la phase de planification des projets. Ces indicateurs couvrent principalement les conditions de confort interne des usagers ainsi que les services et les consommations du bâtiment. Les indicateurs définis seront informés ultérieurement afin d'évaluer les performances des projets en phase d'exploitation.

La méthodologie est appliquée à un projet de rénovation et d'extension d'un bâtiment de recherche de l'Université de Lille (ESPRIT). Les usagers ont constitué une partie intégrante dans l'évaluation des indicateurs liés aux services et au confort dans ce bâtiment. Les consommations sont évaluées sur la base des données recueillies des compteurs intelligents installés dans le nouveau bâtiment.

Les résultats de cette étude confirment la nécessité de l'évaluation post-occupation des projets de rénovation. Cette évaluation fournit des pistes d'amélioration pour les gestionnaires du bâtiment et un retour d'expérience indispensable à l'amélioration de la performance des futurs projets.

Mots-Clés : Rénovation durable, évaluation, performance, confort interne, services, consommations.

Tableau des Matières

Abstract	i
Résumé	ii
Tableau des matières	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	xi
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : État de l’art	3
1.1 Introduction	3
1.2 Contexte énergétique du bâtiment.....	3
1.3 Approche Globale de la rénovation des bâtiments.....	11
1.4 Rénovation durable des bâtiments.....	14
1.4.1 Aspect environnemental	14
1.4.2 Aspect économique	15
1.4.3 Aspect social.....	18
1.5 Défis de la rénovation	24
1.6 Conclusion.....	26
Chapitre 2 : Méthodologie de recherche	27
2.1 Introduction	27
2.2 Méthodologie générale de la rénovation	27
2.3 Phase pré-rénovation	28
2.3.1 Planification.....	28
2.3.2 Indicateurs de performance	37
2.4 Phase post-rénovation	41
2.4.1 Évaluation de l’aspect technique	42
2.4.2 Évaluation de l’aspect social	44
2.4.3 Évaluation de l’aspect environnemental	44
2.4.4 Évaluation de l’aspect économique	48
2.5 Conclusion.....	51

Chapitre 3 : Analyse de la phase de planification du projet ESPRIT	52
3.1 Introduction	52
3.2 Éléments cadrant l'activité	52
3.2.1 Contexte.....	52
3.2.2 Objectif de l'opération.....	53
3.2.3 Contraintes financières	53
3.3 Diagnostic de l'état du bâtiment.....	55
3.3.1 Présentation du bâtiment existant.....	55
3.3.2 Diagnostic environnemental	56
3.4 Besoin des usagers	60
3.5 Besoins de la personne publique	63
3.6 Contexte réglementaire	68
3.7 Indicateurs de performance	71
3.8 Conclusion	73
Chapitre 4 : Analyse de confort et de consommations dans le bâtiment ESPRIT	74
4.1 Introduction	74
4.2 Analyse du confort dans le bâtiment ESPRIT.....	74
4.2.1 Présentation du Laboratoire LGCgE	74
4.2.2 Instrumentation.....	76
4.2.3 Analyse de la période chauffée.....	78
4.2.4 Analyse de la période non chauffée.....	89
4.3 Consommations du bâtiment ESPRIT.....	99
4.3.1 Consommation d'eau.....	99
4.3.2 Consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre.....	106
4.3.3 Consommation d'énergie liée au chauffage	108
4.3.4 Consommation et production de l'électricité	127
4.3.5 Bilan énergétique global.....	131
4.4 Conclusion.....	133
Chapitre 5: Analyse des performances du bâtiment ESPRIT par les usagers	134
5.1 Introduction	134
5.2 Description de l'enquête.....	134
5.3 Analyse de satisfaction.....	137

5.3.1 Observation générale	137
5.3.2 Analyse du groupe 1	139
5.3.3 Analyse du groupe 2	141
5.3.4 Analyse du groupe 3	142
5.3.5 Satisfaction globale	146
5.4 Analyse de l'importance des facteurs	147
5.4.1 Analyse globale	147
5.4.2 Analyse du groupe 1	149
5.4.3 Analyse du groupe 2	149
5.5 Analyse de relations	150
5.5.1 Analyse de corrélation	150
5.5.2 Étude de l'influence des facteurs catégoriels	151
5.5.3 Analyse de satisfaction par variable catégorielle	153
5.6 Conclusion	166
Conclusions Générales et Perspectives.....	168
Références Bibliographiques.....	170

Liste des figures

Figure 1.1 : Consommation finale énergétique par secteur en France	4
Figure 1.2 : Émission des gaz à effet de serre par secteur en France	5
Figure 1.3 : Répartition par usage de la consommation énergétique du bâtiment	5
Figure 1.4 : Répartition du parc de logement français par périodes de construction	6
Figure 1.5 : Évolution de la répartition des logements selon la période de construction	6
Figure 1.6 : Les axes fondamentaux du PREB 2018	7
Figure 1.7 : Le Programme National de Rénovation Urbaine PNRU	7
Figure 1.8 : Le Programme Nationale de Rénovation Urbaine NPNRU	8
Figure 1.9 : Le Programme National de Requalification des Quartiers Anciens Dégradés PNRQAD	8
Figure 1.10 : Part des bâtiments dans la consommation finale d'énergie des états membres de l'UE (2012)	9
Figure 1.11 : Taux de rénovation majeure des bâtiments résidentiels dans les États membres	9
Figure 1.12 : Avantages de la rénovation énergétique des bâtiments	12
Figure 1.13 : Phases clés du programme de rénovation des bâtiments	13
Figure 1.14 : Éléments clés influençant la modernisation des bâtiments	13
Figure 1.15 : Catégories d'impact environnemental selon la norme européenne	15
Figure 1.16 : Indicateurs de performance économique	16
Figure 1.17 : Les principes du SROI	24
Figure 2.1 : Approche systématique d'un projet de rénovation	28
Figure 2.2 : Volets de la phase de planification	29
Figure 2.3 : Objectifs de la rénovation	30
Figure 2.4 : RT Existant	36
Figure 2.5 : Procédure de définition et de pondération des indicateurs de performance	37
Figure 2.6 : Indicateurs de performance	38
Figure 2.7 : Échelle de pondération de l'AHP	40
Figure 2.8 : Échelle de pondération de la méthode de Classement	41
Figure 2.9 : L'architecture du GTB	43
Figure 2.10 : Les phases de l'analyse du cycle de vie	45
Figure 2.11 : Phases du cycle de vie des bâtiments	46
Figure 2.12 : Étapes pour effectuer une analyse du coût du cycle de vie	49
Figure 2.13 : Paramètres d'entrée du calcul du coût de cycle de vie	50
Figure 3.1 : Acteurs de l'opération	53
Figure 3.2 : Principaux travaux de l'opération	54
Figure 3.3 : Thématiques du diagnostic environnemental	57
Figure 3.4 : Caractéristiques fonctionnelles et organisationnelles des locaux.....	61
Figure 3.5 : Thématiques environnementales considérées	63
Figure 3.6 : Objectifs définis dans la stratégie de développement durable de l'université	70

Figure 4.1 : Les bureaux considérés dans cette recherche (a) Branche 1 et (b) Branche 2	75
Figure 4.2 : La répartition des bureaux considérés dans cette recherche selon leur occupation ..	75
Figure 4.3 : Architecture du système de surveillance	76
Figure 4.4 : Exemples d'installation des capteurs dans les bureaux du LGCgE	77
Figure 4.5 : Schéma de Fonctionnement du capteur "Netatmo"	77
Figure 4.6 : Illustration de l'application Home Coach - "Netatmo"	77
Figure 4.7 : Variation de (a) Température et (b) d'Humidité sur une semaine de la période chauffée	79
Figure 4.8 : Variation de (a) La Température et de (b) L'Humidité moyennes horaires durant la période chauffée	79
Figure 4.9 : Diagramme en violon de (a) La Température et (b) L'humidité des bureaux durant la période chauffée	80
Figure 4.10 : (a) La Température moyenne et (b) L'Humidité relative moyenne des bureaux pour la période chauffée	81
Figure 4.11 : L'écart type de (a) La Température et (b) L'Humidité relative des bureaux durant la période chauffée	81
Figure 4.12 : Barre d'erreur de (a) La Température et de (b) L'Humidité relative des bureaux durant la période chauffée	82
Figure 4.13 : Diagramme en violon de la Température dans les bureaux (a) B-01 à B-12, (b) B- 13 à B-17 et (c) B-18 à B-22 durant la période chauffée	84
Figure 4.14 : Diagramme en violon de l'Humidité relative dans les bureaux durant la période chauffée	85
Figure 4.15 : Diagramme de corrélation entre les variables considérées durant la période chauffée	86
Figure 4.16 : Diagramme de confort hygrothermique	87
Figure 4.17 : Pourcentage de confort dans chaque bureau durant la période chauffée	88
Figure 4.18 : Variation de (a) Température et (b) Humidité sur une semaine de la période non chauffée	90
Figure 4.19 : Variation de (a) Température et (b) d'humidité moyenne horaire durant la période non chauffée	91
Figure 4.20 : Diagramme en violon de (a) La Température et de (b) L'humidité des bureaux durant la période non chauffée	91
Figure 4.21 : (a) La Température moyenne et (b) L'Humidité relative moyenne des bureaux durant la période non chauffée	92
Figure 4.22 : L'écart type de (a) La Température et de (b) L'Humidité relative des bureaux durant la période non chauffée	92
Figure 4.23 : Barres d'erreur de (a) La Température et de (b) L'Humidité relative des bureaux durant la période non chauffée	94
Figure 4.24 : Diagramme en violon de (a) La Température et de (b) L'Humidité relative des bureaux durant la période non chauffée	95
Figure 4.25 : Diagramme de corrélation entre les variables considérées durant la période non chauffée	96
Figure 4.26 : Pourcentage de confort dans chaque bureau durant la période non chauffée	97

Figure 4.27 : Variation de la concentration en CO ₂ des bureaux durant la période non chauffée	98
Figure 4.28 : Consommation mensuelle d'eau en 2020.....	99
Figure 4.29 : Répartition des consommations selon les jours de la période (Janvier à mi-Mars)	100
Figure 4.30 : Barres d'erreur des consommations journalières d'eau	101
Figure 4.31 : Diagramme en boîte des consommations journalières lors du confinement	102
Figure 4.32 : Diagramme en boîte des taux d'occupation durant la période de la crise	103
Figure 4.33 : Diagramme en boîte des consommations journalières en 2021	104
Figure 4.34 : Consommation d'eau d'une semaine du mois de Février 2021	105
Figure 4.35 : Diagramme en boîte des taux d'occupation de la période 2021.....	105
Figure 4.36 : Diagramme en boîte des taux d'occupation après élimination des surconsommations de Février	106
Figure 4.37 : Méthode d'évaluation des C _{ep}	107
Figure 4.38 : Consommation mensuelle d'énergie de chauffage du bâtiment rénové	109
Figure 4.39 : Répartition des charges de chauffage selon les jours de la période normale	110
Figure 4.40 : Rapports journaliers KWh/DJU pour chacune des catégories de jours définies ...	112
Figure 4.41 : Rapports journaliers KWh/DJU pour chacune des catégories de jours définies après correction	112
Figure 4.42 : Diagramme en boîte des rapports journaliers KWh/DJU pour chacune des catégories de jours définies après correction	113
Figure 4.43 : Variation du rapport KWh/DJU en fonction du taux d'occupation du bâtiment ...	114
Figure 4.44 : Consommation mensuelle d'énergie de chauffage du nouveau bâtiment	115
Figure 4.45 : Répartition des charges de chauffage du nouveau bâtiment selon les jours de la période normale	116
Figure 4.46 : Rapports journaliers KWh/DJU du nouveau bâtiment pour chacune des catégories des jours	117
Figure 4.47 : Variation des rapports journaliers KWh/DJU sur la période chauffée	118
Figure 4.48 : Diagramme en boîte des rapports journaliers KWh/DJU sur la période chauffée	118
Figure 4.49 : Variation du rapport KWh/DJU du nouveau bâtiment en fonction du taux d'occupation	119
Figure 4.50 : Consommation mensuelle des salles de réunion	120
Figure 4.51 : Répartition des charges de chauffage des salles de réunion selon les jours de la période normale	121
Figure 4.52 : Rapports journaliers KWh/DJU des salles de réunion pour chacune des catégories de jours définies	122
Figure 4.53 : Rapports journaliers KWh/DJU des salles de réunion après correction	122
Figure 4.54 : Diagramme en boîte des rapports journaliers KWh/DJU des salles de réunion après correction	123
Figure 4.55 : Variation du rapport KWh/DJU des salles de réunion en fonction de l'occupation	123
Figure 4.56 : Consommations mensuelles de chauffage liées à la ventilation	124
Figure 4.57 : Consommations journalières de chauffage liées à la ventilation	124

Figure 4.58 : Rapports journaliers KWh/DJU de chauffage liées à la ventilation	125
Figure 4.59 : Diagramme en boîte des consommations liées à la ventilation sur la première période	125
Figure 4.60 : Rapports journaliers KWh/DJU des charges de chauffage liées à la ventilation pour la première période	126
Figure 4.61 : Diagramme en boîte des consommations liées à la ventilation sur la deuxième période	126
Figure 4.62 : Rapports journaliers KWh/DJU des charges de chauffage liées à la ventilation pour la deuxième période	127
Figure 4.63 : Variation du rapport KWh/DJU lié à la ventilation en fonction du taux d'occupation du bâtiment	127
Figure 4.64 : Consommations électriques mensuelles	128
Figure 4.65 : Répartition mensuelle des consommations électriques	128
Figure 4.66 : Répartition des consommations électriques selon les catégories des Jours	129
Figure 4.67 : Production mensuelle du bâtiment en énergie	130
Figure 4.68 : Diagramme en boîte de la part de la production journalière dans la consommation pour chaque mois	131
Figure 4.69 : La part de chaque composante de la consommation énergétique totale du bâtiment	132
Figure 5.1 : Échelle de satisfaction et d'importance	135
Figure 5.2 : Diagramme en boîte des notes de satisfaction	138
Figure 5.3 : Note moyenne de satisfaction par facteur	138
Figure 5.4 : Pourcentage de satisfaction des participants relatif aux facteurs du Groupe 1	140
Figure 5.5 : Sources d'insatisfaction de la qualité de l'air	140
Figure 5.6 : Sources d'insatisfaction de l'éclairage naturel.....	141
Figure 5.7 : Pourcentage de satisfaction des participants relatif au Groupe 2.....	141
Figure 5.8 : Sources d'insatisfaction du contrôle de la température	142
Figure 5.9 : Pourcentage de satisfaction des participants relatif aux facteurs du Groupe 3	143
Figure 5.10 : Sources d'insatisfaction de l'éclairage artificiel	143
Figure 5.11 : Sources d'insatisfaction du contrôle de l'éclairage global	144
Figure 5.12 : Sources d'insatisfaction de la température	144
Figure 5.13 : Sources d'insatisfaction de la ventilation	145
Figure 5.14 : Sources d'insatisfaction du confort acoustique	145
Figure 5.15 : Diagramme en boîte de la note finale de satisfaction par participant	146
Figure 5.16 : Répartition des participants en termes de satisfaction globale	146
Figure 5.17 : Diagramme en boîte des notes d'importance	147
Figure 5.18 : Note moyenne d'importance par facteur	148
Figure 5.19 : Répartition des niveaux d'importance dans le Groupe 1	149
Figure 5.20 : Répartition des niveaux d'importance dans le Groupe 2	149
Figure 5.21 : Corrélation des réponses sur la satisfaction envers les facteurs évalués	150
Figure 5.22 : Note moyenne de satisfaction par genre	153
Figure 5.23 : Répartition des participants par genre en termes de satisfaction globale	154
Figure 5.24 : Note moyenne d'importance par genre	154

Figure 5.25 : Note moyenne de satisfaction par orientation	155
Figure 5.26 : Répartition des participants par orientation en termes de satisfaction globale	156
Figure 5.27 : Note moyenne de satisfaction par type de bureau	157
Figure 5.28 : Répartition des participants par type de bureaux en termes de satisfaction globale	157
Figure 5.29 : Note moyenne d'importance par type de bureau	158
Figure 5.30 : Note moyenne de satisfaction par nombre de personnes dans les bureaux	158
Figure 5.31 : Répartition des participants par nombre de personnes en termes de satisfaction globale	159
Figure 5.32 : Note moyenne de satisfaction par poste occupé	160
Figure 5.33 : Répartition des participants par poste occupé en termes de satisfaction globale ..	161
Figure 5.34 : Note moyenne de satisfaction par laboratoire	162
Figure 5.35 : Répartition des participants par laboratoire en termes de satisfaction globale	163
Figure 5.36 : Note moyenne d'importance par laboratoire	164
Figure 5.37 : Note moyenne de satisfaction par catégorie d'âge	164
Figure 5.38 : Répartition des participants par catégories d'âge en termes de satisfaction globale	165
Figure 5.39 : Note moyenne d'importance par catégorie d'âge	166

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Objectif des stratégies de rénovation (2020) des États membres de l'UE	10
Tableau 1.2 : Méthodes d'évaluation économique du coût du cycle de vie	17
Tableau 1.3 : Thèmes et Indicateurs sociaux de la matrice de connaissance	19
Tableau 1.4 : Résumé des principaux indicateurs sociaux cités dans la littérature	20
Tableau 1.5 : Paramètres clés de collecte de données auprès des occupants	22
Tableau 2.1 : Outils d'aide au diagnostic des bâtiments	33
Tableau 2.2 : Caractéristiques des enquêtes et des groupes de discussion	34
Tableau 2.3 : Exemple de définition de l'Unité Fonctionnelle	45
Tableau 2.4 : Méthodes recommandées pour certaines catégories d'impact	48
Tableau 3.1 : L'indicateur économique de Coût global	55
Tableau 3.2 : Informations sur le Bâtiment D	56
Tableau 3.3 : Indicateurs de performance liés au diagnostic environnemental	60
Tableau 3.4 : Répartition des espaces de chaque entité	61
Tableau 3.5 : Indicateurs de performance liés à la satisfaction des usagers	62
Tableau 3.6 : Besoins en terme d'énergie	63
Tableau 3.7 : Besoins en terme de matériaux	64
Tableau 3.8 : Besoins en terme d'exploitation et de maintenance	65
Tableau 3.9 : Besoins en terme de confort hygrothermique	65
Tableau 3.10 : Besoins en terme de confort visuel	66
Tableau 3.11 : Besoins en terme d'intégration de l'ouvrage dans son site	66
Tableau 3.12 : Besoins en terme de gestion des déchets	67
Tableau 3.13 : Sujets liés au thème confort acoustique	67
Tableau 3.14 : Sujets liés au thème gestion de l'eau.	68
Tableau 3.15 : Les normes à respecter par certains éléments	69
Tableau 3.16 : Résumé des indicateurs de performance	71
Tableau 4.1 : Caractéristiques des bureaux similaires en terme de moyenne et d'écart type	83
Tableau 4.2 : Division des bureaux ayant une distribution plurimodale d'humidité	85
Tableau 4.3 : Les plages de confort associées au diagramme (Figure 4.16)	88
Tableau 4.4 : Les indicateurs de tendance (T°, HR) des bureaux (B-04 et B-14).....	94
Tableau 4.5 : La description statistique de la concentration en CO ₂	98
Tableau 4.6 : Valeurs statistiques des consommations d'eau par catégorie	100
Tableau 4.7 : Valeurs statistiques des taux d'occupation par mois en 2020	103
Tableau 4.8 : Valeurs statistiques des consommations d'eau en 2021	104
Tableau 4.9 : Valeurs statistiques des taux d'occupation en 2021	106
Tableau 4.10 : Facteur d'énergie primaire (FEP)	107
Tableau 4.11 : Facteur d'émission (FE _{GES})	108
Tableau 4.12 : Valeurs statistiques des charges de chauffage par catégorie	110
Tableau 4.13 : Valeurs statistiques des rapports kWh/DJU par catégorie	113
Tableau 4.14 : Calcul C _{ep} et émissions GES.....	115

Tableau 4.15 : Valeurs statistiques des charges de chauffage du nouveau bâtiment par catégorie	117
Tableau 4.16 : Valeurs statistiques des rapports KWh/DJU par catégorie	119
Tableau 4.17 : Calcul C_{ep} et émissions GES	120
Tableau 4.18 : Valeurs statistiques des charges de chauffage des salles de réunions par catégorie	121
Tableau 4.19 : Valeurs statistiques des rapports KWh/DJU des salles de réunion	123
Tableau 4.20 : Valeurs statistiques des consommations électriques	129
Tableau 4.21 : Valeurs statistiques des rapports Production/Consommation.....	131
Tableau 4.22 : Bilan énergétique du bâtiment	132
Tableau 5.1 : Composition du questionnaire	134
Tableau 5.2 : Caractéristiques personnelles des participants	136
Tableau 5.3 : Caractéristiques des bureaux des participants	137
Tableau 5.4 : Répartition des facteurs en terme de note moyenne de satisfaction	139
Tableau 5.5 : Répartition des facteurs en terme de note moyenne d'importance	148
Tableau 5.6 : Résultats des tests statistiques relatifs aux réponses de satisfaction	152
Tableau 5.7 : Résultats des tests statistiques relatifs aux réponses d'importance	152
Tableau 5.8 : Les facteurs les plus importants évalués par les participants par genre	154
Tableau 5.9 : Les facteurs les plus importants évalués par les participants par orientation	156
Tableau 5.10 : Les facteurs les plus satisfaisants pour les trois groupes de nombre de personnes	159
Tableau 5.11 : Les facteurs les plus importants pour les trois groupes de nombre de personnes	160
Tableau 5.12 : Le groupe de participants le plus satisfait pour chaque facteur par poste	161
Tableau 5.13 : Les facteurs les plus importants par poste occupé	162
Tableau 5.14 : Le laboratoire le plus satisfait pour chaque facteur	163
Tableau 5.15 : Le groupe d'âge le plus satisfait pour chaque facteur.....	165

Introduction Générale

Le dérèglement climatique constitue une menace sérieuse pour l'homme et l'environnement. La consommation d'énergie est considérée comme une source fondamentale de ce problème. En réponse, de nombreux pays se sont fixé des objectifs pour réduire la consommation énergétique dans tous les secteurs de l'économie.

Les bâtiments constituent l'une des principales sources de demande d'énergie. Ils sont responsables de 40% de la consommation énergétique dans le monde et de 35% des émissions mondiales de dioxyde de carbone CO₂ [1,2]. Ce secteur constitue donc un important agent de changement. L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est considérée comme une solution efficace contribuant à la réduction de la dépendance énergétique et des émissions de gaz à effet de serre.

Les efforts mondiaux se sont concentrés sur la conception et la construction de bâtiments neufs économes en énergie. Cependant, le taux de renouvellement du secteur du bâtiment est très faible (1 à 2 % par an), car la majorité de ce secteur dans les pays développés est déjà construite. Or, le parc immobilier existant vieillit et ne répond pas aux normes d'efficacité énergétique et de performance environnementale attendues.

Face à cette situation, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments existants est une mesure majeure pour atteindre les objectifs de réduction d'énergie. De nombreuses études ont affirmé que la rénovation énergétique du parc existant a un grand potentiel d'économie d'énergie et de réduction des émissions de CO₂ [3-5].

Le processus de rénovation est confronté à plusieurs défis. Ce processus manque d'une démarche d'évaluation tout au long du cycle de vie des projets impliquant l'ensemble des acteurs du projet, d'un système et de routines d'évaluation du bâtiment en conditions d'utilisation. Ce manque a un impact négatif sur la performance du projet et prive les acteurs du projet d'un retour d'expérience pour les futurs projets.

Ce travail de thèse a pour but de développer une approche méthodologique pour l'élaboration de cette démarche. L'approche s'appuie sur l'identification des indicateurs de performance traduisant les besoins définis dans la phase de planification et couvrant le triple objectif de durabilité économique, environnemental et social. Ces indicateurs seront informés lors de la phase d'exploitation pour une évaluation pertinente du projet.

La méthodologie est appliquée à un projet de rénovation et d'extension d'un bâtiment existant à l'Université de Lille, réalisé dans le but d'accueillir l'activité de quatre laboratoires de recherche. Ce projet a été réalisé dans le cadre d'un partenariat public-privé (PPP). Ce modèle de partenariat intéresse les pouvoirs publics afin de surmonter des difficultés liées à l'insuffisance des ressources financières et humaines.

Le travail est organisé dans 5 chapitres.

Le premier chapitre présente les besoins en rénovation énergétique en présentant le contexte énergétique français et européen. Une attention particulière est accordée à la rénovation durable

des bâtiments. Les différentes phases du projet de rénovation ainsi que les facteurs clé influençant ce processus sont définis. Le chapitre présente l'impact de la rénovation sur les trois piliers de développement durable (environnement, économie et société) et les critères d'évaluation de ces trois piliers.

Le second chapitre présente la méthodologie d'évaluation holistique des projets de rénovation avec un focus sur les phases pré et post-rénovation. Les différents éléments cadrant le projet de rénovation sont définis dans la phase de planification. Sur la base de ces éléments, des indicateurs de performance sont identifiés. Les moyens nécessaires à la quantification de ces indicateurs sont développés dans la phase d'exploitation, afin d'établir une évaluation pertinente du projet.

Le chapitre 3 présente l'application de la méthodologie proposée à un projet de rénovation et d'extension mené à l'Université de Lille. Les données de cadrage et du diagnostic du projet sont présentées. La prise en compte des besoins et aspirations des usagers est discutée. Le chapitre présente aussi les indicateurs de performance du projet.

Le chapitre 4 comporte une évaluation des performances du bâtiment en phase d'usage. Le confort intérieur est évalué sur la base d'une instrumentation. Les performances en matière des consommations d'eau et d'énergie sont analysées d'après les données remontées par les capteurs des consommations.

Le dernier chapitre présente l'évaluation par les usagers du bâtiment. Une enquête a été menée dans le but d'évaluer la satisfaction des usagers de la qualité de l'environnement intérieur et des services du bâtiment. Cette enquête a permis de recenser les sources d'insatisfaction et de proposer ainsi aux gestionnaires du bâtiment des pistes d'amélioration du fonctionnement du bâtiment.

Chapitre 1 : État de l'art

1.1 Introduction

Le développement durable est une priorité pour l'avenir des sociétés. Il est défini comme « un développement qui répond aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Son mode d'organisation est fondé sur trois piliers, la qualité environnementale, l'équité sociale et l'efficacité économique.

Dans le contexte actuel, le parc immobilier consomme 40% de l'énergie. Il est aussi responsable du dérèglement climatique. Le développement durable a donc une importance particulière pour l'industrie de la construction tant pour les bâtiments neufs que pour la rénovation des bâtiments existants.

L'efficacité énergétique des bâtiments peut stimuler la croissance socio-économique et promouvoir le développement durable. En effet, les bâtiments économes en énergie peuvent apporter une contribution significative à la réalisation des objectifs de durabilité, qui sont liés à la lutte contre le changement climatique et ses impacts. Ils visent aussi à rendre les villes et les établissements humains sûrs, inclusifs, résilients et durables.

Le grand potentiel du développement durable réside dans la rénovation des bâtiments existants dû au faible taux de renouvellement du stock de bâtiments. La rénovation assure la préservation des ressources naturelles en limitant la consommation d'énergie. Elle améliore les conditions de vie des occupants en assurant des logements sains et durables. Elle contribue au développement économique en développant le marché des énergies renouvelables et en faisant émerger de nouvelles professions. Elle est donc au centre du développement durable.

Dans ce chapitre, la notion de rénovation durable sera traitée. Le chapitre est organisé en cinq parties. La première décrit le contexte énergétique des bâtiments en France et en Europe. La deuxième présente l'approche globale de la rénovation énergétique. Les aspects de la rénovation durable sont définis dans la troisième. Les principaux défis de la rénovation sont résumés dans la dernière partie.

1.2 Contexte énergétique du bâtiment

L'industrie, le transport, le résidentiel et le tertiaire sont les principaux secteurs économiques à la base de la consommation finale en énergie en France (Figure 1.1). Le champ résidentiel-tertiaire est le secteur le plus énergivore avec près de 44% de la consommation finale du pays et 20% des émissions des gaz à effet de serre GES (Figure 1.2). Bien que la part du secteur tertiaire dans les émissions françaises de CO₂ est de 7.4% et sa part dans le bilan énergétique est modeste avec près de 15% de consommation finale, cependant il est au sein des politiques de maîtrise de l'énergie. La plus grande proportion de consommation énergétique dans ces secteurs est dédiée aux besoins et au confort des occupants liés au chauffage et à la production de l'eau chaude sanitaire (Figure 1.3).

La France à travers ses engagements internationaux et européens en matière de lutte contre le changement climatique, œuvre pour réduire ses émissions des gaz à effet de serre et à améliorer l'efficacité énergétique des différents secteurs. Dans ce cadre, le bâtiment représente un secteur

clé dans lequel il est possible de progresser rapidement sur le plan de l'achèvement des objectifs définis.

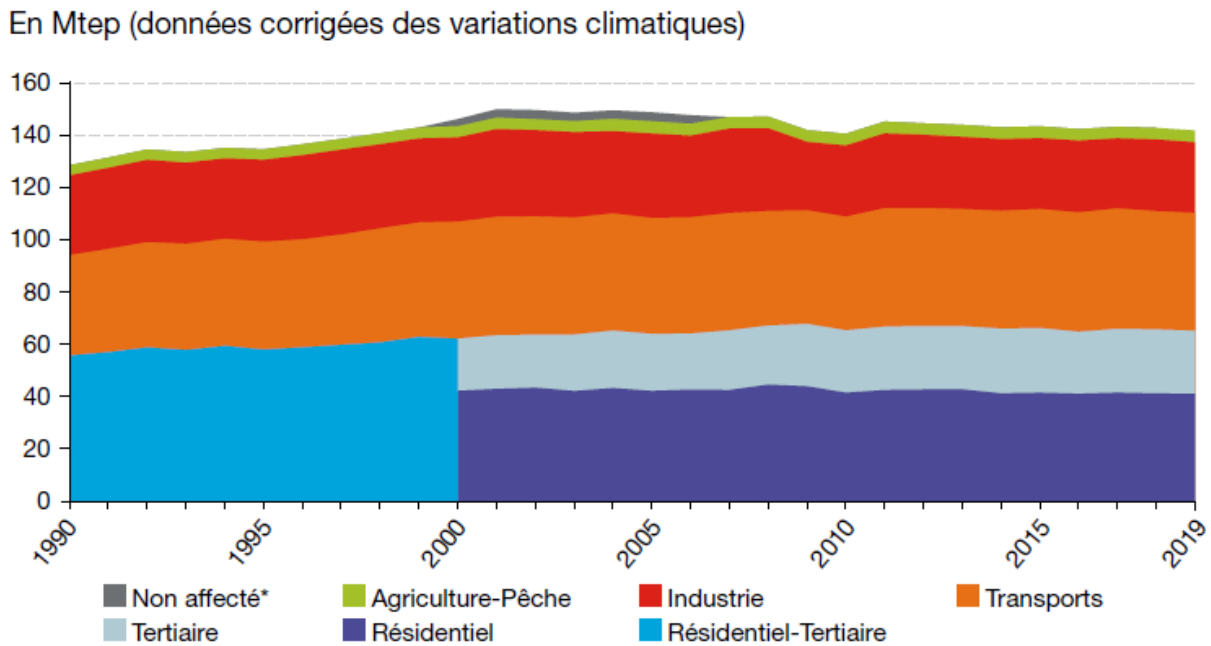


Figure 1.1-Consommation finale énergétique par secteur en France [6].

Son engagement s'est traduit à l'échelle nationale par des mesures concrètes illustrées par la mise en œuvre des Plans Climat (2004,2010,2017) décrivant les actions nationales de prévention du changement climatique dans tous les secteurs d'économie à l'horizon de 2012, 2020 et 2022 respectivement [7]. Outre, la France a adopté des lois relatives à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV 2015) et à l'Énergie et au Climat (2019) qui ont ancré les objectifs assignés au secteur du bâtiment. La loi LTECV repose sur les économies d'énergie comme un pilier principal. Elle a défini des objectifs de réduction des émissions des gaz à effet de serre de 40% et de réduction de la consommation d'énergie de 20% à l'horizon 2030 par rapport à celles en 1990. La loi relative à l'Énergie et au Climat a introduit des modifications sur les visées nationales fixées par la LTECV, notamment en ajoutant un nouvel objectif de neutralité carbone d'ici 2050. Ces lois ont défini aussi des outils de pilotage de la politique énergétique dont les plus émergents sont la Stratégie Nationale Bas-Carbone SNBC et le Programme Pluriannuel de l'Énergie PPE. Des textes cadrant les bâtiments neufs et la rénovation des bâtiments existants ont été développés aussi dans des réglementations thermiques, dont la plus récente est la RT-2020 qui a introduit le principe des bâtiments à énergie positive BEPOS produisant davantage d'énergie qu'ils n'en consomment. Les mesures mises en place ont compris aussi la transposition de directives européennes telles que la directive sur les performances énergétiques des bâtiments, avec l'obligation de la réalisation d'un diagnostic de performance énergétique pour tout logement nouvellement construit [9].

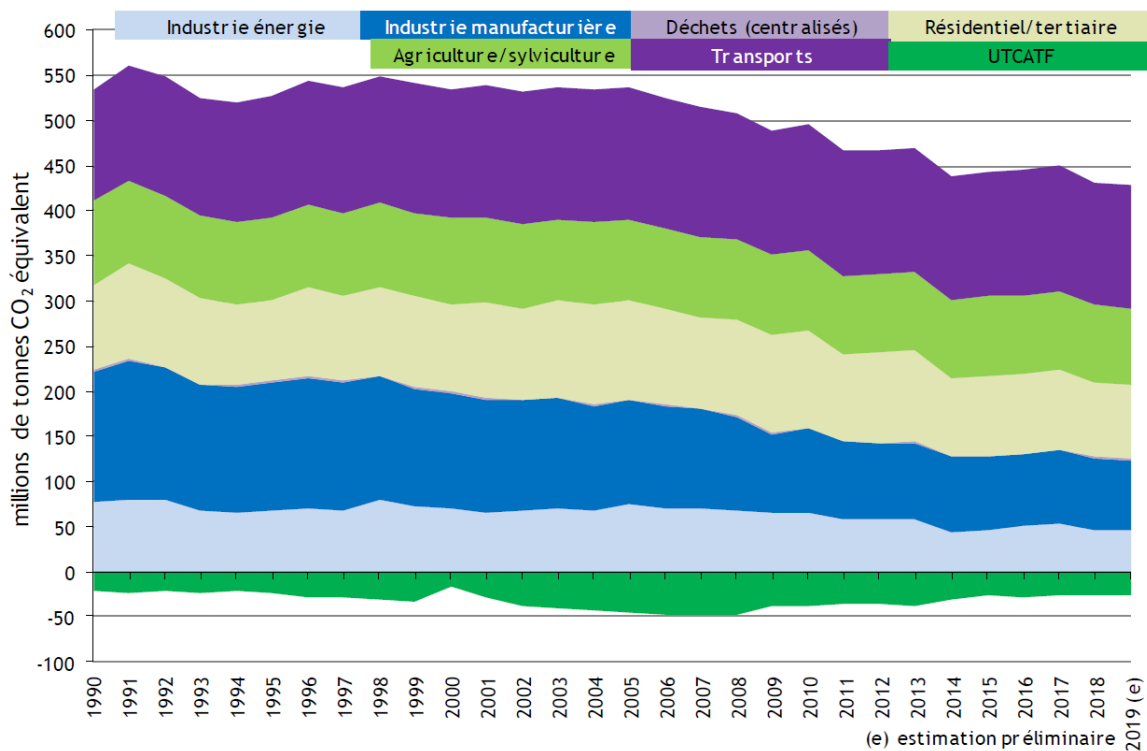


Figure 1.2—Émission des gaz à effet de serre par secteur en France [7].

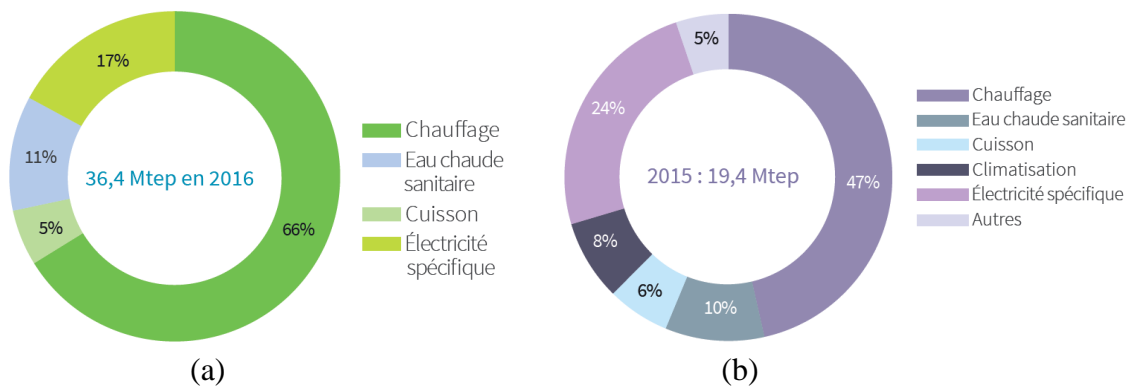


Figure 1.3—Répartition par usage de la consommation énergétique du bâtiment (a) résidentiel et (b) tertiaire [8].

L'analyse des périodes de construction confirme que la France pâtit d'un parc important de logements anciens datant d'avant 1974 [10]. Par conséquent, près de 51% du parc national de bâtiments (Figure 1.4), ne sont pas en conformité avec les normes définies dans les réglementations thermiques étant donné que la première réglementation a vu le jour en 1974. Ces habitations sont identifiées comme étant les plus énergivores, vu que leur consommation énergétique dépasse largement celle des habitations récentes [11].

Les ministères de la transition écologique et solidaire et de la cohésion des territoires ont rapporté que 7 millions de logements français sont mal isolés, 3.8 millions de ménages sont en situation de précarité énergétique et 1 million de ménages ont froid dans leur logement en hiver.

D'autre part, le secteur de bâtiment affiche un taux de renouvellement faible près de 1% (Figure 1.5) justifiant ainsi que 75% de logements qui seront habités en 2050 sont déjà construits [11,12]. De ce fait, les mesures élaborées dans le but d'améliorer la performance énergétique des bâtiments neufs restent incapables de répondre aux défis environnementaux et énergétiques.

Face à cette situation inédite, il n'existe aucune alternative que d'entreprendre une campagne de rénovation massive et exigeante des bâtiments existants dans le but d'atteindre les objectifs ciblés.

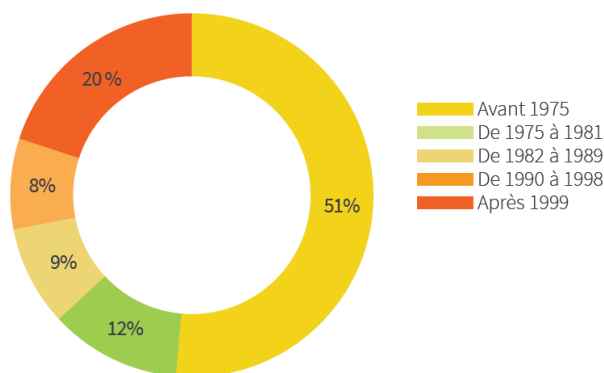


Figure 1.4-Répartition du parc de logement français par périodes de construction [8].

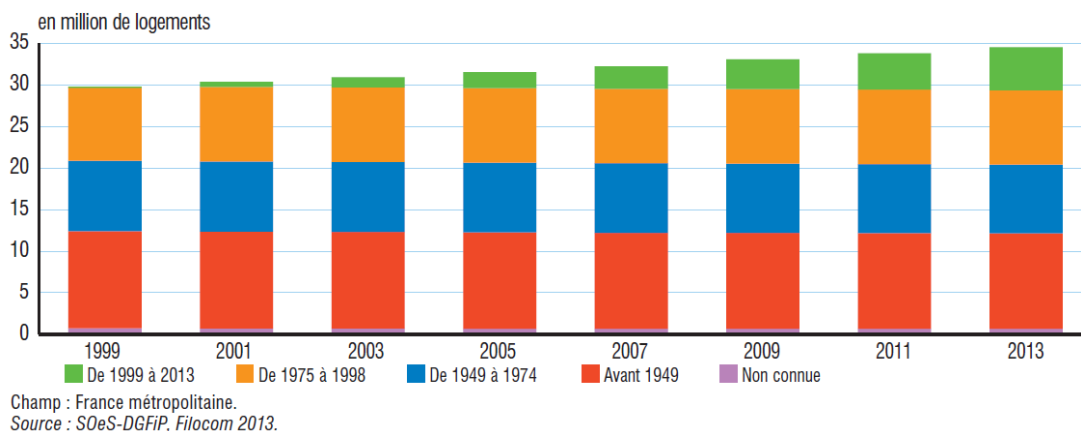


Figure 1.5- Évolution de la répartition des logements selon la période de construction.

Afin d'accélérer et de massifier la mise en œuvre des stratégies de rénovation, le gouvernement français a apporté de nombreux moyens robustes d'actions juridiques et financiers.

Le Plan de Rénovation Énergétique des Bâtiments PREB 2018 a émergé comme un outil adapté à ce sujet. Ce plan est le fruit d'une concertation qui a permis de mobiliser tous les acteurs de la rénovation sur un objectif commun : la neutralité carbone. PREB répond aux objectifs du Plan Climat lancé en Juillet 2017 et repose sur de multiples actions réparties en 4 axes fondamentaux [13] (Figure 1.6). Celui-ci a été supporté par un soutien public en investissement et en prime sur le quinquennat (2018-2022). Environ 14 milliards d'euros sont attribués à l'Agence Nationale Pour l'Amélioration de l'habitat ANAH, aux bailleurs sociaux, aux collectivités et aux bâtiments d'État comme des aides incitatives à la rénovation.

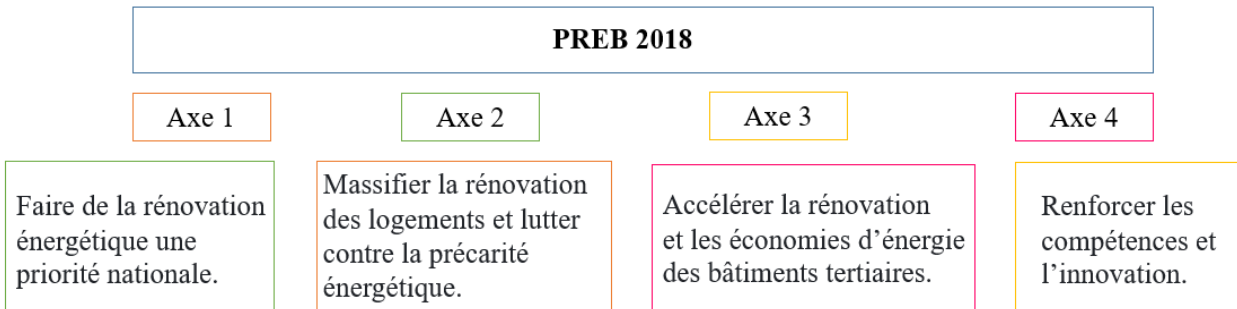


Figure 1.6- Les axes fondamentaux du PREB 2018.

D'autre part, une loi d'orientation et de programmation pour la ville et la rénovation urbaine visant la réhabilitation des quartiers avec une concentration sur ceux avec des difficultés sociales et un dysfonctionnement urbain a vu le jour en 2003. Afin de simplifier les démarches de mise en œuvre de ces projets de réhabilitation urbaine, l'Agence Nationale de Rénovation Urbaine ANRU a été créée en 2004. L'ANRU est un organisme public qui accompagne et finance les collectivités locales et les bailleurs sociaux pour une transformation profonde des territoires français. Concrètement, les transformations entreprises comprennent la démolition des logements inadaptés, la construction ou la réhabilitation des logements et des équipements publics et le développement des mixités sociales. En résultat, l'ANRU a permis la transformation de 700 quartiers et le changement du cadre de vie de 5 millions d'habitants.

Afin d'accomplir les missions auxquelles elle est associée, l'ANRU a défini des programmes de renouvellement urbain [14]. Avec sa naissance, le Programme National de Rénovation Urbaine PNRU (Figure 1.7) est lancé en 2004 et s'est achevé en 2020. Un effort national portant sur les logements, les équipements publics et les aménagements urbains a été mobilisé pour la transformation des quartiers les plus vulnérables. Un budget de 12 milliards d'euros est dédié à la transformation de près de 600 quartiers et à l'amélioration du cadre de vie de 4 millions d'habitants.

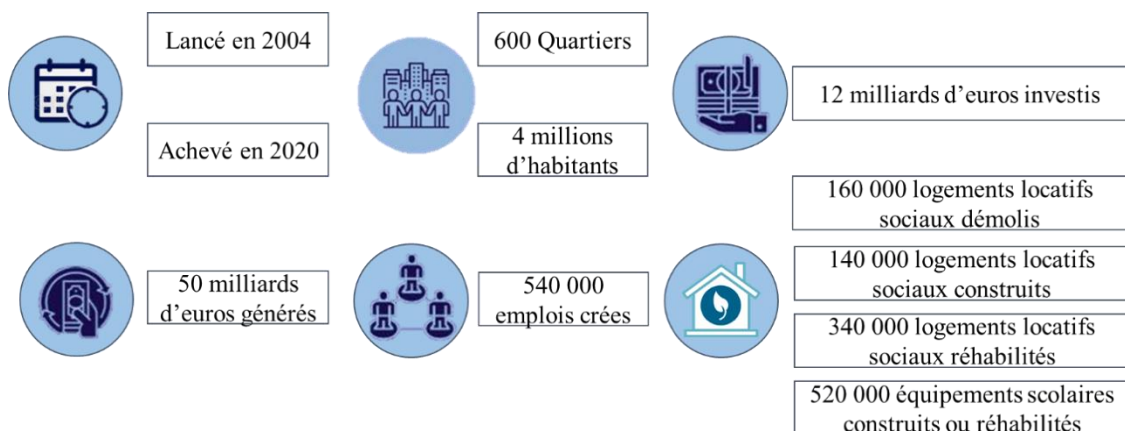


Figure 1.7- Le Programme National de Rénovation Urbaine PNRU.

La transformation urbaine se poursuit jusqu'en 2030 avec le Nouveau Programme National de Rénovation Urbaine NPNRU (Figure 1.8) lancé en 2014 dans le cadre de la loi de programmation

pour la ville et la cohésion urbaine. Tout comme PNRU, il prévoit la transformation profonde de près de 450 quartiers prioritaires de la politique de la ville où résident 3 millions d’habitants avec 10 milliards d’euros de subventions apportées par l’ANRU. Ses évolutions majeures par rapport au PNRU résident dans la favorisation du rééquilibrage des territoires en portant des projets au niveau de l’agglomération plutôt qu’au niveau de la commune et dans la contribution des habitants à la conception et la mise en œuvre des projets à partir des conseils citoyens.

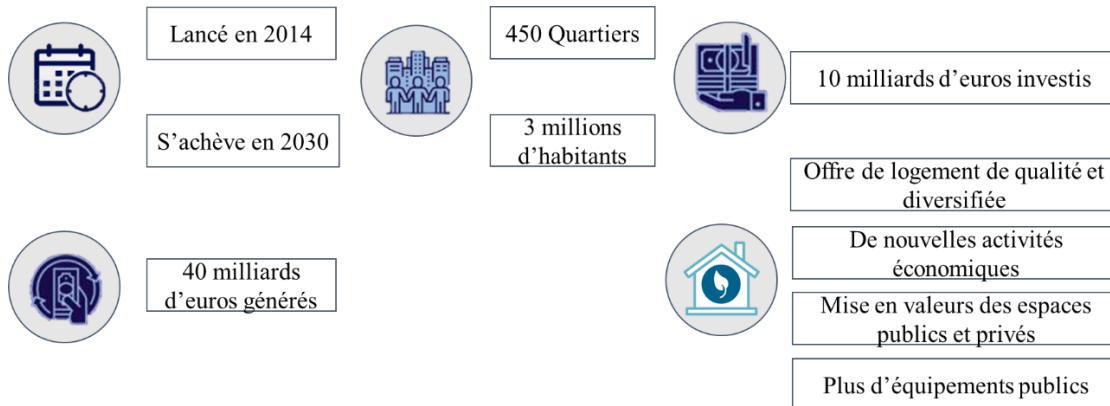


Figure 1.8- Le Programme Nationale de Rénovation Urbaine NPNRU.

Outre PNRU et NPNRU, le Programme National de Requalification des Quartiers Anciens Dégradés PNRQAD (Figure 1.9) est lancé en 2009 dans le but de transformer les quartiers les plus fragiles de centre ancien où un grand nombre d’habitats indignes se concentre et dans lequel les habitants souffrent de difficultés sociales et économiques. Similairement aux programmes cités, les projets concernent la réhabilitation globale des quartiers favorisant ainsi la mixité sociale, la diversification de l’habitat et l’amélioration énergétique des bâtiments tout en conservant les qualités architecturales et patrimoniales. Une trentaine de quartiers français sont concernés par ce programme doté d’un budget de 380 millions d’euros.

Les travaux de l’ANRU ne se limitent pas aux programmes de rénovation définis. En effet, l’ANRU est un opérateur des Programmes d’Investissements d’Avenir avec près de 800 millions d’euros pour plus d’égalité, plus d’innovation, plus de solidarité et une ville durable.



Figure 1.9- Le Programme National de Requalification des Quartiers Anciens Dégradés PNRQAD.

Bien que les mesures phares mises en place par le gouvernement français ont induit un progrès en terme de réduction d'émission des gaz à effet de serre et d'amélioration des performances énergétiques de l'habitat, cependant l'achèvement des objectifs climatiques et énergétiques que la France s'est fixée nécessite d'importants efforts.

Un contexte énergétique similaire peut être détecté dans l'Union Européen (UE) où les bâtiments représentent 40% de la consommation de l'énergie et 36% des émissions du dioxyde de carbone CO₂ [15] (Figure 1.10). De même, le parc de bâtiments dans l'UE est relativement ancien avec plus de 40% construits avant 1960 et 90% construits avant 1990 et dont la plupart persisteront jusqu'en 2050 [17]. Le rythme auquel les nouveaux bâtiments remplacent ou élargissent ce parc ancien existant est aussi faible. En outre, le taux actuel de rénovation des bâtiments est variable selon les programmes de rénovation adoptés par les États membres de l'UE avec environ 0.5 à 2.5 % du parc immobilier rénové par an (Figure 1.11). Cette situation implique que si la consommation énergétique des bâtiments ainsi que leurs émissions de GES doivent être réduites, la rénovation des bâtiments existants est incontournable. Augmenter le taux de rénovation des bâtiments existants à au moins 3% par an jusqu'en 2030 est un objectif clé de l'UE.

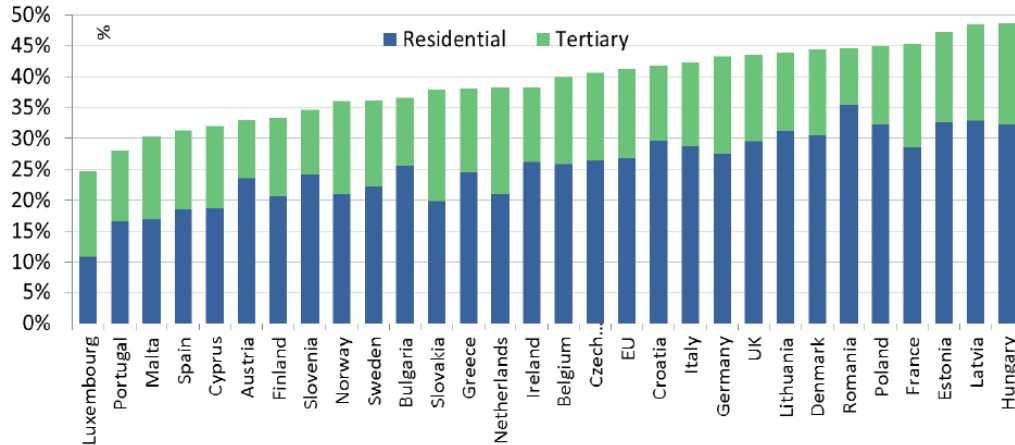


Figure 1.10- Part des bâtiments dans la consommation finale d'énergie des états membres de l'UE (2012) [16].

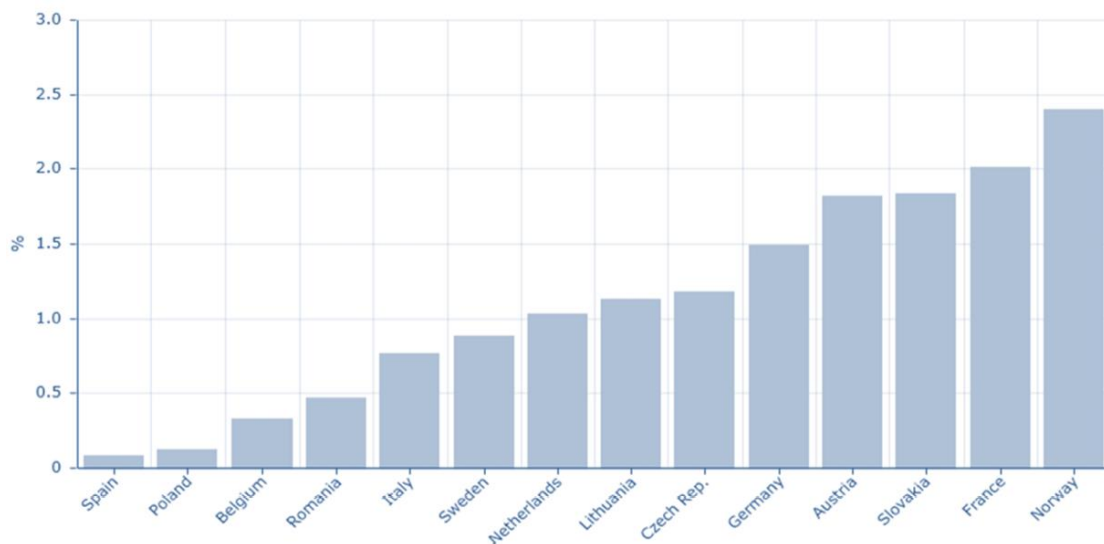


Figure 1.11- Taux de rénovation majeure des bâtiments résidentiels dans les États membres [17].

L'UE a introduit de nouvelles politiques ambitieuses pour aider à orienter les États membres vers une meilleure efficacité énergétique des bâtiments. La Directive relative à la Performance Énergétique des Bâtiments (DPEB), la Directive relative à l'Efficacité Énergétique (DEE) et la Directive sur les Énergies Renouvelables (DER) ont introduit des exigences connexes à la rénovation. L'article 7 de la DPEB entend encourager les rénovations obligeant les États membres à élaborer des plans nationaux afin d'augmenter le nombre de bâtiments à énergie quasi nulle, y compris une liste de mesures nationales de financement des rénovations éco énergétiques [17]. Il exigeait également que les bâtiments existants en cours de rénovation majeure soient conformes aux exigences minimales de performance énergétique dans la mesure où cela est techniquement, fonctionnellement et économiquement réalisable [18]. Conformément à l'article 4 de la DEE, les États membres doivent établir une stratégie à long terme pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments résidentiels et commerciaux, tant publics que privés. Ces stratégies doivent donner un aperçu du parc immobilier national du pays, identifier les politiques clés que le pays a l'intention d'utiliser pour stimuler les rénovations et fournir une estimation des économies d'énergie attendues qui résulteront des rénovations. Cet article appuie aussi la DPEB en ce qui concerne l'élaboration des politiques et des mesures pour stimuler la transformation des bâtiments rénovés en bâtiments à consommation énergétique quasi nulle. En outre, l'article 5 de la DEE fixe un objectif annuel de rénovation de 3% pour les bâtiments publics possédés et occupés par les administrations centrales [16]. La DER stipule que les États membres doivent introduire dans leurs réglementations et normes de construction un niveau minimum d'énergie renouvelable dans les bâtiments neufs et les bâtiments en rénovation majeure [15].

Malgré que la DEE a fixé une date limite pour la publication des États membres de la troisième version (2020) de leurs stratégies de rénovation à long terme, cependant seuls 12 pays (Autriche, Chypre, Tchéquie, Danemark, Estonie, Finlande, France, Allemagne, Luxembourg, Pays-Bas, Espagne, Suède) et deux des trois régions de Belgique (Flandre et Région de Bruxelles-Capitale) avaient soumis leurs stratégies à la Commission européenne. Les objectifs de réduction d'énergie et de carbone déclarés par les États membres dans leurs stratégies de rénovation ainsi que leur classement en fonction de ces stratégies sont résumés dans le Tableau 1.1 [19]. Parmi ces stratégies, une seule (Espagne) est en conformité avec les exigences de la DPEB, alors que les autres restent insuffisantes.

Afin de respecter leurs engagements en matière de lutte contre le dérèglement climatique et d'amélioration de performances énergétiques du parc immobilier, les États membres doivent soumettre des stratégies de rénovation satisfaisant les exigences minimales de conformité et veiller à ce que ces stratégies soient mises en œuvre, relançant le marché de la rénovation.

Tableau 1.1- Objectif des stratégies de rénovation (2020) des États membres de l'UE.

Pays	Horizon	Objectifs	Classement
Espagne	2050	-Bâtiment résidentiel : réduction de 37% de la consommation d'énergie et 99% réduction des émissions de CO ₂ par rapport à 2020. -Bâtiment non résidentiel : réduction de 36% de la consommation d'énergie par rapport à 2020.	1
Finlande	2050	-Réduction de 49% de la consommation d'énergie de chauffage par rapport au niveau de 2020. -92% de réduction des émissions de CO ₂ .	2

		-Élimination quasi totale de l'utilisation de combustibles fossiles. -82 à 100% de part de bâtiments à consommation énergétique quasi nulle, selon la typologie. -Part de 100% des bâtiments de classe énergétique A, B et C.	
Belgique-Flandre	2050	Réduction de la consommation d'énergie de 70% (résidentiel) et de 33% (non résidentiel) par rapport à 2020.	2
Pays-Bas	2050	Réduction des émissions de GES de 95% par rapport aux niveaux de 1990.	3
France	2050	Neutralité du Carbone.	4
Danemark	2050	Réduction de 4,4% par m ² de la consommation d'énergie par rapport aux niveaux de 2020.	4
Suède	2045	Être climatiquement neutre : sans fossile et avec zéro émission de GES	5
Allemagne	2030	Réduction d'énergie de 55% par rapport à 2008.	6
Luxembourg	2040	-Économies d'énergie prévues par rapport à 2018 Non résidentiel : 55% Résidentiel : 37-51% -Réduction des émissions de GES du parc immobilier résidentiel de 96%.	6
Chypre	2050	Réduction de la demande d'énergie de 20%.	7
Autriche	2050	Réduction estimée de la consommation d'énergie de 68% par rapport à 2015.	8
Tchéquie	2050	-Réduction de la consommation d'énergie de 24% par rapport aux niveaux de 2020. -Réduction de 40% des émissions de GES.	9
Estonie	2050	-Économies d'énergie de 60%. - Réduction de 90% des émissions de GES.	10

1.3 Approche globale de la rénovation des bâtiments

La rénovation des bâtiments est motivée par des besoins qui vont au-delà de la volonté de réduire la consommation énergétique des bâtiments et les émissions des gaz à effet de serre, comme dans le cas de travaux de rénovation qui coïncident avec des réparations structurelles [20]. Des travaux de rénovations sont effectués dans le but de réparer les dommages et de moderniser les systèmes de service du bâtiment en fin de vie. La nécessité de s'adapter aux normes et demandes des locataires est aussi un des motifs de rénovation [21,22]. Les efforts de modernisation visent à améliorer le confort intérieur en adoptant des mesures pour améliorer la qualité de l'environnement intérieur [23-25].

La rénovation offre des opportunités d'amélioration de l'état général du bâtiment, notamment son exploitation en assurant des conditions saines de vie et de travail, la prolongation de son cycle de vie et la réduction des coûts de maintenance. Elle peut contribuer à réduire l'exposition à la

volatilité des prix de l'énergie, à augmenter la valeur du bâtiment et à créer des emplois [26,27]. Les avantages de la rénovation des bâtiments sont résumés dans la Figure 1.12.



Figure 1.12- Avantages de la rénovation énergétique des bâtiments.

L'optimisation de la rénovation des bâtiments affecte la possibilité d'atteindre simultanément les profits cités. En effet, la mise en œuvre des mesures de modernisation les plus rentables permettant d'assurer des performances énergétiques tout en maintenant un niveau de service satisfaisant et un confort intérieur acceptable est un problème majeur dans la rénovation énergétique des bâtiments. De ce fait, les phases du programme de rénovation et les éléments qui affectent la modernisation doivent être examinés afin de parvenir à traiter ce problème [28].

Le processus de rénovation d'un bâtiment comporte cinq phases (Figure 1.13). La première phase consiste à comprendre les problèmes opérationnels existants et les préoccupations des usagers, à fixer les objectifs du projet et à déterminer les ressources disponibles pour encadrer le budget et le programme de travail. La deuxième phase comporte une analyse des données énergétiques des bâtiments pour comprendre la consommation en énergie et proposer des mesures d'économie d'énergie. Des diagnostics peuvent être réalisés afin d'identifier les équipements inefficaces et tout autre dysfonctionnement. La troisième phase concerne l'identification des options de modernisation. En utilisant des modèles énergétiques appropriés, des outils d'analyse économique et des méthodes d'évaluation des risques, la performance d'une gamme d'alternatives de rénovation peut être évaluée quantitativement. Ces alternatives peuvent ensuite être hiérarchisées en fonction des facteurs pertinents liés et/ou non liés à l'énergie. Dans la quatrième phase, les mesures de rénovation sélectionnées sont mises en œuvre. Le test et la mise en service seront utilisés pour ajuster les mesures de rénovation afin de garantir que le bâtiment et ses systèmes de services fonctionnent d'une manière optimale. Une fois les mesures de modernisation sont mises en œuvre et bien réglées, il s'agit de vérifier les économies d'énergie. Une enquête post-occupation est nécessaire pour vérifier si les occupants et les propriétaires des bâtiments sont satisfaits de l'opération de rénovation.

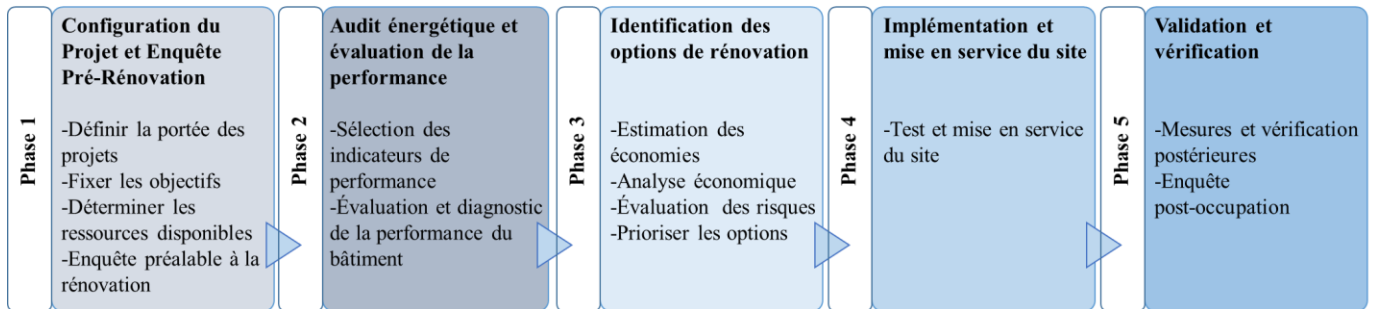


Figure 1.13- Phases clés du programme de rénovation des bâtiments.

La Figure 1.14 montre les éléments clés qui ont des impacts significatifs sur la rénovation des bâtiments.

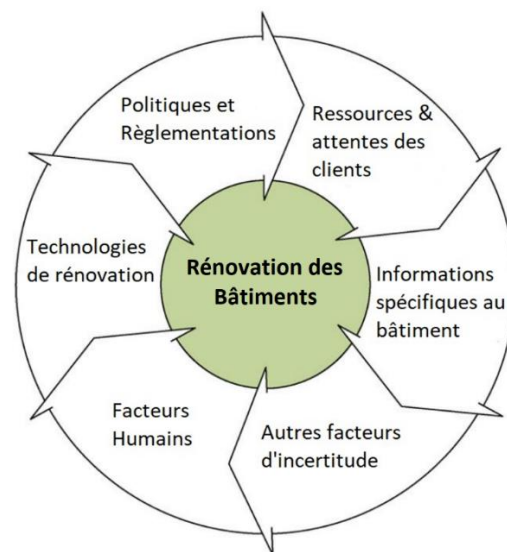


Figure 1.14- Éléments clés influençant la modernisation des bâtiments.

Les politiques et réglementations fixent des exigences minimales d'efficacité énergétique pour la rénovation des bâtiments existants et définissent des lignes directrices nationales pour la mise en œuvre et l'encouragement des mesures de modernisation. Les gouvernements peuvent fournir des dispositifs incitatifs et des subventions pour soutenir les opérations de performance énergétique [29].

Les ressources et les attentes des clients affectent les objectifs du projet et les technologies à utiliser.

Les solutions de rénovation doivent être déterminées en tenant compte des informations spécifiques au bâtiment telles que l'emplacement géographique, le type du bâtiment, son âge, son fonctionnement, ses sources d'énergie et ses systèmes de services.

Les facteurs humains affectent le succès des rénovations des bâtiments. Ils peuvent inclure les exigences de confort, les régimes d'occupation, et l'activité des usagers. De nombreuses études ont montré que les changements du comportement des occupants, et de la plage de confort peuvent conduire à des économies d'énergie importantes [30,31].

Les technologies de rénovation sont des mesures d'économie d'énergie utilisées pour promouvoir l'efficacité énergétique et la durabilité des bâtiments. Ils vont de l'utilisation d'équipements éco

énergétiques, des moyens de contrôle avancés et de sources d'énergie renouvelable aux changements des modèles de consommation d'énergie et à l'application des technologies avancées de chauffage et de refroidissement [28]. Ces mesures doivent être considérées en fonction de leur rentabilité économique, de leur complexité et de la facilité de leur mise en œuvre [32].

La rénovation des bâtiments est affectée par de nombreux facteurs tels que l'incertitude dans l'estimation des économies, les mesures de la consommation d'énergie, les prévisions météorologiques et les dégradations des performances du système. Une bonne estimation de ces facteurs est nécessaire pour déterminer les meilleures options de rénovation et pour réduire l'incertitude sur l'investissement dans la rénovation.

1.4 Rénovation durable des bâtiments

La rénovation durable des bâtiments est une question d'actualité. Elle fait appel à l'innovation ciblant les objectifs économiques, sociaux et environnementaux [33,34]. La rénovation durable va au-delà des objectifs économiques liés à la réduction des coûts d'énergie et d'exploitation. Elle vise aussi des avantages liés à la réduction des impacts environnementaux et l'amélioration de la qualité de l'environnement intérieur (qualité de l'air intérieur, confort thermique) [35,36]. Elle offre une opportunité aux gestionnaires confrontés à des travaux de rénovation d'évaluer les différentes alternatives de rénovation dans une perspective de durabilité [37-41]. Sur la base des mesures de rénovation durable sélectionnées, les catégories d'impact requises et les critères d'évaluation sont déterminés et ils seront développés dans ce qui suit. Les catégories d'impact combinent des critères techniques pour évaluer la durabilité, divisés selon les aspects environnementaux, économiques et sociaux [35,42].

1.4.1 Aspect environnemental

L'aspect environnemental de la rénovation est lié aux pratiques visant la réduction de l'impact environnemental et la création des avantages environnementaux [43]. Les efforts d'évaluation des options de rénovation se sont concentrés sur cet aspect due à l'importance accordée par la société aux facteurs environnementaux [44]. L'activité de rénovation doit contribuer dans la conservation des ressources naturelles et le combat du changement climatique pour assurer la durabilité environnementale.

La littérature a évoqué de nombreuses catégories d'impact environnemental pour l'évaluation des alternatives de rénovation énergétique. La norme européenne a défini 11 catégories d'impact des bâtiments sur l'environnement (Figure 1.15) [45-48].

Le potentiel d'acidification atmosphérique est un indicateur important à considérer. Il mesure les émissions des polluants acidifiants (SO_2 , NO_x , NH_x) ayant des impacts sur l'environnement. L'oxydation photochimique fournit une indication sur la présence de produits contribuant à la production d'un smog dangereux pour l'écosystème.

Plusieurs approches ont utilisé ces catégories dans le but d'évaluer des options de rénovation en fonction de leurs impacts sur les catégories définies. Les critères d'évaluation les plus employés sont les émissions totales des gaz à effet de serre et la consommation totale d'énergie [36].

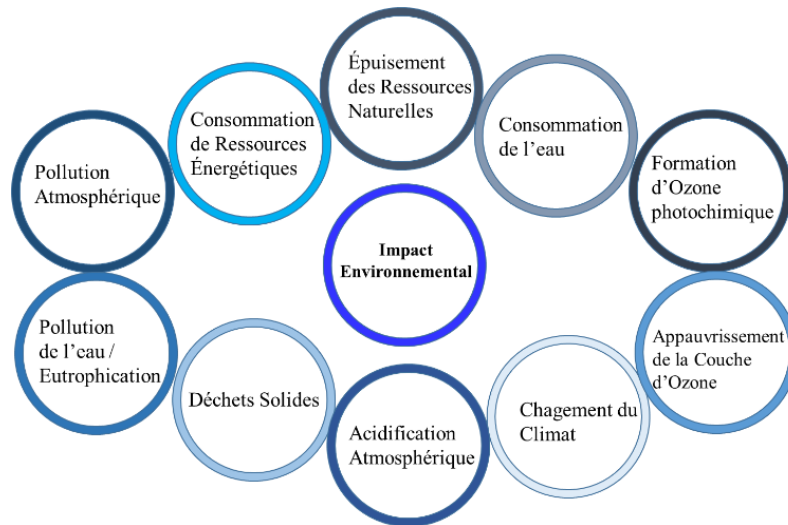


Figure 1.15 - Catégories d'impact environnemental selon la norme européenne.

Les indicateurs de performance environnementale peuvent être évalués au moyen de la méthodologie d'analyse du cycle de vie définie dans [49,50]. Cette analyse permet la quantification de l'impact environnemental de différentes mesures de rénovation. Elle compare ces mesures avec un accent particulier sur la consommation d'énergie primaire et le potentiel de réchauffement climatique. Elle est définie comme la compilation et l'évaluation des entrées, des sorties et des impacts sur l'environnement d'un système tout au long de son cycle de vie [51,52]. Sa capacité à aborder un ensemble de catégories environnementales est l'un de ses points forts.

La méthodologie se compose de 4 phases [53-55]. La première phase définit l'objectif et spécifie les limites du système. La deuxième phase concerne l'analyse d'inventaire. Elle évalue les données et effectue les calculs pour quantifier les entrées et les sorties du système d'étude. Les deux dernières phases évaluent et interprètent l'impact sur l'environnement en fonction des résultats obtenus dans l'analyse d'inventaire.

Les limites du système sont divisées en des limites temporelles et des limites physiques. La limite temporelle comprend les étapes du cycle de vie des mesures de rénovation des bâtiments (la production, le transport, le remplacement et la fin de vie de nouveaux matériaux, les systèmes techniques intégrés du bâtiment et la consommation d'énergie opérationnelle). La limite physique comprend tous les matériaux de construction et les systèmes techniques intégrés ajoutés pour améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment.

Les données environnementales décrivant un matériau de construction ou un vecteur énergétique sont calculées en termes d'indicateurs de performance environnementale dans l'inventaire du cycle de vie.

1.4.2 Aspect économique

La rénovation énergétique des bâtiments doit être évaluée également d'un point de vue économique. De nombreuses études ont traité l'évaluation économique de la rénovation durable des bâtiments [56-60].

La valorisation des effets économiques est basée principalement sur les économies de coûts énergétiques et le retour sur capital [35,61]. Elle est aussi basée sur d'autres avantages économiques tels que la création d'emploi [62,63], l'augmentation de la valeur du bâtiment [35], la variation des tarifs des locataires et la productivité des employés [58]. La rentabilité est la principale considération pour l'investisseur au moment de décider des mesures de rénovation. Le coût énergétique économisé au cours de la durée de vie des bâtiments rénovés doit être supérieur à l'investissement en capital pour des mesures rentables [45]. D'autre part, un bâtiment certifié écologique a un impact important sur la valeur du bâtiment [58]. En outre, la rénovation des bâtiments peut induire une augmentation des loyers. Cette situation entraîne une dépendance accrue des ménages des systèmes de protection social soutenus par les secteurs publics [64]. L'impact de la rénovation sur l'activité économique se manifeste aussi par la création d'emploi [65]. Ces emplois concernent les industries engagées dans les projets de rénovation et celles fournissant les entrants nécessaires aux travaux de rénovation (fabricants d'isolation, transport, ...) [62].

De nombreux indicateurs de performance économique sont présents dans la littérature. Les acteurs d'un projet de rénovation ont estimé à partir d'une enquête réalisée dans [36] les critères économiques les plus importants à évaluer (Figure 1.16). Plusieurs études ont appuyé cette estimation de critères économiques. Les mesures optimales pour la rénovation énergétique sont déterminées en termes de coûts économiques globaux dans [66]. La période de récupération et le coût global sont considérés comme facteurs économiques dans [67,68]. Le coût d'investissement a défini l'aspect économique dans [69]. En outre, la stratégie de rénovation appliquée dans [64] a considéré le taux de retour sur investissement comme critère de l'aspect économique.

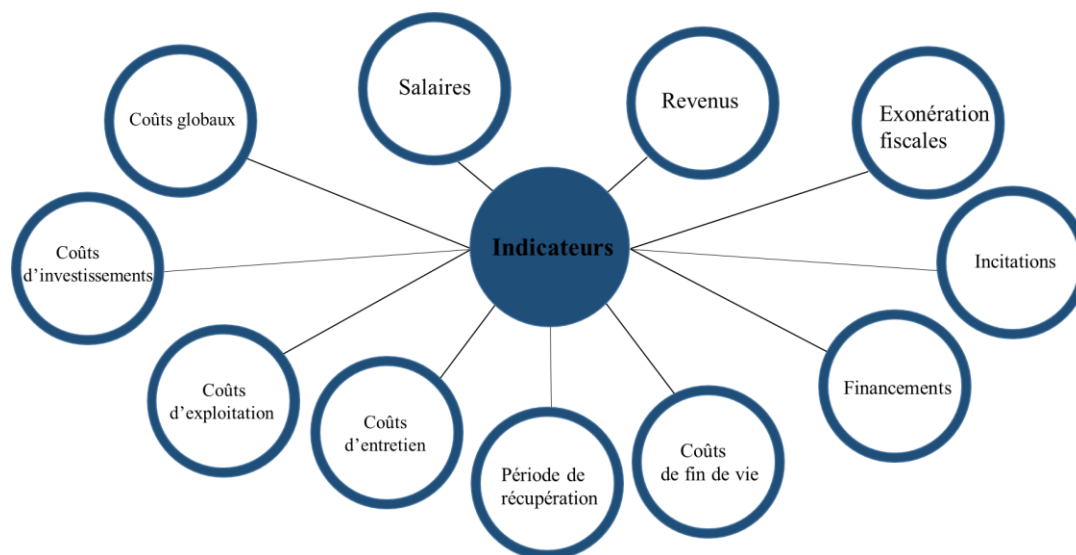


Figure 1.16- Indicateurs de performance économique.

La performance économique des mesures de rénovation énergétique peut être comprise par l'emploi de différentes méthodes développées dans la littérature. Plusieurs méthodologies ont été citées dans [42] :

- *L'analyse du coût du cycle de vie.
- *La méthodologie du coût-optimal.

*La méthodologie de récupération simple.

*La méthodologie des coûts d'investissement.

L'analyse du coût du cycle de vie (CCV) est proposée comme un outil approprié lors de la rénovation énergétique des bâtiments [42,45,70-75]. Elle constitue une phase principale de la méthode du coût-optimal suggérée par la DPEB de l'UE [67,75]. La méthodologie du coût-avantage est utilisée aussi afin d'estimer la faisabilité des stratégies de rénovation énergétique [35,76]. Une description de ces deux méthodologies sera présentée dans la suite.

Le coût du cycle de vie est défini dans la norme méthodologique du règlement ISO 15686-5 [77]. C'est une technique qui permet d'effectuer des évaluations comparatives des coûts sur une période de temps spécifiée. Elle prend en considération tous les facteurs économiques pertinents, en termes de coût d'investissement initial et de coût opérationnel futur. Elle est employée pour établir une comparaison de la rentabilité de différentes alternatives de rénovation. La solution optimale assure un niveau de performance énergétique associé au coût le plus bas pendant le cycle de vie du bâtiment [41,42]. Une grande variété de méthodes d'évaluation économique existe pour l'analyse du coût du cycle de vie. Le Tableau 1.2 illustre les six principales méthodes [78].

Tableau 1.2- Méthodes d'évaluation économique du coût du cycle de vie.

Méthode	Description
Récupération simple	-Calcule le temps nécessaire pour retourner l'investissement initial. -Donne une estimation approximative si l'investissement est rentable.
Période de récupération actualisée	-Identique à la méthode 1 et prend juste en compte la valeur temps. -Elle est un dispositif de dépistage et non pas un conseil de décision.
Valeur actuelle nette	-Applique des facteurs d'actualisation, basés sur un taux de rendement requis pour chaque année. -Les flux de trésorerie prévus sont actualisés à la valeur actuelle. -Non utilisable si les alternatives ont une durée de vie différente.
Coût annuel équivalent	-Exprime la valeur nette actualisée unique d'une alternative comme un coût annuel équivalent uniforme. -Compare différentes alternatives avec différentes durées de vie.
Taux de rentabilité interne	-Critère de flux de trésorerie actualisé. -Détermine un taux de rendement moyen par référence à une condition : Les valeurs sont réduites à zéro au moment initial. -Utilisé seulement si les investissements génèrent un revenu.
Épargne nette	- Différence entre la valeur actuelle du revenu généré par un investissement et le montant investi. -Utilisé pour comparer les options d'investissement qui génèrent un revenu.

La valeur actuelle nette (VAN) est décrite comme la somme de l'avantage actualisé d'une option moins la somme des coûts actualisés [77]. Elle constitue l'approche la plus appropriée pour le calcul du coût du cycle de vie [79-83].

Les paramètres importants à considérer pour évaluer les aspects économiques des options de rénovation dans l'analyse (CCV) sont les coûts d'investissement, la consommation d'énergie avant

et après rénovation, les prix de l'énergie, la période de calcul et les coûts d'exploitation et de maintenance [22,41,84].

L'évaluation de la performance économique des projets de rénovation peut être réalisée à l'aide de l'analyse coût-avantage. Cette analyse estime la valeur des bénéfices attendus par rapport au coût du projet pour déterminer s'il est faisable ou non.

L'étape la plus importante dans cette analyse consiste à évaluer les coûts et les avantages d'une manière quantitative [76]. Dans ce cadre, les différents bénéfices du projet en particulier ceux non énergétiques sont quantifiés et monétisés à l'aide des méthodes de transfert spécifiques.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'analyse coût-avantage, à citer le flux de trésorerie actualisé, la méthode de rente, la période de récupération dynamique et la valeur actuelle nette. La méthode la plus courante est la valeur actuelle nette. Elle prend en compte tous les coûts annuels et toutes les économies de coûts à la valeur actuelle nette par l'intermédiaire des taux d'actualisation cumulés [35].

Les caractéristiques prises en considération lors de la modélisation économique sont les coûts d'investissement initial (travaux de construction et de finition), les économies d'énergie, les frais de maintenance (remplacement et entretien des équipements), la valeur résiduelle indiquant la valeur d'un actif en fin de vie et les multiples avantages du projet (valeur plus élevée du bâtiment, éviter les émissions des gaz à effet de serre). L'analyse peut se concentrer seulement sur les coûts sans tenir compte des bénéfices (analyse financière). Cependant, la prise en compte des avantages supplémentaires peut conduire à un investissement plus viable économiquement.

1.4.3 Aspect social

Les alternatives de rénovation énergétique ne doivent pas être évaluées uniquement d'un point de vue environnemental et économique. La rénovation durable a mis davantage l'accent sur les facteurs sociaux [35,85-88]. En outre, l'aspect social a gagné l'attention du point de vue des locataires et de la société [22]. Par conséquent, il était incorporé dans l'évaluation de l'impact de la rénovation durable.

Une importance croissante est accordée à la mesure de l'aspect social. Cependant, le concept de cet aspect est encore à ses débuts [44]. L'aspect social se concentre sur l'importance de la valeur au-delà des motivations axées sur le profit [86]. Il fait référence aux effets directs affectant les individus et les communautés. Dans le contexte de rénovation, ces effets peuvent être ressentis par l'occupant (confort accru, problèmes physiques réduits, ...). Ils peuvent se manifester également au niveau de la société (réduction de la précarité énergétique, les effets sur la santé, ...). Cet aspect ne doit pas être un ajout. Il doit être une considération clé dans tout projet de rénovation durable. Les facteurs sociaux et les outils d'évaluation de l'aspect social seront développés dans la suite.

1.4.3.1 Indicateurs de l'aspect social

L'identification des facteurs sociaux constitue une tâche indispensable à la planification de la durabilité sociale.

Un groupe d'agents publics S2020 a développé une matrice de connaissances regroupant un ensemble d'indicateurs sociaux [89]. Ce groupe a réalisé des recherches et des activités de dialogue avec différents groupes de parties prenantes. Les activités ont porté sur les questions de durabilité

sociale dans l'urbanisme. La matrice de connaissances était le résultat de ces efforts. Différentes approches d'évaluation de l'aspect social des mesures de rénovation sont basées sur cette matrice [21,22,73]. Elle est composée des indicateurs sociaux répartis en six thèmes vitaux. Ces indicateurs permettent une meilleure compréhension du thème en question.

Le premier volet, intitulé « Une ville cohésive », traite des effets des projets de rénovation sur la cohésion sociale. Ce thème se concentre sur les variations de l'offre de logements. Il détermine aussi leurs effets sur la composition démographique de la population. Le deuxième thème traite de la façon dont un projet de rénovation affecte les opportunités d'interaction sociale, de travail d'équipe et de réunions. Le troisième, « Une vie quotidienne qui fonctionne bien », mesure les effets d'un projet de rénovation sur la capacité des locataires à continuer leur vie quotidienne pendant et après le processus. Le quatrième est intitulé « Identité et expérience ». Ce thème approfondit les identités des différentes parties prenantes. Il présente ainsi leurs expériences liées au projet de rénovation. Le cinquième « Santé et environnements urbains verts », concerne l'interaction entre les projets de rénovation et les environnements verts et sains. Le sixième thème à prendre en compte est celui de « sécurité et ouverture ». Il relie les questions de protection sociale et le sentiment de sécurité des citoyens aux qualités de l'environnement bâti. Les indicateurs associés à chacun de ces thèmes sont illustrés dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 -Thèmes et Indicateurs sociaux de la matrice de connaissance.

Thème	Indicateurs	Explication
Une ville cohésive	Variété d'appartements de différentes tailles.	
	Variations dans les niveaux de loyer.	
	Variation dans les formes de propriété.	Location, copropriété, propriété privée.
	Adaptation des hébergements aux besoins particuliers.	Personnes âgées, handicapées.
Interaction sociale, travail d'équipe et réunions	Existence des environnements physiques.	Lieux intérieurs, jardins, buanderies.
	Existence des activités et des événements organisés.	Journées de jardinage et de nettoyage, ateliers.
	Influence des locataires sur le processus de rénovation.	Accès à différents canaux pour leurs opinions, journées portes ouvertes.
Une vie quotidienne qui fonctionne bien	Absence de perturbations significatives dans la vie quotidienne des résidents.	Possibilité de continuer à vivre dans les appartements , perturbations (bruit, saleté).
	Réception des instructions et des informations adéquates sur l'appartement rénové.	
	Augmentation du loyer.	
	Le niveau et la flexibilité de l'appartement.	Flexibilité dans l'utilisation des espaces .
	Accès pour les personnes âgées et handicapées.	Conception des entrées, ascenseurs, salles de bains, éclairage.
	Accès à un local à vélos , aux poussettes, au parking et à des installations de stockage.	
Identité et expérience	Dialogue entre le maître d'ouvrage et les parties prenantes.	Identifier l'esprit du quartier et les différentes qualités et faiblesses.
	Perception de l'environnement intérieur.	
	La qualité et le niveau de l'appartement .	

	La prise en compte des qualités de conception.	Les aspects architecturaux, culturels et environnementaux.
Santé et environnements urbains verts	Accès aux zones environnantes à des fins de loisirs.	Sentiers pédestres, forêts, espaces verts, terrains de jeux, jardins et lieux pour l'agriculture.
	Accès à un balcon ou une terrasse.	
	Niveau sonore de l'environnement extérieur.	Niveau faible et non gênant
Sécurité et ouverture	Identification des zones environnantes non sécurisées.	
	Mesures de réduction de l'insécurité.	Éclairage, conception des entrées, accès à un numéro de téléphone d'urgence.
	Disponibilité des personnels de sécurité.	
	Existence d'une forme de surveillance de quartier organisée.	
	Temps de réponse en cas de dommage.	

Les recherches présentent une gamme diversifiée de catégories et d'indicateurs sociaux. La plupart d'entre elles se concentrent sur les mêmes thèmes que la matrice de connaissances du groupe S2020. La différence réside dans l'utilisation de mots et de catégorisations [41]. Le Tableau 1.4 résume les principaux indicateurs sociaux évoqués dans la littérature. Les mesures de rénovation ont un impact sur les occupants (un confort accru, meilleure qualité de l'air). Ces impacts concernent le bien-être des habitants et la qualité des bâtiments. Ces mesures ont également un impact sur la société (les effets sur la santé et la précarité énergétique).

Tableau 1.4 - Résumé des principaux indicateurs sociaux cités dans la littérature.

Catégorie	Indicateurs sociaux	Références																
		36	42	43	44	61	64	67	68	85	86	90	91	92	93	94	95	96
Bien-être Des occupants	Confort intérieur	X	X	X		X		X	X			X	X	X	X	X	X	
	Qualité de l'air intérieur	X	X			X		X				X	X			X		
	Satisfaction des occupants	X			X	X		X		X								
	Implication des occupants		X	X			X		X								X	
Qualité Du Bâtiment	Physique du bâtiment	X										X	X					X
	Sécurité			X		X	X						X	X				
	Amélioration esthétique	X						X				X	X		X			
	Préservation de la qualité architecturale		X			X							X					
	Conservation du patrimoine culturel			X		X									X			
Société	Effets sur la santé			X		X		X		X	X	X		X			X	
	Précarité énergétique					X			X			X					X	
	Accessibilité			X		X		X						X				X
	Communautés mixtes						X											
	Productivité des occupants										X		X		X			

Le confort thermique est l'indicateur le plus courant dans les approches d'évaluation des mesures de rénovation d'un point de vue social [97-101]. La rénovation énergétique améliore le confort thermique. Elle entraîne de meilleures températures ambiantes, une température radiante plus élevée et des courants d'air réduits. La qualité de l'air intérieur est améliorée aussi par rénovation (moins de gaz, de particules, et de contaminants microbiens pouvant induire des conditions de santé néfastes) [102-105]. L'intégration des occupants dans le processus de rénovation est un facteur à considérer. Il procure un sentiment d'appartenance et d'implication. Il connecte aussi les personnes aux lieux. Les occupants se sentent alors valorisés.

La rénovation énergétique affecte également la qualité du bâtiment. Elle entraîne une réduction des problèmes physiques liés à la condensation, à l'humidité et aux moisissures. La sécurité personnelle est aussi prise en compte. En effet, le remplacement d'éléments par de nouveaux, offre moins de risques tels que les accidents, les incendies ou les intrusions. Les changements extérieurs avec respect de l'architecture d'origine, de la tradition de construction locale et du programme de préservation patrimonial sont aussi un autre facteur social. L'influence de la rénovation énergétique sur ces changements doit être alors évaluée.

La perspective sociétale met en évidence des effets de la rénovation énergétique des bâtiments. Les mesures de rénovation assurent une réduction de la pollution intérieure et extérieure et des moisissures. Par conséquent, elles entraînent une meilleure santé traduite par la réduction de la mortalité et la morbidité. La précarité énergétique des ménages est aussi affectée par ces mesures. Moins de personnes seront touchées par un faible niveau de service énergétique. La rénovation améliore l'efficacité énergétique. Elle réduit les dépenses énergétiques et l'exposition aux fluctuations des prix de l'énergie. La contribution de la rénovation à la ségrégation socio-économique est à prendre en considération. La rénovation doit être réalisée de manière à ce que les ménages ne soient pas obligés de déménager en raison d'une augmentation du loyer. Les syndromes des bâtiments malsains sont évités par rénovation. L'absentéisme des employés est alors réduit et leur productivité est améliorée.

1.4.3.2 Évaluation de l'aspect social

L'évaluation de la durabilité sociale des mesures de rénovation peut être effectuée par de nombreux outils développés dans les recherches. L'aspect social peut être estimé quantitativement [86] ou qualitativement [44].

Les outils d'évaluation quantitative traite l'aspect social d'une manière objective. Ces outils permettent la réduction de cet aspect à des mesures monétaires. Ils ont une capacité à attirer l'attention sur des résultats intangibles en les présentant dans une unité de valeur communément connue. Ils sont critiqués dans la littérature malgré leurs avantages. Les critiques incluent les facteurs perdus dus à la simplification des pratiques complexes de l'aspect social en mesure monétaire. Ces méthodologies sont alors considérées comme sous-estimant la véritable valeur sociale créée [106,107]. Une valeur sociale ne peut pas à être facilement mesurée. Par conséquent des facteurs sociaux difficiles à mesurer peuvent être omis. Cette situation conduit à appeler des approches qualitatives.

Les groupes communautaires préfèrent l'évaluation qualitative [108]. Cette évaluation consiste à collecter des données concrètes sur l'effet des mesures de rénovation auprès des occupants (Tableau 1.5). Les questionnaires sont des techniques adaptées à cette tâche. Ils permettent d'évaluer plusieurs facteurs sociaux liés à la qualité du bâtiment et le bien-être des occupants. Ils contiennent des questions sur la qualité de l'environnement intérieur et sur la satisfaction des occupants. Ils peuvent également adresser des questions liées à la perception des occupants de l'espace, à la flexibilité et aux aspects des bâtiments.

Dans [90] une enquête par questionnaire a été menée afin d'évaluer la rénovation dans une perspective plus large. L'objectif était d'évaluer l'expérience et la satisfaction des locataires concernant les bâtiments rénovés et le processus de rénovation. L'enquête s'est concentrée sur l'évaluation des avantages potentiels pour le climat intérieur perçu et le confort (Température, qualité de l'air, bruit, lumière). D'autres bénéfices ont été considérés tels que les nouveaux espaces, la satisfaction des travaux de rénovation et le changement de comportement suite à la rénovation. Cette enquête a montré qu'il est possible de rénover en mettant l'accent sur les économies d'énergie et en même temps ajouter des valeurs pour les locataires.

Des questionnaires concernant la satisfaction des occupants et le confort thermique sont développés dans [109]. Le premier se concentre sur la perception du confort. Le second est un questionnaire longitudinal mettant en évidence l'écart entre la perception et les exigences des occupants. Il consiste en une évaluation du confort basée sur les perceptions et les préférences des usagers en fonction des périodes du jour.

Les questionnaires de satisfaction des occupants peuvent être accompagnés d'entretiens semi-structurés ouverts. Ces entretiens comprennent des paramètres plus qualitatifs permettant aux occupants de répondre dans leurs propres termes. Ils offrent une possibilité d'ajouter aux informations collectées, en particulier sur des questions non envisagées à l'avance.

L'évaluation qualitative certifie l'importance de regarder au-delà de la conception physique et des économies d'énergie. Elle incite à la prise en compte de la communauté des utilisateurs du bâtiment.

Tableau 1.5-Paramètres clés de collecte de données auprès des occupants.

	Paramètres	Description
Perception du confort	Température	Confort thermique dans l'espace.
	Lumière du jour	Niveaux de lumière naturelle dans les espaces intérieurs.
	Bruit	Problèmes liés au bruit interne ou externe.
	Systèmes de chauffage	Type, réactivité, efficacité et facilité d'utilisation.
Satisfaction	Espace et flexibilité	Qualité des espaces internes, facilité d'utilisation, stockage, flexibilité pour de futurs changements ou utilisation.
	Les meilleurs aspects	Caractéristiques positives de la maison telles que l'espace, l'emplacement et le jardin.
	Les pires aspects	Manque d'espace, de lumière.
Comportement	Systèmes de chauffage	Fonctionnement ,minuterie et autres commandes, températures internes maintenues

	Appareils et équipements	Nombre d'appareils et utilisation quotidienne moyenne approximative
--	--------------------------	---

Une multitude d'outils d'évaluation quantitative de l'aspect social existe dans la littérature. Un résumé des principaux outils utilisant des mesures monétaires est présent dans [44].

Le retour social sur investissement SROI est identifié comme la méthode la plus développée applicable à l'environnement bâti. Cette méthode est développée à partir d'une analyse coût-avantage traditionnelle. Elle est basée sur sept principes (Figure 1.18). Elle attribue une valeur monétaire aux valeurs sociales en utilisant des proxys financiers (pour chaque 1£ dépensé pour la rénovation, le montant produit en retour social). Ceux-ci seront comparés au niveau d'investissement pour produire un rapport des coûts aux résultats sociaux. Le ratio SROI peut être comparé à des ratios antérieurs et combiné aussi à des récits qualitatifs [110]. La méthodologie SROI comporte six étapes décrites dans ce qui suit [111].

La première consiste à établir la portée et à identifier les principales parties prenantes. Elle permet de définir des limites claires sur ce que va couvrir l'analyse, qui sera impliqué dans le processus et comment. Il est possible de réaliser des entretiens afin de développer une solide compréhension du bâtiment et de son fonctionnement. Des informations sur les coûts peuvent être collectées aussi à ce stade.

La deuxième concerne la cartographie des résultats. Elle consiste à engager les parties prenantes dans le développement d'une carte d'impact. Celle-ci permet d'établir la relation entre les entrants, les sortants et les résultats. Il est possible de réaliser des discussions avec les usagers du bâtiment pour comprendre leurs expériences, leurs préférences, leurs besoins et l'impact de la rénovation.

La troisième évalue les résultats et leur donne une valeur. Les proxys financiers doivent être identifiés pour valoriser les résultats sociaux déterminés dans la deuxième étape.

La quatrième consiste à établir un impact. Les valeurs attribuées aux résultats seront interrogées pour établir leur impact, éviter la sur-revendication et renforcer la crédibilité.

La cinquième présente le calcul du ratio SROI. Elle consiste à additionner les avantages, à soustraire les inconvénients et à comparer le résultat à l'investissement. La sensibilité des résultats peut être testée à cette étape.

La dernière est intitulée « Création de rapports, utilisation et intégration ». Elle consiste à partager les résultats avec les parties prenantes, à tirer des leçons des résultats et à envisager l'application de l'outil à des études similaires plus larges.

L'analyse du cycle de vie (ACV) sociale est suggérée aussi comme une méthode appropriée à l'évaluation des mesures de rénovation pour différentes raisons [41]. L'analyse adopte une approche holistique. Elle se concentre sur l'ensemble de vie d'un produit ou d'un service. Son cadre s'accorde bien avec les perspectives de l'analyse du coût de vie (CCV) et de l'ACV environnementale. En outre, la littérature de recherche sur cette analyse suit une procédure standard. Elle offre la possibilité d'apprendre différents projets de rénovation et de les comparer.

L'ACV sociale suit la même procédure que l'environnementale. Cependant, elle se focalise sur les indicateurs sociaux. Les tâches comprennent la définition du système et de l'unité fonctionnelle, des indicateurs pertinents, des catégories d'impact et de la collecte des données [112].

La différence entre l'ACV sociale et environnementale réside dans la nature de données collectées. La première nécessite une combinaison de données quantitatives, semi-quantitatives et qualitatives

(à travers des entretiens, enquête, observations de participants). Elle nécessite aussi une plus grande implication des parties prenantes [113].

Cette approche, employée comme moyen pour étudier les alternatives de rénovation n'est pas encore mature. Elle doit être approfondie concernant différents sujets (la définition de l'objectif, de la portée et des limites de système, le choix des méthodes de collecte et d'interprétation des données, l'évaluation de la validité et de la fiabilité d'un projet particulier).

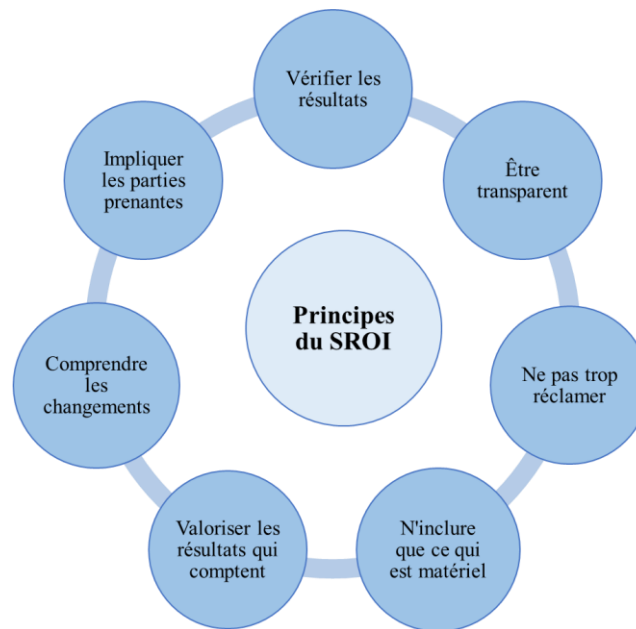


Figure 1.17- Les principes du SROI.

1.5 Défis de la rénovation

Les projets de rénovation des bâtiments sont entravés par de nombreux défis. Ces défis se manifestent dans la phase de prise de décision et dans le processus de rénovation. Dans la littérature, les défis sont identifiés principalement sur les plans financier, social et technique [20]. L'aspect financier compte parmi les défis les plus importants pour les décideurs en matière de rénovation [114-116]. Le succès d'un projet de rénovation est fortement lié à cet aspect. Cela dépend de la capacité et du soutien financiers, du délai de récupération et de la simplicité de l'investissement [23]. Les coûts initiaux de la rénovation et la période de récupération de certaines mesures sont des limites importantes relevées dans la littérature [17]. Les coûts d'investissement initiaux dans la rénovation peuvent être élevés. Ces coûts énormes sont considérés comme un obstacle aux décisions d'investissement [117]. Le temps nécessaire pour récupérer la dépense initiale est aussi une autre limite. Les propriétaires sont susceptibles d'envisager des investissements rentables à court terme. Cependant certaines interventions de modernisation présentent de longs délais de remboursement. De ce fait, la rentabilité de la rénovation doit être évidente en termes de coûts du cycle de vie des bâtiments et de coûts de maintenance à long terme évités grâce à la rénovation.

Dans ce contexte, la rénovation des bâtiments nécessite des financements initiaux. Le manque de financement et l'incapacité d'obtenir un financement à des conditions acceptables sont un obstacle à l'investissement dans les projets de rénovation [33]. En effet, il existe un manque d'approches financières standard pour la rénovation des bâtiments. Un cadre réglementaire fort accompagné de mesures liées au financement sont une nécessité. Les subventions sont aussi un argument important pour inciter les utilisateurs et les propriétaires à rénover [20]. D'autre part, les décideurs politiques au niveau européen encouragent un soutien financier renouvelable combinant des ressources publiques et privées.

Outre les défis financiers, plusieurs défis sociaux peuvent entraver le parcours des projets de rénovation des bâtiments. L'information insuffisante est l'une des plus grandes difficultés dans les projets de rénovation [117]. Elle réfère au manque de consensus, de compréhension et de soutien des habitants. La rénovation des bâtiments est une importante décision pour les propriétaires. Ils recherchent des solutions durables à la fois économiquement et pratiquement viables. Ils demandent également des conseils et des assistances. Cependant, ils ne savent pas comment trouver des experts et des professionnels fiables. En outre, il existe peu d'agences de conseil sur les méthodes de rénovation. Les informations sur les professionnels sont aussi limitées. D'autre part, les propriétaires se méfient des nouvelles technologies. Cette situation est due à un manque de connaissance sur ces technologies. Les activités de formation et de sensibilisation sont des éléments clé pour faire face à ces problèmes. Elles constituent une étape cruciale. Elles fournissent des connaissances sur l'importance de l'amélioration de l'efficacité énergétique en appliquant des technologies innovantes.

Le facteur de perturbation est aussi fondamental. Il fait référence aux troubles liés aux travaux de rénovation pour les occupants. Ce facteur peut avoir un impact sur la décision de rénover [118]. Privilégier des solutions limitant l'intervention sur site devrait permettre de surmonter ce problème. En plus, informer les occupants du plan de rénovation et de l'éventuelle perturbation pourrait éviter le mécontentement de ceux-ci.

La faisabilité technique des mesures de rénovation est d'une grande importance pour l'obtention des résultats de qualité éprouvée [119]. Les sous-systèmes dans les bâtiments sont hautement interactifs. Par suite, différentes mesures de rénovation ont des impacts différents sur ceux-ci. Le choix des technologies de rénovation devient donc complexe. La gestion des interactions sera une nécessité dans tout projet de rénovation durable [28].

Le manque de solutions techniques conformes aux normes de construction en matière d'économie d'énergie est aussi un obstacle. Les approches éco énergétiques peuvent ne pas être facilement disponibles dans certains cas (en raison de la nature historique de l'élément du bâtiment). En outre, il peut y avoir des incertitudes sur le fonctionnement fiable des nouvelles technologies. L'abordabilité de certaines solutions techniques pose aussi un problème. Plusieurs travaux se sont concentrés sur l'évaluation des solutions faisables et techniquement appropriées.

La complexité de rénovation et le manque de travailleurs qualifiés sont aussi un défi technique considérable. De nombreux travailleurs manquent de formation et d'expérience avec certaines des méthodes et des matériaux nécessaires pour réussir le processus de rénovation. Différentes études conviennent que des professionnels sont essentiels pour s'attaquer à ce problème [17].

Des obstacles réglementaires sont aussi évoqués dans la littérature. L'absence des réglementations nationales et internationales pour la modernisation affecte les projets de rénovation des bâtiments

[22,23,117]. Des normes de modernisation complètes et des incitations locales doivent être élaborées pour augmenter les investissements dans ces projets.

Outre les défis de la prise de décision des projets de rénovation, il existe des défis affectant la sélection des mesures de rénovation optimales. Un grand nombre de mesures de rénovation sont disponibles. Cependant, la décision quant à la mesure de rénovation à utiliser est un problème d'optimisation multi-objectifs. Elle est soumise à de nombreuses contraintes et limitations (les caractéristiques spécifiques du bâtiment, le budget total disponible, l'objectif du projet...). La solution optimale est un compromis entre une gamme de facteurs environnementaux, économiques et sociaux. Cependant, les décideurs ont tendance à privilégier les objectifs économiques par rapport aux objectifs environnementaux et sociaux. Des évaluations complètes basées sur les critères de durabilité manquent dans ce domaine. Des études récentes se sont concentrées donc sur la rénovation durable. Elles ont affirmé qu'une approche multidisciplinaire et intégrale incluant des paramètres environnementaux et sociaux au-delà des aspects économiques doit être adoptée. Par conséquent, de nombreuses approches multicritères mettant l'accent simultanément sur les trois aspects ont émergé. Pourtant, des efforts supplémentaires sont requis dans le but de surmonter les conflits pouvant exister entre ces aspects dans la détermination de la mesure optimale.

1.6 Conclusion

Ce chapitre a traité le sujet de rénovation durable des bâtiments. Les phases principales de la rénovation et les éléments clé ayant des impacts significatifs sur ce processus ont été identifiés. Le chapitre a présenté aussi les aspects environnementaux, économiques et sociaux de la rénovation et de son évaluation ainsi que les défis de la rénovation.

L'analyse bibliographique a montré un manque d'une évaluation holistique des projets de rénovation. Pour combler ce manque, ce travail de thèse sera axé sur le développement d'une méthodologie pour l'évaluation durable des projets de rénovation.

Cette méthodologie sera présentée en détail dans le deuxième chapitre. Cette méthodologie sera ensuite appliquée à un projet de rénovation d'un bâtiment de recherche de l'Université de Lille (bâtiment ESPRIT).

Chapitre 2 : Méthodologie de recherche

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une méthodologie pour une rénovation durable des bâtiments. Elle couvre les phases de planification, conception, construction et évaluation. Une attention particulière sera accordée aux phases de planification et d'évaluation en phase d'exploitation. Les informations collectées en phase de planification seront utilisées pour l'évaluation des performances du projet en phase d'exploitation.

Ce chapitre est organisé en trois parties. La première introduit les phases de la méthodologie proposée. La deuxième détaille les différents volets de la phase de planification. En outre, elle développe des indicateurs de performances sur la base de ces volets, et définit leurs poids du point de vue des différents acteurs du projet. La dernière informe les indicateurs dans le but d'évaluer la performance du projet. Les moyens de mesure des différents indicateurs seront définis.

2.2 Méthodologie Générale de la Rénovation

La rénovation des bâtiments est un processus complexe avec de multiples acteurs. Elle doit être adaptée à la demande des propriétaires (maîtres d'ouvrages), à la politique publique et les besoins des usagers [120]. La figure 2.1 présente la méthodologie générale des opérations de rénovation avec des phases de pré-rénovation (planification et conception), de construction et de post-rénovation (exploitation). Dans le projet de rénovation, il faut effectuer un diagnostic de l'état du bâtiment et de son usage.

La phase pré-rénovation définit les objectifs du projet de rénovation ainsi que la planification des opérations. Elle comporte trois éléments majeurs :

- Les éléments de cadrage du maître d'ouvrages (objectifs, ressources affectés, calendrier...).
- Un diagnostic de l'état du bâtiment (structure, conformité aux exigences réglementaires, équipement, environnement extérieur...)
- Une enquête auprès des usagers pour analyser leurs expériences et cerner leurs aspirations.

La phase de conception concerne la définition des scénarios de rénovation adaptés au cas d'étude. Sur la base des éléments collectés dans la phase de pré-rénovation, le bureau d'ingénierie établit différents scénarios (options) pour la rénovation. Il est important de considérer ces mesures comme un scénario plutôt que des mesures individuelles afin d'atteindre les objectifs de la rénovation [73]. Les actions uniques identifiées seront combinées dans des scénarios. La séquence et le nombre d'actions individuelles dans un scénario sont conditionnés par les critères du projet. Ces critères de regroupement dépendent de chaque contexte urbain et socio-économique du projet [92]. Les scénarios de rénovation proposés seront priorisés en fonction de leurs bénéfices. Une discussion entre les parties prenantes est nécessaire. Elle permet de sélectionner le projet de rénovation. Lors de cette phase, il faut définir des indicateurs de performances pour le bâtiment. Ces indicateurs comportent les trois dimensions du développement durable : environnementale, économique et sociale.

La phase de rénovation concerne la réalisation par des entreprises de construction du projet sélectionné d'après le cadrage du maître d'ouvrages, les aspirations des usagers, la réglementation et les règles de l'art.

La phase post-rénovation correspond à la phase d'exploitation du bâtiment par les usagers. Lors de cette phase, il est nécessaire de suivre les conditions de fonctionnement du bâtiment et vérifier qu'il répond bien aux exigences (indicateurs) formulées lors des phases de planification et de conception. Ces indicateurs permettent aussi de mesurer l'impact de l'opération de rénovation sur les trois volets du développement durable.

Si les objectifs de l'opération de rénovation ne sont pas atteints, il faut procéder à une analyse des causes de cette défaillance, identifier les responsabilités et procéder à des mesures d'amélioration. Le travail de thèse sera focalisé sur les phases de planification, de conception et d'évaluation des performances lors de la phase d'exploitation. Les sections suivantes vont détailler la méthodologie qui sera suivie pour chaque phase.

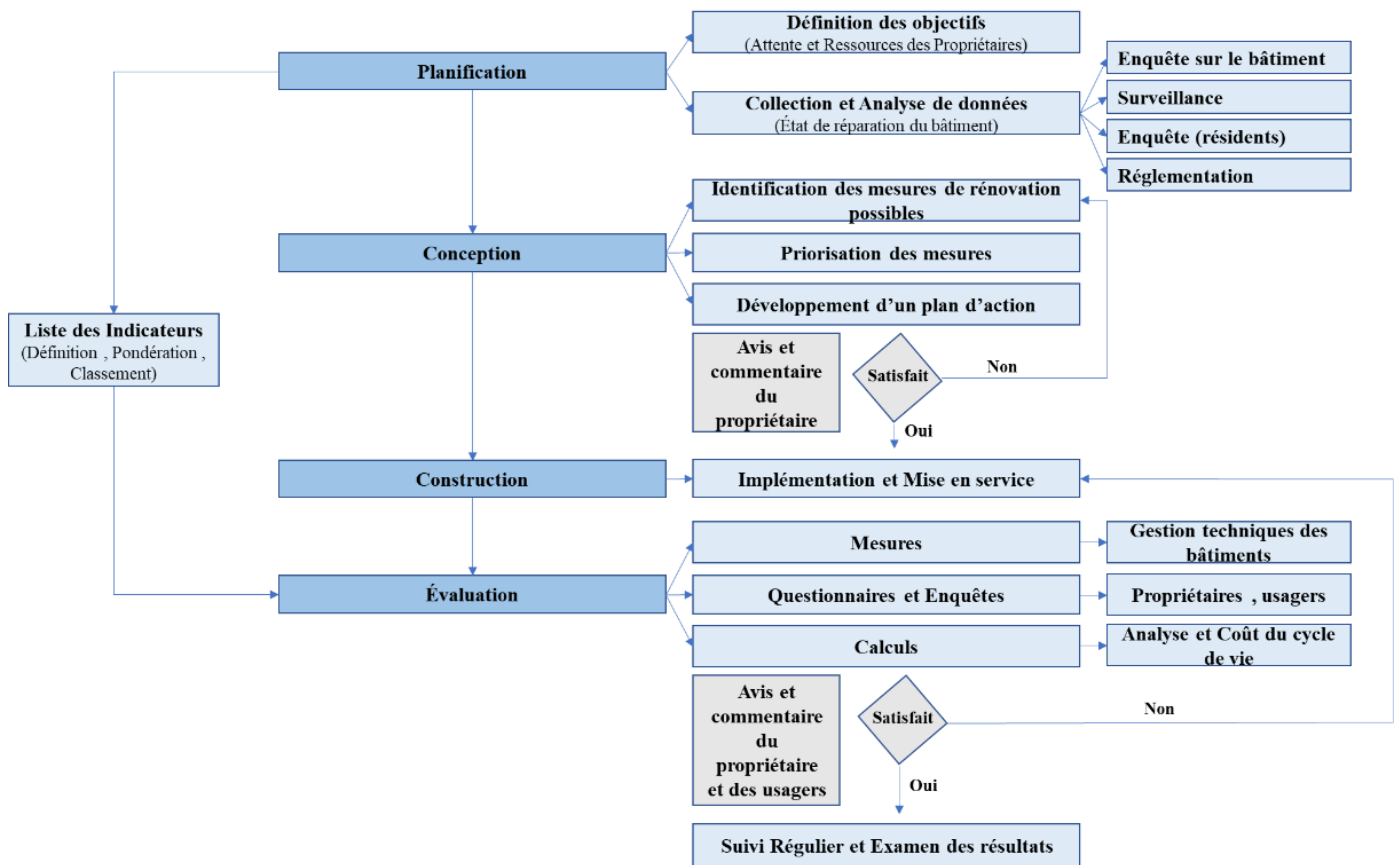


Figure 2.1 - Approche systématique d'un projet de rénovation.

2.3 Phase pré-rénovation

2.3.1 Planification

La première étape clé du processus de rénovation consiste à définir les objectifs du projet. Le processus décisionnel pour entreprendre une rénovation diffère selon la raison motivant son démarrage. Les ressources disponibles pour encadrer le programme de rénovation affectent aussi le processus.

L'état réel de réparation du bâtiment doit être ensuite identifié. Une enquête préliminaire est donc une autre étape essentielle dans le projet de rénovation. Elle est menée afin d'identifier les

problèmes particuliers et d'établir une documentation pertinente. La conduite d'une telle enquête est parfois prescrite par la loi [37]. Cette enquête inclut des études du bâtiment et de son environnement (contexte local, impressions générales, état technique, état de maintenance), de son historique (année de construction, rénovation/modification précédentes) ainsi que de ses plans et images (documents de construction, croquis, photographies). Elle présente également la documentation des besoins des usagers et l'examen des réglementations locales et nationales. Ces étapes constituent les piliers de la planification du projet. La planification est considérée comme une phase préparatoire à la conception de la solution optimale. Les décisions fixées dans la conception seront basées principalement sur les paramètres définis dans la phase de planification (Figure 2.2).

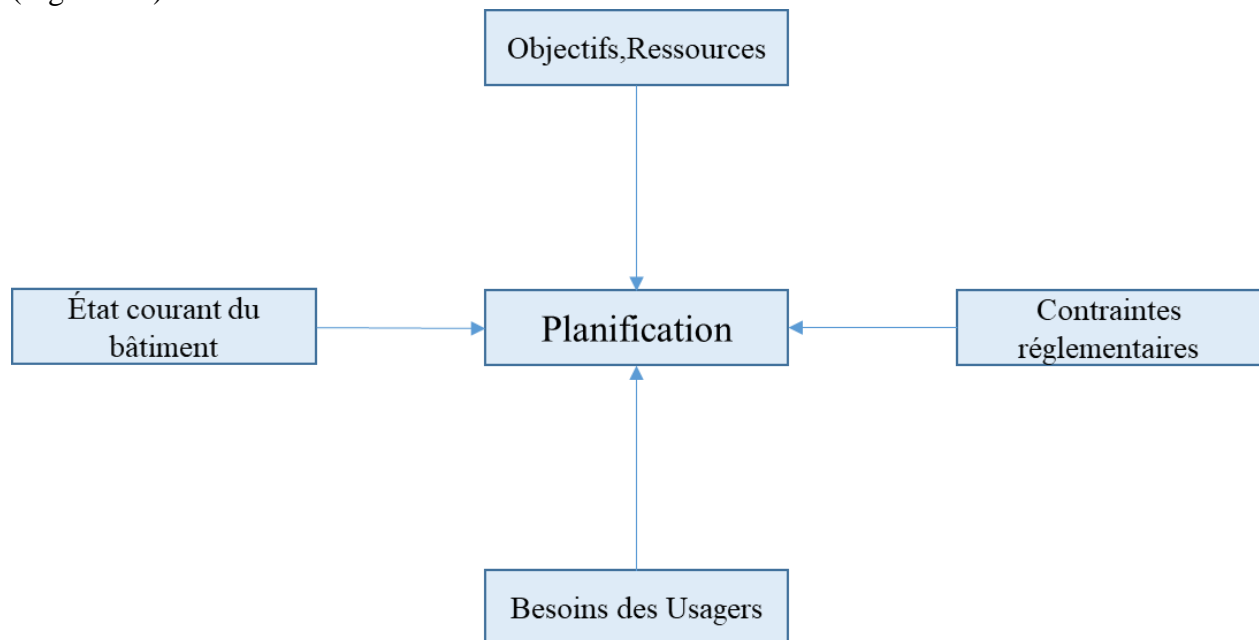


Figure 2.2 - Volets de la phase de planification.

2.3.1.1 Éléments cadrant le maître d'ouvrage

Tout projet de rénovation commence par la décision de l'investisseur de l'effectuer. Le point de départ c'est se fixer les bons objectifs pour résoudre les problèmes et trouver les meilleures alternatives.

Les objectifs peuvent être basés sur les valeurs des parties prenantes impliquées [121]. Ils seront fixés en s'appuyant sur l'expérience du bâtiment et en se concentrant sur les fonctions prioritaires à améliorer.

De nombreux objectifs motivent les travaux de rénovation. Ils varient naturellement pour les différents types de bâtiments et d'organisation dans chaque pays [68]. Basé sur la littérature, on peut les regrouper selon de principaux facteurs (Figure 2.3).

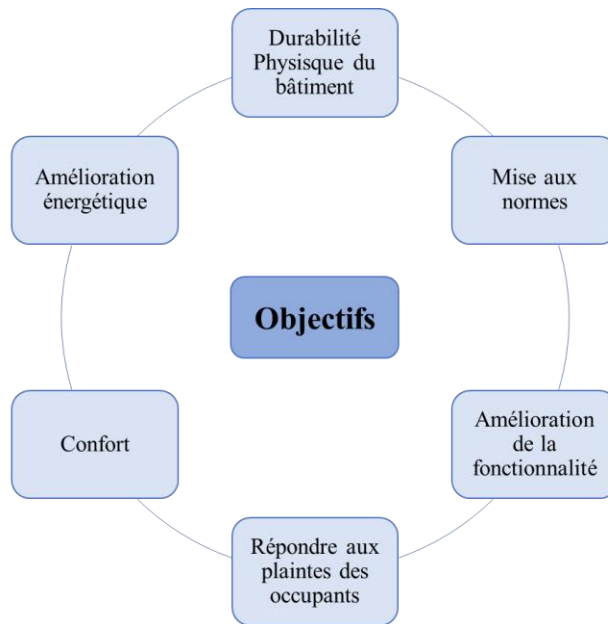


Figure 2.3- Objectifs de la rénovation.

La plupart des propriétaires ne travaillent pas de manière proactive concernant les problèmes de rénovation. Ils prennent la décision de rénover lorsqu'ils seront contraints de le faire par des problèmes techniques urgents ou des plaintes d'usagers [22,41].

Le besoin de rénovation apparaît lorsque les bâtiments commencent à vieillir en raison de la détérioration des matériaux et d'autres influences externes (conditions météorologiques). Les bâtiments auront tendance à subir des dégradations de performances, des défauts et des dysfonctionnements inattendus au fil du temps [122,123]. Face à cette situation, le propriétaire est obligé d'entreprendre une rénovation visant la durabilité et la qualité physique du bâtiment.

Les améliorations énergétiques en soi sont rarement la principale motivation pour lancer une rénovation majeure. En revanche, elles sont l'un des nombreux besoins concomitants. Dans [90] des travaux de rénovation visant la réparation de l'enveloppe ont été l'occasion d'une rénovation énergétique complète des bâtiments. Une autre étude a indiqué que dans trois pays européens (Chypre, Danemark et Suède) la rénovation énergétique était principalement entreprise due au besoin de rénovation des bâtiments dans un sens plus général [68]. La réponse aux plaintes des occupants, traduites par les niveaux de confort et les factures énergétiques est un moteur principal d'une rénovation visant l'amélioration énergétique [21,41,124].

La conformité aux exigences actuelles en termes d'accessibilité et de sécurité peut être aussi une raison pour l'initiation des travaux de rénovation dans le parc immobilier [125,126].

Au niveau public, d'autres objectifs politiques peuvent motiver l'intervention dans la rénovation. L'amélioration de la performance structurelle et énergétique, la correspondance avec les besoins des personnes âgées, la détérioration sociale et des considérations environnementales ont également été une forte motivation pour des interventions importantes [29]. L'entretien des bâtiments publics non adaptés aux exigences fonctionnelles modernes est également un autre motif courant de rénovation. L'adaptation du bâtiment à l'usage des personnes à mobilité réduite et l'implémentation des systèmes de sécurité incendie et de protection sont des axes prioritaires de leurs rénovations [127].

Les contraintes de budget maximum alloué aux opérations de rénovation doivent être définies à ce stade. Lorsque le propriétaire identifie un besoin de rénovation majeure, il précise également les ressources disponibles pour l'exécution du projet.

Le budget est un facteur déterminant dans le choix du propriétaire de la solution optimale. Il doit être capable de couvrir les coûts des matériaux de construction, des systèmes techniques du bâtiment, et de travaux de rénovation (les coûts de main-d'œuvre, les outils, installations temporaires et contrôles de qualité, les frais des consultants) liés à la solution retenue. Une adaptation des besoins de rénovation sera nécessaire lorsque les estimations de coûts dépassent les capacités financières. Il est possible parfois de profiter de soutien économique. Il se traduit par des subventions financières fournies par des entreprises publiques surtout aux projets de rénovation énergétique.

En présence de plusieurs propriétaires (investisseurs) les besoins peuvent être identifiés en introduisant des questionnaires et des entretiens. Ces moyens doivent tenir compte de tous les paramètres économiques pertinents. Ils permettent de déterminer le consentement et la volonté des propriétaires de soutenir financièrement les besoins et les souhaits exprimés.

2.3.1.2 Diagnostic de l'état du bâtiment

L'évaluation de l'état réel du bâtiment après la définition des objectifs rendra le processus plus ciblé [121]. Un diagnostic doit être mené afin de caractériser profondément le bâtiment et déterminer ses besoins de rénovation.

Dans cette phase il faut collecter toutes les données relatives aux bâtiments. Elle est initiée par une analyse approfondie pour repérer les données à obtenir et les moyens nécessaires à leur obtention. Au début, une pré-évaluation des plans du bâtiment et de la documentation doit être effectuée afin de familiariser les décideurs avec le bâtiment [128]. Une première indication des éléments et systèmes du bâtiment et des performances énergétiques prévues est décelée de la documentation de conception originale. La collecte des données concerne les aspects suivants :

- L'implantation du bâtiment, les espaces, l'orientation et la zone climatique.
- La superficie et le volume du bâtiment.
- Le plan des façades avec tous les détails.
- L'organisation interne (plans, coupes).
- Les modes de construction (éléments porteurs, enveloppe (composants opaques et transparents), connexions).
- Les équipements techniques et installations (chauffage, refroidissement, ventilation).
- Gestion des charges et des besoins énergétiques (consommation de gaz et d'électricité).

Généralement ces informations peuvent être consultées à partir de plans, de documents, de factures d'énergie et de Certificats de performance énergétique. Des informations concernant les données démographiques des habitants (groupes d'âge et de revenu), les niveaux de loyer et les conditions d'accessibilité peuvent être également recueillies.

Après avoir déterminé les caractéristiques du bâtiment, l'inspection physique du bâtiment doit être conduite [35]. Elle consiste en une évaluation physique du bâtiment et de ses parties (éléments et systèmes) [42]. Des visites de sites doivent être alors effectuées pour vérifier la conformité des données théoriques documentaires avec l'aspect réel des bâtiments. Des relevés géométriques de

parties importantes des bâtiments peuvent être réalisés au hasard. Les matériaux de structure peuvent être vérifiés. De plus, les performances des fenêtres et des portes peuvent être confirmées avec des appareils de mesure spécifiques.

Un audit énergétique peut être réalisé parallèlement à l'analyse physique. Il fournit des informations nécessaires à l'évaluation des performances des bâtiments et de ses systèmes de services. Il joue alors un rôle essentiel dans le programme de rénovation énergétique permettant d'identifier les zones présentant un potentiel d'économie d'énergie. Un certain nombre d'études ont souligné son importance dans la rénovation durable [122,129].

Les audits énergétiques varient en étendue et en profondeur. Selon le manuel ASHRAE les audits énergétiques peuvent être classés en trois niveaux, niveau 1 : inspection visuelle, niveau 2 : enquête et analyse énergétiques, et niveau 3 : analyse énergétique détaillée [130].

Le niveau 1 est le type d'audit le plus simple et l'exigence la plus élémentaire. Ce niveau peut nécessiter des visites du bâtiment. Il permet une évaluation réelle et un relèvement des données sur la situation du bâtiment, de ses équipements techniques et de sa performance énergétique. Le niveau 2 évalue en détail les systèmes énergétiques du bâtiment afin de définir une variété d'améliorations potentielles en matière d'efficacité énergétique. Le niveau 3 permet une compréhension détaillée des avantages, des coûts et des attentes de performance d'une mesure énergétique repérée au niveau 2. Le niveau approprié est sélectionné en tenant compte du niveau de précision requis, du budget disponible, des objectifs définis et de la portée des travaux [28].

De nombreux paramètres sont à considérer lors d'un audit énergétique. L'état thermique du bâtiment (températures des pièces, des surfaces des parois, et des émetteurs) peut être mesuré par l'intermédiaire de capteurs. Les données de consommations énergétiques peuvent être acquises à partir de compteurs. Les données météorologiques influençant le comportement du bâtiment sont aussi à déterminer (déploiement d'une petite station météo, utilisation de données météo). Les mesures aérauliques sont aussi incluses dans l'audit. Elles concernent les dispositifs de renouvellement d'air (mesure directe par un anémomètre) ainsi que les infiltrations par le bâti (technique de la porte soufflante). La thermographie infrarouge est aussi employée. Elle permet de mesurer la transmittance thermique des murs, de vérifier la détérioration du bâtiment et la présence de ponts thermiques ou de fuites d'air.

La collection de données sera simplifiée si les bâtiments sont équipés par des systèmes complets d'automatisation et des systèmes de gestion et de contrôle de l'énergie. Leurs données peuvent être utilisées aussi dans les audits pour aider à identifier les opportunités d'économie d'énergie.

Des entretiens avec les usagers peuvent être aussi réalisés pour mieux comprendre l'exploitation du bâtiment (le nombre d'occupants, les schémas d'occupation, la température de consigne, les heures d'ouverture des fenêtres).

La combinaison de ces étapes aboutit à une documentation complète du bâtiment. Les décideurs peuvent avoir une idée des mesures de rénovation à proposer sur la base de cette documentation.

Un enregistrement systématique de l'état de dégradation des composants du bâtiment peut être réalisé autrement par l'intermédiaire des outils tel que EPIQR [131] et BR-DSS [132]. L'outil EPIQR contient pour chaque élément du bâtiment la détérioration générale et les travaux de rénovation correspondants, y compris le coût, les travaux de modernisation futurs ainsi que les normes nationales et lignes directrices [133]. Les données sont collectées lors d'une enquête de diagnostic. Des questionnaires sont distribués aux occupants pour évaluer la qualité de l'environnement intérieur. L'état physique du bâtiment est évalué sur place. L'enquête est divisée

en 50 éléments et chaque élément est noté sur une échelle de quatre points allant de bon à mauvais état. Un audit portant sur l'état physique est effectué lors de la visite du site abordant la performance énergétique avec des informations provenant de données historiques (factures d'énergie). Basés sur les principes de ce logiciel, d'autres outils ont été développés concernant les bâtiments résidentiels et de bureaux et les hôtels (Tableau 2.1). Ils évaluent le degré de dégradation physique et l'étendue des travaux nécessaires pour rénover le bâtiment et les coûts [134].

Tableau 2.1 - Outils d'aide au diagnostic des bâtiments.

Outil	Bâtiment	Méthodes	Autres Données
EPIQR [131]	Appartement	-Questionnaire occupant -Liste de contrôle, problèmes (occupants) -Liste de contrôle, audit énergétique (auditeur)	Consommation d'énergie
TOBUS [135]	Bureaux	Liste de contrôle : - structure du bâtiment et services (gestionnaire du bâtiment et personnel technique) - (auditeur) Questionnaire, confort et réclamations (occupants)	
XENIOS [136]	Hôtel	Audit du bâtiment, évaluation de la détérioration (auditeur avec occupants)	
BR-DSS [132]		Questionnaire (facultatif)	-Informations économiques (Facultatif) -Informations générales (détérioration et obsolescence) -Informations conceptuelles (numériques, textuelles, graphique, dessin)
INVESTIMMO [137]	Résidentiel	Audit de bâtiment EPIQR (qualité des quartiers locaux et urbains, l'impact environnemental des bâtiments, les ressources nécessaires à leur cycle de vie, le potentiel de modernisation et d'entretien, les perceptions culturelles)	

Les outils de certification peuvent être aussi employés dans l'évaluation des bâtiments (LEED et BREEAM). Ils fournissent un cadre pour évaluer et améliorer la performance énergétique et environnementale des bâtiments. Le processus de notation est mené en comparant le bâtiment évalué à un ensemble de critères quantitatifs prescrits et des indicateurs de performance qualitatifs d'objectifs divers [28]. La performance des bâtiments peut être quantifiée en examinant la différence entre les indicateurs du bâtiment évalué et les indicateurs ciblés.

2.3.1.3 Préoccupations des usagers

Le processus d'identification des besoins des usagers est aussi fondamental dans la phase de planification. Des interventions appropriées centrées sur l'utilisateur peuvent être considérées sur sa base. Cela permet de combler les écarts de crédibilité qui apparaissent souvent entre les attentes

et les résultats [109]. D'autre part, une meilleure compréhension des besoins des usagers permet de cibler davantage le choix sur les solutions durables. L'accent est mis alors sur les facteurs sociaux et environnementaux en plus des facteurs économiques.

Des techniques telles que des entretiens (individuelles, de groupe) et des questionnaires convenablement adaptés, peuvent être utilisés (Tableau 2.2) en fonction de la nature du projet et des occupants (nombre et profils) [138].

Tableau 2.2 - Caractéristiques des enquêtes et des groupes de discussion.

Caractéristiques	Enquête	Groupes de discussions
But	-Une méthode de collecte quantitative. -Elle consiste en un ensemble de questions utilisées pour collecter, analyser et interpréter les informations d'un groupe de répondants.	-Un groupe d'individus sélectionnés et rassemblés pour discuter et recueillir des informations sur un sujet particulier. -Ils permettent une interaction de groupe pour mieux comprendre le sujet.
Procédure	-Les chercheurs conçoivent un questionnaire puis le distribuent à un groupe de répondants (données quantitatives et qualitatives). -Les répondants remplissent le sondage et le renvoient. -Les chercheurs analysent les résultats et présentent les résultats statistiques.	-Les chercheurs invitent et rassemblent un groupe de personnes. -Équipements associés sont nécessaires. (installations d'enregistrement audio ou vidéo ,des aides visuelles et du matériel d'écriture)
Population	Personnes concernées par le sujet du questionnaire.	Personnes concernées par le sujet des discussions.
Taille de l'échantillon	-Une taille d'échantillon suffisamment grande. (La fiabilité de l'analyse dépend d'une taille d'échantillon appropriée).	6 à 10 personnes par groupes généralement.
Anonymat	Les répondants sont anonymes entre eux et pour le chercheur.	Les participants ne sont pas anonymes.
Analyse	Analyses statistiques -Mesures de la tendance centrale (moyenne, médiane, mode) et du niveau de dispersion (écart-type, variance). -Test paramétrique et non paramétrique.	Analyse qualitative Système de codage; manuellement ou par logiciel.
Force	-Le suivi est souvent limité. -Facilite l'accès : Communications postales ou électroniques. -Collection d'une grande quantité de données à partir d'un large échantillon. -Rentable.	-Le taux de réponse n'est pas un problème. -Le suivi est souvent limité. -Rétroaction rapide et résultats. -Données riches et informations détaillées obtenues. -Il offre l'occasion de demander des éclaircissements.
Faiblesse	-Taux de réponse faible. -Processus long. -Processus lent pour obtenir les résultats.	-Coûteux à conduire. -Difficulté de constituer un groupe. -Des discussions non pertinentes peuvent détourner l'attention de l'objectif. -Difficulté à conduire et à gérer un grand nombre de participants. -Processus d'analyse long.

Le questionnaire est une technique importante de collection de données. Il permet au résident de réfléchir à un ensemble de critères liés à l'environnement interne de la maison dans un format

structuré et facile à comprendre (ce qu'ils ressentent et ce qui serait préférable). Les réponses à choix multiples ou basées sur une échelle clarifient le sens et le contexte des questions posées. Les enquêteurs peuvent parfois remplir le questionnaire au nom des répondants, dans un souci de garantir l'efficacité du questionnaire en peu de temps et d'éviter les réponses aléatoires causées par la fatigue [139].

Dans [140] un questionnaire a été développé dans le but de collecter des informations sur les besoins, les comportements et les préférences des occupants. Il consiste en une série de questions à choix multiples traitant de l'environnement intérieur, des valeurs immatérielles (architecturales, psychologiques et socioculturelles) et de l'économie.

Les entretiens sont aussi un autre moyen pour capturer les besoins des usagers. Ils se concentrent sur des paramètres plus qualitatifs mais connexes. Ils permettent aux occupants de répondre dans leurs propres termes. Les occupants peuvent aussi ajouter des informations supplémentaires sur des sujets non traités dans le questionnaire. Lors de ces entretiens, les usagers informent leurs comportements quotidiens. Ils offrent aussi un aperçu des caractéristiques d'utilisation de leurs logements. D'autres questions peuvent être posées en plus des questions sur le confort thermique (sur l'espace et la flexibilité, les meilleurs et les pires aspects de la maison et les changements futurs que les occupants souhaiteraient voir incorporés). Ces questions aident à mieux comprendre comment le logement est utilisé actuellement. Elles permettent de comprendre également comment les besoins futurs peuvent être efficacement intégrés dans la rénovation.

Des entretiens qualitatifs semi-structurés individuels des locataires ont été conduits dans [138]. Ils visaient à mieux comprendre les besoins et priorités des locataires. Les résultats ont montré que les locataires aimaient être consultés dans la conception de l'entrée du bâtiment et des espaces communs extérieurs et intérieurs. Ils souhaiteraient également être régulièrement informés de l'avancement du processus de rénovation. L'étude a aussi identifié des projets comprenant une participation des occupants au processus de conception illustrée par des discussions de groupe et des questionnaires.

Une importance particulière est accordée à l'engagement des occupants dans les premières phases du projet de rénovation. Cependant, la recherche montre que dans la plupart des cas, les occupants ne sont pas activement impliqués dans le processus de conception. Ils sont seulement informés des décisions déjà prises [88,141].

2.3.1.4 Contraintes réglementaires

Un point important lors de la décision de rénovation est de vérifier les travaux autorisés selon la réglementation. Les démarches administratives à effectuer sont aussi à déterminer (permis de construire, déclaration préalable). Ces démarches dépendent de plusieurs paramètres (type du bâtiment à rénover, localisation géographique, classement (monument historique) et types de travaux à faire).

Les travaux de rénovation créant une surface de plancher de plus de 20 ou 40 m² selon la commune, doivent faire l'objet d'un permis de construire. Ce permis est aussi nécessaire dans le cas où plusieurs des conditions suivantes sont remplies : modification du volume du bâtiment, modification ou création d'une ouverture et changement de destination (transformer un bâtiment industriel en logement). Dans le cas contraire une déclaration préalable sera suffisante.

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, fait partie des priorités fixées par le gouvernement français dans le cadre de l'accomplissement des objectifs énergétiques. Dans ce contexte, les travaux de rénovation des bâtiments existants sont soumis à la réglementation thermique RT Existant. Les mesures réglementaires dépendent de l'importance des travaux entrepris. On peut distinguer la RT Existant Globale et la RT Existant par élément (Figure 2.4).

La RT Existant Globale s'applique aux bâtiments résidentiels et tertiaires faisant l'objet de rénovations lourdes. Ils respectent les trois critères suivants simultanément :

- La surface Hors Œuvre Nette (SHON) est supérieure à 1000 m².
- La date d'achèvement du bâtiment est postérieure au 1^{er} janvier 1948.
- Le coût des travaux de rénovation « thermique » décidés est supérieur à 25% de la valeur hors foncier du bâtiment.

Ces bâtiments doivent aussi faire l'objet d'une étude de faisabilité des approvisionnements en énergie, préalablement au dépôt de la demande de permis de construire. Par ailleurs, ils doivent respecter différentes exigences relatives à la performance thermique du bâtiment rénové (l'évaluation de l'état initial, l'économie d'énergie, le confort d'été, performances minimales requises pour une série de composants modifiés).

Les bâtiments résidentiels et tertiaires ne satisfaisant pas les trois critères cités sont soumis à la RT Existant par élément. Pour les éléments à remplacer ou à installer, il faut que la performance des nouveaux soit supérieure aux caractéristiques minimales mentionnées dans l'arrêté (relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants). Les exigences concernent les parois opaques (murs, toiture, planchers), les parois vitrées, le chauffage, l'eau chaude sanitaire, le refroidissement, la ventilation et l'éclairage.

En complément de ces réglementations, les bâtiments faisant l'objet de travaux de rénovation importants (ravalement de façade, réfection de toiture, ou aménagement de locaux en vue de les rendre habitables) sont obligés aussi d'améliorer leur isolation thermique (la loi relative à la transition énergétique vers la croissance verte).

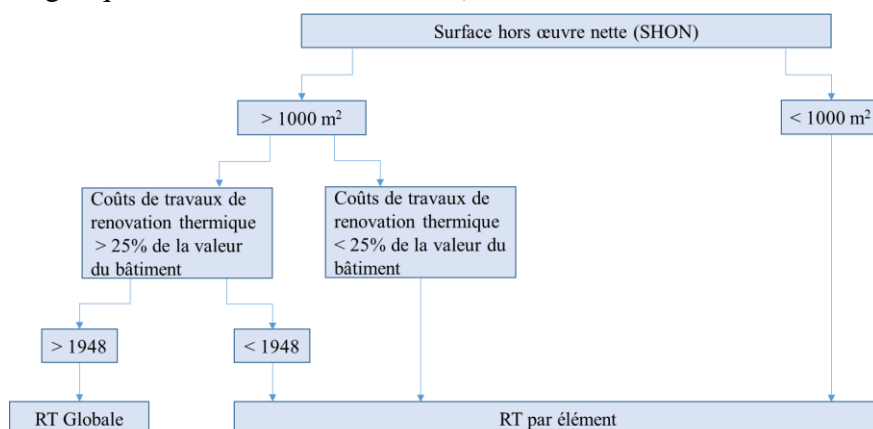


Figure 2.4 - RT Existant.

D'autre part, l'extension d'un bâtiment existant présente une certaine particularité. En effet, elle peut être soumise soit à la RT Existant soit à la RT en vigueur. L'application s'appuie sur le calcul de la surface thermique SRT d'un bâtiment à usage d'habitation. Si l'extension correspond à une SRT < 50 m², la rénovation est soumise aux exigences relatives à la RT Existant. Sinon elle est soumise aux exigences relatives à la RT en vigueur pour les bâtiments neufs (RT 2012 ou RT 2020). RT 2012 vise à réduire la consommation énergétique des

nouveaux bâtiments. Elle a imposé le Bâtiment Basse Consommation (BBC) comme référence pour la construction neuve (une consommation d'énergie primaire limitée à 50 kWhep/m²/ an en moyenne). Elle est un pas important vers la RT 2020 qui entrera en vigueur en été 2021. RT 2020 vise à réduire la consommation d'énergie et l'émission de gaz à effet de serre par la construction de bâtiments autonomes et en favorisant les économies d'énergie. Les bâtiments neufs devront respecter certaines obligations pour qu'ils répondent aux exigences de la RT 2020. La consommation relative au chauffage doit être inférieure au seuil 12 kWhep/m²/ an. En outre, les bâtiments doivent avoir la capacité de produire de l'énergie plus qu'ils en consomment. Pour satisfaire à la première exigence, il est important d'utiliser des matériaux isolants écologiques performants, d'installer un système de ventilation efficace et d'opter pour une conception bioclimatique optimale. La deuxième exigence nécessite l'intégration de nouvelles technologies telles que les panneaux photovoltaïques et solaires.

2.3.2 Indicateurs de Performance

Après avoir établi une documentation de l'état du bâtiment et des besoins des usagers, une liste d'indicateurs de performance peut être définie. Cette liste concerne les trois aspects de durabilité. Elle traduit les attentes des acteurs. Une pondération de ces indicateurs sera conduite. Les résultats du projet de rénovation seront évalués sur la base de cette liste. Dans la suite, on présente la définition et la pondération des indicateurs (Figure 2.5).

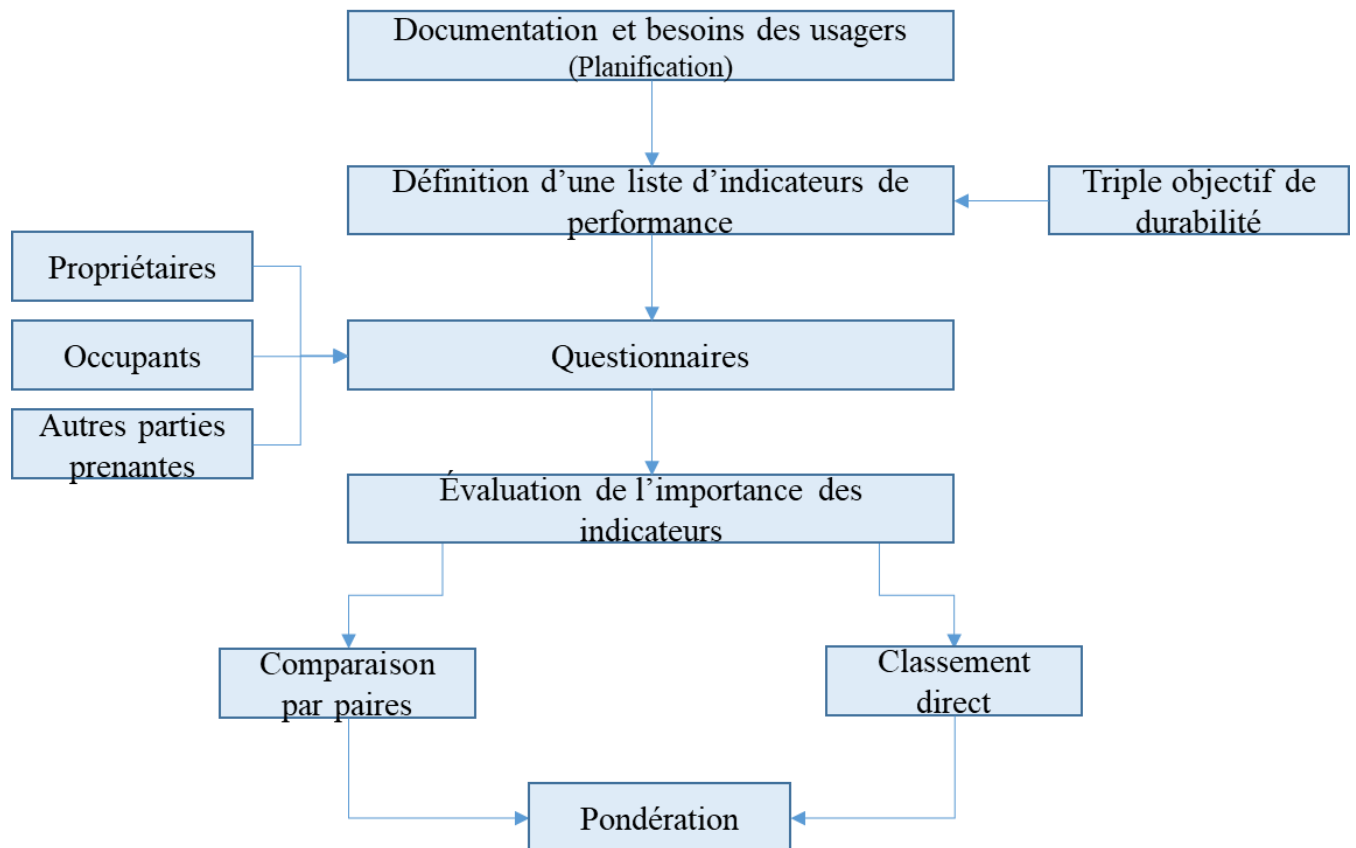


Figure 2.5 - Procédure de définition et de pondération des indicateurs de performance.

2.3.2.1 Définition

Les indicateurs de performance sont regroupés selon les piliers de durabilité en trois catégories (environnementale, économique et sociale). Le choix de ces indicateurs est adapté au cas d'étude. Il dépend principalement de différentes parties prenantes du projet de rénovation [142]. Les avantages devant être atteints des diverses actions de rénovation seront à définir du point de vue des acteurs. Ils permettent d'identifier les indicateurs appropriés à l'évaluation [143].

Des indicateurs pertinents à évaluer dans les projets de rénovation ont été identifiés à partir de l'analyse bibliographique conduite au chapitre précédent. Un résumé des principaux indicateurs de performance évoqués est illustré dans la Figure 2.6.

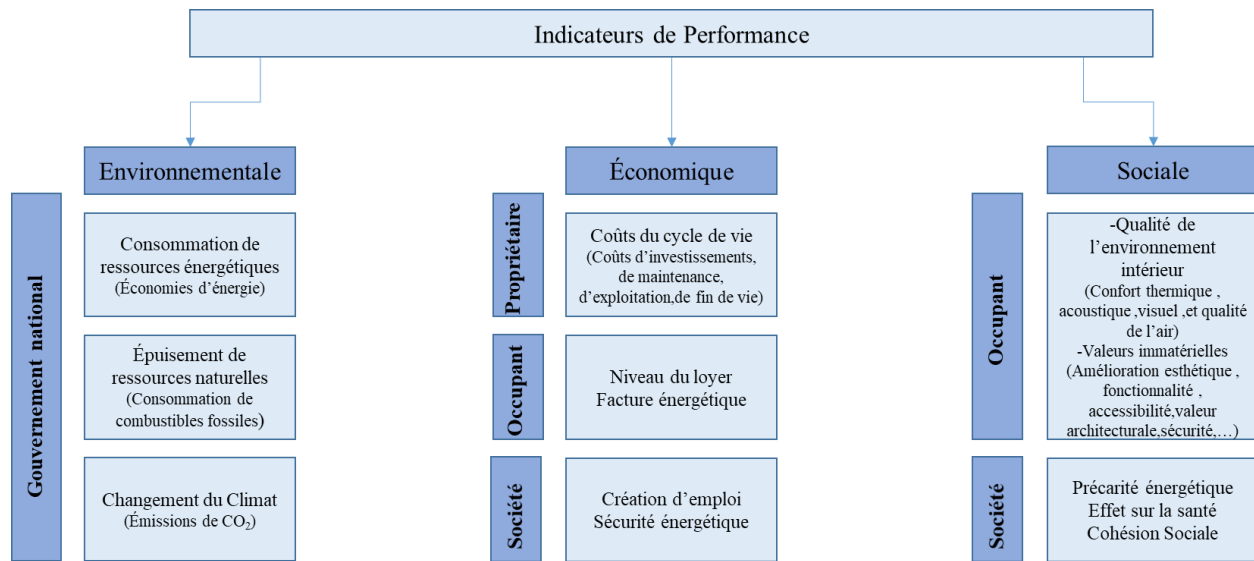


Figure 2.6 - Indicateurs de performance.

La durabilité environnementale comprend les aspects d'impact énergétique et environnemental et d'impact de ressources. Les catégories d'impact (Consommations de ressources énergétiques, Épuisement des ressources naturelles et Changement du climat) sont les plus courantes parmi celles définies dans le chapitre précédent. Les avantages environnementaux sont généralement estimés en terme d'énergie primaire et d'émissions des gaz à effet de serre [144]. L'économie d'énergie est un indicateur environnemental offrant des perspectives intéressantes. Sur sa base deux autres indicateurs sont définis : La consommation de combustibles fossiles et les émissions de CO₂. L'impact des économies d'énergie finales sur la réduction de la consommation de combustibles fossiles et sur la réduction des émissions de CO₂ sont mesurés respectivement par ces indicateurs. Les décideurs politiques au niveau du gouvernement national sont les plus intéressés par cet aspect [67].

La durabilité économique comprend les aspects liés aux coûts de construction et d'exploitation. Les indicateurs employés pour estimer la viabilité économique des interventions sont liés à l'estimation des coûts et des économies. Ils déterminent si les économies monétaires sont en mesure de couvrir (faisabilité économique) ou de dépasser (rentabilité économique) les coûts d'investissements encourus. L'analyse bibliographique a évoqué le coût du cycle de vie comme étant le plus employé dans l'évaluation économique d'un projet de rénovation du point de vue du

propriétaire [94]. L'évolution du niveau du loyer et de la facture énergétique est le principal indicateur économique pour les occupants. D'autres avantages économiques illustrés par l'augmentation des emplois et la sécurité énergétique peuvent être considérés comme indicateurs économiques du point de vue de la société.

La durabilité sociale comme indiqué précédemment comprend les aspects liés aux occupants et à la société. Les indicateurs du point de vue des occupants se concentrent sur la qualité de l'environnement intérieur et sur d'autres valeurs immatérielles. La qualité de l'environnement intérieur est un indice de satisfaction des occupants due au confort thermique, visuel et acoustique et à la qualité de l'air [144]. D'autres valeurs liées à la qualité du bâtiment peuvent également les intéresser (Accessibilité, Sécurité, Organisation spatiale, Esthétique...). Les indicateurs du point de vue de la société sont représentés par la réduction de la précarité énergétique, la santé et la cohésion sociale.

Outre ces trois aspects, l'aspect technique lié au profil du bâtiment peut être considéré (État de dégradation du bâtiment, Obsolescence technique des éléments du bâtiment) [140]. Il concerne à la fois les propriétaires et les occupants.

2.3.2.2 Pondération

Introduction

Un projet de rénovation implique un large éventail d'acteurs. Ils sont classés en trois groupes par souci de simplicité [43]. Il s'agit de la société au sens large (communauté, autorités locales et nationales...) du propriétaire et des locataires. Chacun a ses propres intérêts et priorités.

La société présente des intérêts liés à la réduction de la précarité énergétique, à la cohésion sociale et à l'abordabilité des logements (surtout les groupes sociaux vulnérables). Le gouvernement local exprime ses attitudes spécialement liées au plan de construction (maintenir l'esthétique historique du bâtiment, réduire les perturbations aux communautés locales). Le gouvernement national se concentre spécifiquement sur les impacts des potentiels d'économie d'énergie et de réduction des émissions des gaz à effet de serre.

D'autre part, les intérêts des deux autres groupes nécessitent une attention particulière. Ceux-ci présentent des similitudes et différences dans leurs intérêts selon les aspects. Ils sont convergents concernant l'aspect technique du bâtiment (qualité physique, performance des équipements). Cependant, leurs intérêts diffèrent concernant d'autres aspects. Le contexte actuel dans le secteur du bâtiment peut être à l'origine. En effet, le propriétaire met à la disposition du locataire le logement, les appareils et installations, et le locataire paie la facture énergétique. Au fil du temps, des travaux de rénovation seront nécessaires. Les investissements dans la rénovation seront sur la charge du propriétaire. Celui-ci affirme que la plupart des avantages des rénovations vont directement aux locataires. C'est son argument pour augmenter le loyer.

Cette situation est la raison de divergence des intérêts économiques des deux groupes. Les propriétaires chargés des coûts d'investissement accorderont plus d'importance aux aspects financiers. Alors que les locataires attribueront une priorité au loyer, à la facture énergétique et à l'environnement intérieur.

La pondération des indicateurs du point de vue de différents acteurs est alors une nécessité. Elle pourra clarifier la convergence et la divergence des intérêts des groupes.

Processus

La pondération des indicateurs, outre leur sélection, est indispensable au processus d'évaluation des travaux de rénovation. Elle domine la performance globale des interventions. Le projet de rénovation, faisant intervenir plusieurs acteurs, implique une nécessité d'une pondération du point de vue de chacun.

Le processus de pondération consiste à déterminer l'intensité de signification des indicateurs identifiés [145]. La pertinence et le poids relatif de chaque indicateur sont établis en fonction des priorités adressées par les propriétaires et les occupants. Les indicateurs peuvent être pondérés également sur la base des objectifs de performance minimum, des politiques et des réglementations nationales et internationales [146]. Les pondérations accordées à chacun des indicateurs définissent leurs impacts sur les résultats d'évaluation.

Une valeur de facteur de pondération plus élevée signifie que les parties prenantes expriment une attention particulière à cet égard. Un poids plus élevé attribué aux indicateurs économiques exprime une préférence des aspects financiers de l'investissement et du profit. Un poids plus élevé attribué aux indicateurs environnementaux indique une préoccupation particulière à la question de l'environnement. Un poids plus élevé attribué aux indicateurs sociaux donne une grande importance à la satisfaction des occupants et à la sauvegarde des valeurs architecturales et patrimoniales.

Des études ont été menées sur la pondération, développant ainsi de nombreux outils. Ces outils sont caractérisés par leurs manières de pondérer. Celles-ci sont basées sur une famille de méthodes de pondération proposée dans la littérature. Le Processus de Hiérarchie Analytique (AHP) [138], et la méthode de Classement [147] sont les plus courants dans les processus de pondération. Les outils de détermination des poids des indicateurs sont principalement basés sur ces deux méthodes (le modèle « Knapsack » [147], MCDM-23 [148]) [149]. De nombreux autres outils sont cités dans [138].

La méthode AHP a été développée par Saaty [150] pour hiérarchiser les indicateurs à l'aide de la comparaison par paires. Le problème de pondération prend la forme d'une structure hiérarchique. Le premier niveau de la structure définit l'objectif (rénovation durable). Aux niveaux suivants l'objectif est décomposé en des critères, sous-critères et indicateurs. L'essence de la méthode est de construire une matrice de comparaison par paires. Dans cette matrice les éléments du même niveau seront comparés les uns aux autres sur une échelle de pondération de 1 à 9 (Figure 2.7).

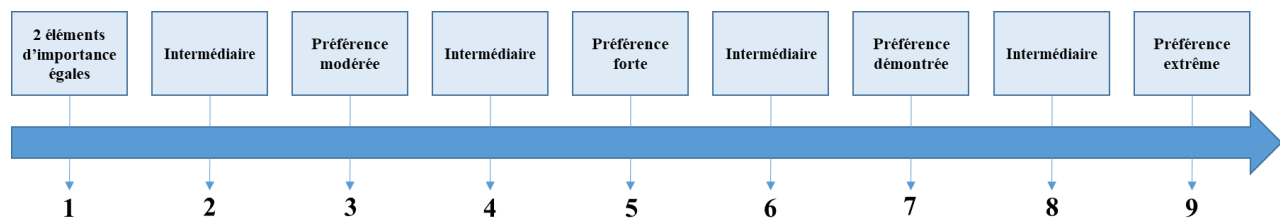


Figure 2.7 - Échelle de pondération de l'AHP.

Cette comparaison permet la génération des entrées de la matrice. Les valeurs attribuées reflètent le degré de préférence d'un indicateur par rapport à l'autre. Les poids des critères sont normalisés et synthétisés à partir de la matrice [121]. Il est possible de calculer un ratio de cohérence

correspondant à la matrice pour vérifier les opinions émises. Un ratio supérieur à 1 indique des jugements arbitraires. Cette analyse peut être conduite à partir des entretiens avec des experts, propriétaires et occupants [151,152].

La méthode de Classement est une méthode simple pour attribuer des poids. Les poids sont déterminés en utilisant une échelle de 1 à 10. Le rang 10 est affecté à l'indicateur le plus important d'un niveau donné. Les autres indicateurs du même niveau seront notés de 1 à 10 en fonction de leur importance relative par rapport au plus performant. Par exemple, si un critère est jugé un peu moins important que le plus performant, il reçoit une note de 7. Cette idée est présentée dans la Figure 2.8. Les poids sont ensuite normalisés pour être compris entre 0 et 1 de sorte que la somme des poids à un certain niveau soit l'unité. Cette procédure est répétée pour chaque niveau de la structure [147].

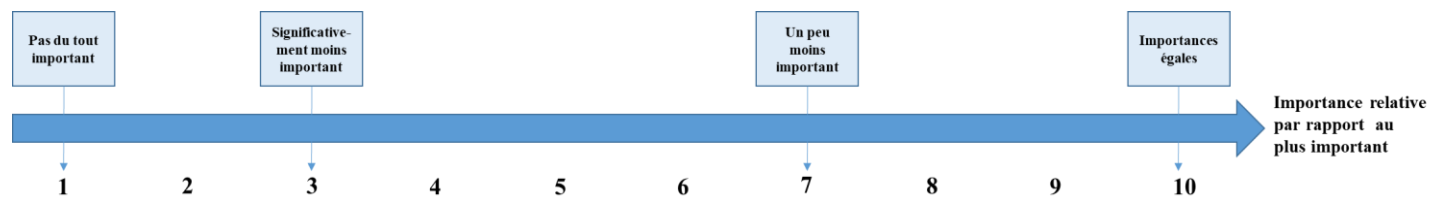


Figure 2.8 - Échelle de pondération de la méthode de Classement.

Une autre méthode de pondération développée récemment par les chercheurs est la nouvelle technique d'analyse du rapport d'évaluation du poids par étapes SWARA. Cette méthode présente des similitudes avec la méthode AHP, mais chacune a ses spécificités respectives [153]. Les deux méthodes utilisent la comparaison par paires pour exprimer la signification relative des éléments dans une hiérarchie. Cependant, pour le même nombre de critères, la méthode SWARA nécessite un nombre moins élevé de comparaison de paires. En outre, elle fournit au répondants une plus grande liberté pour exprimer leurs préférences. Cette méthode manque la procédure de vérification de la cohérence des comparaisons effectuées.

La pondération des indicateurs peut être effectuée aussi par l'intermédiaire de questionnaires interrogeant un groupe d'experts ou des parties prenantes [154,155]. Ceux-ci sont invités à remplir les questionnaires dans le but de classer les indicateurs par importance sur une échelle qualitative (par exemple : 0 non important, 1 pas assez important, 2 plutôt important, 3 modérément important, 4 = très important et 5 = extrêmement important). Les réponses seront utilisées pour calculer le poids de chaque critère. Les facteurs de pondération sont déterminés en divisant chaque importance relative par le total, fournissant ainsi un ensemble de facteurs dont la somme est de 1.

2.4 Phase post-rénovation

Les bâtiments seront exploités par les usagers, une fois les travaux de rénovation achevés. Les conditions de fonctionnement des bâtiments doivent être testées. Une évaluation post-rénovation visant à vérifier la réalisation des objectifs prévus au stade de diagnostic peut être menée. Cette évaluation correspond à la quantification des indicateurs de performance identifiés sur la base de la planification.

La liste définie fait intervenir des indicateurs tant quantitatifs que qualitatifs couvrant différents aspects. Un suivi physique, des enquêtes post-occupation et des calculs adaptés seront nécessaires pour démontrer les avantages du plan de rénovation par rapport au scénario de référence.

L'aspect technique concerne les paramètres mesurables liés à la qualité de l'environnement intérieur et aux équipements. Ils peuvent être récupérés grâce à la technologie intelligente (capteurs, système de surveillance...). Une importance considérable est attribuée aux systèmes de gestion technique des bâtiments à cet égard.

L'aspect social implique des indicateurs immatériels. Ces valeurs seront recueillies par l'intermédiaire d'enquêtes post-rénovation. Elles peuvent se concentrer sur des sujets comparables à ceux abordés dans l'enquête pré-rénovation. La différence réside dans le fait que la première reflète les attentes des occupants alors que la deuxième les évaluent.

Quant aux aspects environnementaux et économiques, l'évaluation s'appuiera sur l'analyse du cycle de vie.

2.4.1 Évaluation de l'aspect technique

L'aspect technique désigne les paramètres pouvant être quantifiés au moyen de mesures physiques. Ces paramètres sont généralement liés à la qualité de l'environnement intérieur et aux systèmes du bâtiment.

La qualité de l'environnement intérieur offre une indication tangible sur la satisfaction des occupants. Elle concerne les conditions de confort (thermique, acoustique et visuel) et la qualité de l'air intérieur. Le confort thermique peut être évalué en se référant à la température et à l'humidité relative. Le confort acoustique peut être évalué en fonction du son et du bruit. En outre, le confort visuel peut être lié à l'éclairage. Quant à la qualité de l'air intérieur, elle peut être déterminée en fonction de la concentration de polluants dans l'air.

Les paramètres liés aux systèmes permettent l'évaluation de la consommation en énergie et de leur fonctionnement.

Le développement de la technologie intelligente a permis la mise en œuvre des systèmes de surveillance basés sur des capteurs adaptés à chacun des paramètres (T° , HR, Luminosité, Bruit, Concentration en CO_2 ...). Ils permettent le suivi en temps réel des paramètres cités et la collection de leurs historiques.

Cependant le bâtiment peut intervenir plusieurs systèmes simultanément : Chauffage, Climatisation, Ventilation, Éclairage, Alimentation électrique, Surveillance, Sécurité et Incendie. Le besoin de gestion de l'ensemble de ces systèmes devient incontournable. La gestion technique du bâtiment GTB a émergé comme un moyen prometteur à ce sujet. La GTB fait référence à un système informatique permettant de contrôler et de surveiller les différents équipements électriques et mécaniques d'un bâtiment [156]. Elle est responsable de la régulation et du contrôle automatiques de ces systèmes, du maintien des paramètres prédéfinis et du contrôle de leur fonctionnalité. L'architecture de ce système est illustrée dans la Figure 2.9. La surveillance, la supervision et le suivi sont les trois missions principales assurées par la GTB. La surveillance consiste en une optimisation des opérations de maintenance des installations techniques assurant ainsi leur sécurité et disponibilité. La supervision permet de suivre en temps réel plusieurs paramètres de confort. Elle permet d'adapter le fonctionnement des équipements aux besoins des

occupants. Le suivi consiste à identifier les consommations du bâtiment par usage, faire une analyse critique et proposer des pistes d'amélioration. À chaque mission est associé un système informatique. Le système Terrain mesure et détecte les anomalies éventuelles. Les contrôleurs classés reçoivent un stimulus à partir de capteurs, de compteurs, détecteurs ou actionneurs. Le système Régulation mesure et agit automatiquement. Le système d'archivage est le cerveau [158]. La GTB permet de réduire les coûts énergétiques et les coûts de maintenance et d'offrir un confort optimal aux usagers. Elle permet aussi la gestion à distance des équipements.

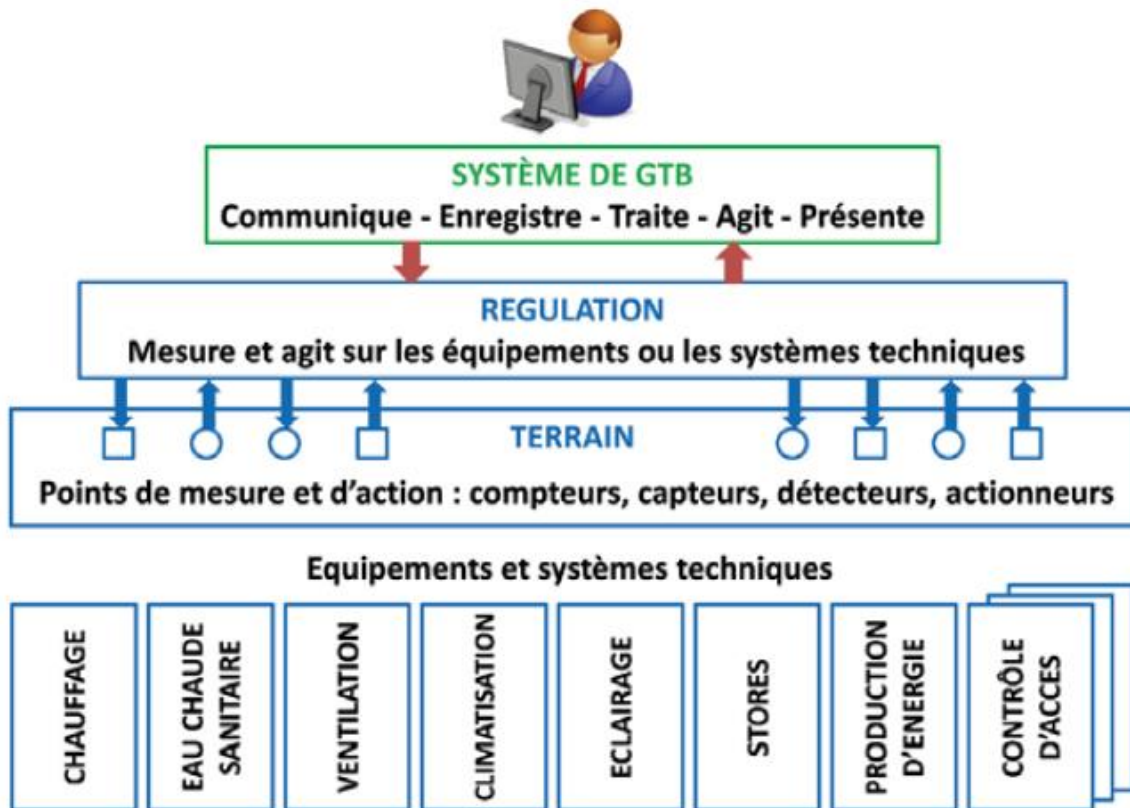


Figure 2.9 - L'architecture du GTB [157].

L'intérêt de la GTB dans l'évaluation du projet de rénovation réside dans le suivi du bâtiment grâce à la gestion des installations. Ce système peut collecter des données en temps réel (Température, HR, CO₂...) des capteurs. Les enregistrements de ces divers paramètres seront ensuite stockés. Une comparaison des données liées au confort et à la consommation d'énergie avant et après rénovation sera possible. Ceci permet de déterminer l'évolution des performances du bâtiment suite aux interventions de rénovation.

Dans [159], les données de température enregistrées par le système GTB ont été combinées à des mesures sur site et des questionnaires pour évaluer la performance thermique d'un bâtiment rénové. Dans [160], un système GTB a été prévu dans le but de récolter des informations (T°, HR, consommations énergétiques) nécessaires à l'évaluation des performances réelles de la rénovation d'un bâtiment tertiaire.

2.4.2 Évaluation de l'aspect social

L'aspect social concerne les paramètres immatériels permettant aux occupants d'évaluer les projets de rénovation en fonction de leurs attentes. Les paramètres physiques collectés de la GTB fournissent une idée quantitative sur l'environnement intérieur. Cependant, ils ne donnent aucune indication qualitative sur l'expérience et la satisfaction des occupants à l'égard du processus de rénovation en général.

Une enquête par questionnaires ou entretiens peut être réalisée afin d'évaluer la rénovation dans une perspective d'occupants. Elle peut ressembler par sa structure à celle réalisée dans la phase de planification. Pourtant, elle doit se concentrer sur les indicateurs sociaux définis dans la liste afin de les informer. D'une manière générale, l'enquête peut aborder des paramètres potentiels sur le climat intérieur perçu et le confort intérieur. Elle peut se concentrer aussi sur d'autres paramètres tels que l'organisation spatiale (flexibilité, espaces verts, aires de loisirs extérieures...), l'accès par les personnes à mobilité réduite, les perturbations dues au projet, la relocalisation des occupants pendant la rénovation et l'augmentation du loyer.

Dans [92], une enquête post-rénovation visant les résidents a été employée afin de comprendre les effets des travaux de rénovation et leur satisfaction à l'égard de la rénovation. Les résultats du questionnaire ont montré que la rénovation est un processus complexe provoquant une gêne et des inconvénients aux occupants. Dans [161] également, la perception des occupants de la qualité de l'environnement intérieur a été évaluée sur la base d'une enquête post-rénovation. Elle a montré que la rénovation a augmenté la proportion de résidents bénéficiant d'un confort thermique et d'une qualité d'air satisfaisante, ainsi que de meilleures conditions acoustiques. Une comparaison du confort thermique avant et après rénovation a été conduite par un questionnaire dans [162]. Les occupants ont été invités à indiquer leur vote de confort pendant une période donnée. Le questionnaire comportait aussi d'autres sujets tels que la perception de l'environnement intérieur et la consommation d'énergie. Le questionnaire était combiné à des enregistrements de (T° , HR, Concentration de polluants) afin de déterminer l'impact des améliorations énergétiques sur la qualité de l'air intérieur et le confort des occupants.

2.4.3 Évaluation de l'aspect environnemental

La pensée du cycle de vie a indiqué l'ACV comme outil prometteur pour l'évaluation des aspects environnementaux de la rénovation. L'ACV est une approche systématique permettant la quantification des impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie. Son application dans le secteur de bâtiment est récente, notamment dans les projets de rénovation éco-énergétiques [120]. Elle fournit une perspective holistique de la performance environnementale des travaux de rénovation. Les impacts résultant de la consommation des matériaux, des composants supplémentaires liés à la rénovation et de la consommation d'énergie dans la phase post-rénovation seront évalués. L'ACV a été appliquée dans des recherches afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels des bâtiments rénovés avant et après le processus [163].

L'ACV comporte quatre étapes définies dans les normes ISO : définition de l'objectif et de la portée, analyse d'inventaire, évaluation d'impact et interprétation des résultats (Figure 2.10).

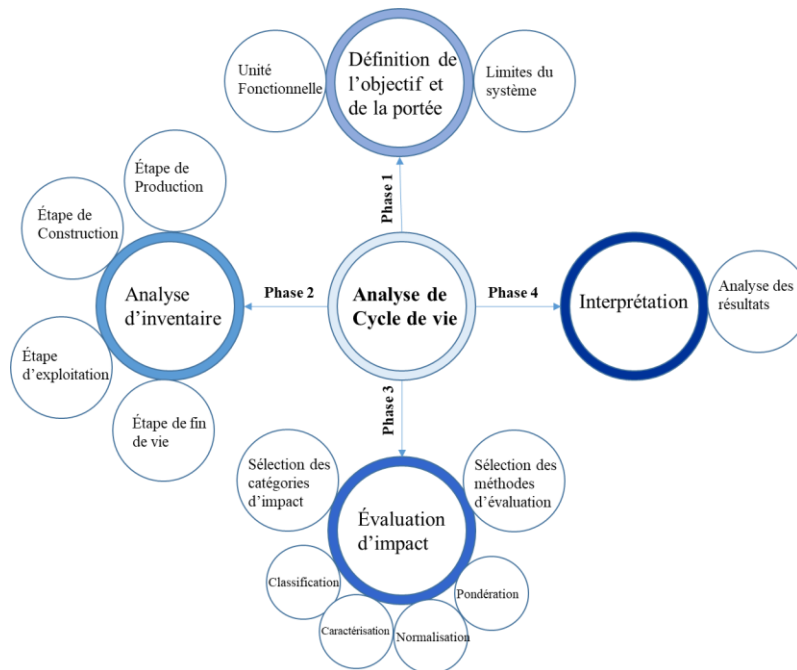


Figure 2.10 -Les phases de l'analyse du cycle de vie.

2.4.3.1 Objectif et portée de l'étude

Cette première phase consiste à décrire le type d'étude menée. Les raisons, la partie concernée par l'analyse et les limites du système seront à définir.

Unité Fonctionnelle

L'unité fonctionnelle permet de fournir une référence sur laquelle les données d'entrée et de sortie sont normalisées. Des exemples d'UF traitant du logement peuvent être trouvés dans la littérature (Tableau 2.3).

L'horizon temporel après le projet de rénovation considéré dans les analyses ACV peut varier considérablement d'une étude à l'autre. La durée de vie considérée varie de 20 à 60 ans. La valeur la plus représentative est de 50 ans, en prenant comme référence la durée de vie normale pour les produits de construction définie dans les normes [164].

Tableau 2.3 - Exemple de définition de l'Unité Fonctionnelle.

Réf.	Définition de l'Unité Fonctionnelle
[45]	1 m ² de surface de plancher nette chauffée et refroidie d'une seule unité dans un bâtiment.
[53]	L'énergie nécessaire (MJ) pour assurer les conditions de confort dans un logement pendant un an.
[165]	L'utilisation de 1 m ² de surface habitable du bâtiment sur une période d'un an.
[166]	Le bâtiment évalué.
[167]	1 m ² de surface habitable.
[168]	1 m ² de composant de bâtiment opaque avec un taux de transfert de chaleur similaire sur 80 ans.

Limite du système

Un autre paramètre devant être défini dans une étude de l'ACV est la limite du système. Il s'agit de spécifier les étapes considérées du cycle de vie [169], les systèmes techniques utilisés et leurs composants [170]. Les limites du système les plus couramment adoptées sont du berceau à la tombe « from cradle to grave » [171]. L'ensemble du cycle de vie du bâtiment doit être pris en compte (Figure 2.11).

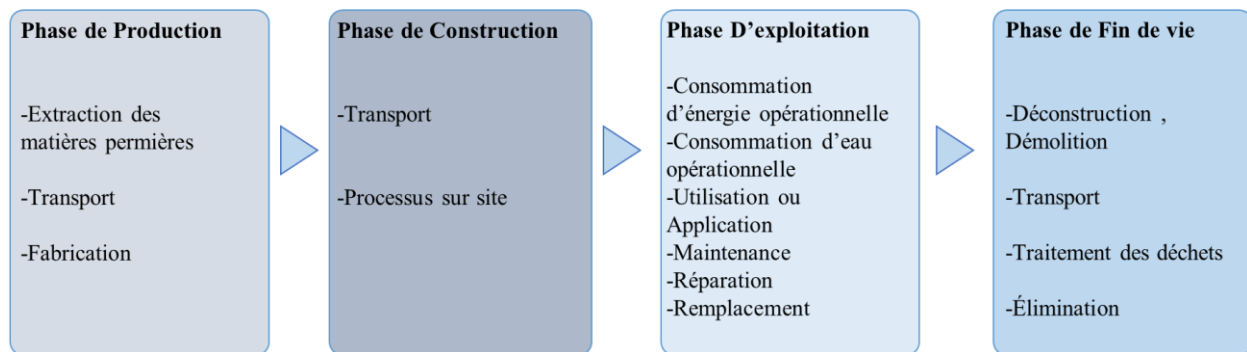


Figure 2.11 - Phases du cycle de vie des bâtiments.

2.4.3.2 Inventaire du cycle de vie

Cette phase d'analyse est un inventaire des données d'entrée et de sortie relatives au système étudié (les besoins en matériaux et en énergie, les consommations et les déchets). Elle implique la collecte des données nécessaires pour atteindre les objectifs de l'étude définie. Ces données sont évaluées et des calculs sont effectués pour quantifier les entrées et les sorties du système. L'inventaire est réalisé en considérant les phases du cycle de vie, la production, la construction, l'exploitation et la fin de vie.

L'étape de production

Au cours de cette phase, les données concernant les matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment et les systèmes techniques doivent être évaluées. Cette évaluation est effectuée sur la base des données collectées soit de la documentation des projets [36], soit de déclarations environnementales de produits (EPD) dans le secteur de la construction relatives à chaque pays [172], soit d'une base de données génériques (Ecoinvent) [173].

Les matériaux peuvent être associés à un facteur de durée de vie indicatif du nombre de substitutions pendant la durée de vie du bâtiment après le projet de rénovation. Ils peuvent être associés également à un facteur de déchets représentant le pourcentage de déchets de coupe générés pendant le processus de construction en fonction des normes [36].

L'étape de construction

Les pertes matérielles sont prises en compte lors de cette phase. Une perte matérielle moyenne de 5% peut être considérée [45]. L'énergie directe utilisée pour les activités de construction (pour l'assemblage des matériaux et l'exploitation du chantier de construction) est à considérer selon la

disponibilité des informations correspondantes [174]. Les matériaux sont supposés être transportés de l'usine au chantier par des camions dont la capacité dépend du taux de chargement. La distance peut être estimée sur la base de la documentation du projet, en supposant une distance approximative en cas de manque d'informations [172].

L'étape d'exploitation

Pour l'analyse de cette phase, la consommation annuelle d'énergie doit être quantifiée (chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage intérieur et appareils). Certaines hypothèses peuvent être faites pour les actions de maintenance survenant pendant la phase d'utilisation. Par exemple le remplacement de certains systèmes techniques du bâtiment après une période prédéfinie de l'occurrence du projet de rénovation (chaudière, pompe à chaleur) [36,58].

L'étape de fin de vie

En ce qui concerne cette phase, le transport, la manutention et l'élimination des déchets doivent être pris en compte pour tous les matériaux impliqués dans le projet de rénovation. En particulier, l'acier, l'aluminium, le fer, le verre, le béton, la céramique et la laine de verre sont censés être entièrement mis en décharge [174]. D'autres matériaux peuvent être traités dans une usine d'incinération (bois). Les plans régionaux de gestion des déchets de construction et de démolition sont aussi à considérer [45]. En plus de la mise en décharge, le recyclage de certains matériaux peut être envisagé. Similairement à la phase de construction, le transport des déchets est aussi pris en considération.

2.4.3.3 Évaluation de l'impact du cycle de vie

Cette analyse permet de décrire les conséquences potentielles des flux d'entrée et de sortie quantifiés dans l'analyse d'inventaire en termes de leurs effets néfastes sur l'environnement. Elle comprend la sélection des catégories d'impact, les indicateurs de catégorie et les modèles de caractérisation.

Une grande variété de catégories d'impact a été résumée dans l'analyse bibliographique conduite dans le chapitre précédent. Le potentiel de réchauffement climatique, d'acidification et d'eutrophisation ainsi que la consommation de ressources énergétiques sont les plus abordés dans la littérature [171]. La sélection d'un nombre important de catégories fournit une vision globale des impacts environnementaux du système.

Les impacts environnementaux seront évalués au moyen de méthodes d'évaluation d'impact spécifiques. La méthode de la demande d'énergie cumulée [36,174,175], la méthode ReCiPe [174-176] et la méthode CML [45,172,176,177] sont les plus populaires. Le Tableau 2.4 présente les méthodes recommandées pour certaines des catégories d'impact. Il existe également des outils permettant d'évaluer l'impact environnemental. Le logiciel SimaPro est le plus répandu [172,174,178]. D'autres outils sont aussi présents (openLCA, OneClickLCA et Mobius).

Tableau 2.4 - Méthodes recommandées pour certaines catégories d'impact.

Catégorie	Méthode
Changement Climatique	IPCC GWP100
Appauvrissement de l'ozone	WMO 100
Acidification	Dépassement accumulé
Eutrophisation aquatique	ReCipe
Écotoxicité	USEtox
Rareté des ressources abiotiques	CML

Dans l'ACV, une étape facultative peut être ajoutée. Elle consiste en une évaluation monétaire. En effet, une multiplicité de scores d'impact individuels est rarement une bonne base pour la prise de décision [171,173]. L'objectif de l'évaluation monétaire dans la recherche est d'exprimer, en termes monétaires, comment le bien-être des générations actuelles et futures est affecté par les impacts environnementaux causés par les activités dans le secteur du bâtiment. Pour chaque indicateur environnemental individuel, les valeurs de caractérisation sont multipliées par un facteur de monétisation.

2.4.3.4 Interprétation

Une fois l'impact calculé, la dernière étape de l'évaluation est l'interprétation, où les résultats des calculs sont résumés et discutés.

2.4.4 Évaluation de l'aspect économique

La performance économique peut être comprise par le soutien de l'analyse du coût du cycle de vie CCV. Cette analyse est définie par la norme sur les bâtiments et les actifs construits ISO 15686 comme « une technique précieuse qui est utilisée pour prédire et évaluer la performance des coûts des actifs construits » [179]. Elle a été adaptée pour la première fois au domaine du bâtiment dans les années 1960 [180].

L'analyse CCV représente une approche économique pour évaluer les coûts totaux des produits ou des projets au cours d'une période. Elle implique tous les facteurs économiques pertinents survenant au cours du cycle de vie d'un bâtiment. Elle permet également d'actualiser les coûts futurs à leur valeur actuelle. Ceci est particulièrement approprié pour les systèmes à longue durée de vie, tels que les bâtiments [181].

Les calculs CCV sont bien établis pour l'évaluation de la rénovation des bâtiments [42]. Ils font partie des directives de la Commission européenne [182,183].

Les étapes essentielles à considérer dans une analyse CCV sont illustrées dans la Figure 2.12. En premier lieu, il est nécessaire de définir l'objectif et la portée de l'étude. L'objectif défini dans l'analyse ACV peut être retenu aussi pour cette analyse. Il consistait en une évaluation des interventions effectuées dans un projet de rénovation des bâtiments. La période de calcul dans les analyses CCV peut être équivalente à la durée de vie du bâtiment après le projet de rénovation estimée de 20 à 60 ans. Une période de calcul équivalente à la durée de vie définie dans l'analyse ACV (50 ans) peut être adoptée [120].

Contrairement à l'analyse ACV, une classification du cycle de vie du berceau à la tombe est plutôt inhabituelle dans les études CCV. Ces études se concentrent principalement sur les phases du cycle de vie où se produisent des effets monétaires pertinents pour le décideur concerné. Par conséquent, elles n'incluent souvent que les phases de construction et d'exploitation [171].

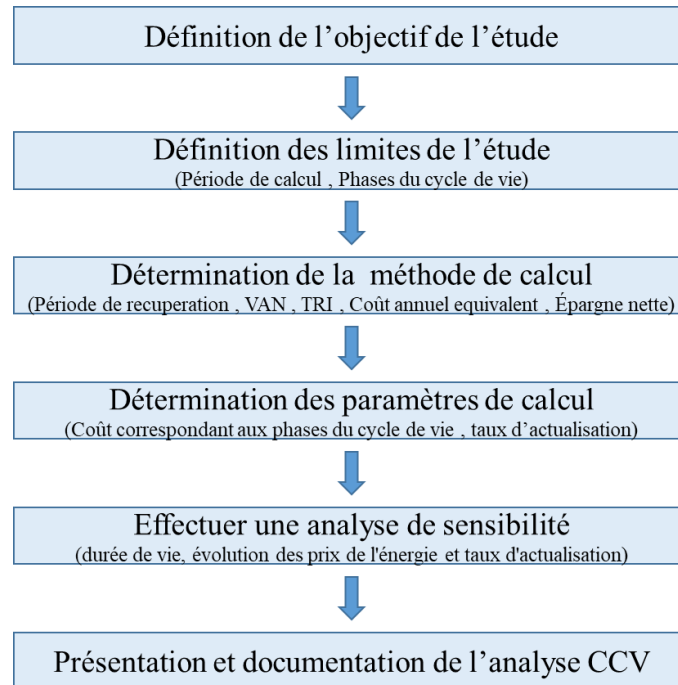


Figure 2.12 - Étapes pour effectuer une analyse du coût du cycle de vie.

La deuxième phase consiste à déterminer la méthode de calcul du coût de cycle de vie. La valeur actuelle nette est la mesure normale utilisée dans l'analyse CCV, bien que d'autres soient disponibles (période de récupération, de rendement interne) [184]. La VAN a été identifiée comme la technique la plus largement utilisée pour l'évaluation optimale des bâtiments lorsque le flux de trésorerie futur est pris en compte [171]. En effet, elle permet d'additionner les coûts répartis uniformément pendant n années. Elle est définie comme une technique permettant d'effectuer des évaluations comparatives des coûts sur une période de temps spécifiée. Elle prend en compte tous les facteurs économiques pertinents, à la fois en termes de coûts initiaux et de coûts opérationnels futurs. Le calcul de la VAN est défini dans la norme EN 15459 [185] et la norme ISO 15686-5 :2008 [184].

Des facteurs d'actualisation spécifiques sont utilisés pour actualiser les coûts futurs à l'année de départ du calcul. Le choix du taux d'actualisation a un impact significatif sur le CCV. Selon les lignes directrices données par la Commission européenne (2012), un taux d'actualisation réel plus élevé (généralement supérieur à 4%) reflétera une approche purement commerciale et à court terme de l'évaluation des investissements. Un taux inférieur (généralement compris entre 2% et 4%) reflétera plus fidèlement les avantages apportés par les investissements en efficacité énergétique aux occupants du bâtiment pendant toute la durée de vie de l'investissement [171].

La troisième phase concerne les paramètres d'entrée de l'analyse du coût du cycle de vie (Figure 2.13). Les catégories de coûts à considérer doivent être en accord avec les phases de vie analysées.

Elles peuvent inclure les coûts d'investissement, les coûts de maintenance, les coûts de remplacement, les coûts opérationnels, les coûts de réinvestissement et les coûts de fin de vie [186].

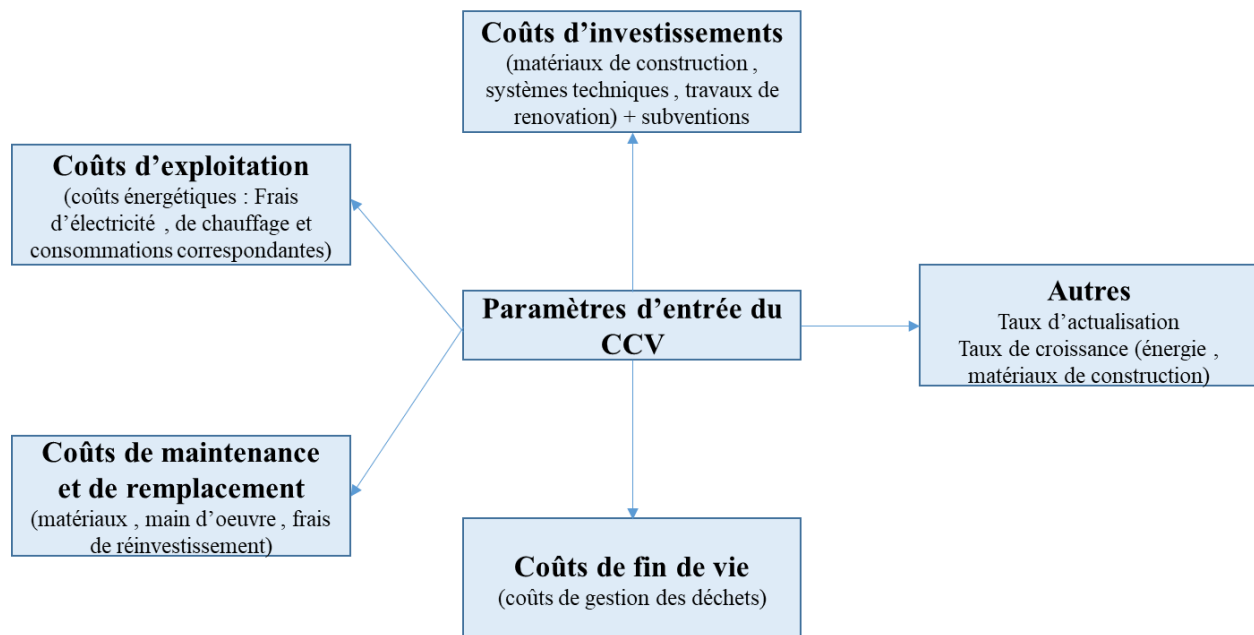


Figure 2.13 - Paramètres d'entrée du calcul du coût de cycle de vie.

La catégorie des coûts d'investissement comprend le coût des matériaux de construction, des systèmes techniques du bâtiment, et de travaux de rénovation (les coûts de main-d'œuvre, les outils, installations temporaires et contrôles de qualité, les frais des architectes). Les rénovations énergétiques des bâtiments peuvent être encouragées par l'octroi de subventions financières. Elles doivent également être incluses en tant qu'économies supplémentaires.

Le coût d'entretien et de remplacement (substitution des composants du bâtiment) comprend les coûts des matériaux de construction et les coûts de main-d'œuvre associés pour chaque mesure. Lorsque la durée de vie estimée expire, un réinvestissement peut être effectué.

Les coûts d'exploitation annuels incluent les coûts récurrents des vecteurs énergétiques. Des données concernant la consommation d'énergie, ainsi que des informations sur les variations annuelles potentielles des prix moyens et toute augmentation annuelle des coûts de chauffage urbain et d'électricité sont nécessaires afin de calculer les coûts énergétiques.

Le coût de fin de vie concerne la gestion des déchets. Il comprend le coût de la séparation des déchets, le transport vers le lieu de traitement et le traitement.

Tous les coûts futurs doivent être actualisés à l'année de départ du calcul via le taux d'actualisation réel. Le taux de croissance des prix des matériaux de construction, de l'énergie (gaz et électricité) et de la main-d'œuvre doit être pris en compte.

Les coûts des mesures de construction peuvent être extraits des normes nationales de l'industrie, des documentations de projet, des bases de données valide pour chaque contexte national et des enquêtes sur les listes de prix régionales. Les coûts de main-d'œuvre peuvent être directement tirés des statistiques d'Eurostat [187]. Les coûts annuels d'entretien des systèmes techniques du bâtiment peuvent être définis conformément à l'annexe A de l'EN 15459 : 2007, en pourcentage

de leur coût d'investissement initial. Les coûts énergétiques peuvent être estimés au moyen des prix statistiques disponibles (Statistiques d'Eurostat) [188,189] et les tendances énergétiques de l'UE. Les données de coût relatives à la phase de fin de vie peuvent être repérées des bases de données appropriées (base de données CYPE) [190] et des catalogues de prix nationaux.

Les calculs CCV pour la rénovation des bâtiments nécessitent des paramètres prévisionnels incertains (durée de vie des éléments et des produits, évolution des prix de l'énergie et taux d'actualisation) [42]. Une analyse de sensibilité peut être réalisée sur ces paramètres [45]. Sur la base de l'analyse de sensibilité, une évaluation de la précision des paramètres les plus importants peut être effectuée. Elle permettra de faciliter la mise en œuvre de l'impact de ces paramètres sur le résultat final.

Il existe plusieurs outils de calcul du CCV qui ont été développés par des sociétés immobilières ou de logement afin d'évaluer différentes mesures de rénovation [41].

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une approche pour le suivi des différentes phases des projets de rénovation, avec un intérêt pour les phases de planification et d'évaluation.

La phase de planification est axée sur la définition du cadre du projet et la documentation de l'état réel du bâtiment, des besoins des usagers et des contraintes réglementaires.

La phase d'évaluation permet de vérifier la conformité des résultats du projet de rénovation avec les objectifs définis dans la phase de planification.

L'évaluation du plan de la rénovation est assurée par la définition d'une liste d'indicateurs de performance. Les indicateurs définis et pondérés traduisent les attentes et les préférences des différents acteurs du projet. La quantification de ces indicateurs permet d'évaluer les performances du projet de rénovation.

La méthodologie présentée sera adaptée et appliquée dans les chapitres suivants à l'opération de rénovation d'un bâtiment recherche de l'Université de Lille (ESPRIT)

Chapitre 3 : Analyse de la phase de planification du projet ESPRIT

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter la phase de planification relative à l'opération de rénovation conduite sur un bâtiment de recherche sur la Cité Scientifique (Bâtiment ESPRIT).

Cette phase définit l'opération dans son ensemble. Les données de cadrage pour la caractérisation de l'activité sont fournies. La situation du bâtiment et de ses équipements est détaillée. Outre, les objectifs du projet sont identifiés en tenant compte des attentes des acteurs.

Le chapitre est organisé en 6 parties. La première présente le contexte, l'objectif et les contraintes financières cadrant l'opération de rénovation. La seconde discute de l'état du bâtiment existant et le diagnostic environnemental associé. Les besoins des usagers et de l'université sont identifiés dans la troisième et la quatrième partie, respectivement. La cinquième partie détaille les contraintes réglementaires à respecter par l'opération. La dernière partie résume des indicateurs de performances définis par les acteurs du projet.

3.2 Éléments cadrant l'activité

L'activité de rénovation des bâtiments est délimitée par de nombreux facteurs. Ceux-ci seront déterminés en se référant à la méthodologie détaillée précédemment.

L'objectif de l'opération et les contraintes de budget sont les principaux facteurs évoqués. Ces facteurs seront définis pour l'opération de rénovation du Bâtiment D dans la suite.

3.2.1 Contexte

Le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a lancé une initiative « Opération Campus » dans le but de remédier à la situation vétuste des locaux universitaires. Cette initiative permet de favoriser et de renforcer l'attractivité des universités. Elle vise le financement des actions de rénovation, de restructuration et de construction au sein d'un nombre limité de campus universitaires.

La communauté d'Universités et d'Établissements (ComUE) Lille Nord de France a bénéficié de cette opération dans le cadre du plan de relance. Elle a été sélectionnée parmi les campus ayant une forte visibilité internationale, labellisés « Campus International ».

La cité scientifique à Villeneuve d'Ascq était l'un des campus concernés par le projet « Campus Grand Lille » dans le cadre de l'opération initiée. La réalisation de trois opérations sur le site de la cité scientifique a été décidée, y compris l'opération sur le Bâtiment D. Elles étaient regroupées dans un contrat partenariat « Recherche-Cité Scientifique ». De nombreux acteurs se sont mobilisés autour de ce projet et ont contribué à la réalisation des opérations conduites (Figure 3.1).

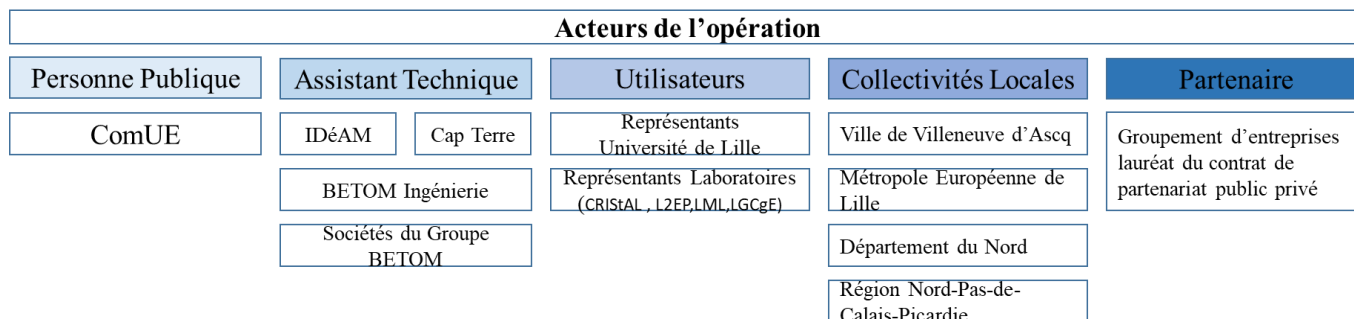


Figure 3.1 - Acteurs de l'opération.

3.2.2 Objectif de l'opération

L'opération sur le Bâtiment D vise la création d'un bâtiment de recherche accueillant des laboratoires dispersés sur plusieurs sites. Cette dispersion pourra influencer la visibilité de ces laboratoires et nuire à la synergie entre leurs équipes autour des projets actuels et futurs.

La restructuration du bâtiment existant et la construction d'une extension accolée ont été conduites dans le but de rassembler trois importants pôles de recherche (STIC-SOFT, LML et LGCgE). Chaque pôle représente un projet indépendant. Le projet STIC-SOFT consiste en un centre de compétence dans le domaine des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication. Il est caractérisé par sa qualité scientifique lui permettant de jouer un rôle majeur surtout dans les conditions de développement de la recherche autour des systèmes et des logiciels. Ce projet comporte deux laboratoires CRISTAL (Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille) et L2EP (Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance). Avant l'opération, il était réparti sur de nombreux bâtiments du campus de la cité scientifique et du parc des activités de la Haute Borne.

Le projet LML (Laboratoire Mécanique de Lille) est une Unité Mixte de Recherche travaillant sur les thématiques mécanique et génie civil. Il a pour but de regrouper les forces de recherche sur un même site permettant ainsi de remédier à certaines faiblesses avérées. Avant l'opération, le projet était réparti sur plusieurs bâtiments au sein de la cité scientifique.

Le projet LGCgE (Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement) regroupe des équipes de recherche travaillant sur des thématiques variées du génie civil (Matériaux, Interaction sol-structure). Il comporte aussi une équipe pilotant des projets importants dans le domaine de la ville intelligente. Elle dispose du campus de la cité scientifique comme démonstrateur de ville intelligente. Le laboratoire est organisé en quatre centres de recherche. Seule une partie des effectifs de ce laboratoire est transférée dans le Bâtiment D.

L'Université de Lille dans sa politique favorise la synergie entre la recherche et l'enseignement. De ce fait, la localisation des bâtiments de recherche à proximité de ceux d'enseignement est essentielle. D'autre part, l'opération concerne le rassemblement de plusieurs unités dans un bâtiment de recherche. Dans ce contexte, le Bâtiment D a été sélectionné spécifiquement pour héberger ces trois pôles de recherche. En effet, sa position au sein de la cité scientifique et à proximité des deux pôles principaux de formations de master et d'ingénierie (Polytech'Lille et École Centrale) l'a rendu adapté à cette opération.

3.2.3 Contraintes financières

Les ressources disponibles et les performances économiques requises par l'investisseur constituent un facteur déterminant pour l'exécution du projet de rénovation comme évoqué dans la méthodologie.

Le respect du coût plafond et l'optimisation du coût global est un enjeu majeur cadrant les opérations conduites sur la cité scientifique.

Le coût plafond fixe le coût final maximal couvrant l'ensemble des dépenses dévolues à la personne publique. Ces dépenses sont liées non seulement aux diagnostics (structurel, environnemental), études, travaux (Figure 3.2) et équipements, mais aussi aux provisions (pour aléas, imprévus et hausse de prix).

Ce coût plafond est estimé au préalable par l'Université de Lille sur la base d'une simulation de coût de travaux. Cette simulation se fonde sur des hypothèses de ratios : SHON/SU (Surface Hors Œuvre Nette, Surface Utile) et coûts de travaux par m² SHON pour chaque composant du bâtiment. Les candidats à leurs tours déterminent la répartition de coûts de travaux selon les composants du bâtiment (enveloppe, second œuvre, équipements techniques et spécifiques). Cette répartition sera confrontée aux estimations spécifiques du projet dans le cadre d'évaluation des offres.

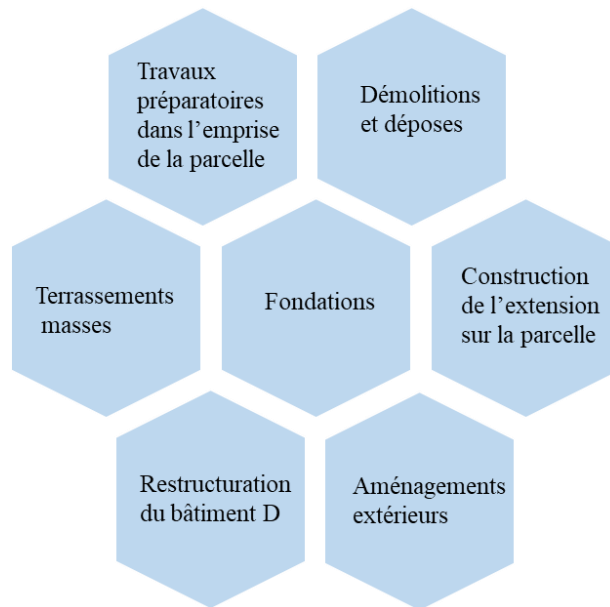


Figure 3.2 - Principaux travaux de l'opération.

D'autres exigences ont été définies dans le cadre des performances économiques requises de l'opération. Elles concernent essentiellement les coûts d'investissement et les coûts de fonctionnement du bâtiment.

Les choix concernant les principes constructifs, les matériaux et les équipements techniques doivent faire l'objet d'une étude réaliste visant l'optimisation de leurs coûts. Cette étude permettra de limiter les coûts d'investissement tout en respectant les exigences architecturaux et techniques. L'intégration des coûts de fonctionnement et de gestion des bâtiments (coûts d'exploitation, de maintenance et d'entretien) dès la phase de conception est aussi une exigence. De plus, la maîtrise de ces coûts doit être assurée. Des suivis et des analyses des consommations énergétiques seront indispensables à la réduction des coûts d'exploitation. Une optimisation de la maintenance des équipements techniques (équipes de maintenance compétentes, disponibilité des installations) est aussi une nécessité pour limiter les coûts de maintenance et d'entretien.

La prise en compte de ces exigences peut être justifiée par l'intermédiaire d'une analyse du coût global (coût du cycle de vie) conduite par le partenaire dans la phase de conception. Ce coût a été

identifié comme indicateur économique pertinent pour l'évaluation d'un projet de rénovation dans la méthodologie déjà définie. Le coût global correspond à la somme des coûts d'investissement et des coûts différés du projet. L'équilibre entre ces coûts doit être assuré par l'optimisation du coût global de l'opération.

Dans l'opération sur le Bâtiment D cet indicateur a été utilisé dans le but d'évaluer les offres des candidats et retenir la solution optimale. Il peut être également utilisé dans la phase post-rénovation afin d'identifier sa conformité avec l'analyse menée dans la phase pré-rénovation. En effet, des écarts entre les performances économiques estimées et atteintes sont soulignés dans certaines études [191,192]. Ces écarts sont engendrés principalement par les paramètres d'entrée de certains coûts estimés.

La méthode de calcul du coût global a été détaillée dans la section de la phase d'évaluation de la méthodologie. Le Tableau 3.1 présentera un résumé de ce calcul.

Tableau 3.1- L'indicateur économique de Coût global.

Indicateur	Quantification	Objectif	Limites du Calcul	Paramètres de Calcul		Méthode de Calcul
				Coûts	Autres	
Coût Global	Calcul CCV détaillé dans la méthodologie	Étudier la Faisabilité	Durée de vie	Investissement	Taux d'actualisation	VAN
		Comparer des Projets		Exploitation		TRI
		Optimiser des Projets		Maintenance et Entretien		
		Budgéter les dépenses	Phases de cycle de vie	Fin de vie	Taux de croissance	Période de récupération

3.3 Diagnostic de l'état du bâtiment

Le diagnostic de l'état du bâtiment est un autre volet important de la phase de planification identifié dans la méthodologie. Dans le cadre de l'opération sur le Bâtiment D une enquête préliminaire a été réalisée afin de déterminer ses caractéristiques. Des diagnostics ont été également effectués. Leurs objectifs sont de caractériser le bâtiment au niveau structurel, énergétique et environnemental. Des besoins à assurer par l'opération de rénovation seront donc définis sur la base de ces enquêtes et diagnostics. Ceux-ci seront développés dans ce qui suit.

3.3.1 Présentation du bâtiment existant

Le Bâtiment D fait partie de Polytech'Lille. Celui-ci était classé comme Établissement Recevant du Public (ERP) de 2ème catégorie, de type R. Il est encadré par l'École Centrale de Lille au Sud-Ouest et Polytech'Lille au Nord-Est. Ses liaisons fonctionnelles vers Polytech'Lille sont assurées par deux passerelles couvertes sur la façade Sud-Est. En outre, en tête du bâtiment (Nord-Ouest) une extension a été construite en 1999. Les principales informations concernant ce bâtiment sont illustrées dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2- Informations sur le Bâtiment D.

Information sur le Bâtiment D					
Année de construction	1969-1970				
Niveaux	5 niveaux - Rez-de-chaussée et 4 étages				
Dimensions (Longueur x Largeur)	RDC	126 m x 11.7 m			
	Étages	126 m x 12.7 m			
Surface Hors Œuvre (Nette et Brute)	RDC	1543 m ²			
	Étages	1650 m ²			
Surface Dans Œuvre	RDC	1473 m ²			
	Étages	1575 m ²			
Surface Utile Existante	RDC	R+1	R+2	R+3	R+4
	1097 m ²	1098 m ²	1102 m ²	1121 m ²	1119 m ²
Ratio SHON/SU	1.47				

Des opérations de rénovations ont été conduites sur le Bâtiment D. Durant ces opérations les huisseries extérieures ont été changées. Cependant, son état dégradé l'a rendu inadapté à l'utilisation. La dégradation de ses qualités était accompagnée par des plaintes des usagers, notamment ceux situés en façade Nord. Ils étaient gênés par les éblouissements de la façade Sud de Polytech'Lille. L'opération de restructuration sera chargée de la résolution de ce problème. Dans ce cadre, la nécessité d'un indicateur de confort visuel apparaît. Les gênes provoquées par les éblouissements peuvent être considérées comme sous-indicateur. La vérification de sa prise en compte est nécessaire afin d'informer l'indicateur. Elle peut être assurée par l'intermédiaire des enquêtes de satisfaction des usagers dans le cadre de l'évaluation du projet.

3.3.2 Diagnostic Environnemental

Le diagnostic environnemental a pour objectif de réaliser un état des lieux des paramètres environnementaux du site et d'identifier ses sensibilités. Celui-ci permet de caractériser les principaux atouts et contraintes du site et d'identifier les principaux enjeux environnementaux. Le gestionnaire du projet sera ainsi éclairé sur la nature et l'importance des contraintes écologiques pouvant être rencontrées. Il pourra également employer des moyens appropriés permettant d'améliorer les conditions du site et de minimiser les impacts négatifs du projet sur l'environnement.

Dans le cadre de l'opération sur le Bâtiment D, un diagnostic environnemental a été réalisé par Cap Terre. Ses résultats ont été intégrés dans la définition des objectifs de performance environnementale. Ce diagnostic s'est concentré sur 8 thématiques regroupant 22 points essentiels (Figure 3.3).

Le premier thème concerne le contexte réglementaire. Il traite les sujets de servitude et de réglementation.

En ce qui concerne la servitude, le site n'est soumis à aucune servitude d'utilité publique (conservation du patrimoine, utilisation de certaines ressources et équipement, défense nationale, salubrité et sécurité publique).

Quant à la réglementation, elle désigne généralement les lois de construction. Le site n'est pas limité par un coefficient d'occupation du sol (COS) fixant la surface du plancher susceptible d'être

construite sur le terrain. Cependant, les règles d’implantation du bâtiment par rapport aux autres doivent être respectées dans la construction de l’extension. Ces règles ont pour objectif principal de garantir une certaine intimité pour les constructions voisines, garantir l’ensoleillement et permettre un agencement harmonieux des constructions. Elles permettent alors l’intégration architecturale de l’extension dans son environnement.

La valorisation de transports en commun était identifiée comme un atout du site. De ce fait, la proposition des mesures visant l’incitation à l’utilisation de transports doux (marche, vélo, trottinette...) constitue un enjeu important de ce sujet.

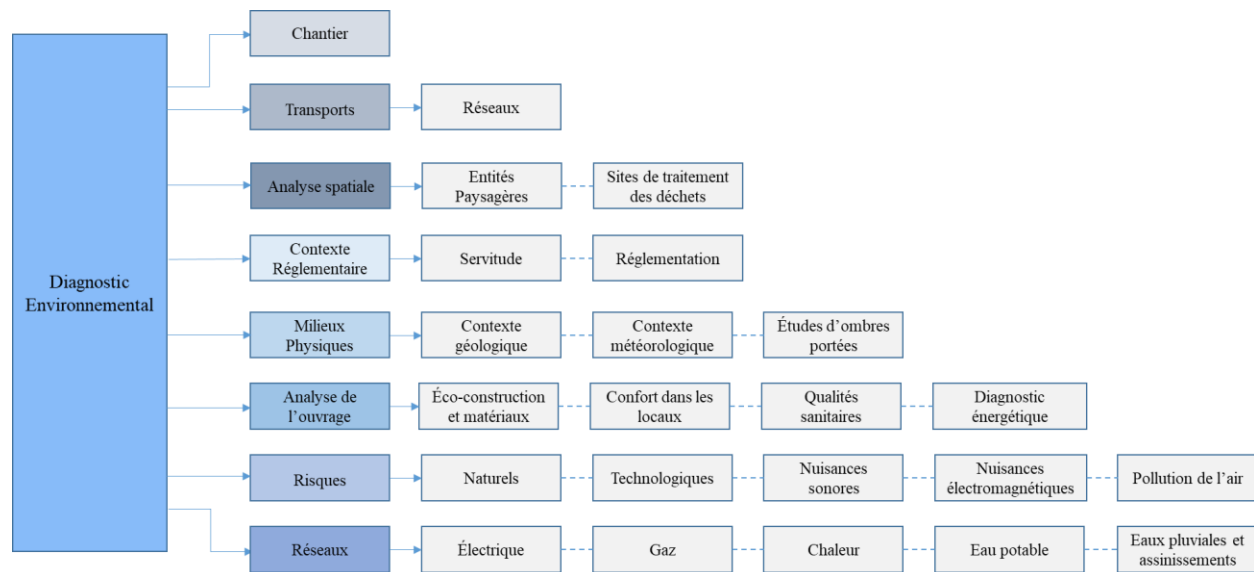


Figure 3.3 - Thématiques du diagnostic environnemental.

Le milieu physique couvrant le contexte géologique et météorologique et l’étude d’ombres portées est un autre thème relatif au diagnostic environnemental.

Les résultats géotechniques du diagnostic ont montré que la parcelle est fortement imperméabilisée. Son état constitue une contrainte importante à prendre en considération. En effet, l’imperméabilisation rend difficile l’infiltration des eaux pluviales, augmentant ainsi les risques d’inondations. Par conséquent, le choix de matériaux adaptés permettant la réduction du coefficient d’imperméabilisation est une nécessité. Outre, une étude de sol G11/G12 est recommandée. En général, une étude de sol consiste à analyser des points précis du site afin d’identifier des mises en œuvres de construction adéquates. La norme NF P 94-500 a défini différentes missions d’étude de sol. Les missions G11 et G12 font partie de la mission d’études préalables G1. La mission G11 est réalisée en phase préliminaire dans le but d’identifier les risques géologiques inhérents du site. G12 est réalisée dans la phase avant-projet afin de réduire les risques identifiés au préalable.

Concernant le contexte météorologique, une bonne exposition solaire et une forte pluviométrie caractérisent le site. Cependant, des températures moyennes faibles et une exposition modérée au vent (en fonction de l’implantation du bâtiment) ont été identifiées comme faiblesses du site. Une isolation thermique optimale est recommandée afin de réduire l’effet de basses températures. Ce sujet fait appel à un indicateur de confort thermique. L’effet de basses températures peut être considéré comme un sous-indicateur de confort thermique. Sa prise en compte dans le projet peut

être aussi vérifiée à travers un suivi des températures intérieures. Des enquêtes de satisfaction réalisées auprès des usagers peuvent être aussi nécessaires à cette fin.

Une étude d'ombres portées a été aussi conduite dans le but d'étudier l'accès du bâtiment à la lumière solaire. Elle permet d'identifier les zones fortement ombragées. Le résultat de l'étude a montré que la façade Sud est ombragée en hiver.

Une analyse spatiale a été aussi effectuée. Son résultat indique que la parcelle ne se situe pas dans une Zone Naturelle d'Intérêts Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) caractérisant les secteurs et les ensembles naturels ayant une richesse patrimoniale et écologique remarquable. Le résultat a aussi montré que la parcelle se trouve à moins d'une trentaine de kilomètres de trois sites de traitement de déchets de chantier. Les déchets de chantier seront alors à trier en fonction de la nature de déchets traités par chaque site.

Les risques auxquels la parcelle peut être soumise sont aussi analysés. Comme résultat, la parcelle ne présente aucun risque au niveau naturel. Elle se trouve hors zone de prévention des risques. Cependant, des risques d'inondation entravant l'accès à la parcelle sont possibles. Ces risques se manifestent en raison des remontées d'égouts au niveau de l'anneau Langevin. Celui-ci présente alors une zone inondable. Par conséquent, il est recommandé de favoriser l'infiltration des eaux pluviales, évitant ainsi leur rejet dans le réseau.

Au niveau des risques technologiques, la parcelle est à quelques kilomètres d'une usine classée Seveso seuil bas. Ce type d'usine peut être caractérisé par des activités liées à la manipulation, la fabrication, l'emploi ou le stockage de substances dangereuses. Toutefois, il a été indiqué qu'aucune implication n'est engendrée sur la parcelle.

D'autre part, la présence d'un relai de radio de téléphonie à proximité de la parcelle la rend soumise à des nuisances électromagnétiques. Dans ce cadre, la prise de mesures effectives est recommandée afin de minimiser ces nuisances. Ces mesures peuvent être illustrées par l'usage des peintures anti ondes et l'emploi des plantes absorbantes. Elles peuvent être illustrées également par la protection de zones particulières surtout les espaces autour des ascenseurs et des transformateurs. Ces espaces doivent être organisés d'une manière à créer des zones tampons. Des espaces à occupation passagères seront conseillés autour de ces équipements. La santé des usagers est un indicateur de performance identifié dans ce contexte. L'effet des ondes électromagnétiques sur le corps humain est un sous-indicateur. La prise en considération des recommandations peut être évaluée par un suivi des ondes électromagnétiques au sein du bâtiment ainsi que par une enquête auprès des usagers portant sur la présence des symptômes liés à ces nuisances.

Le site présente aussi un risque de pollution de l'air du fait de sa présence auprès d'une autoroute et d'une voie rapide. Une conception adaptée des équipements et des réseaux aérauliques est suggérée. Dans ce contexte, un indicateur de qualité de l'air intérieur peut être employé. Le suivi de la concentration en polluants, du taux de ventilation et du débit d'air pourront traduire la prise en compte de ce risque dans le projet. L'avis des usagers peut contribuer à une meilleure évaluation. Au niveau des nuisances sonores, la parcelle est à l'abri des zones de bruit classées. Le confort acoustique peut être un indicateur prouvant ce constat. Un suivi du bruit à l'intérieur des locaux ainsi que l'expérience des usagers peuvent informer cet indicateur.

Une analyse des réseaux de transport a été menée. Elle a montré que la parcelle est desservie par des transports en commun et des axes routiers principaux. Il est possible également de louer des vélos depuis la station se trouvant sur la cité scientifique. Malgré le nombre réduit de voies protégées pour vélo, cependant le type de voie se trouvant à l'intérieur de la cité rend ce problème peu contraignant.

Le diagnostic a aussi couvert l'étude des réseaux existants. La parcelle est raccordée à un réseau d'eau potable et ne dispose d'aucun réseau de gaz à proximité.

Concernant le réseau électrique, un transformateur HT/BT est présent dans le Bâtiment D. L'extension du bâtiment doit prendre en considération sa présence.

Un réseau de chauffage issu d'une sous-station localisée dans l'École centrale alimente aussi le Bâtiment D. Dans le cas de l'extension, le potentiel de la sous-station doit être vérifié afin d'étudier la possibilité de son raccordement au réseau existant.

Un réseau d'eaux pluviales et d'assainissement séparatif existe sur toute la commune de Villeneuve d'Ascq. Un réseau de collecte d'eau pluviale se rejette sur un collecteur. L'ensemble est penté vers une rue. Une sortie réseau d'eau usée est aussi issue du bâtiment. Il est collecté dans un autre réseau longeant le même bâtiment et penté vers la même rue. Il a été recommandé de concevoir un réseau d'assainissement séparatif sur toute la parcelle et non seulement à l'intérieur.

L'analyse de l'ouvrage est aussi ciblée par le diagnostic. Cette analyse a couvert les matériaux, le confort dans les locaux, la qualité sanitaire des espaces et le diagnostic énergétique.

Les résultats de l'analyse ont révélé l'état usé et détérioré des revêtements (sols, murs, plafonds) et la nécessité de les renouveler.

Plusieurs faiblesses ont été détectées aussi au niveau du confort visuel. L'aspect vétuste et dégradé des parois a engendré sa dégradation. La rénovation des revêtements est davantage appuyée. Le confort visuel était défini précédemment comme indicateur de performance. Son évaluation est assurée par un suivi de la luminosité à l'intérieur des locaux accompagné de la perception des usagers. D'autres faiblesses concernant l'éco-gestion illustrées par l'absence des appareils hydro-économiques ainsi que le sous-dimensionnement et le sous-équipement des locaux d'entretien sont aussi présents. L'équipement des sanitaires par des appareils hydro-économiques est alors conseillé. La consommation de l'eau est un autre indicateur de performance identifié dans ce cadre. L'effet de l'emploi des appareils hydro-économiques peut être détecté par un suivi de la consommation d'eau des sanitaires.

La qualité sanitaire des espaces était aussi limitée par des contraintes. Elles concernent principalement la présence des équipements engendrant des nuisances électromagnétiques (2 ascenseurs et 2 transformateurs). Elles concernent également les équipements sanitaires vétustes. Plusieurs recommandations ont été suggérées à ce sujet, à citer le remplacement des équipements sanitaires, la rénovation des locaux d'entretien pour faciliter le ménage et les mesures permettant la réduction des nuisances électromagnétiques.

La mauvaise efficacité thermique de l'enveloppe a été détectée par le diagnostic énergétique. Le respect des recommandations indiquées par le diagnostic permettra des économies d'énergie pouvant atteindre jusqu'à 78%. La consommation énergétique est un autre indicateur de performance identifié. Un suivi de cet indicateur ainsi que des températures intérieures pourra confirmer l'amélioration de l'efficacité thermique de l'enveloppe.

Le dernier thème traité par le diagnostic environnemental concerne les nuisances pouvant être provoquées pour les établissements situés à proximité du chantier. De ce fait, une programmation du chantier est une nécessité afin de limiter les nuisances pour le voisinage.

Les indicateurs de performance identifiés dans cette partie sont résumés dans le Tableau 3.3.

D'autre part, les consommations énergétiques peuvent être traduites en impacts environnementaux potentiels. La consommation d'énergie primaire, les émissions de gaz à effet de serre et l'acidification atmosphérique associées aux matériaux et aux consommations sont des indicateurs de performance permettant une évaluation au plan environnemental. Dans le cadre de l'opération sur le Bâtiment D, l'analyse du cycle de vie considérant ces indicateurs est

recommandée dans la phase pré-rénovation afin d'évaluer les alternatives proposées par les candidats.

Tableau 3.3 - Indicateurs de performance liés au diagnostic environnemental.

Indicateurs	Sous-indicateurs	Mesures d'amélioration	Vérification
Confort Visuel	Éblouissement de la façade sud de Polytech.	Matériaux de façades limitant le reflet de la lumière.	Mesures et suivi de la luminosité par l'intermédiaire de capteurs appropriés.
	Dégradation du confort visuel due aux parois vétustes.	Rénovation des revêtements.	Enquête de satisfaction des usagers.
Confort thermique	Basses températures moyennes caractérisant la parcelle.	Isolation thermique optimale.	Mesures et suivi des températures intérieures par l'intermédiaire de capteurs appropriés.
			Enquête de satisfaction des usagers.
Qualité de l'air intérieur	Pollution de l'air induite par l'autoroute et la voie rapide à proximité de la parcelle.	Conception adaptée des réseaux et équipements aérauliques.	Mesures et suivi de la concentration des polluants par l'intermédiaire de capteurs appropriés et de taux de renouvellement d'air.
			Enquête de satisfaction des usagers.
Confort acoustique	Nuisances sonores.		Mesures et suivi du bruit à l'intérieur des locaux par l'intermédiaire de capteurs appropriés.
			Enquête de satisfaction des usagers.
Consommation de l'énergie	Mauvaise efficacité thermique de l'enveloppe.	Recommandations du diagnostic énergétique.	Suivi des consommations énergétiques liées au chauffage à l'aide de compteurs et sous-compteurs
Consommation de l'eau	Absence d'appareils hydro-économiques.	Équiper les sanitaires par des appareils hydro-économiques.	Suivi de la consommation de l'eau des sanitaires à l'aide de compteurs et sous-compteurs

3.4 Besoins des usagers

L'identification des besoins et des considérations des usagers liés au processus de rénovation est un volet fondamental de la planification évoqué dans la méthodologie. Elle fournit des informations essentielles pour les décisions à prendre concernant l'activité de rénovation.

La prise en compte des préoccupations des usagers dans l'opération réalisée s'est manifestée par des séances de travail avec les représentants des laboratoires accueillis dans le bâtiment rénové. Les représentants de chaque pôle ont projeté le mode de fonctionnement de leurs laboratoires durant ces discussions. La répartition de l'espace de chaque entité (Tableau 3.4), l'implantation de ses locaux, leurs caractéristiques fonctionnelles et organisationnelles (Figure 3.4) ont été définies à la lumière des réunions.

Tableau 3.4 - Répartition des espaces de chaque entité.

Désignation des espaces	Pôle
Accueil	STIC-SOFT , LML ,LGCgE
Administration	
Enseignants-Chercheurs	
Plateformes Technologiques	STIC-SOFT
Techniques et Logistiques	
Plateformes Techniques	LGCgE
Pool réunion	Espaces communs aux trois pôles
Salle de démonstration	
Logistique	
Locaux de réunion	Espaces communs (LML,LGCgE)
Locaux techniques	
Abri-vélos	Espaces extérieurs
Station co-voiturage	
Places stationnement de recharge de véhicules électriques	

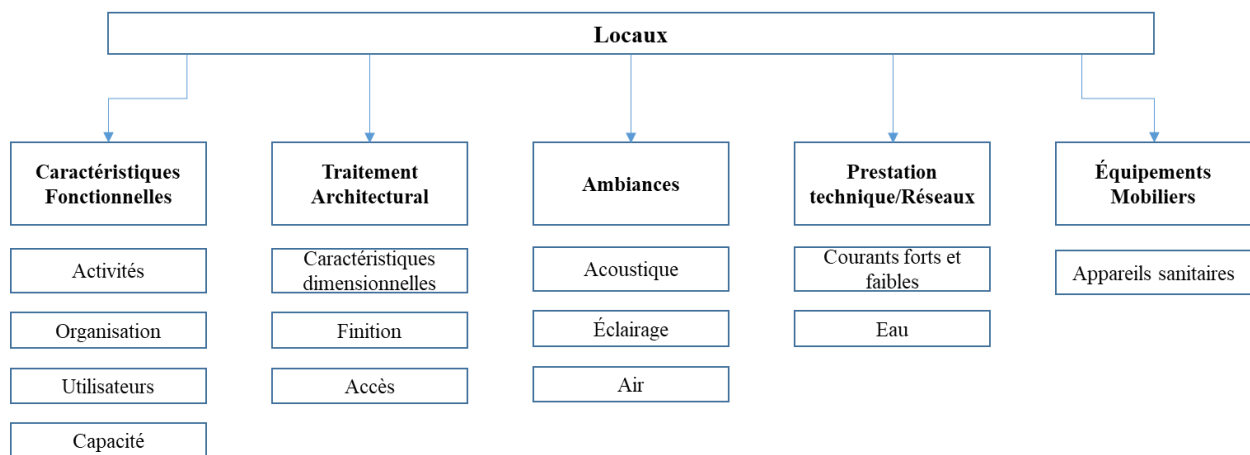


Figure 3.4 - Caractéristiques fonctionnelles et organisationnelles des locaux.

Les espaces identifiés sont soumis à des exigences en terme d'organisation, d'équipements et d'ambiance.

Les espaces d'accueil doivent être facilement accessibles. Pour cette fin, l'emploi des signalétiques permettant l'orientation des personnes à l'intérieur du bâtiment est demandé. Ces espaces doivent être organisés afin de contribuer à l'attractivité et à l'image des activités des laboratoires.

Chaque poste de travail doit être doté de mobiliers (bureaux, chaises, rangement), d'un téléphone, d'un ordinateur et de connexions électriques, informatiques et téléphoniques. Les locaux doivent bénéficier aussi d'un réseau sans fil.

Une attention particulière doit être accordée à l'aménagement des locaux. La conception doit assurer leur fonctionnalité. Ils doivent être de forme simple et sans poteau interne. L'aménagement des plateaux de bureaux est aussi essentiel. Ceux-ci doivent être flexibles afin de permettre une réorganisation ou un cloisonnement en fonction des besoins (ajout, suppression de cloisons).

La maîtrise des ambiances sonores, visuelles, thermiques et olfactives dans les locaux est aussi fondamentale afin de garantir un confort optimal et une qualité de travail agréable. L'ensemble des locaux recevant des postes de travail doit bénéficier de la lumière naturelle. En plus, les utilisateurs du rez-de-chaussée veulent voir l'extérieur sans être vus. Ceci leur permet de bénéficier de la lumière naturelle ainsi que d'une vue sur l'extérieur tout en étant en sécurité et caché des personnes et activités extérieures. Le traitement acoustique des espaces pouvant générer des nuisances sonores pour les locaux avoisinants (espaces de photocopie, ateliers de maintenance des équipements) est aussi une nécessité. Le confort acoustique doit être privilégié également dans les bureaux accueillant plusieurs personnes pour favoriser le travail en autonomie et une confidentialité des espaces.

La conception d'un bâtiment convivial est un enjeu majeur de l'opération tant pour la personne publique que pour les usagers. Cette notion peut être traduite par la création des espaces communs au sein du même laboratoire ainsi que pour l'ensemble de laboratoires. Dans ce contexte, des salles d'animations d'activités scientifiques ont été prévues. Ces salles doivent être organisées de manière à offrir un large espace ouvert réunissant cafétéria, espaces de détente et de lecture. La conception, l'aménagement et le mobilier doivent créer une ambiance agréable à l'accueil de dizaines de personnes (rencontres, échanges et travail formel). Des espaces équipés d'une fontaine à eau et de fauteuils doivent être aussi prévus dans les circulations principales. Ils participent à la convivialité du bâtiment en offrant un espace d'échanges entre les personnels.

La prise en considération des besoins définis doit être vérifiée. Elle fait appel à une série d'indicateurs de performance permettant d'évaluer la perception des usagers de l'ambiance de travail. Le confort thermique, visuel et acoustique ainsi que la qualité de l'air intérieur sont des indicateurs objectifs définis précédemment. La satisfaction des usagers est un critère subjectif pouvant traiter les indicateurs objectifs du point de vue des usagers ainsi que d'autres sujets liés à l'environnement de travail. Un résumé des indicateurs identifiés dans cette partie est présenté dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 - Indicateurs de performance liés à la satisfaction des usagers.

Indicateurs	Sous-indicateurs	Quantification
Confort thermique	Perception de la température et de l'humidité	Enquête auprès des usagers
	Contrôle de la température	
Confort acoustique	Perception de l'ambiance sonore	
Confort visuel	Perception de la qualité d'éclairage	
Qualité de l'air	Perception de la qualité de l'air	
Satisfaction des usagers	Existence de facteurs gênants (circulation de l'air, odeur désagréable, poussière...)	
	Perception de l'environnement de travail et de l'opération en général (conception, espaces, ambiance, ameublement, matériel disponible, confidentialité, autonomie, réception des informations adéquates sur l'opération).	
Accessibilité des personnes handicapées	Accès libre aux lieux, services et activités.	

Sécurité	Perception de la sécurité en général (personnels de sécurité , surveillance , accès sécurisés)	
Convivialité	Communication entre les usagers	
	Lieux favorables aux rencontres et échanges (internes et externes)	
	Organisation des activités et des événements communs aux laboratoires	

3.5 Besoins de la personne publique

La personne publique ne s'est pas limitée à la définition des objectifs économiques de l'opération. Elle a défini en plus des intérêts pour la performance environnementale et technique.

Des objectifs de performance ont été définis sur la base du diagnostic environnemental conduit et des attentes de la personne publique. Ces objectifs couvrent plusieurs thématiques environnementales classées en deux niveaux de priorité selon les intérêts de l'université (Figure 3.5). Dans la suite, chacun des thèmes sera détaillé en fonction de besoins et de mesures à considérer afin de satisfaire à ces besoins.

Les besoins définis par la personne publique tiennent compte de ceux définis par les usagers en terme de confort, de qualité d'air, d'accessibilité et d'ambiance. Des indicateurs ont été déjà définis à ces sujets. Ces indicateurs peuvent être évalués quantitativement (mesures et suivi) et qualitativement par l'intermédiaire d'enquêtes auprès des usagers.

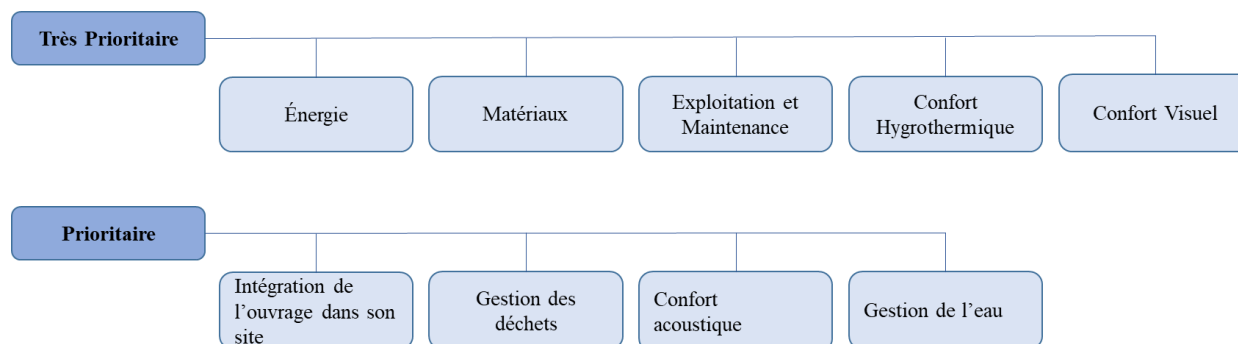


Figure 3.5 - Thématiques environnementales considérées.

Le premier thème considéré comme étant très prioritaire est lié à l'énergie. La personne publique vise la réduction des consommations énergétiques et la limitation des impacts environnementaux liées à celles-ci (épuisement des ressources naturelles, émissions des gaz à effet de serre). Une bonne conception architecturale, une amélioration de la qualité de l'enveloppe, un choix des systèmes performants ainsi qu'une intégration de l'énergie renouvelable sont des solutions adaptées à l'objectif (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 - Besoins en terme d'énergie.

Objectifs	Sujet	Mesures
	Réduire la consommation d'énergie primaire .	Respect de la réglementation thermique.

Réduire la consommation d'énergie	Réduire le recours à l'éclairage artificiel.	Emploi de systèmes performants. Emploi de détecteurs de présence. Favorisation de l'autonomie en éclairage naturel.
	Privilégier la récupération d'énergie dans les équipements énergétiques.	Rechercher des solutions innovantes (Récupération liée à la marche piétonne dans les halls et corridors).
	Sensibiliser les usagers.	Former les usagers sur les gestes éco-citoyen.
		Informers les usagers sur les consommations des ressources du bâtiment.
limiter l'impact environnemental lié à la consommation	Privilégier la sobriété énergétique.	Fixer un taux de couverture des besoins en énergie assuré par le recours aux énergies renouvelables.
	Réduire les émissions des polluants en terme de CO ₂ , SO ₂ et déchets.	Choisir des systèmes énergétiques efficaces.
	Quantifier les émissions des gaz à effet de serre.	Évaluer les masses de CO ₂ en phase chantier.
		Étudier des scénarios permettant leurs réductions.
	Compenser la destruction des espèces végétales.	
Réduire les consommations énergétiques en phase chantier .	Suivi des consommations mensuelles (compteurs , sous-compteurs). Dispositions pour les limiter.	

Le second thème très prioritaire considéré concerne les matériaux. Il a pour objectif de définir les critères de choix des matériaux et des produits. La durabilité et l'adaptabilité à l'usage, l'entretien et les impacts environnementaux et sanitaires sont les critères principaux à prendre en compte dans le choix des matériaux (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 - Besoins en terme de matériaux.

Critères	Mesures
Durabilité et adaptabilité de l'usage	Choix des matériaux offrant peu de prise à l'usure, résistants aux agressions.
	Adéquation du choix et de la durée de vie en fonction de l'usage.
Réduction de l'impact sanitaire	Choix des revêtements intérieurs en fonction du critère sanitaire d'émission de composés organiques volatiles (COV) , formaldéhyde et composés cancérigènes.
	Choix de peintures et vernis intérieurs respectant les teneurs en COV définies dans les directives européennes.
	Choix de matériaux en contact avec l'air intérieur de catégorie A ⁺ .
	Proposition de matériaux contribuant à l'amélioration de la qualité de l'air.

Réduction des impacts environnementaux	Choix de matériaux labellisés.
	Choix des isolants naturels.
	Choix des produits à base de matières premières naturelles.
Facilité de l'entretien	Faciliter l'accès aux éléments de bâtiments.
	Choix de matériaux faciles à entretenir.

Le troisième thème très prioritaire traité est lié à l'exploitation et la maintenance. Ce thème doit être pris en considération dès la phase de conception afin de garantir la pérennité et la performance des équipements. Dans ce contexte, plusieurs critères sont à tenir en compte notamment la facilité d'accès aux équipements, l'optimisation des besoins en maintenance, les moyens de suivi permettant le maintien des performances et le faible impact de procédés de maintenance environnemental et sanitaire. Plusieurs sujets liés à ce thème sont discutés (Tableau 3.8).

Tableau 3.8 - Besoins en terme d'exploitation et de maintenance.

Sujets	Mesures
Assurer une exploitation et une maintenance optimisée	Suivi des consommations d'énergie et d'eau (dispositifs de comptage et de sous-comptage).
	Dispositifs de détection des défauts (anomalie de fonctionnement, fuite d'eau).
	Moyens de gestion et de contrôle de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel.
	Supervision globale assurée par la GTB (programmation de différentes installations , suivi et contrôle de performance).
Optimisation de la conception pour une maintenance simplifiée	Faciliter les interventions de maintenance et d'entretien lors de la construction.
	Prévision des locaux d'entretien bien dimensionnés et positionnés dans le bâtiment.
	Réaliser des formations pour la conduite des équipements.
Suivi et contrôle des systèmes et des conditions de confort pendant l'exploitation de l'ouvrage	Suivi et pilotage de température et des temps de fonctionnement.
	Contrôle et pilotage des débits d'air neuf.
	Contrôle et gestion de l'éclairage artificiel.

Le confort hygrothermique est aussi un thème très prioritaire défini par la personne publique. Ce thème traite des sujets permettant d'assurer le confort tant en été qu'en hiver. Les solutions passives et la maîtrise de la régulation des équipements seront nécessaires à cette fin (Tableau 3.9).

Tableau 3.9 – Besoins en terme de confort hygrothermique.

Sujets	Mesures
Dispositions architecturales visant à optimiser le confort	Orientation des locaux en fonction de leur usage et des conditions d'ensoleillement de la parcelle et l'orientation des vents.
	Dimensionnement et performances adéquats de vitrage.
	Privilégier la ventilation naturelle.

hygrothermique en hiver et en été.	Mise en place d'un système de ventilation spécifique par type d'espace (insuffisance de ventilation naturelle).
	Optimisation de la vitesse d'air.
Garantir le confort en hiver	Respecter les températures de consignes adaptées à chaque type de local en fonction de son activité et de son occupation.
	Mise en place de dispositifs adaptés de redémarrage , programmation et régulation des installations de chauffage.

Le dernier thème traité comme étant très prioritaire concerne le confort visuel. Plusieurs facteurs sont responsables d'assurer un confort visuel de qualité (Tableau 3.10).

Tableau 3.10 - Besoins en terme de confort visuel.

Sujets	Mesures
Optimiser l'apport de lumière naturelle	Assurer l'accès à la lumière du jour et aux vues de l'extérieur.
	Respecter le niveau d'éclairage naturel (Facteur de réflexion de lumière du plafond , des parois latérales et des sols).
Éclairage artificiel confortable	Assurer une bonne uniformité de l'éclairage.
	Respecter le taux d'éblouissement.
	Respecter l'indice de rendu de couleurs.

Concernant les thèmes traités comme prioritaires, l'intégration de l'ouvrage dans son site est considérée. Ce thème a pour objectif de prendre en compte des enjeux environnementaux dans l'implantation du projet (Tableau 3.11).

Tableau 3.11 - Besoins en terme d'intégration de l'ouvrage dans son site.

Sujets	Mesures
Intégration du bâtiment dans son contexte	Assurer des connexions avec les autres secteurs du campus universitaire.
	Rénovation de la structure des chemins couverts entre les bâtiments.
	Aménagement des espaces extérieurs afin de créer des lieux conviviaux.
Accessibilité et fonctionnalité	Favoriser le recours aux transports les moins polluants.
	Faciliter l'accès aux piétons et aux circulations douces.
	Assurer des installations dédiées à la recharge des véhicules électriques ou hybrides.
	Aménagements des emplacements vélos abrités et sécurisés à proximité des entrées du bâtiment.
	Assurer une station de co-voiturage.
	Assurer un accès sécurisé aux arrêts de transports communs.
Accessibilité des personnes à mobilité réduite :	-Accès adaptés par des cheminements praticables définis et continus -Passages de dénivelés et des stationnements respectant les normes en vigueur.

Implantation bioclimatique	Prise en compte du rapport aux vents.
	Prise en compte des précipitations et du soleil.
Biodiversité	Maintenir un cadre végétalisé.
	Disposition pour préserver les écosystèmes variés favorables à la création d'habitats pour la petite faune.
Terrassement	Bilan neutre remblai-déblai.
Réduction des nuisances engendrées par le chantier	Limiter les nuisances engendrées par le chantier.
	Limiter les pollutions du sol , de l'eau et de l'air générées par le chantier.
	Limiter les consommations en ressources.
	Organiser le travail sur site (utiliser des moyens moins bruyants , entretien et nettoyage du site , stationnement de compagnons en zone de chantier).

La gestion de déchets est aussi un thème prioritaire. Il concerne l'optimisation de la valorisation des déchets d'activité de l'établissement et la gestion des déchets de qualité (Tableau 3.12).

Tableau 3.12 – Besoins en terme de gestion des déchets.

Sujets	Mesures
Gestion des déchets d'activité	Adapter les équipements de tri et de stockage de déchets à leurs quantités et natures.
	Favoriser la valorisation de déchets.
	Faciliter le tri de déchets à la source.
Gestion des déchets de chantier	Valoriser 70% des déchets de chantier.
	La totalité des déchets doivent faire l'objet d'un bordereau de suivi.

Le confort acoustique fait aussi partie des thématiques prioritaires. Il vise à garantir une qualité acoustique adaptée à chaque local (Tableau 3.13).

Tableau 3.13 - Sujets liés au thème confort acoustique.

Sujets	Mesures
Exigences environnementales générales	Répartir les locaux en fonction de leurs sensibilités aux bruits ou aux nuisances acoustiques qu'ils génèrent en tenant compte des nuisances extérieurs.
Création d'une ambiance acoustique adaptée aux différents locaux	Respect de la réglementation relative aux bâtiments d'enseignement concernant les grandeurs acoustiques assurant la protection contre les bruits aériens et solides.

La gestion de l'eau est le dernier thème prioritaire traité. Il a pour but de réduire la consommation d'eau potable, une bonne gestion des eaux de pluies et l'assainissement des eaux pluviales (Tableau 3.14).

Tableau 3.14 - Sujets liés au thème gestion de l'eau.

Sujets	Mesures
Réduction de la consommation d'eau potable	Respect du seuil de consommations conventionnelles sanitaires (Valeur de référence = 5640 l/Jour).
	Suivi des consommations réelles.
	Emploi des équipements hydro-économiques.
Gestion des eaux pluviales	Privilégier l'infiltration et la circulation maîtrisée des eaux de surface.
	Préconiser des dispositifs de rétention des eaux.
	Réutilisation des eaux pluviales.
Réduction de la consommation d'eau sur chantier	Assurer le suivi des consommations d'eau.
	Dispositifs permettant leurs réductions.

3.6 Contexte réglementaire

Le contexte réglementaire est le dernier volet de la phase de planification défini dans la méthodologie. Il consiste à repérer les réglementations, les normes et chartes cadrant l'activité de rénovation.

Les réglementations en vigueur sont à respecter dans la construction et la restructuration du Bâtiment D.

Au niveau de la réglementation urbaine, le site de la cité scientifique est soumis au plan local d'urbanisme (PLU) de la Métropole Européenne de Lille. Le PLU est un document définissant les grandes orientations d'aménagement d'un territoire et d'utilisation des sols ainsi que les règles en matière de construction (délimitations avec le voisinage, hauteurs de construction, accès au terrain, raccordement aux réseaux, l'aspect architectural général ...). Le PLU ne s'oppose pas à la réalisation de l'opération sur le Bâtiment D. Cependant, le partenaire doit se conformer à ses exigences.

L'opération est également soumise à la réglementation thermique. Les parties neuves sont concernées par la RT2012 alors que les parties existantes et restructurées sont concernées par la RT Existant Globale. Elles ont été déjà définies dans la méthodologie. Ces réglementations déterminent les performances énergétiques à atteindre dans l'opération sur le Bâtiment D en terme de consommation d'énergie primaire, de perméabilité à l'air et de ventilation. Les hypothèses de calcul pour l'isolation et le chauffage doivent satisfaire aussi ces réglementations.

La réglementation accessibilité handicap doit être aussi respectée dans le cadre de l'opération sur le Bâtiment D. Elle permet la définition de dispositions minimales de conception garantissant le confort et la sécurité de tous les handicaps dans leur accès au bâtiment et aux espaces extérieurs (dispositions relatives aux cheminements extérieurs, stationnements automobiles, circulations intérieures, escaliers et ascenseurs, revêtements des sols, murs et plafonds, portes, équipements, sanitaires, sorties et à l'éclairage).

L'opération doit tenir compte aussi de la réglementation sécurité incendie. Elle est considérée comme une référence pour garantir la sécurité des biens et des personnes dans l'établissement. Des principes de conception seront à considérer dans le but de limiter les risques d'incendie, d'informer

les usagers lors d'un incident, d'assurer une évacuation organisée de l'établissement et de faciliter les interventions des services de secours.

La réglementation sanitaire définit des exigences en matière de ventilation et de critères liés aux émissions des matériaux de polluants devant être respectées aussi.

Des seuils de bruit et des exigences techniques applicables aux établissements d'enseignement sont fixés par la réglementation relative aux bâtiments d'enseignement (isolement acoustique standardisé pondéré, niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé, niveau de pression acoustique normalisé, durée de réverbération, aire d'absorption équivalente de revêtements absorbés...). La définition des objectifs acoustiques de l'opération sur le Bâtiment D doit être en conformité avec les seuils définis par cette réglementation.

Outre les réglementations, les normes françaises encadrent des critères liés aux équipements et matériaux (ventilation, menuiseries, câblages ...). Les travaux dans le cadre de l'opération sur le Bâtiment D doivent également prendre en considération les exigences définies dans ces normes (Tableau 3.15).

Tableau 3.15 - Les normes à respecter par certains éléments.

Éléments		Normes
Ventilation naturelle : Débits d'air		NF EN 15251 :2007
Ventilation mécanique : Filtres		NF EN 13779
Éclairage	Facteur d'uniformité	NF EN 12464-1
	Taux d'éblouissement	
	Rendu de couleurs	
Peintures intérieures		COV 2010
Alarme intrusion		NFA 2P
Sonorisation		NFS 31047
Panneaux de contreplaqué		NF EN 1084
Panneaux de fibres et de particules		NF EN 13986 - NF EN 120

Dans le cadre de la loi dite « Grenelle 1 » les établissements d'enseignement supérieur doivent élaborer un « Plan Vert » favorable au développement durable. L'université de Lille a répondu à cette demande. Elle s'est engagée dans une démarche garantissant la prise en compte des défis du « Plan Vert » et des principes de développement durable dans les différents domaines d'actions. Dans ce contexte, une charte de développement durable s'est élaborée.

Dans sa stratégie de développement durable, l'université de Lille s'est fixé 21 objectifs et des moyens contribuant à leurs réalisations. Ces objectifs couvrent 7 sujets (Figure 3.6). L'opération sur le Bâtiment D devra aussi respecter ces exigences de développement durable.

Dans le cadre de son implication et de son ambition sur la transformation du campus à un pôle d'innovation, le projet PACTE (Penser, Agir, Construire pour la Transition Écologique) a été défini. Il a pour but de combiner les contributions au développement durable (politique patrimoniale, de formation et de recherche). Plusieurs sujets sont traités dans ce projet. Le premier concerne le projet SunRise répondant par ses activités au développement durable. Son objectif consiste à rendre le campus universitaire un démonstrateur de ville intelligente. Ce projet permet une optimisation et une fiabilisation de la production et de la distribution de l'énergie en intégrant la technologie intelligente (capteurs, actionneurs).

Un autre sujet traité dans le projet PACTE concerne la sobriété énergétique. L'université vise la disposition de bâtiments à énergie positive à l'horizon de 2050 en favorisant la rénovation durable de bâtiments. Outre les performances énergétiques, elle s'intéresse aussi à la qualité de l'air intérieur dans le cadre du projet APOLLINE (Air Pollution in Indoor Environments). Dans le cadre de ce projet, un suivi de la qualité de l'air intérieur et des consommations énergétiques est assuré par l'intermédiaire de capteurs installés dans plusieurs bâtiments. La concentration de polluants dans l'air peut être prise en considération dans le choix des techniques constructives et du mobilier. La mobilité innovante et neutre à l'horizon de 2050 est un autre objectif visé par l'université de Lille. Dans le cadre du projet CUMIN (Campus Universitaire à Mobilité Innovante et Neutre en Carbone) les transports propres seront à privilégier.

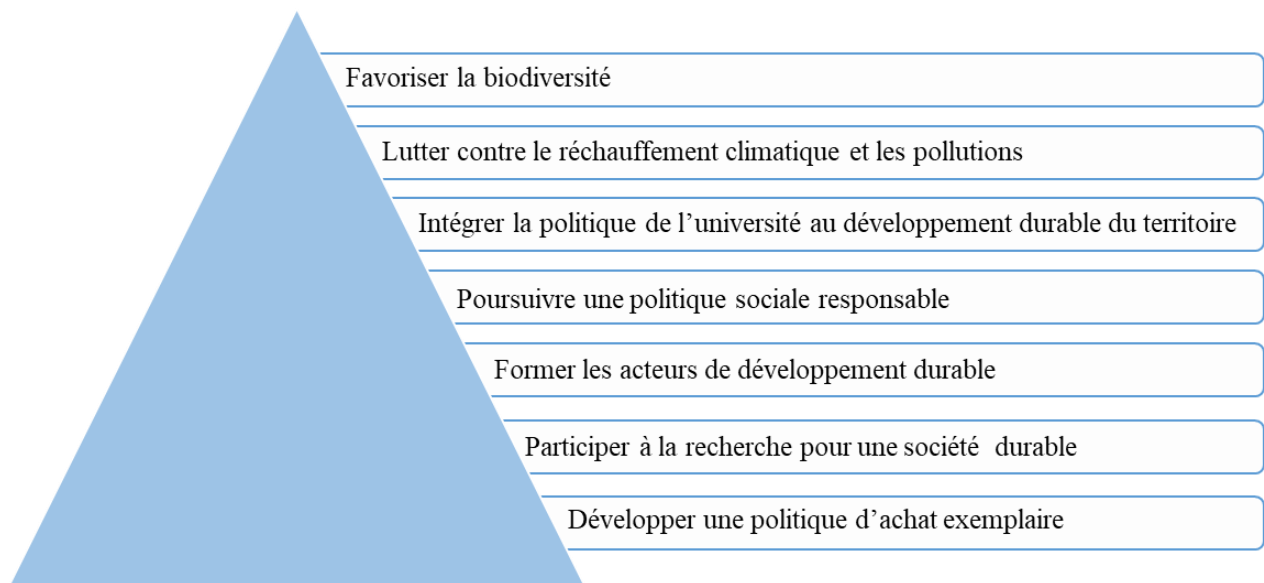


Figure 3.6 - Objectifs définis dans la stratégie de développement durable de l'université.

Une qualité améliorée de l'environnement de travail est aussi étudiée dans le projet PACTE. Elle concerne l'amélioration de la biodiversité en reliant les espaces naturels par des corridors écologiques et en réduisant les perturbations affectant le déplacement des espèces animales. Elle vise également la préservation de l'eau en favorisant les moyens de récupération des eaux. L'amélioration de la convivialité et la solidarité est aussi un objectif important de l'université. La création de jardins collectifs et des espaces de rencontre permettra un développement des interactions sociales.

La préparation des usagers à la transition écologique et à la création d'une société durable est un autre sujet traité dans le projet PACTE. Des formations au développement durable seront nécessaires à cette fin.

L'opération sur le Bâtiment D doit respecter aussi les sujets traités dans le projet PACTE aussi que les objectifs définis par les trois projets universitaires (SunRise, APOLLINE et CUMIN).

Une charte chantier est aussi développée par l'université définissant des règles à respecter dans le but de réduire les impacts environnementaux.

3.7 Indicateurs de performance

Des indicateurs de performance ont été identifiés en se référant aux besoins de la personne publique et des usagers ainsi qu'au diagnostic environnemental. Ces indicateurs reflètent les objectifs de l'opération sur le Bâtiment D. Ils fournissent des moyens d'évaluation du progrès vers ces objectifs pour des améliorations ultérieures.

Les indicateurs sont en conformité avec le principe de durabilité. Ils couvrent les catégories environnementales, économiques et sociales. Un résumé de ces indicateurs, de leurs désignations et de leurs moyens de quantification est illustré dans le Tableau 3.16. Ils seront quantifiés ultérieurement permettant ainsi une évaluation de la réalisation des objectifs définis sur la base des attentes de la personne publique et des usagers.

Tableau 3.16 - Résumé des indicateurs de performance.

Catégorie	Indicateurs	Désignation	Quantification		Évaluation Pré / Post-rénovation
Environnementale	Consommation d'énergie du bâtiment		Suivi de la consommation de l'énergie par l'intermédiaire de compteurs et sous-compteurs		Post
	Consommation de l'eau du bâtiment		Suivi de la consommation de l'eau par l'intermédiaire de compteurs et sous-compteurs		Post
	Consommation d'énergie primaire (MJ)	Quantité d'énergies consommée par l'ensemble des activités de l'opération.	Analyse de Cycle de Vie définie dans la méthodologie Quantification à partir de l'inventaire des bilans matières et consommations d'énergie tout au long du cycle de vie	Fonction des quantités d'intrants et leurs facteurs d'impact	Pré
	Potentiel de Réchauffement Global (PRG kg-CO ₂)	Quantité de gaz à effet de serre émis par l'ensemble des activités de l'opération ayant un impact potentiel sur le changement climatique		Fonction des émissions de gaz à effet de serre et du PRG associé à chacun (CO ₂ ,CH ₄ ,N ₂ O)	Pré
	Acidification atmosphérique (Kg-SO ₂)	Quantité équivalente de dioxyde de soufre émis par l'ensemble des activités de l'opération ayant des impacts nocifs sur les sols, la faune et la flore		Fonction des émissions de contaminants acidifiants et du Potentiel d'acidification associé (SO ₂ ,NO _x ,NH _x)	Pré
Économique	Coût Plafond	Coût final de dépenses dévolues à la personne publique	Simulation de coûts de travaux	Fonction des ratios : SHON/SU coûts de travaux par m ² SHON	Pré
	Coût Global	Coût prenant en compte les coûts d'investissement, d'exploitation, de	Coût du Cycle de Vie définie dans la méthodologie	Fonction des coûts cités, de la durée de vie, du taux	Pré

		maintenance et de fin de vie associés à l'opération		d'actualisation et de croissance	
Sociale	Confort thermique	Sentiment de bien-être vis-à-vis d'un environnement thermique	Température intérieure	Mesures et Suivi par l'intermédiaire de capteurs appropriés	Post
			Humidité relative intérieure		
	Confort visuel	Réaction subjective à la quantité et à la qualité de la lumière dans un espace donné.	Luminosité	Mesures et Suivi (capteur approprié)	Post
			Avis des usagers (éblouissement , vues vers l'extérieur)	Enquête auprès des usagers	
	Confort acoustique	Sentiment de bien-être vis-à-vis d'un environnement acoustique (transport, équipements, activité, bruit de voisinage)	Niveau de bruit	Mesures et Suivi (capteur approprié)	Post
			Avis des usagers (nuisances sonores, écho , confidentialité acoustique)	Enquête auprès des usagers	
	Qualité de l'air	Pureté de l'air à l'intérieur du bâtiment déterminé par le niveau de poussière, de particules en suspension et de polluants présents	Concentration en CO ₂	Mesures et Suivi (capteur approprié)	Post
			Avis des usagers (odeurs , poussière)	Enquête auprès des usagers	
Accessibilité des personnes	Garantir l'accès libre à tous les lieux , activités et services aux personnes y compris les personnes à mobilité réduite , malvoyantes et malentendantes	Avis des usagers (Stationnement véhicules, accès au bâtiment, circulation à l'intérieur, sanitaires, locaux de réunions ...)	Enquête auprès des usagers	Post	
		Diagnostic permettant de dresser l'état d'accessibilité dès l'entrée et jusqu'à la sortie d'une personne	Auto-diagnostic, Contrôleur technique		
Sécurité des usagers	Sécurité contre les intrusions et le vandalisme	Avis des usagers sur (la présence de personnels de sécurité , accidents vécus , temps de réponse en cas d'incident , sécurité d'accès au bâtiment et locaux)	Enquête auprès des usagers	Post	
Confort Spatial	Perception des usagers de l'environnement du	Avis des usagers sur	Enquête auprès des usagers		

		travail et de l'opération en général	(la conception , la qualité architecturale, l'ambiance , les espaces , l'ameublement , la confidentialité , l'autonomie , les perturbations,)		Post
	Convivialité	Création d'une ambiance favorable aux échanges entre les personnes et les groupes	Communication entre les usagers , Lieux favorables aux rencontres, Organisation des activités et des événements communs aux laboratoires	Enquête auprès des usagers	Post

3.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'application de la première phase de la méthodologie présentée au 2nd chapitre à la phase de planification de la rénovation d'un bâtiment recherche (ESPRIT) de l'Université de Lille. Cette opération de rénovation a été réalisée dans le cadre du projet ' ' Campus Grand Lille'. Elle avait pour but de regrouper des laboratoires dispersés sur plusieurs sites dans le même bâtiment. L'Université de Lille en tant que maître d'ouvrage a fixé les ressources du projet.

Le diagnostic du bâtiment a révélé un état dégradé. Le diagnostic environnemental a défini des contraintes liées à l'environnement intérieur du bâtiment et ses consommations énergétiques.

Les besoins des usagers se sont concentrés sur l'ambiance dans le bâtiment, l'aménagement et l'équipement des espaces. Le maître d'ouvrage a fixé les priorités du projet en termes d'énergie, de matériaux, de maintenance, de confort, de gestion de déchets et de l'eau.

Des indicateurs de performance ont été fixés pour chaque volet de la phase de planification. Ces indicateurs ont été présentés en précisant leurs définitions et quantification. Ils serviront à l'évaluation du projet en phase d'exploitation. Cet aspect sera discuté dans les chapitres suivants.

Chapitre 4 : Analyse du confort et des consommations du bâtiment ESPRIT

4.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'analyser le confort et les consommations du bâtiment de recherche qui a fait l'objet du projet de rénovation (ESPRIT). Ces indicateurs ont été déterminés dans le chapitre précédent.

Le chapitre est organisé en deux parties. La première se concentre sur l'analyse du confort intérieure sur la base d'une instrumentation des locaux du LGCgE qui se trouvent au 4^{ème} étage du bâtiment. Les données collectées ont été analysées pour évaluer le niveau de confort intérieur.

La deuxième partie concerne l'analyse des consommations du bâtiment, qui couvrent les consommations d'eau, d'énergie de chauffage et d'énergie électrique. Les données des consommations ont été collectées par l'intermédiaire des compteurs intelligents installés dans le bâtiment. Cette partie présente également la production d'énergie solaire. Le bilan énergétique relative au bâtiment ainsi que ses émissions de gaz à effet de serre sera discuté.

4.2 Analyse du confort dans le bâtiment ESPRIT

Dans cette partie on s'est concentré sur l'évaluation des conditions de confort dans le bâtiment. Cette évaluation a pour but de vérifier la prise en compte des exigences définies dans la phase de planification en terme de confort hygrothermique et de qualité de l'air.

Les bureaux du laboratoire LGCgE du bâtiment ESPRIT ont fait l'objet de cette analyse. Un système d'instrumentation innovant a été employé à cette fin.

L'analyse couvre les deux périodes de l'année : chauffée et non chauffée. Pour chaque période, une analyse du comportement thermique des bureaux est conduite. De plus, les facteurs affectant le comportement thermique des bureaux sont identifiés. Les paramètres de confort (Humidité et Température) sont également évalués. L'étude de la qualité de l'air dans certains bureaux a été aussi réalisée pendant la période non chauffée.

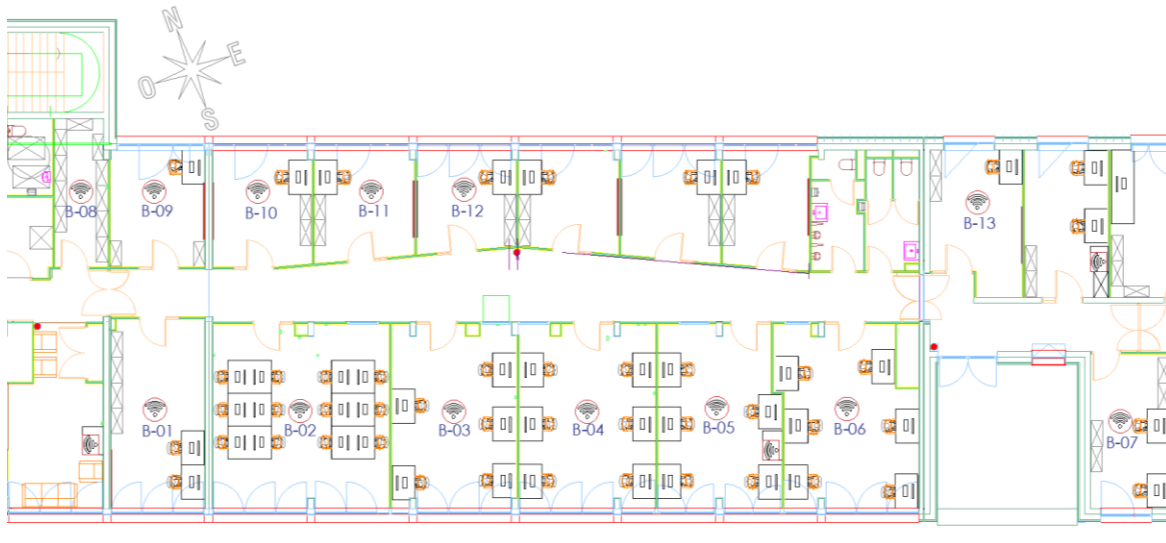
4.2.1 Présentation du Laboratoire LGCgE

Dans cette étude, on s'est focalisé sur les locaux du laboratoire LGCgE, occupant près de la moitié du quatrième étage du bâtiment ESPRIT. Il est constitué d'une trentaine de bureaux répartis sur les deux façades sud et nord du bâtiment et ayant différents usages.

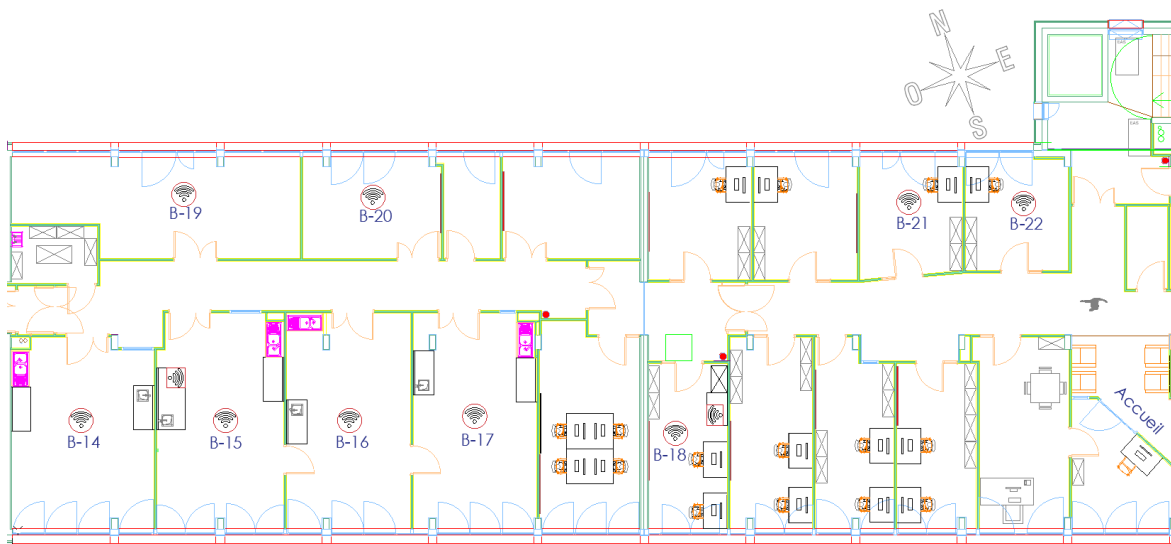
On distingue des bureaux occupés par des personnels et des doctorants, des bureaux à usage collectif tels que la salle de réunion et la salle à manger et des bureaux inoccupés tels que la salle d'archive et les salles d'essais.

L'étude thermique s'est concentrée sur 22 bureaux respectant les deux critères de diversité d'usage et d'orientation mentionnés. Elle vise à établir une image claire couvrant tant que possible la diversité des zones détectées du laboratoire et aboutissant à une conception générale de son environnement intérieur.

La Figure 4.1 présente l'emplacement des bureaux considérés (B-01 à B-22). Leur usage est résumé dans la Figure 4.2.



(a)



(b)

Figure 4.1-Les bureaux considérés dans cette recherche (a) Branche 1 et (b) Branche 2.

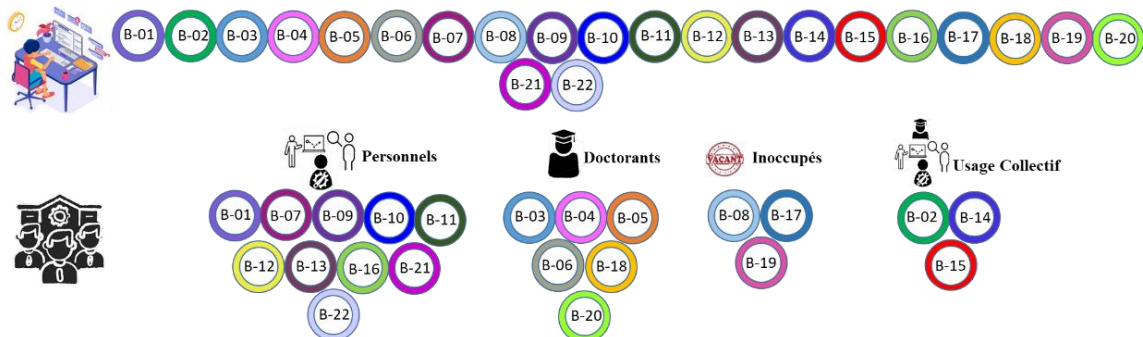


Figure 4.2-La répartition des bureaux considérés dans cette recherche selon leur occupation.

4.2.2 Instrumentation

Les locaux du LGCgE ont été équipés d'un système de capteurs sans fils pour assurer la surveillance des paramètres intérieurs. Ce système a été développé au laboratoire avec l'objectif de surveiller facilement les paramètres de confort intérieur à l'aide d'une installation facile et peu coûteuse.

4.2.2.1 Suivi des conditions de confort hygrothermique

La Figure 4.3 montre l'architecture du système, qui a été développé dans le cadre du LGCgE [193]. Il est constitué d'une unité centrale, des capteurs et d'une interface utilisateur. Les capteurs sont chargés de mesurer et d'enregistrer les paramètres cibles et de les transmettre à l'unité centrale. Cette dernière assure le stockage et le traitement des données et leur mise à la disposition des utilisateurs via une interface web.

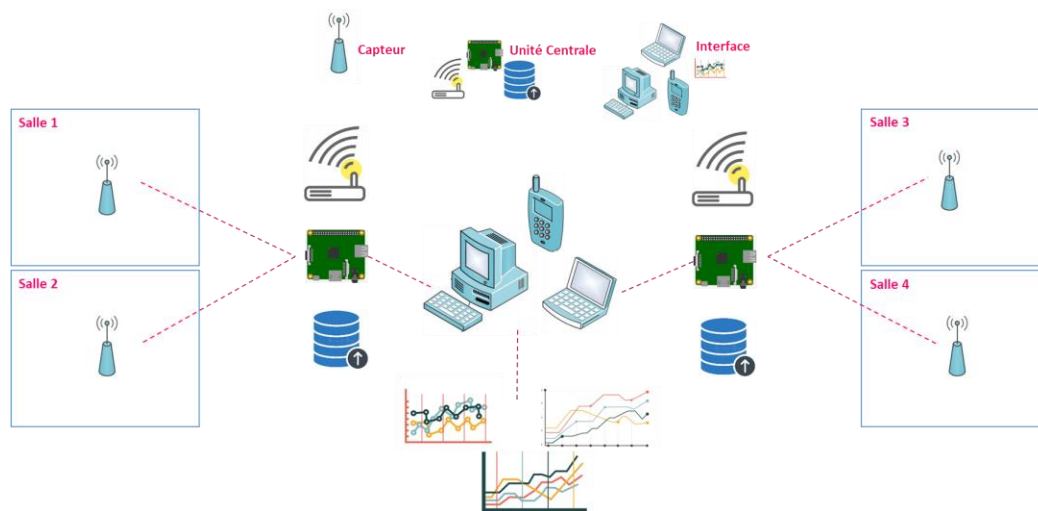
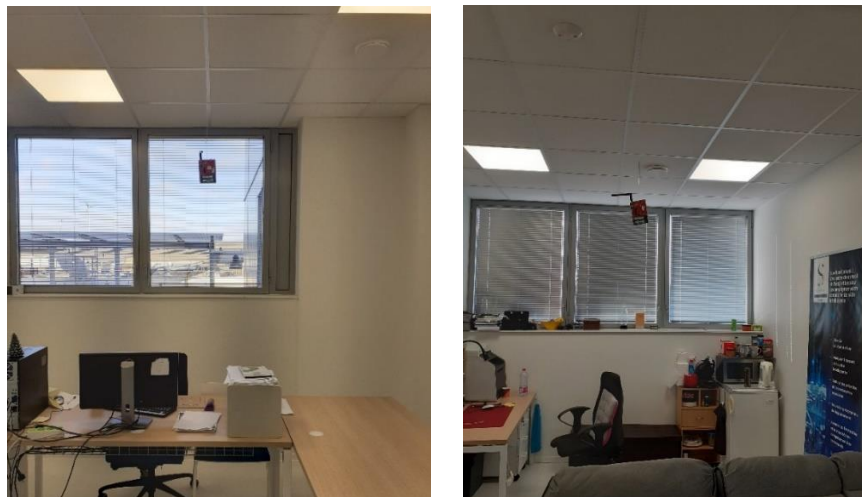


Figure 4.3-Architecture du système de surveillance.

Le nombre de capteurs et leurs positions ont été déterminés d'après l'expérience acquise dans le laboratoire. En s'appuyant sur cette expérience, chaque bureau a été équipé des capteurs rassemblés sur une seule carte. Ils sont suspendus au plafond au centre du bureau à travers un fil à une hauteur de 1.8 m au-dessus du sol (Figure 4.4).



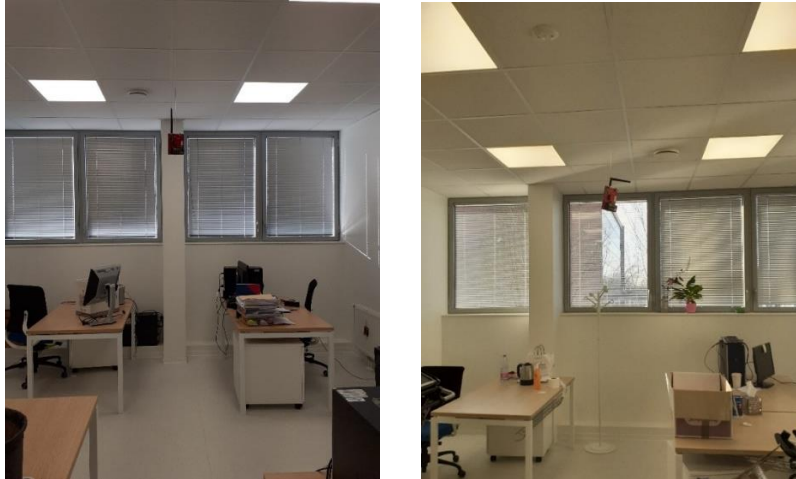


Figure 4.4-Exemples d'installation des capteurs dans les bureaux du LGCgE.

4.2.2.2 Suivi de la qualité de l'air intérieur

La qualité de l'air a été suivie en considérant la concentration de CO₂. De ce fait, on a installé des capteurs "Netatmo", mesurant la concentration de CO₂, la température, l'humidité relative et le bruit. Quatre bureaux (B-01, B-04, B-05 et B-06) ont été équipés par ces capteurs (Figure 4.5). Ceux-ci offrent la possibilité d'un suivi en temps réel des enregistrements grâce à une application Mobile "Home coach". Elle permet un affichage périodique des données, une description de l'environnement et une représentation sous forme de graphe (Figure 4.6). Outre, à travers cette application l'utilisateur sera notifié lorsque l'une des valeurs mesurées dépassent un seuil défini.



Figure 4.5- Schéma de Fonctionnement du capteur "Netatmo".

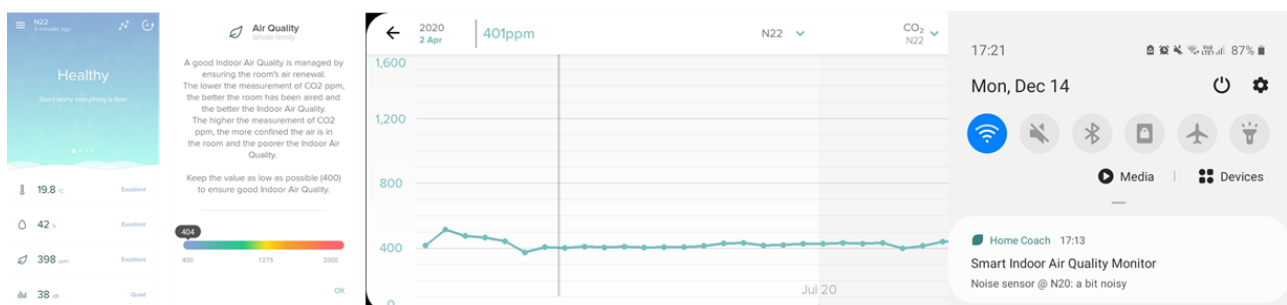


Figure 4.6- Illustration de l'application Home Coach - "Netatmo".

Ces capteurs mesurent la concentration de CO₂ à l'aide d'un procédé optique : La station est embarquée avec une ampoule et un récepteur infrarouge. La lumière est émise par l'ampoule et partiellement absorbée par le CO₂ contenu dans l'air ambiant. Plus le niveau de CO₂ est élevé, plus la lumière est absorbée. Le récepteur infrarouge mesure alors la quantité de lumière reçue et de là il en déduit le niveau de CO₂. Cette méthode fonctionne quelle que soit la lumière ambiante.

Les capteurs permettent une mesure des concentrations dans l'intervalle [400,5000] ppm. Ils donnent aussi des indications sur les valeurs tolérables. Par exemple, dans une pièce correctement ventilée, le niveau de CO₂ doit rester inférieur à 1000 ppm pour un confort optimal. Le dépassement de cette valeur indique que l'air intérieur n'a pas été renouvelé depuis longtemps.

4.2.3 Analyse de la période chauffée

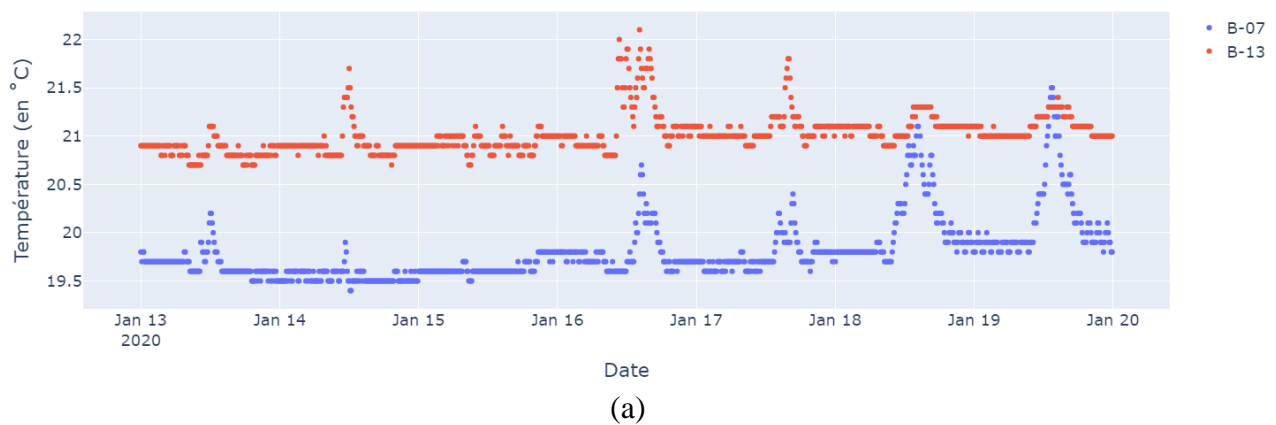
Dans cette partie, on s'intéresse à évaluer les conditions de confort hygrothermique dans les bureaux du laboratoire. Les mesures de paramètres hygrothermiques ont été enregistrées à un intervalle de temps défini de 10 minutes pendant le mois de Janvier 2020.

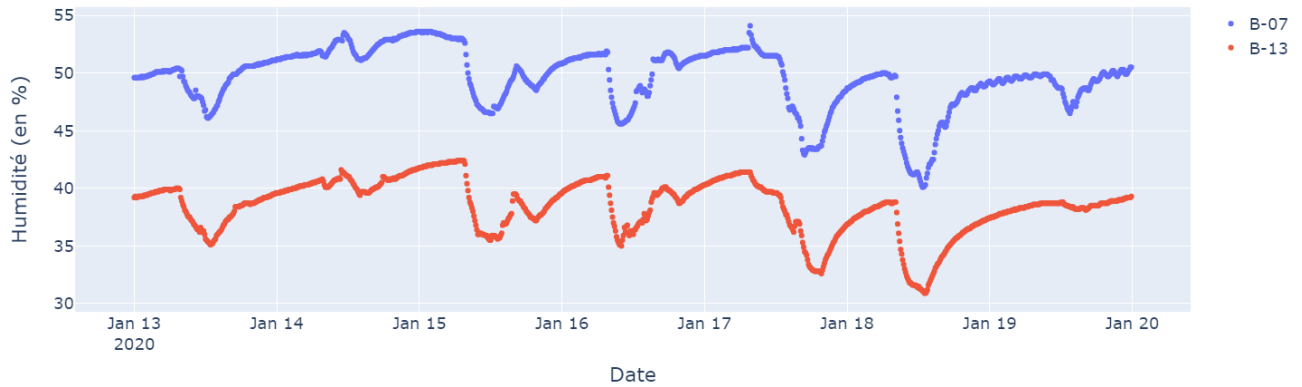
4.2.3.1 Analyse détaillée de bureaux

21 bureaux équipés de capteurs ont été considérés dans l'analyse thermique de la période chauffée. Une analyse hebdomadaire du comportement thermique de deux bureaux (B-07 et B-13) a été conduite afin d'avoir une idée générale sur leurs tendances thermiques. Ces bureaux présentent une différence dans leur orientation et une similarité dans leur occupation. Le bureau B-07 se situe du côté sud du bâtiment et le bureau B-13 du côté nord. Les deux sont occupés par des personnels (le bureau B-07 est dans la plupart des temps inoccupé).

La Figure 4.7 présente la variation de la température et de l'humidité relative des bureaux sur la semaine de (13 Janvier). On note des allures similaires des courbes des bureaux avec des valeurs différentes. Le fonctionnement du système de chauffage peut être à l'origine de cette différence.

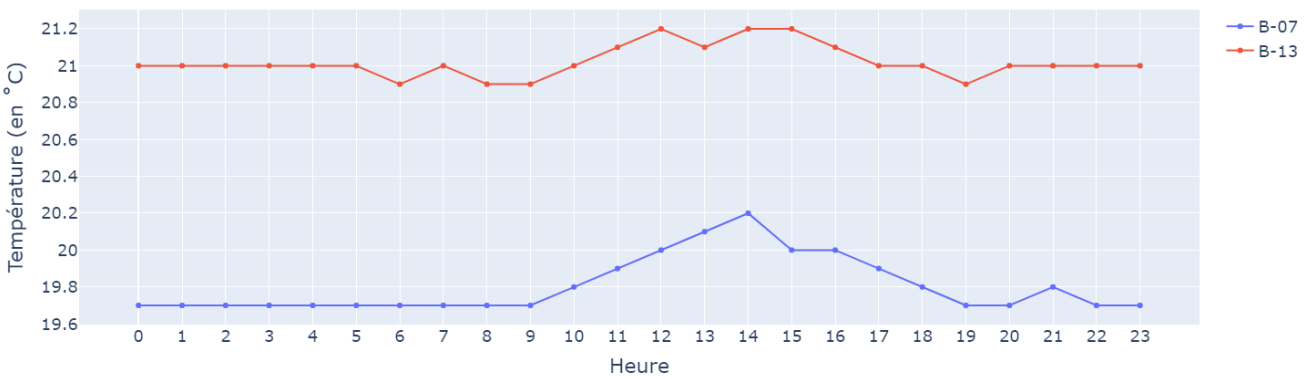
La Figure 4.8 montre clairement la différence entre ces valeurs. Elle confirme la similarité des variations des paramètres (T°, HR) avec un faible taux d'évolution durant le jour. D'une manière générale, la courbe de température est caractérisée par deux phases de stabilité : pendant les premières heures du jour (0:00-9:00) et le soir (19:00-23:00). L'humidité est stable sur la période (0:00-7:00). Elle décroît légèrement entre 8h et 9h et puis se stabilise jusqu'à 14h où elle subit une légère croissance sur le reste du jour.



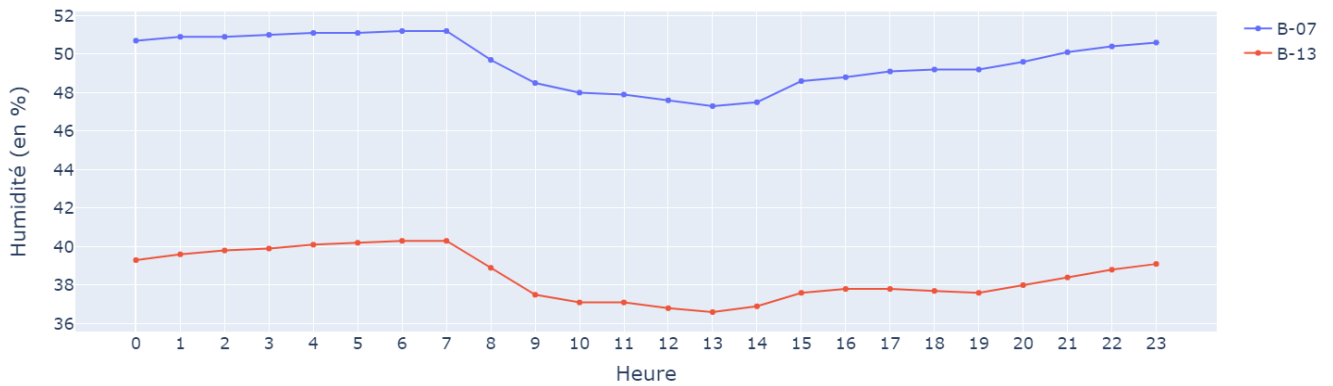


(b)

Figure 4.7- Variation de (a) Température et (b) d’Humidité sur une semaine de la période chauffée.



(a)



(b)

Figure 4.8- Variation de (a) La Température et de (b) L’Humidité moyennes horaires durant la période chauffée.

La Figure 4.9 illustre les répartitions journalières de la température et de l’humidité par l’intermédiaire des diagrammes en violon. Elle confirme la similarité de variations des paramètres en montrant une distribution journalière de température et d’humidité comparable dans les deux bureaux (avec des valeurs plus importantes de température dans le bureau B-13 et d’humidité dans le bureau B-07). D’autre part, le comportement hygrothermique de chacun des bureaux ne présente

pas de similarité à l'échelle journalière : chaque jour de la semaine est caractérisé par une répartition spécifique des paramètres (T°, HR).

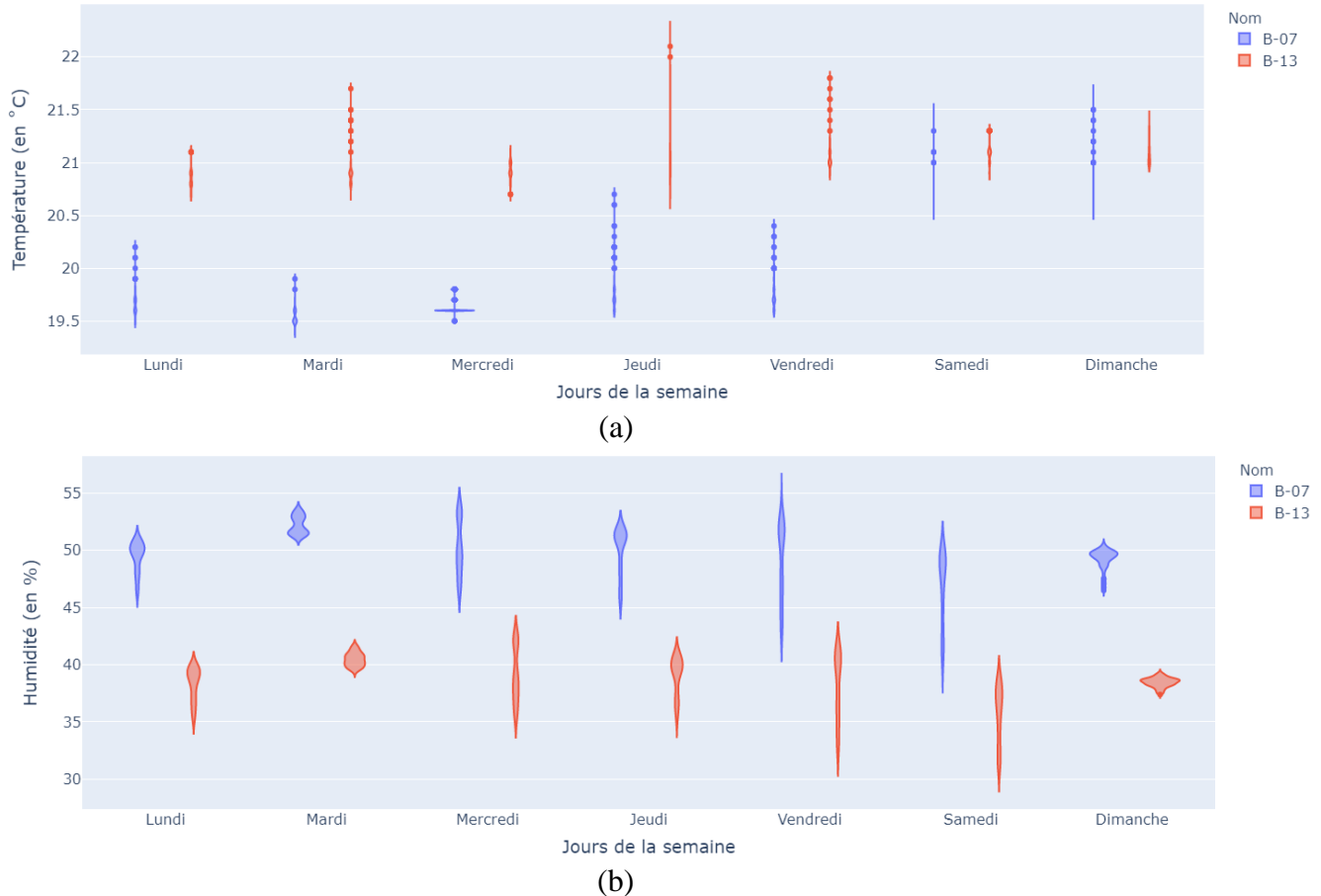


Figure 4.9- Diagramme en violon de (a) La Température et (b) L'humidité des bureaux durant la période chauffée.

4.2.3.2 Analyse statistique

Cette analyse s'est concentrée sur la distribution de la température et de l'humidité relative résumée par les indicateurs empiriques de tendance centrale (moyenne) et de dispersion (écart type). La répartition et la fréquence des variables sont identifiées aussi à partir de diagrammes en violon.

Les valeurs moyennes de la température et de l'humidité relative des bureaux sont illustrées dans la Figure 4.10.

La température moyenne des bureaux se situe dans l'intervalle [19 - 22] °C. Le bureau B-17 présente la moyenne la moins importante, autour de 19 °C. Les bureaux (B-02, B-07, B-09, B-10, B-14, B-15, B-16, B-19 et B-20) ont une température moyenne d'environ 20 °C. Les bureaux (B-01, B-03 à B-06, B-11 à B-13, B-21 et B-22) sont caractérisés par une moyenne de 21 °C, alors que le bureau B-18 présente la moyenne la plus élevée de 22 °C.

Pour l'humidité, la valeur moyenne varie légèrement entre les bureaux. Elle est autour de 40% dans les bureaux (B-01 à B-06, B-09, B-13, B-18 et B-19 à B-22) et autour de 50% dans les autres bureaux (B-07, B-10, B-11, B-12 et B-14 à B-17).

Les bureaux ont été classés en 4 groupes selon les valeurs moyennes des paramètres : G1 (B-01, B-03, B-04, B-05, B-06, B-13, B-21 et B-22), G2 (B-11 et B-12), G3 (B-02, B-09, B-19 et B-20) et G4 (B-07, B-10 et B-14 à B-16).

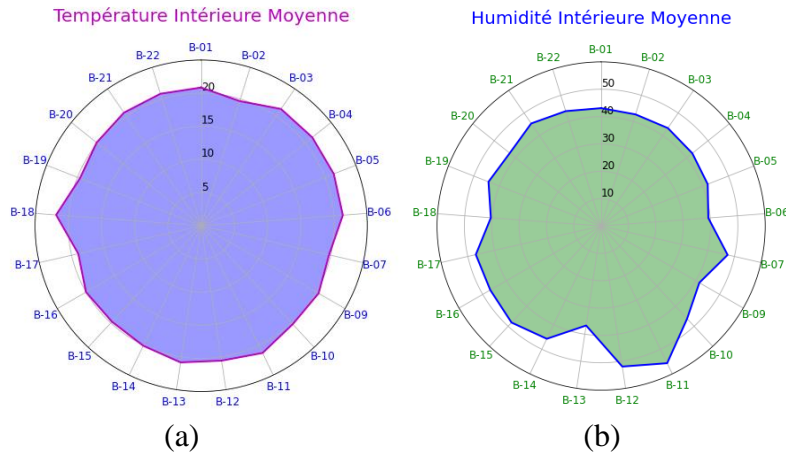


Figure 4.10- (a) La Température moyenne et (b) L’Humidité relative moyenne des bureaux pour la période chauffée.

Les écarts type de la température et de l’humidité relative sont illustrés dans la Figure 4.11. L’écart type de la température présente des variations dans l’intervalle $[0.3, 1.8]$ °C et celui de l’humidité relative varie dans l’intervalle $[3.5, 7.5]$ %.

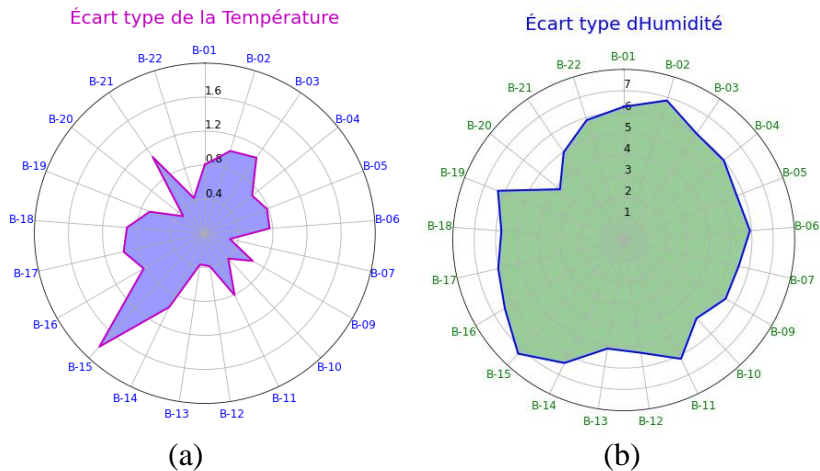
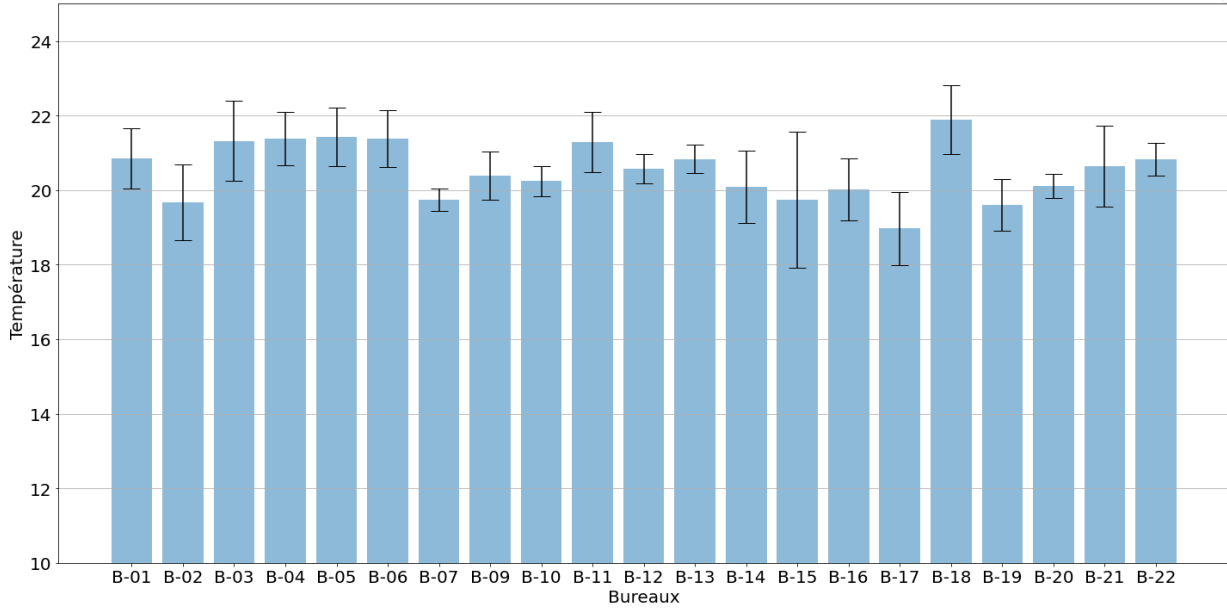


Figure 4.11- L’écart type de (a) La Température et (b) L’Humidité relative des bureaux durant la période chauffée.

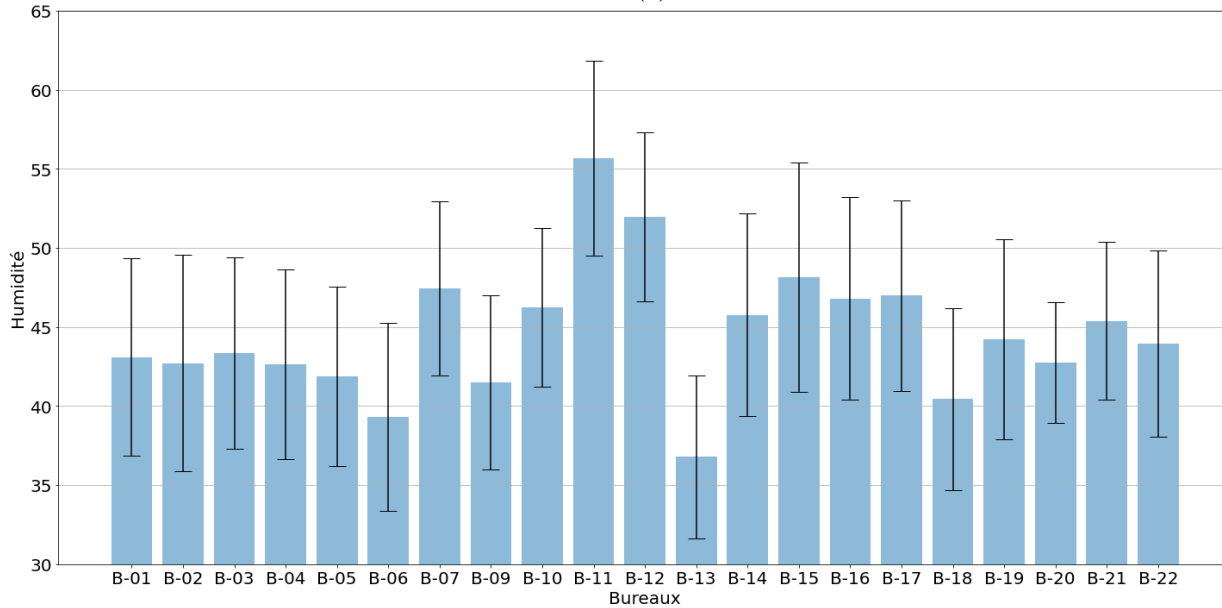
Dans le but d’établir une explication fiable à partir de l’écart type, on a représenté graphiquement les valeurs de la moyenne et de l’écart type de chacune des variables (T° , HR) dans les bureaux considérés (Figure 4.12).

Malgré que les bureaux (B-02, B-07, B-09, B-10, B-14, B-15, B-16, B-19 et B-20) ont des valeurs similaires de températures moyennes, ils présentent des valeurs d’écart type variables. Les bureaux (B-07, B-10, et B-20) ont des écarts types de même ordre de grandeur, de même pour (B-02, B-09, B-14, B-16 et B-19). Cependant, le bureau B-15 présente la distribution de température la moins serrée autour de la valeur centrale en raison de sa valeur d’écart type la plus importante

($\cong 1.8$ °C). Les bureaux (B-01, B-03 à B-06, B-11 à B-13, B-21 et B-22) présentent des différences dans leurs valeurs d'écart type. (B-01, B-03 à B-06, B-11 et B-21) ont des valeurs plus importantes que celles des bureaux (B-12, B-13 et B-22) ayant une distribution de température plus concentrée autour de la moyenne.



(a)



(b)

Figure 4.12- Barre d'erreur de (a) La Température et de (b) L'Humidité relative des bureaux durant la période chauffée.

En ce qui concerne l'humidité, on remarque que l'écart type est approximativement du même ordre de grandeur pour tous les bureaux, mais ceux-ci diffèrent par leurs valeurs moyennes d'humidité. Donc les valeurs d'humidité dans chacun de ces groupes de bureaux (B-01 à B-05, B-09, B-19, B-

20 et B-22), (B-07, B-10 et B-14 à B-17), (B-06, B-13 et B-18) et (B-11 et B-12) ont des distributions comparables autour de leurs valeurs moyennes.

Si on considère la similarité dans les caractéristiques des deux variables (moyenne et écart type) on peut identifier 5 groupes de bureaux (Tableau 4.1).

Tableau 4.1- Caractéristiques des bureaux similaires en terme de moyenne et d'écart type.

Groupe	Bureau	Moyenne		Écart type	
		Température	Humidité	Température	Humidité
G1	B-01	20.8	43.1	0.8	6.3
	B-03	21.3	43.3	1.1	6.1
	B-04	21.3	42.7	0.7	6
	B-05	21.4	41.9	0.8	5.7
	B-06	21.3	39.5	0.8	5.9
G2	B-02	19.6	42.7	1	6.8
	B-09	20.3	41.5	0.7	5.5
	B-19	19.6	44.2	0.7	6.3
G3	B-07	19.7	47.5	0.3	5.5
	B-10	20.2	46.5	0.4	5
G4	B-13	20.8	36.7	0.4	5.1
	B-22	20.8	43	0.4	5.8
G5	B-14	20.1	45.7	1	6.3
	B-16	20	46.8	0.8	6.4

Les Figures 4.13 et 4.14 illustrent respectivement la distribution de la température et de l'humidité à l'aide des diagrammes en violon.

En terme de répartition, chacun des bureaux est caractérisé par une forme de distribution de température intérieure. Cependant, certains présentent approximativement la même forme de distribution d'humidité relative. Considérons la température intérieure, tous les bureaux à l'exception de (B-01, B-09, B-11, B-17 et B-21) présentent une distribution unimodale de leurs valeurs. La température donc se concentre autour d'une seule valeur avec une plage de température différente d'un bureau à l'autre. Les bureaux (B-01, B-17 et B-21) présentent une distribution bimodale de température alors que la température dans les bureaux (B-09 et B-11) a une distribution plurimodale. En ce qui concerne l'humidité, la majorité des bureaux présente une distribution plurimodale sauf les bureaux (B-07, B-13, B-18 et B-20) caractérisés par une distribution bimodale.

En terme de densité de probabilité, parmi les bureaux présentant une distribution unimodale de température, les bureaux (B-02 et B-07) ont la valeur la plus fréquente de 19 °C, (B-10, B-12, B-14, B-15, B-16, B-19 et B-20) sont caractérisés par la valeur la plus fréquente de température de 20°C, alors que le reste des bureaux (B-03, B-04, B-05, B-06, B-13, B-18 et B-22) présente la probabilité d'observation la plus élevée pour la valeur de 21°C. Pour les bureaux ayant une distribution bimodale (B-01, B-17 et B-21) chacun est caractérisé par une paire de mode différente, respectivement (20,21), (20,22) et (18.5,19.5) °C. De même, les valeurs des quatre modes (19,20,21 et 22) °C sont identiques pour les bureaux (B-09 et B-11).

En considérant l'humidité, tous les bureaux caractérisés par une distribution bimodale ont (40,50) % comme valeurs respectives des deux modes sauf le bureau B-07 caractérisé par les valeurs

(50,60) %. Quant à la distribution plurimodale, les bureaux peuvent être divisés en plusieurs groupes illustrés dans le Tableau 4.2 selon leurs valeurs modales.

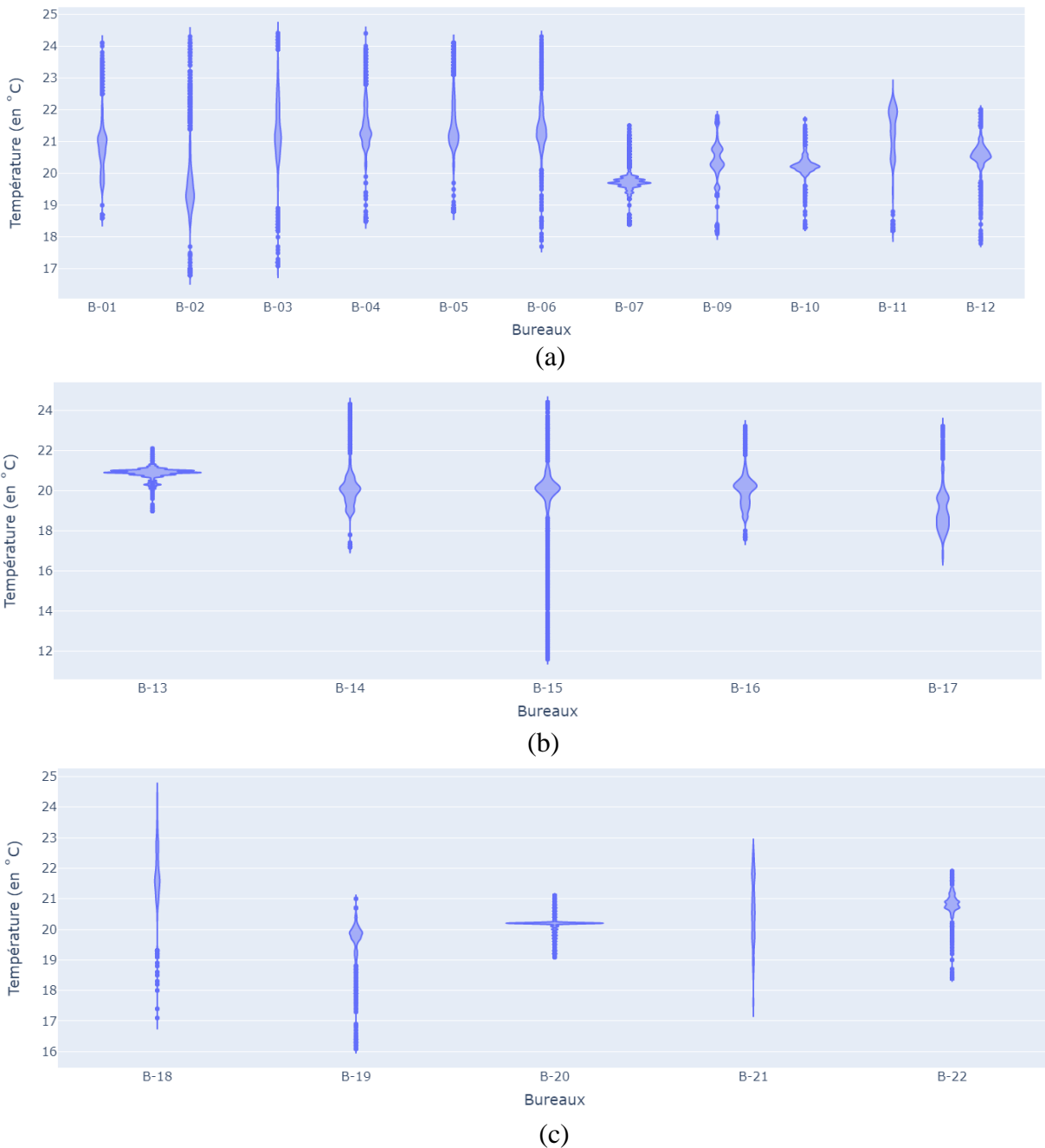


Figure 4.13-Diagramme en violon de la Température dans les bureaux (a) B-01 à B-12, (b) B-13 à B-17 et (c) B-18 à B-22 durant la période chauffée.

En considérant la similarité des deux variables (T° , HR) à la fois, on peut distinguer cinq groupes de bureaux G1 (B-03 et B-04), G2 (B-05, B-06 et B-22), G3 (B10 et B-19), G4 (B-12, B-14 et B-16) et G5 (B-13 et B-18).

En considérant l'intégralité de l'analyse statistique en terme de tendances centrale et de dispersion aussi que de répartition on peut identifier trois groupes de bureaux G1 (B-03 et B-04), G2 (B-05 et B-06) et G3 (B-14 et B-16).

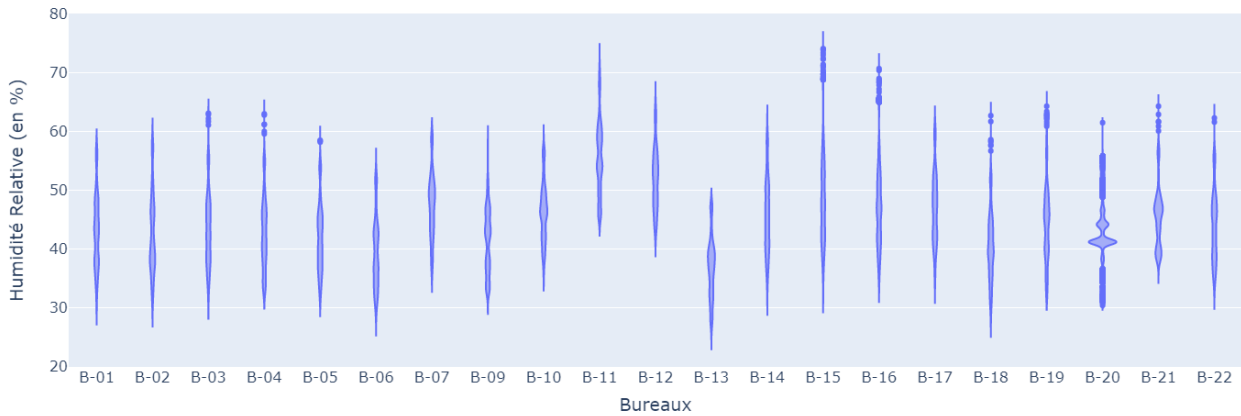


Figure 4.14-Diagramme en violon de L'Humidité relative dans les bureaux durant la période chauffée.

Tableau 4.2- Division des bureaux ayant une distribution plurimodale d'humidité.

Groupe	Bureaux	Modes	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
G1	B-01, B-02, B-05, B-06, B-09, B-10, B-19, B-21, B-22	3	35 %	45%	55%	--
G2	B-12, B-14, B-16, B-17	3	40%	50%	60%	--
G3	B-03, B-04	4	35%	40%	45%	55%
G4	B-11, B-15	4	40%	50%	60%	70%

4.2.3.3 Facteurs d'influence du comportement thermique des bureaux

La thermique d'un bâtiment fait intervenir de nombreux facteurs, notamment l'enveloppe, les systèmes de chauffage, de climatisation et de ventilation et le facteur humain.

On désigne par l'enveloppe, l'interface physique séparant l'intérieur du bâtiment de son environnement extérieur. Il est chargé de maintenir un microclimat intérieur confortable au profit du facteur humain. Celui-ci par son comportement aura une contribution positive ou négative dans l'achèvement de cette tâche. Dans la suite on se concentrera sur ces deux facteurs.

La performance de l'enveloppe est soumise à l'action de multiples paramètres résumés en deux typologies. La première représente l'ensemble des paramètres intrinsèques relatifs au bâtiment, à citer la forme architecturale, l'orientation et l'isolation thermique. La deuxième concerne les paramètres extrinsèques relatifs aux facteurs climatiques.

L'orientation par son interaction avec le rayonnement solaire et l'action du vent peut influencer largement la performance thermique globale du bâtiment. Ce facteur a fait l'objet de plusieurs études [194-196]. Ils ont montré que l'orientation du bâtiment est un facteur critique de conception. Celle-ci peut avoir un impact sur la performance thermique de l'enveloppe en agissant sur le rayonnement solaire direct à travers les fenêtres, les ouvertures des bâtiments, aussi que les parois opaques externes.

D'autre part, le nombre de personnes dans une pièce influence l'environnement thermique. Lors de l'évaluation thermique, il est donc nécessaire de considérer l'occupation. C'est un facteur qui affecte l'environnement intérieur du bâtiment par les apports générés par les usagers aussi que par

leurs réactions comportementales. De nombreuses études ont rapporté son influence sur les charges de refroidissement et de chauffage des bâtiments [197-200].

Dans cette étude on a repéré les conditions climatiques externes, l'orientation et l'occupation comme facteurs d'influence. Une analyse de corrélation a été menée afin d'identifier la relation existante entre ces facteurs et les conditions intérieures des bureaux. Le coefficient de corrélation varie dans l'intervalle [-1,1]. Plus la valeur absolue du coefficient est importante, plus la relation entre les variables est forte. Un programme en Python a été utilisé pour analyser les corrélations.

Les variables suivantes sont considérées : L'environnement intérieur (T° et HR)_{int} , l'environnement extérieur (T° et HR)_{ext} , l'occupation et l'orientation. Les données relatives à l'environnement intérieur sont représentées par les enregistrements des capteurs des 21 bureaux durant le mois de Janvier, les données relatives à l'environnement extérieur sont celles de la station Lille-Lesquin récupérées à partir du site « Meteoblue¹ » ; les données d'occupation sont représentées par le nombre d'occupants d'un bureau pendant la période de travail. Concernant l'orientation, cette variable est qualitative puisqu'il s'agit de deux orientations : nord et sud. Les bureaux situés sur le côté sud du bâtiment sont caractérisés par une valeur égale à 1 et ceux qui sont situés sur le côté nord sont caractérisés par une valeur égale à 0.

La Figure 4.15 présente le diagramme de corrélation entre les différents paramètres. Aucune relation ne peut être identifiée entre l'environnement intérieur et l'orientation du bâtiment : coefficient de corrélation $r(T_{int}, Orientation) = 0.014$. On note aussi une faible influence de la température extérieure sur la température intérieure : coefficient de corrélation $r(T_{int}, T_{ext}) = -0.054$. Ces deux faibles corrélations montrent un bon fonctionnement thermique du bâtiment résultant de la qualité de l'enveloppe et de la gestion du chauffage. On note l'existence d'une relation plus importante entre l'environnement extérieur et l'humidité intérieure : coefficient de corrélation $r(H_{int}, T_{ext}) = 0.54$. D'autre part, l'occupation est faiblement corrélée à la température intérieure : $r(T_{int}, Occupation) = 0.47$.

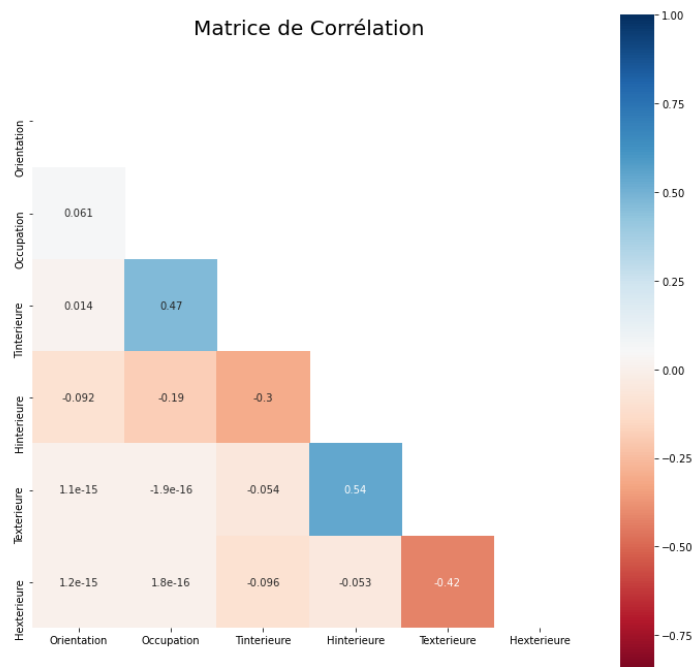


Figure 4.15- Diagramme de corrélation durant la période chauffée.

¹www.meteoblue.com

Les valeurs des coefficients de corrélation donnent des indications sur les relations entre les variables. Ils doivent être validés par un test de “Significativité”, pouvant être réalisé de la façon suivante :

a-Définir l’hypothèse nulle H_0 :

Il n’y a pas de relation entre l’humidité intérieure et la température extérieure.

Il n’y a pas de relation entre la température intérieure et l’occupation.

b-Fixer un risque d’erreur pour le rejet de H_0 :

5% est le seuil le plus employé.

c-Spécifier un moyen pour tester cette hypothèse :

Le t-test est employé. Il permet de calculer à partir d’une formule une valeur associée à un degré de significativité p. Elle est basée sur la moyenne et l’écart type des variables.

Les valeurs de $p(H_{int}, T_{ext}) = 0$ et $p(T_{int}, Occupation) = 0$ ont été calculées aussi dans le langage de programmation python.

d-Tester l’hypothèse nulle :

Il suffit que la valeur p soit inférieure au seuil fixé pour rejeter l’hypothèse nulle.

$p(H_{int}, T_{ext}), p(T_{int}, Occupation) = 0 < 0.05$, on rejette alors l’hypothèse d’une corrélation nulle entre l’humidité intérieure et la température extérieure et entre la température intérieure et l’occupation. On conclut alors que la corrélation est statistiquement significative.

4.2.3.4 Le confort thermique

Le confort thermique intérieur est l’un des facteurs les plus importants affectant le bien-être, la santé et la productivité des usagers. Des températures et des humidités anormales peuvent être à l’origine d’un inconfort thermique affectant de manière significative l’activité humaine. La Figure 4.16 montre une qualification des zones de confort relatives aux usagers [201].

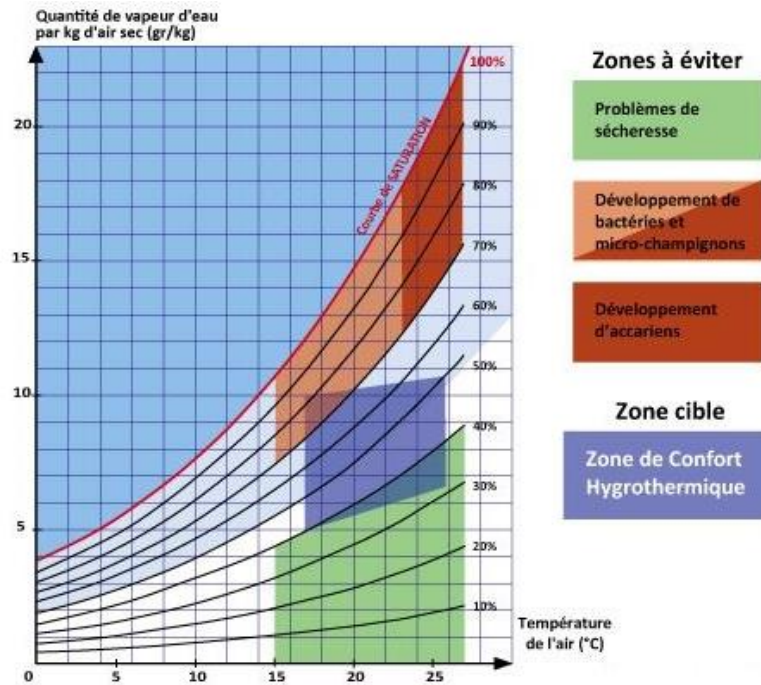


Figure 4.16- Diagramme de confort hygrothermique [201].

Ce diagramme a pour abscisse la température ambiante et pour ordonnée l'humidité absolue (quantité de vapeur d'eau / Kg d'air sec). Les courbes intérieures représentent différents niveaux d'humidité relative. Sur ce diagramme 4 zones sont présentées dans une plage de température allant de 15°C jusqu'à 27°C. La zone verte est caractérisée par des conditions d'HR < 40% pouvant causer des problèmes de sécheresse et des augmentations de la concentration de la poussière dans l'air. Les zones orange clair et foncé présentent des niveaux élevés d'HR au-dessus de 70% qui pourraient accélérer la croissance de moisissure et les phénomènes de condensation. Par conséquent ces trois zones seront à éviter. La zone de confort hygrothermique à respecter est celle ayant la couleur lavande. Elle s'étale sur un intervalle de température [17,25] °C.

À chaque température correspond un intervalle de confort lié à l'HR. On a pu définir pour chaque température les valeurs tolérables d'HR pour maintenir le confort thermique basé sur le diagramme. Ces valeurs sont illustrées dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3- Les plages de confort associées au diagramme (Figure 4.16)

Température (°C)	Humidité Relative Minimale (%)	Humidité Relative Maximale (%)
17	40	80
18	40	79
19	39	75
20	38	70
21	37	65
22	36	62
23	35	60
24	34	55
25	30	50

Tenant compte de ces plages de confort, pour chaque bureau occupé on a défini un pourcentage indiquant des conditions satisfaites de T° et d'HR, en d'autres termes le pourcentage de confort pour la période considérée. Ce pourcentage est représenté dans l'histogramme de la Figure 4.17.

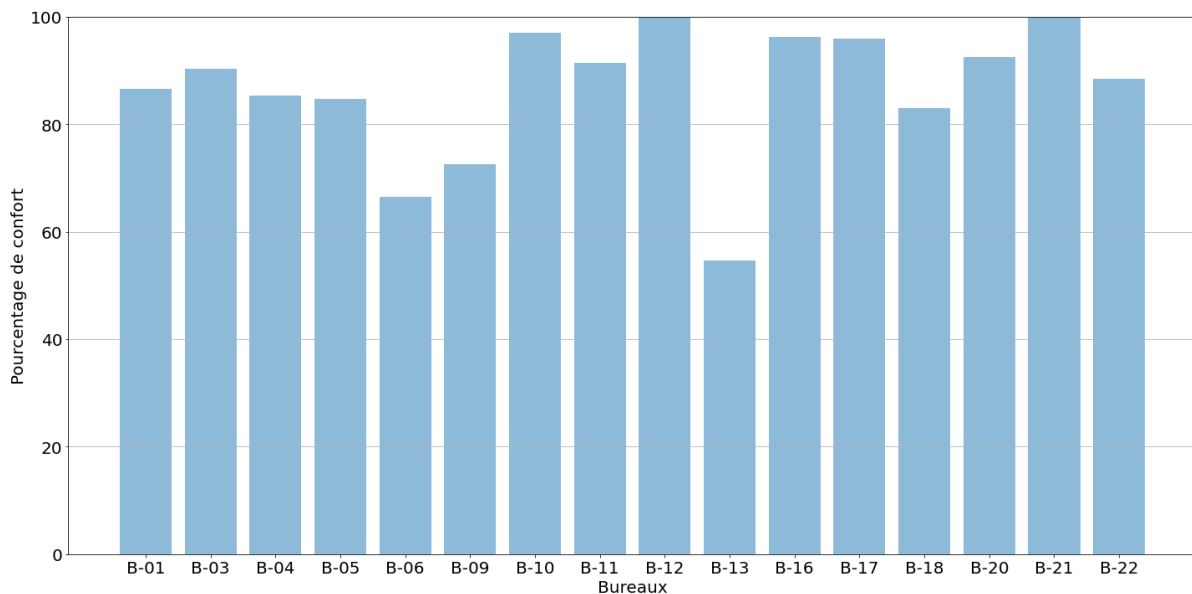


Figure 4.17- Pourcentage de confort dans chaque bureau durant la période chauffée.

Dans les bureaux (B-12 et B-21) le confort est atteint durant toute la période considérée alors que le bureau B-13 présente le plus faible pourcentage de confort, légèrement supérieur à 50%. Les bureaux (B-03, B-10, B-11, B-16, B-17 et B20) ont un confort supérieur à 90%. Les bureaux (B-01, B-04, B-05, B-18 et B-22) présentent un confort supérieur à 80%. Un confort supérieur à 70% est atteint dans le bureau B-09 et 60% dans le bureau B-06.

Le confort est atteint dans la majorité des bureaux. Dans tous les bureaux l'inconfort est provoqué par les valeurs d'humidité hors seuil pour des températures respectant la zone de confort. Par exemple l'inconfort dans les bureaux (B-01 et B-03) est dû à des valeurs d'HR inférieures au seuil correspondant aux températures 19 à 24 °C.

On peut conclure alors que le fonctionnement du système de chauffage et la qualité thermique de l'enveloppe assurent dans tous les bureaux des températures ambiantes conformes aux exigences de confort intérieur.

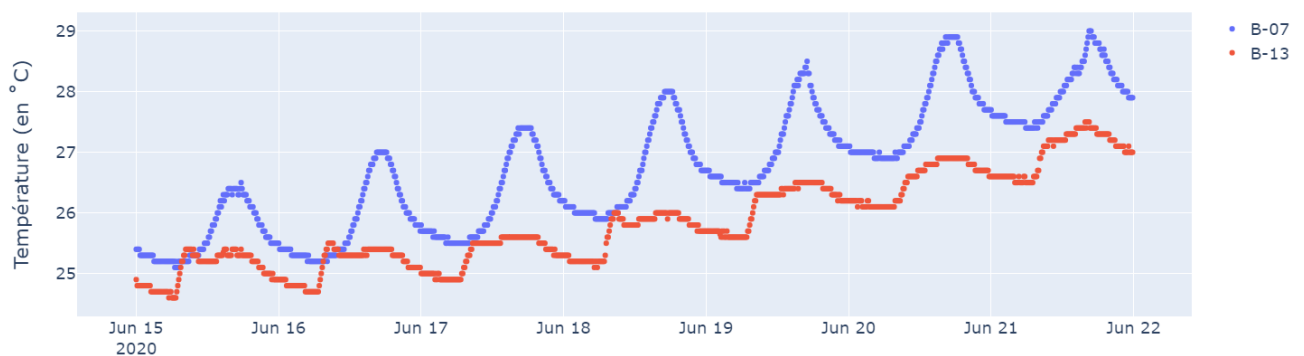
4.2.4 Analyse de la période non chauffée

Dans cette partie, les conditions de confort hygrothermique dans les bureaux du laboratoire sont aussi évaluées. Les mesures de paramètres hygrothermiques ont été enregistrées à un intervalle de temps défini de 10 minutes pendant le mois de Juin 2020. La qualité de l'air est également testée durant cette période.

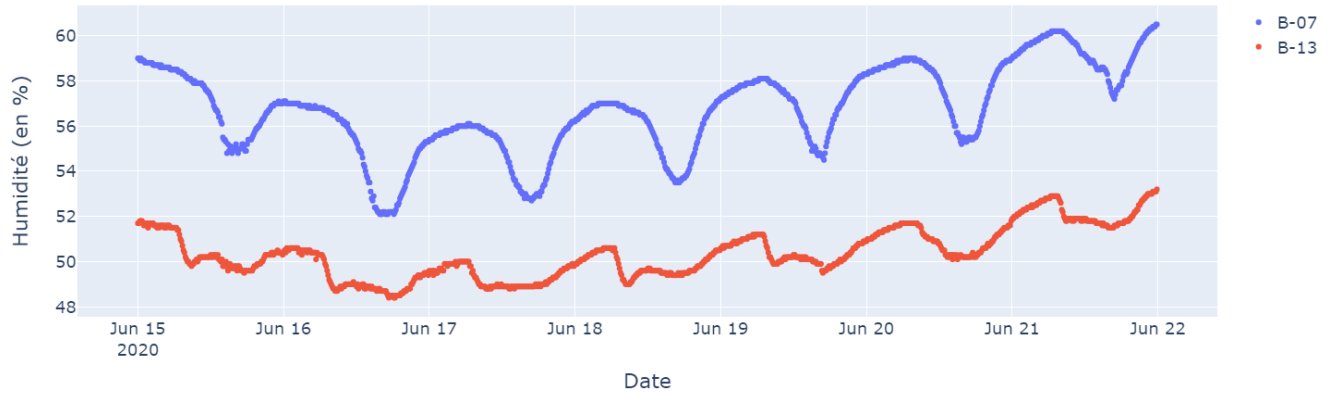
4.2.4.1 Analyse détaillée de bureaux

Parmi les 22 bureaux équipés de capteurs, 13 ont été considérés dans l'analyse thermique durant la période non chauffée. L'analyse conduite pour étudier le comportement thermique des deux bureaux (B-07 et B-13) pendant la période chauffée a été répétée durant la période non chauffée. La Figure 4.18 présente la variation de la température et de l'humidité relative sur la semaine de (15 Juin) dans ces bureaux.

Par simple lecture de ces courbes de variations, on peut tirer que chacune d'elles est caractérisée par une allure périodiquement uniforme. Pour chaque jour de la semaine, on a la même forme de courbe mais avec des valeurs extrêmes différentes et croissantes dans le temps en raison de l'environnement extérieur. Une différence dans les valeurs de température et d'humidité dans chaque bureau peut être remarquée. Elle peut être expliquée par la façade en acier du bureau B-07.



(a)



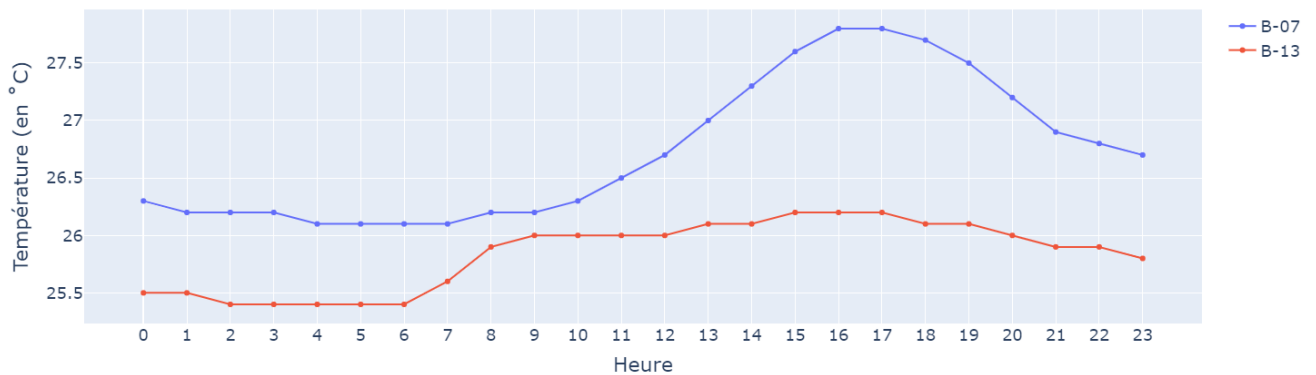
(b)

Figure 4.18- Variation de (a) Température et (b) Humidité sur une semaine de la période non chauffée.

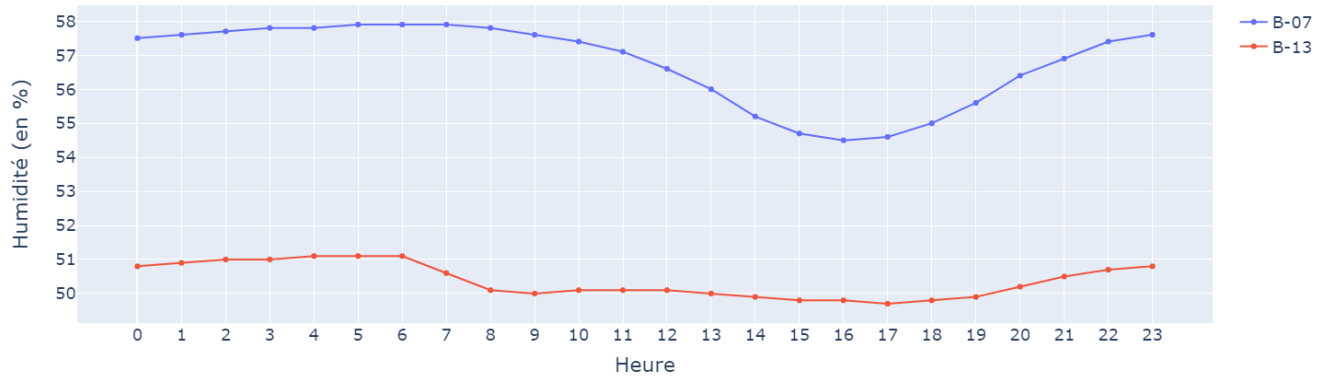
Une observation plus claire de la différence entre ces valeurs et de leur variation en fonction de la période du jour est représentée dans la Figure 4.19. Les courbes de variation de (T° , HR) de chaque bureau présentent la même allure mais elles présentent une différence dans leurs directions de croissance. D'une manière générale, la courbe de température est caractérisée par une phase de stabilité sur les premières heures du jour précédant une phase de croissance progressive durant la journée, suivie d'une décroissance le soir. Au contraire, dans le cas de l'humidité les phases sont inversées. On remarque la même phase de stabilité, mais suivie d'une décroissance progressive durant la journée et d'une croissance le soir. L'évolution des valeurs des variables de (T° , HR) dans le bureau B-13 est moins importante que celle du bureau B-07. Elle présente aussi une phase quasi-stable durant la journée.

On peut tirer une similarité dans la variation de la température dans ces deux bureaux. En effet, cette température est stable sur une période commune de (0:00-6:00). Ensuite, elle subit une croissance moins significative dans le bureau B-07 que dans le bureau B-13 sur la période (7:00-9:00). Elle se stabilise de nouveau à sa valeur extrême sur une période commune (16:00-17:00) et décroît sur la période (17:00-23:00).

D'autre part, la différence réside dans le fait que la croissance de la température se produit en une seule phase dans le bureau B-07 cependant dans le bureau B-13 elle se produit sur deux phases séparées d'une période de stabilité.



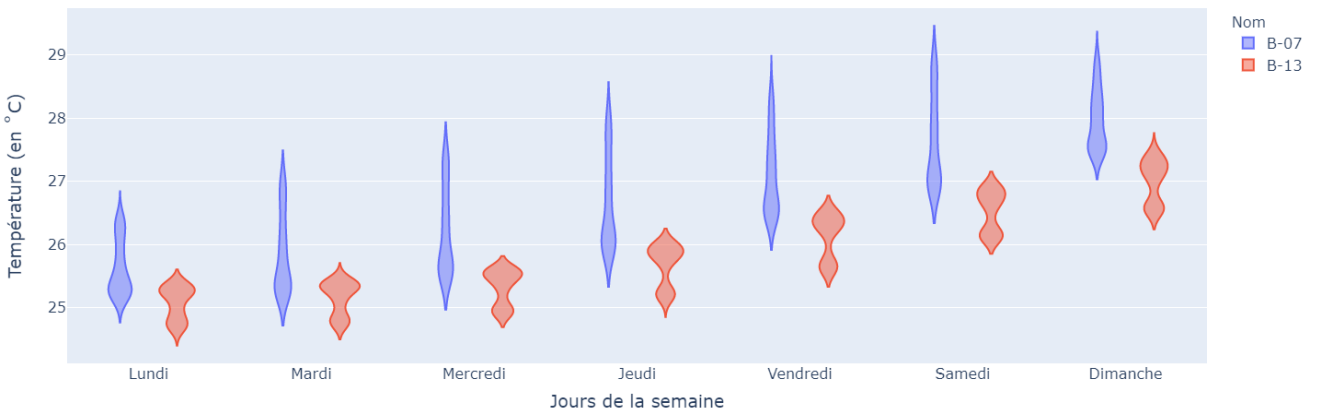
(a)



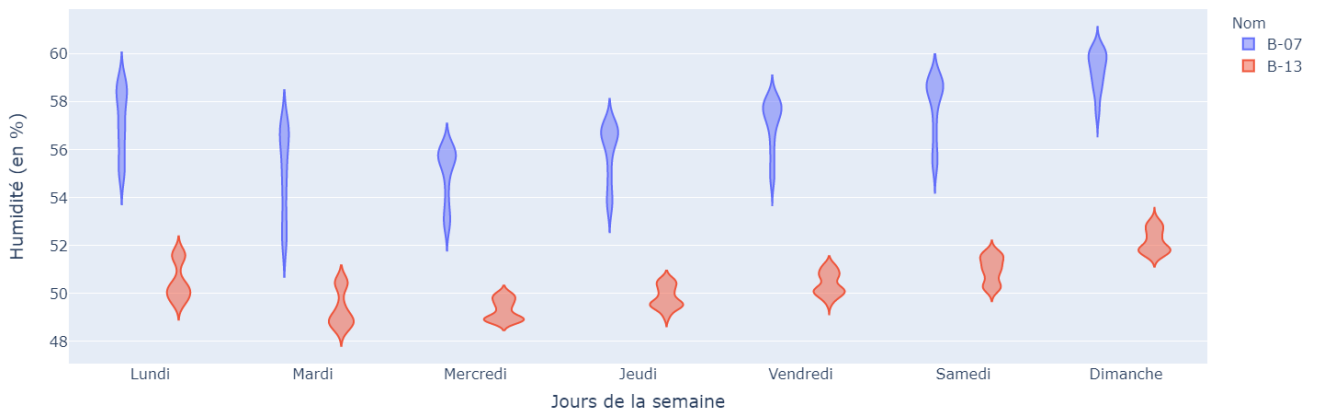
(b)

Figure 4.19- Variation de (a) Température et (b) D'humidité moyenne horaire durant la période non chauffée.

La Figure 4.20 illustre les distributions journalières de la température et de l'humidité. Elle confirme les conclusions précédentes d'une variation plus importante de la température et de l'humidité avec des valeurs plus élevées dans le bureau B-07 comparées à celles du bureau B-13. En plus, pour chaque bureau, la distribution journalière des variables est comparable avec une différence dans les valeurs.



(a)



(b)

Figure 4.20- Diagramme en violon de (a) La Température et de (b) L'humidité des bureaux durant la période non chauffée.

4.2.4.2 Analyse statistique

La Figure 4.21 résume les variations des valeurs moyennes de la température et de l'humidité relative dans les bureaux considérés. La température intérieure moyenne des bureaux varie dans l'intervalle [23 - 26] °C. On peut diviser les bureaux selon leurs températures moyennes en G1 (B-05, B-06, B-08, B-18 et B-19) ayant une moyenne autour de 23 °C, G2 (B-03, B-04, B-14 et B-16) présentant une valeur moyenne autour de 24 °C, G3 (B-11, B-12 et B-13) caractérisé par une moyenne autour de 25 °C et G4 (B-07) avec une moyenne de 26°C.

Pour certains, notamment (G2, G3) cette similarité de valeur moyenne peut être due aux conditions d'exposition et de géométrie des bureaux de ces groupes qui ont la même orientation et approximativement la même surface.

Ce classement n'est pas valable pour la valeur moyenne de l'humidité relative qui présente une variation dans la plage de [47-59] %. De ce fait, on propose un autre regroupement : groupe G1 (B-07, B-11, B-12 et B-19) ayant une valeur moyenne d'HR > 50% et les autres bureaux de G2 ayant une moyenne d'HR < 50%.

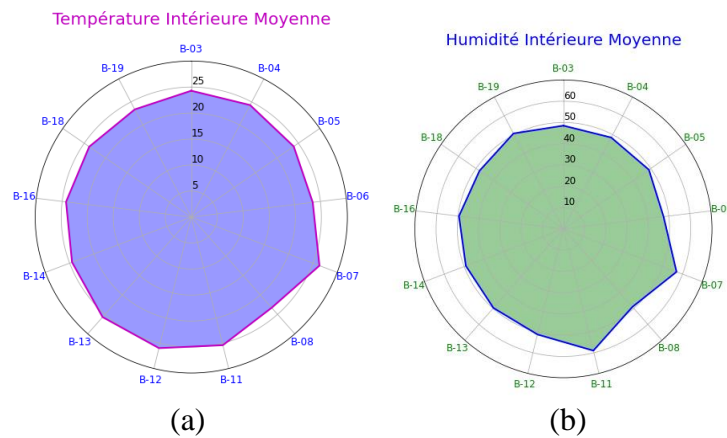


Figure 4.21- (a) La Température moyenne et (b) L'Humidité relative moyenne des bureaux durant la période non chauffée.

La Figure 4.22 présente les écarts type de la température et de l'humidité relative de chaque bureau. L'écart type relatif à la température varie dans la plage de [0.8-1.8] °C, alors que celui de l'humidité relative varie dans l'intervalle de [4.5 - 6.5] %.

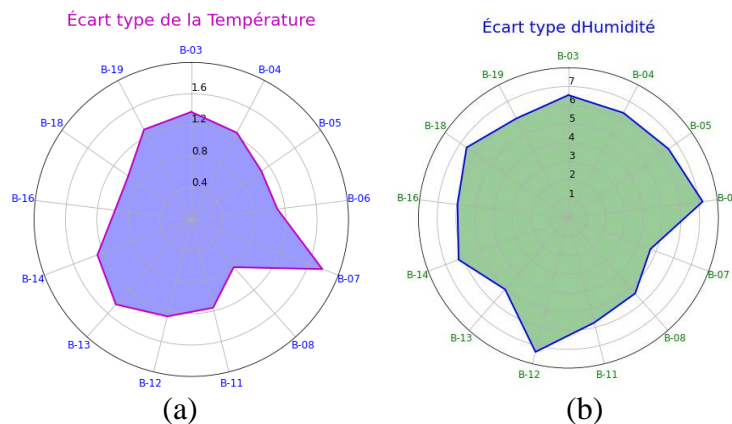


Figure 4.22- L'écart type de (a) La Température et de (b) L'Humidité relative des bureaux durant la période non chauffée.

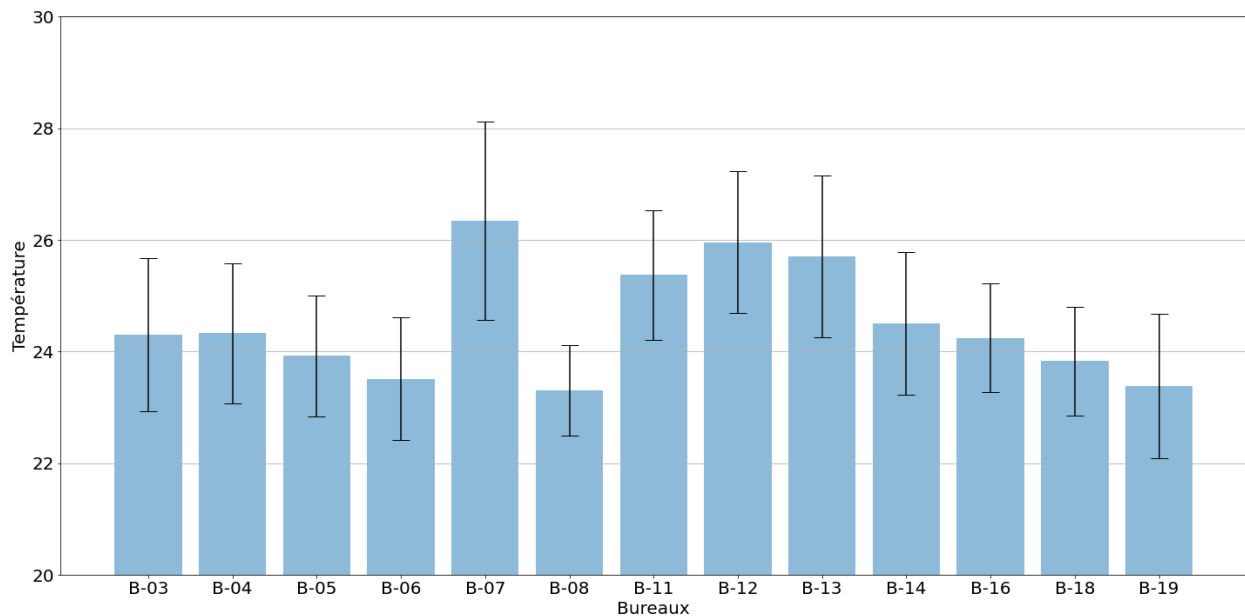
La Figure 4.23 montre l'importance de l'écart type des variables par rapport à la valeur moyenne. Malgré que le groupe G1 (B-05, B-06, B-08, B-18 et B-19) est caractérisé par des valeurs semblables de température moyenne, cependant cette similarité ne peut pas être étendue aux écarts type. Les bureaux (B-08 et B-18) présentent un écart type inférieur à 1°C alors que les autres ont des valeurs autour de 1.2°C. Donc la température dans les bureaux (B-08 et B-18) est plus concentrée autour de sa valeur centrale.

De même le groupe G2 (B-03, B-04, B-14 et B-16) présente des moyennes similaires de la température, toutefois ce n'est pas le cas pour les écarts types. En effet, le bureau B-16 présente le plus petit écart type dans G2 alors que les autres présentent des valeurs autour de 1.25°C, d'où la température dans le bureau B-16 présente une distribution moins dispersée que celles des autres bureaux.

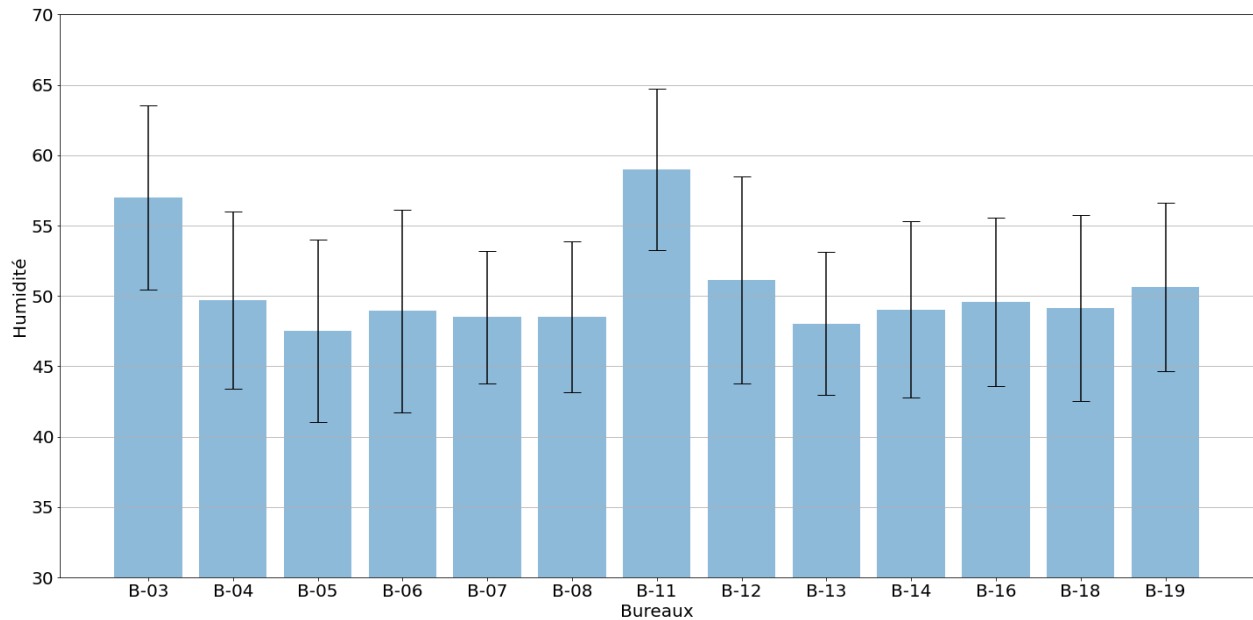
D'autre part le groupe G3 (B-11, B-12 et B-13) présente des valeurs similaires de température moyenne autour de 25°C et d'écart type autour de 1.2°C indiquant alors des distributions assimilables de la température de ses bureaux en terme de dispersion autour de la valeur moyenne. On remarque aussi que le bureau B-07 présentant la valeur moyenne de température la plus importante, est caractérisé également par la valeur de l'écart type la plus importante de 1.8°C et alors une distribution plus dispersée autour de la moyenne.

En ce qui concerne l'HR, les groupes G1 (B-07, B-11, B-12 et B-19) et G2 (B-03, B-04, B-05, B-06, B-08, B-13, B-14, B-16, et B-18) sont caractérisés par des écarts type dans l'intervalle [5,7]%. Donc pour chaque bureau de ses deux groupes la distribution de l'humidité autour de sa moyenne est approximativement comparable.

Somme toute, un regroupement des bureaux en fonction de la similarité des indicateurs des deux variables (T°, HR) paraît difficile. Cependant, on a pu détecter une similarité dans les bureaux B-04 et B-14 qui se traduit par des valeurs semblables de la moyenne et de l'écart type des variables comme le montre le Tableau 4.4.



(a)



(b)

Figure 4.23- Barres d'erreur de (a) La Température et de (b) L'Humidité relative des bureaux durant la période non chauffée.

Tableau 4.4- Les indicateurs de tendance (T° , HR) des bureaux (B-04 et B-14).

Bureau	Température		Humidité Relative	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
B-04	24.3	1.24	49.7	6.32
B-14	24.5	1.27	49.1	6.26

La Figure 4.24 illustre la distribution de la température et de l'humidité. Plusieurs observations peuvent être formulées.

En terme de répartition, certains des bureaux présentent approximativement la même forme de distribution avec des valeurs de variables différentes. Considérons la température intérieure, tous les bureaux à l'exception de (B-07, B-08, B-12 et B-13) présentent une distribution de valeurs unimodale, donc une concentration de la température autour d'une seule valeur. Les bureaux (B-07 et B-13) présentent une distribution bimodale de température alors que la température dans les bureaux (B-08 et B-12) a une distribution plurimodale.

Si on considère l'humidité relative, tous les bureaux présentent une distribution bimodale à l'exception de (B-07, B-12 et B-13) caractérisés par une distribution plurimodale.

En terme de densité de probabilité, parmi les bureaux présentant une distribution unimodale de température, (B-04, B-05, B-06, B-18 et B-19) ont la valeur la plus fréquente de 23 °C. (B-03, B-14 et B-16) sont caractérisés par la valeur la plus fréquente de température de 24°C. Pourtant, seul le bureau B-11 présente la probabilité d'observation la plus élevée pour la valeur de 25°C. Pour les bureaux (B-07 et B-13) on remarque la même valeur pour les deux modes (24 et 28) °C. Quant aux bureaux (B-08 et B-12) chacun est caractérisé par deux valeurs différentes et une commune respectivement (22,23,24) °C et (24,26,27) °C.

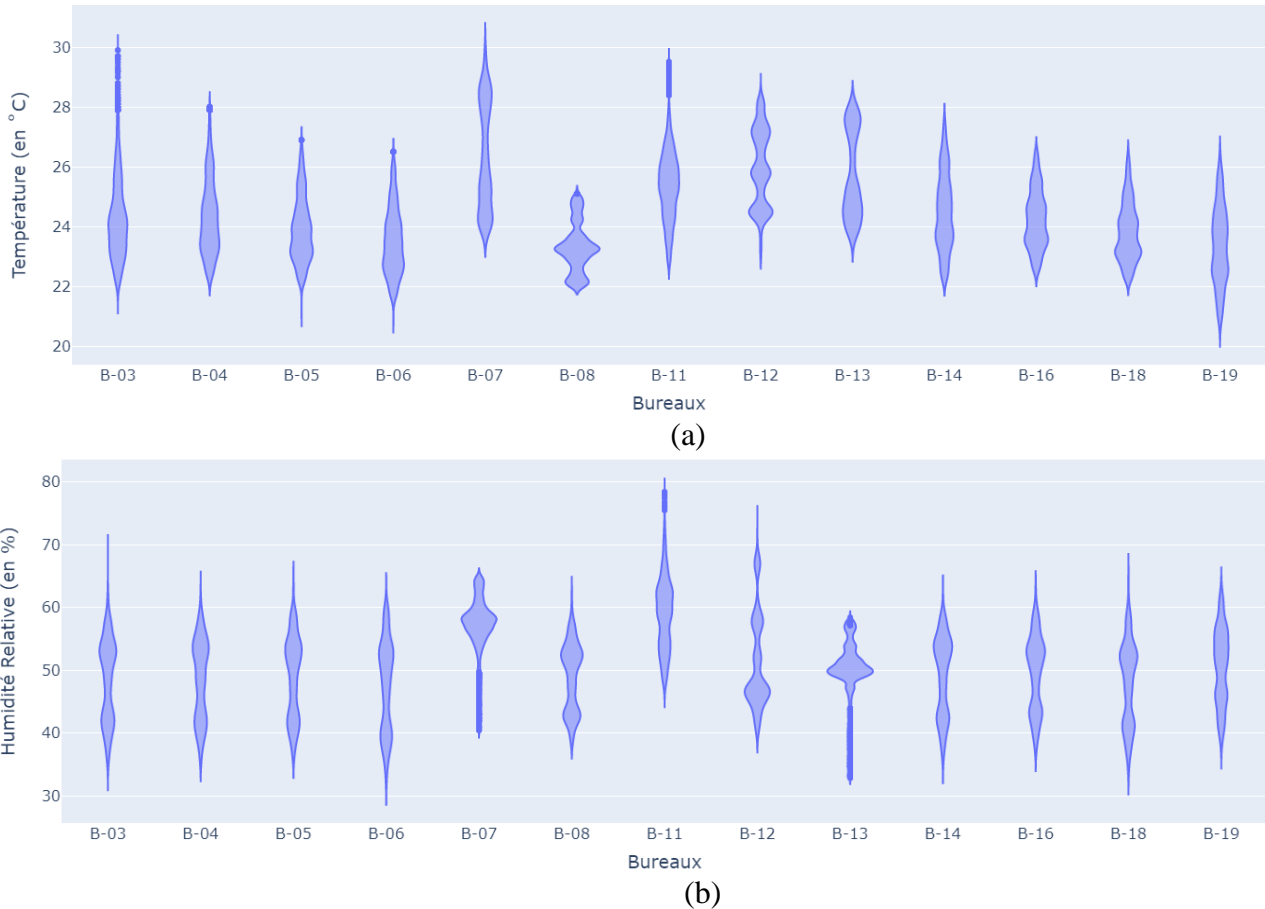


Figure 4.24- Diagramme en violon de (a) La Température et de (b) L’Humidité relative des bureaux durant la période non chauffée.

En ce qui concerne l’humidité, tous les bureaux caractérisés par une distribution bimodale ont (40,50) % comme valeurs respectives des deux modes sauf le bureau B-11 caractérisé par les valeurs (50,60) %. Quant à la distribution plurimodale, les deux bureaux (B-07 et B-13) présentent les mêmes valeurs modales (40, 50, 60) % alors que B-12 présentent d’autres valeurs autour de (50,60,70) %.

En considérant la similarité des deux variables (T° , HR) à la fois, on peut distinguer trois groupes de bureaux G1 (B-03, B-14 et B-16), G2 (B-04, B-05, B-06, B-18 et B-19) et G3 (B-07 et B-13) présentant des distributions et des valeurs fréquentes comparables de variables.

La statistique descriptive permet de dégager des similarités dans le comportement des bureaux en terme de température et d’humidité relative. Toutefois ces bureaux ne peuvent pas être classés en de groupes caractérisés par les mêmes tendances de ces deux variables. En effet, ils présentent des comportements différents en fonction de la variable et de la description considérées.

4.2.4.3 Facteurs d’influence du comportement thermique des bureaux

Cette section présente une analyse de l’influence des facteurs considérés dans la période chauffée (Conditions Climatiques, Orientation et Occupation) sur l’environnement intérieur.

La Figure 4.25 présente les résultats obtenus. Similairement à la période chauffée, la corrélation entre la température intérieure et l’orientation est insignifiante $r(T_{int}, Orientation) = - 0.13$. Il en

est de même pour la température et l'occupation avec $r(T_{int}, Occupation) = -0.22$. Ce résultat peut être expliqué par le faible nombre d'occupants des bureaux. Pendant cette période, l'occupation des bureaux était moins importante en raison des conditions sanitaires. Quant à la température extérieure, le coefficient de corrélation est important comparé aux deux autres $r(T_{int}, T_{ext}) = 0.49$. À noter que durant la période chauffée, cette corrélation était négligeable. Pour l'humidité relative, les coefficients de corrélation sont aussi faibles avec $r(HR_{int}, Orientation) = -0.22$, $r(HR_{int}, Occupation) = -0.26$ et $r(HR_{int}, HR_{ext}) = 0.33$.

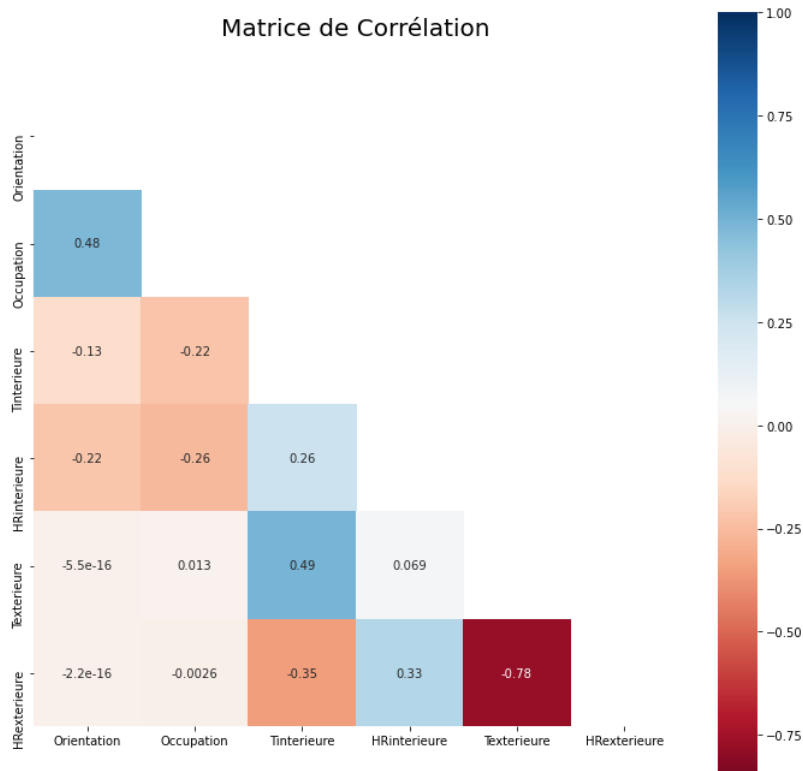


Figure 4.25- Diagramme de corrélation entre les variables considérées durant la période non chauffée.

Dans cette partie on procède aussi au calcul du degré de signification de la relation existante entre la température intérieure et extérieure, en considérant les mêmes étapes de la partie précédente :

a-Définir l'hypothèse nulle H_0 :

Il n'y a pas de relation entre la température intérieure et extérieure.

b-Fixer un risque d'erreur pour le rejet de H_0 :

On définit le seuil le plus employé : 5%.

c-Spécifier un moyen pour tester cette hypothèse :

Calcul de la valeur de p à l'aide du langage de programmation python : $p(T_{int}, T_{ext}) = 0$

d-Tester l'hypothèse :

$p(T_{int}, T_{ext}) = 0 < 0.05$, on rejette alors l'hypothèse d'une corrélation nulle entre la température intérieure et extérieure et alors le résultat du test est statistiquement significatif.

De ce qui précède on peut tirer que la température extérieur est le facteur déterminant qui affecte la température intérieure parmi les paramètres d'influence pris en considération.

4.2.4.4 Le confort thermique

Dans cette période le confort thermique des bureaux a été évalué aussi en fonction du même pourcentage défini durant la période chauffée. Ce pourcentage quantifie les valeurs de température et d'humidité conformes aux plages de confort extraites du diagramme de confort hygrothermique. En considérant le nouvel ensemble de données, chaque couple (T° , HR) a été comparée aux valeurs limites acceptables dans le but de déterminer le pourcentage de confort qui leur caractérise (Figure 4.26).

Dans les bureaux (B-06 et B-18) le confort est atteint 85% de la période considérée. L'inconfort dans ces bureaux est dû à des températures pouvant dépasser 25°C et à des valeurs d'HR hors limites pour les températures 23, 24 et 25°C . Pour le bureau B-05 le confort est atteint 79% de la période considérée. L'inconfort est induit par des valeurs hors limite de température ($>25^\circ\text{C}$) et d'HR pour les températures (24 et 25°C). Pour les bureaux (B-03 et B-04) le confort est atteint 71% de la période considérée, et l'inconfort est causé par les mêmes raisons évoquées pour le bureau B-05.

Cependant, dans les bureaux (B-11, B-12 et B-13) le pourcentage de confort atteint durant cette période est inférieur à 50%, ceci peut être expliqué par les rayonnements solaires à travers leurs vitrages fermés, qui combinés à la surface réduite de ces bureaux comparées avec les autres, peuvent générer des températures intérieures assez élevées. Pour ces bureaux les exigences de confort thermique ne sont pas respectées.

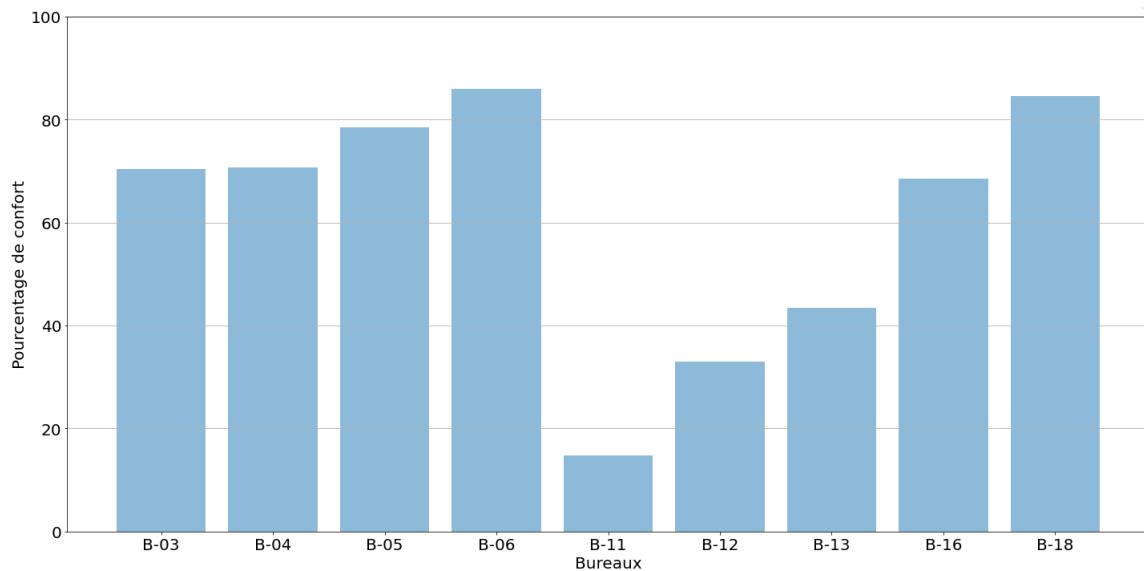


Figure 4.26- Pourcentage de confort dans chaque bureau durant la période non chauffée.

4.2.4.5 Analyse de la qualité de l'air

La qualité de l'air intérieur est un facteur considérable parmi les mesures de confort des occupants dans le bâtiment. Il est traité dans plusieurs études [202-204] comme un facteur primordial pouvant affecter la santé et la productivité des occupants. En effet, les humains par leur nature sont dépendants de l'air et lorsqu'on considère que ceux-ci passent la plupart de leur temps à l'intérieur des bâtiments, ils interagissent principalement avec des polluants intérieurs. Par conséquent, il existe un besoin d'évaluer la qualité de l'air intérieur. De nombreuses études ont été conduites

dans le but de développer des systèmes de surveillance pouvant fournir une évaluation de la qualité de l'air dans l'environnement intérieur [205-207].

Des recherches récentes ont considéré la concentration du CO₂ comme un facteur pertinent selon la perception des occupants de la qualité de l'air intérieur à partir de l'étude des relations existantes entre ce dernier, le pourcentage d'inconfort et la qualité de l'air intérieur. En tant que constituant important de l'air dans l'environnement naturel, le CO₂ n'est pas considéré comme un polluant lorsqu'il est à faible concentration. Cependant, à une concentration élevée il pourrait contribuer négativement à la qualité de l'air. Les normes ont défini une valeur de confort de la concentration en CO₂ entre 600 et 1000 ppm avec une valeur de consigne réaliste pour une bonne qualité de l'air intérieur de 700 ppm.

Dans notre étude on s'est servi des données collectées de la concentration de CO₂ dans certains bureaux équipés de capteurs intelligents de Netatmo.

Dans les quatre bureaux instrumentés, la limite supérieure de la concentration en CO₂ spécifiée de 1000 ppm est respectée comme le montre les enregistrements des capteurs Netatmo pour la période de Juin illustrés dans la Figure 4.27. Les paramètres statistiques (Tableau 4.5) confirment la bonne qualité de l'air intérieur.

La distribution et la description statistique des données indiquent des similarités et des différences entre les bureaux considérés. Bien que ces concentrations atteignent des valeurs minimales similaires [360 - 380] ppm, on note une différence importante entre les valeurs maximales : environ 600 ppm dans les bureaux (B-01 et B-05), 700 ppm dans le bureau B-06, et 800 ppm dans le bureau B-04. Cette dernière peut être due à la présence de plantes qui émettent de CO₂ durant la nuit. La valeur moyenne de la concentration de CO₂ reste toujours dans l'intervalle [420,460] ppm. Concernant l'écart type, on note une différence importante : dans l'intervalle [23,28] pour les bureaux (B-01, B-05 et B-06) et de l'ordre de 60 ppm pour le bureau B-04.

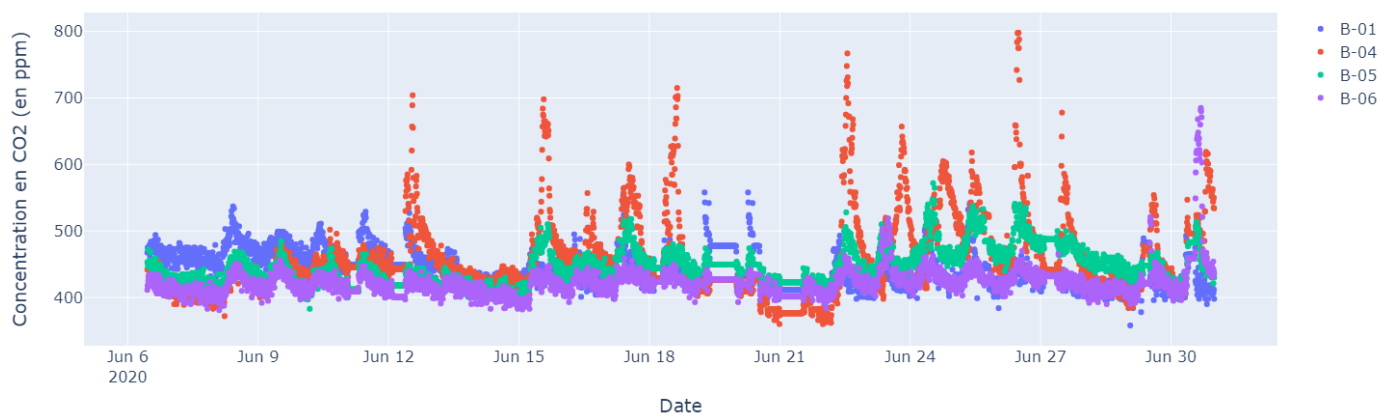


Figure 4.27- Variation de la concentration en CO₂ des bureaux durant la période non chauffée.

Tableau 4.5-La description statistique de la concentration en CO₂.

Bureaux	B-01	B-04	B-05	B-06
Concentration minimale en CO₂ (ppm)	358	360	383	381
Concentration moyenne en CO₂ (ppm)	442.2	458.3	445.9	422.5
Concentration maximale en CO₂(ppm)	558	798	572	685
Écart type de la Concentration en CO₂(ppm)	27.8	60.8	27.03	23.25

4.3 Consommations du bâtiment ESPRIT

Dans cette partie on s'intéresse à analyser les consommations du nouveau bâtiment ESPRIT. Cette analyse a pour objectif de vérifier la prise en considération des exigences définies dans la phase de planification en terme de consommations.

Les données sur les consommations ont été recueillies par les services de l'université à partir des compteurs installés dans le bâtiment. Elles comprennent les consommations de l'eau, d'énergie de chauffage et d'énergie électrique.

L'analyse se concentre sur l'évaluation de ces consommations. De plus, elle présente la production du bâtiment en énergie solaire et la part des consommations électriques qu'elle assure. Elle évalue également les émissions des gaz à effet de serre relatives aux consommations énergétiques du bâtiment.

4.3.1 Consommation d'eau

L'analyse a été menée sur les consommations d'eau des années 2020-2021. Cette analyse vise à évaluer l'atteinte des objectifs de consommation d'eau fixés dans la phase de planification. Celle-ci fournit aussi un suivi de l'évolution des consommations en fonction des périodes de l'année. Elle permet également d'introduire un nouvel indicateur d'occupation du bâtiment lors de l'épidémie.

4.3.1.1 Consommation d'eau sur l'année 2020

Cette année est caractérisée par des variations considérables de consommations mensuelles d'eau (Figure 4.28).

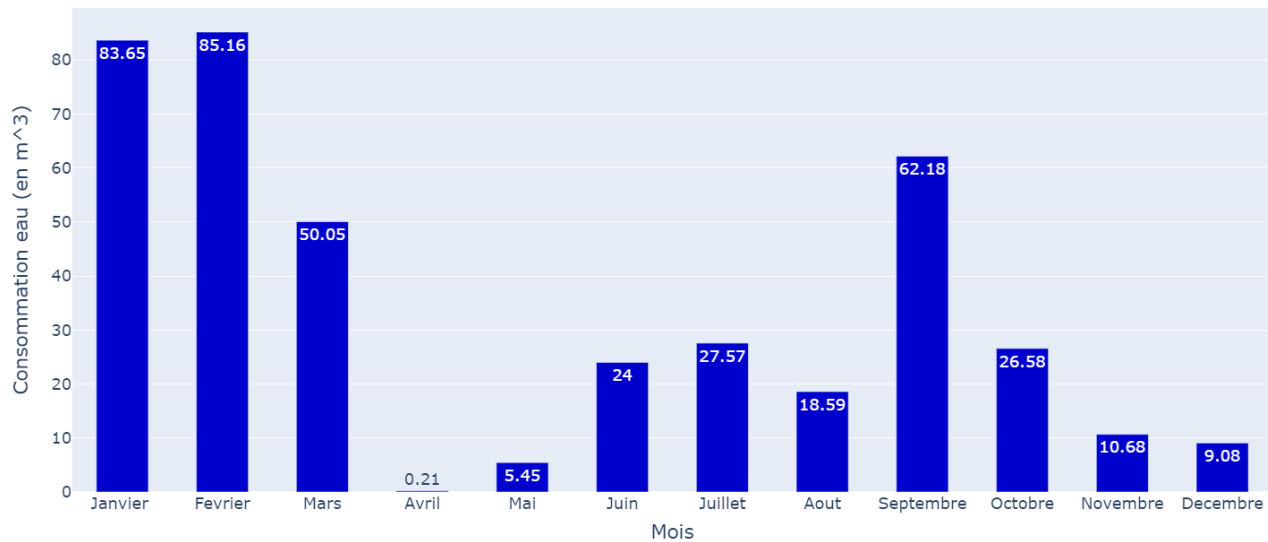


Figure 4.28 - Consommation mensuelle d'eau en 2020.

La crise sanitaire survenue au cours de l'année est à l'origine de ces variations. L'effet de cette crise s'étend sur toute l'année allant du mois de Mars. Il se manifeste clairement par une réduction considérable des consommations d'eau durant ce mois. Des consommations d'eau négligeables sont aussi observées pour les mois du confinement (Avril, Mai). Les consommations d'eau des

autres mois sont également affectées, malgré le déconfinement entamé. Ces consommations sont largement inférieures à celles des mois précédant l'épidémie (Janvier-Février).

Dans la suite, l'analyse des consommations d'eau sera conduite sur deux périodes : La période normale et la période de crise sanitaire.

Analyse en période normale

Cette analyse permet le suivi des consommations journalières d'eau du bâtiment en période de fonctionnement normal (Janvier à mi-Mars). Cette période a été divisée en sept catégories selon les jours de la semaine (Lundi à Dimanche). Une catégorie intitulée "Vacance" existait aussi. Cependant, cette période comprend seulement quatre jours de vacances au début du mois de Janvier. Les consommations de ces jours de vacances étaient comparables à celles des jours de Dimanche. De ce fait, les deux catégories Dimanche et Vacances ont été fusionnées en une seule. La répartition des consommations d'eau en fonction des catégories définies est illustrée dans la Figure 4.29. Leurs valeurs statistiques sont aussi indiquées dans le Tableau 4.6.

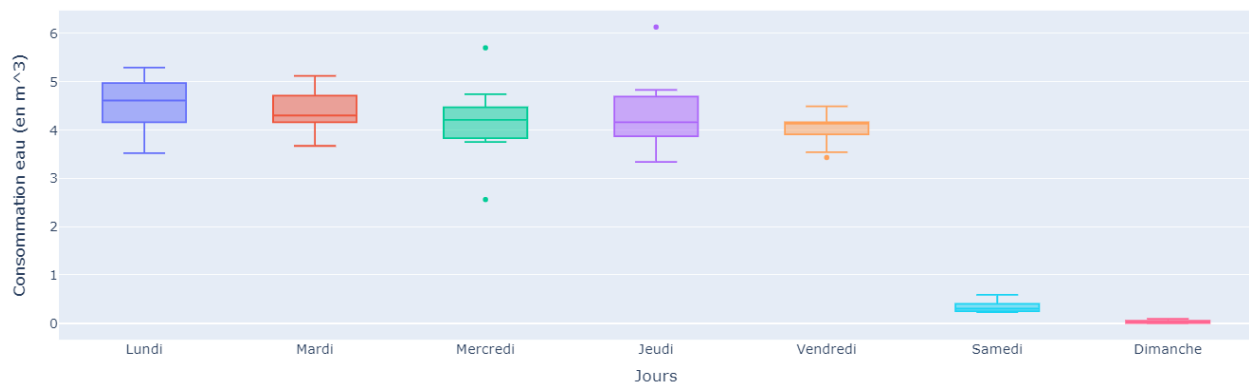


Figure 4.29 - Répartition des consommations selon les jours de la période (Janvier à mi-Mars).

Tableau 4.6 - Valeurs statistiques des consommations d'eau par catégorie.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Lundi	3.52	4.16	4.61	4.97	5.29	4.503	0.63
Mardi	3.67	4.16	4.3	4.71	5.12	4.394	0.45
Mercredi	3.75	3.83	4.21	4.47	4.74	4.174	0.8
Jeudi	3.34	3.87	4.16	4.69	4.83	4.338	0.76
Vendredi	3.54	3.91	4.13	4.16	4.49	4.022	0.32
Samedi	0.23	0.25	0.3	0.4	0.59	0.338	0.11
Dimanche	0	0.0025	0.03	0.05	0.09	0.034	0.029

Les catégories des jours de la semaine présentent des similarités en terme de distribution des consommations d'eau. Les consommations des catégories (Lundi-Mardi) varient dans des intervalles comparables. Elles sont caractérisées par des valeurs identiques du 1^{er} quartile (4.16 m³), des valeurs proches de médianes et du 3^{ème} quartile (variables autour de 4.4 et 4.8 m³ respectivement).

Quelques différences peuvent être identifiées entre les catégories (Mercredi-Jeudi-Vendredi). La valeur minimale de consommation atteinte les jours de Jeudi est faiblement inférieure à celle des

autres jours. De même, la valeur du 3^{ème} quartile et la valeur maximale des consommations des jours de Vendredi sont légèrement moins importantes que celles des autres. Cependant, en raison de ces faibles différences, on peut considérer que ces consommations présentent des répartitions comparables.

Les catégories de fin de semaine sont caractérisées par de faibles consommations d'eau. Ces consommations présentent une distribution serrée variable dans l'intervalle $[0.23, 0.59] \text{ m}^3$ pour les jours de Samedi. Elles sont quasiment nulles pour les jours de Dimanche et de Vacances $[0, 0.09] \text{ m}^3$.

L'importance des écarts type des consommations d'eau de chaque catégorie par rapport à leurs valeurs moyennes est représentée dans la Figure 4.30.

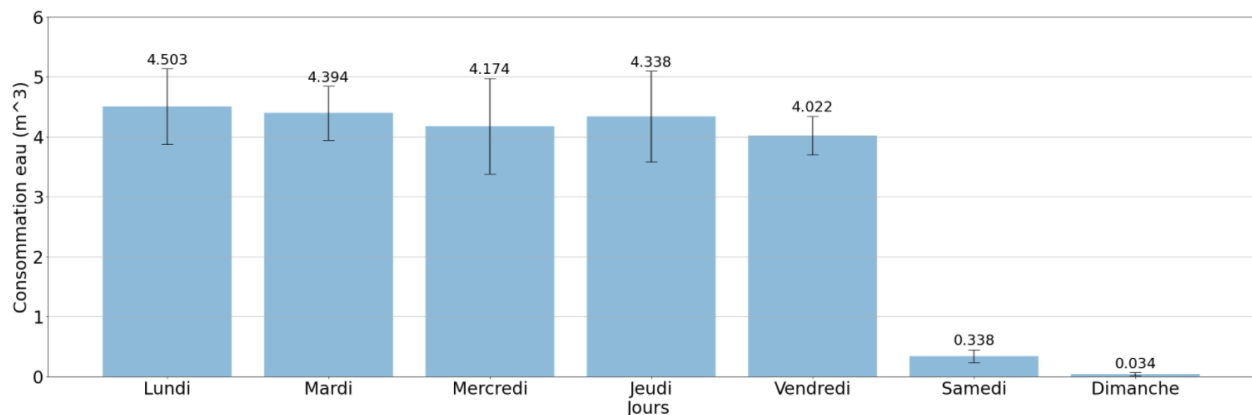


Figure 4.30 - Barres d'erreur des consommations journalières d'eau.

Les catégories des jours de la semaine sont également caractérisées par des valeurs moyennes de consommations similaires. Ces valeurs moyennes sont variables autour de 4 m^3 . Les consommations d'eau sont plus concentrées autour de leurs valeurs moyennes pour les jours (Mardi-Vendredi). Les écarts type relatifs à ces consommations varient autour de 0.4 m^3 . Les consommations des autres jours présentent des valeurs légèrement supérieures (autour de 0.7 m^3). L'écart type des consommations d'eau en fin de la semaine est faible, indiquant ainsi une distribution serrée de ces valeurs autour de leurs moyennes.

En se référant à la phase de planification, la réduction de la consommation d'eau potable était une exigence. Un seuil de consommations conventionnelles sanitaires défini est à respecter.

$$\text{Consommations Conventionnelles (CC) sanitaires communs} \leq 0,60 \text{ CC}_{\text{référence}} \quad (4.1)$$

Les calculs du $\text{CC}_{\text{référence}}$ des sanitaires communs comprennent les consommations des appareils suivants : Chasse d'eau, robinet de lavabo, évier et urinoir. Un besoin de référence journalier de $5.84 \text{ m}^3/\text{jour}$ a été fixé.

Le seuil de consommation correspondant à cette période est déterminé en considérant les jours de travail durant lesquels le bâtiment est normalement occupé. Après avoir soustrait les catégories des jours de Samedi et Dimanche, 50 jours de travail sont identifiés. La consommation d'eau autorisée pour cette période est donc de 175.2 m^3 . La consommation totale d'eau sur la période

considérée est de 214.3 m³. Elle dépasse largement le seuil défini de consommations indiquant ainsi des surconsommations pouvant être liées à des problèmes dans les appareils cités ci-dessus.

Analyse en période de crise

Les consommations journalières ont été largement impactées par l'épidémie vécue. La répartition mensuelle de ces consommations durant la période de crise (Catégories Lundi à Vendredi) est schématisée dans la Figure 4.31.

Pour la période (Mars-Avril) des mesures strictes de confinement étaient appliquées entraînant ainsi des consommations d'eau nulles. Des consommations d'eau élevées ont été observées sur la période (Juillet-Septembre). Celles-ci sont dues à l'ouverture partielle du bâtiment. Cependant ces consommations restent toujours inférieures à celles de la période normale. Les mois restant de l'année sont caractérisés par de faibles consommations d'eau ne dépassant même pas 2 m³/Jour et considérablement inférieures à celles en temps normal.

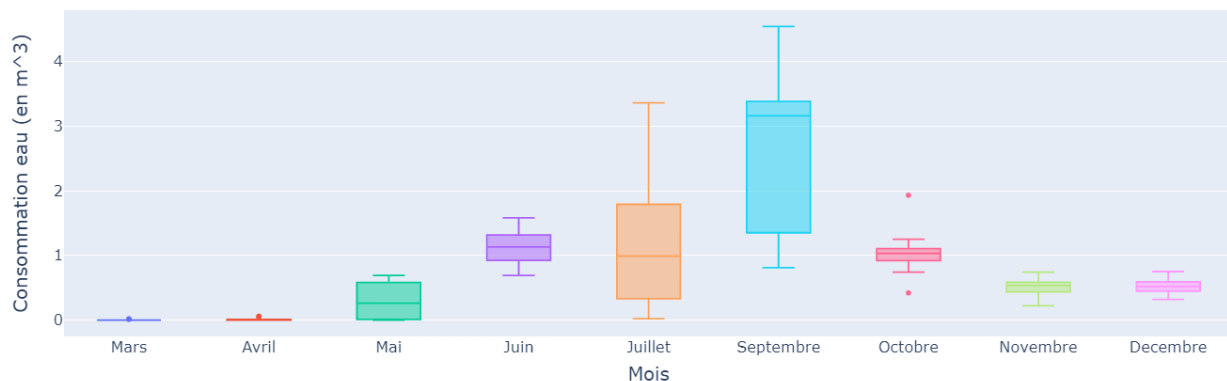


Figure 4.31 - Diagramme en boîte des consommations journalières lors du confinement.

De ce qui précède on peut confirmer que la consommation d'eau est affectée essentiellement par l'occupation du bâtiment. Elle est élevée en temps normal et diminue effectivement en période de confinement. Dans cette analyse on s'est donc servi de cette consommation afin de déterminer le taux d'occupation du bâtiment durant la période de la crise.

Un indicateur de présence est alors introduit. Il fournit une idée préliminaire sur la présence des usagers dans le bâtiment. C'est le quotient de la consommation d'un jour (J) de la semaine et la consommation journalière moyenne de la catégorie (J) calculée en période de fonctionnement normal du bâtiment.

$$\tau_J = \frac{C_J}{\bar{C}_J} \quad (4.2)$$

τ_J = Taux d'occupation du bâtiment le jour J.

C_J = Consommation d'eau du jour J de la période de la crise.

\bar{C}_J = Consommation moyenne d'eau de la catégorie du jour J en période normale (Tableau 4.6).

Les taux d'occupation ont été calculés sur toute la période de la crise sanitaire. Leurs répartitions mensuelles ainsi que leurs valeurs statistiques sont indiquées dans la Figure 4.32 et le Tableau 4.7 respectivement.

Ces taux étaient négligeables sur la période (mi-Mars à Avril) en raison du strict confinement imposé. Les taux d'occupation du mois de Mai varient dans l'intervalle [0,0.17]. Ceux-ci donnent une indication d'un bâtiment faiblement occupé même parfois inoccupé. Ces taux ont subi une légère augmentation en Juin [0.17,0.364] comparés à ceux du mois précédent. L'occupation du bâtiment reste faible également pour ce mois. Une augmentation remarquable de ces taux a été observée pour le mois de Juillet [0,0.835]. Le bâtiment présente généralement une occupation modérée. Cependant, il est caractérisé par des jours où son occupation se rapproche de celle en période normale. L'occupation du bâtiment devient de plus en plus importante au mois de Septembre [0.2,0.92]. Près de la moitié de ses taux d'occupation dépassent 0.752. Les taux d'occupation diminuent de nouveau durant le mois d'Octobre [0.17,0.3]. Des valeurs aberrantes sont notées pour ce mois, mais elles indiquent toujours une faible occupation. Une faible présence des usagers dans le bâtiment caractérise les mois (Novembre-Décembre). Les taux d'occupation sont généralement inférieurs à 0.2.

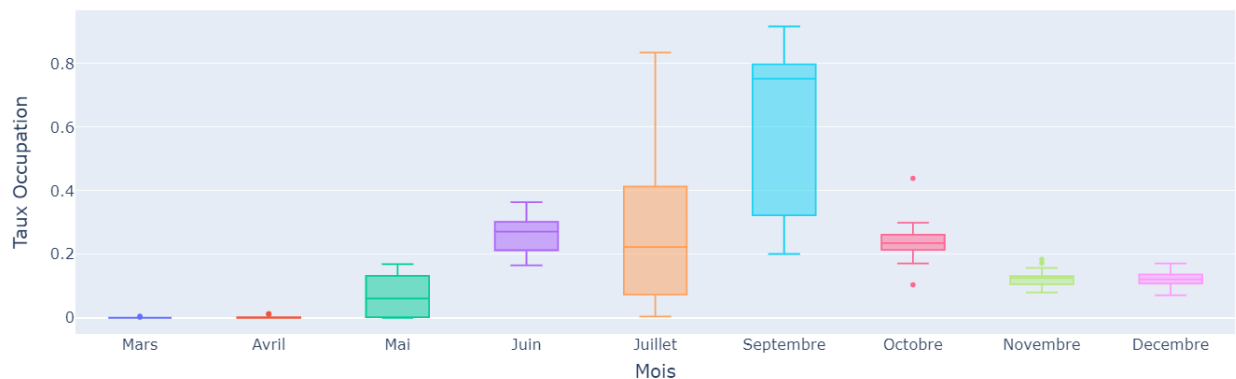


Figure 4.32 - Diagramme en boîte des taux d'occupation durant la période de la crise.

Les valeurs moyennes des taux d'occupations pour les mois (Mars-Mai) sont négligeables. Il en est de même pour leurs écarts type. Les mois (Juin, Juillet et Octobre) présentent des valeurs moyennes comparables de taux d'occupation (autour de 0.2). Ces taux sont moins concentrés autour de leur valeur moyenne au mois de juillet ($\sigma = 0.25$) comparés à ceux des autres mois. Les mois de Novembre et Décembre présentent de faibles valeurs moyennes et écarts type. La valeur moyenne du taux d'occupation la plus importante est observée au mois de Septembre.

Tableau 4.7 - Valeurs statistiques des taux d'occupation par mois en 2020.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Mars	--	--	0	--	0.005	0	0
Avril	--	--	0	0.002	0.013	0.002	0.004
Mai	0	0.002	0.0605	0.132	0.17	0.07	0.06
Juin	0.17	0.213	0.271	0.302	0.364	0.26	0.055
Juillet	0	0.073	0.223	0.413	0.835	0.29	0.25
Septembre	0.2	0.323	0.752	0.798	0.92	0.64	0.25
Octobre	0.17	0.214	0.235	0.261	0.3	0.24	0.062
Novembre	0.08	0.105	0.125	0.132	0.157	0.12	0.03
Décembre	0.071	0.108	0.121	0.136	0.171	0.12	0.025

Ces taux d'occupation journaliers seront utilisés ultérieurement afin d'évaluer le contrôle du système de chauffage. Ils permettent d'identifier la prise en compte de la présence des usagers dans le fonctionnement/dysfonctionnement du chauffage dans le bâtiment. Il en est de même pour les consommations d'électricité. Des gaspillages peuvent être également détectés sur la base de ces taux d'occupation.

4.3.1.2 Consommation d'eau sur l'année 2021

Les consommations d'eau sur la période (Janvier-Avril) ont été considérées. L'impact de la crise sanitaire reste aussi remarquable pour cette période. Les consommations journalières des mois (Janvier, Mars et Avril) sont faibles (Figure 4.33). Elles ne dépassent pas 4 m³/Jour restant toujours inférieures à celles de la période normale. La valeur moyenne de consommations de ces mois est variable autour de 1.4 m³ (Tableau 4.8). Les consommations relatives à ces mois sont légèrement variables autour de cette valeur ($\sigma \cong 1\text{m}^3$).

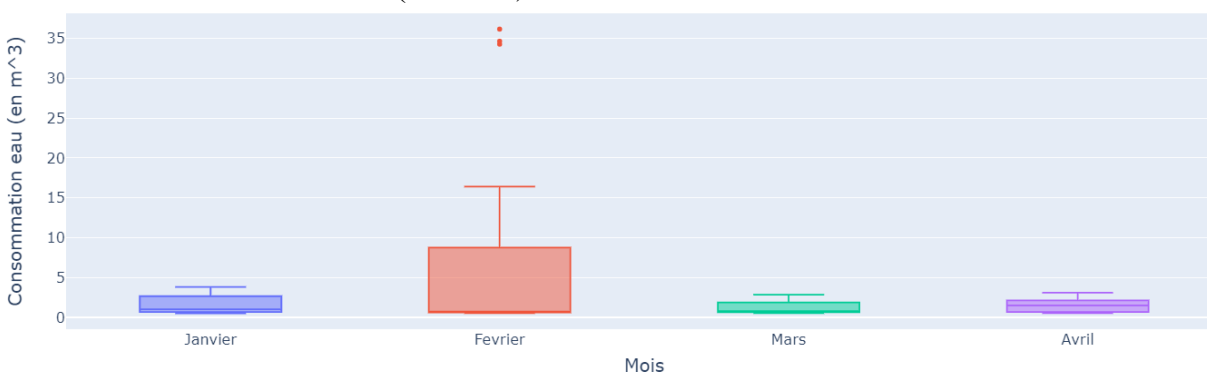


Figure 4.33 - Diagramme en boîte des consommations journalières en 2021.

Tableau 4.8 - Valeurs statistiques des consommations d'eau en 2021.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Janvier	0.49	0.655	0.99	2.64	3.79	1.629	1.2
Février	0.51	0.61	0.7	8.745	16.41	7.583	12.62
Mars	0.52	0.63	0.78	1.86	2.82	1.28	0.8
Avril	0.53	0.64	1.49	2.12	3.08	1.51	0.82

Le mois de Février constitue un cas particulier de cette période. L'effet de la crise sanitaire peut être détectable à partir de la valeur médiane des consommations (0.7 m³). Près de la moitié de ses consommations ne dépassent pas 1 m³/Jour. D'autre part, des consommations journalières élevées, dépassant largement celles de la période normale peuvent être notées à partir des valeurs du 3^{ème} quartile, des valeurs maximales et des valeurs aberrantes pouvant atteindre 30 m³/Jour. La Figure 4.34 illustre ces valeurs excessives de consommations journalières d'eau observées sur la semaine (11-17) de ce mois. Ces consommations anormales peuvent être dues à des activités particulières se produisant durant cette période. Elles peuvent être aussi un indicateur de surconsommations causées par des fuites ou par des problèmes liés aux sanitaires (appareils et équipements).

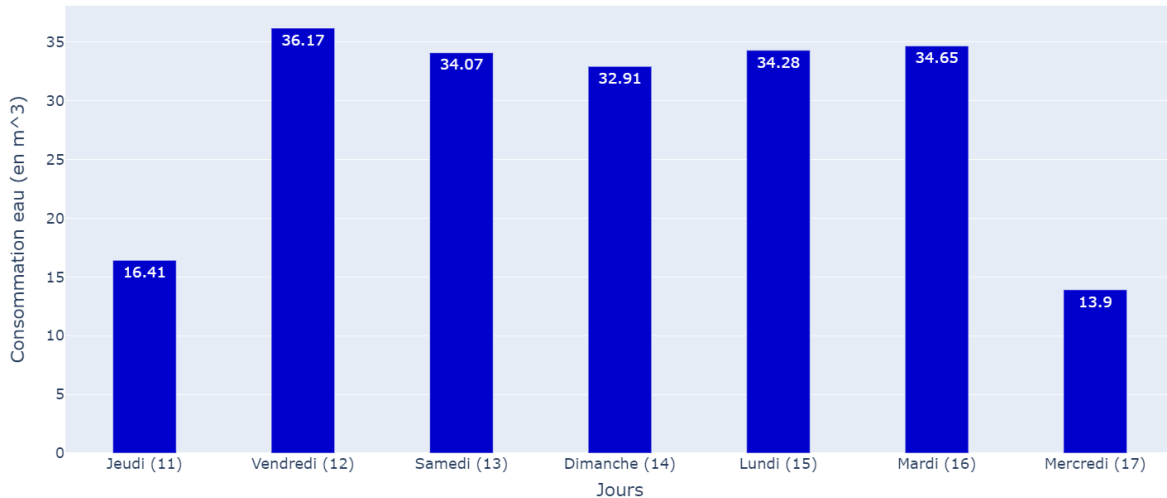


Figure 4.34 - Consommation d'eau d'une semaine du mois de Février 2021.

Les taux d'occupation du bâtiment étaient également calculés pour cette période. Leurs répartitions sont indiquées dans la Figure 4.35. Les taux d'occupation du mois de Février sont les seuls à dépasser la valeur 1 en raison des consommations journalières beaucoup plus importantes que celles en temps normal. Ces taux d'occupation anormaux sont ensuite éliminés et la nouvelle répartition est illustrée dans la Figure 4.36. Les valeurs statistiques associées sont aussi indiquées dans le Tableau 4.9.

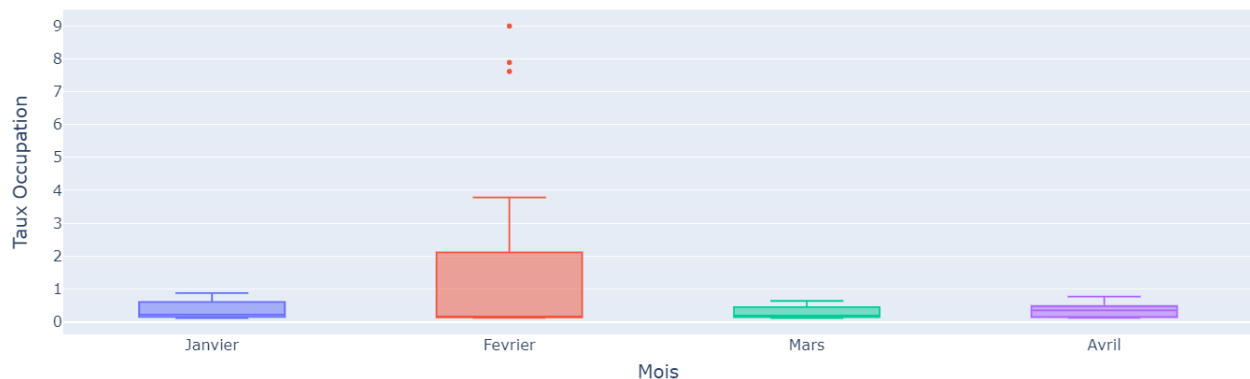


Figure 4.35 - Diagramme en boîte des taux d'occupation de la période 2021.

Les valeurs minimales et du 1^{er} quartile sont similaires pour tous les mois (0.12 et 0.15), indiquant ainsi que le bâtiment est faiblement occupé sur près de 25% de cette période.

Après l'élimination des consommations excessives du mois de Février, on remarque que celui-ci est caractérisé généralement par de faibles taux d'occupations [0.12,0.17]. Cependant, il présente toujours des valeurs aberrantes indiquant une occupation qui tend parfois vers celle de la période normale. Les mois de Janvier et Avril présentent des taux d'occupation élevés montrant ainsi une présence importante des usagers dans le bâtiment. Des occupations modérées sont indiquées par la répartition des taux relatifs aux mois de Mars.

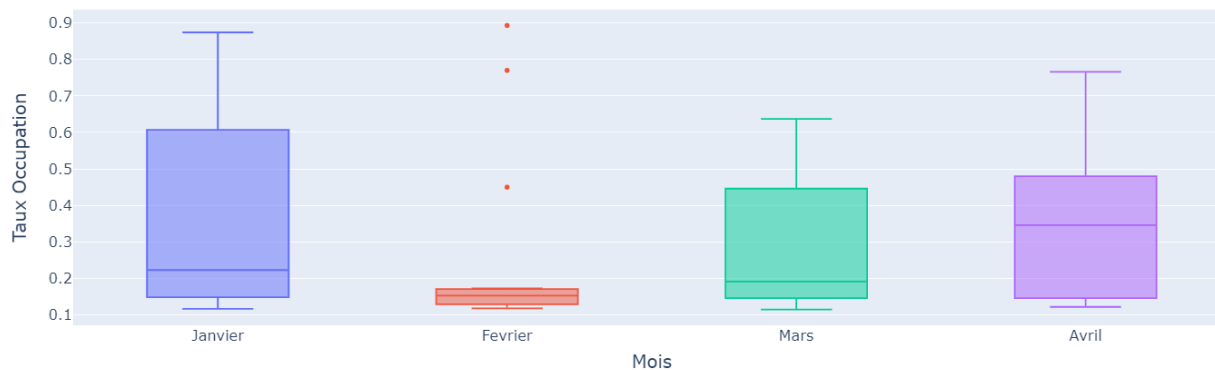


Figure 4.36 - Diagramme en boîte des taux d'occupation après élimination des surconsommations de Février.

Les valeurs moyennes sont comparables pour tous les mois. Elles sont variables autour de 0.4 aux mois Janvier et Avril, et autour de 0.3 pour les autres mois. D'autre part, Les taux relatifs aux mois de Mars et Avril sont plus concentrés autour de leurs moyennes ($\sigma \cong 0.2$).

Tableau 4.9 - Valeurs statistiques des taux d'occupation en 2021.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Janvier	0.12	0.15	0.22	0.61	0.87	0.38	0.28
Février	0.12	0.13	0.15	0.17	0.173	0.26	0.25
Mars	0.12	0.15	0.19	0.44	0.63	0.3	0.19
Avril	0.12	0.15	0.34	0.48	0.76	0.36	0.2

4.3.2 Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre

Cette partie introduit la méthode d'évaluation des consommations d'énergie primaire (C_{ep}) et des émissions des gaz à effet de serre (GES).

4.3.2.1 Calcul des C_{ep}

Le calcul des C_{ep} peut être résumé en trois étapes essentielles détaillées dans ce qui suit (Figure 4.37).

Dans la première, il s'agit de déterminer les types et les valeurs de consommations annuelles d'énergie finale (C_{ef}) du bâtiment. Dans notre cas d'étude, les consommations d'énergie du bâtiment comprennent principalement les consommations liées au chauffage, à l'éclairage des locaux et aux appareils électriques. Ces consommations sont à l'origine des émissions des gaz à effet de serre. Celles-ci sont recueillies par l'intermédiaire des compteurs installés dans le bâtiment. Elles seront détaillées séparément par type dans les parties suivantes.

Le chauffage du bâtiment est assuré par l'intermédiaire d'un réseau de chauffage urbain qui alimente le campus de la cité scientifique. Le combustible utilisé durant la période de chauffage normal est le gaz naturel.

L'électricité dans le bâtiment est assurée en partie par le nucléaire. Le bâtiment produit également de l'énergie solaire à partir de cellules photovoltaïques (PV) couvrant ainsi une portion de ses besoins en électricité.

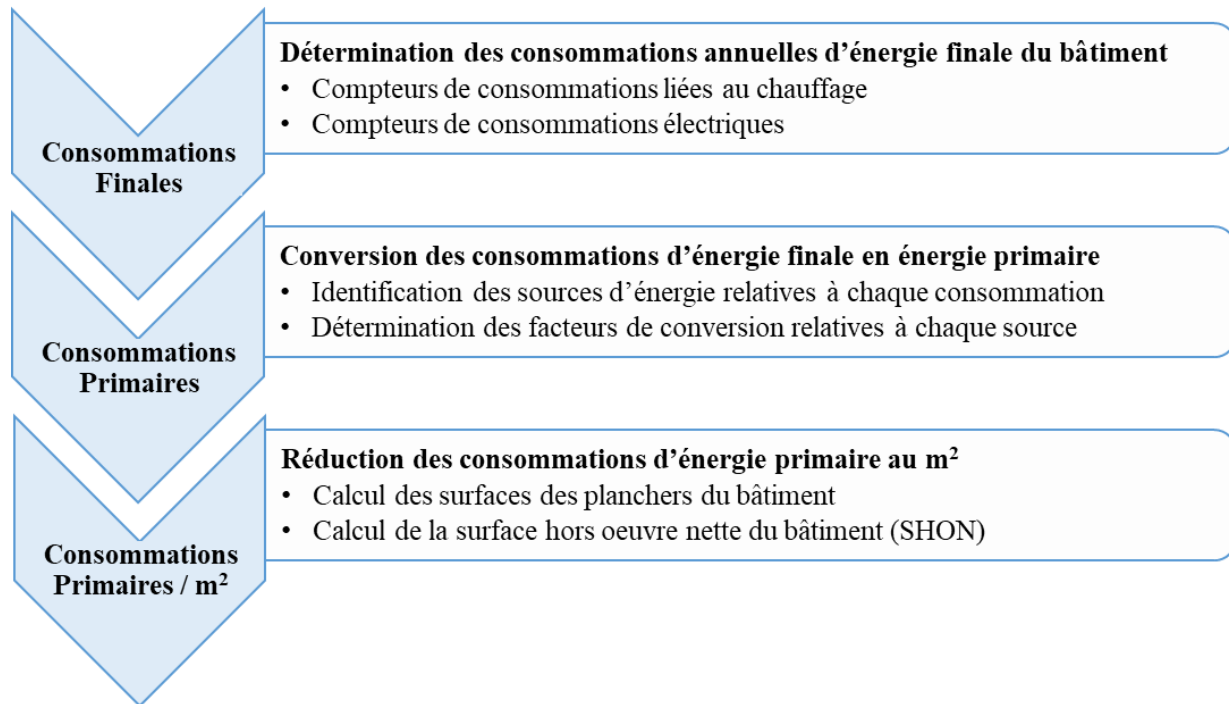


Figure 4.37 - Méthode d'évaluation des C_{ep} .

La deuxième étape consiste à convertir les consommations d'énergie finale en énergie primaire. L'énergie primaire est l'énergie sous sa forme initiale, avant qu'elle ne soit transformée en énergie secondaire (finale) transportée vers les utilisateurs finaux. Un facteur d'énergie primaire (FEP) est défini à cette fin. Il indique la quantité d'énergie primaire nécessaire pour fournir une unité d'énergie secondaire.

L'énergie primaire sera donc calculée à partir de l'équation suivante :

$$C_{ep} = FEP \times C_{ef} \quad (4.3)$$

Le facteur d'énergie primaire a été déterminé à partir du "Référentiel Énergie-Carbone pour les bâtiments neufs" [206]. Ses valeurs sont indiquées dans le Tableau 4.10.

Tableau 4.10 - Facteur d'énergie primaire (FEP).

Vecteur énergétique	FEP
Électricité	2.58
Autres (Gaz , Charbon, produits pétroliers...)	1

Dans la troisième étape l'énergie primaire calculée doit être exprimée en fonction de la surface du bâtiment. L'opération de rénovation obéit à la réglementation thermique RT2012. La surface hors oeuvre nette (SHON)_{RT} du bâtiment doit être donc calculée. Elle est fonction de la surface utile du bâtiment (S_{utile}). La surface utile est la somme des surfaces des planchers du bâtiment de laquelle

sont déduites des surfaces déterminées (planchers de combles, de sous-sols, des balcons, des terrasses, des escaliers...). Dans le cas d'un bâtiment hors usage d'habitation, la surface utile doit être multipliée par un certain facteur afin d'obtenir la $(SHON)_{RT}$. Dans notre cas, ESPRIT peut être considéré comme un bâtiment à bureau, le coefficient correspondant sera donc égal à 1.1 [208].

$$(SHON)_{RT} = 1.1 \times S_{utile} \quad (4.4)$$

La consommation d'énergie primaire totale du bâtiment peut être comparée à l'objectif de consommation d'énergie fixé dans la phase de planification. La rénovation est soumise aux exigences minimales de la RT2012 permettant d'obtenir le label BEPOS Effinergie. Parmi ces exigences, la contrainte suivante doit être vérifiée :

$$Cep_{Bâtiment} < Cep_{MAX RT 2012} \quad (4.5)$$

$Cep_{Bâtiment}$: Consommation d'énergie primaire du bâtiment.

$Cep_{MAX RT 2012}$: Consommation d'énergie primaire autorisée par la RT 2012.

Dans le département nord (zone H_{1a}) la valeur maximale autorisée est de 65 KWhep/m²/an.

4.3.2.2 Calcul des émissions (GES)

Les émissions des gaz à effet de serre sont évaluées à partir des consommations d'énergie finale déterminées dans la première étape de calcul des C_{ep} . Le contenu en équivalent CO₂ de ces quantités d'énergie doit être déterminé. Un facteur d'émission (FE_{GES}) est donc défini pour chaque source d'énergie. Il permet d'identifier la relation entre les émissions de GES et la consommation d'énergie secondaire.

$$\acute{E}missions (GES) = FE_{GES} \times C_{ef} \quad (4.6)$$

Le facteur d'émission de GES a été déterminé à partir de la "Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone" [209]. Ses valeurs pour les sources considérées dans notre cas d'étude figurent dans le Tableau 4.11.

Tableau 4.11 - Facteur d'émission (FE_{GES}).

Vecteur énergétique	FE_{GES}
Gaz naturel	241 g CO ₂ e / KWh PCI
Centrale nucléaire	10 g CO ₂ e / KWh
Énergie Solaire (PV)	55 g CO ₂ e / KWh

4.3.3 Consommation d'énergie liée au chauffage

Les consommations relatives au chauffage de l'année 2020 ont été considérées. Ces consommations sont réparties sur quatre composantes essentielles dans le bâtiment. Elles comprennent celles liées au chauffage du bâtiment rénové, du nouveau bâtiment et des salles de réunion. Le chauffage lié à la ventilation occupe également une part de ces consommations.

Dans la suite, l'évolution des consommations énergétiques sur les périodes de l'année sera évaluée pour chacune des composantes. Le contrôle du système de chauffage sera discuté en fonction de ces consommations et des conditions climatiques. L'impact de la crise sanitaire sur les consommations sera aussi identifié. Les émissions des GES et les C_{ep} relatives à ces consommations seront également déterminées.

4.3.3.1 Consommations du bâtiment rénové

Les consommations mensuelles du bâtiment rénové sont illustrées dans la Figure 4.38. Les consommations varient selon qu'il s'agit d'une période chauffée ou non. Le bâtiment est généralement chauffé sur une période s'étendant du mois d'Octobre jusqu'à mi-Avril.

Les consommations d'énergie de chauffage les plus élevées sont observées au début et à la fin de l'année (Janvier, Février et Décembre). Ces consommations sont modérées pour les mois (Mars et Novembre). Les consommations les moins importantes sont associées aux mois (Avril - Octobre) correspondant à la fin et au début de la période chauffée respectivement.

Une interprétation directe de ces consommations paraît difficile. Ces consommations sont soumises aux effets de deux facteurs principaux. L'impact de la crise sanitaire s'est ajouté à celui des conditions climatiques sur cette année. Afin d'établir une explication fiable de ces effets, l'analyse sera conduite en trois étapes. La première se concentre sur la variation des consommations d'énergie en fonctions des catégories de jours en période normale. La deuxième introduit la notion du degré jour unifié (DJU) permettant d'évaluer l'impact du climat sur les consommations énergétiques, en d'autres termes le contrôle du chauffage. La troisième traite de l'effet de la crise sanitaire sur les consommations du bâtiment.

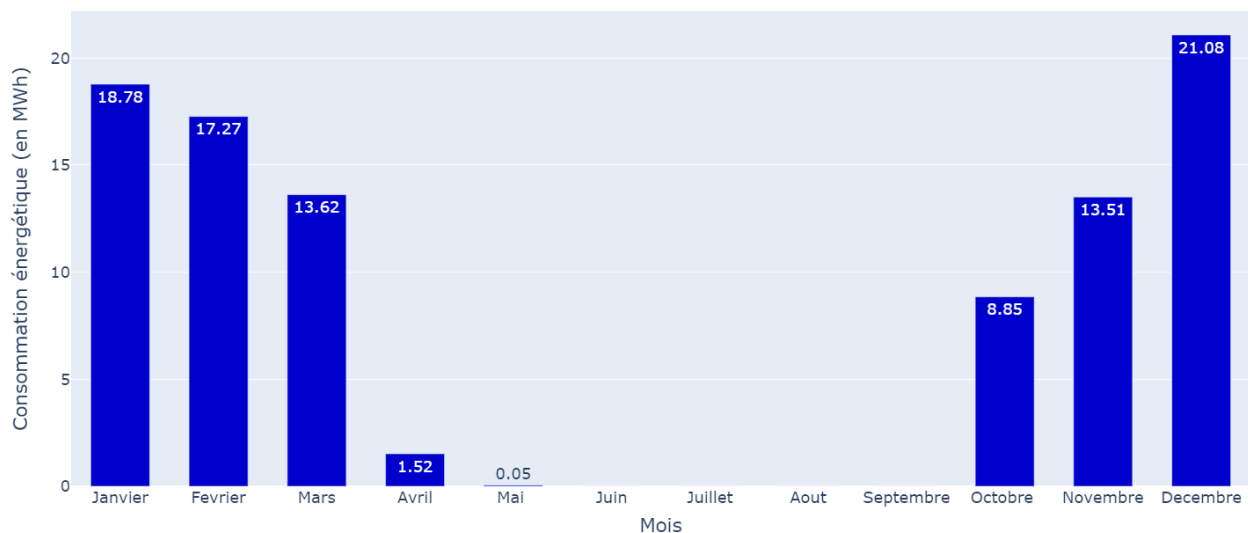


Figure 4.38 - Consommation mensuelle d'énergie de chauffage du bâtiment rénové.

Analyse en temps normal

Cette analyse a pour but d'identifier l'évolution des charges de chauffage en fonction des catégories des jours de la période normale. Huit catégories ont été considérées (Lundi à Dimanche et Vacances). La répartition des consommations en fonction de ces catégories est présentée dans la Figure 4.39.

Les distributions des charges de chauffage sur les catégories des jours de la semaine sont comparables. Les charges de chauffage des catégories (Mercredi et Vendredi) sont approximativement variables dans l'intervalle [0.5,0.8] MWh (Tableau 4.12). Celles-ci se caractérisent aussi par des valeurs assez proches de médiane et de quartiles.

Des similarités ainsi que de faibles différences peuvent être détectées pour les autres catégories des jours de la semaine. Les valeurs de la médiane et du 3^{ème} quartile sont similaires. La valeur minimale de consommation de la catégorie Lundi est un peu plus importante que celles des deux autres. Le cas contraire est observé pour sa valeur maximale. Les valeurs du 1^{er} quartile et de la médiane sont aussi moins importantes pour la catégorie Jeudi. Malgré ces différences, les valeurs varient toujours dans les mêmes rangs. Les répartitions de ces catégories peuvent donc être considérées comme comparables.

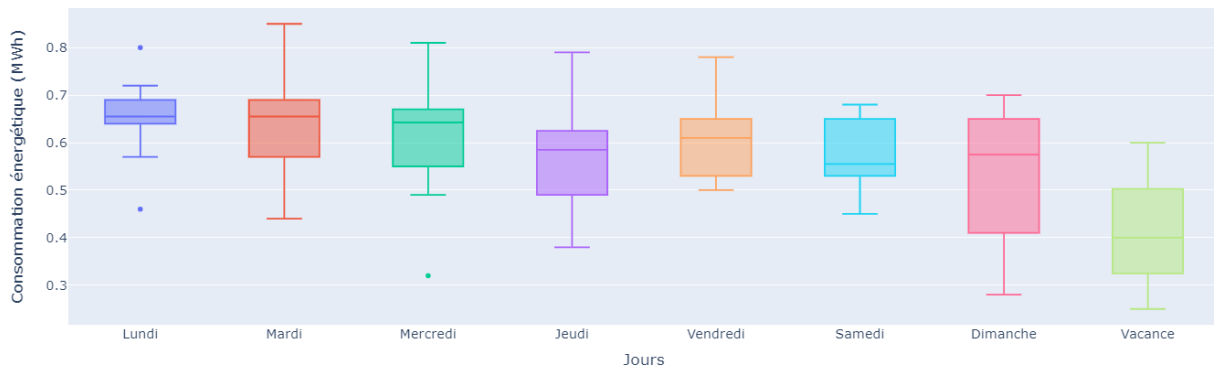


Figure 4.39 - Répartition des charges de chauffage selon les jours de la période normale.

Concernant les catégories de fin de semaine et de Vacances, les charges de chauffage ne sont pas négligeables comme est le cas des consommations d'eau. La catégorie Samedi présente une répartition de consommations dans l'intervalle [0.45,0.68] MWh, proche de celle de (Mercredi-Vendredi).

La catégorie Dimanche présente des valeurs plus faibles de consommation (1^{er} quartile = 0.41 MWh). De plus, des consommations importantes sont observées pour cette catégorie (Médiane = 0.58 MWh).

Il en est de même pour la catégorie Vacances (Médiane = 0.4 MWh et 3^{ème} quartile = 0.5 MWh). Ses consommations sont relativement moins importantes que celles de Dimanche.

Les valeurs moyennes de toutes les catégories à l'exception de Dimanche et Vacances sont variables autour de 0.6 MWh. Des consommations plus serrées autour de ces moyennes sont observées pour les catégories Lundi, Vendredi et Samedi en raison de leurs écarts types un peu plus faibles que ceux des autres.

Les catégories Dimanche et Vacances présentent les valeurs moyennes les plus faibles.

Tableau 4.12 - Valeurs statistiques des charges de chauffage par catégorie.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Lundi	0.57	0.64	0.655	0.69	0.72	0.65	0.09
Mardi	0.44	0.57	0.655	0.69	0.85	0.65	0.125
Mercredi	0.49	0.55	0.642	0.67	0.81	0.61	0.133
Jeudi	0.38	0.49	0.58	0.62	0.79	0.57	0.12
Vendredi	0.5	0.53	0.61	0.65	0.78	0.61	0.082
Samedi	0.45	0.53	0.55	0.65	0.68	0.58	0.077
Dimanche	0.28	0.41	0.58	0.65	0.7	0.52	0.15

Vacance	0.25	0.325	0.4	0.5025	0.6	0.41	0.13
----------------	------	-------	-----	--------	-----	------	------

De cette analyse on peut tirer que le système de chauffage dans le bâtiment est en fonctionnement quasi-continu sur la période normale. Les catégories de fin de semaine et de Vacance ont été identifiées dans la partie précédente comme période inoccupée. Toutes les consommations associées doivent être donc négligeables. Ce constat n'est pas valable pour les consommations énergétiques du bâtiment rénové. Celles-ci atteignent parfois sur ces catégories des valeurs similaires à celles des jours de la semaine.

Analyse tenant compte du DJU

Le DJU est une unité permettant d'évaluer l'écart entre la température moyenne d'une journée et le seuil de température fixé au préalable pour les locaux du bâtiment. En premier lieu, il fournit une indication sur la rigueur du climat. Il est aussi adapté au suivi des consommations d'énergie liées au chauffage durant la saison de chauffe. Celui-ci permet de comparer objectivement les consommations annuelles de chauffage sans incidence de variations climatiques. Il peut être également utilisé dans l'estimation du besoin calorifique du bâtiment.

Le DJU peut être calculé en considérant la méthode appliquée par la météo en France :

$$DJU = T_s - \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (4.7)$$

T_s : Température de référence préétabli.

Dans notre cas d'étude $T_s = 19^\circ\text{C}$ pour les jours de travail. Dans un premier temps, on considère que ce seuil est aussi valable pour les jours de fin de semaine.

T_{max} , T_{min} : Températures maximale et minimale du jour respectivement.

Elles sont déterminées à partir des données météorologiques de la station Lille-Lesquin récupérées à partir du site « Meteoblue¹ ».

Dans cette étude, la notion de DJU a été introduite dans le but d'évaluer la gestion du système de chauffage dans le bâtiment. Les valeurs journalières du DJU ont été déterminées sur la période couvrant les mois (Janvier à mi-Mars et Novembre à Décembre). Les jours de cette période sont regroupés en quatre catégories. Les jours de la semaine appartiennent à la même catégorie intitulée "Semaine". Les autres jours sont répartis sur les catégories de fin de semaine et de Vacance.

Les valeurs calculées de DJU ont servi de base pour la normalisation des consommations journalières en énergie. Des rapports journaliers KWh/DJU ont été calculés sur les catégories de jours définies. Ils sont schématisés en fonction des conditions extérieures de températures (DJU) pour chacune des catégories dans la Figure 4.40.

Considérons la catégorie Semaine en premier lieu. En général, les valeurs des rapports se concentrent approximativement autour d'une même valeur. Elles sont variables autour d'une valeur de référence de 50KWh/DJU environ. Cependant, cette variation est remarquable pour quelques rapports. Plusieurs valeurs s'écartant largement de la référence définie sont détectées.

Chacune de ses valeurs a été traitée séparément afin d'identifier l'origine de cet écart. Les valeurs relatives aux périodes avoisinant celles des rapports anormaux ont été vérifiées. Ces valeurs anormales apparaissent sur des périodes séparées. L'hypothèse de panne peut être rejetée.

¹www.meteoblue.com

Un problème dans le contrôle du système de chauffage peut être à l'origine. Pour chacun des rapports, on a comparé sa consommation d'énergie avec celle d'un autre rapport variable autour de la valeur de référence et présentant le même DJU.

De faibles consommations en énergie ont été associées aux faibles rapports malgré les valeurs importantes de DJU. Le bâtiment durant les périodes caractérisées par ces faibles rapports est donc sous-chauffé. La température intérieure peut être donc maintenue à moins de 19°C.

De même, des surconsommations ont été identifiées pour les valeurs élevées de rapports. Le bâtiment est donc surchauffé et la température peut dépasser le seuil défini.

Les rapports relatifs aux catégories de fin de semaine sont en majorité distribués autour de la valeur de référence. Cependant, ils présentent quelques valeurs anormales dues à une mauvaise estimation des besoins de chauffage. Quant à la catégorie de Vacances, une portion modérée de ses rapports sont considérablement inférieurs à la référence.

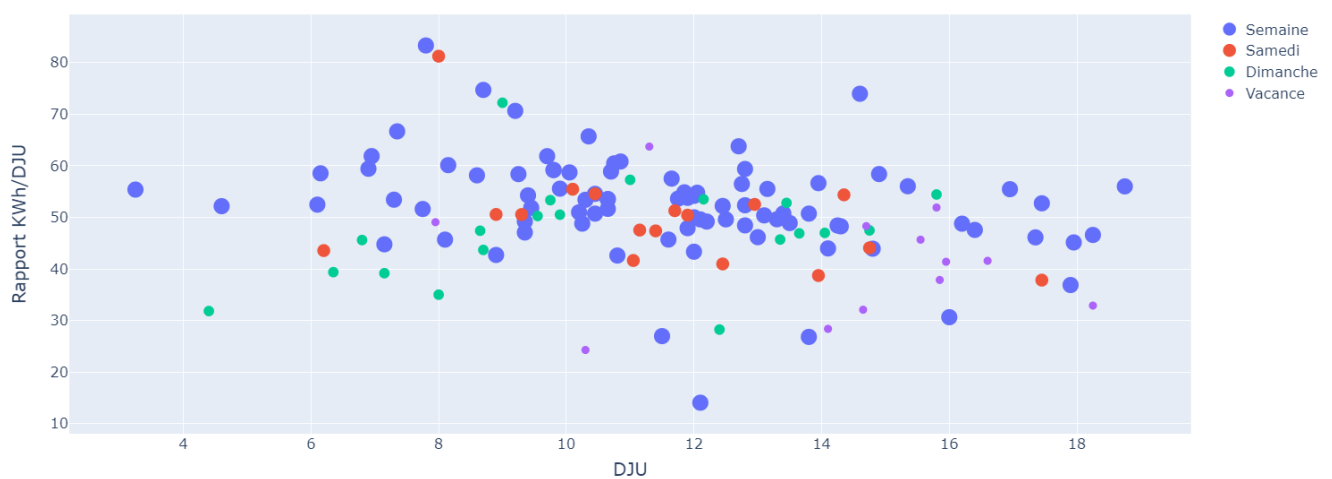


Figure 4.40 - Rapports journaliers KWh/DJU pour chacune des catégories de jours définies.

Le pourcentage des valeurs écartées de la référence ne dépasse pas 18%. Dans la suite, elles seront éliminées. Leur nouvelle représentation est illustrée dans la Figure 4.41.

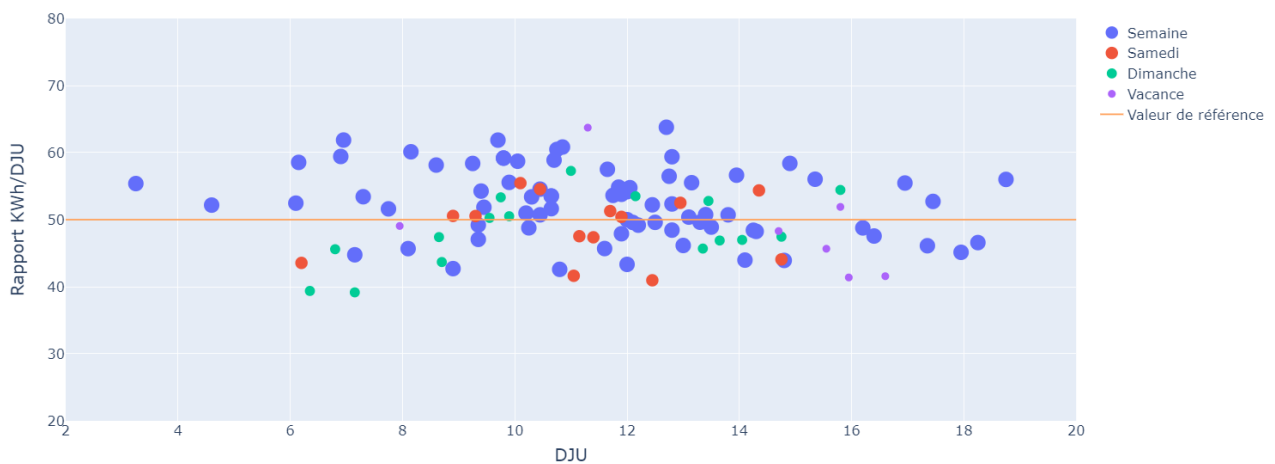


Figure 4.41- Rapports journaliers KWh/DJU pour chacune des catégories de jours définies après correction.

Les rapports sont donc clairement regroupés autour de leur valeur moyenne de référence. Cette répartition indique que le contrôle du système de chauffage est globalement adapté aux variations de conditions climatiques sur toute la période considérée sauf quelques exceptions déjà citées. Le rapport est constant autour d'une certaine valeur. L'augmentation de la valeur de DJU sera accompagnée d'une augmentation de consommation en énergie permettant le maintien de la température de référence. De même, une diminution de consommations sera associée à la diminution de DJU.

La répartition des rapports sur les catégories des Jours est représentée dans la Figure 4.42. Généralement, ils sont variables dans des intervalles comparables [40,65] KWh/DJU pour chacune des catégories. De faibles différences peuvent être détectées.

Lundi, Mardi et Jeudi sont les catégories présentant les valeurs les plus élevées de rapports avec des valeurs médianes de 54 KWh/DJU (Tableau 4.13). Elles présentent des distributions similaires. Mardi présente une valeur maximale plus importante que celles des autres. Jeudi est caractérisé par la valeur minimale la moins importante.

Il en est de même pour les catégories Mercredi et Samedi. La seule différence réside dans leur valeur maximale. Elle est plus élevée pour la première catégorie (61.87 KWh/DJU).

Cette même observation reste valable pour les deux autres catégories Dimanche et Vacances présentant des valeurs moins importantes de rapports (Médiane \cong 48 KWh/DJU).

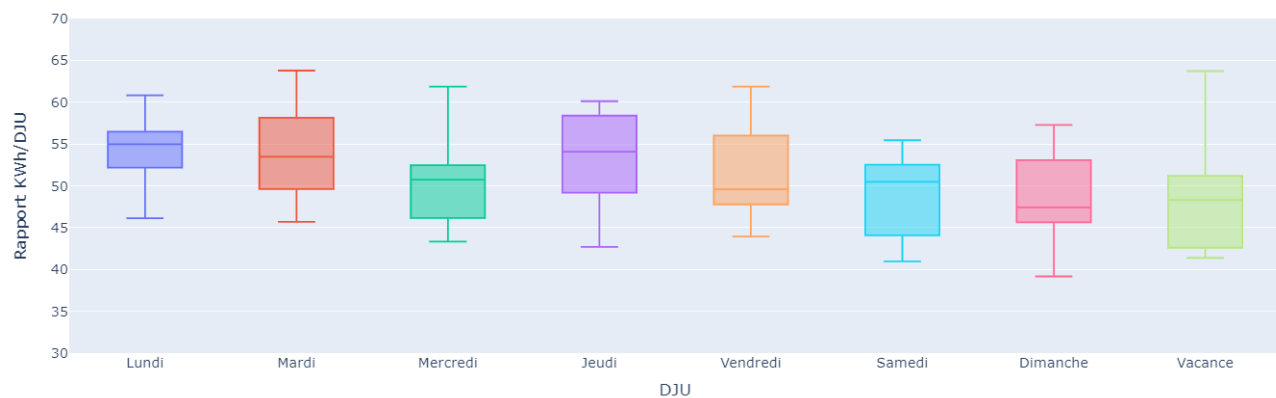


Figure 4.42- Diagramme en boîte des rapports journaliers KWh/DJU pour chacune des catégories de jours définies après correction.

Les valeurs moyennes des catégories reflètent également l'hypothèse de la gestion efficace du système de chauffage. Elles sont toutes variables autour de 50 KWh/DJU. Les rapports relatifs à chacune des catégories présentent aussi des distributions comparables autour de leurs valeurs moyennes à l'exception de Vacances. Elle présente une distribution moins serrée, ayant la valeur la plus élevée d'écart type ($\sigma \cong 7$ KWh/DJU).

Tableau 4.13 - Valeurs statistiques des rapports KWh/DJU par catégorie.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Lundi	46.11	52.17	54.96	56.47	60.83	54.5	4.2
Mardi	45.68	49.62	53.47	58.14	63.78	53.5	4.9
Mercredi	43.33	46.15	50.735	52.46	61.87	50.6	4.9

Jeudi	42.7	49.18	54.085	58.39	60.12	53.3	5.2
Vendredi	43.92	47.78	49.59	56.015	61.86	50.7	5.4
Samedi	40.96	44.07	50.48	52.51	55.45	48.9	4.8
Dimanche	39.16	45.64	47.43	53.06	57.27	48.4	5.2
Vacance	41.38	42.59	48.3	51.19	63.72	48.8	7.6

Analyse en période de crise

Cette analyse vise à vérifier la prise en compte de l'occupation du bâtiment dans le fonctionnement/disfonctionnement du système de chauffage durant les jours de travail de la période Novembre-Décembre.

Le rapport journalier KWh/DJU est employé comme indicateur. Sa variation en fonction des taux d'occupation définis précédemment servira de base à cette vérification. Elle est représentée dans la Figure 4.43.

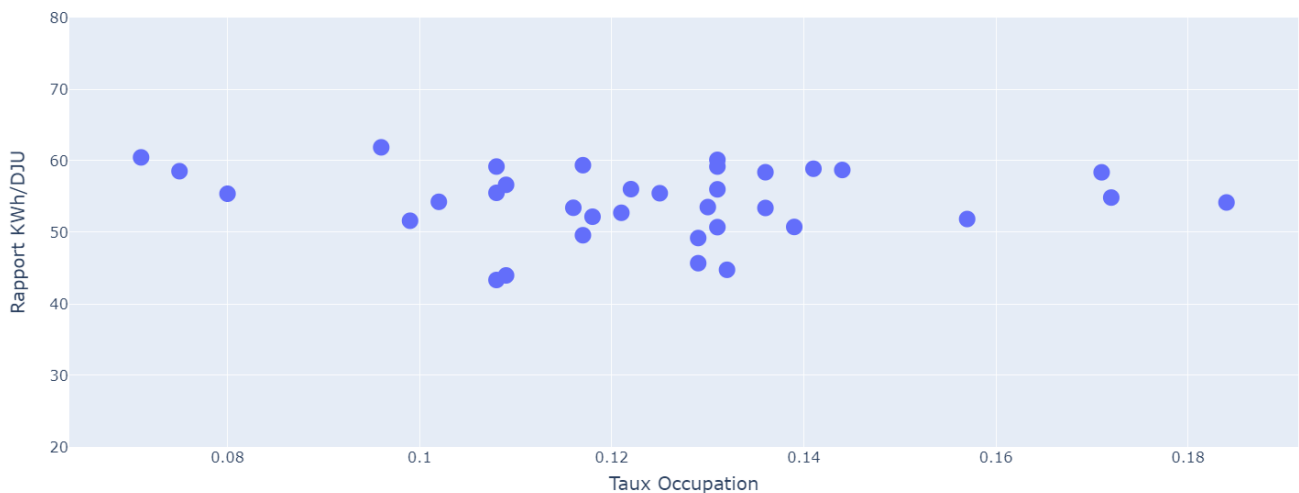


Figure 4.43- Variation du rapport KWh/DJU en fonction du taux d'occupation du bâtiment.

Sur cette période, la présence des usagers dans le bâtiment est relativement faible (taux < 0.2). Les rapports sont variables toujours autour de leur valeur de référence malgré les faibles taux d'occupation du bâtiment. La consommation énergétique n'a pas subi donc de modifications. Ceci indique que les gestionnaires du bâtiment n'ont appliqué aucune mesure spécifique pour profiter de la diminution du taux d'occupation et alors réduire ses consommations énergétiques. Il se peut que le contrôle du chauffage tenant compte de l'occupation du bâtiment soit relativement compliqué dans ce cas d'étude.

Évaluation des C_{ep} et des émissions GES

L'évaluation des C_{ep} et des émissions GES du bâtiment rénové est effectuée conformément à la méthode définie dans la partie 4.3.2. Les détails de calcul figurent dans le Tableau 4.14.

On considère les consommations du bâtiment rénové sur l'année 2020. La consommation annuelle en énergie finale (C_{ef}) de chauffage de ce bâtiment est de 94.68 MWh. La source d'énergie utilisée afin d'assurer le chauffage du bâtiment est le gaz naturel. Le facteur de conversion en énergie

primaire et le facteur d'émission de GES associés sont donc de 1 et de 241 g CO_{2e}/KWh PCI respectivement. La surface utile du bâtiment rénové a été déterminée à partir des plans du bâtiment après avoir éliminé les surfaces indiquées précédemment : S_{utile} = 4464m².

Tableau 4.14 - Calcul C_{ep} et émissions GES.

Données	C _{ep}	Émissions GES
(a) C _{ef} = 94 680 KWh	$\frac{(a) \times (b)}{(e)}$	$\frac{(a) \times (c)}{(e)}$
(b) FEP= 1		
(c) FE _{GES} = 0.241 Kg CO _{2e} /KWh PCI		
(d) S _{utile} = 4464 m ²		
(e) (SHON) _{RT} = 1.1* (d) = 4911 m ²	19.28 KWh/m ² /an	4.64 Kg CO _{2e} /m ² /an

Ces valeurs de C_{ep} et d'émissions seront comparées ultérieurement à celles des autres composantes afin de déterminer laquelle présente la meilleure performance.

4.3.3.2 Consommation du nouveau bâtiment

La même démarche appliquée dans l'analyse des consommations du bâtiment rénové a été conduite sur celles du nouveau bâtiment. Ses consommations mensuelles sont illustrées dans la Figure 4.44. Les charges de chauffage sont modérées au début de l'année (Janvier et Février). Une certaine diminution de consommations est remarquée au cours des mois (Mars et Octobre) de la période chauffée. Cette consommation devient négligeable au mois d'Avril correspondant à la fin de la saison de chauffe. Les consommations augmentent de nouveau pour atteindre les valeurs les plus élevées en fin d'année (Novembre et Décembre).

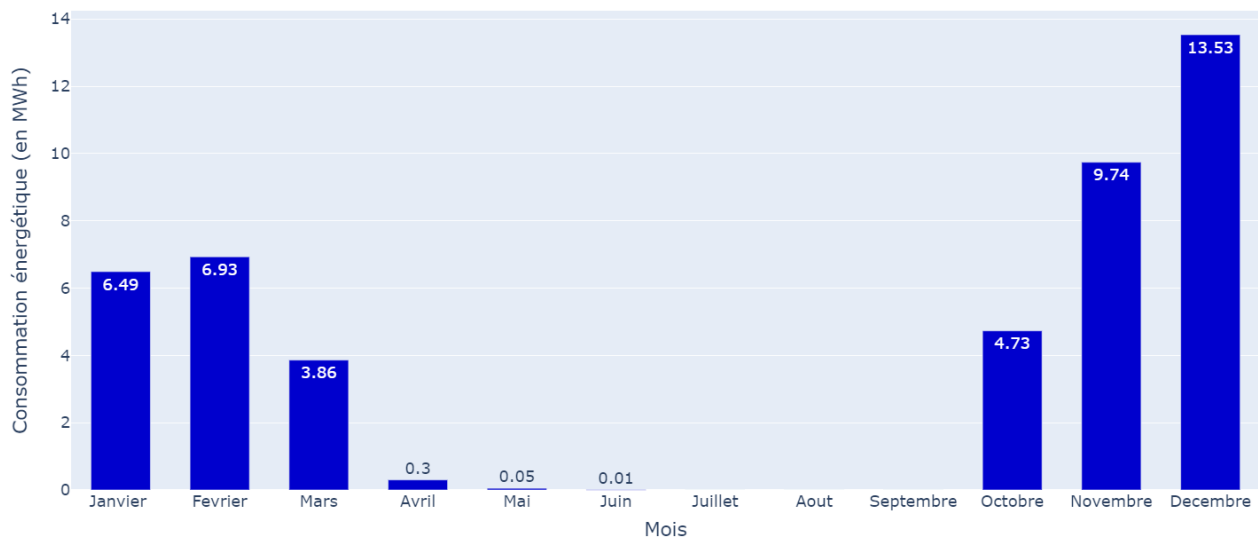


Figure 4.44 - Consommation mensuelle d'énergie de chauffage du nouveau bâtiment.

Dans ce qui suit, une analyse des consommations en temps normal est réalisée. De plus, la gestion du système de chauffage sera évaluée. L'impact de l'occupation du bâtiment sur ses consommations sera aussi étudié. Les émissions de GES et les C_{ep} relatives aux deux composantes du bâtiment (Rénové et Nouveau) seront comparées.

Analyse en temps normal

Généralement, le nouveau bâtiment consomme moins d'énergie que le bâtiment rénové. La répartition journalière de ces consommations est schématisée dans la Figure 4.45. La valeur journalière maximale atteinte en période normale est de 0.33 MWh (Tableau 4.15) considérablement inférieure à celle du bâtiment rénové (0.85 MWh).

Les catégories des jours de la semaine présentent des distributions comparables. Elles sont caractérisées par des valeurs de médianes, de quartiles et des valeurs maximales similaires ($\cong 0.2, 0.22, 0.28, 0.3$ MWh) respectivement. De faibles différences sont observées au niveau de leurs valeurs minimales. Les catégories Lundi et Vendredi ont des valeurs minimales de consommation de 0.16 MWh, un peu plus importantes que celles des autres catégories ($\cong 0.1$ MWh).

Quant aux catégories de fin de semaine, les consommations des Jours de Samedi sont variables dans un intervalle similaire à ceux des jours de la semaine [0.17, 0.28] MWh. Cependant, leurs valeurs de médiane et de 3^{ème} quartile sont inférieures à celles de ces catégories.

La catégorie Dimanche présente des valeurs plus faibles de consommations (médiane = 0.165 MWh). Elle est caractérisée également par des valeurs importantes de consommations (3^{ème} quartile = 0.21 MWh). Il en est de même pour la catégorie de Vacances caractérisée par des valeurs de plus en plus inférieures mais dont une portion peut être évaluée comme importante (maximum = 0.23 MWh).

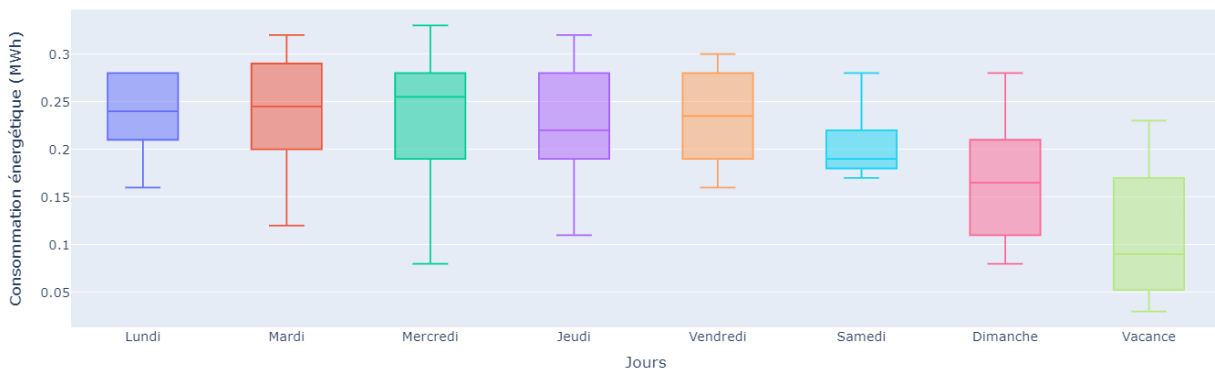


Figure 4.45 - Répartition des charges de chauffage du nouveau bâtiment selon les jours de la période normale.

Les valeurs moyennes de toutes les catégories à l'exception de Dimanche et Vacances sont variables autour de 0.2 MWh. Les consommations des catégories Lundi, Vendredi et Samedi sont plus concentrées autour de leurs valeurs moyennes, ayant des valeurs d'écart types plus faibles comparées à celles des autres catégories.

Les valeurs moyennes les moins élevées correspondent aux catégories Dimanche et Vacances. Les consommations de celles-ci présentent des distributions comparables autour de leurs moyennes ($\sigma \cong 0.08$ MWh).

La conclusion tirée pour le chauffage du bâtiment rénové est appuyée aussi par les consommations du nouveau bâtiment. Le système de chauffage fonctionne tout au long de la période normale. Cependant, les consommations relatives au nouveau bâtiment sont moins importantes.

Tableau 4.15 - Valeurs statistiques des charges de chauffage du nouveau bâtiment par catégorie.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Lundi	0.16	0.21	0.24	0.28	0.28	0.239	0.04
Mardi	0.12	0.2	0.245	0.29	0.32	0.241	0.059
Mercredi	0.08	0.19	0.255	0.28	0.33	0.226	0.078
Jeudi	0.11	0.19	0.22	0.28	0.33	0.227	0.07
Vendredi	0.16	0.19	0.235	0.28	0.3	0.234	0.048
Samedi	0.17	0.18	0.19	0.22	0.28	0.21	0.042
Dimanche	0.08	0.11	0.165	0.21	0.28	0.17	0.07
Vacance	0.03	0.0525	0.09	0.17	0.23	0.112	0.08

Analyse tenant compte du DJU

Les rapports journaliers KWh/DJU relatifs au nouveau bâtiment sont schématisés en fonction des conditions extérieures de températures (DJU) pour chacune des catégories (Semaine, Samedi, Dimanche et Vacance) dans la Figure 4.46.

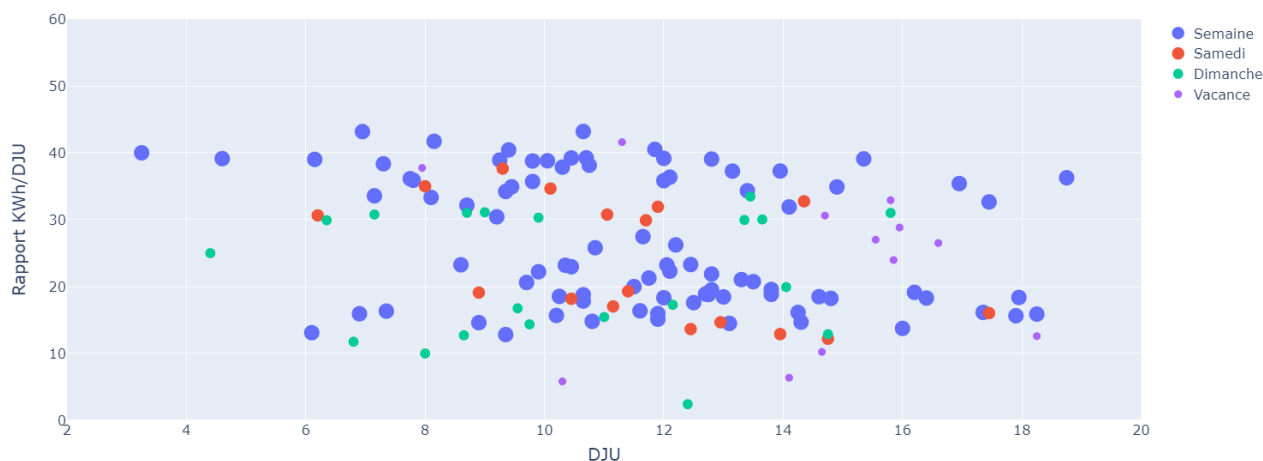


Figure 4.46 - Rapports journaliers KWh/DJU du nouveau bâtiment pour chacune des catégories des jours.

Globalement, une concentration de rapports autour d'une même valeur de référence ne peut être remarquée pour les consommations du nouveau bâtiment. Le regroupement de ces rapports en deux catégories principales est possible. La première couvre les rapports ayant des valeurs variables autour de 20 KWh/DJU. La deuxième comporte les autres rapports répartis autour d'une valeur de 35 KWh/DJU environ. Cette différence de valeurs de référence peut être considérée comme un indicateur d'une anomalie de gestion du système de chauffage. Afin d'établir une explication de l'origine de ce problème, la variation des rapports en fonction de la période chauffée de l'année est illustrée dans la Figure 4.47.

Un changement important des valeurs des rapports est observé entre le début et la fin de l'année. Les rapports relatifs aux mois (Janvier-Février et Mars) sont moins élevés que ceux des mois

(Novembre et Décembre). Cependant, des rapports anormaux sont toujours détectés pour ces deux groupes. Ils ne sont pas assez fréquents.

Pour le premier groupe, quelques valeurs anormales sont faibles et peuvent atteindre des valeurs inférieures à 10 KWh/DJU. Les consommations associées à ces rapports sont donc moins importantes que celles nécessaires à maintenir la température seuil du bâtiment. Une minorité de rapports dépasse aussi 30 KWh/DJU. Ils reflètent donc des consommations inutiles d'énergie accompagnées d'un surchauffage du bâtiment. De même, le second groupe présente des valeurs anormales de rapports inférieures à 25 KWh/DJU.



Figure 4.47 - Variation des rapports journaliers KWh/DJU sur la période chauffée.

Ces valeurs sont dans la suite éliminées. La répartition mensuelle de ces rapports est schématisée dans la Figure 4.48. Les répartitions des rapports sont comparables pour les mois de chaque groupe. Concernant le premier groupe, les rapports du mois de Février sont plus importants que ceux du mois de Janvier. Leur valeur moyenne de 19.95 KWh/DJU (Tableau 4.16) dépasse légèrement celle de Janvier (17.4 KWh/DJU). Ces deux mois présentent des distributions comparables autour de leurs valeurs moyennes, ayant des valeurs similaires d'écart type.

Les mois du second groupe sont caractérisés par des valeurs statistiques similaires. Cependant, la valeur minimale et la valeur moyenne relatives au mois de Novembre dépassent faiblement celles de Décembre.

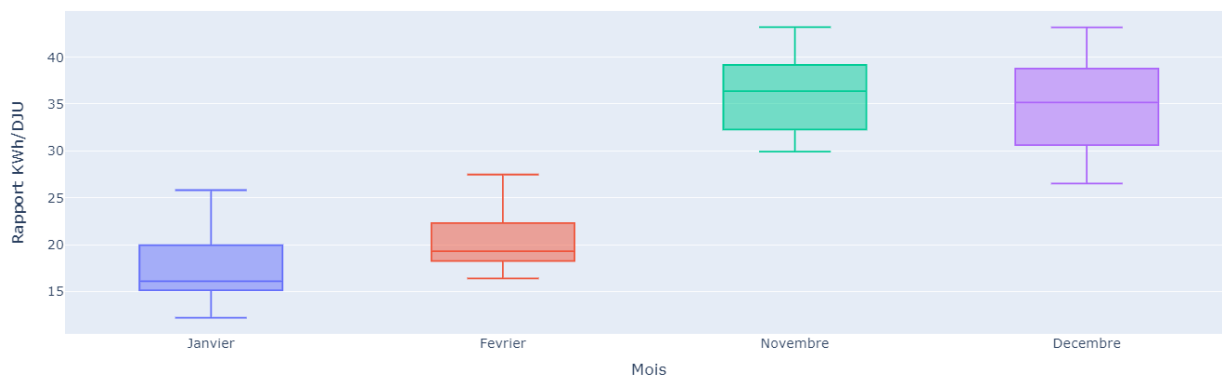


Figure 4.48 - Diagramme en boîte des rapports journaliers KWh/DJU sur la période chauffée.

Tableau 4.16 - Valeurs statistiques des rapports KWh/DJU par catégorie.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Janvier	12.2	15.13	16.1	19.93	25.81	17.36	3.51
Février	16.38	18.25	19.3	22.28	27.47	19.95	3.37
Novembre	29.92	32.28	36.36	39.16	43.19	36.04	3.9
Décembre	26.51	30.61	35.15	38.78	43.17	34.7	4.3

Analyse en période de crise

La variation des rapports de KWh/DJU en fonction des taux d'occupation définis est aussi représentée dans le cas du nouveau bâtiment pour les jours de travail de la période Novembre-Décembre (Figure 4.49).

La même observation décelée dans le cas du bâtiment rénové reste valable. Le taux d'occupation n'a aucune influence sur le contrôle du système de chauffage. Les rapports sont toujours variables dans les mêmes rangs définis précédemment pour cette période. Ils sont aussi importants malgré le faible taux d'occupation du bâtiment. Cette situation aboutit donc à des consommations énergétiques inutiles.

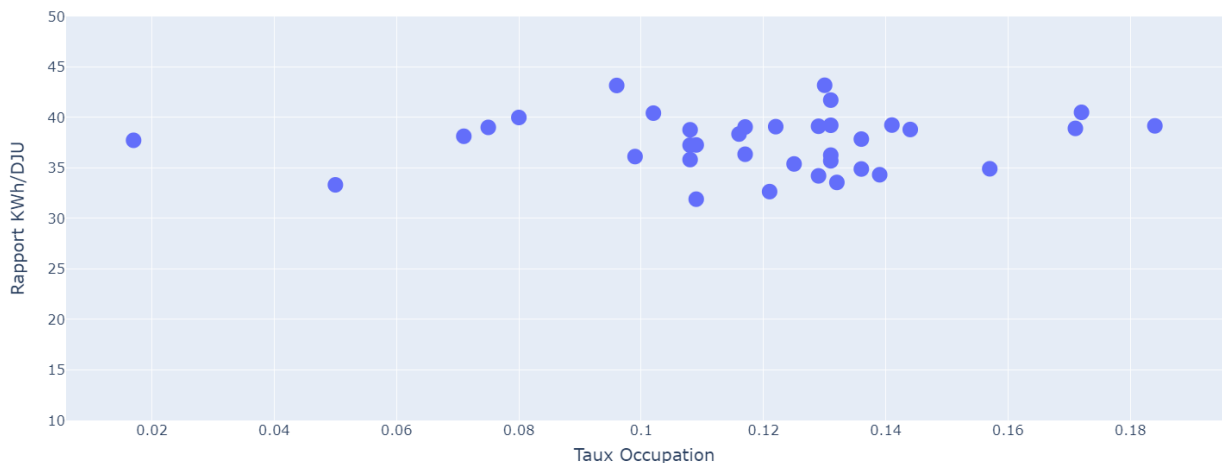


Figure 4.49- Variation du rapport KWh/DJU du nouveau bâtiment en fonction du taux d'occupation.

Évaluation des C_{ep} et des émissions GES

Les mêmes données de calcul définies dans le cas du bâtiment rénové peuvent être utilisées. Les seules différences seront la consommation d'énergie finale et la surface utile du bâtiment. Les détails de calcul figurent dans le Tableau 4.17. Les valeurs de C_{ep} et des émissions de GES relatives au nouveau bâtiment sont largement inférieures à celles du bâtiment rénové (19.28 KWh/m²/an et 4.64 Kg CO_{2e}/m²/an). Celles-ci confirment l'observation tirée des analyses précédentes. Ces analyses ont montré de faibles consommations du nouveau bâtiment comparées à celles du bâtiment rénové. Le nouveau bâtiment est donc plus performant énergétiquement.

Tableau 4.17 - Calcul C_{ep} et émissions GES.

Données	C_{ep}	Émissions GES
(a) $C_{ef} = 45\ 640\ \text{KWh}$	$\frac{(a) \times (b)}{(e)}$	$\frac{(a) \times (c)}{(e)}$
(b) $FEP = 1$		
(c) $FE_{GES} = 0.241\ \text{Kg CO}_2\text{e/KWh PCI}$		
(d) $S_{utile} = 6285\ \text{m}^2$		
(e) $(SHON)_{RT} = 1.1 * (d) = 6913.5\ \text{m}^2$	6.6 KWh/m ² /an	1.59 Kg CO _{2e} /m ² /an

4.3.3.3 Consommations des salles de réunion

Les consommations mensuelles des salles de réunion sont illustrées dans la Figure 4.50. Elles sont importantes en début et en fin d'année (Janvier, Février et Décembre). Elles diminuent au cours de la période chauffée pour atteindre des valeurs intermédiaires aux mois de Mars et Novembre. Ces consommations sont les plus faibles au mois d'Octobre et négligeables au mois d'Avril. Les mêmes analyses conduites sur les consommations des autres composantes seront menées également sur ces consommations.

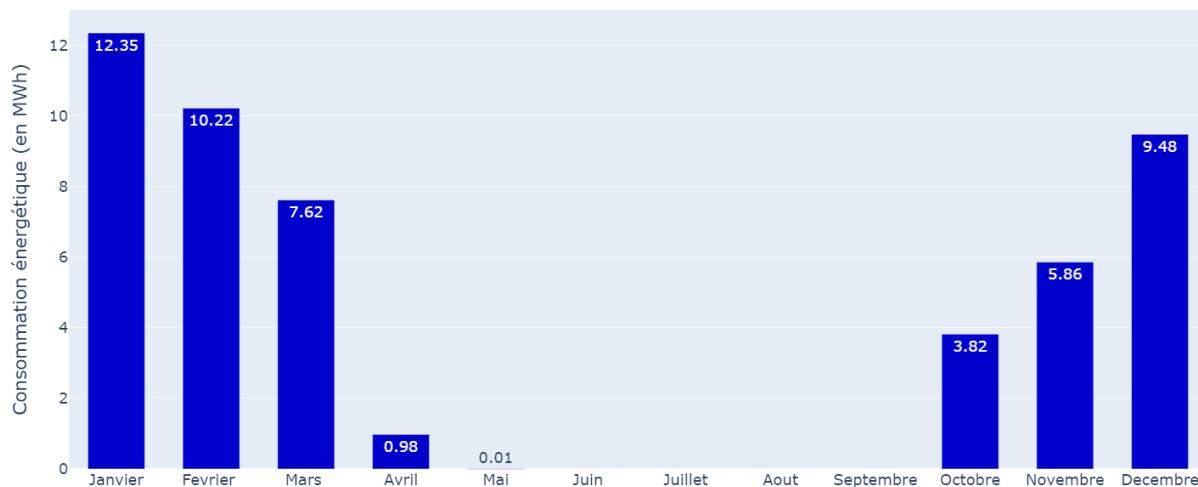


Figure 4.50 - Consommation mensuelle des salles de réunion.

Analyse en temps normal

La répartition des consommations journalières en période normale est illustrée dans la Figure 4.51. En général, les consommations sont variables dans des intervalles comparables sur les catégories (Lundi à Samedi). Il en est de même pour celles des catégories (Dimanche et Vacances).

Les consommations sur les catégories Lundi et Mardi présentent des valeurs statistiques similaires (Tableau 4.18). La catégorie Mercredi est caractérisée par des consommations variables dans un intervalle serré [0.34,0.42] MWh. Des valeurs aberrantes faibles et élevées sont aussi observées pour cette catégorie. Les catégories (Jeudi à Samedi) présentent à la fois des similarités et des différences. Les valeurs minimales de consommations et celles du 3^{ème} quartile sont comparables. Les valeurs du 1^{er} quartile et de médiane sont plus importantes sur les Jours de Vendredi. La valeur maximale la plus importante correspond aux jours Samedi.

Concernant les catégories Dimanche et Vacance, des consommations un peu plus faibles peuvent être détectées (Min = 0.15 MWh et 1^{er} quartile \cong 0.2 MWh) comparées à celles des autres catégories. Des valeurs importantes sont aussi observées (3^{ème} quartile \cong 0.4 MWh). Les valeurs du 3^{ème} quartile relatives à la catégorie Dimanche dépassent celles de Vacance.

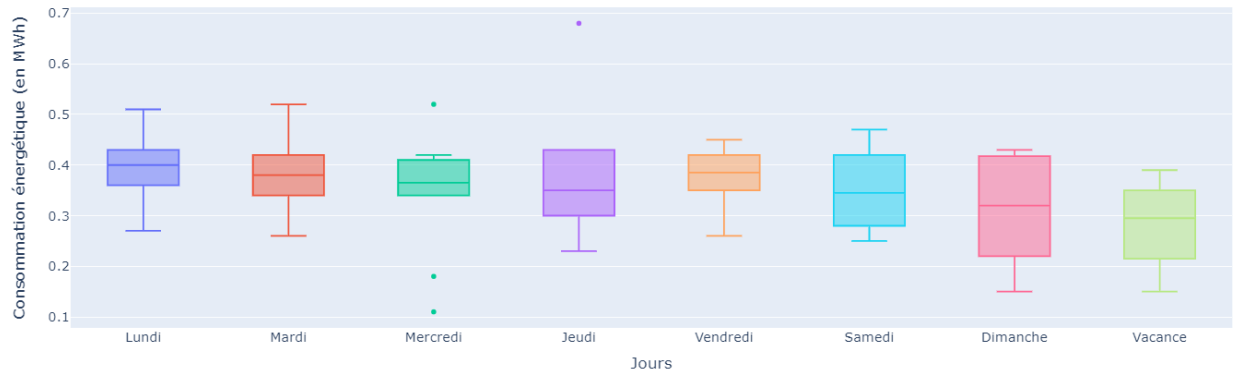


Figure 4.51 - Répartition des charges de chauffage des salles de réunion selon les jours de la période normale.

Les valeurs moyennes de toutes les catégories sont variables autour de 0.3 MWh. Les catégories Dimanche et Vacance présentent les valeurs moyennes les moins importantes. Les consommations relatives à ces catégories présentent des distributions similaires autour de leurs valeurs moyennes, ayant toutes des valeurs d'écart types variables autour de 0.1 MWh.

Pour cette composante aussi, on peut tirer que le chauffage est en fonctionnement continu sur la période normale générant ainsi des surconsommations d'énergie.

Tableau 4.18 - Valeurs statistiques des charges de chauffage des salles de réunions par catégorie.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Lundi	0.27	0.36	0.4	0.43	0.51	0.39	0.06
Mardi	0.26	0.34	0.38	0.42	0.52	0.38	0.08
Mercredi	--	0.34	0.365	0.41	0.42	0.34	0.12
Jeudi	0.23	0.3	0.35	0.43	--	0.37	0.12
Vendredi	0.26	0.35	0.385	0.42	0.45	0.37	0.05
Samedi	0.25	0.28	0.345	0.42	0.47	0.35	0.07
Dimanche	0.15	0.22	0.32	0.42	0.43	0.31	0.1
Vacance	0.15	0.21	0.29	0.35	0.39	0.28	0.09

Analyse tenant compte du DJU

La variation des rapports journaliers KWh/DJU en fonction des conditions climatiques extérieures est illustrée dans la Figure 4.52.

Une concentration des rapports autour d'une valeur de référence 25 KWh/DJU peut être observée pour cette composante.

Cependant, des valeurs anormales peuvent être également détectées. Les valeurs anormales faibles, correspondent à des consommations négligeables que présentent certains jours de la catégorie

Dimanche. Les valeurs élevées sont observées pour toutes les catégories sauf Vacances. Elles correspondent à des surconsommations dépassant les valeurs indispensables au maintien de la température seuil.

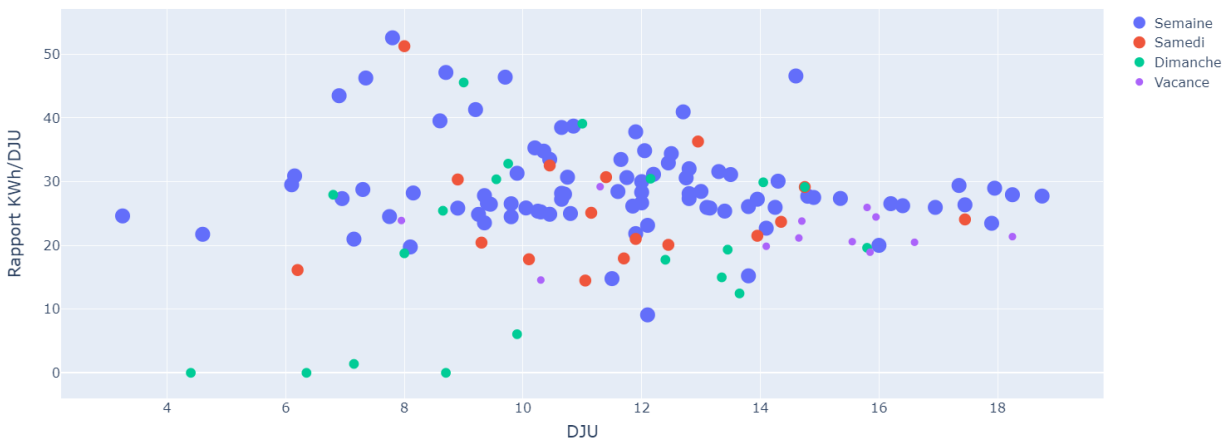


Figure 4.52 - Rapports journaliers KWh/DJU des salles de réunion pour chacune des catégories de jours définies.

Ces valeurs ne sont pas assez fréquentes et seront ensuite éliminées. La nouvelle répartition des rapports est schématisée dans la Figure 4.53. Leur concentration autour de la valeur de référence est donc clairement observée. Ceci reflète le contrôle adapté du système de chauffage.

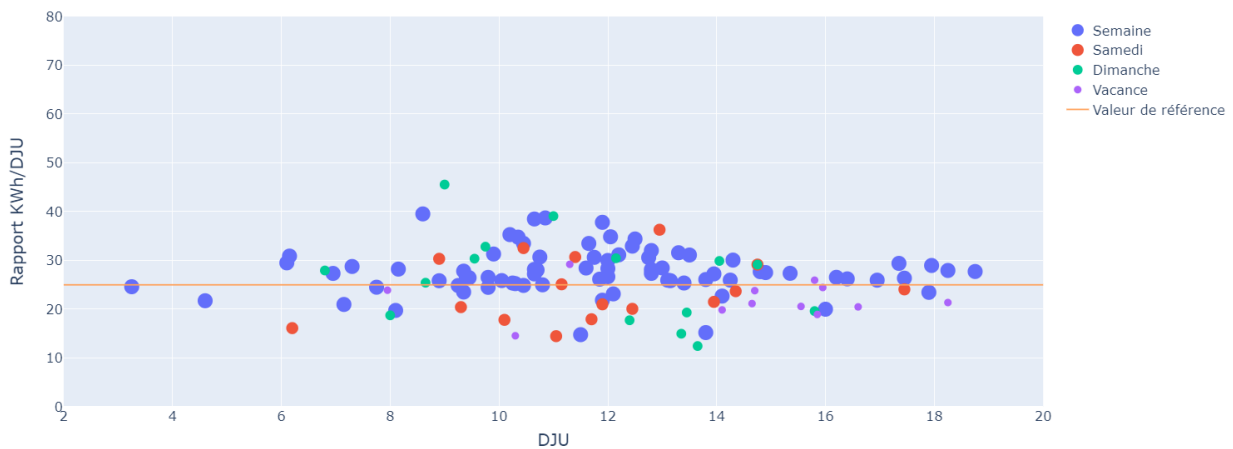


Figure 4.53- Rapports journaliers KWh/DJU des salles de réunion après correction.

La distribution des rapports en fonction des catégories de la semaine est illustrée dans la Figure 4.54. Les rapports sont variables dans des intervalles serrés sur les catégories Mardi, Mercredi et Vendredi. Mardi et Mercredi présentent des similarités dans leurs valeurs statistiques (Tableau 4.19). Vendredi présente des valeurs moins importantes mais toujours dans les mêmes rangs. Lundi et Jeudi présentent aussi des similarités dans la distribution des rapports. Cependant, la valeur maximale de la catégorie Lundi est plus importante. Il en est de même pour les catégories de fin de semaine (Samedi et Dimanche). Cependant, les valeurs les plus importantes sont observées les jours de Dimanche (Médiane = 27.9 MWh). Les rapports relatifs à la catégorie Vacances sont répartis dans un intervalle moins important.

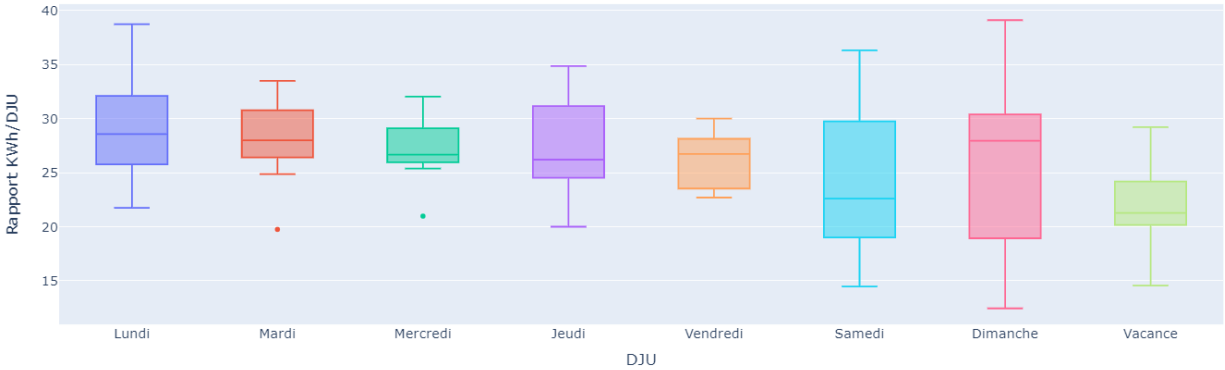


Figure 4.54- Diagramme en boîte des rapports journaliers KWh/DJU des salles de réunion après correction.

Les valeurs moyennes des catégories varient autour de 25 KWh/DJU. La valeur moyenne la plus importante correspond aux rapports relatifs aux jours de Lundi. La catégorie Vacances présente la moyenne la plus faible. Les rapports présentent des distributions moins concentrées autour de leurs valeurs moyennes pour les catégories de fin de semaine puisqu'elles ont les valeurs les plus élevées d'écart types.

Tableau 4.19 - Valeurs statistiques des rapports KWh/DJU des salles de réunion.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Lundi	21.7	25.7	28.5	32.1	38.7	32.48	4.83
Mardi	25.37	25.95	26.66	29.1	32.03	29.8	3.36
Mercredi	24.8	26.4	27.9	30.7	33.4	27.8	4.11
Jeudi	20	24.5	26.2	31.14	34.85	28.24	4.17
Vendredi	22.7	23.52	26.72	28.12	30	27.1	3.34
Samedi	14.5	19	22.6	29.7	36.29	28.7	6.36
Dimanche	12.45	18.93	27.94	30.38	39	29.68	7.59
Vacance	14.56	20.17	21.26	24.17	29.2	21.8	3.75

Analyse en période de crise

Similairement au cas des autres composantes, l'occupation du bâtiment n'a pas affecté le contrôle du système de chauffage (Figure 4.55).

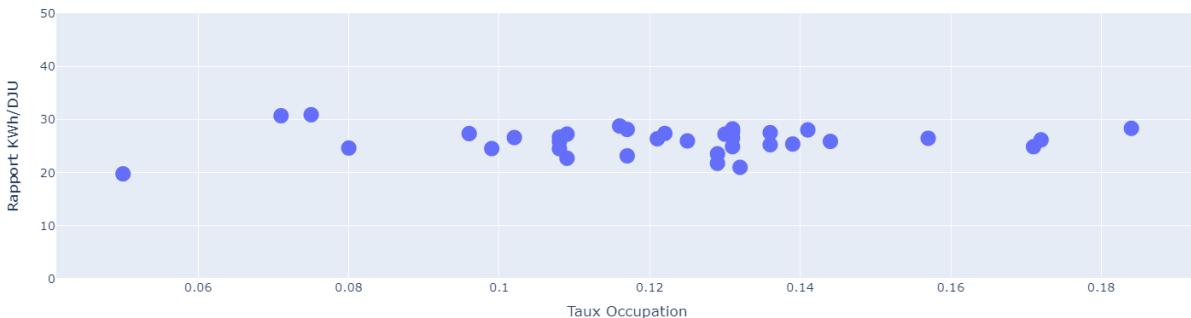


Figure 4.55- Variation du rapport KWh/DJU des salles de réunion en fonction de l'occupation.

Les rapports sont toujours variables autour de la référence. Des consommations inutiles sont donc engendrées par le chauffage des salles de réunion sur cette période.

4.3.3.4 Consommations liées à la ventilation

Les consommations mensuelles de chauffage liées à la ventilation sont illustrées dans la Figure 4.56. Elles sont observées tout au long de la période de chauffage du bâtiment. Les consommations les plus élevées sont observées sur les mois Novembre et Décembre. Elles sont intermédiaires aux mois de Janvier et Octobre. Celles-ci atteignent les valeurs les moins importantes sur les mois Février et Mars. La même démarche d'analyse sera considérée également pour cette composante.

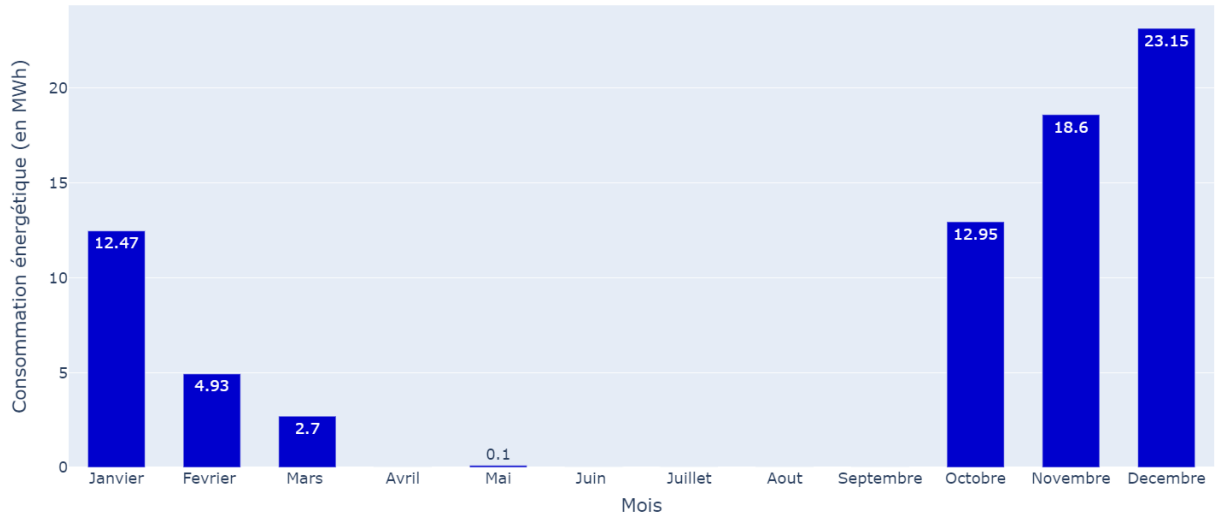


Figure 4.56 - Consommations mensuelles de chauffage liées à la ventilation.

Analyse temporelle

Dans le but de mieux comprendre les consommations de chauffage liées à la ventilation, leur variation en fonction du temps est illustrée dans la Figure 4.57.

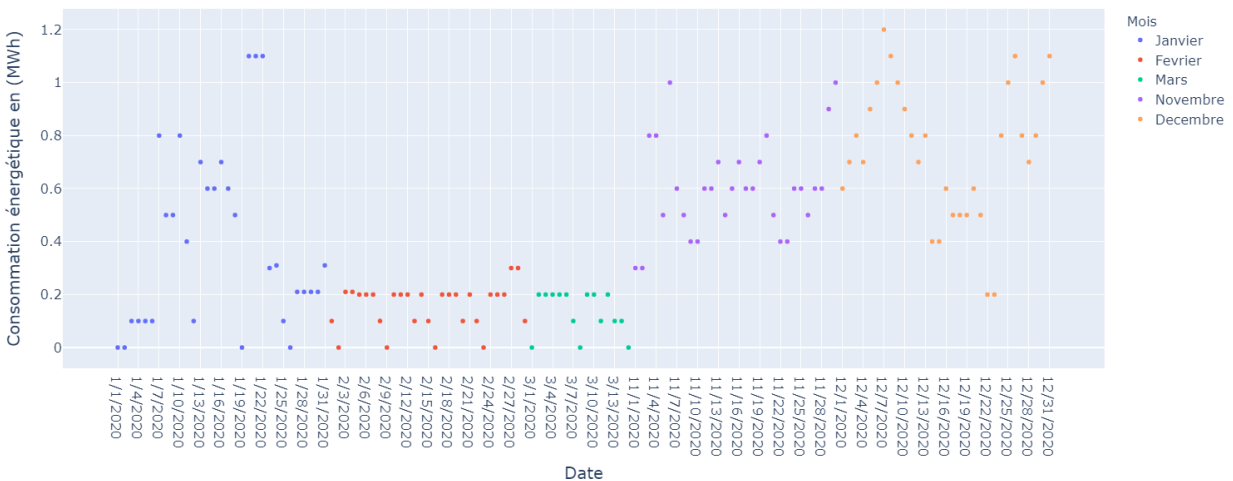


Figure 4.57 - Consommations journalières de chauffage liées à la ventilation.

Deux périodes peuvent être considérées. La première est caractérisée par de faibles consommations liées à la ventilation du bâtiment. Elle s'étend sur le début et la fin du mois de Janvier ainsi que sur le mois de Février arrivant à mi-Mars. Durant cette période les consommations ne dépassent pas 0.4 MWh. La deuxième période est caractérisée par des consommations élevées atteignant des valeurs dépassant largement celles de la première période.

Chacune de ces deux périodes est caractérisée par des valeurs différentes de rapports KWh/DJU (Figure 4.58). Pendant la première période, les rapports se concentrent autour d'une valeur de référence de 15 KWh/DJU. Une telle concentration ne peut être détectée sur la deuxième période caractérisée par des valeurs dispersées et élevées de rapports pouvant atteindre 90 KWh/DJU. Dans la suite, chacune des périodes sera analysée à part.

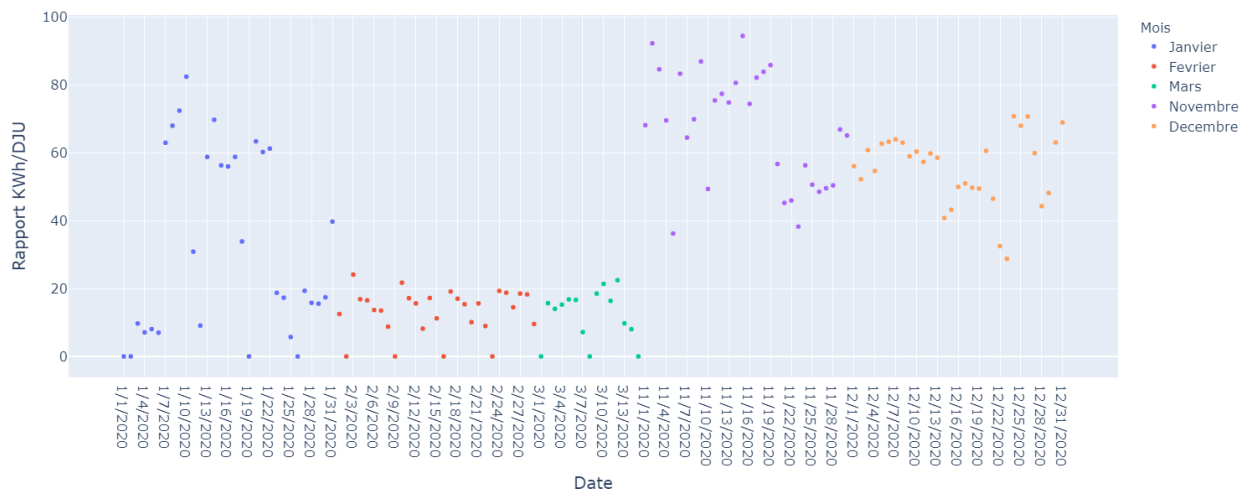


Figure 4.58 - Rapports journaliers KWh/DJU de chauffage liées à la ventilation.

Analyse de la période à faible consommation

Cette analyse est conduite sur la période normale précédant la crise sanitaire. La répartition journalière des consommations est illustrée dans la Figure 4.59.

Les consommations les plus importantes de cette période sont observées les jours de Jeudi et Vendredi (médiane = 0.2 MWh et maximum = 0.3 MWh). Pour les autres catégories des jours de la semaine, les consommations se concentrent autour de la valeur 0.2 MWh.

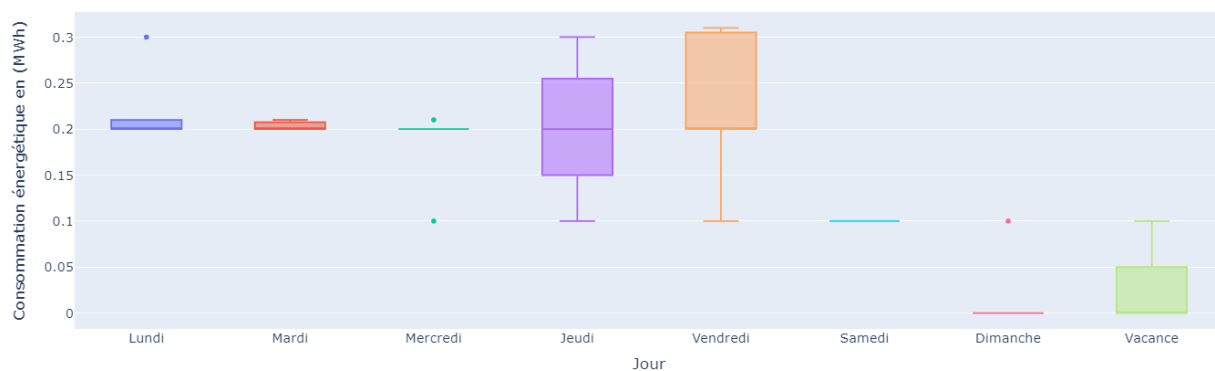


Figure 4.59 - Diagramme en boîte des consommations liées à la ventilation sur la première période.

Les consommations deviennent faibles en fin de semaine. Elles sont constantes à 0.1 MWh pour la catégorie Samedi. Les catégories Dimanche et Vacance sont caractérisées par des valeurs négligeables de consommations. Au contraire des consommations relatives aux autres composantes, le chauffage lié à la ventilation ne fonctionne que sur les jours de travail (Lundi à Samedi) pour cette période. Ces catégories ne sont donc pas prises en considération dans le reste de l'analyse.

La concentration des rapports KWh/DJU autour de la valeur de référence sur cette période est clairement observée dans la Figure 4.60. Les rapports les moins élevés correspondent à la catégorie de fin de semaine (Samedi), en raison des faibles valeurs de consommations.

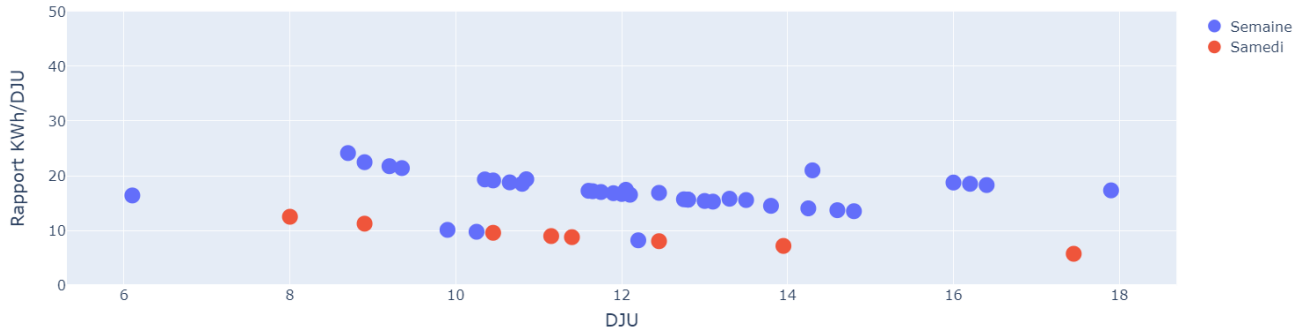


Figure 4.60 - Rapports journaliers KWh/DJU des charges de chauffage liées à la ventilation pour la première période.

Analyse de la période à consommation élevée

La répartition des consommations journalières liées à la ventilation sur la deuxième période est illustrée dans la Figure 4.61. Ces consommations dépassent largement celles de la première période, atteignant parfois des valeurs supérieures à 1 MWh.

Ce qui est remarquable sur cette période est que la consommation sur les catégories Dimanche et Vacance ne sont pas négligeables. Ces consommations sont importantes et peuvent être supérieures parfois à celles des catégories de la semaine.

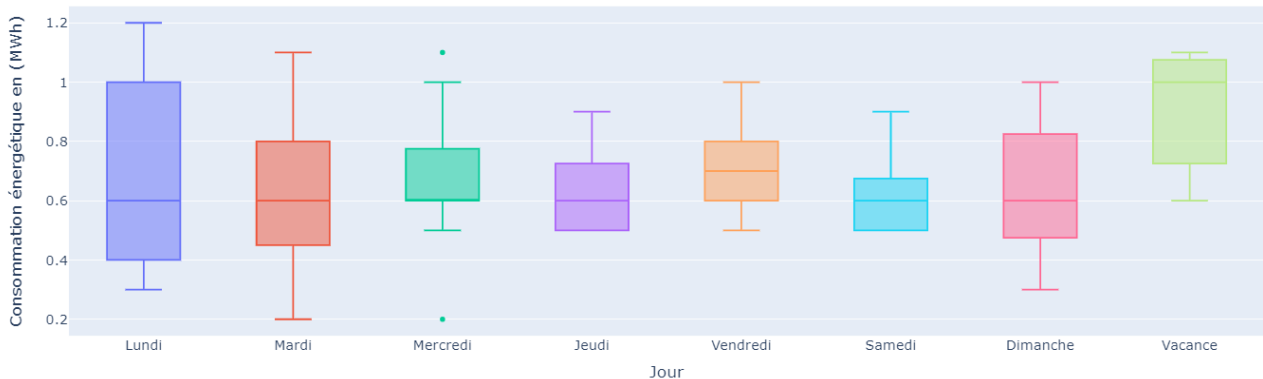


Figure 4.61 - Diagramme en boîte des consommations liées à la ventilation sur la deuxième période.

La variation des rapports KWh/DJU en fonction des conditions extérieures est représentée dans la Figure 4.62. En général, ces rapports sont variables autour de 60 KWh/DJU. Des rapports s'écartant

largement de cette valeur peuvent être détectés. Ils correspondent à la fois à des périodes anormales de surconsommations et de sous-consommations, durant lesquelles la température intérieure du bâtiment n'est pas maintenue au seuil défini. Dans la suite ces valeurs seront éliminées.

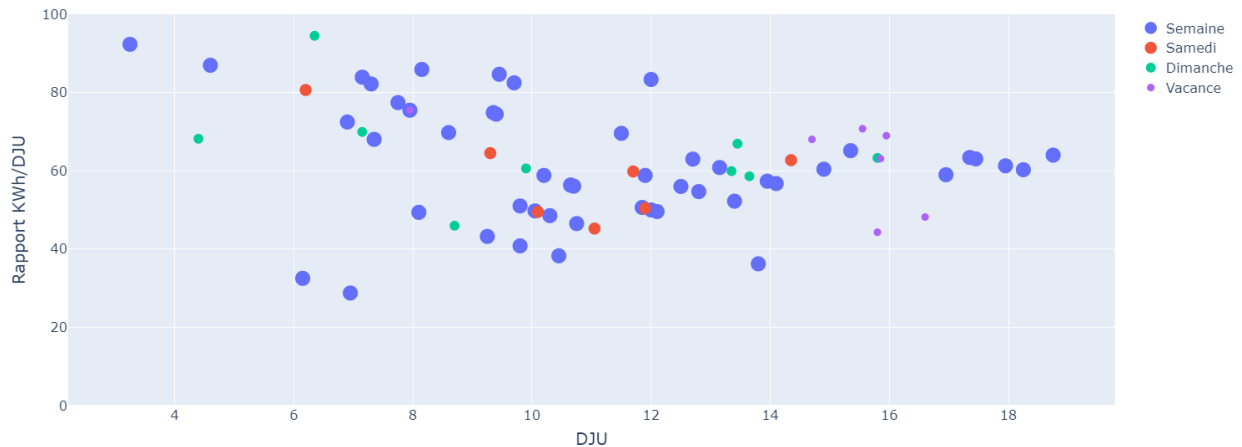


Figure 4.62 - Rapports journaliers KWh/DJU des charges de chauffage liées à la ventilation pour la deuxième période.

Analyse en période de crise

La variation des rapports KWh/DJU confirme également pour cette composante la non prise en compte de l'occupation dans la gestion du système de chauffage (Figure 4.63). Malgré la faible occupation du bâtiment, des consommations énergétiques liées au chauffage de l'air indispensable à la ventilation sont toujours observées.

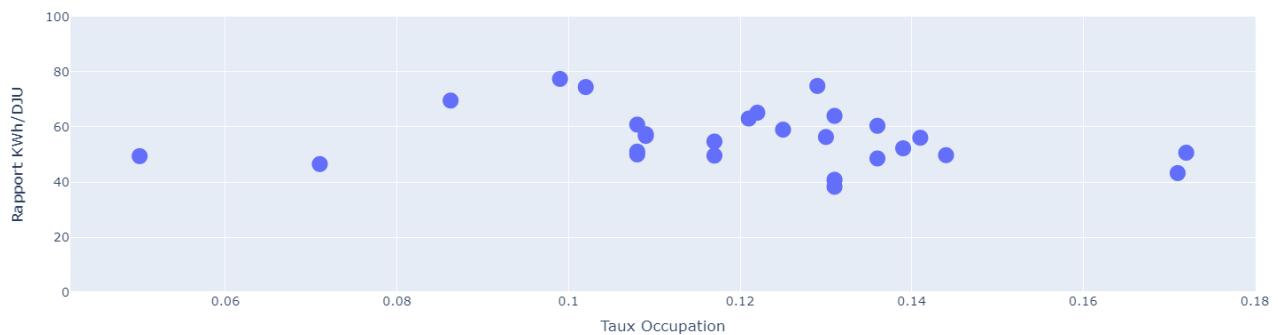


Figure 4.63- Variation du rapport KWh/DJU lié à la ventilation en fonction du taux d'occupation du bâtiment.

4.3.4 Consommation et Production de l'électricité

Dans cette partie on s'intéresse au suivi des consommations électriques sur l'année 2020. La variation mensuelle et journalière de ces consommations seront évaluées. L'effet de la crise sanitaire est aussi identifiée. En outre, la production en énergie et sa part des consommations du bâtiment seront aussi discutées.

4.3.4.1 Analyse des consommations électriques

Les consommations mensuelles du bâtiment en électricité sont illustrées dans la Figure 4.64. La crise sanitaire se manifeste partiellement au niveau de ces consommations. Une diminution remarquable est observée dans les consommations des mois de Mars à Juillet. Le mois d'Avril présente la consommation électrique la plus faible. La diminution au mois d'Août revient aux vacances. Sur le reste des mois de l'année les consommations sont comparables et dépassent 40000 KWh. La consommation la plus élevée correspond au mois d'Octobre.

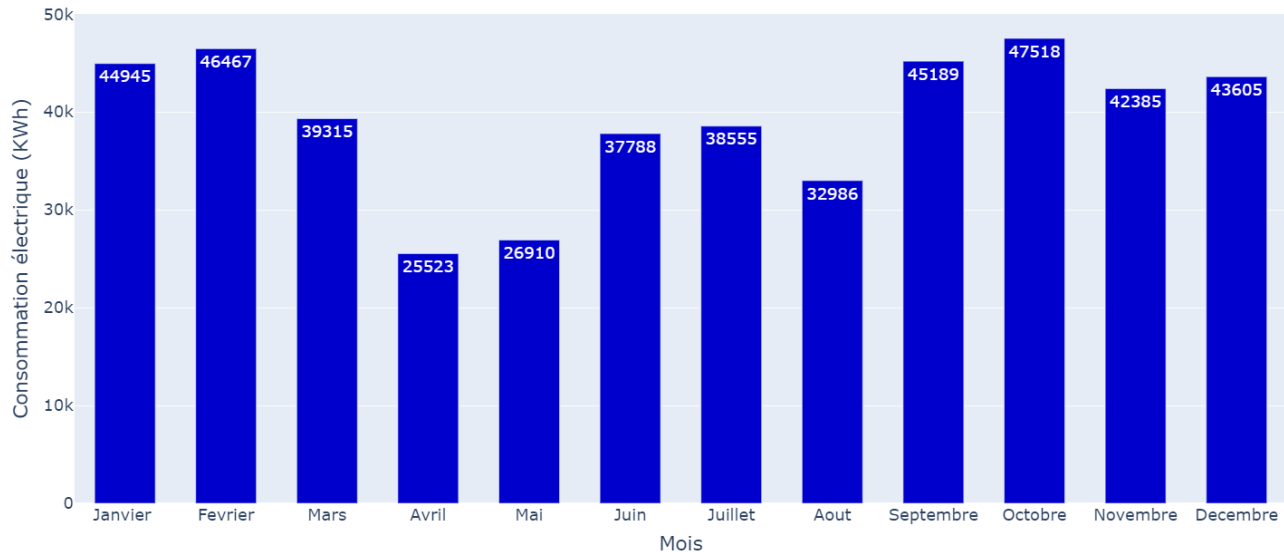


Figure 4.64 - Consommations électriques mensuelles.

Les consommations mensuelles totales sont justifiées par les répartitions journalières des consommations (Figure 4.65).

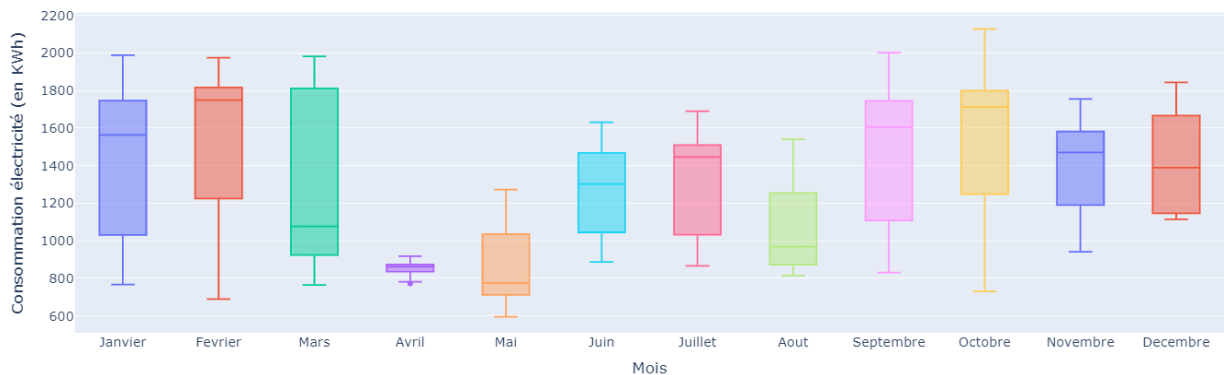


Figure 4.65 - Répartition mensuelle des consommations électriques.

Les consommations journalières les plus élevées sont observées aux mois de (Janvier, Février, Septembre et Octobre) présentant des valeurs médianes autour de 1600 KWh. Des valeurs moins importantes sont observées lors de la période de crise. Le mois de Mars présente des valeurs élevées de consommations avant la crise (3^{ème} quartile = 1800 KWh). Cependant, de faibles valeurs de consommations sont détectées (médiane \cong 1000 KWh) montrant ainsi l'impact de l'épidémie. Au mois d'Avril, les consommations sont faibles (<1000 KWh), pourtant elles ne sont pas négligeables (confinement). Une augmentation de ces consommations est observée sur les mois

(Mai à Août) mais elles sont toujours inférieures à celles de la période caractérisée par les consommations les plus élevées.

De plus, en fin d'année les consommations ont présenté une certaine diminution, comparées à celles des mois de Septembre et Octobre.

La répartition journalière des consommations électriques tout au long de l'année est illustrée dans la Figure 4.66.

En général, ces consommations sont variables dans des intervalles comparables pour les catégories des jours de la semaine. Les catégories Lundi et Jeudi sont caractérisées par des valeurs statistiques comparables à l'exception de la valeur médiane et du 1^{er} quartile (Tableau 4.20). La catégorie Mardi présente la valeur maximale de consommations la plus importante. Des consommations électriques moins faibles sont observées les jours de Mercredi présentant les valeurs minimales et maximales les moins élevées comparées aux autres catégories. Les consommations sur les jours de Vendredi sont variables dans un intervalle serré de valeurs considérables [1450,1975] KWh.

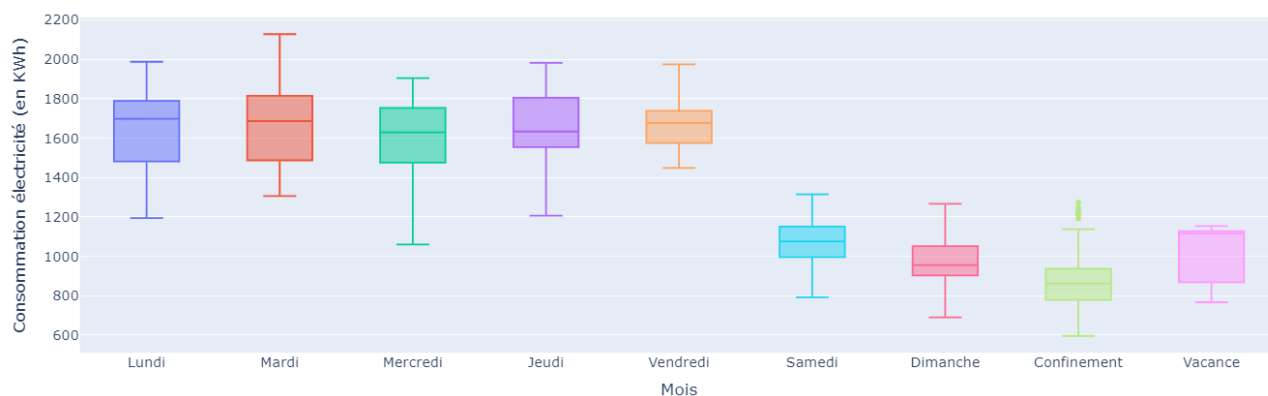


Figure 4.66 - Répartition des consommations électriques selon les catégories des Jours.

Une catégorie Confinement a été ajoutée dans cette analyse. Elle correspond à la période de fermeture du bâtiment pendant la crise sanitaire. Concernant les catégories de fin de semaine, de confinement et de vacance, une diminution remarquable de consommations électriques est observée par rapport aux autres. Cependant, ces consommations sont toujours considérables. Celles-ci sont relatives à des consommations électriques inutiles en période d'inoccupation du bâtiment. Par conséquent, elles sont à l'origine du gaspillage d'énergie. La gestion du bâtiment n'a donc pas profité de l'absence des usagers afin d'optimiser ses consommations en électricité.

Les valeurs moyennes des catégories de la semaine sont variables autour de 1600 KWh dépassant celles des autres catégories ($\cong 1000$ KWh). Les catégories Vendredi à Dimanche présentent des consommations plus concentrées autour de leurs valeurs moyennes ayant les valeurs les plus faibles d'écart types.

Tableau 4.20 - Valeurs statistiques des consommations électriques.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum	Moyenne	Écart type
Lundi	1194	1481	1698	1788	1987	1636	217
Mardi	1306	1487	1686	1814	2127	1664	196
Mercredi	1060	1475	1629	1753	1904	1605	194
Jeudi	1206	1554	1633	1804	1981	1658	192

Vendredi	1450	1575	1677	1738	1975	1672	125
Samedi	792	996	1076	1151	1314	1080	120
Dimanche	690	903	955	1052	1266	974	128
Confinement	596	779	863	937	1137	881	157
Vacance	767	868.5	1117	1128	1153	1021	151

4.3.4.2 Analyse de la production électrique

Le bâtiment dispose d'un système de production de l'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie solaire au moyen de la technologie de cellules photovoltaïques. Cette production assure une portion des besoins du bâtiment en électricité. La variation mensuelle de la production d'énergie est présentée dans la Figure 4.67.

La production la moins importante d'énergie solaire est observée en début et en fin d'année (Janvier-Février et Octobre à Décembre). Au contraire, cette production est maximale durant les mois Avril et Mai. Elle est intermédiaire pour les mois restant de l'année.

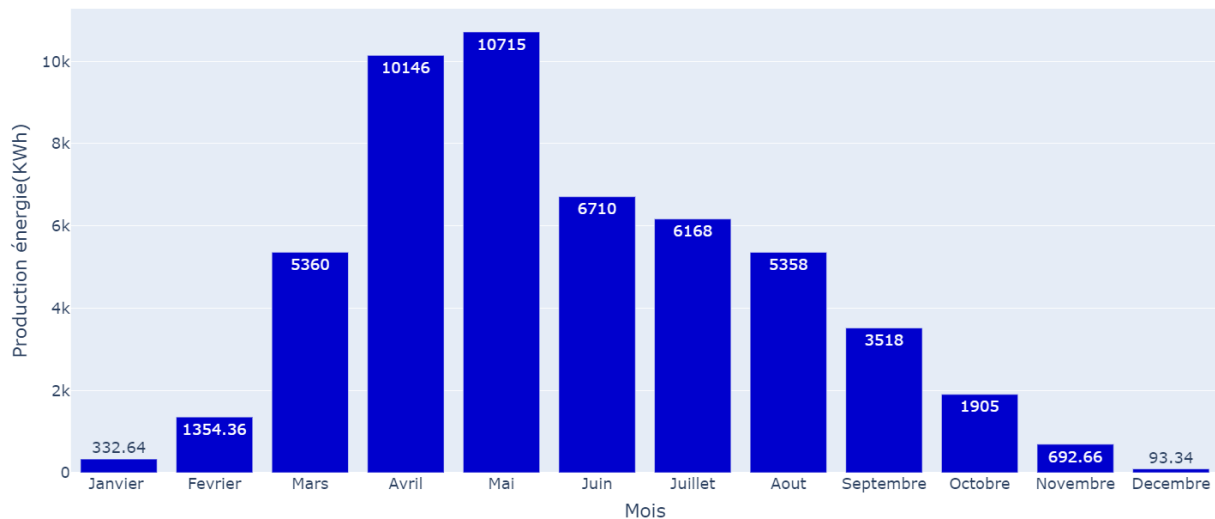


Figure 4.67 - Production mensuelle du bâtiment en énergie.

En considérant la consommation électrique et la production d'énergie totales du bâtiment, on constate que celui-ci a produit 11% de ses besoins pour l'année 2020.

La part de la consommation électrique journalière assurée par la production du bâtiment en énergie est représentée pour chacun des mois de l'année dans la Figure 4.68. Pour les mois Janvier, Février, Novembre et Décembre la production assure moins que 10% de la consommation journalière. Il en est de même pour le mois d'Octobre dont la production journalière peut assurer au maximum 12% des besoins du bâtiment (Tableau 4.21). Pour le mois de Septembre, la part de la production montre une certaine augmentation. La production journalière peut assurer plus que 11% des besoins journalières (médiane = 11%). Une amélioration de la portion d'énergie assurée par la production du bâtiment est observée aux mois de Mars et Juin à Août. La production garantit plus que 30% de la consommation électrique (3^{ème} quartile = 31%).

Sur les mois Juin à Août, la part journalière de la production peut dépasser 16%. La production du bâtiment occupe une part beaucoup plus importante des consommations aux mois Avril et Mai.

Elle assure plus que 40% de ses besoins sur ces deux mois. Ce pourcentage peut atteindre des valeurs maximales de 60 et 80% respectivement.

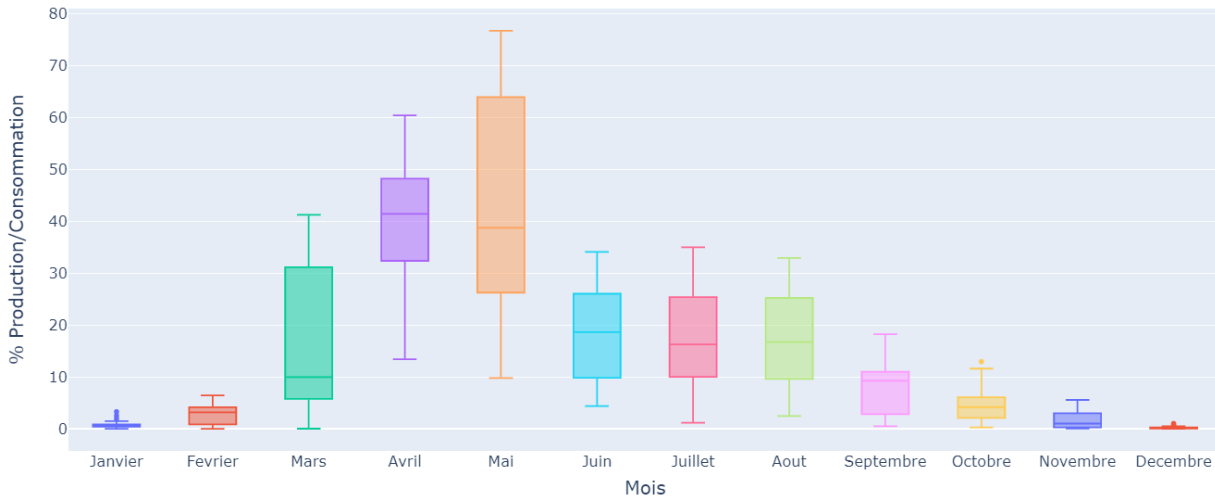


Figure 4.68 - Diagramme en boîte de la part de la production journalière dans la consommation pour chaque mois.

Tableau 4.21 - Valeurs statistiques des rapports Production/Consommation.

	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum
Janvier	0.03	0.42	0.57	0.87	1.51
Février	0.04	0.87	3.2	4.2	6.5
Mars	0.05	5.8	10	31.2	41.2
Avril	13.4	32.4	41.4	48.2	60.4
Mai	9.8	26.26	38.75	63.9	76.7
Juin	4.4	9.9	18.7	26	34
Juillet	1.2	10.05	16.3	25.4	35
Août	2.5	9.6	16.7	25.2	32.9
Septembre	0.53	2.86	9.3	11	18.3
Octobre	0.28	2.13	4.2	6.11	11.6
Novembre	0.07	0.285	1.035	3.02	5.6
Décembre	0.027	0.066	0.12	0.3	0.53

4.3.5 Bilan énergétique Global

Dans cette partie les consommations énergétiques totales du bâtiment seront évaluées. La composante responsable de la partie grandissante des consommations sera également identifiée. La consommation d'énergie primaire totale du bâtiment ainsi que les émissions des gaz à effet de serre seront aussi calculées.

La consommation totale en énergie finale du bâtiment est de 737 MWh. La part de l'énergie finale consommée par chacune des composantes du bâtiment est illustrée dans la Figure 4.69. La consommation électrique est responsable de plus que la moitié des consommations du bâtiment. La consommation liée au chauffage est à son tour répartie sur les quatre composantes définies du

bâtiment. Le bâtiment rénové et la ventilation sont les plus grands consommateurs d'énergie liée au chauffage. Ils sont responsables de la consommation majeure du bâtiment (64%).

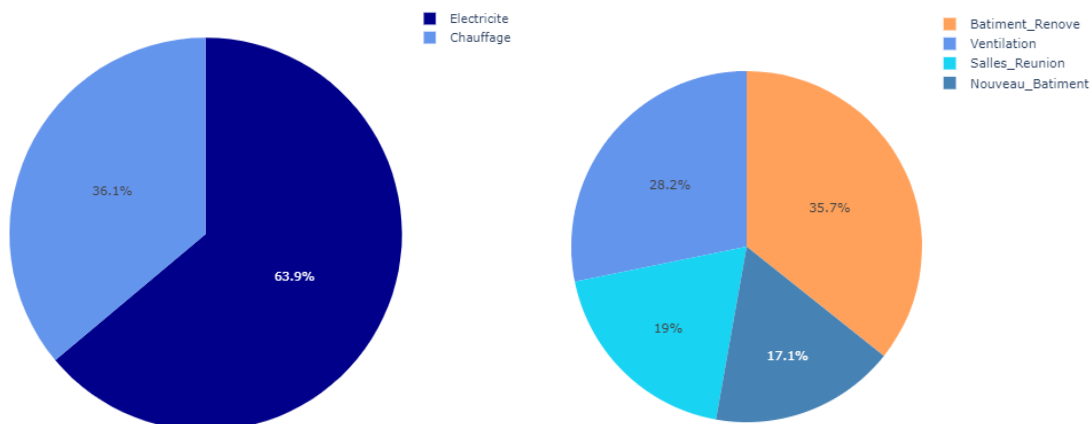


Figure 4.69 - La part de chaque composante de la consommation énergétique totale du bâtiment.

La consommation des bâtiments en énergie primaire et les émissions des gaz à effet de serre associées à leurs consommations d'énergie finale sont calculées en conformité avec la méthode définie dans la Partie 4.3.2. Les résultats sont résumés dans le Tableau 4.22.

Tableau 4.22 - Bilan énergétique des bâtiments.

	Composante	Énergie Finale	Énergie Primaire/m ²	Total	Émissions CO ₂ /m ²	Total
Bâtiment Rénové	Chauffage	94 680 KWh	19.3 KWhep/m ²	111 KWhep/m ²	4.64 Kg CO _{2eq} /m ²	5.56 Kg CO _{2eq} /m ²
	Électricité	448920 KWh	91.4 KWhep/m ²		0.94 Kg CO _{2eq} /m ²	
Nouveau Bâtiment	Chauffage	45 640 KWh	6.6 KWhep/m ²	98 KWhep/m ²	1.59 Kg CO _{2eq} /m ²	2.504 Kg CO _{2eq} /m ²
	Électricité	632 100 KWh	91.4 KWhep/m ²		0.914 Kg CO _{2eq} /m ²	

Les consommations d'énergie primaire dépassent largement le seuil défini dans la réglementation thermique spécifié dans le cahier de charge (65 KWhep/m²/an). Cette situation peut être expliquée par les consommations observées lors des périodes d'inoccupation du bâtiment engendrant ainsi des surconsommations et un non-respect des exigences définies dans la phase de planification. Les émissions de gaz à effet de serre sont relativement acceptables.

Dans le but d'améliorer le bilan énergétique du bâtiment, il est indispensable d'élaborer un contrôle du système de chauffage basé sur les profils d'occupation du bâtiment. En outre, il sera nécessaire d'améliorer les mesures de contrôle de l'éclairage et des appareils électriques permettant d'optimiser la consommation du bâtiment en électricité.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a été axé sur la quantification des indicateurs de performance liés au confort et aux consommations dans le bâtiment ESPRIT.

L'analyse a montré que les conditions de confort sont conformes aux exigences réglementaires et aux besoins des usagers lors de la période chauffée. Durant la période non chauffée, certains bureaux présentent des températures dépassant la limite réglementaire. Les exigences en terme de qualité de l'air sont respectées dans les bureaux.

L'analyse des mesures a montré que l'orientation et l'occupation des bureaux ont un faible impact comparé à celui de l'environnement extérieur.

Le suivi des consommations a permis de détecter les atouts et les faiblesses des systèmes techniques du nouveau bâtiment.

En premier lieu, les consommations d'eau sur l'année 2020 ont été considérablement affectées par la crise sanitaire. Elles étaient négligeables en période d'inoccupation du bâtiment, indiquant ainsi l'absence de fuites et de problèmes techniques dans les équipements et les appareils sanitaires. Cependant, ces consommations ne respectent pas le seuil imposé dans la phase de planification. Des surconsommations d'eau ont été identifiées en période normale.

Le bâtiment est caractérisé par une gestion efficace de son système de chauffage en termes de consommation. Le contrôle du système de chauffage est globalement adapté aux variations des conditions climatiques. Cependant, des anomalies ont été détectées dans le chauffage de ses composantes (Nouveau bâtiment et Ventilation). Elles sont illustrées par (i) un changement important du rapport kWh/DJU utilisé dans l'estimation des besoins de chauffe (ii) le maintien du niveau de chauffage pendant les périodes d'inoccupation du bâtiment (Fin de semaine et Vacances). Les consommations électriques ont été impactées par l'épidémie. En revanche, elles n'étaient pas négligeables sur les périodes d'inoccupation du bâtiment.

La production d'énergie solaire a couvert près de 11% de des besoins du bâtiment en 2020.

Chapitre 5 : Analyse des performances du bâtiment ESPRIT par les usagers

5.1 Introduction

Ce chapitre présente l'analyse des performances du bâtiment ESPRIT par ses usagers. L'analyse s'appuie sur une enquête auprès des usagers.

Les données collectées ont été analysées pour évaluer (i) la satisfaction des usagers des facteurs de l'environnement intérieur, (ii) le niveau d'importance de ces facteurs pour les usagers, (iii) les relations entre la satisfaction des usagers et d'importance accordée aux facteurs d'évaluation, (iv) l'impact du profil des usagers sur leur satisfaction.

Le chapitre est organisé en 4 parties. La première présente une description de l'enquête. Les principaux thèmes traités dans le questionnaire sont définis. Le processus de sa mise en œuvre est introduit. Les informations générales relatives aux participants sont aussi analysées.

Dans la deuxième, une analyse de satisfaction est réalisée. Les sources d'insatisfaction sont discutées. La troisième analyse l'importance des facteurs. La dernière présente une analyse des corrélations entre les facteurs étudiés.

5.2 Description de l'enquête

L'enquête conduite dans cette étude consiste en un questionnaire en ligne. Ce questionnaire est destiné à évaluer l'expérience et la satisfaction des usagers vis-à-vis du nouveau bâtiment ESPRIT. Il s'est donc concentré sur l'évaluation des indicateurs sociaux définis au Chapitre 3.

Le questionnaire est organisé en deux parties principales : Informations générales, Degré de satisfaction et d'importance. La première partie traite des informations de base sur les caractéristiques descriptives des usagers et de leurs bureaux. Des données démographiques des usagers (âge, genre et poste occupé) et leurs dates d'arrivée au bâtiment sont recueillies. Des informations permettant l'identification de l'emplacement des usagers dans le bâtiment sont également collectées (laboratoire, étage, orientation, type d'espace de travail et nombre de personnes dans l'espace).

La deuxième partie est composée de trois thèmes essentiels : Qualité de l'environnement intérieur, Sécurité et Accessibilité des usagers. Chaque thème comporte une séquence de sections ciblant la perception des usagers du confort et des services du bâtiment. Un ensemble de 23 questions fondamentales ont été employées à cette fin. Ces questions évaluent la satisfaction des usagers à l'égard de plusieurs facteurs définis dans les sections, ainsi que l'importance attribuée à ces facteurs. Le Tableau 5.1 résume les éléments composant le questionnaire développé dans cette étude.

Tableau 5.1 - Composition du questionnaire.

Thèmes	Sections	Facteurs
	Confort Thermique et Hydrique	Température Intérieure
		Contrôle de la Température Intérieure
		Humidité
		Ventilation
	Confort Acoustique	Bruit Général
		Éclairage Naturel

Qualité de l'Environnement Intérieur	Confort Visuel	Éclairage Artificiel
		Contrôle de l'Éclairage Global
	Qualité de l'Air Intérieur	Qualité de l'Air
	Confort Spatial	Espace de Travail
		Espace de Stockage et d'Expérimentations
		Couleurs , Textures ,Revêtements, Finitions
Confidentialité		
	Espaces Communs	
Sécurité des Usagers	Paramètres de Sécurité	Incendie
		Vandalisme
		Accidents de Travail
Accessibilité des Usagers	Paramètres d'Accessibilité	Accès des Personnes Handicapées
		Heures d'Accès au Bâtiment

L'enquête emploie une échelle d'évaluation de Likert à 5 points (Figure 5.1). Lorsqu'un usager indique un certain degré d'insatisfaction (vote 1 ou 2), il est invité à répondre à un ensemble de questions de ramification. Cet ensemble permet d'obtenir une rétroaction spécifique et détaillée sur les sources d'insatisfaction. Il comprend des questions à choix multiples et de types réponses ouvertes afin de mieux comprendre les raisons de mécontentement. À la fin du questionnaire, une section a été réservée aux commentaires des usagers. Cette section leur offre un espace ouvert pour signaler des problèmes liés à l'environnement du bâtiment, non cités dans l'enquête. Elle permet aux usagers d'exprimer leur satisfaction globale à l'égard du nouveau bâtiment également.

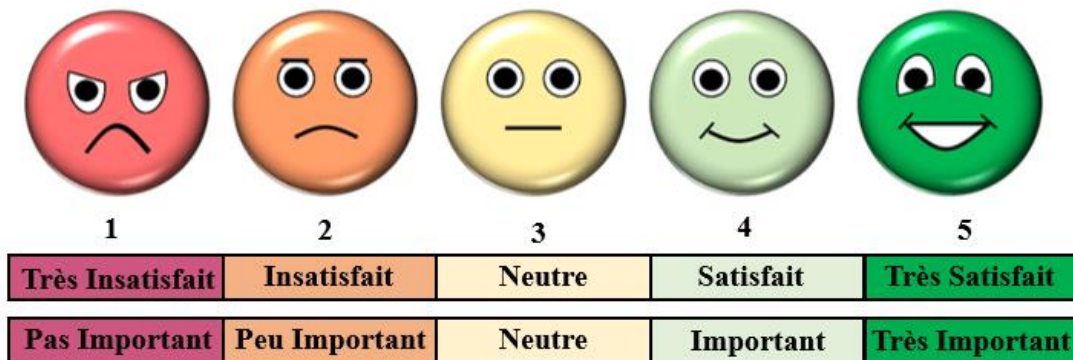


Figure 5.1 - Échelle de satisfaction et d'importance.

Le logiciel d'enquête en ligne "FourEyes" a été utilisé pour établir le questionnaire. Celui-ci offre aux participants une interface conviviale. Il leur assure également une participation anonyme. Aucune information d'identification n'est collectée. Les répondants peuvent donc se retirer de l'enquête à tout moment.

Avant la diffusion du questionnaire, une pré-enquête a été effectuée avec certains usagers du bâtiment. Elle a pour but de vérifier la compréhension de l'ensemble des questions et la durée nécessaire pour y répondre. Généralement, les questions étaient compréhensibles et l'enquête nécessitait une durée approximative de 5 minutes.

Le processus de mise en œuvre de l'enquête a commencé par un courriel envoyé aux usagers des laboratoires du bâtiment ESPRIT. Ce courriel les invite à participer à une enquête de recherche sur le confort et les services du bâtiment. Il les informe également de l'adresse du site Web de l'enquête. Dans le laboratoire LGCgE, le courriel a été envoyé directement aux usagers. Cependant dans les autres laboratoires, le courriel a été envoyé en premier lieu aux gestionnaires administratifs. Ceux-ci à leurs tours l'ont diffusé aux membres de leurs laboratoires suite à l'approbation par la direction.

Les usagers peuvent remplir le questionnaire à leur convenance. Une fois connectés sur site Web, les participants seront dirigés vers une page d'accueil. Cette page définit l'objectif de l'enquête et annonce son contenu. Elle les rappelle aussi du temps nécessaire pour compléter le questionnaire. En outre, les échelles d'évaluation à utiliser dans les réponses aux questions sont expliqués dans cette page. Les participants doivent cliquer sur le bouton "Commencer" afin de démarrer l'enquête. Ils seront ensuite capables de répondre aux questions définis précédemment.

L'enquête a été effectuée au mois d'Avril 2021. Elle est restée ouverte pendant une semaine. Au total, 112 réponses individuelles ont été recueillies. Le taux de réponse est satisfaisant, compte tenu de l'épidémie et du contexte sanitaire qui en résulte. En effet, un confinement était imposé pendant cette période. Par conséquent, la présence des usagers au bâtiment était moins importante qu'en temps normal.

Les résultats de l'enquête ont été récupérés du logiciel sous forme d'un fichier .csv (fichier de valeurs séparées par des virgules). Un nettoyage des données a été conduit avant de procéder à l'analyse des résultats. Toutes les réponses des participants ont été vérifiées. Les questionnaires incomplets ont été ensuite supprimés. L'ensemble final de données était constitué de 95 questionnaires complètement remplis.

Les caractéristiques personnelles des participants sont résumées dans le Tableau 5.2. Sur l'ensemble des participants, la majorité des répondants était des Hommes (70.5%). Près de la moitié des participants ont une tranche d'âge comprise entre 30 et 50 ans (48.4%). La catégorie d'emploi participant le plus à l'enquête (50.5%) était celle des Enseignants - Chercheurs. Le pourcentage des participants arrivant au bâtiment juste après l'accomplissement de l'opération de rénovation (2019) est de 80%.

Tableau 5.2 - Caractéristiques personnelles des participants.

Caractéristiques	Description			
	Homme	Femme	Non Précisé	
Genre	70.5 %	28.4 %	1.1 %	
Âge	Moins que 30 ans	Entre 30 et 50 ans	Plus que 50 ans	Non Précisé
	29.4 %	48.4 %	21.1 %	1.1 %
Poste Occupé	Enseignant-Chercheur	Personnels Technique et Administratif	Doctorant	Non Précisé
	50.5 %	28.4 %	20 %	1.1 %
Date d'arrivée	2019	2020	2021	Non Précisé
	80 %	14.7 %	3.2 %	2.1 %

Les caractéristiques de l'espace de travail des participants sont décrites dans le Tableau 5.3. Une fraction importante des participants appartenait au Laboratoire CRISAL avec 34% des répondants. Les bureaux collectifs étaient les plus populaires parmi les différents types d'espace de travail. 64.3% des participants occupaient ce type de bureau. En plus, les bureaux collectifs à 2 personnes sont les plus dominants (53.2%). La plupart des bureaux des participants étaient orientés vers le Sud (54.7%). Le plus grand pourcentage de bureaux est accueilli au 4^{ème} étage du bâtiment (30.9%).

Tableau 5.3 - Caractéristiques des bureaux des participants.

Caractéristiques	Description					
Laboratoire	CRISAL	L2EP		LaMCube		LGCgE
	34%	14.8 %		23.3%		27.7%
Type	Collectif		Individuel		Salles d'expérimentation	
	64.3 %		33.7 %		2.1%	
Nombre de personnes	2		3		4	5
	53.2 %		17.7 %		25.8 %	3.3 %
Orientation	Sud		Nord		Non Précisé	
	54.7 %		39 %		6.3 %	
Étage	RDC	R+1	R+2	R+3	R+4	Non Précisé
	9.5 %	22.3 %	24.4 %	10.6 %	30.9 %	2.1 %

5.3 Analyse de satisfaction

Une analyse descriptive des réponses du questionnaire a été menée. Son objectif est d'évaluer les niveaux de satisfaction et d'importance attribués aux facteurs testés. Une classification des facteurs sera conduite à la base de ces niveaux. Les facteurs satisfaisants et importants seront aussi identifiés. D'autre part, les sources d'insatisfaction relatives à chaque facteur seront développées. Enfin, une note finale sera accordée à chaque participant afin de vérifier le niveau de satisfaction à l'égard du nouveau bâtiment tenant compte de tous les facteurs.

5.3.1 Observation générale

En premier lieu, une représentation graphique des réponses des participants sous forme de diagrammes en boîte a été employée. Elle a pour but de résumer d'une manière simple les notes de satisfaction attribuées aux facteurs évalués.

La répartition des notes de satisfaction ainsi que leurs valeurs extrêmes relatives à chacun des facteurs ont été identifiées (Figure 5.2). Une similarité dans la répartition des notes de certains facteurs a été détectée. Ces facteurs ont été donc répartis en trois groupes.

La température, la ventilation, l'éclairage artificiel, le contrôle de l'éclairage et la confidentialité sont caractérisés par une distribution comparable des notes de satisfaction. Ces notes varient entre 2 et 5. Leur valeur médiane est de 4. Elle coïncide avec celle du 3^{ème} quartile, indiquant ainsi qu'au moins 50 % des notes sont comprises entre 4 et 5.

L'humidité, l'espace disponible pour le travail et la sécurité contre l'incendie présentent aussi une répartition identique de notes. Ces notes se concentrent entre 3 et 5. Leur valeur médiane est la

même que celle du premier groupe (4).Cependant , elle est confondue avec la valeur du 1^{er} quartile.Ceci implique que 75% des notes ont une valeur supérieure ou égale à la médiane. De même , le confort acoustique , la qualité de l’air , l’espace disponible pour les activités de stockage et d’expérimentation , les second œuvres (couleurs, textures, revêtements et finitions) , la sécurité contre les accidents de travail et les heures d’accès au bâtiment ont une distribution similaire de notes.Ces notes sont variables entre 1 et 5 avec une valeur médiane de 4. Des répartitions de notes différentes ont été observées pour les facteurs restants.

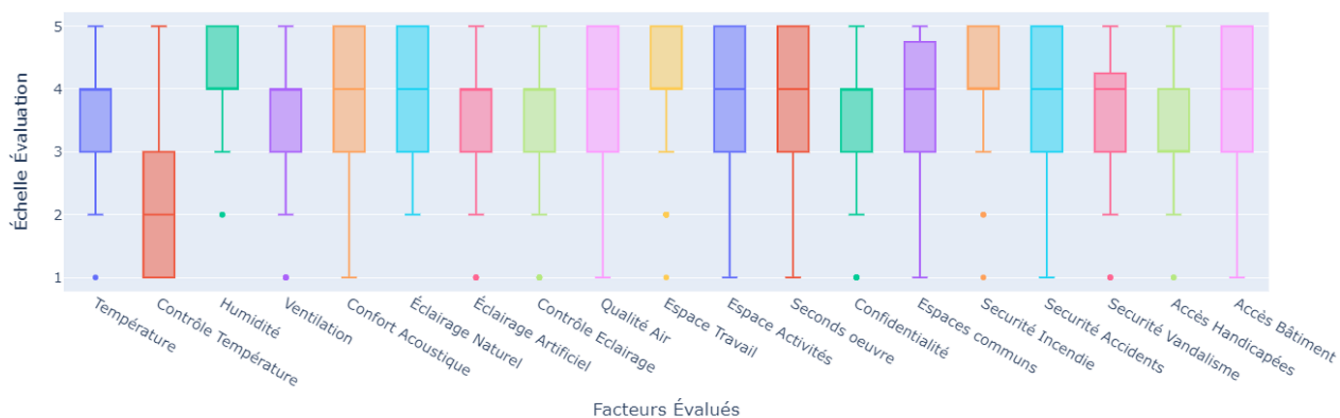


Figure 5.2 - Diagramme en boîte des notes de satisfaction.

La Figure 5.3 compare la note moyenne de satisfaction des usagers à l’égard des facteurs définis.

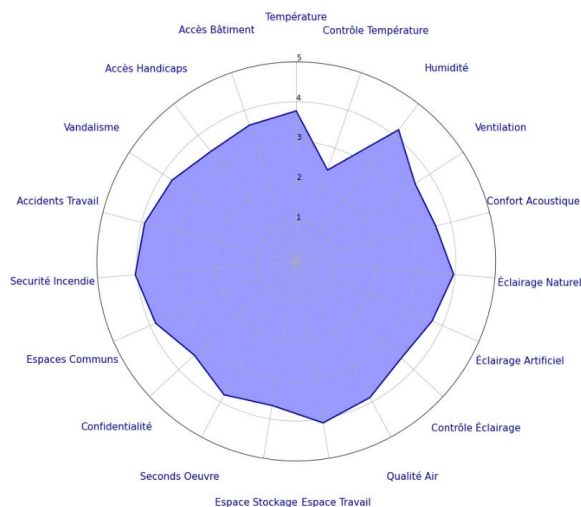


Figure 5.3 - Note moyenne de satisfaction par facteur.

Une inspection approfondie du graphique permet l’identification de trois groupes de facteurs en termes de note moyenne (Tableau 5.4). Les facteurs sont classés dans le tableau par ordre décroissant de note moyenne pour chaque groupe.

Le premier groupe est constitué des facteurs ayant reçu les notes moyennes les plus élevées (autour de 4).Un niveau de satisfaction élevé a été accordé à ces facteurs ;En particulier l’humidité caractérisée par la note la plus importante dans ce groupe (4.2).

Le deuxième comporte le contrôle de la température , le seul facteur ayant obtenu la note la moins élevée (2.4).Ce facteur est donc le moins satisfaisant pour les usagers.

Le troisième comprend le reste des facteurs caractérisés par des notes moyennes intermédiaires (autour de 3.5).Parmi ces facteurs , la température présente la note moyenne la plus haute (3.7).

Tableau 5.4 - Répartition des facteurs en terme de note moyenne de satisfaction.

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Humidité	Contrôle de la température	Température Intérieure
Espace de Travail		Éclairage Artificiel
Sécurité Incendie		Sécurité Vandalisme
Éclairage Naturel		Espace des activités
Accidents de Travail		Confort Acoustique
Qualité de l'Air		Accès au Bâtiment
Espaces Communs		Contrôle de l'Éclairage
Seconds œuvres		Ventilation
		Accès Handicaps
	Confidentialité	

Le pourcentage de satisfaction des usagers relatif aux facteurs évalués est aussi représenté pour chacun des groupes définis. Il permet une compréhension améliorée de la perception des usagers de l'environnement du bâtiment et de ses services. Trois niveaux de satisfaction sont considérés : Insatisfait, correspond aux participants ayant voté (1 ou 2) ; Satisfait, correspond à ceux qui ont voté (4 ou 5) ; Neutre correspond aux votes (3).

5.3.2 Analyse du groupe 1 (Humidité, ...)

La répartition de la satisfaction des participants relative aux facteurs du Groupe 1 est représentée par le diagramme de la Figure 5.4. Le niveau "Satisfait" est le plus dominant dans ce groupe, confirmant ainsi le regroupement des facteurs basé sur la note moyenne de satisfaction. Le pourcentage de participants satisfaits dépasse généralement 65%. Une satisfaction maximale des participants est exprimée envers l'espace disponible de travail et l'humidité avec des pourcentages autour de 80%. Les participants votant pour un niveau neutre ou insatisfait sont mineurs dans ce groupe. Leurs pourcentages ne dépassent pas 20% et 10% respectivement.

Malgré le pourcentage minimale d'insatisfaction envers les facteurs de ce groupe, cependant il est important d'identifier les sources permettant de comprendre ce mécontentement. On note qu'une fraction des usagers votant (1 ou 2) n'a pas mentionné des sources d'insatisfaction.

Pour les facteurs concernant les sections de confort spatial, de sécurité et d'accessibilité un espace ouvert était réservé aux participants pour exprimer dans leurs propres termes les principales causes de leur insatisfaction.

En ce qui concerne le confort spatial, une minorité de participants (3%) ont évalué leur espace disponible de travail comme insuffisant, en raison des petites surfaces de bureaux comparées au nombre de personnes hébergés dans ces bureaux. En outre, un pourcentage comparable de participants a exprimé aussi une insatisfaction envers l'aménagement et l'ameublement des bureaux. D'autre part, 4% des participants étaient insatisfaits de la peinture, évaluant ses couleurs

comme dérangeantes, froides et impersonnelles. En plus, 2% des participants ont évalué la qualité des revêtements de sols comme étant mauvaise, faisant apparaître des traces indélébiles. La qualité des espaces communs, surtout leur aspect convivial, a été aussi reprochée par 6% des participants. Ils ont évalué les espaces communs comme inconfortables, inadaptés au repos et pauvrement aménagés (plantes, jeux et machines à café). Quant à la sécurité, 2% des usagers ont indiqué l'ignorance des mesures à prendre en cas d'incendie comme une cause principale de leur insatisfaction. D'autres ont évoqué des exemples d'accidents de travail (chute de plaques de plafond dans les couloirs et le local à vélo) les poussant à mettre en doute la question de sécurité contre ces accidents.

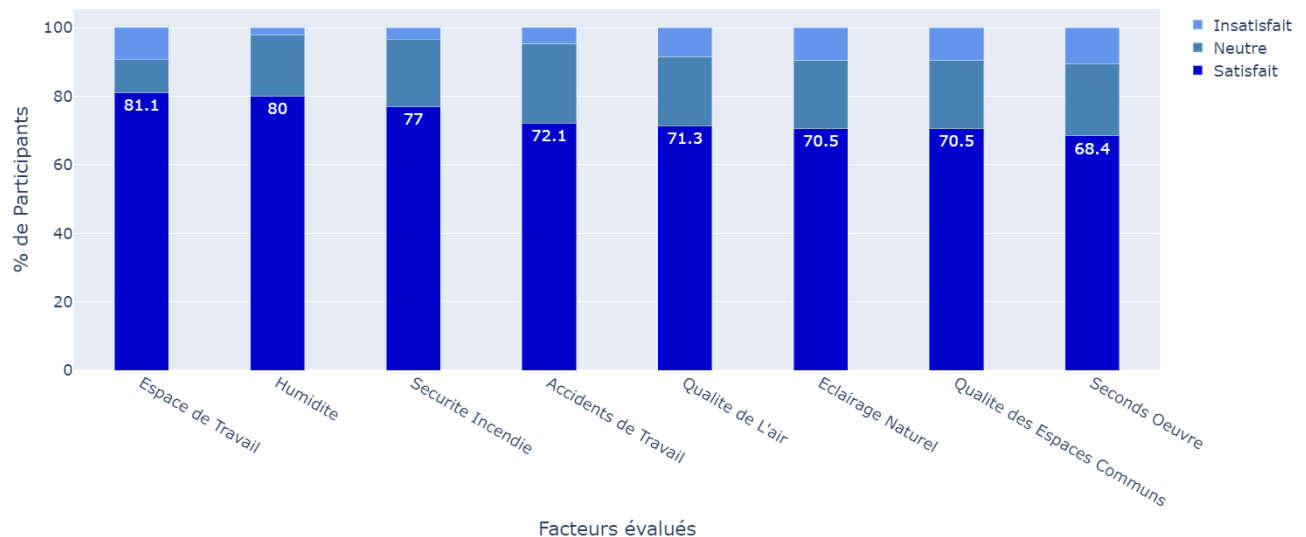


Figure 5.4 - Pourcentage de satisfaction des participants relatif aux facteurs du Groupe 1.

Pour les facteurs concernant les autres sections, des questions à choix multiples ont été employées pour identifier les causes d'insatisfaction. Un espace ouvert était aussi assuré dans le cas où les participants souhaitent ajouter d'autres sources non citées.

Deux participants étaient insatisfaits de l'humidité. Le premier l'a évaluée comme étant faible alors que l'autre l'a considérée élevée. L'insuffisance de ventilation mécanique était identifiée comme une cause principale de l'insatisfaction de la qualité de l'air exprimée par 8.5% des participants (Figure 5.5). L'insuffisance de ventilation naturelle est aussi une autre source d'insatisfaction moins importante.

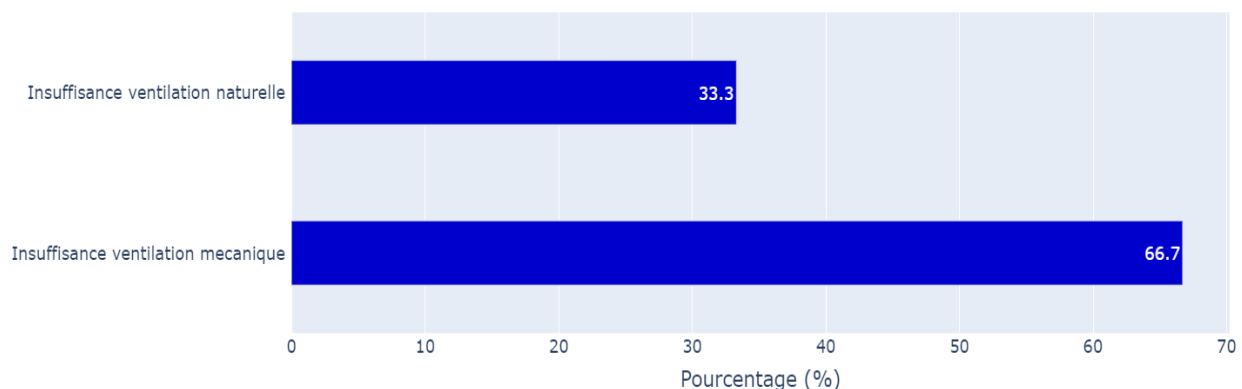


Figure 5.5 - Sources d'insatisfaction de la qualité de l'air.

Environ 10% des usagers ont exprimé une insatisfaction envers l'éclairage naturel de leurs bureaux. La gêne visuelle illustrée par les scintillements et les reflets était la source d'insatisfaction la plus importante (Figure 5.6). L'éblouissement est considéré aussi une autre source importante. En outre, des sources supplémentaires (moins importantes) telles que l'orientation des bureaux et l'inefficacité des stores ont été ajoutées par certains usagers.

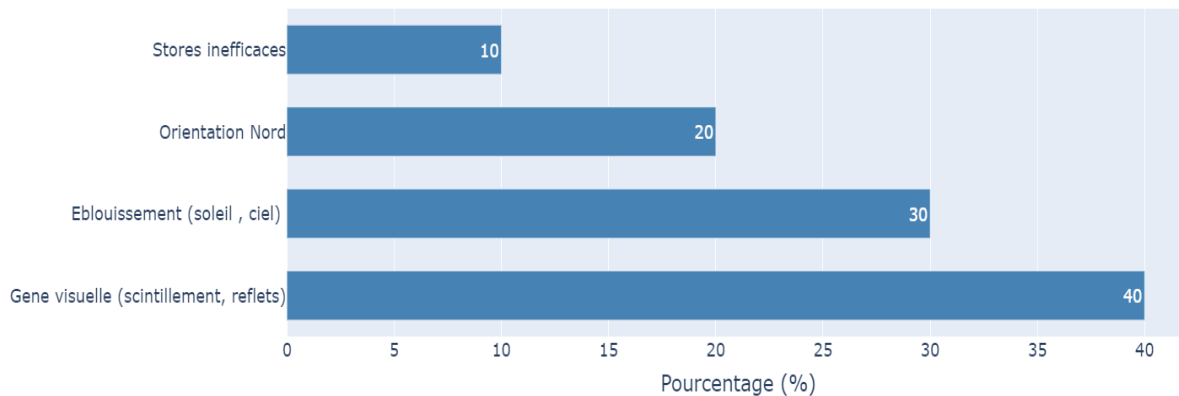


Figure 5.6 - Sources d'insatisfaction de l'éclairage naturel.

5.3.3 Analyse du groupe 2 (Contrôle de la température)

Le niveau "Insatisfait" domine le Groupe 2 (Figure 5.7). La moitié des participants sont insatisfaits à l'égard du contrôle de la température (50.5%). Les votes neutres représentent aussi une part importante (32.6%). La répartition du pourcentage de satisfaction explique la note moyenne caractérisant ce facteur. Les problèmes dans la régulation de la température étaient à l'origine de l'insatisfaction des participants (Figure 5.8). La manipulation des protections est une autre cause identifiée par une fraction moins importante de participants. Ces derniers ne se sont pas contentés de ces deux sources citées dans le questionnaire. Ils ont ajouté d'autres causes, parmi lesquelles l'ouverture déconseillée des fenêtres était la plus importante. L'absence de climatisation en été et la faible ouverture des fenêtres sont également des sources d'insatisfaction citées par une minorité de participants (2.1%).

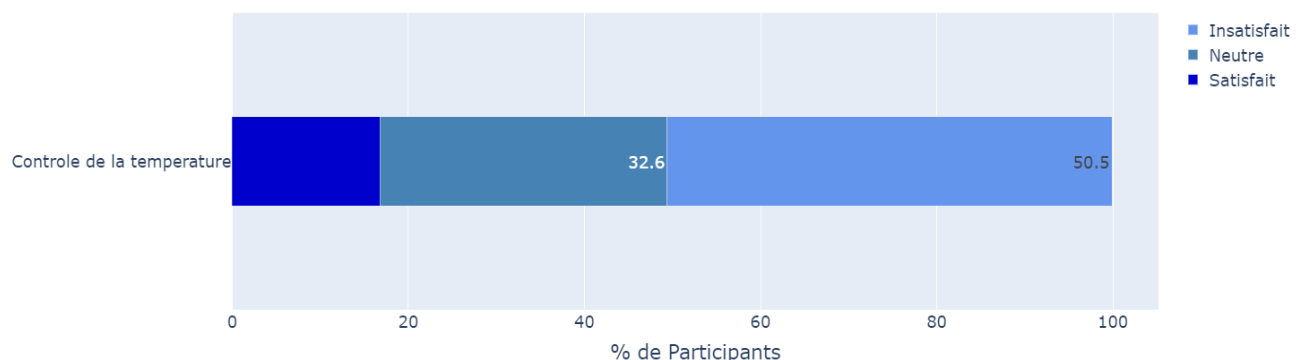


Figure 5.7 - Pourcentage de satisfaction des participants relatif au Groupe 2.

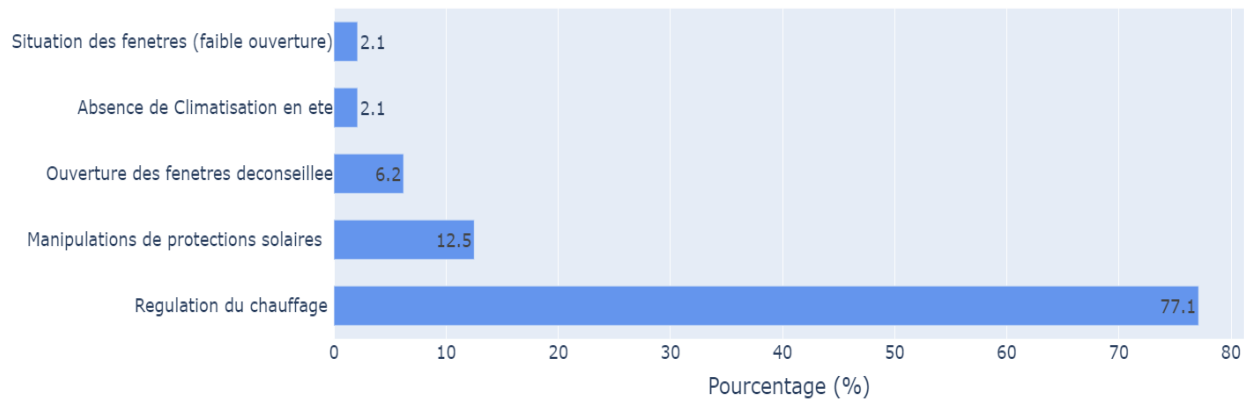


Figure 5.8 - Sources d'insatisfaction du contrôle de la température.

5.3.4 Analyse du groupe 3 (Température intérieure...)

Quant au troisième groupe, ses facteurs présentent un pourcentage intermédiaire de satisfaits ($\leq 65\%$) et un pourcentage considérable de votes neutres ($>20\%$) représentés dans la Figure 5.9. Cette répartition est en conformité avec la note moyenne de satisfaction. Dans ce groupe l'éclairage artificiel est le plus satisfaisant aux usagers (65.3%). Presque tous les facteurs se caractérisent par un pourcentage de satisfaits variable autour de 60% et un pourcentage de votes neutres autour de 20%. Cependant, la confidentialité et l'accès des personnes handicapées présentent le pourcentage le moins important de satisfaits (autour de 50%). En outre, l'accès des personnes handicapées reçoit la fraction la plus élevée de votes neutres (40.9%) suivi de l'espace disponible pour les activités de stockage et d'expérimentation (27.5%).

Les sources d'insatisfaction ont été repérées pour ce groupe aussi. Les facteurs liés aux sections de confort spatial, sécurité et accessibilité sont traités en premier. Concernant les facteurs liés au confort spatial, l'absence d'espace de stockage pour les plateformes au rez-de-chaussée et l'espace limité des salles d'expérimentation sont à la base de l'insatisfaction envers l'espace disponible pour les activités. D'autre part, les participants ont exprimé une insatisfaction à l'égard de la confidentialité visuelle et acoustique à la fois. Au niveau de la confidentialité visuelle, les participants étaient dérangés des vitres intérieures des bureaux. Leurs surfaces importantes rendent la totalité de l'espace intérieur du bureau visible. La transmission des sons du couloir et entre les bureaux est la cause de leur insatisfaction au niveau de la confidentialité auditive. Certains participants ont considéré que le facteur de confidentialité ne peut être évalué. À leur avis il n'y a pas de confidentialité, puisque globalement les bureaux sont partagés.

Concernant la sécurité, les avis des usagers se sont divisés sur le facteur de vandalisme. Certains ont jugé que les mesures prises sont insuffisantes. En effet, ils considèrent que l'entrée des personnes extérieures au bâtiment est très facile et ne nécessite pas de badge. Ils ont évoqué aussi des actes de vol qu'ils ont vécus surtout dans le local à vélo. De ce fait, ils ont exprimé une certaine insatisfaction vis-à-vis ce sujet. D'autres usagers sont insatisfaits en raison des mesures limitant l'accès des personnes extérieures au bâtiment. Cette situation peut déranger surtout les enseignants-chercheurs dans leurs rendez-vous avec leurs étudiants venant d'autres départements.

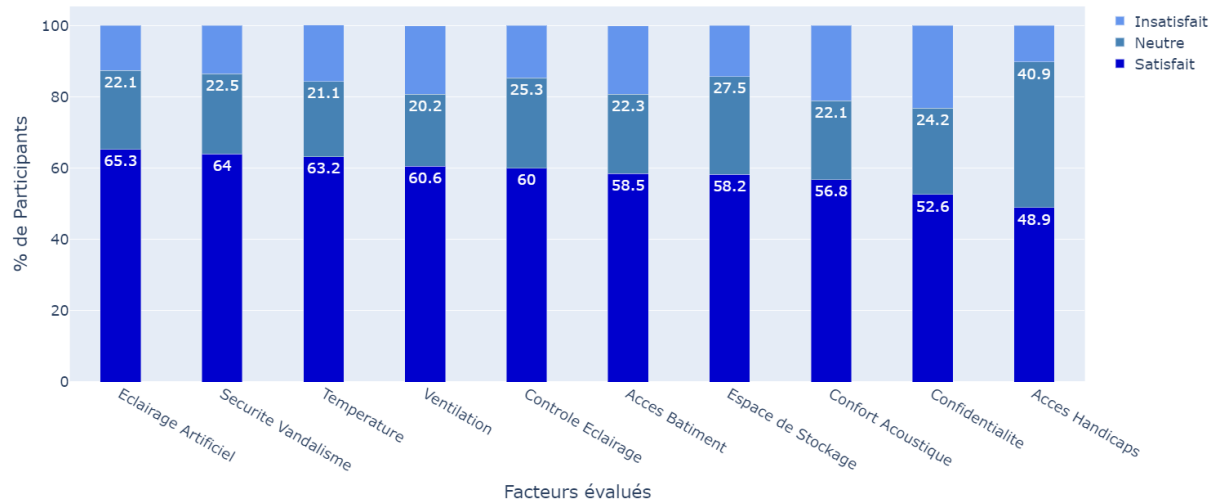


Figure 5.9 - Pourcentage de satisfaction des participants relatif aux facteurs du Groupe 3.

En ce qui concerne l’accessibilité des personnes handicapées, les participants à l’enquête ne présentent aucun besoin spécifique. Cependant, certains participants ont évoqué les sources probables d’insatisfaction. La porte de l’entrée principale lourde et non automatique, l’accès par badge et le cheminement intérieur inadapté peuvent être à l’origine du mécontentement des usagers. Quant aux heures d’accès au bâtiment, la limitation de l’accès pour des heures spécifiques (ouverture tard le matin, fermeture tôt le soir, interdiction de l’accès en week-end et pendant les vacances) est la principale cause d’insatisfaction. Les usagers, surtout les doctorants, considèrent que l’activité de recherche nécessite beaucoup de préparation et des interventions en dehors des heures habituels de travail. Par conséquent, elle ne doit être limitée par des horaires fixes.

Dans la suite, les sources d’insatisfaction relatives aux autres sections seront développées. Deux sources d’insatisfaction de l’éclairage artificiel ont été citées dans le questionnaire : Gêne visuelle et distribution non uniforme de l’éclairage. Parmi ces sources, les gênes visuelles étaient à la base de l’insatisfaction des usagers (Figure 5.10). D’autres sources importantes ont été ajoutées par les participants : Fonctionnement automatique, Puissance et Insuffisance de l’éclairage. De plus, les questions sur le contrôle de l’éclairage ont indiqué que l’incapacité des usagers à ajuster le niveau de l’éclairage artificiel est la raison de leur insatisfaction (Figure 5.11). Une importance minimale était dédiée à une source supplémentaire signalée par les participants : le fonctionnement automatique de l’éclairage (12.4%).

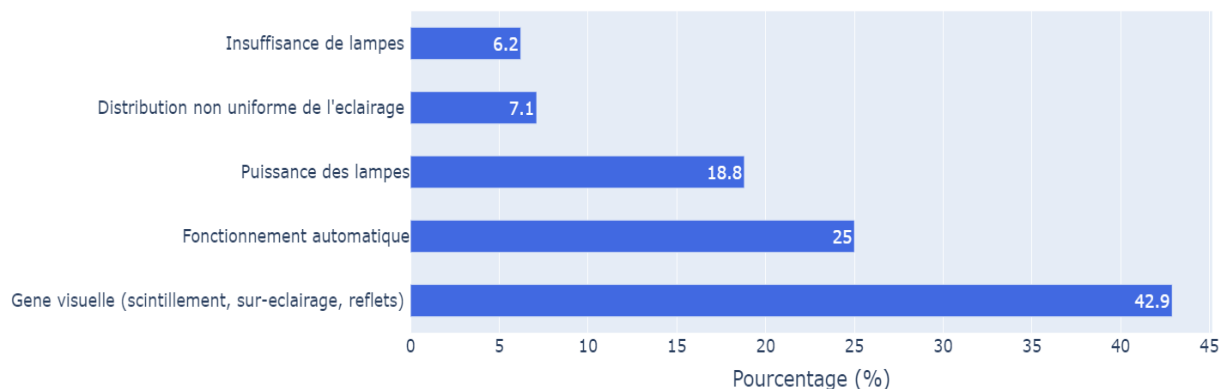


Figure 5.10- Sources d’insatisfaction de l’éclairage artificiel.

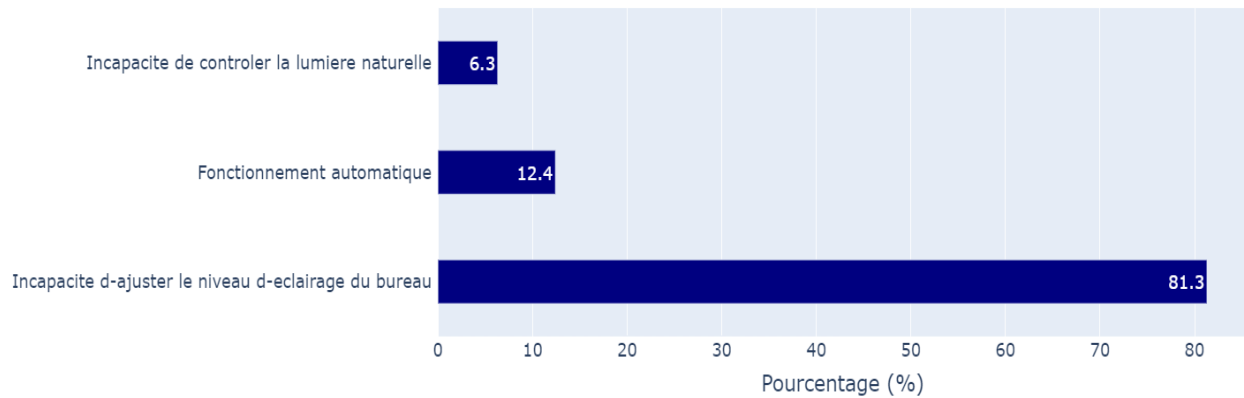


Figure 5.11- Sources d'insatisfaction du contrôle de l'éclairage global.

Des températures élevées en été et basse en hiver étaient les sources les plus fréquemment indiquées par les participants comme raison de leur mécontentement à l'égard du confort thermique (Figure 5.12). Des fluctuations de température ont été ressenties par certains des usagers causant ainsi leur insatisfaction. Aucune source supplémentaire (autre que celles mentionnées dans le questionnaire) n'a été ajoutée par les participants.

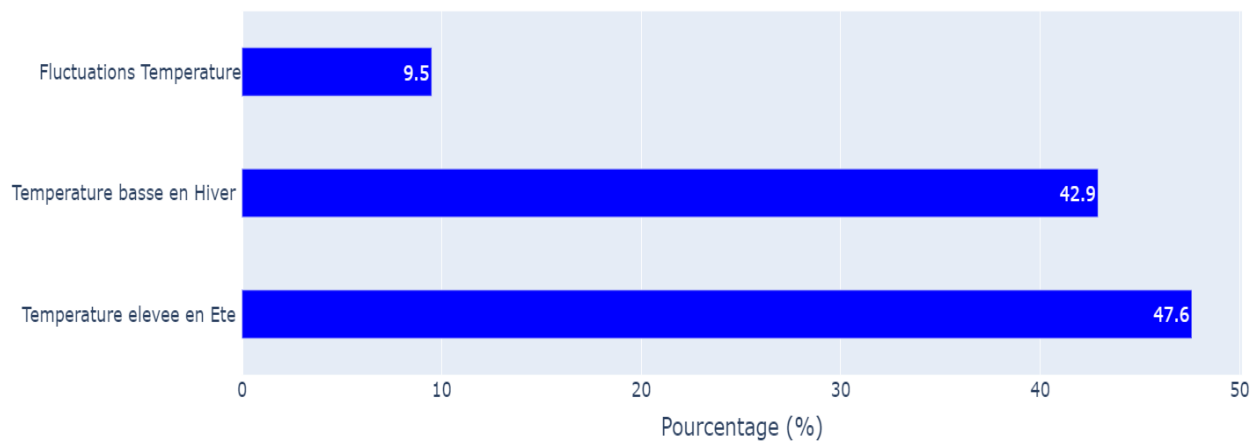


Figure 5.12- Sources d'insatisfaction de la température.

Les raisons d'insatisfaction de la ventilation sont multiples (Figure 5.13). Deux sources d'insatisfaction ont été spécifiées dans le questionnaire (courant d'air faible et important). Le courant d'air faible est le problème le plus évoqué par les participants (36.4%). Les autres sources ont été ajoutées par les participants. Le bruit de la ventilation, la situation des fenêtres et le fonctionnement du système de ventilation sont les plus mentionnés parmi les sources supplémentaires.

Les participants ont été demandés de choisir parmi trois sources d'insatisfaction concernant le confort acoustique (Figure 5.14). Bruits : intérieurs aux bureaux, intérieurs et extérieurs au bâtiment. La plupart d'eux ont choisi les bruits extérieurs aux bureaux mais intérieurs au bâtiment comme cause principale de leur insatisfaction. Une minorité a évoqué d'autres sources telles que les bruits liés au système de ventilation, l'écho et la réverbération dans les salles d'expérimentation ainsi que les bruits des portes et des badges.

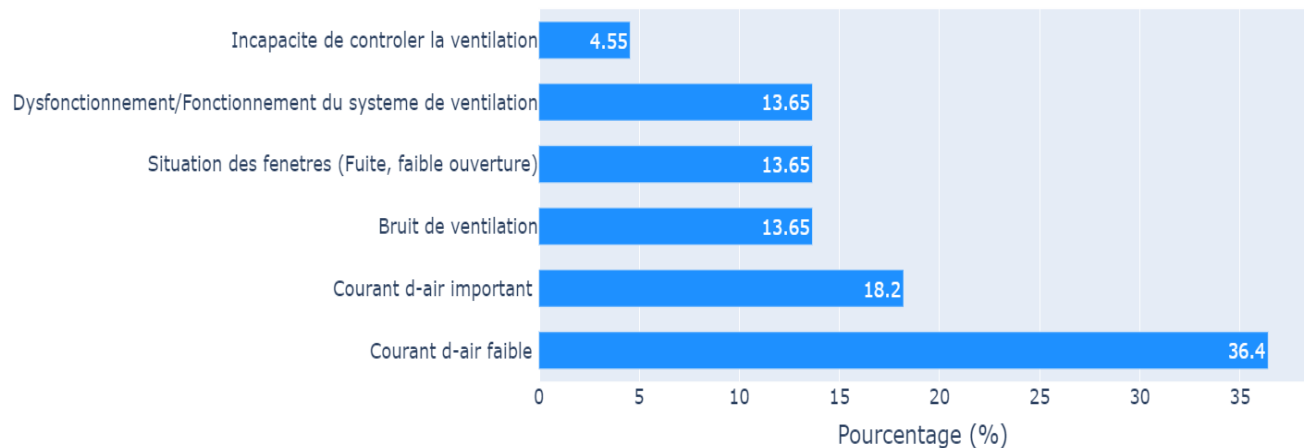


Figure 5.13- Sources d'insatisfaction de la ventilation.

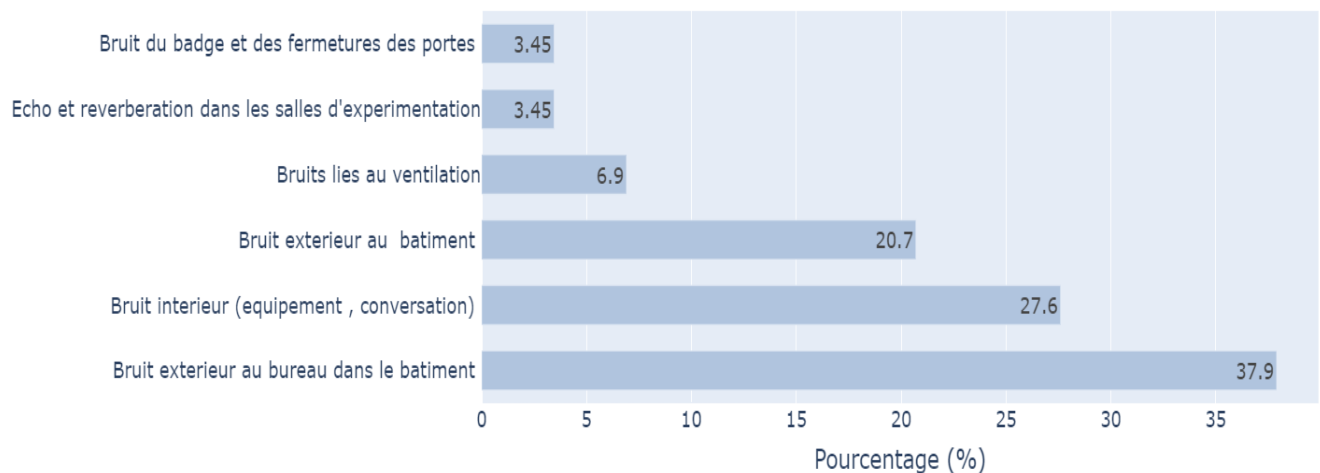


Figure 5.14- Sources d'insatisfaction du confort acoustique.

Dans la section réservée aux commentaires éventuels, certains des participants ont insisté sur des sources d'insatisfaction déjà évoquées dans leurs réponses, surtout celles liées à l'organisation des espaces et aux règles d'accès dans le bâtiment. D'autres participants ont signalé l'importance de favoriser l'interaction et les échanges entre les membres des différents laboratoires du bâtiment. Quelques participants ont laissé des commentaires positifs concernant l'état du bâtiment en général (neuf, agréable et propre).

Cette analyse conduite sur la satisfaction des usagers permet de tirer une conclusion fondamentale. Les participants sont généralement satisfaits à l'égard de tous les facteurs évalués dans le questionnaire mais avec des taux variables. Le pourcentage de satisfaits dépasse celui des votes neutres et celui des insatisfaits pour ces facteurs à l'exception du contrôle de la température. Le taux d'insatisfaction le plus élevé a été observé pour ce facteur.

5.3.5 Satisfaction Globale

Dans cette partie on s'intéresse à évaluer la satisfaction des usagers à l'égard de l'ensemble des facteurs définis. Cette évaluation tient compte des notes moyennes de satisfaction et d'importance

relatives à chacun des facteurs. Une note finale est alors définie. Celle-ci est calculée pour chacun des participants. Elle représente la moyenne pondérée des notes de satisfaction des facteurs. La note finale moyenne de tous les participants représentera l'indicateur de satisfaction du nouveau bâtiment ESPRIT.

La note finale relative à chaque participant est calculée selon l'équation suivante :

$$NF_i = \frac{\sum_j^n NS_{i,j} \times NI_{i,j}}{\sum_j^n NI_{i,j}}$$

Avec i : Le nombre total de participants.

n : Le nombre total de facteurs évalués.

NF_i : La note finale du participant i .

$NS_{i,j}$: La note de satisfaction du participant i relative au facteur j .

$NI_{i,j}$: La note d'importance attribuée par le participant i au facteur j .

La répartition de la note finale des participants est illustrée dans la Figure 5.15. Les notes finales sont variables entre 2 et 5. L'indicateur de satisfaction du bâtiment est de 3.62 indiquant ainsi un niveau intermédiaire de satisfaction.

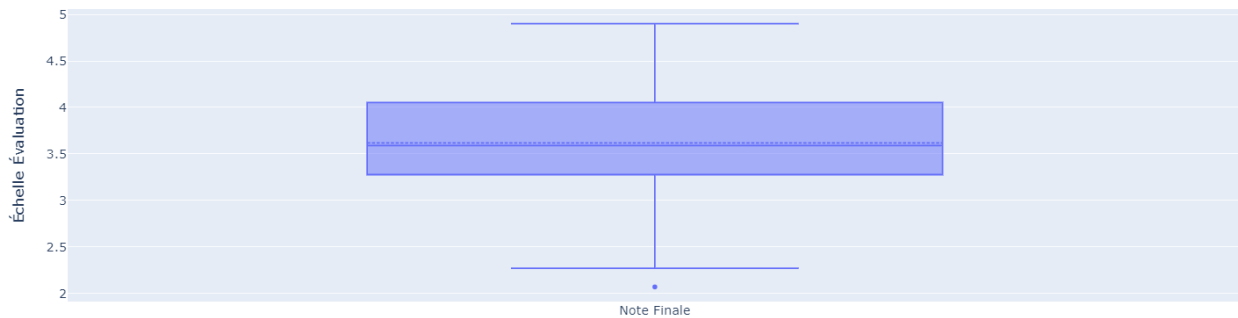


Figure 5.15- Diagramme en boîte de la note finale de satisfaction par participant.

En considérant toujours la même échelle d'évaluation (Satisfait, Neutre, Insatisfait), la répartition des participants sur les niveaux de satisfaction a été déterminée (Figure 5.16). Une minorité de participants ($\cong 5\%$) était insatisfaite du confort et des services du bâtiment. Cependant, la fraction la plus importante a montré une satisfaction vis-à-vis de l'ensemble des facteurs ($\cong 65\%$). Outre, près de 30% des participants ont exprimé une neutralité.

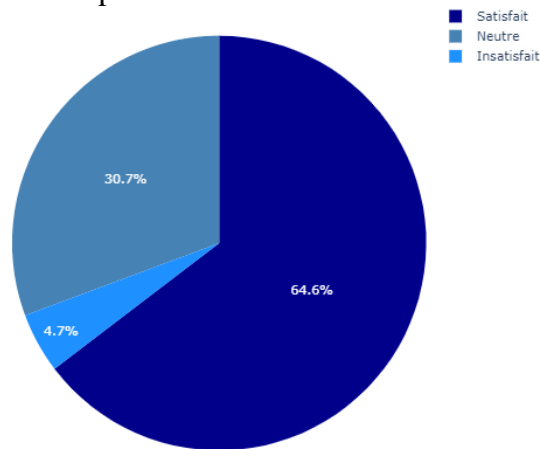


Figure 5.16 - Répartition des participants en termes de satisfaction globale.

5.4 Analyse de l'importance des facteurs

5.4.1 Analyse globale

Une analyse a été réalisée afin d'évaluer l'importance des facteurs définis pour le confort des usagers. La distribution des notes d'importance est illustrée dans la Figure 5.17. Trois groupes de facteurs peuvent être distingués en terme de distribution. La température, le confort spatial et l'accessibilité ont des répartitions similaires des notes d'importance. Ces notes sont variables entre 3 et 5 et leur valeur médiane est confondue avec celle du 1^{er} quartile (4). Le confort visuel, le confort acoustique et la sécurité constituent un deuxième groupe. Il diffère du premier par sa valeur médiane qui coïncide avec la valeur du 3^{ème} quartile. Le troisième groupe comporte le contrôle de la température et l'humidité. Les notes varient entre 2 et 5. Les valeurs de la médiane et du 3^{ème} quartile sont identiques. La ventilation et la qualité de l'air présentent des répartitions distinctes. Les notes moyennes d'importance par facteur sont représentées dans la Figure 5.18. Elles peuvent être divisées en deux groupes. Les facteurs dans chaque groupe sont classés par ordre décroissant d'importance par rapport aux usagers (Tableau 5.5). Les valeurs moyennes d'importance les plus élevées caractérisent le premier groupe (autour de 4). Le confort acoustique est le facteur le plus important du point de vue des usagers. Il présente la note moyenne la plus élevée du groupe (4.53). Le deuxième comporte les deux facteurs ayant reçus la note la plus basse (inférieure à 4). L'humidité présente la note moyenne la moins importante de ce groupe (3.65). Le pourcentage des participants ayant attribué différents niveaux d'importance pour les facteurs évalués sera représenté pour chacun des deux groupes. Il permet de confirmer la répartition des facteurs en deux groupes selon leur note moyenne d'importance. Trois niveaux d'importance seront considérés : Pas Important, correspond aux participants ayant votés (1 ou 2) ; Important, correspond à ceux qui ont votés (4 ou 5) ; Neutre correspond aux votes (3).

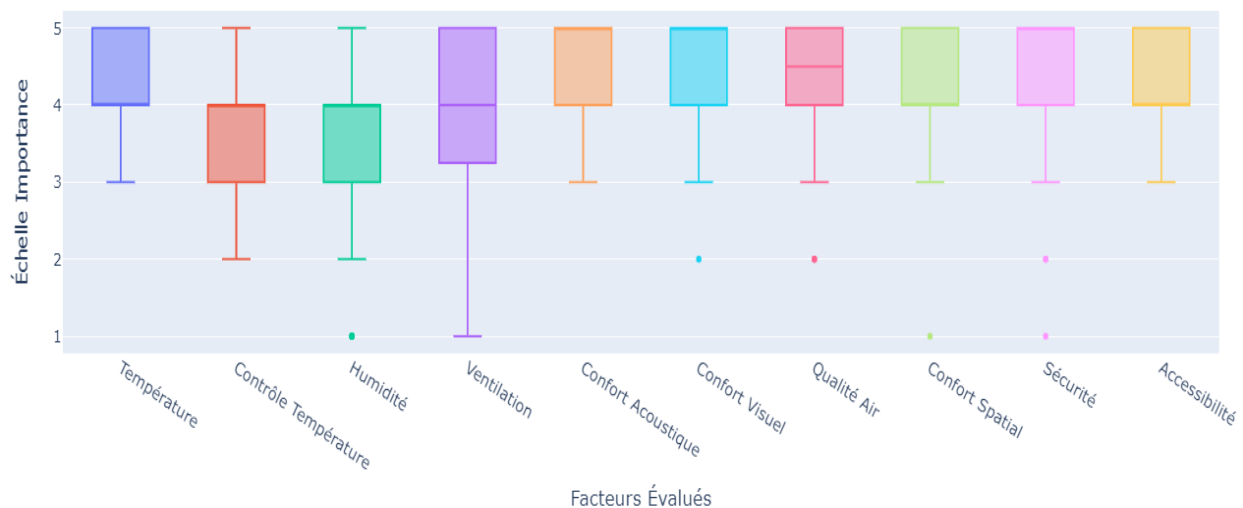


Figure 5.17 - Diagramme en boîte des notes d'importance.

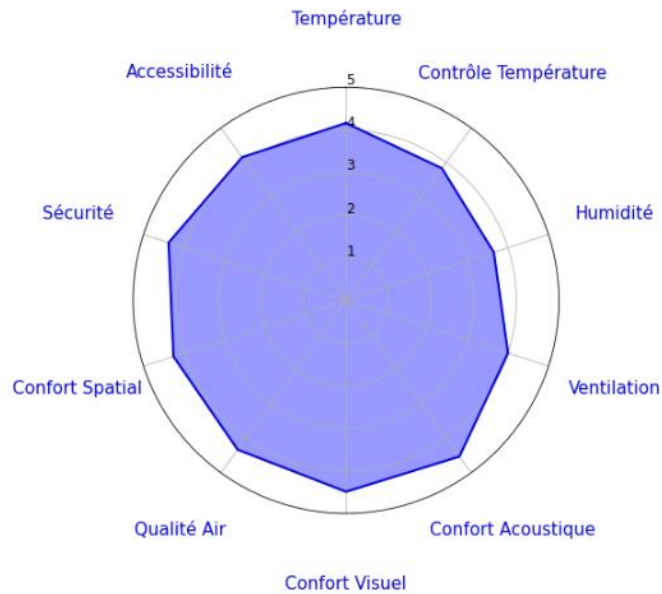


Figure 5.18 - Note moyenne d'importance par facteur.

Tableau 5.5 - Répartition des facteurs en terme de note moyenne d'importance.

Groupe 1	Groupe 2
Confort Acoustique	Contrôle de la Température
Confort Visuel	
Sécurité	
Qualité de l'air	
Confort Spatial	Humidité
Température	
Accessibilité	
Ventilation	

5.4.2 Analyse du groupe 1 (Confort acoustique, ...)

La répartition des participants sur les niveaux d'importance attribués aux facteurs du Groupe 1 est illustrée dans la Figure 5.19. Le niveau "Important" caractérise ce groupe, confirmant ainsi les notes moyennes observées pour chacun de ses facteurs. Généralement, plus que 75% des participants ont évalué ces facteurs comme importants. Le confort visuel et le confort acoustique sont les deux facteurs les plus intéressants pour les usagers avec des pourcentages d'évaluation "Important" dépassant 90%. Le confort acoustique, la température et l'accessibilité présentent un pourcentage nul d'évaluation "Pas Important". Même les facteurs restants présentent un pourcentage négligeable de ce niveau (≤ 3.3). Le pourcentage d'évaluation "Neutre" est variable pour ces facteurs. Près de 20% des participants ont évalué l'importance de l'accessibilité, la ventilation et la température comme neutre.

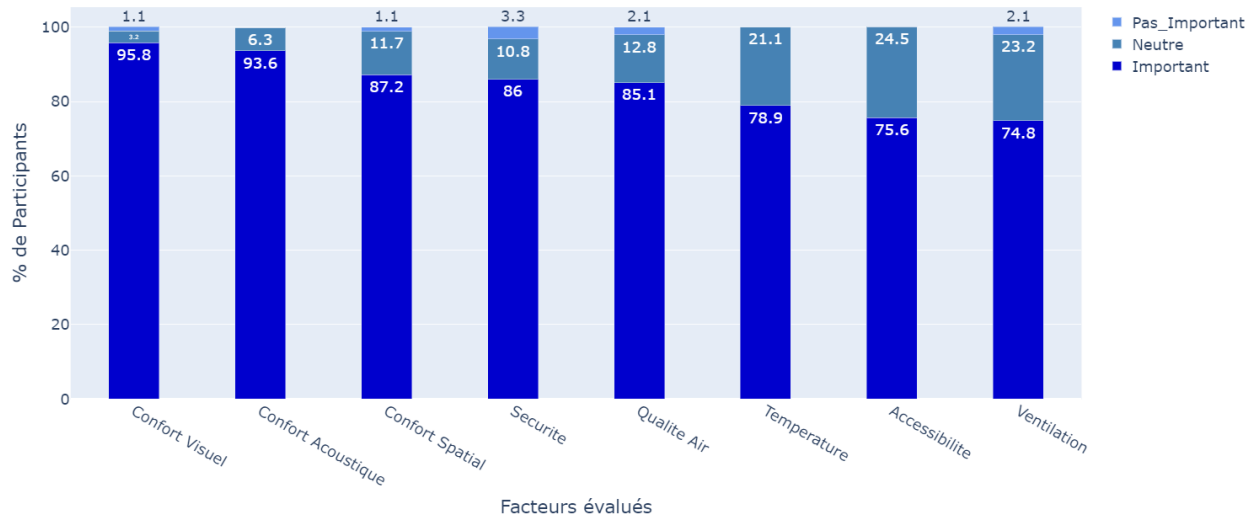


Figure 5.19 - Répartition des niveaux d'importance dans le Groupe 1.

5.4.3 Analyse du groupe 2 (Contrôle de la température...)

Le Groupe 2 présente une répartition comparable des participants sur les niveaux d'importance attribués à ses facteurs (Figure 5.20). Près de 60% des usagers ont évalué ces facteurs comme importants. Les participants accordent une importance un peu plus élevée au contrôle de la température comparée à celle de l'humidité. Le pourcentage d'évaluation "Pas important" est presque négligeable dans ce groupe aussi. Cependant, une fraction considérable ($\cong 30\%$) ont évalué l'importance de ces facteurs comme étant neutre.

L'analyse de l'importance des facteurs a montré que les participants ont évalué tous les facteurs comme étant importants pour leur confort avec des taux variables. Une minorité des participants, ne dépassant pas 7%, ont considéré quelques facteurs comme non importants. En outre, une importance particulière a été accordée au confort visuel et acoustique.

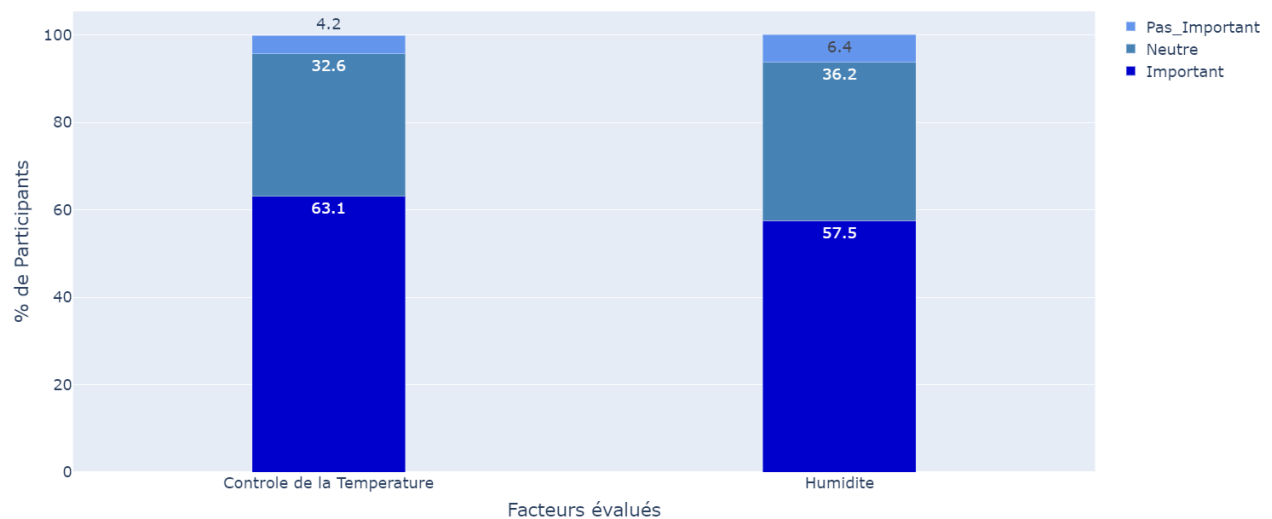


Figure 5.20- Répartition des niveaux d'importance dans le Groupe 2.

5.5 Analyse de relations

Dans cette partie on s'intéresse à identifier les relations existantes entre les différentes variables évaluées dans l'enquête. Les corrélations entre les facteurs liés au confort et aux services dans le bâtiment seront testées. L'influence des facteurs catégoriels liés aux caractéristiques personnelles et spatiales sur le niveau de satisfaction des usagers et d'importance des facteurs sera également analysée.

5.5.1 Analyse de corrélation

L'analyse a été effectuée sur les questions évaluant la satisfaction des usagers et l'importance des facteurs. Elle vise à mieux comprendre la relation entre les réponses des usagers à ces éléments. Les corrélations ont été testées sur la base du coefficient de rang de Spearman. Un test de significativité de la corrélation a été réalisé aussi. La corrélation est considérée forte si le coefficient dépasse 0.8, modérée s'il varie entre 0.5 et 0.8 et faible s'il est inférieur à 0.5 [210]. Les résultats de corrélation relatifs aux réponses de satisfaction des usagers sont présentés dans la Figure 5.21. Les coefficients de corrélation sont en majorité inférieurs à 0.5 indiquant ainsi une faible corrélation en générale.

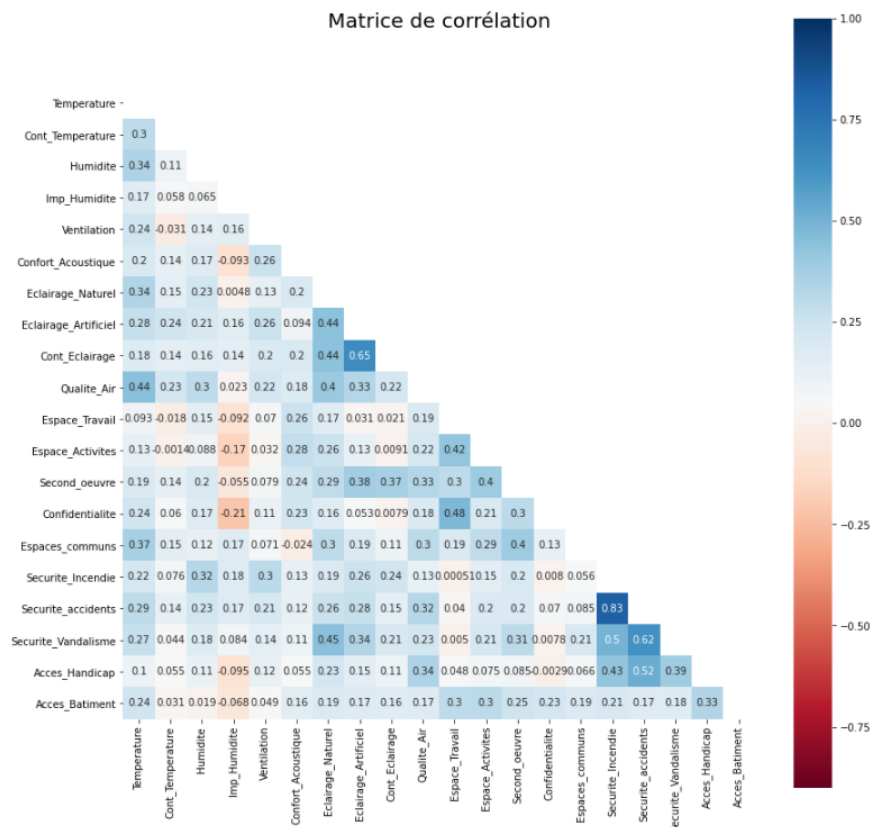


Figure 5.21 - Corrélation des réponses sur la satisfaction envers les facteurs évalués.

Certains coefficients dépassent 0.5 (corrélation modérée) et un seul dépasse 0.8 (corrélation forte). La corrélation est statistiquement significative pour ces coefficients. Cependant une seule corrélation est identifiée comme raisonnable. La satisfaction à l'égard du contrôle de l'éclairage est étroitement liée à la satisfaction de l'éclairage artificiel ($r=0.65$, $p<0.05$). Cette corrélation peut

être appuyée par les réponses des participants indiquant le contrôle de l'éclairage comme source d'insatisfaction de l'éclairage artificiel.

Des résultats similaires ont été observés pour la corrélation relative aux réponses d'importance des facteurs aux usagers. Ils sont caractérisés par une faible corrélation ($r < 0.5$). Cependant, une corrélation modérée a été identifiée. Les questions sur l'importance de l'humidité et de la ventilation ont été modérément corrélées ($r = 0.5$, $p < 0.05$).

5.5.2 Étude de l'influence des facteurs catégoriels

Une analyse plus approfondie des résultats a été menée dans cette partie. L'influence de facteurs catégoriels (âge, genre, poste occupé, laboratoire, orientation, type de bureaux et nombre de personnes dans les bureaux) sur la satisfaction des usagers et l'importance des facteurs définis est étudiée.

À cette fin, une analyse statistique par l'intermédiaire du logiciel IBM SPSS a été menée. En premier lieu, la normalité des variables a été testée au moyen du test de Shapiro-Wilk. "La variable suit une loi normale" est l'hypothèse nulle définie pour ce test. La significativité du test a été ensuite déterminée afin d'évaluer cette hypothèse. La valeur p calculée pour chacune des variables était significative ($p < 0.05$). Ceci permet de conclure que les variables ne suivent pas une loi normale.

Des tests statistiques non paramétriques sont utilisés en raison de la distribution des variables. Ils permettent de déterminer si les facteurs catégoriels affectent de manière significative la satisfaction et l'importance attribuées aux facteurs évalués. Deux types de tests sont employés. Pour les variables catégorielles à deux groupes (genre, orientation et types de bureaux) le test U de Mann-Whitney est utilisé. Pour les variables catégorielles restantes (présentant plus que deux groupes) le test de Kruskal-Wallis est conduit.

Une paire de variables (une variable ordinale et l'autre catégorielle) est sélectionnée. Une hypothèse nulle est également définie pour le test : La distribution de la variable ordinale est la même sur les groupes de la variable catégorielle. Une valeur significative de p (< 0.05) permet le rejet de l'hypothèse nulle. Dans ce cas, une différence est observée dans les réponses des groupes de la variable catégorielle. Dans le cas contraire, l'hypothèse nulle sera validée et aucune différence n'est observée.

Les Tableaux 5.6 et 5.7 illustrent les résultats des tests statistiques. Seul les facteurs évalués présentant des différences de réponses entre les groupes de variables catégorielles sont présentés. Certaines réponses de satisfaction varient en fonction d'une seule variable catégorielle. Tel est le cas de la température et la qualité de l'air présentant une différence de réponses entre les participants selon leurs genres. Les réponses sur la sécurité incendie diffèrent selon les catégories d'âge. Les réponses relatives au confort acoustique sont influencées par le type des bureaux. Le poste occupé par les participants a aussi un impact sur les réponses concernant la satisfaction vis-à-vis des espaces communs et des heures d'accès au bâtiment.

D'autres réponses varient en fonction de plusieurs variables catégorielles. C'est le cas de la satisfaction à l'égard de la ventilation. Elle est différente selon le genre des participants et le nombre de personnes dans les bureaux. La confidentialité est aussi affectée par deux variables : le laboratoire auquel appartiennent les participants et le nombre de personnes dans les bureaux.

D'autre part les réponses de satisfaction de l'espace de travail dépendent de trois variables : l'âge des participants, le type de bureau et le nombre de personnes dans les bureaux.

Tableau 5.6 - Résultats des tests statistiques relatifs aux réponses de satisfaction.

	Température	Ventilation	Confort Acoustique	Qualité Air	Espace Travail	Confidentialité	Espaces Communs	Sécurité incendie	Heures d'accès
Âge					■			■	
Genre	■			■					
Laboratoire						■			
Orientation									
Type bureau			■		■				
Nb de personnes		■			■	■			
Poste occupé							■		■

Concernant les réponses sur l'importance des facteurs, elles dépendent d'une seule variable catégorielle dans le cas des facteurs liés à la température, à la qualité de l'air et à l'accessibilité. Les réponses sur la température diffèrent selon le genre des participants. Elles diffèrent selon le nombre de personnes dans les bureaux pour la qualité de l'air et selon l'orientation pour l'accessibilité.

Ces réponses dépendent de plusieurs variables pour le facteur de la sécurité (orientation et poste occupé).

Tableau 5.7 - Résultats des tests statistiques relatifs aux réponses d'importance.

	Température	Ventilation	Qualité Air	Sécurité	Accessibilité
Âge					
Genre	■				
Laboratoire					
Orientation				■	■
Type bureau					
Nb de personnes			■		
Poste occupé				■	

5.5.3 Analyse de satisfaction par variable catégorielle

Dans cette partie l'effet des groupes de chaque variable catégorielle sur les réponses de satisfaction et d'importance des facteurs associés sera étudié. Pour chaque variable catégorielle, le groupe le plus satisfait et le moins satisfait à l'égard des facteurs sont identifiés. Les facteurs les plus et les moins importants pour chaque groupe sont aussi indiqués. La satisfaction globale de chaque groupe est aussi évaluée.

5.5.3.1 Analyse par Genre

L'ensemble des réponses est divisé selon le genre des participants en deux groupes : Femme et Homme. Les notes moyennes de satisfaction attribuées par chacun des groupes aux facteurs évalués sont représentées dans la Figure 5.22.

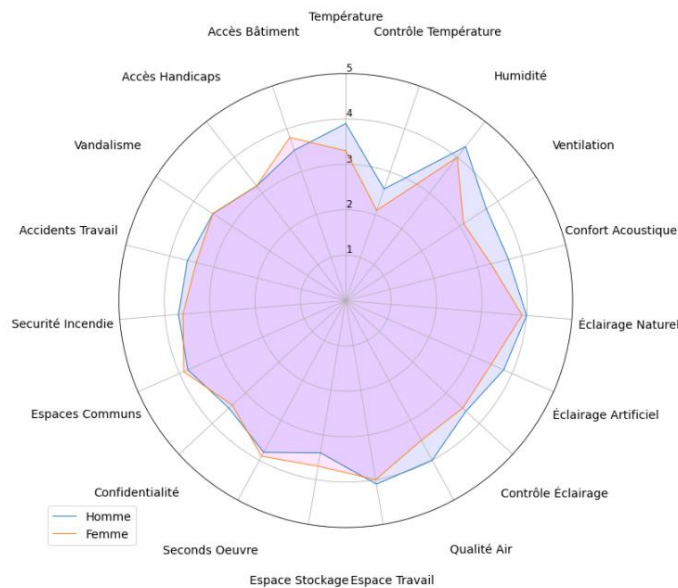


Figure 5.22 - Note moyenne de satisfaction par genre.

Presque tous les facteurs évalués sont caractérisés par des notes moyennes comparables pour les deux groupes. Cependant, certains facteurs présentent des exceptions. La température, le contrôle de la température, la ventilation et la qualité de l'air présentent une différence de notes moyennes entre les groupes. Pour ces facteurs, les hommes présentent une note moyenne plus élevée. Ceci implique que les femmes sont moins satisfaites à l'égard de ces facteurs.

L'humidité, l'espace de travail et l'éclairage naturel sont les facteurs les plus satisfaisants pour les deux groupes à la fois. Ils présentent les notes moyennes les plus élevées ($\cong 4$). Outre ces facteurs, les hommes ont montré une satisfaction élevée envers la qualité de l'air et les femmes aussi envers les seconds œuvres et la qualité des espaces communs. Ces deux groupes ont exprimé le plus d'insatisfaction envers le contrôle de la température présentant la note moyenne la moins élevée.

La satisfaction globale a été également évaluée pour les deux groupes. Généralement, les hommes expriment une satisfaction plus élevée comparée aux Femmes (Figure 5.23). Le pourcentage des hommes satisfaits à l'égard de l'ensemble des facteurs évalués (69.5) dépasse celui des femmes (52.2). Dans les deux groupes une minorité de participants exprime une insatisfaction et une portion remarquable exprime une neutralité.

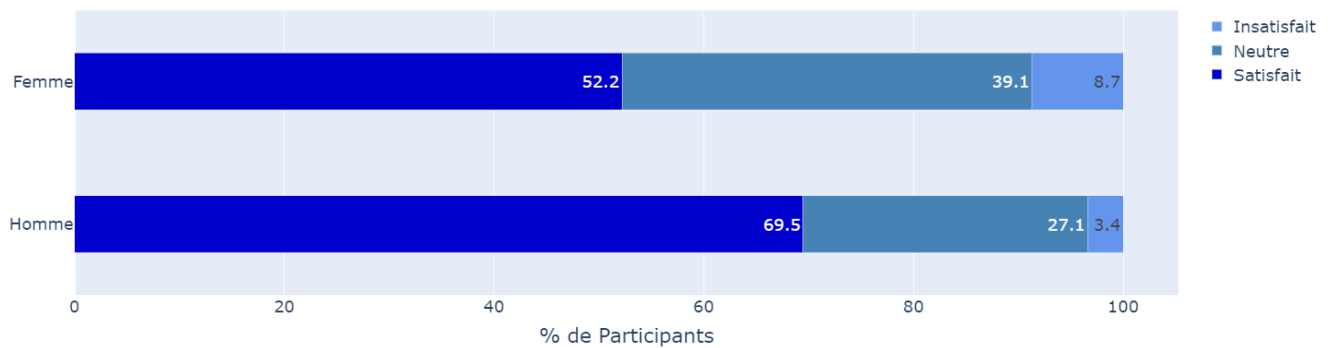


Figure 5.23- Répartition des participants par genre en termes de satisfaction globale.

En ce qui concerne l'importance, les notes moyennes sont similaires pour la majorité des facteurs sauf pour certains (Figure 5.24).

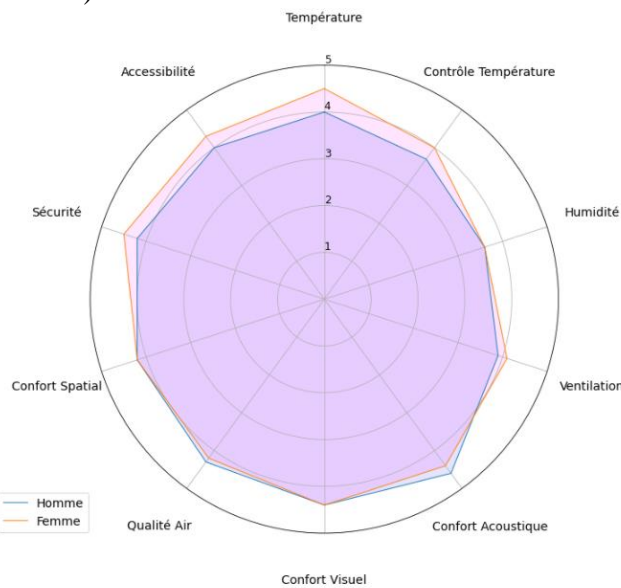


Figure 5.24 - Note moyenne d'importance par genre.

Le groupe de femmes est caractérisé par des notes moyennes légèrement élevées pour la température, le contrôle de la température, l'accessibilité et la sécurité. Les femmes sont donc plus intéressées que les hommes par ces facteurs. Le Tableau 5.8 présente les facteurs les plus importants pour chacun des deux groupes ainsi que leurs notes moyennes. Les hommes ont évalué "important" la qualité de l'air en plus du confort acoustique et visuel. Quant aux femmes ils ont classé la température, la sécurité et l'accessibilité parmi les facteurs les plus importants. L'humidité et le contrôle de la température sont les moins importants pour les deux groupes.

Tableau 5.8 - Les facteurs les plus importants évalués par les participants par genre.

Genre	Facteurs 1	Facteurs 2	Facteurs 3
Hommes	Confort Visuel	Confort Acoustique	Qualité de l'air
	4.6	4.4	4.3

Femmes	Température , Sécurité	Confort Acoustique , Visuel	Accessibilité
	4.5	4.4	4.3

5.5.3.2 Analyse par Orientation

Les bureaux des participants sont répartis sur les deux façades Sud et Nord du bâtiment. L'ensemble des réponses est donc divisé selon l'orientation des bureaux en deux groupes. Les notes moyennes des facteurs relatives à chacun des groupes sont représentées dans la Figure 5.25.

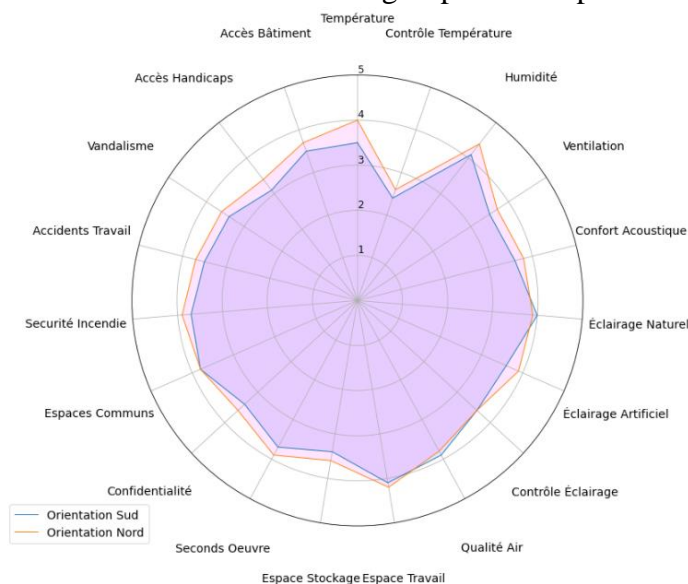


Figure 5.25 - Note moyenne de satisfaction par orientation.

En général, une légère différence est remarquée dans les notes moyennes entre les deux groupes. Cette différence est la plus importante pour les notes attribuées à la température. Les usagers des bureaux orientés vers le nord présentent une satisfaction plus élevée envers la température comparée à ceux des bureaux orientés vers le sud.

L'humidité et l'espace de travail sont les deux facteurs les plus satisfaisants par rapport aux participants des deux groupes. Les bureaux orientés vers le sud ont exprimé aussi une satisfaction importante envers l'éclairage naturel. De même, ceux orientés vers le nord sont satisfaits également de la température. Le contrôle de la température est le facteur le moins satisfaisant pour les deux groupes.

Le pourcentage de satisfaits de l'ensemble des facteurs est beaucoup plus élevée pour les participants occupants des bureaux à orientation nord (Figure 5.26). Un pourcentage nul d'insatisfaits caractérise cette orientation. De même, un nombre minime de participants dans le groupe de l'orientation sud exprime une insatisfaction. Pour les deux groupes, la fraction exprimant une neutralité envers le confort dans le bâtiment est importante.

Concernant l'importance, les participants dans les bureaux orientés nord accordent une importance plus élevée aux facteurs liés à la sécurité et à l'accessibilité. Des notes d'importance comparables sont attribuées au reste des facteurs.

Les facteurs les plus importants et leurs notes moyennes sont indiqués dans le Tableau 5.9. En plus du confort visuel et acoustique, les participants du sud ont évalué la qualité de l'air et le confort spatial comme facteurs importants. La sécurité est le facteur le plus important pour les participants dans les bureaux orientés vers le nord. Les facteurs les moins importants pour les deux groupes sont l'humidité et le contrôle de la température.

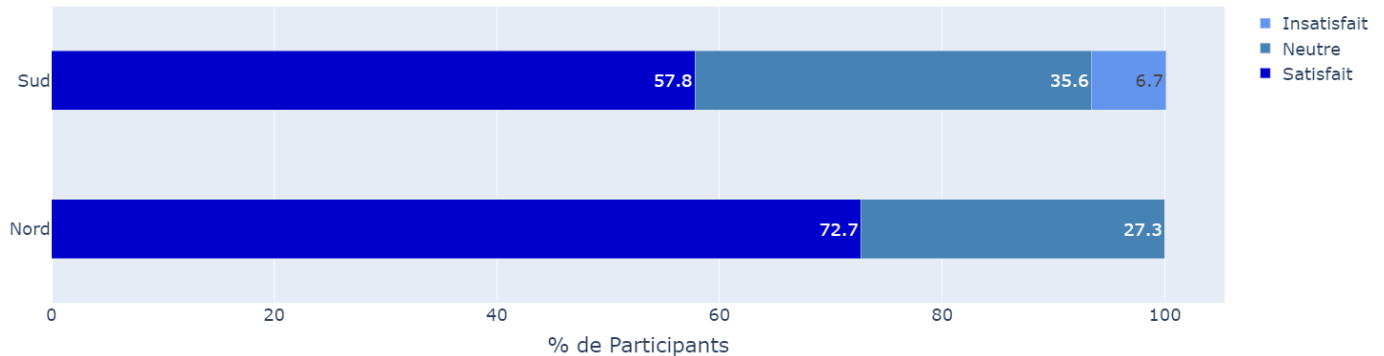


Figure 5.26- Répartition des participants par orientation en termes de satisfaction globale.

Tableau 5.9 - Les facteurs les plus importants évalués par les participants par orientation.

Orientation	Facteurs 1	Facteurs 2	Facteurs 3
Sud	Confort Acoustique	Confort Visuel	Qualité de l'air, Confort Spatial
	4.5	4.4	4.2
Nord	Sécurité	Confort Visuel	Confort Acoustique
	4.7	4.6	4.5

5.5.3.3 Analyse par type de bureau

Les participants occupent deux types de bureaux : Collectifs et Individuels. Les réponses sont divisées en deux groupes selon ces types. Leurs notes moyennes de satisfaction sont présentées dans la Figure 5.27.

Les notes moyennes attribuées par les participants occupant des bureaux collectifs sont plus importantes que celles des bureaux individuels pour l'éclairage artificiel et la sécurité incendie. Le cas contraire est observé pour les facteurs de confort acoustique, l'espace de travail, l'espace d'activités et la confidentialité. Des notes moyennes légèrement différentes entre les deux groupes caractérisent les autres facteurs.

L'humidité, l'espace de travail et l'éclairage naturel sont les facteurs les plus satisfaisants pour les deux groupes. Dans les bureaux collectifs, l'éclairage artificiel, la qualité des espaces communs et la sécurité incendie sont évalués comme satisfaisants aussi. Il en est de même pour le confort acoustique, la qualité de l'air, la confidentialité et les seconds œuvres dans les bureaux individuels. Les deux groupes ont évalué insatisfaisant le contrôle de la température.

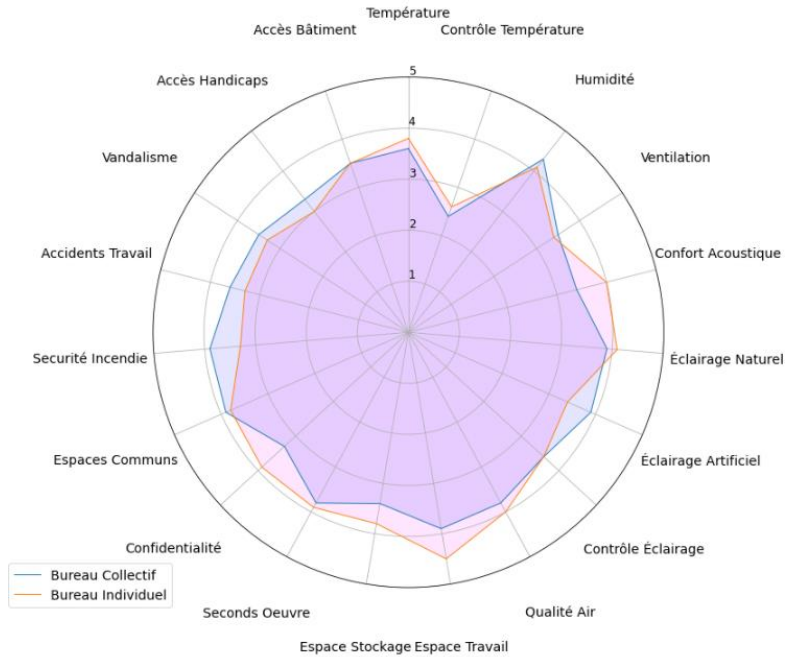


Figure 5.27 - Note moyenne de satisfaction par type de bureau.

Les pourcentages de satisfaction envers l'ensemble des facteurs évalués dans le bâtiment sont comparables dans les deux groupes (Figure 5.28).

Une minorité de participants dans les deux types de bureaux sont insatisfaits. En plus une fraction importante est neutre.

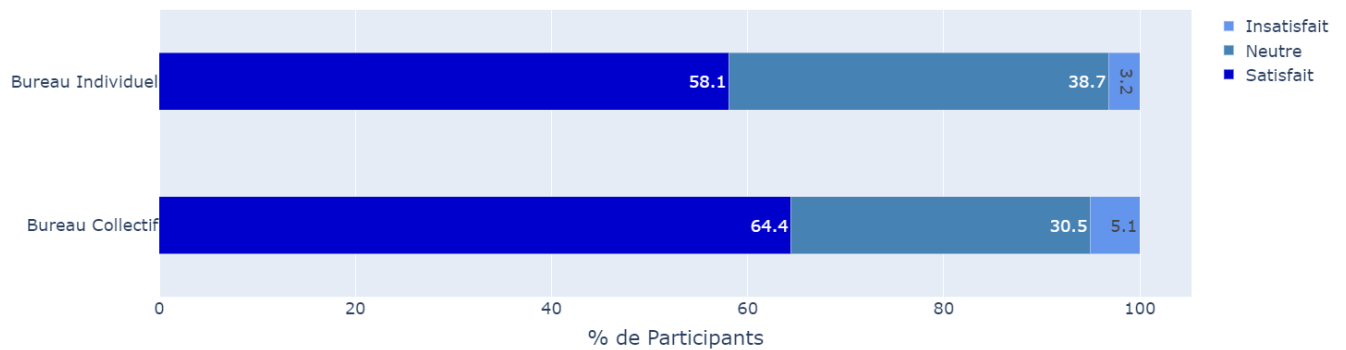


Figure 5.28- Répartition des participants par type de bureaux en termes de satisfaction globale.

Concernant l'importance des facteurs, les notes moyennes sont presque similaires relativement aux facteurs évalués pour les deux groupes (Figure 5.29). Le confort acoustique et visuel, la sécurité incendie et la qualité de l'air sont évalués comme les facteurs les plus importants. Le contrôle de la température et l'humidité sont les moins importants.

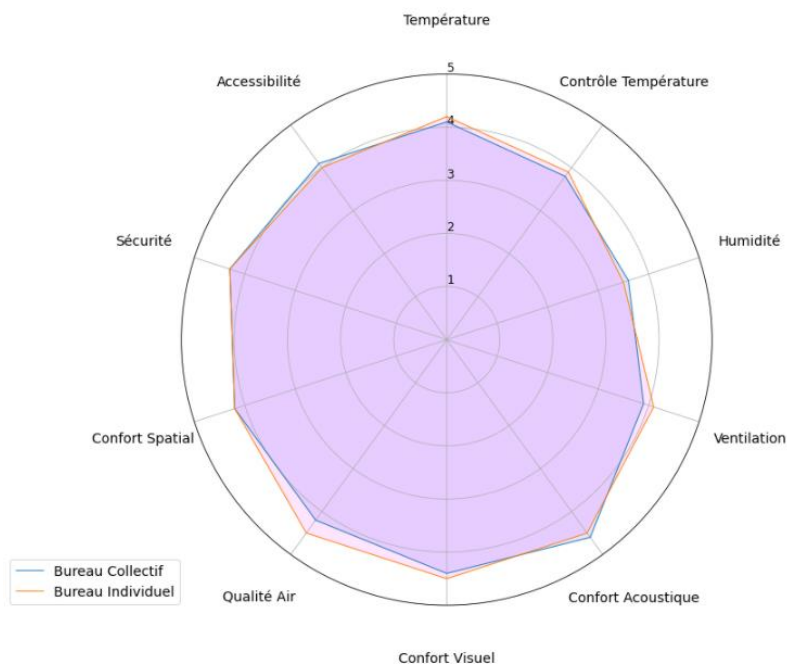


Figure 5.29 - Note moyenne d'importance par type de bureau.

5.5.3.4 Analyse par nombre de personnes dans les bureaux

Les bureaux des participants sont répartis en trois groupes selon le nombre des personnes qui les occupe. Les réponses des participants sont alors divisées en fonction du nombre de personnes dans les bureaux en trois groupes. Dans la Figure 5.30 les notes moyennes de satisfaction relatives à ces groupes sont illustrées.

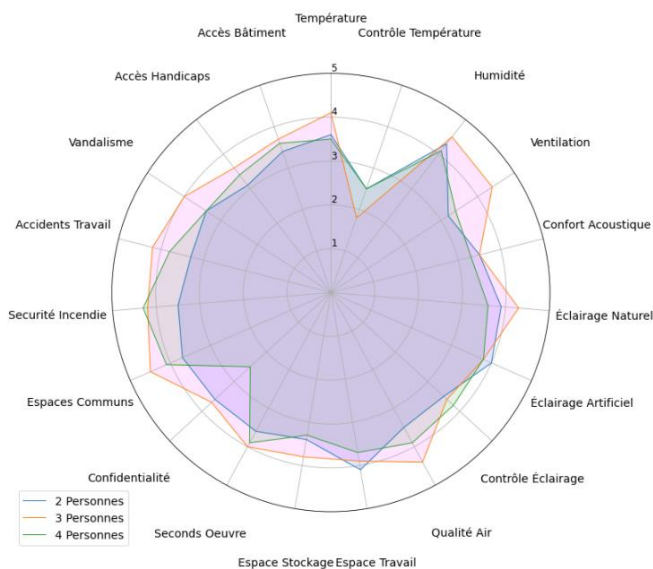


Figure 5.30 - Note moyenne de satisfaction par nombre de personnes dans les bureaux.

Les trois groupes présentent des notes moyennes de satisfaction légèrement différentes pour l'humidité, le confort acoustique, l'éclairage artificiel, le contrôle de l'éclairage, l'espace de travail, les second œuvres et l'accès au bâtiment.

On considère les facteurs restants. Pour chaque facteur un des 3 groupes est le plus satisfait comparé aux autres (il attribue la note moyenne la plus élevée). Les groupes les plus satisfaits envers le contrôle de la température sont ceux des bureaux occupés par 2 et 4 personnes (Groupes 1 et 3). Le groupe le plus satisfait à l'égard de la sécurité incendie est le groupe des bureaux à 4 personnes. Les bureaux à 3 personnes (Groupe 2) sont les plus satisfaits des autres facteurs comparés aux bureaux à 2 et 4 personnes.

Les trois groupes sont satisfaits de la qualité des espaces communs à la fois. D'autres facteurs sont aussi évalués satisfaisants pour chacun des groupes (Tableau 5.10). Ces groupes sont insatisfaits du contrôle de la température. En plus, le groupe des bureaux à 4 personnes exprime son insatisfaction envers la confidentialité.

Tableau 5.10- Les facteurs les plus satisfaisants pour les trois groupes de nombre de personnes.

Nombre	Facteurs 1	Facteurs 2	Facteurs 3
2 personnes	Éclairage naturel	Espaces communs	Température ,Confidentialité
	3.9	3.7	3.6
3 personnes	Espaces communs	Ventilation ,Qualité de l'air	Éclairage naturel
	4.5	4.4	4.3
4 personnes	Sécurité incendie	Espaces communs	Qualité de l'air
	4.3	4.1	3.9

La répartition des participants de chaque groupe selon leur satisfaction globale est représentée dans la Figure 5.31.

Le groupe 2 est caractérisé par le pourcentage de satisfaits le plus élevé (90%) dépassant largement celui des autres groupes. En outre, nul participant de ce groupe n'est insatisfait de l'environnement du bâtiment. Le groupe 3 est le deuxième en terme de pourcentage de satisfaits et d'insatisfaits. Le groupe 1 présente moins de satisfaits et plus de votes neutres.

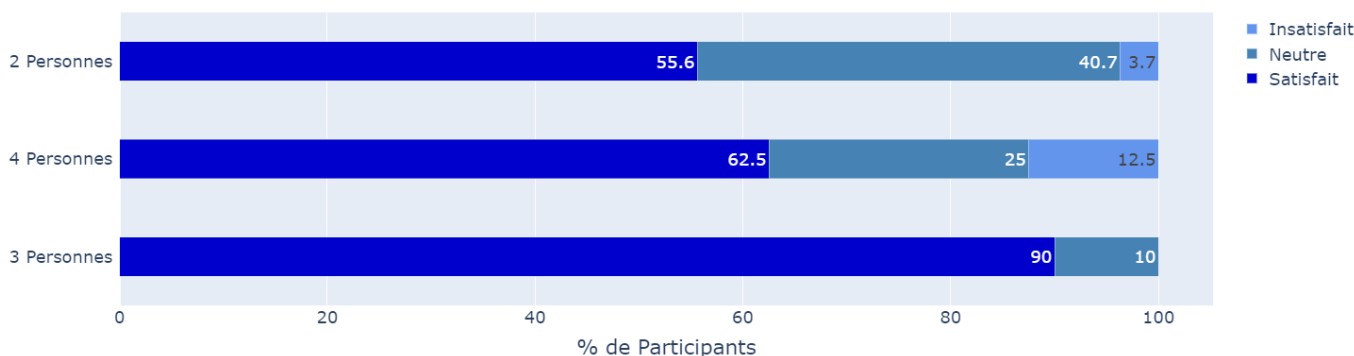


Figure 5.31- Répartition des participants par nombre de personnes en termes de satisfaction globale.

En termes d'importance, les notes moyennes sont semblables pour tous les facteurs sauf pour la ventilation, la qualité de l'air et la sécurité.

Le groupe 3 a attribué une note moyenne plus élevée à la ventilation comparée à celles des autres groupes. La note moyenne relative à la qualité de l'air est plus élevée dans les groupes 2 et 3. Il en est de même pour la sécurité présentant une note moyenne plus élevée dans les groupes 1 et 3.

Les facteurs les plus importants par rapport à chaque groupe sont indiqués dans le Tableau 5.11. Le confort acoustique est commun aux trois groupes. Les groupes 1 et 3 ont évalué l'humidité comme le facteur le moins important. Le groupe 2 était moins intéressé au contrôle de la température.

Tableau 5.11- Les facteurs les plus importants pour les trois groupes de nombre de personnes.

Nombre	Facteurs 1	Facteurs 2	Facteurs 3
2 personnes	Confort acoustique	Confort visuel	Sécurité
	4.5	4.4	4.3
3 personnes	Confort acoustique	Qualité de l'air, Confort spatial	Accessibilité
	4.6	4.5	4.3
4 personnes	Confort acoustique , Qualité de l'air	Confort Visuel , Sécurité	Ventilation, Confort spatial
	4.6	4.5	4.3

5.5.3.5 Analyse par poste occupé

Les participants occupent trois types de poste : Enseignant-Chercheur, Personnels techniques et administratifs et Doctorants. L'ensemble des réponses est divisé selon ces types en trois groupes. Les notes moyennes de satisfaction sont présentées dans la Figure 5.32.

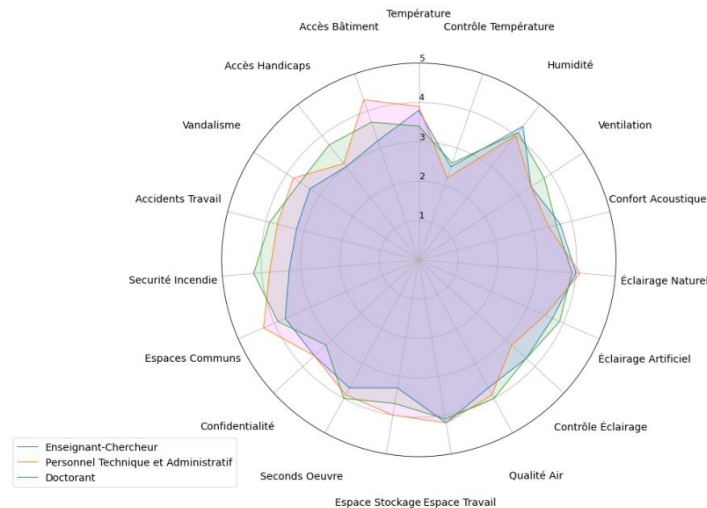


Figure 5.32 - Note moyenne de satisfaction par poste occupé.

Les trois groupes présentent des notes moyennes de satisfaction légèrement différentes pour l'humidité, le confort acoustique, l'éclairage artificiel, la qualité de l'air, l'espace de travail, les seconds œuvres et la sécurité contre le vandalisme. Le Tableau 5.12 indique le groupe le plus satisfait pour chaque facteur. Les groupes 1 et 3 (Enseignants et Doctorants) présentent des niveaux de satisfaction identiques envers le contrôle de l'éclairage.

L'humidité et l'espace de travail sont parmi les facteurs les plus satisfaisants communs aux trois groupes. Les enseignants sont en plus satisfaits de l'éclairage naturel. Les personnels sont satisfaits le plus de la qualité des espaces communs et des heures d'accès au bâtiment. Les doctorants sont

les plus satisfaits de la sécurité contre incendie. Le contrôle de la température est le facteur le plus insatisfaisant pour les trois groupes.

Tableau 5.12 - Le groupe de participants le plus satisfait pour chaque facteur par poste.

Enseignants (G1)	Personnels (G2)	Doctorants (G3)
Humidité	Température	Contrôle de la Température
Confort Acoustique	Espace de travail	Ventilation
Éclairage Naturel	Espace d'activités	Éclairage Artificiel
Contrôle Éclairage	Confidentialité	Contrôle Éclairage
Espace de travail	Qualité des espaces communs	Qualité de l'air
Confidentialité	Sécurité Vandalisme	Seconds œuvres
	Accès au bâtiment	Sécurité Incendie
		Accidents de travail
		Accès Handicaps

Le groupe des personnels présente le pourcentage de satisfaction globale le plus élevé (Figure 5.33). Il est caractérisé aussi par un pourcentage nul d'insatisfaits. Les groupes d'enseignants et de doctorants présentent des pourcentages comparables de satisfaits. Un pourcentage mineur d'insatisfaits caractérise aussi ces groupes. Une partie importante de votes neutres caractérise les trois groupes à la fois.

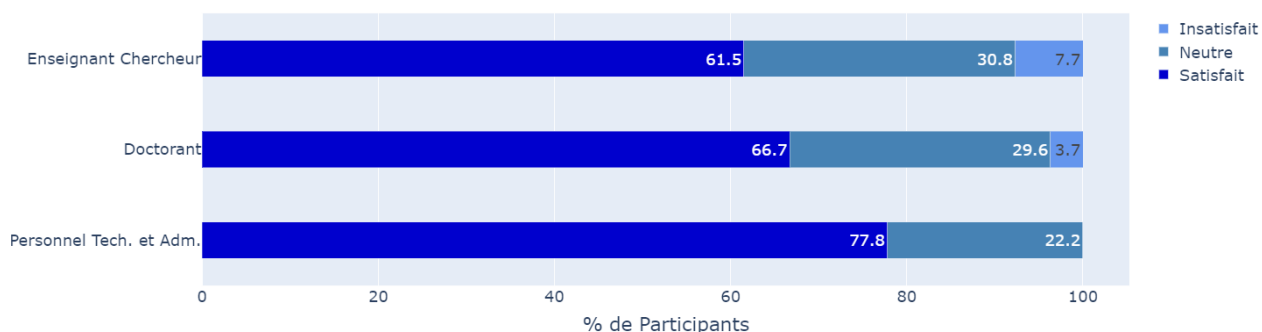


Figure 5.33 - Répartition des participants par poste occupé en termes de satisfaction globale.

Les notes moyennes d'importance sont comparables pour tous les groupes à l'exception de la sécurité. Les personnels et les doctorants accordent une importance plus élevée que les enseignants à ce facteur.

Le confort acoustique est évalué parmi les facteurs les plus importants par les trois groupes. Ces groupes ont évalué d'autres facteurs comme étant importants pour leur confort aussi (Tableau 5.13). Le confort visuel est évalué aussi comme le plus important par rapport aux enseignants. Les personnels et les doctorants ont considéré que la sécurité est la plus importante. L'humidité est le facteur le moins important par rapport aux trois groupes.

Tableau 5.13- Les facteurs les plus importants par poste occupé.

Nombre	Facteurs 1	Facteurs 2	Facteurs 3
Enseignants	Confort acoustique et visuel	Qualité de l'air, Confort spatial	Température
	4.5	4.2	4.1
Personnels	Sécurité	Confort acoustique	Température
	4.7	4.5	4.4
Doctorants	Confort acoustique, Sécurité	Confort Visuel , Qualité de l'air	Accessibilité, Confort spatial
	4.6	4.4	4.2

5.5.3.6 Analyse par laboratoire

Les participants à l'enquête sont répartis sur les quatre laboratoires du bâtiment ESPRIT. L'ensemble des données est donc divisé en quatre groupes. La Figure 5.34 illustre les notes moyennes de satisfaction reçues par les facteurs dans les laboratoires.

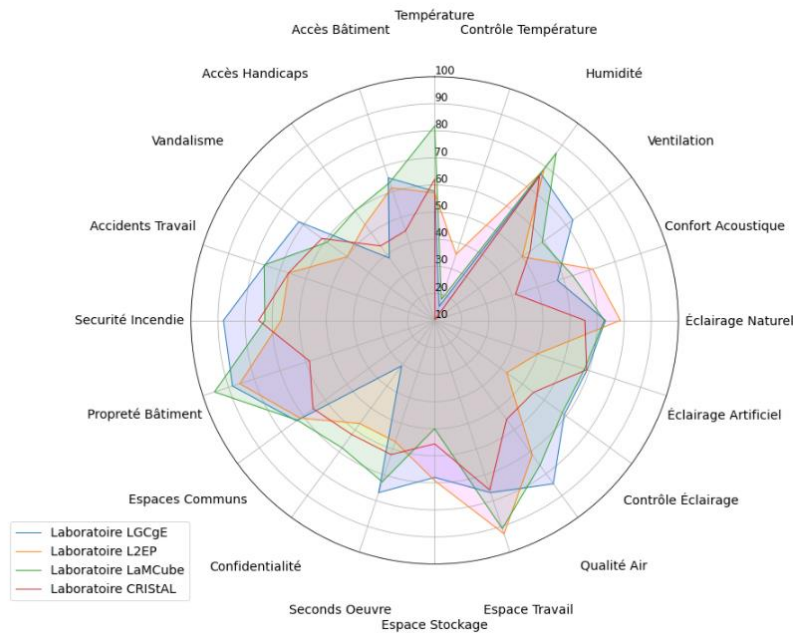


Figure 5.34 - Note moyenne de satisfaction par laboratoire.

Tous les laboratoires présentent des notes moyennes de satisfaction légèrement différentes pour l'humidité, l'éclairage naturel, la qualité de l'air et l'espace d'activités. Le laboratoire le plus satisfait à l'égard de chaque facteur est indiqué dans le Tableau 5.14. La satisfaction des laboratoires envers tous les facteurs (sauf l'éclairage artificiel) dépasse celle de CRISAL. Les laboratoires LGCgE et LaMCube présentent des niveaux de satisfaction identiques envers le contrôle de l'éclairage, l'espace d'activités et la sécurité contre incendie. L2EP et LaMCube présentent aussi des notes moyennes identiques pour le confort acoustique.

L'humidité et l'espace de travail sont les facteurs communs aux trois groupes classés parmi les plus satisfaisants. L'éclairage naturel et la qualité de l'air font partie aussi des plus satisfaisants

par rapport au LGCgE. La qualité des espaces communs est aussi satisfaisante par rapport aux usagers dans LaMCube.

Tableau 5.14 - Le laboratoire le plus satisfait pour chaque facteur.

LGCgE (G1)	L2EP (G2)	LaMCube (G3)	CRISAL (G4)
Contrôle de la Température	Confort Acoustique	Température	Éclairage Artificiel
Ventilation	Éclairage Naturel	Humidité	
Contrôle Éclairage	Espace de travail	Confort Acoustique	
Qualité de l'air		Contrôle Éclairage	
Espace d'activités		Espace d'activités	
Sécurité Incendie		Seconds œuvres	
Accidents de travail		Confidentialité	
Sécurité Vandalisme		Qualité des espaces communs	
		Sécurité Incendie	
		Accès au bâtiment	
		Accès Handicaps	
	Accès au bâtiment		

Tous les laboratoires expriment une satisfaction envers l'ensemble des facteurs (Figure 5.35). Les participants du laboratoire LaMCube sont les plus satisfaits du nouveau bâtiment avec un pourcentage nul d'insatisfaits. L2EP et CRISAL présentent des pourcentages similaires de satisfaits moins élevés que ceux des autres laboratoires. L2EP est aussi caractérisé par un pourcentage nul d'insatisfaits alors que CRISAL présente le plus grand pourcentage. Les participants expriment une neutralité importante envers le bâtiment dans tous les laboratoires.

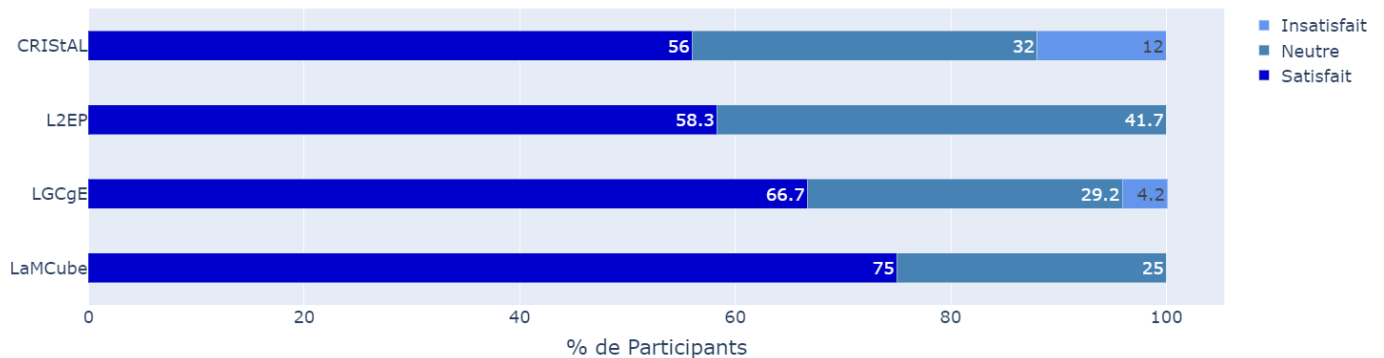


Figure 5.35 - Répartition des participants par laboratoire en termes de satisfaction globale.

Les laboratoires sont caractérisés par des notes moyennes d'importance similaires pour tous les facteurs à l'exception de l'humidité, la ventilation et la qualité de l'air (Figure 5.36).

Les notes attribuées à l'humidité et la ventilation par les usagers de LaMCube sont moins importantes que celles des autres laboratoires. LGCgE accorde à la qualité de l'air une importance plus élevée comparé aux autres.

Les usagers des laboratoires ont classé le confort acoustique et visuel parmi les facteurs les plus importants. La qualité de l'air et la sécurité sont évalués comme étant importants dans les

laboratoires LGCgE et LaMCube. Dans le laboratoire L2EP le confort spatial et la qualité de l'air sont aussi importants. Les participants du laboratoire CRISStAL ont évalué l'accessibilité et le confort spatial comme des facteurs importants aussi. Pour le laboratoire L2EP, l'accessibilité est le facteur le moins important. L'humidité est le facteur le moins important pour les autres laboratoires.

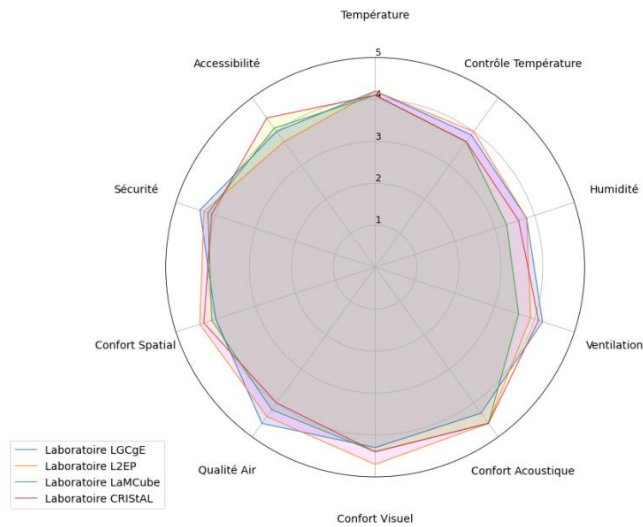


Figure 5.36 - Note moyenne d'importance par laboratoire.

5.5.3.7 Analyse par âge

Des usagers appartenant à trois catégories d'âge ont participé à l'enquête. L'ensemble des données est divisé en trois groupes en fonction de ces catégories. Les notes moyennes de chaque groupe sont présentées dans la Figure 5.37.

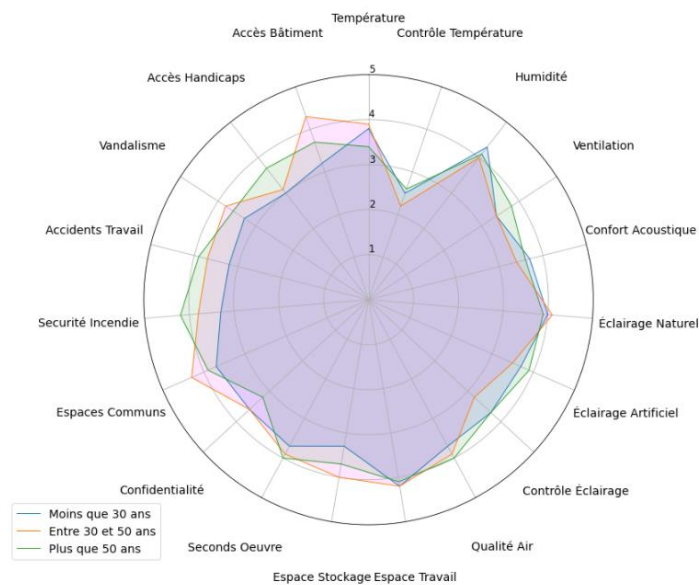


Figure 5.37 - Note moyenne de satisfaction par catégorie d'âge.

La moitié des facteurs sont caractérisés par des notes moyennes similaires pour les trois catégories d'âge. Dans le Tableau 5.15 les facteurs pour lesquels chacun des groupes est le plus satisfait sont indiqués. En général, les participants ayant moins de 30 ans sont les plus satisfaits de la majorité des facteurs. Les deux premiers groupes présentent des niveaux de satisfaction similaires envers la température. Les groupes 1 et 3 ont attribué aussi la même note moyenne à l'humidité. Il en est de même pour les groupes 2 et 3 envers la confidentialité.

L'humidité est le facteur le plus satisfaisant pour les trois groupes. Les participants de moins de 30 ans sont aussi satisfaits de la sécurité contre l'incendie. Les participants des deux autres groupes considèrent l'espace de travail comme satisfaisant aussi. Le contrôle de la température est le moins satisfaisant pour les trois groupes.

Tableau 5.15 - Le groupe d'âge le plus satisfait pour chaque facteur.

Moins que 30 ans (G1)	Entre 30 et 50 ans (G2)	Plus que 50 ans (G3)
Température	Température	Contrôle de la Température
Humidité	Confidentialité	Humidité
Ventilation		Confort Acoustique
Éclairage Artificiel		Éclairage Naturel
Contrôle Éclairage		Espace de travail
Espace d'activités		Qualité de l'air
Seconds œuvres		Confidentialité
Qualité des espaces communs		
Sécurité Incendie		
Accidents de travail		
Sécurité Vandalisme		
Accès Handicaps		
Accès au bâtiment		

Le pourcentage de satisfaits à l'égard de l'ensemble des facteurs est le plus élevé pour les participants ayant moins de 30 ans (Figure 5.38). Il dépasse largement ceux des deux autres groupes. Juste la moitié des participants entre 30 et 50 ans sont satisfaits.

Les participants du premier groupe n'ont exprimé aucune insatisfaction. Les deux autres groupes, présentent un pourcentage minime de participants insatisfaits et un pourcentage de votes neutres considérable.

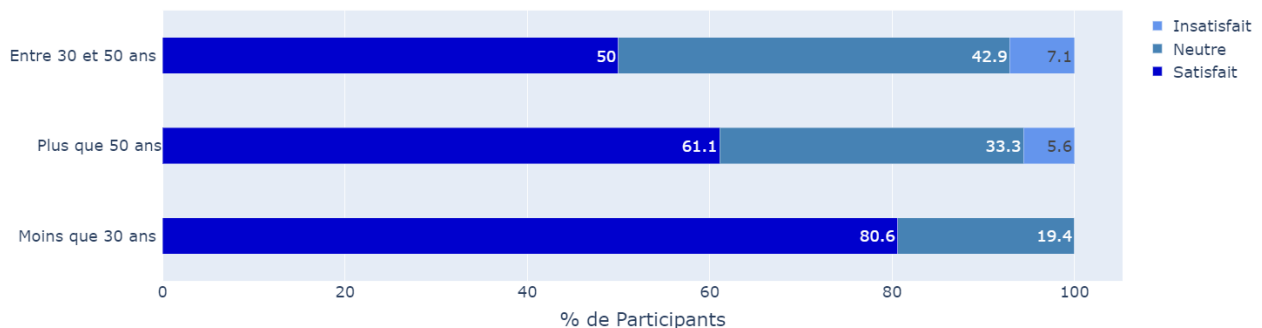


Figure 5.38 - Répartition des participants par catégories d'âge en termes de satisfaction globale.

Les catégories d'âge présentent des notes moyennes d'importance différentes pour les facteurs de confort visuel, acoustique et spatial et d'accessibilité (Figure 5.39). Les groupes 1 et 3 donnent une importance plus élevée au confort acoustique et visuel et l'accessibilité que le groupe 2. Le groupe 1 aussi accorde une importance plus élevée au confort spatial comparé aux autres groupes. Les groupes 1 et 3 ont considéré le confort acoustique et visuel comme les facteurs les plus importants. L'humidité est le facteur le moins important pour ces deux groupes. Cependant, le groupe 2 a évalué la sécurité et la qualité de l'air comme les facteurs les plus importants et l'accessibilité le facteur le moins important.

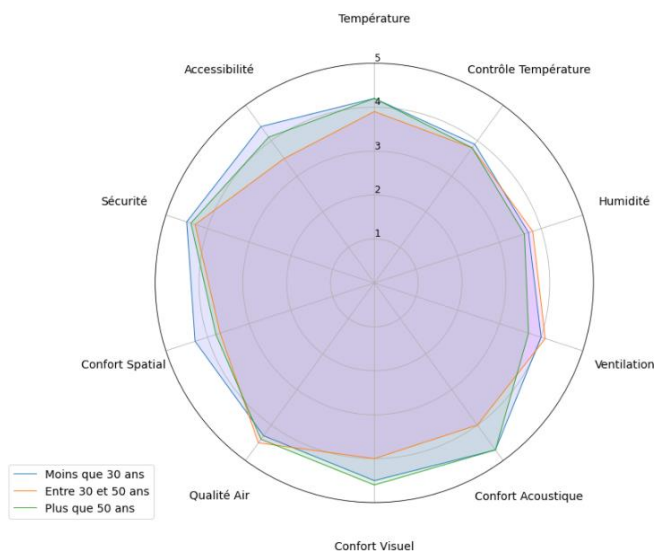


Figure 5.39- Note moyenne d'importance par catégorie d'âge.

5.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'analyse d'une enquête conduite auprès des usagers pour analyser les performances liées au confort et services dans le bâtiment ESPRIT. Cette analyse a permis de comprendre le niveau de satisfaction des usagers et les principales sources d'insatisfaction. Elle a permis d'identifier les facteurs les plus importants pour le confort des usagers.

L'analyse a montré que les participants sont globalement satisfaits des facteurs évalués, en particulier de l'humidité, l'espace de travail et la sécurité contre l'incendie. Mais, ils ont exprimé des réserves sur le contrôle de la température dans leurs bureaux essentiellement en raison de leur incapacité à réguler le chauffage.

L'analyse d'importance a indiqué que le confort acoustique et le confort visuel sont les facteurs les plus importants pour le confort des usagers. Le contrôle de la température et l'humidité ont été classés parmi les facteurs les moins importants.

Des faibles corrélations ont été trouvées entre les facteurs de satisfaction et d'importance. Les niveaux de satisfaction du contrôle de l'éclairage et l'éclairage artificiel ont été bien corrélés. Il en est de même pour l'importance de l'humidité et de la ventilation.

En général, les hommes ont exprimé une satisfaction plus élevée que les femmes. Le niveau de satisfaction le plus élevé était observé pour les participants âgés de moins de 30 ans. Parmi les trois types de poste occupé, les personnels technique et administratif ont exprimé le plus de satisfaction. La satisfaction des participants occupant des bureaux orientés vers le nord est plus

importante que ceux dans les bureaux orientés vers le sud. Les participants dans les bureaux collectifs et individuels ont présenté des niveaux de satisfaction comparables. Pour les bureaux collectifs, ceux occupés par 3 personnes étaient les plus satisfaits par rapport aux bureaux à 2 et à 4 personnes.

Conclusions Générales et Perspectives

L'objectif de ce travail de thèse est d'élaborer une approche globale d'évaluation des projets de rénovation durable des bâtiments. Cette approche est basée sur l'identification des indicateurs de performance d'après les besoins des usagers et de la valeur ajoutée des opérations de rénovation. Cette approche a été appliquée à une opération de rénovation et d'extension conduite sur un bâtiment recherche de l'Université de Lille (Bâtiment ESPRIT).

L'analyse bibliographique a confirmé le rôle de la rénovation des bâtiments dans la réalisation des objectifs de lutte contre le changement climatique et d'économie d'énergie. Elle a montré l'importance de la rénovation durable, allant au-delà des objectifs économiques liés à la réduction des coûts vers des objectifs liés à la réduction des impacts environnementaux et l'amélioration de la qualité de vie de la société. Elle a indiqué la nécessité de la prise en compte de ce concept dans l'évaluation des projets de rénovation. Cette analyse a permis l'identification des critères d'évaluation économiques, environnementaux et sociaux. Elle a montré également le manque d'une évaluation holistique des projets de rénovation.

La méthodologie développée dans ce travail a montré la nécessité d'une analyse approfondie lors de la phase de planification de l'état du bâtiment et les besoins des usagers. Cette analyse doit donner lieu à des indicateurs pour une évaluation fiable des projets de rénovation. Ces indicateurs servent de base pour l'évaluation des performances du bâtiment en phase d'exploitation.

L'application de cette méthodologie à la phase de planification de l'opération de rénovation du bâtiment ESPRIT a permis de déterminer les principales contraintes liées à l'état, l'environnement intérieur, les consommations énergétiques et le site du bâtiment. Elle a montré également l'intérêt des usagers à l'ambiance interne, l'aménagement et l'ameublement des espaces. Sur la base de cette analyse, les indicateurs de performance de ce projet ont été identifiés. Les indicateurs liés à l'aspect économique concernent le coût du cycle de vie et le coût plafond à respecter par le partenaire privé. Ceux liés à l'aspect social concernent principalement les conditions de confort thermique, acoustique, visuel et spatial, la qualité de l'air, l'accessibilité et la sécurité des usagers. Quant aux indicateurs environnementaux, ils couvrent les consommations d'énergie et d'eau.

L'analyse du confort a indiqué que les paramètres hygrothermiques et la concentration en CO₂ étaient en général en conformité avec les exigences réglementaires et les attentes des usagers. Cependant, certains bureaux présentaient durant la période non chauffée des niveaux de température dépassant largement la limite réglementaire.

Le suivi des consommations du bâtiment a permis l'évaluation du fonctionnement de ses systèmes techniques. Les consommations d'eau étaient principalement affectées par la crise sanitaire, cependant, elles ne respectaient pas le seuil de consommation fixé dans la phase de planification du projet. L'analyse des consommations de chauffage a montré une gestion efficace du système de chauffage du bâtiment. Elle a également souligné une anomalie, illustrée par le chauffage quasi-continu, même en période d'inoccupation du bâtiment. Quant aux consommations électriques, elles étaient aussi impactées par l'épidémie. Un gaspillage d'énergie en période d'inoccupation est aussi détecté. D'autre part, le bâtiment a montré sa capacité à produire environ 11% de ses besoins électriques à partir de l'énergie solaire.

Une enquête auprès des usagers des bâtiments a montré la satisfaction d'un grand pourcentage des occupants de l'ensemble des facteurs évalués. Les usagers ont montré une grande satisfaction avec l'humidité, l'espace de travail et la sécurité contre l'incendie, mais ils ont exprimé des réserves sur le contrôle de la température dans leurs bureaux essentiellement en raison de leur incapacité à réguler le chauffage.

Les résultats de ce travail donnent des indications intéressantes aux gestionnaires de ce bâtiment, notamment pour prendre des mesures sur les sources des réserves des usagers des bâtiments. On peut citer, les difficultés de contrôler la température et l'éclairage dans les bureaux, et les bruits dans les bureaux collectifs. Des mesures sont aussi nécessaires pour la réduction des consommations d'énergie, notamment le chauffage des locaux non occupés et les équipements électriques. L'analyse rapide du fonctionnement du bâtiment pendant la crise COVID a révélé aussi des questions quant à la réduction des coûts de fonctionnement de ce bâtiment en période de sous-utilisation.

Dans l'avenir, il serait utile d'assurer une coopération importante avec les gestionnaires du bâtiment dans le but de collecter des données additionnelles et d'implémenter les recommandations proposées en termes de gestion efficace de l'espace en procédant à un contrôle basé sur l'occupation du système de chauffage et des équipements électriques ainsi que de réponse aux besoins des usagers notamment le contrôle du chauffage dans leurs bureaux afin d'examiner comment ces recommandations peuvent améliorer la performance du bâtiment.

Il serait également intéressant d'intégrer dans l'approche proposée une combinaison pondérée des indicateurs de performance, les stratégies des acteurs du projet, une évaluation économique et environnementale tout au long du cycle de vie du bâtiment. Fautes des données, ces éléments n'ont pas été considérés dans ce travail.

Les opérations de maintenance et l'intégration du concept de smart building constituent aussi des éléments majeurs dans la gestion optimale des projets de rénovations. Ces deux éléments constituent aussi des perspectives intéressantes pour ce travail.

Références Bibliographiques

- [1] T. Johansson, T. Olofsson, and M. Mangold, “Development of an energy atlas for renovation of the multifamily building stock in Sweden,” *Appl. Energy*, vol. 203, no. 2017, pp. 723–736, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.027.
- [2] V. Milić, K. Ekelöw, M. Andersson, and B. Moshfegh, “Evaluation of energy renovation strategies for 12 historic building types using LCC optimization,” *Energy Build.*, vol. 197, pp. 156–170, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.05.017.
- [3] A. Ahmed, M. Mateo-Garcia, A. Arewa, and K. Caratella, “Integrated performance optimization of higher education buildings using low-energy renovation process and user engagement,” *Energies*, vol. 14, no. 5, 2021, doi: 10.3390/en14051475.
- [4] L. Liu, P. Rohdin, and B. Moshfegh, “Evaluating indoor environment of a retrofitted multifamily building with improved energy performance in Sweden,” *Energy Build.*, vol. 102, pp. 32–44, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.021.
- [5] M. M. Agha-Hosseini, S. El-Jouzi, A. A. Elmualim, J. Ellis, and M. Williams, “Post-occupancy studies of an office environment: Energy performance and occupants’ satisfaction,” *Build. Environ.*, vol. 69, pp. 121–130, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.08.003.
- [6] “Chiffres clés de l’énergie Édition 2020”, Ministère de la transition écologique, Septembre 2020.
- [7] “Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France,” Format Secten, Citepa, Juin 2020..
- [8] “Climat Air et Énergie -Chiffres Clés,” ADEME, Édition 2018.
- [9] “Climat Air et Énergie- Chiffres Clés,” ADEME, Édition 2015.
- [10] “Transposition de l'article 2 bis sur la performance énergétique des bâtiments modifiée par la directive 2018-844 du 30 mai 2018. Stratégie à long terme de la France pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments à usage résidentiel et commercial, public et privé,” DPEB - Article 2 bis, 2018.
- [11] “Les chiffres-clés de la précarité énergétique,” ONPE, Édition n°1, 2015.
- [12] “Analyse détaillée du parc résidentiel existant,” PACTE, Version 2.0, Juillet 2017.
- [13] “Plan rénovation énergétique des bâtiments, Concertation départementale - Manche, Plan climat en action,” Ministère de la transition écologique et solidaire / Ministère de la cohésion des territoires.
- [14] Agence Nationale de Rénovation Urbaine, ANRU, <https://www.anru.fr>.
- [15] “Building renovation in the Clean Energy Package: implications at local, national and EU levels,” BPIE, October 2019.
- [16] “Energy Efficiency Trends and Policies In Industry. An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases,” European Union, June 2015.

- [17] I. ARTOLA, “Boosting Building Renovation: What Potential and Value for Europe?”, European Parliament, 2016.
- [18] B. Atanasiu , I. Kouloumpi , “Stimuler la rénovation des bâtiments,”BPIE , Novembre 2013.
- [19] D. Staniaszek ,J. Kockat ,A. V. Roscini, “A REVIEW OF EU MEMBER STATES’ 2020 LONG-TERM RENOVATION STRATEGIES,” BPIE,September 2020.
- [20] S. D’Oca, A. Ferrante, C.Ferrer, R.Pernetti, A. Gralka, R.Sebastian, P.op ‘t Veld, , “Technical, financial, and social barriers and challenges in deep building renovation: Integration of lessons learned from the H2020 cluster projects,” *Buildings*, vol. 8, no. 12, 2018, doi: 10.3390/buildings8120174.
- [21] L. Malmgren and K. Mjörnell, “Application of a decision support tool in three renovation projects,” *Sustain.*, vol. 7, no. 9, pp. 12521–12538, 2015, doi: 10.3390/su70912521.
- [22] L. Malmgren, S. Elfborg ,K. Mjörnell , , “Development of a decision support tool for sustainable renovation - a case study,” *Structural Surv.*, vol. 34 Iss 1 pp. 3 - 11, 2016 doi: <http://dx.doi.org/10.1108/SS-07-2015-0031>.
- [23] L. C. Felius, F. Dessen, and B. D. Hrynyszyn, “Retrofitting towards energy-efficient homes in European cold climates: a review,” *Energy Effi.*, vol. 13, no. 1, pp. 101–125, 2020, doi: 10.1007/s12053-019-09834-7.
- [24] M.Jradi, C.Veje, B. N.Jørgensen, “Deep Energy Retrofit vs Improving Building Intelligence: Danish Case Study.” Proceedings of the 2018 Building Performance Modeling Conference and SimBuild co-organized by ASHRAE and IBPSA-USA, 470-477, 2018.
- [25] F.Noris, G.Adamkiewicz, W. W.Delp, T.Hotchi, M. Russell, B. C.Singer, M.Spears, K.Vermeer, W.J.Fisk , “Indoor environmental quality benefits of apartment energy retrofits,” *Build. Environ.*, vol. 68, pp. 170–178, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.07.003.
- [26] Ernst and Young, “Business opportunities in a low carbon economy,” Final report, Industry and Investment NSW, September 2010.
- [27] P. Sweatman, K. Managan, “Financing Energy Efficiency Building Retrofits: International Policy and Business Model Review and Regulatory Alternatives for Spain,” Climate Strategy and Partners, Spain, 2010.
- [28] Z. Ma, P. Cooper, D. Daly, and L. Ledo, “Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art,” *Energy Build.*, vol. 55, pp. 889–902, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.08.018.
- [29] C. H. Baek and S. H. Park, “Changes in renovation policies in the era of sustainability,” *Energy Build.*, vol. 47, pp. 485–496, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.028.
- [30] Y. G. Yohanis, “Domestic energy use and householders’ energy behaviour,” *Energy Policy*, vol. 41, pp. 654–665, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.028.
- [31] O. Guerra Santin, L. Itard, and H. Visscher, “The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock,” *Energy Build.*, vol. 41, no. 11, pp. 1223–1232, 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.07.002.

- [32] F.E. Preiser, “The Evolution of Post-Occupancy Evaluation: Toward Building Performance and Universal Design Evaluation Wolfgang,” CIBSE, Energy Efficiency in Buildings: CIBSE Guide F, Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 2004.
- [33] J. Elkington, “Enter the triple bottom line,” *Triple Bottom Line Does it All Add Up*, vol. 1, no. 1986, pp. 1–16, 2013, doi: 10.4324/9781849773348.
- [34] “Energy-Efficient Buildings - Multi-Annual Roadmap for Contractual PPP under Horizon 2020,” European Commission - Directorate-General for Research & Innovation: Brussels, Belgium, 2013.
- [35] N. Šuman, M. Marinič, and M. Kuhta, “A methodological framework for sustainable office building renovation using green building rating systems and cost-benefit analysis,” *Sustain.*, vol. 12, no. 15, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/su12156156.
- [36] R. Moschetti, H. Brattebø, K. S. Skeie, and A. G. Lien, “Performing quantitative analyses towards sustainable business models in building energy renovation projects: Analytic process and case study,” *J. Clean. Prod.*, vol. 199, pp. 1092–1106, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.091.
- [37] L. Thuvander, P. Femenías, K. Mjörnell, and P. Meiling, “Unveiling the Process of Sustainable Renovation,” *Sustain.*, vol. 4, no. 6, pp. 1188–1213, 2012, doi: 10.3390/su4061188.
- [38] N. Gohardani and F. Björk, “Sustainable refurbishment in building technology,” *Smart Sustain. Built Environ.*, vol. 1, no. 3, pp. 241–252, 2012, doi: 10.1108/20466091211287128.
- [39] A. Mickaityte, E. K. Zavadskas, A. Kaklauskas, and L. Tupénaitė, “The concept model of sustainable buildings refurbishment,” *Int. J. Strateg. Prop. Manag.*, vol. 12, no. 1, pp. 53–68, 2008, doi: 10.3846/1648-715X.2008.12.53-68.
- [40] J. Ferreira, M. Duarte Pinheiro, and J. De Brito, “Refurbishment decision support tools: A review from a Portuguese user’s perspective,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 425–447, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.064.
- [41] K. Mjörnell, A. Boss, M. Lindahl, and S. Molnar, “A tool to evaluate different renovation alternatives with regard to sustainability,” *Sustain.*, vol. 6, no. 7, pp. 4227–4245, 2014, doi: 10.3390/su6074227.
- [42] Y. I. Antonov, P. Heiselberg, F. Flourentzou, and M. Z. Pomianowski, “Methodology for evaluation and development of refurbishment scenarios for multi-story apartment buildings, applied to two buildings in Denmark and Switzerland,” *Buildings*, vol. 10, no. 6, 2020, doi: 10.3390/BUILDINGS10060102.
- [43] J. Liu, B. Bengtsson, H. Bohman, and K. S. Pauli, “A system model and an innovation approach toward sustainable housing renovation,” *Sustain.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/su12031130.
- [44] Watts, G, Dainty, A and Fernie, S , “Measuring Social Value in Construction,” In: Gorse C and Neilson, C J (Eds) Proceedings of the 35th Annual ARCOM Conference, 2-4 September 2019, Leeds, UK, Association of Researchers in Construction Management, 54-63.
- [45] O. Pombo, K. Allacker, B. Rivala, and J. Neila, “Sustainability assessment of energy saving

measures: A multi-criteria approach for residential buildings retrofitting - A case study of the Spanish housing stock,” *Energy Build.*, vol. 116, pp. 384–394, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.01.019.

[46] EN, Sustainability of construction works-assessment of environmental performance of buildings-calculation method, in: EN 15978:2011, EN,2012.[19] European.

[47] International reference life cycle data system (ILCD) handbook – general guide for life cycle assessment – detailed guidance, in: European Commission JRC, Institute for Environment and Sustainability, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2010, p. 417.

[48] K. Allacker, M. Sié, D. Trigaux, J. Payet, F. De Troyer, Search for the environmental indicators relevant for the building sector, in: World Sustainable Building Conference, Barcelona, Spain : Green Building Council España (GBCe), 2014, pp. 112–122.

[49] International Organization for Standardization, 2006b. ISO 14040:2006, Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.

[50] International Organization for Standardization, 2006c. ISO 14044:2006, Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines.

[51] T. Ramesh, R. Prakash, and K. K. Shukla, “Life cycle energy analysis of buildings: An overview,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1592–1600, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.007.

[52] I. Zabalza Bribián, A. Aranda Usón, and S. Scarpellini, “Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 12, pp. 2510–2520, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.05.001.

[53] R. Assiego De Larriva, G. Calleja Rodríguez, J. M. Cejudo López, M. Raugéi, and P. Fullana I Palmer, “A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort,” *Energy Build.*, vol. 70, pp. 333–342, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.049.

[54] ISO-14040, “Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework,” 2006.

[55] ISO-14044, “Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines,” 2006.

[56] S. E. Chidiac, E. J. C. Catania, E. Morofsky, and S. Foo, “A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 2–3, pp. 614–620, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.002.

[57] J. Park, J. Yoon, and K. H. Kim, “Critical review of the material criteria of building sustainability assessment tools,” *Sustain.*, vol. 9, no. 2, 2017, doi: 10.3390/su9020186.

[58] J. W. Bleyl *et al.*, “Office building deep energy retrofit: life cycle cost benefit analyses using cash flow analysis and multiple benefits on project level,” *Energy Effic.*, vol. 12, no. 1, pp. 261–279, 2019, doi: 10.1007/s12053-018-9707-8.

[59] R. Lohse, H. Staller, and M. Riel, “The economic challenges of deep energy renovation -

Differences, similarities, and possible solutions in central Europe: Austria and Germany,” *ASHRAE Conf.*, vol. 122, pp. 69–87, 2016.

[60] Shah, S. “Sustainable Refurbishment,” John Wiley & Sons Ltd.: Oxford, UK, 2012.

[61] L. Thuvander, P. Femenías, and P. Meiling, “Strategies for an Integrated Sustainable Renovation Process: Focus on the Swedish Housing stock ‘People’s Home,” *Sustain. Build.* 2011, 2011.

[62] D. Mikulić, Ž. Lovrinčević, and D. Keček, “Valorization of economic effects from the programme of energy renovation of public buildings in Croatia,” *Build. Res. Inf.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1080/09613218.2020.1832433.

[63] D. Mikulić, I. Rašić Bakarić, and S. Slijepčević, “The socioeconomic impact of energy saving renovation measures in urban buildings,” *Econ. Res. Istraz.*, vol. 29, no. 1, pp. 1109–1125, 2016, doi: 10.1080/1331677X.2016.1211952.

[64] H. Lind, K. Annadotter, F. Björk, L. Högberg, and T. A. Klintberg, “Sustainable renovation strategy in the Swedish million homes programme: A case study,” *Sustain.*, vol. 8, no. 4, pp. 1–12, 2016, doi: 10.3390/su8040388.

[65] M. Jradi, C. Veje, and B. N. Jørgensen, “Deep energy renovation of the Mærsk office building in Denmark using a holistic design approach,” *Energy Build.*, vol. 151, no. 2017, pp. 306–319, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.047.

[66] J. Ortiz, A. Fonseca, J. Salom, N. Garrido, P. Fonseca, and V. Russo, “Comfort and economic criteria for selecting passive measures for the energy refurbishment of residential buildings in Catalonia,” *Energy Build.*, vol. 110, pp. 195–210, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.10.022.

[67] X. Chen *et al.*, “Multi-criteria assessment approach for a residential building retrofit in Norway,” *Energy Build.*, vol. 215, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109668.

[68] P. A. Jensen, E. Maslesa, J. B. Berg, and C. Thuesen, “10 Questions Concerning Sustainable Building Renovation,” *Build. Environ.*, vol. 143, no. July, pp. 130–137, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.06.051.

[69] N. W. O. Brown, T. Malmqvist, W. Bai, and M. Molinari, “Sustainability assessment of renovation packages for increased energy efficiency for multi-family buildings in Sweden,” *Build. Environ.*, vol. 61, pp. 140–148, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.11.019.

[70] J. Bull, A. Gupta, D. Mumovic, and J. Kimpian, “Life cycle cost and carbon footprint of energy efficient refurbishments to 20th century UK school buildings,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–17, 2014, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2014.07.002.

[71] M. S. Gustafsson, J. A. Myhren, E. Dotzauer, and M. Gustafsson, “Life cycle cost of building energy renovation measures, considering future energy production scenarios,” *Energies*, vol. 12, no. 14, 2019, doi: 10.3390/en12142720.

[72] S. A. Sharif and A. Hammad, “Simulation-Based Multi-Objective Optimization of

institutional building renovation considering energy consumption, Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment,” *J. Build. Eng.*, vol. 21, no. June 2018, pp. 429–445, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2018.11.006.

[73] L. Liu, P. Rohdin, and B. Moshfegh, “LCC assessments and environmental impacts on the energy renovation of a multi-family building from the 1890s,” *Energy Build.*, vol. 133, no. 2016, pp. 823–833, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.10.040.

[74] J. Ouyang, C. Wang, H. Li, and K. Hokao, “A methodology for energy-efficient renovation of existing residential buildings in China and case study,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, pp. 2203–2210, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.005.

[75] C. Araújo, M. Almeida, L. Bragança, and J. A. Barbosa, “Cost-benefit analysis method for building solutions,” *Appl. Energy*, vol. 173, pp. 124–133, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.04.005.

[76] H. Ren, Q. Wu, Q. Zhu, and W. Gao, “Cost–benefit analysis of distributed energy systems considering multi-benefits and multi-stakeholders,” *Energy*, vol. 189, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116382.

[77] ISO, “Buildings and constructed assets-service-life planning-Part 5: Life-cycle costing,” in: ISO 15686-5, ISO, 2008.

[78] J. Schade, “Life cycle cost calculation models for buildings,” *Open Inf. Environ. Knowledge-Based Collab. Process. throughout Lifecycle a Build.*, no. October, pp. 2–4, 2007, [Online]. Available: http://www.inpro-project.eu/media/lcc_juttaschade.pdf.

[79] J. Vrijders, L. Wastiels, Nearly Zero Energy Renovation of houses: life cycle costs and environmental impact, in: A. Passer, K. Höfler, P. Maydl (Eds.), *Int.Sustain. Build. Conf.*, Verlagder Technischen Universität Graz, Graz, 2013, pp.87–94, <http://dx.doi.org/10.3217/978-3-85125-299-6>.

[80] F. Nemry, A. Uihlein, C.M. Colodel, C. Wetzel, A. Braune, B. Wittstock, et al., Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union-potential and costs, *Energy Build.* 42 (2010) 976-984, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.009>.

[81] R.W. Amstalden, M. Kost, C. Nathani, D.M. Imboden, Economic potential of energy-efficient retrofitting in the Swiss residential building sector: the effects of policy instruments and energy price expectations, *Energy Policy*, vol.35, 1819–1829, 2007 <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.05.018>.

[82] J. Ouyang, M. Lu, B. Li, C. Wang, K. Hokao, Economic analysis of upgrading aging residential buildings in China based on dynamic energy consumption and energy price in a market economy, *Energy Policy*, vol.39, 4902-4910, 2011 <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.025>.

[83] B. Risholt, B. Time, A.G. Hestnes, Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators, *Energy Build.*, vol. 60 217–224, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.017>.

- [84] L. Liu, B. Moshfegh, J. Akander, and M. Cehlin, “Comprehensive investigation on energy retrofits in eleven multi-family buildings in Sweden,” *Energy Build.*, vol. 84, pp. 704–715, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.044.
- [85] J. Terés-Zubiaga, K. Martín, A. Erkoreka, and J. M. Sala, “Field assessment of thermal behaviour of social housing apartments in Bilbao, Northern Spain,” *Energy Build.*, vol. 67, pp. 118–135, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.061.
- [86] K. J. Watson, J. Evans, A. Karvonen, and T. Whitley, “Capturing the social value of buildings: The promise of Social Return on Investment (SROI),” *Build. Environ.*, vol. 103, no. April, pp. 289–301, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.04.007.
- [87] S. Gundes, “The Use of Life Cycle Techniques in the Assessment of Sustainability,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 216, no. October 2015, pp. 916–922, 2016, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.12.088.
- [88] A. Kamari, R. Corrao, and P. H. Kirkegaard, “Sustainability focused decision-making in building renovation,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6, no. 2, pp. 330–350, 2017, doi: 10.1016/j.ijjsbe.2017.05.001.
- [89] Kunskapsmatris S2020. Knowledge matrix 2020. Accessible online: <http://kunskapsmatris-s2020.se/> (accessed on 2 January 2013).
- [90] K. E. Thomsen, J. Rose, O. Mørck, S. Ø. Jensen, I. Østergaard, H. N. Knudsen, N. C. Bergsøe, “Energy consumption and indoor climate in a residential building before and after comprehensive energy retrofitting,” *Energy Build.*, vol. 123, pp. 8–16, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.04.049.
- [91] M. Ferreira and M. Almeida, “Benefits from energy related building renovation beyond costs, energy and emissions,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 2397–2402, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.199.
- [92] A. Serrano-Jiménez, P. Femenías, L. Thuvander, and Á. Barrios-Padura, “A multi-criteria decision support method towards selecting feasible and sustainable housing renovation strategies,” *J. Clean. Prod.*, vol. 278, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123588.
- [93] B. E. Bazar, M. Park, H. S. Lee, I. Yoon, and J. Cho, “Determining retrofit technologies for building energy performance,” *J. Asian Archit. Build. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 367–383, 2020, doi: 10.1080/13467581.2020.1748037.
- [94] B. Risholt, B. Time, and A. G. Hestnes, “Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators,” *Energy Build.*, vol. 60, pp. 217–224, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.017.
- [95] M. Reuter, M. K. Patel, W. Eichhammer, B. Lapillonne, and K. Pollier, “A comprehensive indicator set for measuring multiple benefits of energy efficiency,” *Energy Policy*, vol. 139, pp. 1–39, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111284.
- [96] M. Tunefalk and M. Legnér, “Decision-Making on a National Home Improvement Programme in Sweden and Its Effects on the Built Environment, 1984–1993,” *Hist. Environ. Policy Pract.*, vol. 10, no. 2, pp. 106–121, 2019, doi: 10.1080/17567505.2019.1549397.

- [97] H. Kauko, M. J. Alonso, O. Stavset, and I. C. Claussen, “Case Study on Residential Building Renovation and its Impact on the Energy Use and Thermal Comfort,” *Energy Procedia*, vol. 58, pp. 160–165, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.423.
- [98] N. Kadri and A. Mokhtari, “Contribution à l’étude de réhabilitation thermique de l’enveloppe du bâtiment.,” *Rev. des énergies Renouvelable*, vol. 14, pp. 301–311, 2011.
- [99] P. Ala-Kotila, T. Vainio, and J. Laamanen, “The influence of building renovations on indoor comfort - A field test in an apartment building,” *Energies*, vol. 13, no. 18, 2020, doi: 10.3390/en13184958.
- [100] M. Etxebarria, X. Oregi, O. Grijalba, and R. J. Hernández, “Relationship between energy demand, indoor thermal behaviour and temperature-related health risk concerning passive energy refurbishment interventions,” *Environ. Clim. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 348–363, 2020, doi: 10.2478/rtuct-2020-0078.
- [101] M. Awada and I. Srour, “A genetic algorithm based framework to model the relationship between building renovation decisions and occupants’ satisfaction with indoor environmental quality,” *Build. Environ.*, vol. 146, no. July, pp. 247–257, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.10.001.
- [102] I. Dimdina, A. Lešinskis, E. Krumiņš, V. Krumiņš, L. Šnidere, and V. Zagorskis, “Indoor air quality and energy efficiency in multi-apartment buildings before and after renovation: A case study of two buildings in Riga,” *Civ. Eng. '11 - 3rd Int. Sci. Conf. Proc.*, vol. 3, pp. 236–241, 2011.
- [103] V. Földváry, H. P. Bukovińska, and D. Petráš, “Analysis of energy performance and indoor climate conditions of the Slovak housing stock before and after its renovation,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 2184–2189, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.314.
- [104] M. Dovjak, J. Slobodnik, and A. Krainer, “Consequences of energy renovation on indoor air quality in kindergartens,” *Build. Simul.*, vol. 13, no. 3, pp. 691–708, 2020, doi: 10.1007/s12273-020-0613-6.
- [105] V. Földváry, G. Bekö, S. Langer, K. Arrhenius, and D. Petráš, “Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia,” *Build. Environ.*, vol. 122, pp. 363–372, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.06.009.
- [106] Jim McLoughlin Jaime Kaminski Babak Sodagar Sabina Khan Robin Harris Gustavo Arnaudo Sinéad Mc Brearty, (2009), “A strategic approach to social impact measurement of social enterprises,” *Social Enterprise Journal*, vol. 5 Iss 2 pp. 154 - 178. <http://dx.doi.org/10.1108/17508610910981734>.
- [107] S. Wright, J. D. Nelson, J. M. Cooper, and S. Murphy, “An evaluation of the transport to employment (T2E) scheme in Highland Scotland using social return on investment (SROI),” *J. Transp. Geogr.*, vol. 17, no. 6, pp. 457–467, 2009, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2008.10.006.
- [108] S. McCarthy, “Social Value and Design of the Built Environment,” *Supply Chain Sustain. Sch.*, 2018.

- [109] R. Gupta and S. Chandiwala, “Understanding occupants: Feedback techniques for large-scale low-carbon domestic refurbishments,” *Build. Res. Inf.*, vol. 38, no. 5, pp. 530–548, 2010, doi: 10.1080/09613218.2010.495216.
- [110] S. Olsen and A. Lingane, “Working Paper Series Title Social Return on Investment: Standard Guidelines Permalink Publication Date,” 2003, [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/6xp540hs>.
- [111] J. Nicholls, E. Lawlor, E. Neitzert, et al., “A Guide to Social Return on Investment, Office of the Third Sector,” 2012.
- [112] C. Benoît *et al.*, “The guidelines for social life cycle assessment of products: Just in time!,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 15, no. 2, pp. 156–163, 2010, doi: 10.1007/s11367-009-0147-8.
- [113] L. C. Dreyer, M. Z. Hauschild, and J. Schierbeck, “A framework for social life cycle impact assessment,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 11, no. 2, pp. 88–97, 2006, doi: 10.1065/lca2005.08.223.
- [114] K. B. Janda, “Building communities and social potential: Between and beyond organizations and individuals in commercial properties,” *Energy Policy*, vol. 67, pp. 48–55, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.08.058.
- [115] B. Mills and J. Schleich, “Residential energy-efficient technology adoption, energy conservation, knowledge, and attitudes: An analysis of European countries,” *Energy Policy*, vol. 49, pp. 616–628, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.07.008.
- [116] D. X. Zhao, B. J. He, C. Johnson, and B. Mou, “Social problems of green buildings: From the humanistic needs to social acceptance,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1594–1609, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.072.
- [117] C. Baek and S. Park, “Policy measures to overcome barriers to energy renovation of existing buildings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3939–3947, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.03.046.
- [118] Annika Feige Holger Wallbaum Marcel Janser Lukas Windlinger, (2013), “Impact of sustainable office buildings on occupant's comfort and productivity”, *Journal of Corporate Real Estate*, vol. 15 Iss 1 pp. 7 - 34, <http://dx.doi.org/10.1108/JCRE-01-2013-0004>.
- [119] O. C. Mørck, “Concept Development and Technology Choices for the More-connect Pilot Energy Renovation of Three Apartment Blocks in Denmark,” *Energy Procedia*, vol. 96, no. October, pp. 738–744, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.136.
- [120] J. Ferreira, M. D. Pinheiro, and J. de Brito, “Refurbishment decision support tools review-Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects,” *Energy Policy*, vol. 62, pp. 1453–1460, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.06.082.
- [121] A. N. Nielsen, R. L. Jensen, T. S. Larsen, and S. B. Nissen, “Early stage decision support for sustainable building renovation - A review,” *Build. Environ.*, vol. 103, pp. 165–181, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.04.009.

- [122] Y. Heo, R. Choudhary, and G. A. Augenbroe, “Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty,” *Energy Build.*, vol. 47, no. 2012, pp. 550–560, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.029.
- [123] Z. Ma and S. Wang, “Online fault detection and robust control of condenser cooling water systems in building central chiller plants,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 1, pp. 153–165, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.09.003.
- [124] B. Ástmarsson, P. A. Jensen, and E. Maslesa, “Sustainable renovation of residential buildings and the landlord/tenant dilemma,” *Energy Policy*, vol. 63, pp. 355–362, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.08.046.
- [125] M. Monzón and B. López-Mesa, “Buildings performance indicators to prioritise multi-family housing renovations,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 38, no. August 2017, pp. 109–122, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2017.12.024.
- [126] A. Serrano-Jiménez, Á. Barrios-Padura, and M. Molina-Huelva, “Sustainable building renovation for an ageing population: Decision support system through an integral assessment method of architectural interventions,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 39, pp. 144–154, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.01.050.
- [127] R. Bucoñ, “Model supporting decisions on renovation and modernization of public utility buildings,” *Open Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 178–185, 2019, doi: 10.1515/eng-2019-0022.
- [128] M. Seddiki, K. Anouche, A. Bennadji, and P. Boateng, “A multi-criteria group decision-making method for the thermal renovation of masonry buildings: The case of Algeria,” *Energy Build.*, vol. 129, pp. 471–483, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.08.023.
- [129] A. Alajmi, “Energy audit of an educational building in a hot summer climate,” *Energy Build.*, vol. 47, pp. 122–130, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.033.
- [130] ASHRAE, 2011 ASHRAE Handbook – HVAC Applications, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2011.
- [131] M. Jaggs and J. Palmer, “Energy performance indoor environmental quality retrofit - a European diagnosis and decision making method for building refurbishment,” *Energy Build.*, vol. 31, no. 2, pp. 97–101, 2000, doi: 10.1016/S0378-7788(99)00023-7.
- [132] E. K. Zavadskas, A. Kaklauskas, and A. Gulbinas, “Multiple criteria decision support web-based system for building refurbishment,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 10, no. 1, pp. 37–41, 2004, doi: 10.1080/13923730.2004.9636289.
- [133] C. Balaras, E. Dascalaki, P. Drousa, Kontoyiannidis. “EPIQR-TOBUS –XENIOS INVESTIMMO, European methodologies & software tools for building refurbishment, assessment of energy savings and IEQ,” in: 33rd Int. HVAC Congress, 2002, pp. 20-29, <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3759.4405>.
- [134] E. Brandt and M. H. Rasmussen, “Assessment of building conditions,” *Energy Build.*, vol. 34, no. 2, pp. 121–125, 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(01)00102-5.

- [135] F. Flourentzou, J. L. Genre, and C. A. Roulet, "TOBUS software - An interactive decision aid tool for building retrofit studies," *Energy Build.*, vol. 34, no. 2, pp. 193–202, 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(01)00108-6.
- [136] E. Dascalaki and C. A. Balaras, "XENIOS - A methodology for assessing refurbishment scenarios and the potential of application of RES and RUE in hotels," *Energy Build.*, vol. 36, no. 11, pp. 1091–1105, 2004, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.03.007.
- [137] K. Droutsas, C.A. Balaras, "European Residential Building Audits Database," 2004, pp. 1-18.
- [138] K. Golić, V. Kosorić, and S. K. Lau, "A framework for early stages of socially sustainable renovation of multifamily buildings with occupants' participation," *Sustain.*, vol. 12, no. 21, pp. 1–23, 2020, doi: 10.3390/su12218823.
- [139] B. Guo, Y. Li, and J. Wang, "The improvement strategy on the management status of the old residence community in Chinese cities: An empirical research based on social cognitive perspective," *Cogn. Syst. Res.*, vol. 52, pp. 556–570, 2018, doi: 10.1016/j.cogsys.2018.08.002.
- [140] N. Galiotto, P. Heiselberg, and M.-A. Knudstrup, "Integrated Renovation Process: Overcoming Barriers to Sustainable Renovation," *J. Archit. Eng.*, vol. 22, no. 1, p. 04015007, 2016, doi: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000180.
- [141] P. A. Jensen and E. Maslesa, "Value based building renovation - A tool for decision-making and evaluation," *Build. Environ.*, vol. 92, no. November 2013, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.008.
- [142] M. Botta, Towards Sustainable Renovation. Three Research Projects, PhD, School of Architecture, Royal Institute of Technology, Stockholm (2005).
- [143] M. Kušar, M. Š. Kovač, and J. Šelih, "Selection of efficient retrofit scenarios for public buildings," *Procedia Eng.*, vol. 57, pp. 651–656, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.082.
- [144] A. G. Ruggeri, M. Calzolari, M. Scarpa, L. Gabrielli, and P. Davoli, "Planning energy retrofit on historic building stocks: A score-driven decision support system," *Energy Build.*, vol. 224, p. 110066, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110066.
- [145] G. P. White, "The implementation of management science in higher education administration," *Omega*, vol. 15, no. 4, pp. 283–290, 1987, doi: 10.1016/0305-0483(87)90016-8.
- [146] C. Passoni, A. Marini, A. Belleri, and C. Menna, "Redefining the concept of sustainable renovation of buildings: State of the art and an LCT-based design framework," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 64, no. July 2020, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102519.
- [147] K. Alanne, "Selection of renovation actions using multi-criteria 'knapsack' model," *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 3, pp. 377–391, 2004, doi: 10.1016/j.autcon.2003.12.004.
- [148] F. Vanclay, "Conceptualising social impacts," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 22, no. 3, pp. 183–211, 2002, doi: 10.1016/S0195-9255(01)00105-6.
- [149] J. D. Balcomb and A. Curtner, "Multi-criteria decision-making process for buildings,"

proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1. 528 - 535 vol.1. 10.1109/IECEC.2000.870762.

[150] A. G. Ruggeri, M. Calzolari, M. Scarpa, L. Gabrielli, and P. Davoli, “Planning energy retrofit on historic building stocks: A score-driven decision support system,” *Energy Build.*, vol. 224, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110066.

[151] M. Pavlovskis, D. Migilinskas, J. Antucheviciene, and V. Kutut, “Ranking of heritage building conversion alternatives by applying BIM and MCDM: A case of Sapiuha Palace in Vilnius,” *Symmetry (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2019, doi: 10.3390/sym11080973.

[152] E. K. Burdova and S. Vilcekova, “Sustainable building assessment tool in Slovakia,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1829–1834, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.323.

[153] D. Stanujkic, D. Karabasevic, and E. K. Zavadskas, “A framework for the selection of a packaging design based on the SWARA method,” *Eng. Econ.*, vol. 26, no. 2, pp. 181–187, 2015, doi: 10.5755/j01.ee.26.2.8820.

[154] I. Huertas-Valdivia, A. M. Ferrari, D. Settembre-Blundo, and F. E. García-Muiña, “Social life-cycle assessment: A review by bibliometric analysis,” *Sustain.*, vol. 12, no. 15, pp. 1–25, 2020, doi: 10.3390/su12156211.

[155] J. J. McArthur and C. G. H. Jofeh, “Portfolio retrofit evaluation: A methodology for optimizing a large number of building retrofits to achieve triple-bottom-line objectives,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 27, pp. 263–274, 2016, doi: 10.1016/j.scs.2016.03.011.

[156] Md. Faruque Hossain, “Sustainable Design and Build”, Butterworth-Heinemann, 2019.

[157] Cerema “La Gestion Technique du Bâtiment (GTB) : quel système choisir ?,” 2017.

[158] H. Yin, “Building Management System to support building renovation,” *Boolean Snapshots Dr. Res. Univ. Coll. Cork*, no. 2010, pp. 164–169, 2010, doi: 10.33178/boolean.2010.37.

[159] H. Bakhtiari, J. Akander, and M. Cehlin, “Evaluation of thermal comfort in a historic building refurbished to an office building with modernized HVAC systems,” *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 14, no. 2, pp. 218–237, 2020, doi: 10.1080/17512549.2019.1604428.

[160] V. Renzi and F. Burgun, “Evaluation des performances énergétiques et du confort d’un bâtiment tertiaire rénové,” *IBPSA Fr.*, vol. 2, p. 7, 2008.

[161] E. Pedersen, C. Gao, and A. Wierzbicka, “Tenant perceptions of post-renovation indoor environmental quality in rental housing: Improved for some, but not for those reporting health-related symptoms,” *Build. Environ.*, vol. 189, p. 107520, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107520.

[162] Á. Broderick, M. Byrne, S. Armstrong, J. Sheahan, and A. M. Coggins, “A pre and post evaluation of indoor air quality, ventilation, and thermal comfort in retrofitted co-operative social housing,” *Build. Environ.*, vol. 122, pp. 126–133, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.05.020.

[163] V. Chandrasekaran, J. Dvarioniene, A. Vitkute, and G. Gecevicius, “Environmental Impact

Assessment of Renovated Multi-Apartment Building Using LCA Approach : Case Study from Lithuania,” 2021.

[164] I. Cetiner and E. Edis, “An environmental and economic sustainability assessment method for the retrofitting of residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 74, pp. 132–140, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.01.020.

[165] A. Uihlein et al., “Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union - Potential and costs Franc,” *Energy Build.*, vol. 42, pp. 976–984, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.009.

[166] M. Beccali, M. Cellura, M. Fontana, S. Longo, and M. Mistretta, “Energy retrofit of a single-family house : Life cycle net energy saving and environmental benefits,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 283–293, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.040.

[167] De Angelis, E., Dotelli, G., Pittau, F., La Torre, A., Porcino, C., Pansa, G., Villa, N., “LCA and LCC Based Energy Optimization of Building Renovation Strategies,” Conference SB13 Graz - Sustainable buildings construction products & technologies pp. 77-86, 25-28 Se2013.

[168] D. Kellenberger, “Relevance of simplifications in LCA of building components,” *Build.Env.*, vol. 44, pp. 818–825, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.06.002.

[169] C. Thormark, “A low energy building in a life cycle - its embodied energy , energy need for operation and recycling potential,” *Build.Env.*, vol. 37, pp. 429–435, 2002.

[170] M. K. Dixit, J. L. Fernández-solís, S. Lavy, and C. H. Culp, “Identification of parameters for embodied energy measurement : A literature review,” *Energy Build.*, vol. 42, pp. 1238–1247, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.016.

[171] O. Pombo, B. Rivela, and J. Neila, “The challenge of sustainable building renovation : assessment of current criteria and future outlook,” *J.Clean.Prod.*, vol. 123, 2016.

[172] O. Pombo, B. Rivela, and J. Neila, “Life cycle thinking toward sustainable development policy-making : The case of energy retrofits,” *J.Clean.Prod.*, vol. 206, 2019.

[173] Ecoinvent Centre, The Ecoinvent Version 2.2 Database, 2010, <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>.

[174] R. Moschetti and H. Brattebø, “Combining Life Cycle Environmental and Economic Assessments in Building Energy Renovation Projects,” *Energies*, vol.10, 1851, 2017, doi: 10.3390/en10111851.

[175] Y. Ostermeyer, H. Wallbaum, and F. Reuter, “Multidimensional Pareto optimization as an approach for site-specific building refurbishment solutions applicable for life cycle sustainability assessment,” *Int J Life Cycle Assess*, vol.18, pp.1762–1779, 2013, doi: 10.1007/s11367-013-0548-6.

[176] M. I. Touceda, F. J. Neila, and M. Degrez, “Modeling socioeconomic pathways to assess sustainability : a tailored development for housing retrofit,” *Int J Life Cycle Assess*, vol.23, pp. 710–725, 2018, doi: 10.1007/s11367-016-1194-6.

- [177] X. Oregi, P. Hernandez, C. Gazulla, and M. Isasa, “Integrating Simplified and Full Life Cycle Approaches in Decision Making for Building Energy Refurbishment: benefits and barriers,” *Buildings*, vol. 5, pp. 354–380, 2015, doi: 10.3390/buildings5020354.
- [178] M. Gustafsson *et al.*, “Economic and environmental analysis of energy renovation packages for European office buildings,” *Energy Build.*, vol. 148, pp. 155–165, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.079.
- [179] International Organization for Standardization, ISO 15686-5:2008, 2008.
- [180] B. H. Goh, Y. Sun, B. H. Goh, and Y. Sun, “The development of life-cycle costing for buildings The development of life-cycle costing for buildings,” *Build.Res.Inf.*, vol. 3218, no. October, 2015, doi: 10.1080/09613218.2014.993566.
- [181] Flanagan, R. *Life Cycle Costing: Theory and Practice*; BSP Professional Books: Oxford, UK, 1989.
- [182] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2010; Volume L 153/13, pp. 1–23.
- [183] The European Commission. Commission Recommendation (EU) 2019/786 of 8 May 2019 on Building Renovation; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2019; Volume L 127/34, pp. 1–46.
- [184] International Organization for Standardization (ISO). *Buildings and Constructed Assets-Service-Life Planning-Part 5: Life-Cycle Costing*; ISO 15686–5; ISO: Geneva, Switzerland, 2008.
- [185] EN 15459:2007, 2008. *Energy Performance of Buildings. Economic Evaluation Procedure for Energy Systems in Buildings*.
- [186] H. Islam, M. Jollands, and S. Setunge, “Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 129–140, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.006.
- [187] Eurostat. *European social statistics*. European Commission, 2013. p. 161. DOI:10.2785/36105.
- [188] Eurostat. *Electricity prices for domestic consumers, from 2007 onwards - bi-annual data*. European Commission; 2014.
- [189] Eurostat. *Gas prices for domestic consumers, from 2007 onwards - bi-annual data*. European Commission; 2014.
- [190] CYPE Ingenieros S.A., *Generador de precios de la construcción*, CYPE Ingenieros S.A., 2015.
- [191] K. Kuusk, T. Kalamees, S. Link, S. Ilomets, and A. Mikola, “Case-study analysis of concrete large-panel apartment building at pre- and post low-budget energy-renovation,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 23, no. 1, pp. 67–75, 2017, doi: 10.3846/13923730.2014.975741.

- [192] A. Synnefa *et al.*, “Transformation through Renovation: An Energy Efficient Retrofit of an Apartment Building in Athens,” *Procedia Eng.*, vol. 180, pp. 1003–1014, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.260.
- [193] Attoue, N., “Use of Smart Technology for heating energy optimization in buildings: Experimental and numerical developments for indoor temperature forecasting,” PhD thesis, University of Lille, France (2019).
- [194] A. Dutta, A. Samanta, and S. Neogi, “Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate,” *Energy Build.*, vol. 139, pp. 680–689, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.01.018.
- [195] N. A. M. Al-Tamimi, S. F. Syed Fadzil, and W. M. Wan Harun, “The Effects of Orientation, Ventilation, and Varied WWR on the Thermal Performance of Residential Rooms in the Tropics,” *J. Sustain. Dev.*, vol. 4, no. 2, 2011, doi: 10.5539/jsd.v4n2p142.
- [196] A. Albatayneh, “The Influence of Building’s Orientation on the Overall Thermal Performance,” *Acad. Res. Community Publ.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2018, doi: 10.21625/archive.v2i1.234.g122.
- [197] T. Imanishi, R. Tennekoon, P. Palensky, and H. Nishi, “Enhanced building thermal model by using CO₂ based occupancy data,” *IECON 2015 - 41st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 3116–3121, 2015, doi: 10.1109/IECON.2015.7392578.
- [198] A. Ioannou and L. C. M. Itard, “Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy,” *Energy Build.*, vol. 92, pp. 216–233, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.055.
- [199] V. Martinaitis, E. K. Zavadskas, V. Motuziene, and T. Vilutiene, “Importance of occupancy information when simulating energy demand of energy efficient house: A case study,” *Energy Build.*, vol. 101, pp. 64–75, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.031.
- [200] S. S. K. Kwok, R. K. K. Yuen, and E. W. M. Lee, “An intelligent approach to assessing the effect of building occupancy on building cooling load prediction,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 8, pp. 1681–1690, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.02.008.
- [201] Fauconnier R., L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires, article paru dans le numéro 10 (1992) de la revue Chauffage Ventilation Conditionnement.
- [202] S. Abraham and X. Li, “A cost-effective wireless sensor network system for indoor air quality monitoring applications,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 34, pp. 165–171, 2014, doi: 10.1016/j.procs.2014.07.090.
- [203] A. Norhidayah, C. K. Lee, M. K. Azhar, and S. Nurulwahida, “Indoor air quality and sick building syndrome in three selected buildings,” *Procedia Eng.*, vol. 53, no. 2010, pp. 93–98, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.014.
- [204] J. Sundell, “On the history of indoor air quality and health,” *Indoor Air, Suppl.*, vol. 14, no. SUPPL. 7, pp. 51–58, 2004, doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x.
- [205] F. Lachhab, M. Bakhouya, R. Ouladsine, and M. Essaïdi, “Monitoring and controlling buildings indoor air quality using WSN-based technologies,” *2017 4th Int. Conf. Control. Decis. Inf.*

Technol. CoDIT 2017, vol. 2017-January, pp. 696–701, 2017, doi: 10.1109/CoDIT.2017.8102676.

[206] R. Du Plessis, A. Kumar, G. P. Hancke, and B. J. Silva, “A wireless system for indoor air quality monitoring,” *IECON Proc.Industrial Electron. Conf.*, pp. 5409–5414, 2016, doi: 10.1109/IECON.2016.7794087.

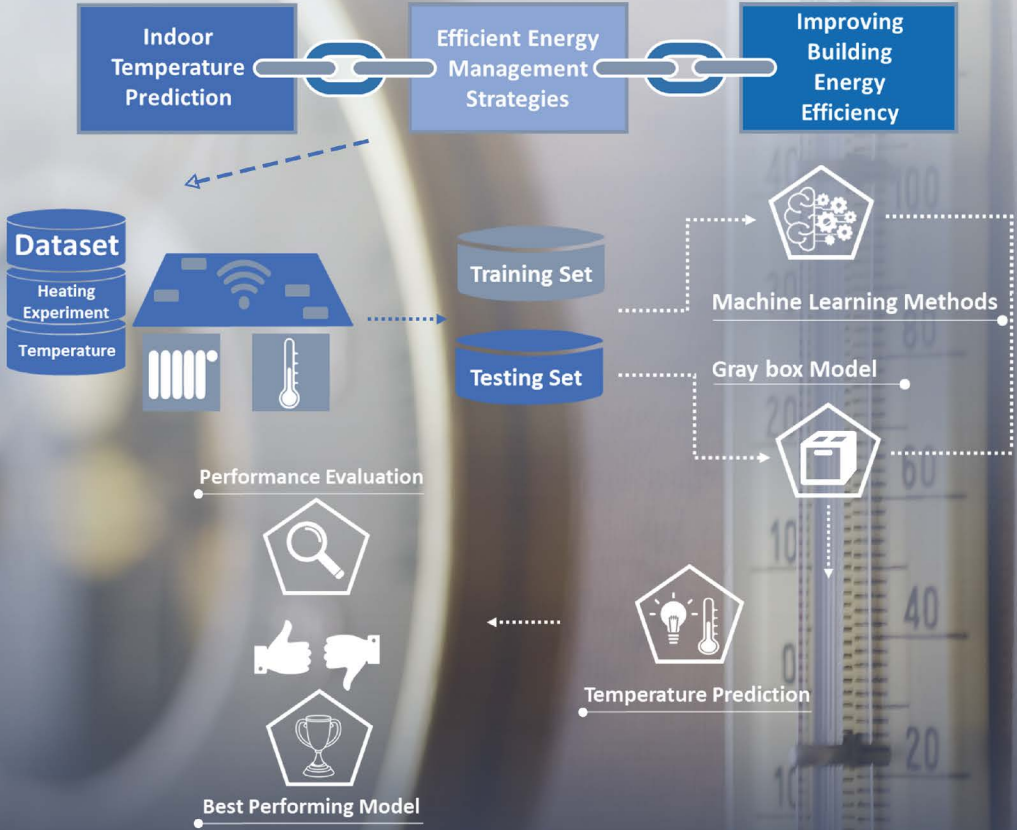
[207] P. Kumar *et al.*, “Indoor air quality and energy management through real-time sensing in commercial buildings,” *Energy Build.*, vol. 111, pp. 145–153, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.037.

[208] GE11-Surface de référence , Rapport du groupe d'expertise , Version 1 ,2019.

[209] ADEME , Documentation des facteurs d'émission de la base carbone, Version 11 , 2014.

[210] L.t.Graham,T.Parkinson,S.Schiavon, “Lessons learned from 20 years of CBE's occupant survey,” *Build.Cities* , vol.2,no.1,pp.166-184,2021,doi:10.5334/bc.76.

Annexe A : Publication



Use of Machine Learning Methods for Indoor Temperature Forecasting

Volume 13 · Issue 10 | October 2021





Article

Use of Machine Learning Methods for Indoor Temperature Forecasting

Lara Ramadan ^{1,2}, Isam Shahrour ^{1,*} , Hussein Mroueh ¹ and Fadi Hage Chehade ²

¹ Laboratoire Génie Civil et Géo-Environnement, University Lille, IMT Lille Douai, JUNIA Hauts de France, ULR 4515-LGCgE, 59000 Lille, France; lara.ramadan@univ-lille.fr (L.R.); hussein.mroueh@univ-lille.fr (H.M.)

² Modeling Center, Doctoral School of Science and Technology, Lebanese University, Hadath 99000, Lebanon; fchehade@ul.edu.lb

* Correspondence: isam.shahrour@univ-lille.fr

Abstract: Improving the energy efficiency of the building sector has become an increasing concern in the world, given the alarming reports of greenhouse gas emissions. The management of building energy systems is considered an essential means for achieving this goal. Predicting indoor temperature constitutes a critical task for the management strategies of these systems. Several approaches have been developed for predicting indoor temperature. Determining the most effective has thus become a necessity. This paper contributes to this objective by comparing the ability of seven machine learning algorithms (ML) and the thermal gray box model to predict the indoor temperature of a closed room. The comparison was conducted on a set of data recorded in a room of the Laboratory of Civil Engineering and geo-Environment (LGCgE) at Lille University. The results showed that the best prediction was obtained with the artificial neural network (ANN) and extra trees regressor (ET) methods, which outperformed the thermal gray box model.

Keywords: energy efficiency; prediction; indoor temperature; machine learning; gray box model



Citation: Ramadan, L.; Shahrour, I.; Mroueh, H.; Chehade, F.H. Use of Machine Learning Methods for Indoor Temperature Forecasting. *Future Internet* **2021**, *13*, 242. <https://doi.org/10.3390/fi13100242>

Academic Editor:
Efsthios Stamatatos

Received: 29 August 2021
Accepted: 17 September 2021
Published: 23 September 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Improving buildings' energy efficiency is a priority area for progress. The design and the implementation of efficient energy management strategies to balance energy consumption and occupant comfort have a particular interest in this domain. The indoor temperature is a major key to such a strategy, being one of the most critical parameters affecting energy consumption and personal comfort. In this context, predicting the indoor temperature is an essential task.

Temperature forecasting has been considered an interesting subject, widely studied in the literature [1–4]. Moreover, it has also been integrated into predictive control models, developed to optimize energy devices [5,6].

The estimation of indoor temperature has been tackled with different approaches, classified according to their foundations in two main categories: the physical approach and the data-driven approach [7]. Physical modeling uses detailed equations based on physical engineering principles [8]. This approach requires thorough knowledge of the overall structure of the building, its components, and energy systems and has a reasonably high computational cost [8–10]. The data-driven approach allows the dynamic system to be written in purely mathematical relations expressing the output data as a function of the input data. The adopted mathematical functions can have a physical meaning; it is then a gray box model, or they may not carry any physical sense, and the model will then be known as a black box.

The black box model forgoes the need for detailed input data of the simulated building and focuses on learning from the available historical data [11]. This approach has been used in a wide variety of building energy performance applications. It has proven its

applicability in the modeling of building thermal behavior [12] as well as the forecast of the energy consumption [13–15] and the energy demand of buildings [16,17].

Machine learning methods, a branch of artificial intelligence (AI), are considered an effective tool for black-box modeling. In the past decade, these algorithms have experienced remarkable progress [18]. They have offered a promising pathway for the development of prediction models [19]. Scholars have reported their application in the energy prediction of buildings due to their ability to overcome the limits encountered by existing models [20–23].

Several AI-based techniques have been used to improve buildings' energy performance. The study conducted in [24] tested the capacity of various AI-based algorithms (ANN, fuzzy logic ((FL)), and adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS)) to control the thermal conditions and optimize heating loads in double-skin buildings. The study results showed that the selection of the optimal algorithm depends on the objective of the control strategy. ANN was the most suitable energy-saving strategy, while the others were more adapted to thermal comfort strategies. Cotrufo et al. [23] proposed a methodology for the development of an AI-based model for the thermal control of institutional buildings. The results showed that the Gaussian process regression (GPR) outperformed the ANN, support vector machine (SVM), decision tree (DT), and random forest (RF) models.

Sholuhadin and Han [25] used two ANN models to predict hourly heating loads using fewer meteorological parameters. Li et al. [26,27] applied an SVM-based model to predict the hourly cooling load of an office building. The developed model outperformed the back propagation neural network (BPNN) and the radial basis function neural network (RBFNN) techniques. Chammas et al. [22] developed a system based on a multi-layer perception neural network (MLP) to predict energy consumption using data collected from wireless sensors in a two-story building. Compared to four algorithms (linear regression, SVM, RF, and gradient boosting (GB)), the model had improved performance. This model, enhanced with deep learning capabilities, has also outperformed SVM, LR, regression trees (RT), ensemble boosting, and GPR in predicting buildings' aggregated energy demand [28]. In [29] a DT algorithm showed its ability to predict the energy demand of a residential building accurately. Wang et al. [30] demonstrated the superiority of the RF algorithm compared to the RT and the support vector regressor (SVR) methods.

Mba et al. [20] demonstrated that ANN is a powerful modeling tool for hourly forecasting of indoor temperature and other thermal parameters in modern buildings one day to one month in advance using only the twelve last indoor and outdoor air temperature and relative humidity values. Özbalta et al. [31] developed ANN and multiple regression models to predict the daily indoor temperature and relative humidity in an educational building. The study showed that the ANN successfully predicted the thermal parameters and outperformed the multiple regression model. Considering the capacity of the ANN method to deal with time-series data, it has also been used in [32] to predict the indoor temperature in an institutional building. The study highlighted the importance of selecting the relevant input parameters and a suitable training algorithm to improve the prediction results. Potočník et al. [33] conducted short-term prediction of indoor temperature using three ML methods (NN, autoregressive models with exogenous inputs (ARX), and extreme learning machine models ((ELM)). The NN model achieved the best prediction. Results also showed that the use of future weather data improves prediction performance. Qi et al. [21] showed that using SVR effectively predicts the indoor temperature of an office building and that it is more accurate than BPNN. The study carried out by Mateo et al. [34] confirmed the validity of several linear (autoregressive methods and robust multiple linear regression) and non-linear techniques (ELM and non-linear autoregressive exogenous multilayer perceptron) for predicting indoor temperature. Paul et al. [35] used an approach combining the Internet of Things (IoT) and ML methods to predict the indoor temperature in a smart building. Results showed that the RF, SVM, and NN methods gave accurate results. Aguilera et al. [36] showed the accuracy of a thermal model based on a DT algorithm using the weather data and occupants' feedback to predict the indoor temperature.

The gray box model involves both physical and black-box modeling [37]. This approach is based on the thermal modeling of buildings by analogy with an electrical resistance-capacity circuit [38]. The buildings are modeled by a set of dynamic differential equations representing the phenomenon of conduction, convection, and capacitive phenomenon. Several scholars used this approach in research about building energy efficiency. Berthou et al. [17] tested the capacity of four gray box models to predict heating and cooling demands of a multi-zone occupied office building to determine the best model architecture. The results showed that a second-order model was able to well represent the thermal behavior of the office building. Cui et al. [3] developed a hybrid model to predict the average temperature in two-story houses. Tests conducted on the 24 h data horizon gave satisfactory results. Ogunsola et al. [39] created a time-series model to estimate the indoor temperature’s real-time cooling load. Two gray box models were combined for the building envelope and the internal thermal mass. The relevance of the model was checked on light, medium, and heavy constructions. A reasonably high degree of precision was obtained for the studied cases.

The studies mentioned above focused on using either the machine learning technics or the gray box approach for the thermal building modeling. This paper presents a comparison of the performances of a set of data-driven models in these two categories.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 outlines the research methodology and material; Section 3 presents and discusses the prediction results., Section 4 summarizes the conclusions and highlights the primary outcome of this research.

2. Methodology and Materials

2.1. Methodology

This research aimed to compare the ability of different ML algorithms and a gray box model to predict indoor temperature. During this investigation, data on the thermal environment were first collected from a heating experiment in a closed room in the LGCgE laboratory using an intelligent monitoring system. The recorded datasets served as a basis for the development and training of ML algorithms, and the evaluation of their predictive performance in terms of root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2). For detailed information about the dataset see the Supplementary Material.

A gray box model was also established and compared to the ML algorithms to cover the statistical and hybrid aspects of data-driven modeling.

Figure 1 summarizes the methodology applied in this study. More explicit descriptions of the experiment, intelligent algorithms, and evaluation criteria are presented below.

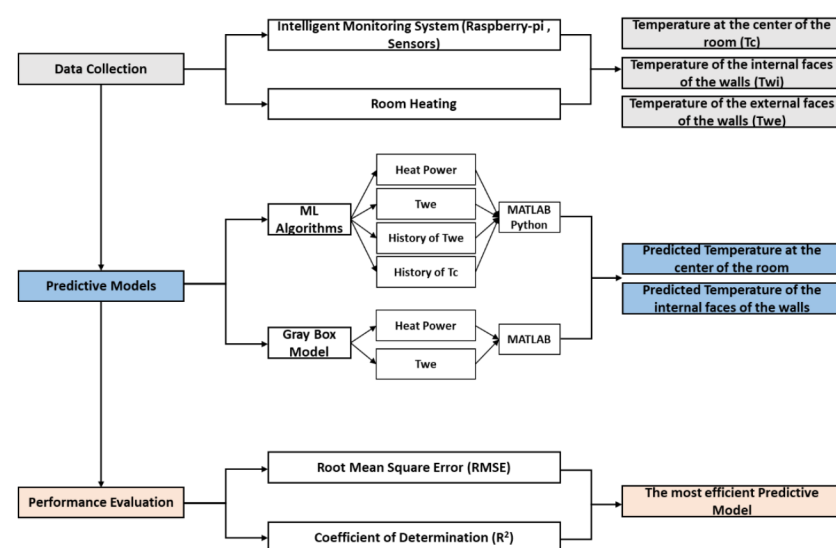


Figure 1. Research Methodology.

2.2. Material

The study was conducted in an unoccupied closed room in the LGCgE Laboratory at Lille University. The closed room has an area of 9 m² and a height of 2.3 m. It is furnished and does not have a facade or windows (Figure 2).

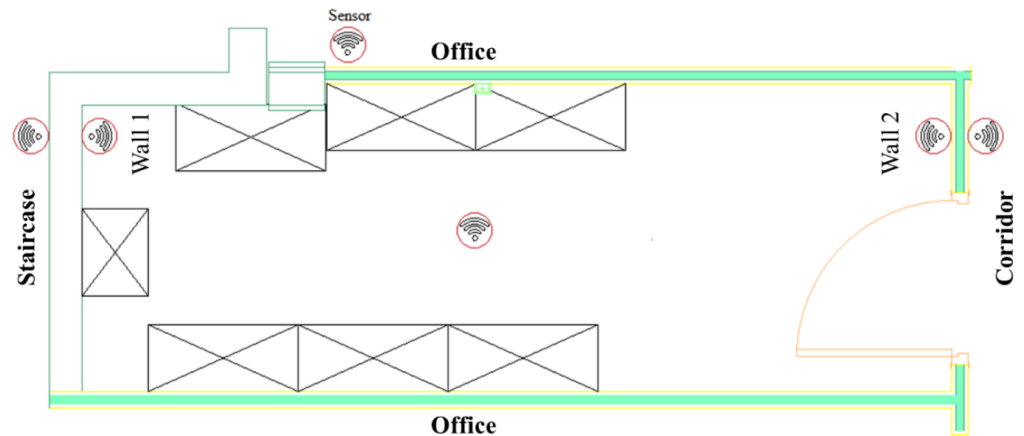


Figure 2. Reference room in LGCgE laboratory.

To model the thermal environment of the room, an intelligent monitoring system composed of a wireless network sensor connected to a micro-computer (Raspberry-pi) was implemented.

The main objective of these sensors was to track indoor comfort parameters. They provided measurements of four environmental variables: temperature, humidity, luminosity, and noise (THLN). In our work, we focused on the temperature readings. Sensors were installed as shown (Figure 2) on the internal and external faces of the walls of the room and another sensor was suspended at the center to assess the indoor temperature. A standard methodology for monitoring cannot be found in the scientific literature. Therefore, the number of sensors and their positions were based on empirical approaches [40]. However, several studies have developed models to determine the optimal location of sensors to control energy consumption and thermal comfort [41–43]. In this research, the position of the thermal sensors was determined based on a study carried out in the LGCgE laboratory about the optimal sensor position that can provide representative data of the indoor room environment. Therefore, a sensor was suspended through a wire in the center of the room at a height of 1.5 m above the ground. The position of the sensors recording the temperature of the internal and external faces of the walls was determined based on the manufacturer's recommendations [44]. Two sensors per wall were installed on the internal and external faces of the walls in a neutral zone at the same height above the ground (1.5 m).

Reliability analysis of the sensors was carried out before their use. A set of sensors was located at the same position. Based on the obtained temperature profiles, these were classified into four groups (Figure 3). The maximum temperature difference between these groups, shown in Figure 4 (0.4 °C), did not exceed the precision range set at 0.4 °C. These results confirm the reliability of the sensors and their use in the experiments carried out.

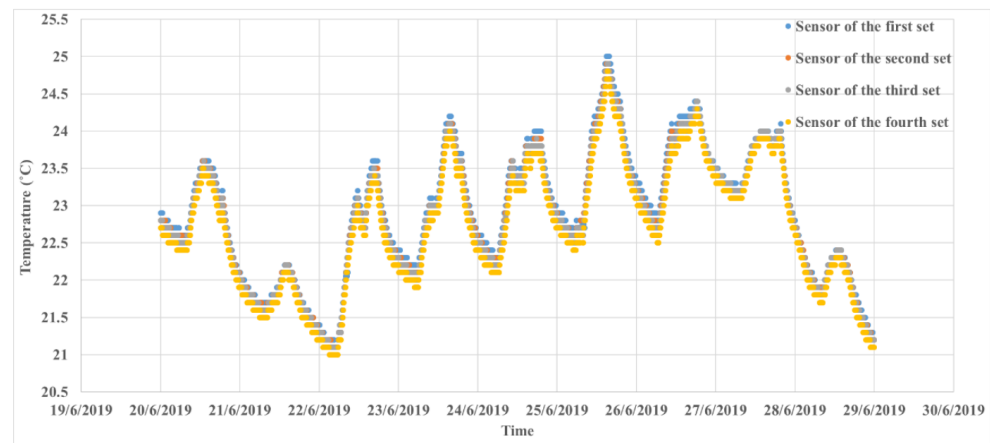


Figure 3. Recorded data by groups of sensors located at the same position.

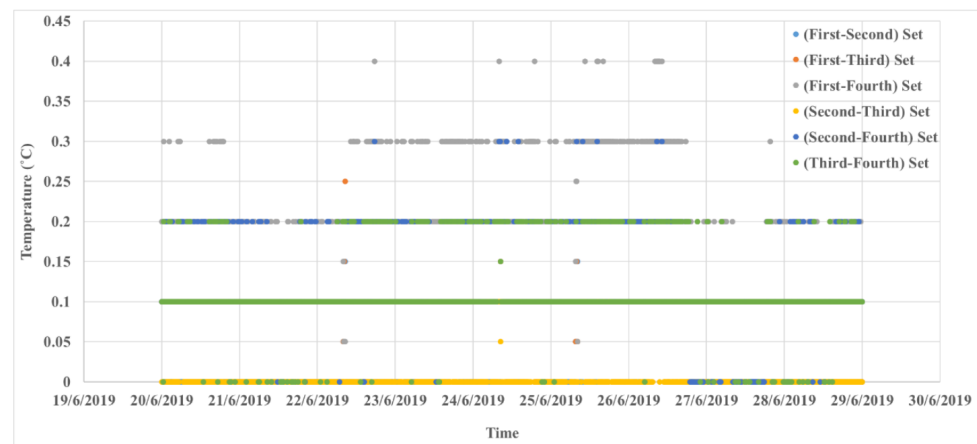


Figure 4. Temperature difference for the groups of sensors located at the same position.

The closed room was heated using a 2000 W power radiator for several hours. The temperatures at the center and on the walls, recording measurements at an interval of 10 min during the experiment, served as a dataset for the applied thermal algorithms.

Data were checked before their use in numerical modeling for the identification of missing data or abnormal values. Missing data were identified easily since data were recorded at a given time interval. Abnormal values were identified if they exceeded maximum expected values. In these two cases, data were identified and reported as unacceptable data. Since our experiments were conducted in controlled conditions, collected data were exempt from missing data or abnormal values. In the future, techniques based on machine learning will be used to identify and treat missing data and abnormal values.

The variation of these parameters, as well as the heating period, are illustrated in Figure 5.

2.3. Selection of Predictive Models

In this study, a set of AI-based algorithms and a gray box model were compared to identify the most suitable model to predict the indoor temperature of the room. Furthermore, these models were evaluated according to their forecast accuracy and their performance. A detailed description of the adopted models will be presented below.

2.3.1. ML Methods

A variety of ML algorithms are found in the literature. Some of these algorithms (Table 1) have been frequently used and have shown reliable results in predicting buildings' thermal and energy variables.

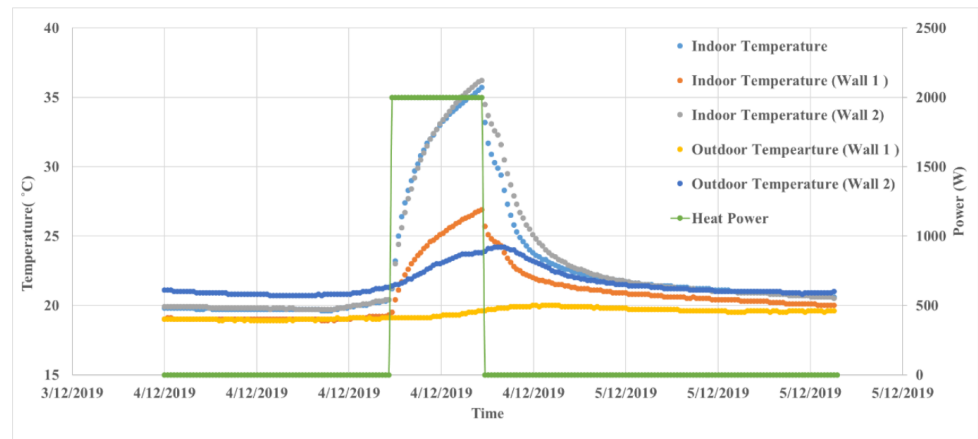


Figure 5. Recorded parameters of the heating experiment.

Table 1. Machine learning-based thermal prediction.

Reference	Predicted Variables	ML Algorithms	Input Variables	Data Source	Key Finding	Performance Evaluation
[9]	Building energy needs	Multiple linear regression (MLR)	Cooling and heating degree day, external temperature, shape factor, opaque surface, and surface of glazed component	Non-residential building stock	MLR is a promising alternative in the field of building energy performance	Mean absolute error (MAE), mean square error (MSE), RMSE, R ² , mean absolute percentage error (MAPE)
[22]	Energy consumption	MLP, LR, SVM, GB, RF	Meteorological data, temporal data, appliances, and light energy consumption	Two story building	MLP outperforms all other models	R ² , RMSE, MAE, MAPE
[45]	Indoor temperature	MLP, radial basis function (RBF), group method of data handling (GMDH)	Solar irradiation, environmental temperature, outdoor relative humidity, wind speed, working hours, and occupancy	Laboratory of a university	MLP achieved the highest estimations	Coefficient of correlation, RMSE
[46]	Next day daily peak demand and consumption	MLR, RF, MLP, boosting tree (BT), SVR, K-nearest neighbors (K-NN), multivariate adaptive regression splines (MARS), autoregressive integrated moving average (ARIMA)	Building power consumption, meteorological data, time of observations,	High-class skyscraper	The ensemble model produces better generalization performance	MAPE, RMSE, MAE, R ²

Table 1. Cont.

Reference	Predicted Variables	ML Algorithms	Input Variables	Data Source	Key Finding	Performance Evaluation
[47]	Comfort index	LR, DT, RF, GB, naive Bayes (NB), Logistic regression (LoR) ANN, SVM K-NN adaboost (AB)	Indoor environment, meteorological data, personal factors, building information	ASHRAE global thermal database	RF model has shown better prediction accuracy	MSE, R ² accuracy
[48]	Heating and cooling loads	RF, ET, GB	Building features	12 buildings typologies	Tree-based ensemble learning is able to accurately model and predict building loads	MSE, MAE, MAPE
[49]	Hourly HVAC energy consumption	ANN, RF	Meteorological data, time of observations, number of guests for the day, number of rooms booked	Hotel in Spain	Both models have comparable predictive power	Mean absolute percentage deviation (MAPD), median absolute deviation (MAD), MAPE, coefficient of variation of root mean square error (CV-RMSE), R ²
[50]	Heating energy consumption	RF, GB SVR extreme gradient boosting (XGB)	Meteorological data, occupancy data, time of day, historical heating consumption	Residential quarter	XGB exhibits the optimal efficiency RF exhibits optimal average accuracy The robustness of RF is the highest	RMSE, MAPE MAE, CV-RMSE

An artificial neural network (ANN) is a system whose functioning is inspired by the neurons of the human brain. Multi-layer perception (MLP) is the most popular structure among the forwarding propagation methods in ANN and has been the subject of several types of research. MLP has an input layer, an output layer, and a hidden layer in which each neuron is connected to the mentioned layers. This architecture has been used as a powerful method to predict the indoor temperature and energy consumption of buildings [22,45,51] and assess the occupants' thermal comfort [52,53]. This research started with an MLP model with one hidden layer and four neurons. This number was selected after a set of tests conducted with several neurons ranging from 4 to 10. The study conducted in [51] also supports this number. The training process was carried out by considering the Levenberg–Marquardt algorithm, which has proven to be effective with convergence towards a minimal root mean square [52,53]. The transfer function sigmoid was used for the hidden layer, while a linear transfer function was used for the output layer. Several tests were carried out to obtain a reliable prediction. These tests were characterized by similar training times. The best prediction was obtained for a test with 32 epochs and four

neurons in the hidden layer. Appendix A summarizes the different tests conducted to estimate the number of neurons and to obtain the best prediction performance.

Multiple linear regression (MLR) is a mathematical regression method that extends simple linear regression. It has demonstrated its ability to solve complex problems, in particular a building's energy balance and energy planning [9], daily peak demand and consumption [46], and annual energy consumption [54].

A decision tree (DT) is a technique based on partitioning the dataset into groups in the form of a flowchart. This technique has been widely used in predicting buildings' energy consumption [14,55] and user comfort indices [47], as well as modeling buildings' energy demands [56].

Ensemble learning has also been applied in monitoring building energy performance, especially bagging and boosting algorithms.

Random forest (RF) and extra trees (ET) are representative techniques of the bagging family, which combine a multitude of decision trees. These algorithms have proven their efficiency in predicting a building's cooling and heating loads [48] and energy consumption [49,57], as well as personal thermal comfort [58,59].

Gradient boosting (GB) and extreme gradient boosting (XGB) methods also belong to the ensemble learning method. Their basic idea is to combine several simple models called weak learners to obtain a strong model with an improved prediction error. These methods appeared as a promising alternative in the domain of building energy efficiency. Several studies have confirmed their effectiveness in predicting energy consumption [50,60] and building energy loads [48,61], establishing predictive energy models [62] as well as detecting faults in HVAC systems [63].

These supervised ML algorithms were selected in this research due to their popularity. The dataset was divided into two subsets to train and test the chosen algorithms. The 70% and 80% training proportions are most often used in the literature [46–48,64,65]. To determine the most appropriate ratios for the dataset, values ranging from 50% to 80% were tested in this study. The results confirmed the use of the two proportions mentioned above. Similar performances in terms of RMSE and R^2 were observed for these proportions (see Appendix B).

ANN modeling was conducted using the neural network toolbox in MATLAB-based software, considering a dataset divided into 70% for training, 15% for validation, and 15% for testing. All the other algorithms were developed based on the python statistical computation language. The hyper-parameters were maintained at their default values, considering a dataset distribution of 70% for training and 30% for testing.

The input and output variables used for the models are summarized in Table 2. The temperature history is a matrix of parameters with a difference of 30 min between its different columns. For example, if the temperature was recorded at a time t , the history corresponds to $t-0.5$ h, $t-1$ h, $t-1.5$ h, and $t-2$ h.

Table 2. Input and output parameters of the ML methods.

Input Parameters	Output Parameters
Heat Power	Indoor Temperature (at the center)
Outdoor Temperature Wall 1	
Outdoor Temperature Wall 2	Indoor Temperature Wall 1
Outdoor Temperature History Wall 1	
Outdoor Temperature History Wall 2	Indoor Temperature Wall 2
Indoor Temperature History	

The accuracy of these forecasting models was evaluated, and their performances were compared based on the following criteria:

The root mean square error (RMSE) that can provide information on the magnitude of the deviations [3,65,66]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \tag{1}$$

The coefficient of determination (R^2) that can be a measure of the adequacy between the predicted and the observed data [16,52,55]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{2}$$

where \hat{y} is the predicted vector, y is the reference vector, and n is the number of parameters.

2.3.2. Gray Box Model (GBM)

Hybrid models have been the subject of numerous studies. They have been widely used in the field of predictive control [67–69] as well as in the area of predicting building thermal load [70,71] and indoor temperature forecasting [3]. The most common method for creating this model is applying a resistance-capacity (RC) form based on physical and statistical approaches [38,72–74]. The thermal resistance R represents the component to resist the heat flux, and the thermal capacity C describes its storage capacity.

In this work, a simplified (RC) model (Figure 6) was developed to thermally model the considered room.

(T_1, T_2) are the respective outdoor and indoor temperatures of the first wall, (T_5, T_4) the respective outdoor and indoor temperatures of the second wall, and T_3 the indoor air temperature. Q_h is the heat source power.

$[Q_h \ T_1 \ T_5]$ and $[T_2 \ T_3 \ T_4]$ represent the RC model’s input and output vectors, respectively.

The model’s parameters (R_1, C_1), (R_2, C_2), and (R_3, C_3) respectively designate the thermal resistance and capacity of the first wall, the indoor air, and the second wall.

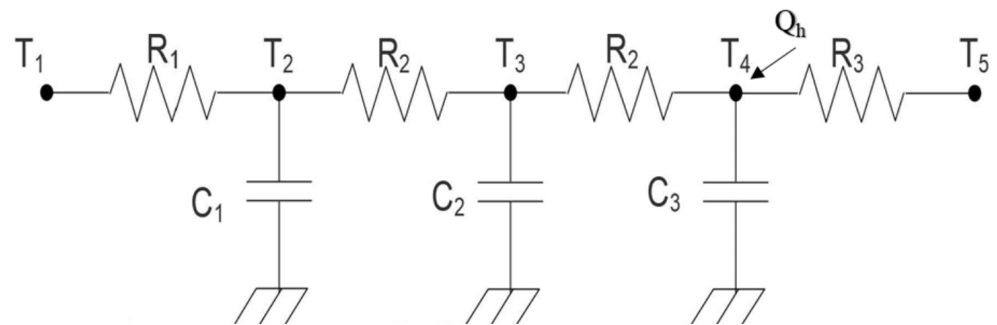


Figure 6. 3R3C room model.

The model can be expressed as a linear stochastic differential equation written into a matrix form for state-space representation by applying Kirchoff’s balance laws to the circuit [75]. In addition, it includes a state equation and an output equation:

$$\begin{cases} \dot{T} = AT + BU \\ Y = CT + DU \end{cases} \tag{3}$$

The T vector contains the node temperatures, U the controllable inputs and disturbances, Y the measured output; A, B, C, D matrices have the RC parameters to be identified.

As for the parameters of the models, they are determined using the grayest function in MATLAB. The initial values of (R_2, C_2) and (R_1, R_3) were selected by applying the French thermal code (RT 2005-2012), while those of (C_1, C_3) were estimated based on the equations characterizing the walls mentioned in the building thermal code [66,76] (see Appendix C).

3. Results and Discussion

The tested algorithms' performance has been evaluated using the coefficient of determination (R^2), and the root mean square error (RMSE). The obtained values are illustrated in Table 3. This part focuses on the results of the prediction of the temperature at the center of the room only, since similar results were obtained for the prediction of the temperature of the internal faces of the walls.

Table 3. Prediction performance of predictive models.

ML Algorithms	RMSE	R^2
ANN	0.081	0.99965
MLR	0.332	0.99415
DT	0.268	0.99618
RF	0.295	0.99539
ET	0.159	0.99864
GB	0.218	0.99748
XGB	0.229	0.99721
GBM	0.842	0.96237

The used ML algorithms have been sorted in decreasing order based on their performance in each experiment, in other words, by increasing RMSE and decreasing R^2 , as shown in Figure 7.

The proposed algorithms have shown their efficiency in the prediction of the indoor temperature of the room, given the values of the performance indices (RMSE <1 and $R^2 > 0.8$) [47,77]. Even though these algorithms seem powerful, they do not all have the same prediction accuracy. In fact, the best result for predicting the indoor temperature was provided by the ANN (RMSE = 0.081 and $R^2 = 0.99965$) and ET (RMSE = 0.159 and $R^2 = 0.99864$) algorithms. Boosting algorithms (GB and XGB) have shown fairly close performance. DT, RF, and MLR were less high performing than the previous algorithms despite the acceptable values of the performance criteria.

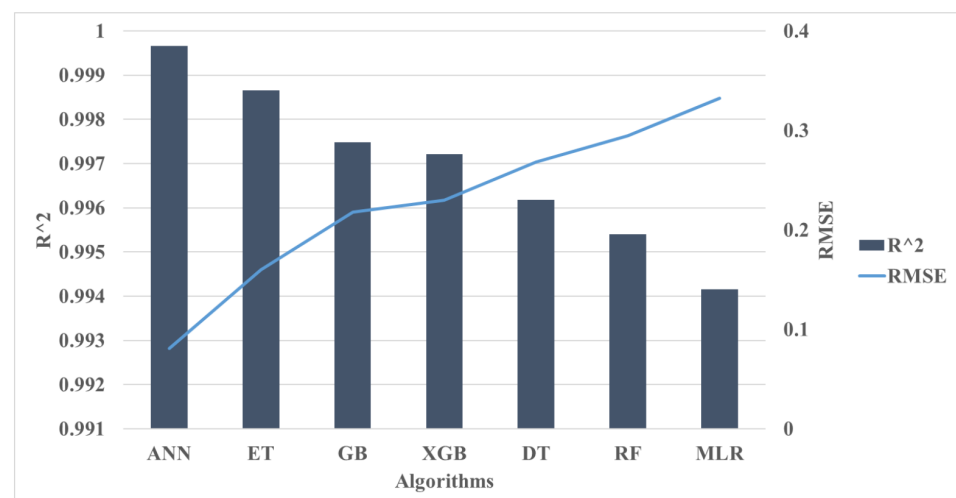


Figure 7. Performance criteria of ML algorithms (RMSE and R^2 coefficient).

The RC model also exhibited acceptable values of performance criteria ($RMSE < 1$ and $R^2 > 0.8$). These are compared to those of the ML algorithms in Figure 8, which illustrate the ranking of the gray box model against the lower- and the best-performing ML algorithms. This figure shows that the AI-based algorithms outperformed the gray box model in predicting the indoor temperature. The lower-performing algorithm MLR (Figure 6) showed improved performance criteria values ($RMSE = 0.332$ and $R^2 = 0.99415$) compared to those of the RC model ($RMSE = 0.842$ and $R^2 = 0.96237$).

The results of this research were compared to other investigations in the literature. [65] compared the performance of 20 families of ML methods in predicting the indoor temperature of an intelligent building. The ET algorithm provided the best performances. This research partially agrees with this study: the ET method was among the best performing methods, but the ANN model outperformed the ET method. Wang and Chen [78] compared three data-driven models, a linear black-box model (ARX), a non-linear black-box model (ANN), and a gray box model in predicting the indoor temperature of a single-zone house. The performance of the gray box model was intermediate between the other two models. Our research also confirms the improved performance of the ANN and the linear black-box models over the gray box model. Indeed, in our study, even the simple MLR model outperformed the gray box model.

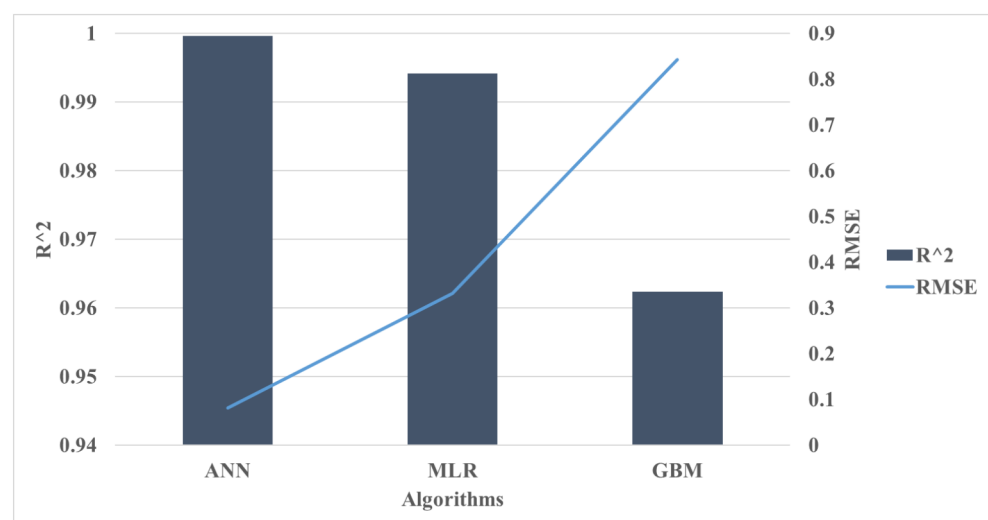


Figure 8. Data-driven models' performance comparison.

Our study compared the two aspects of the data-driven approach (black and gray box models) on their abilities to provide a reliable prediction of indoor temperature. It employed emerging predictive models in a straightforward manner using a limited number of input parameters necessary to achieve accurate prediction results. The obtained results were based on a heating experiment conducted in a closed room in a laboratory environment. This comparison is helpful as it provides a preliminary idea of the most relevant model in indoor temperature prediction that can be employed in energy system management strategies aimed at improving the energy performance of existing buildings.

Although the obtained results are exciting and some are confirmed by other research, this research has some limitations, which are related to the conditions of the experimentation. Indeed, the prediction of the indoor temperature was limited to the use of the following input parameters: heat power, outdoor wall temperatures, and indoor temperature history. In the future, this approach could be generalized by integrating additional input parameters such as the occupants' behavior and the building exposure. The case study in this work was done in a room that was unoccupied and has no facade. This can be viewed as a limitation of this study due to the additional input parameters, whose influence on the models needs to be investigated. The use of variables related to the occupancy and exposure of the room might be necessary to establish a more generalized approach.

4. Conclusions

Forecasting indoor temperature in buildings constitutes a central task in the optimal energy control in buildings and ensuring comfort and health conditions for users. This prediction combines technical parameters such as building characteristics and their energy system, environmental parameters such as the outdoor temperature and humidity, and social parameters. Considering these techno-social issues in the thermal modeling of buildings requires advanced methods such as machine learning methods. In addition, the consideration of complex building assets and the integration of unstructured data such as those recorded by cameras requires the use of Big Data tools. This paper contributes to the first objective by comparing AI-based techniques and a gray box model to predict indoor temperature. This subject is helpful for the assessment of thermal comfort conditions and for reducing energy consumption.

The analysis was conducted on temperature datasets collected in a closed room of the LGCgE laboratory at Lille University using MATLAB and python statistical computation language simulations.

The adopted models exhibited a favorable prediction capacity in terms of root mean square error ($RMSE < 1$) and coefficient of determination ($R^2 > 0.8$). Among these models, ANN and ET emerged as the most suitable algorithms for indoor temperature forecasting, thus surpassing the other ML algorithms and the gray box model. These algorithms were followed by the boosting algorithms that exhibited approximately similar behavior. This research shows that a simple AI-based model could provide accurate forecasting of indoor temperature. It also offers an idea of the effective predictive models to be used in energy management strategies.

However, more efforts should be considered in the future to improve the research findings. In addition, this research should be extended to other data collected from other experimentations operating under various conditions with additional parameters such as occupancy and buildings' exposure. The use of these different data will help generalize the results of this research and their use in practical applications.

Furthermore, we suggest extending this research to the prediction of the operative temperature. Indeed, although the air temperature is the commonly used parameter in the control of energy systems, the international standards use the operative temperature for the thermal comfort control.

Supplementary Materials: The supplementary dataset can be seen at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/fi13100242/s1>.

Author Contributions: Conceptualization, L.R., I.S.; methodology, L.R., I.S.; validation, L.R., I.S.; formal analysis L.R. Investigation, L.R. writing—original draft preparation, L.R. writing—review and editing, L.R., I.S.; supervision, I.S., H.M., F.H.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: Not applicable, the study does not report any data.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Appendix A

Table A1. Prediction performance of ANN based on the number of epochs and neurons.

Neurons	Epochs	RMSE	R ²
4	12	0.274	0.996
	16	0.311	0.99487
	18	0.244	0.9968
	22	0.222	0.99738
	26	0.143	0.99891
	29	0.142	0.99893
	32	0.081	0.99965
	37	0.117	0.99927
	43	0.179	0.99829
	54	0.41	0.9911
	59	0.257	0.99648
	62	0.1	0.99946
	82	0.211	0.9976
	94	0.095	0.99952
	139	0.191	0.9981
5	9	0.327	0.99433
	11	0.244	0.99685
	15	0.219	0.99745
	21	0.351	0.99349
	26	0.172	0.99843
	30	0.279	0.99587
	41	0.0806	0.99965
	57	0.146	0.99886
	61	0.251	0.99665
	87	0.326	0.99436
6	11	0.303	0.99513
	16	0.165	0.99854
	20	0.158	0.99866
	25	0.152	0.99878
	28	0.148	0.99883
	34	0.358	0.99317
	43	0.235	0.99705
	73	0.151	0.99879
	81	0.231	0.99714
159	0.311	0.99487	

Table A1. Cont.

Neurons	Epochs	RMSE	R ²
7	13	0.291	0.9955
	17	0.085	0.99961
	20	0.206	0.99774
	24	0.317	0.99467
	28	0.175	0.99836
	32	0.181	0.99826
	49	0.218	0.9974
	91	0.121	0.99921
	120	0.11	0.99935
8	15	0.278	0.9959
	19	0.265	0.99627
	23	0.234	0.99711
	33	0.167	0.99851
	41	0.229	0.99722
	55	0.352	0.9934
	69	0.213	0.9976
	74	0.123	0.99919
111	0.239	0.99697	
9	14	0.135	0.99903
	19	0.12	0.99923
	25	0.229	0.99722
	28	0.217	0.9975
	38	0.282	0.99578
	43	0.243	0.99684
	55	0.131	0.9991
	73	0.166	0.99853
10	12	0.165	0.99854
	14	0.089	0.99957
	19	0.161	0.99831
	27	0.277	0.99591
	31	0.265	0.99627
	53	0.266	0.99623
	66	0.178	0.99831
72	0.3202	0.99456	

Appendix B

Table A2. Prediction performance based on training proportion.

	50%		60%		70%		80%	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
ANN	0.248	0.99672	0.235	0.9971	0.081	0.99965	0.059	0.99981
MLR	0.347	0.99359	0.336	0.99398	0.332	0.99415	0.331	0.99419
DT	0.52	0.98561	0.332	0.9945	0.268	0.99618	0.237	0.99702
RF	0.395	0.99171	0.353	0.99337	0.295	0.99539	0.278	0.99589
ET	0.198	0.99791	0.166	0.99852	0.159	0.99864	0.139	0.99898
GB	0.297	0.99531	0.269	0.99614	0.218	0.99748	0.191	0.9981
XGB	0.304	0.9951	0.282	0.99578	0.229	0.99721	0.219	0.99743

Appendix C

The heat balance at each node of the room model is described using the following set of first-order differential equations.

$$C_1 \frac{dT_2}{dt} = \frac{T_1 - T_2}{R_1} + \frac{T_3 - T_2}{R_2} \quad (\text{A1})$$

$$C_2 \frac{dT_3}{dt} = \frac{T_2 - T_3}{R_2} + \frac{T_4 - T_3}{R_2} \quad (\text{A2})$$

$$C_3 \frac{dT_4}{dt} = \frac{T_3 - T_4}{R_2} + \frac{T_5 - T_4}{R_3} + Q_h \quad (\text{A3})$$

The initial values of (R_1, C_1) , (R_2, C_2) , and (R_3, C_3) were determined using the following equations:

$$R_2 = \frac{1}{h_{\text{int}} \times S_{\text{int}}} \quad (\text{A4})$$

where h_{int} is the coefficient of internal convection, and S_{int} is the internal exchange surface.

$$C_2 = \rho_{\text{air}} \times C_{\text{air}} \times V_{\text{int}} + \text{Mob} \times S_h \quad (\text{A5})$$

where ρ_{air} is the air density, C_{air} air mass capacity, V_{int} indoor air volume, Mob is the impact of the furniture on the air capacity, and S_h is the heated surface.

$$R_1, R_3 = \left(R_{si} + \frac{e}{\lambda} + R_{se} \right) \times \frac{1}{S} \quad (\text{A6})$$

where R_{si} and R_{se} are the wall's inner and outer surface resistances, respectively, e is the depth of the wall, S its surface, and λ its thermal conductivity.

$$C_1, C_3 = m \times C_p \quad (\text{A7})$$

where m is the mass of the wall and C_p is its specific heat.

References

1. Zamora-Martínez, F.; Romeu, P.; Botella-Rocamora, P.; Pardo, J. Online learning of indoor temperature forecasting models towards energy efficiency. *Energy Build.* **2014**, *83*, 162–172. [[CrossRef](#)]
2. Zamora-Martínez, F.; Romeu, P.; Botella-Rocamora, P.; Pardo, J. Towards energy efficiency: Forecasting indoor temperature via multivariate analysis. *Energies* **2013**, *6*, 4639–4659. [[CrossRef](#)]
3. Cui, B.; Fan, C.; Munk, J.; Mao, N.; Xiao, F.; Dong, J.; Kuruganti, T. A hybrid building thermal modeling approach for predicting temperatures in typical, detached, two-story houses. *Appl. Energy* **2019**, *236*, 101–116. [[CrossRef](#)]

4. Ruano, A.E.; Crispim, E.M.; Conceição, E.Z.E.; Lúcio, M.M.J.R. Prediction of building's temperature using neural networks models. *Energy Build.* **2006**, *38*, 682–694. [[CrossRef](#)]
5. Ferreira, P.M.; Ruano, A.E.; Silva, S.; Conceição, E.Z.E. Neural networks based predictive control for thermal comfort and energy savings in public buildings. *Energy Build.* **2012**, *55*, 238–251. [[CrossRef](#)]
6. Álvarez, J.D.; Redondo, J.L.; Camponogara, E.; Normey-Rico, J.; Berenguel, M.; Ortigosa, P.M. Optimizing building comfort temperature regulation via model predictive control. *Energy Build.* **2013**, *57*, 361–372. [[CrossRef](#)]
7. Zhao, Y.; Genovese, P.V.; Li, Z. Intelligent thermal comfort controlling system for buildings based on IoT and AI. *Future Internet* **2020**, *12*, 30. [[CrossRef](#)]
8. Li, X.; Wen, J. Review of building energy modeling for control and operation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *37*, 517–537. [[CrossRef](#)]
9. Ciulla, G.; D'Amico, A. Building energy performance forecasting: A multiple linear regression approach. *Appl. Energy* **2019**, *253*, 113500. [[CrossRef](#)]
10. Amasyali, K.; El-Gohary, N.M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *81*, 1192–1205. [[CrossRef](#)]
11. Jain, R.K.; Damoulas, T.; Kontokosta, C.E. Towards data-driven energy consumption of multi-family residential buildings: Feature selection via The Lasso. *Comput. Civ. Build Eng.* **2016**, 1675–1682. [[CrossRef](#)]
12. Ferracuti, F.; Fonti, A.; Ciabattini, L.; Pizzuti, S.; Arteconi, A.; Helsén, L.; Comodi, G. Data-driven models for short-term thermal behaviour prediction in real buildings. *Appl. Energy* **2017**, *204*, 1375–1387. [[CrossRef](#)]
13. Liu, Z.; Wu, D.; Liu, Y.; Han, Z.; Lun, L.; Gao, J.; Jin, G.; Cao, G. Accuracy analyses and model comparison of machine learning adopted in building energy consumption prediction. *Energy Explor. Exploit.* **2019**, *37*, 1426–1451. [[CrossRef](#)]
14. Wei, Y.; Zhang, X.; Shi, Y.; Xia, L.; Pan, S.; Wu, J.; Han, M.; Zhao, X. A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *82*, 1027–1047. [[CrossRef](#)]
15. Bourdeau, M.; Qiang Zhai, X.; Nefzaoui, E.; Guo, X.; Chatellier, P. Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques. *Sustain. Cities Soc.* **2019**, *48*, 101533. [[CrossRef](#)]
16. Ahmad, M.W.; Reynolds, J.; Rezugui, Y. Predictive modelling for solar thermal energy systems: A comparison of support vector regression, random forest, extra trees and regression trees. *J. Clean. Prod.* **2018**, *203*, 810–821. [[CrossRef](#)]
17. Berthou, T.; Stabat, P.; Salvazet, R.; Marchio, D. Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings. *Energy Build.* **2014**, *74*, 91–100. [[CrossRef](#)]
18. Mahesh, B. Machine learning algorithms—A review. *Int. J. Sci. Res.* **2018**, *9*, 381–386. [[CrossRef](#)]
19. Jordan, M.I.; Mitchell, T.M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science* **2015**, *349*, 255–260. [[CrossRef](#)]
20. Mba, L.; Meukam, P.; Kemajou, A. Application of artificial neural network for predicting hourly indoor air temperature and relative humidity in modern building in humid region. *Energy Build.* **2016**, *121*, 32–42. [[CrossRef](#)]
21. Qi, C.; Wang, W.; Wang, S. Application of indoor temperature prediction based on SVM and BPNN. In Proceedings of the 27th Chinese Control and Decision Conference CCDC 2015, Qingdao, China, 23–25 May 2015; pp. 2883–2887. [[CrossRef](#)]
22. Chammas, M.; Makhoul, A.; Demerjian, J. An efficient data model for energy prediction using wireless sensors. *Comput. Electr. Eng.* **2019**, *76*, 249–257. [[CrossRef](#)]
23. Cotrufo, N.; Saloux, E.; Hardy, J.M.; Candanedo, J.; Platon, R. A practical artificial intelligence-based approach for predictive control in commercial and institutional buildings. *Energy Build.* **2020**, *206*, 109563. [[CrossRef](#)]
24. Moon, J.W. Comparative performance analysis of the artificial-intelligence-based thermal control algorithms for the double-skin building. *Appl. Therm. Eng.* **2015**, *91*, 334–344. [[CrossRef](#)]
25. Sholahudin, S.; Hwataik, H. Simplified Dynamic Neural Network Model to Predict Heating Load of a Building Using Taguchi Method. *Energy* **2016**, *115*, 1672–1678. [[CrossRef](#)]
26. Li, Q.; Meng, Q.; Cai, J.; Yoshino, H.; Mochida, A. Predicting hourly cooling load in the building: A comparison of support vector machine and different artificial neural networks. *Energy Convers. Manag.* **2009**, *50*, 90–96. [[CrossRef](#)]
27. Li, Q.; Meng, Q.; Cai, J.; Yoshino, H.; Mochida, A. Applying support vector machine to predict hourly cooling load in the building. *Appl. Energy* **2009**, *86*, 2249–2256. [[CrossRef](#)]
28. Paterakis, N.G.; Mocanu, E.; Gibescu, M.; Stappers, B.; Van Alst, W. Deep learning versus traditional machine learning methods for aggregated energy demand prediction. In Proceedings of the 2017 IEEE PES Innovation Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Turin, Italy, 26–29 September 2017; pp. 1–6. [[CrossRef](#)]
29. Yu, Z.; Haghghat, F.; Fung, B.C.M.; Yoshino, H. A decision tree method for building energy demand modeling. *Energy Build.* **2010**, *42*, 1637–1646. [[CrossRef](#)]
30. Wang, Z.; Wang, Y.; Zeng, R.; Srinivasan, R.S.; Ahrentzen, S. Random Forest based hourly building energy prediction. *Energy Build.* **2018**, *171*, 11–25. [[CrossRef](#)]
31. Özbalta, T.G.; Sezer, A.; Yildiz, Y. Models for prediction of daily mean indoor temperature and relative humidity: Education building in Izmir, Turkey. *Indoor Built Environ.* **2012**, *21*, 772–781. [[CrossRef](#)]
32. Afroz, Z.; Shafiullah, G.; Urmee, T.; Higgins, G. Prediction of Indoor Temperature in an Institutional Building. *Energy Procedia* **2017**, *142*, 21860–21866. [[CrossRef](#)]
33. Potočník, P.; Vidrih, B.; Kitanovski, A.; Govekar, E. Neural network, ARX, and extreme learning machine models for the short-term prediction of temperature in buildings. *Build. Simul.* **2019**, *12*, 1077–1093. [[CrossRef](#)]

34. Mateo, F.; Carrasco, J.J.; Sellami, A.; Millan-Giraldo, M.; Dominguez, M.; Soria-Olivas, E. Machine learning methods to forecast temperature in buildings. *Expert Syst. Appl.* **2013**, *40*, 1061–1068. [[CrossRef](#)]
35. Paul, D.; Chakraborty, T.; Datta, S.K.; Paul, D. IoT and machine learning based prediction of smart building indoor temperature. In Proceedings of the 2018 4th International Conference on Computer and Information Sciences ICCOINS, Kuala Lumpur, Malaysia, 13–14 August 2018. [[CrossRef](#)]
36. Aguilera, J.J.; Andersen, R.K.; Toftum, J. Prediction of indoor air temperature using weather data and simple building descriptors. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 4349. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Fouquier, A.; Robert, S.; Suard, F.; Stéphan, L.; Jay, A. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, *23*, 272–288. [[CrossRef](#)]
38. Brastein, O.M.; Sharma, R.; Skeie, N.-O. Sensor placement and parameter identifiability in grey-box models of building thermal behaviour. In Proceedings of the 60th SIMS Conference on Simulation and Modelling SIMS 2019, Västerås, Sweden, 12–16 August 2019; Volume 170, pp. 51–58. [[CrossRef](#)]
39. Oguniola, O.T.; Song, L.; Wang, G. Development and validation of a time-series model for real-time thermal load estimation. *Energy Build.* **2014**, *76*, 440–449. [[CrossRef](#)]
40. Hong, D.; Ortiz, J.; Whitehouse, K.; Culler, D. Towards automatic spatial verification of sensor placement in buildings. In Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings, BuildSys 2013, Roma, Italy, 11–15 November 2013. [[CrossRef](#)]
41. Yanti, R.J.; Faridah; Mustika, I.W.; Ariananda, D.D.; Utami, S.S. Analysis of Gaussian process to predict thermal sensor placement for controlling energy consumption on the educational building. *AIP Conf. Proc.* **2020**, *2223*, 50006. [[CrossRef](#)]
42. Borggaard, J.; Burns, J.; Zietsman, L. On using LQG performance metrics for sensor placement. In Proceedings of the 2011 American Control Conference, San Francisco, CA, USA, 29 June–1 July 2011; pp. 2381–2386. [[CrossRef](#)]
43. Campana, J.P.; Schuss, M.; Mahdavi, A.; Morini, G.L. Effects of the room temperature sensor position and radiator sizing on indoor thermal comfort and energy performances. *E3S Web Conf.* **2019**, *111*. [[CrossRef](#)]
44. Borier, O.M.; Kazanci, O.B.; Olesen, B.W.; Khovalyg, D. Which sensor type at which location should offices with south orientated window choose to improve comfort and reduce energy consumption? *J. Phys. Conf. Ser.* **2019**, *1343*. [[CrossRef](#)]
45. May Tzuc, O.; Livas-García, A.; Jiménez Torres, M.; Cruz May, E.; López-Manrique, L.M.; Bassam, A. Artificial Intelligence Techniques for Modeling Indoor Building Temperature under Tropical Climate Using Outdoor Environmental Monitoring. *J. Energy Eng.* **2020**, *146*. [[CrossRef](#)]
46. Fan, C.; Xiao, F.; Wang, S. Development of prediction models for next-day building energy consumption and peak power demand using data mining techniques. *Appl. Energy* **2014**, *127*, 1–10. [[CrossRef](#)]
47. Luo, M.; Xie, J.; Yan, Y.; Ke, Z.; Yu, P.; Wang, Z.; Zhang, J. Comparing machine learning algorithms in predicting thermal sensation using ASHRAE Comfort Database II. *Energy Build.* **2020**, *210*, 109776. [[CrossRef](#)]
48. Papadopoulos, S.; Azar, E.; Woon, W.L.; Kontokosta, C.E. Evaluation of tree-based ensemble learning algorithms for building energy performance estimation. *J. Build. Perform. Simul.* **2018**, *11*, 322–332. [[CrossRef](#)]
49. Ahmad, M.W.; Mourshed, M.; Rezgui, Y. Trees vs Neurons: Comparison between random forest and ANN for high-resolution prediction of building energy consumption. *Energy Build.* **2017**, *147*, 77–89. [[CrossRef](#)]
50. Wang, R.; Lu, S.; Li, Q. Multi-criteria comprehensive study on predictive algorithm of hourly heating energy consumption for residential buildings. *Sustain. Cities Soc.* **2019**, *49*, 101623. [[CrossRef](#)]
51. Attoue, N.; Shahrour, I.; Younes, R. Smart building: Use of the artificial neural network approach for indoor temperature forecasting. *Energies* **2018**, *11*, 395. [[CrossRef](#)]
52. Chan, S.Y.; Chau, C.K. Development of artificial neural network models for predicting thermal comfort evaluation in urban parks in summer and winter. *Build. Environ.* **2019**, *164*, 106364. [[CrossRef](#)]
53. Deng, Z.; Chen, Q. Artificial neural network models using thermal sensations and occupants' behavior for predicting thermal comfort. *Energy Build.* **2018**, *174*, 587–602. [[CrossRef](#)]
54. Mottahedi, M.; Mohammadpour, A.; Amiri, S.S.; Riley, D.; Asadi, S. Multi-linear Regression Models to Predict the Annual Energy Consumption of an Office Building with Different Shapes. *Procedia Eng.* **2015**, *118*, 622–629. [[CrossRef](#)]
55. Capozzoli, A.; Grassi, D.; Causone, F. Estimation models of heating energy consumption in schools for local authorities planning. *Energy Build.* **2015**, *105*, 302–313. [[CrossRef](#)]
56. Attanasio, A.; Piscitelli, M.S.; Chiusano, S.; Capozzoli, A.; Cerquitelli, T. Towards an automated, fast and interpretable estimation model of heating energy demand: A data-driven approach exploiting building energy certificates. *Energies* **2019**, *12*, 1273. [[CrossRef](#)]
57. Ahmad, M.W.; Mouraud, A.; Rezgui, Y.; Mourshed, M. Deep highway networks and tree-based ensemble for predicting short-term building energy consumption. *Energies* **2018**, *11*, 3408. [[CrossRef](#)]
58. Farhan, A.A.; Pattipati, K.; Wang, B.; Luh, P. Predicting individual thermal comfort using machine learning algorithms. In Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Gothenburg, Sweden, 24–28 August 2015; pp. 708–713. [[CrossRef](#)]
59. Liu, S.; Schiavon, S.; Das, H.P.; Jin, M.; Spanos, C.J. Personal thermal comfort models with wearable sensors. *Build. Environ.* **2019**, *162*, 106281. [[CrossRef](#)]

60. Touzani, S.; Granderson, J.; Fernandes, S. Gradient boosting machine for modeling the energy consumption of commercial buildings. *Energy Build.* **2018**, *158*, 1533–1543. [[CrossRef](#)]
61. Seyedzadeh, S.; Pour Rahimian, F.; Rastogi, P.; Glesk, I. Tuning machine learning models for prediction of building energy loads. *Sustain. Cities Soc.* **2019**, *47*, 101484. [[CrossRef](#)]
62. Chakraborty, D.; Elzarka, H. Advanced machine learning techniques for building performance simulation: A comparative analysis. *J. Build. Perform. Simul.* **2019**, *12*, 193–207. [[CrossRef](#)]
63. Chakraborty, D.; Elzarka, H. Early detection of faults in HVAC systems using an XGBoost model with a dynamic threshold. *Energy Build.* **2019**, *185*, 326–344. [[CrossRef](#)]
64. Chaudhuri, T.; Soh, Y.C.; Li, H.; Xie, L. A feedforward neural network based indoor-climate control framework for thermal comfort and energy saving in buildings. *Appl. Energy* **2019**, *248*, 44–53. [[CrossRef](#)]
65. Alawadi, S.; Mera, D.; Fernández-Delgado, M.; Alkhabbas, F.; Olsson, C.M.; Davidsson, P. A comparison of machine learning algorithms for forecasting indoor temperature in smart buildings. *Energy Syst.* **2020**, 1–17. [[CrossRef](#)]
66. Attoue, N.; Shahrou, I.; Mroueh, H.; Younes, R. Determination of the optimal order of grey-box models for short-time prediction of buildings' thermal behavior. *Buildings* **2019**, *9*, 198. [[CrossRef](#)]
67. Sarabi, S.; Ploix, S.; Le, M.H.; Dang, H.A.; Wurtz, F. Assessing the relevance of reduced order models for building envelop. In Proceedings of the BS 2013 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 26–28 August 2013; pp. 3538–3545.
68. Ha, D.L.; Ploix, S.; Zamai, E.; Jacomino, M. Realtimes dynamic optimization for demand-side load management. *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.* **2008**, *3*, 243–252. [[CrossRef](#)]
69. Candanedo, J.A.; Dehkordi, V.R.; Lopez, P. A control-oriented simplified building modelling strategy. In Proceedings of the BS 2013 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 26–28 August 2013; pp. 3682–3689.
70. Fumo, N.; Rafe Biswas, M.A. Regression analysis for prediction of residential energy consumption. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *47*, 332–343. [[CrossRef](#)]
71. Xu, M.; Watanachaturaporn, P.; Varshney, P.K.; Arora, M.K. Decision tree regression for soft classification of remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* **2005**, *97*, 322–336. [[CrossRef](#)]
72. Wang, Z.; Chen, Y.; Li, Y. Development of RC model for thermal dynamic analysis of buildings through model structure simplification. *Energy Build.* **2019**, *195*, 51–67. [[CrossRef](#)]
73. Belić, F.; Hocenski, Ž.; Slišković, D. Thermal modeling of buildings with RC method and parameter estimation. In Proceedings of the International Conference on Smart Systems and Technologies SST, Osijek, Croatia, 12–14 October 2016; pp. 19–25. [[CrossRef](#)]
74. Steindl, G.; Kastner, W.; Stangl, V. Comparison of data-driven thermal building models for model predictive control. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.* **2019**, *7*, 730–742. [[CrossRef](#)]
75. Viot, H.; Sempey, A.; Mora, L.; Batsale, J.C.; Malvestio, J. Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building: Part II—Potential of predictive strategy. *Energy Build.* **2018**, *172*, 385–396. [[CrossRef](#)]
76. Tsilingiris, P.T. Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures. *Energy Build.* **2006**, *38*, 1200–1211. [[CrossRef](#)]
77. Attoue, N. *Smart Technology for Building Heating Optimization: Indoor Temperature Forecasting*; Lille University: Lille, France, 2019.
78. Wang, Z.; Chen, Y. Data-driven modeling of building thermal dynamics: Methodology and state of the art. *Energy Build.* **2019**, *203*, 109405. [[CrossRef](#)]