



HAL
open science

Optimisation énergétique dans la rénovation du bâtiment

Souleymane Daniel

► **To cite this version:**

Souleymane Daniel. Optimisation énergétique dans la rénovation du bâtiment. Architecture, aménagement de l'espace. INSA de Lyon, 2023. Français. NNT : 2023ISAL0112 . tel-04689679

HAL Id: tel-04689679

<https://theses.hal.science/tel-04689679v1>

Submitted on 5 Sep 2024

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.



N° d'ordre NNT : 2023ISAL0112

**THESE de DOCTORAT DE L'INSA LYON,
membre de l'Université de Lyon**

**École Doctorale MEGA N°162
(Mécanique Énergétique Génie Civil Acoustique)**

Spécialité/ discipline de doctorat :

Thermique Énergétique

Soutenue publiquement le 08/12/2023, par :
Souleymane DANIEL

**Optimisation énergétique dans la
rénovation du bâtiment**

Devant le jury composé de :

Nom prénom, grade/qualité, établissement/entreprise

Christian INARD, Professeur des Universités, Université de La Rochelle,
Rapporteur

Monika WOLOSZYN, Professeur des Universités, Université de Savoie Mont Blanc,
Rapporteuse

Gislain LIPEME-KOUYI, Professeur des Universités, INSA Lyon, Examineur

Christian GHIAUS, Professeur des Universités, INSA Lyon, Directeur de thèse

Jean-Michel PARIS, Immobilier Rhône-Alpes, Groupe 3F, Invité

Département FEDORA – INSA Lyon Ecoles Doctorales

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
ED 206 CHIMIE	CHIMIE DE LYON https://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr	M. Stéphane DANIELE C2P2-CPE LYON-UMR 5265 Bâtiment F308, BP 2077 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69616 Villeurbanne directeur@edchimie-lyon.fr
ED 341 E2M2	ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	Mme Sandrine CHARLES Université Claude Bernard Lyon 1 UFR Biosciences Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69622 Villeurbanne CEDEX e2m2.codir@listes.univ-lyon1.fr
ED 205 EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ http://ediss.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie RICARD-BLUM Laboratoire ICBMS - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Raulin - 2ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tél : +33(0)4 72 44 82 32 sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr
ED 34 EDML	MATÉRIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Yann DE ORDENANA Tél : 04.72.18.62.44 yann.de-ordenana@ec-lyon.fr	M. Stéphane BENAYOUN Ecole Centrale de Lyon Laboratoire LTDS 36 avenue Guy de Collongue 69134 Ecully CEDEX Tél : 04.72.18.64.37 stephane.benayoun@ec-lyon.fr
ED 160 EEA	ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE https://edeaa.universite-lyon.fr Sec. : Philomène TRECOURT Bâtiment Direction INSA Lyon Tél : 04.72.43.71.70 secretariat.edeaa@insa-lyon.fr	M. Philippe DELACHARTRE INSA LYON Laboratoire CREATIS Bâtiment Blaise Pascal, 7 avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.88.63 philippe.delachartre@insa-lyon.fr
ED 512 INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Hamamache KHEDDOUCI Université Claude Bernard Lyon 1 Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tél : 04.72.44.83.69 direction.infomaths@listes.univ-lyon1.fr
ED 162 MEGA	MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Philomène TRECOURT Tél : 04.72.43.71.70 Bâtiment Direction INSA Lyon mega@insa-lyon.fr	M. Jocelyn BONJOUR INSA Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne CEDEX jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
ED 483 ScSo	ScSo¹ https://edsciencesociales.universite-lyon.fr Sec. : Mélina FAVETON Tél : 04.78.69.77.79 melina.faveton@univ-lyon2.fr	M. Bruno MILLY (INSA : J.Y. TOUSSAINT) Univ. Lyon 2 Campus Berges du Rhône 18, quai Claude Bernard 69365 LYON CEDEX 07 Bureau BEL 319 bruno.milly@univ-lyon2.fr

¹ ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie
Cette thèse est accessible à l'adresse : <https://theses.insa-lyon.fr/publication/2023ISAL0112/these.pdf>
© [S. Daniel], [2023], INSA Lyon, tous droits réservés

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce manuscrit de thèse.

Tout d'abord, je tiens à remercier ma femme Aurélie, qui m'a apporté son soutien et ses encouragements indéfectibles, quel que soit les circonstances, les états d'esprits et les événements que nous avons pu traverser ensemble.

Je tiens ensuite à remercier profondément mon directeur de thèse, Christian GHIAUS, pour sa guidance inestimable, son soutien constant et ses précieux conseils tout au long de ce voyage académique et sans lequel ce manuscrit de thèse n'aurait été.

Je tiens également à remercier chaleureusement Jean-Michel PARIS pour sa contribution inestimable à la réalisation de ce projet ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordé durant ces 3 années de thèse CIFRE.

Je tiens par la suite à remercier Gaël WIEDERKEHR pour sa contribution à la réalisation de ce projet de thèse. Ses réflexions perspicaces et son expertise de chef de projet dans le domaine du logement social ont été d'une aide précieuse tout au long de ce projet.

Je tiens aussi à remercier particulièrement les membres de mon comité de thèse, Dominique DUMORTIER et Gislain LIPEME KOUYI, pour leur expertise, leurs commentaires constructifs et leur disponibilité.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers ma sœur, mon père, et ma mère, dont la foi inébranlable en notre potentiel n'a jamais vacillé, quelles que soient nos imperfections, nos erreurs, ou nos maladresses.

Chacun de vous a apporté une contribution essentielle à la réalisation de ce manuscrit de thèse, et je ressens une profonde gratitude envers vous tous pour votre soutien inestimable. Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans votre précieuse influence, et je vous en suis infiniment reconnaissant.

Sommaire

Remerciements.....	5
Sommaire.....	7
Résumé.....	9
Abstract.....	10
CHAPITRE 1 - CONTEXTE DE LA REHABILITATION ENERGETIQUE DES LOGEMENTS EN FRANCE	11
1.1 Introduction.....	11
1.2 Les enjeux environnementaux du secteur du bâtiment.....	11
1.3 Études typologiques du parc de logements en France.....	13
1.4 Rétrospective de la rénovation énergétique en France	17
1.5 Performances énergétiques et réglementations environnementales.....	21
1.6 Méthodes et outils d'évaluation des performances.....	23
1.7 Problématique des bâtiments fonctionnants à l'énergie électrique.....	26
1.8 Autoconsommation collective : perspectives et problématiques	27
CHAPITRE 2 - ÉTUDES EXPERIMENTALES PREALABLES.....	31
2.1 Objectifs et stratégie d'instrumentation	32
2.2 Appareils de mesure	33
2.3 Mesures brutes et post-traitement.....	37
2.4 Instrumentation de la résidence Le PLATEAU.....	39
2.5 Estimations de productibles électriques photovoltaïques	49
2.6 Potentiels de l'autoconsommation collective	68
2.7 Conclusions	77
CHAPITRE 3 - L'AIDE A LA DECISION MULTICRITERE : ÉTAT DE L'ART ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	79
3.1 Histoire, état de l'art et fondement	79
3.2 Méthode « Agréger-Comparer » ou méthodes d'agrégation.....	84
3.3 Méthode « Comparer-Agréger » ou méthodes de surclassement	86
3.4 Choix d'une méthode d'analyse multicritère	88
3.5 Scénarios, critères et pondérations.....	89
3.6 Conclusion sur la méthodologie proposée	92

CHAPITRE 4 - METHODOLOGIE ET EXEMPLE D'APPLICATION	93
4.1 Cas d'étude, contexte et objectifs.....	94
4.2 Présentation des étapes de la méthodologie.....	97
4.3 Définition des scénarios potentiels de rénovation.....	99
4.4 Définitions et choix des critères d'évaluation.....	102
4.5 Pondération des critères	104
4.6 Méthodologie d'évaluation des performances.....	105
4.7 Algorithme de surclassement ELECTRE Tri	106
4.8 Sensibilité, analyse et recommandations.....	123
4.9 Conclusions	130
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	133
BIBLIOGRAPHIE	137
Annexe 1 – Schémas détaillées d'instrumentations des appartements.....	147
Annexe 2 - Post-traitement des données d'instrumentation.....	149
Annexe 3 - Estimation du productible PV	153
Annexe 4 - Définition des scénarios de rénovation.....	161
Annexe 5 - Définition des critères d'évaluation.....	163
Annexe 6 - Pondération des critères d'évaluation.....	165
Annexe 7 - Protocole pondération méthode SRF (SIMOS REVISEE)	173
Annexe 8 - Estimatif des coûts de fourniture et de pose de différents matériels.....	175

Résumé

Ce travail de thèse s'intéresse à la prise des décisions pour les choix de solutions de rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs. Comme seulement 1 % des nouvelles constructions sont ajoutées au parc immobilier chaque année en France, la rénovation est le levier principal dans la sobriété énergétique. L'objectif de la thèse est d'aider les acteurs de la rénovation énergétique à élaborer une stratégie de rénovation en utilisant une méthode d'aide à la décision adaptée. Le projet de recherche s'appuie sur un cas d'étude concret, une résidence qui comprend trois bâtiments et 67 logements.

Dans un premier temps, une étude expérimentale préliminaire est menée pour mettre en place une instrumentation dans les logements afin de collecter des données sur les comportements énergétiques et les conditions environnementales. Ensuite, une étude sur l'analyse multicritère justifie le choix de la méthode ELECTRE TRI pour aider à choisir les solutions de rénovation les plus appropriées, compte tenu de la complexité du projet. Basé sur ce choix, une méthodologie a été développée pour l'aide à la décision multicritère dans le contexte de la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs et appliquée sur un programme de rénovation d'un bâtiment de 67 appartements. Cette méthodologie comprend la définition de scénarios de rénovation, la pondération des critères, l'évaluation économique des scénarios sur une période de trente ans. Les aspects originaux de la méthodologie sont la définition des familles de scénario, la création d'une matrice de décision pour la rénovation, et la prise en compte des incertitudes grâce à une approche probabiliste.

En résumé, la thèse vise à fournir une méthodologie complète et novatrice pour guider les décisions de rénovation énergétique dans le domaine des bâtiments résidentiels collectifs. Elle utilise des données concrètes, une analyse multicritère avec une famille de critères et une matrice de décision spécifique, ainsi qu'une approche probabiliste pour tenir compte des incertitudes, soulignant ainsi son originalité et son potentiel pour des applications pratiques.

Abstract

This thesis looks at the decision-making process involved in choosing energy-efficient renovation solutions for multi-family residential buildings. As only 1% of new buildings are added to the French housing stock each year, renovation is the main lever for energy efficiency. The aim of this thesis is to help those involved in energy renovation to develop a renovation strategy, using an appropriate decision-support method. The research project is based on a concrete case study, a residence comprising three buildings and 67 dwellings.

First, a preliminary experimental study is carried out to set up instrumentation in the dwellings to collect data on energy behaviour and environmental conditions. Next, a multi-criteria analysis study justifies the choice of the ELECTRE TRI method to help select the most appropriate renovation solutions, given the complexity of the project. Based on this choice, a methodology has been developed for multi-criteria decision support in the context of energy renovation of collective residential buildings and applied to a renovation program for a building with 67 apartments. The methodology includes the definition of renovation scenarios, the weighting of criteria, and the economic evaluation of the scenarios over a thirty-year period. The original aspects of the methodology are the definition of scenario families, the creation of a renovation decision matrix, and the considering of uncertainties thanks to a probabilistic approach.

In summary, the thesis aims to provide a comprehensive and innovative methodology to guide energy retrofit decisions in the field of multi-family residential buildings. It uses concrete data, a multi-criteria analysis with a family of criteria and a specific decision matrix, as well as a probabilistic approach to account for uncertainties, thus underlining its originality and potential for practical applications.

CHAPITRE 1 - CONTEXTE DE LA REHABILITATION ENERGETIQUE DES LOGEMENTS EN FRANCE

1.1 Introduction

Le secteur du bâtiment, responsable de plus de 36 % des émissions des gaz à effet de serre, doit s'adapter aux enjeux environnementaux. La transition énergétique, au-delà de ses avantages environnementaux, doit aussi promouvoir le progrès social (Ministère de la Transition Ecologique, 2021). En France, la rénovation énergétique des logements existants, en particulier des bâtiments collectifs, est cruciale pour atteindre les objectifs nationaux visant la réduction des émissions des gaz à effet de serre (Ministère de la Transition Ecologique, 2022). Cette thèse se penche sur cette problématique en élaborant une méthodologie d'aide à la décision basée sur l'analyse multicritère, testée sur un cas d'étude concret. Cette méthodologie vise à guider les acteurs de la rénovation énergétique en intégrant des critères environnementaux, sociaux et économiques.

1.2 Les enjeux environnementaux du secteur du bâtiment

En 2016, les émissions mondiales de CO₂ s'élevaient à 353 631 Méga tonnes, une augmentation de près de 59 % par rapport à 1990 (INSEE, 2019). Responsable de plus de 36 % de ces émissions, le secteur du bâtiment doit subir une profonde mutation pour s'adapter aux enjeux environnementaux contemporains. Ces enjeux, lourdement rappelés à l'occasion des derniers rapports spéciaux du GIEC, alertent sur l'extrême urgence à contenir le réchauffement planétaire et ses conséquences par une diminution drastique des émissions de dioxyde de carbone (MTECT, 2022).

Au regard de ce bilan alarmant, la transition énergétique est une clé dans la maîtrise des émissions de CO₂ et des consommations d'énergie. Au-delà de la dimension environnementale, cette transition énergétique doit permettre un progrès de l'ordre social par la lutte contre la précarité, le gain de confort et le soulagement des factures énergétiques.

En France, chaque année, les constructions neuves ne représentent que 1 % du parc immobilier. Alors, pour atteindre l'objectif que se fixe la France de disposer d'ici 2050 d'un parc de logement atteignant entièrement le niveau bâtiment basse consommation (BBC) (MTESa, 2020), la rénovation énergétique des logements est le principal levier d'action. La rénovation énergétique des logements est un processus complexe impliquant de nombreux acteurs, des objectifs variés, parfois dissonants mêlant intérêts environnementaux, sociaux et économiques qu'il est souvent difficile à concilier.

Le travail de recherche effectué dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans ce contexte et a pour dessein d'accompagner les acteurs de la rénovation énergétique dans l'élaboration d'une stratégie de rénovation par le biais d'un processus d'aide à la décision adapté. Les travaux s'appuient sur un cas d'étude réel, la résidence du Plateau à Villefontaine : un

ensemble de trois bâtiments, regroupant 67 logements. Cette résidence fait l'objet d'un plan de rénovation énergétique enclenché par le bailleur social Immobilière Rhône-Alpes. Elle est également au cœur du projet de recherche InER : *Innovation Énergétique dans la Rénovation*, visant à optimiser les choix en matière de rénovation énergétique sur des bâtiments tout électrique grâce à des méthodes d'analyse multicritère et de permettre l'autoconsommation collective. Le projet InER a été le lauréat des fonds d'innovation ALINOV du groupe Action Logement. Au cours des deux ans (2019-2020), des phases d'études, de diagnostics et d'instrumentation ont été réalisées dans le cadre du projet InER visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments chauffés à l'électricité tout en respectant les contraintes budgétaires et environnementales. Initialement, 13 scénarios différents impliquant diverses solutions techniques ont été envisagés. La première étape consistait à établir des critères modélisés pour garantir un processus décisionnel fiable. Cette démarche a conduit à la création de simulations mathématiques basées sur des considérations économiques, techniques, sociales et environnementales. C'est le sujet de cette thèse. À la suite de cette analyse multicritère, le scénario optimal a été identifié : il préconise le maintien de la source de chauffage électrique, la rénovation avec des matériaux spécifiques pour améliorer l'isolation thermique, le choix d'équipements techniques spécifiques, ainsi que l'intégration d'une production d'énergie locale, notamment photovoltaïque, pour l'autoconsommation.

Les équipes de recherche ont choisi deux résidences, à savoir la résidence du Plateau à Villefontaine (38) avec 67 logements équipés de planchers chauffants électriques et la résidence du Maréchal Juin à Rive-de-Gier (42) avec 53 logements chauffés par des accumulateurs électriques bi-jonction et des convecteurs d'appoint, comme sites d'étude et d'expérimentation. Les travaux ont commencé fin 2021, après l'achèvement d'un algorithme permettant d'optimiser la production et la consommation d'eau chaude individuelle, ainsi que la gestion du stockage d'énergie.

Ce projet vise à maîtriser les coûts d'investissement, à optimiser les coûts d'utilisation, à améliorer le confort des résidents, tout en réduisant la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Les modèles et les recherches réalisés dans le cadre du projet InER s'annoncent prometteurs pour les futures rénovations du patrimoine immobilier (3F Immobilier Rhône-Alpes, 2022).

Un volet du projet InER a été le développement d'une méthodologie d'aide à la décision par analyse multicritère, adaptée à la rénovation énergétique des bâtiments et expérimentée sur le cas d'étude de Villefontaine. L'étude sur la méthodologie de choix multicritère des solutions de rénovation s'appuie dans un premier temps sur une bibliographie riche permettant de positionner ce travail par rapport à l'état de l'art, et sur le développement détaillé de la méthode d'analyse multicritère retenue. Dans une seconde partie, plusieurs verrous techniques seront à lever par la mise en place de processus nouveaux dans l'objectif d'aboutir à la matrice de décision qui permettra alors d'appliquer la méthode d'aide à la décision retenue. Enfin, un guide destiné aux acteurs de la rénovation énergétique souhaitant

mettre en place une méthode d'aide à la décision a été développé dans le cadre de ce projet de recherche.

Le projet InER, détenteur de nombreuses informations relatives aux bâtiments existants et scénarios de rénovation, a permis de nourrir ce travail et d'alimenter avec des données réelles les algorithmes d'aide à la décision issus du projet de recherche. La méthodologie développée pour ce cas d'étude a pour vocation d'être transposable à tout autre projet de rénovation énergétique en bâtiment d'habitation collectif.

L'approche usuelle pour les rénovations énergétiques des bâtiments consiste à limiter les déperditions énergétiques des ouvrages et, ensuite, améliorer les performances énergétiques des équipements.

Dans un premier temps, la limitation des déperditions est obtenue par l'isolation de l'enveloppe des bâtiments : isolation des façades, remplacement des menuiseries extérieures (fenêtres, portes-fenêtres, portes d'entrée...) par des menuiseries moins déperditives. L'amélioration de l'étanchéité du bâtiment participe de cette limitation des déperditions. Le traitement des déperditions permet de diminuer les besoins énergétiques des bâtiments. Les équipements peuvent ainsi être calibrés sur ces nouveaux besoins diminués (ADEME, 2020).

L'amélioration des performances énergétiques des équipements consiste à recourir à des équipements, pour l'essentiel de production et de diffusion de la chaleur mais également de ventilation, performants. C'est-à-dire que l'on recherche à mettre en œuvre des équipements qui consommeront le moins d'énergie pour un confort à minimum équivalent et souvent amélioré (ADEME, 2020).

1.3 Études typologiques du parc de logements en France

Le parc de logements en France peut être typologisé de différentes manières en fonction de critères tels que l'ancienneté, la taille, la localisation, le type de propriété, etc. Voici quelques exemples de typologies couramment utilisées (INSEE, 2021) :

- Typologie par âge du logement : Cette typologie consiste à classer les logements en fonction de leur année de construction ou de leur ancienneté. Elle peut être subdivisée en plusieurs catégories, telles que les logements neufs, les logements récents, les logements anciens, les logements de caractère, etc.
- Typologie par taille du logement : Cette typologie consiste à classer les logements en fonction de leur taille, en termes de nombre de pièces ou de mètres carrés. On peut ainsi distinguer les studios, les T1, T2, T3, etc., ainsi que les logements de grandes tailles, tels que les maisons individuelles ou les appartements de standing.
- Typologie par localisation : Cette typologie consiste à classer les logements en fonction de leur emplacement géographique, en distinguant les logements situés en centre-ville, en périphérie, en zone rurale, etc.
- Typologie par type de propriété : Cette typologie consiste à classer les logements en fonction de leur statut de propriété, en distinguant les logements locatifs, les

logements en copropriété, les logements sociaux, les logements en accession à la propriété, etc.

Selon les données les plus récentes de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) datant de 2019, le parc de logements en France est constitué de plus de 35,7 millions de logements. La répartition des logements en France est la suivante (INSEE, 2021):

- Les maisons individuelles représentent 56,7 % des logements en France.
- Les appartements représentent 42,6 % des logements en France.
- Les autres types de logements (résidences mobiles, logements-foyers, etc.) représentent 0,7% des logements en France.

La répartition des logements selon le type de propriété est la suivante (MTECTa, 2022) :

- Les propriétaires occupants représentent 58,9% des ménages.
- Les locataires du secteur privé représentent 23,2% des ménages.
- Les locataires du secteur public représentent 17,9% des ménages.

La répartition des logements en fonction de leur localisation est la suivante (MTECTa, 2022) :

- Les logements en zone urbaine représentent 80,2% des logements en France.
- Les logements en zone rurale représentent 19,8% des logements en France.

Ces chiffres peuvent varier selon les sources et les méthodes de calcul utilisées, mais ils donnent une idée générale de la répartition des logements en France.

Le logement social en France est organisé autour de plusieurs acteurs et institutions, qui ont des rôles et des missions spécifiques. Les principaux acteurs et institutions qui interviennent dans le domaine du logement social en France sont :

- Les bailleurs sociaux : ce sont des organismes publics ou privés qui construisent, gèrent et entretiennent des logements sociaux. Les principaux bailleurs sociaux sont les Offices Publics de l'Habitat (OPH), les Sociétés Anonymes de HLM (SA HLM) et les Sociétés Coopératives d'HLM (SC HLM).
- Les locataires : ce sont les personnes qui occupent les logements sociaux. Ils bénéficient d'un loyer modéré, fixé en fonction de leurs revenus et de leur situation familiale.
- L'État : il est responsable de la politique du logement social en France. Il fixe les objectifs de construction de logements sociaux, définit les critères d'attribution des logements et assure le financement de la politique du logement social.
- Les collectivités territoriales : elles sont associées à la mise en œuvre de la politique du logement social. Elles peuvent financer la construction de logements sociaux, définir des objectifs de construction en fonction des besoins locaux, et participer à l'attribution des logements.
- Les organismes financiers : ils peuvent participer au financement de la construction de logements sociaux, en accordant des prêts aux bailleurs sociaux ou en investissant dans des opérations de construction.

- Les associations et les acteurs de la société civile : ils peuvent intervenir dans le domaine du logement social, en accompagnant les locataires dans leurs démarches, en proposant des solutions alternatives de logement (comme la colocation), ou en plaidant pour une politique du logement plus juste et plus solidaire.

L'ensemble de ces acteurs et institutions contribuent à l'organisation du logement social en France, qui est un dispositif complexe et diversifié, visant à répondre aux besoins en logement des populations les plus fragiles.

Le logement social en France présente de enjeux clés, qui sont au cœur de nombreuses préoccupations politiques et sociales.

Le principal enjeu que l'on peut citer est bien sur la lutte contre la précarité et la pauvreté. Un Français sur deux vit ou a vécu dans une habitation à loyer modérée (Cosse, 2022). Le logement social est en effet destiné à offrir un logement décent et abordable aux personnes en difficulté financière. Il contribue ainsi à lutter contre la précarité et la pauvreté, en permettant aux personnes les plus fragiles de bénéficier d'un logement digne et adapté à leurs besoins.

Il doit également permettre de favoriser la mixité sociale et territoriale en évitant la concentration des populations les plus fragiles dans certains quartiers. Pour cela, il est nécessaire de répartir les logements sociaux de manière équilibrée sur l'ensemble du territoire, et d'encourager la construction de logements sociaux dans des quartiers résidentiels.

Bien que 85 % des locataires du parc social sont satisfaits de leur logement, l'amélioration du parc et de la qualité des logements sociaux est également un sujet très important en France et sur lequel il y a beaucoup de critiques (Escudié, 2020). Il est donc important de poursuivre les efforts pour améliorer la qualité des logements sociaux, en garantissant notamment des normes de confort et de sécurité suffisantes et adaptés (Escudié, 2020).

La demande en logement social est également très importante en France et source de tensions et de disparité. De nombreux ménages sont en attente d'un logement social, notamment dans les secteurs urbanisés où l'offre d'emploi est plus abondante. Il est donc crucial d'encourager la construction de nouveaux logements sociaux, en mobilisant les financements nécessaires et en simplifiant les procédures administratives.

En France, le logement social est un pilier du modèle social français, qui repose sur l'idée que chaque citoyen doit avoir accès à un logement décent et abordable (Hoorens, 2022). Il est donc important de préserver ce modèle, en garantissant un financement pérenne du logement social et en évitant toute remise en cause des droits des locataires.

Selon le Bilan énergétique de la France pour l'année 2020, la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel en France s'élève à 873 TWh (térawattheures). Cela représente alors 44,3 % de la consommation d'énergie finale totale du pays (V. Andrieux, et al., 2020).

Plus précisément, la répartition de la consommation d'énergie par usage dans le secteur résidentiel en France en 2018 était la suivante (Boutchenik, 2022) :

- chauffage : 66 %
- électricité spécifique : 17 %
- eau chaude sanitaire : 11 %
- cuisson : 6 %
- climatisation : 0,2 %

Il est à noter que la consommation d'énergie du secteur résidentiel a diminué de 3,5 % en 2020 par rapport à l'année 2019, principalement en raison de la crise sanitaire qui a entraîné une baisse de l'activité économique et une diminution des déplacements. Cependant, la rénovation énergétique des logements reste un enjeu majeur pour réduire la consommation d'énergie du secteur résidentiel et atteindre les objectifs de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (MTES, 2022).

En 2018, 78% du parc des résidences principales en France métropolitaine est chauffé au gaz naturel et à l'électricité. 13% de ce même parc est chauffés par des dérivés du pétrole (fioul domestique, gaz de pétrole liquide), 4% par le chauffage urbain et que 5% est chauffés par une énergie alternative (bois, charbon) (Figure 2).

Les différentes énergies de chauffage ne sont pas mobilisées dans les mêmes proportions en appartement et en maison. 52 % des bâtiments d'habitation collectif utilisent le gaz naturel, 33 % l'électricité et 10 % emploient du chauffage urbain. Le reste utilise les dérivés du pétrole. Parmi les maisons individuelles, 40 % utilisent l'électricité, 32 % le gaz naturel, 20 % les dérivés pétroliers et 7 % le bois chauffe.

Par ailleurs, selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le secteur du bâtiment est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre en France, dont une grande partie provient des logements (ADEME, 2018). Il est donc essentiel de réduire la consommation d'énergie dans le secteur du logement afin de lutter efficacement contre le changement climatique.

D'un autre côté, l'environnement extérieur est impacté par la construction et la déconstruction des bâtiments. Par exemple, l'utilisation de matériaux de construction polluants peut avoir des effets néfastes sur la qualité de l'air, des sols et des eaux. Le recyclage et la gestion des déchets liés au bâtiment sont également des enjeux majeurs. Aujourd'hui on constate par ailleurs que des filières de recyclage, de valorisation et de réutilisation des matériaux de construction se mettent doucement en place. Des solutions sont mises en œuvre dans de nombreux pays, notamment en France, où les politiques

publiques encouragent fortement le recyclage des matériaux de construction. Il est important de sensibiliser les professionnels du bâtiment à ces solutions pour favoriser leur adoption et réduire l'impact environnemental du secteur (MEET, 2023).

Les enjeux énergétiques et environnementaux liés aux bâtiments et aux logements en France sont donc considérables et le potentiel gisement d'économie d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet est très important.

La rénovation énergétique des bâtiments existants est un des premiers leviers pour réduire considérablement la consommation d'énergie et l'empreinte carbone du secteur en améliorant la performance énergétique par un renforcement de l'isolation, le remplacement des équipements obsolètes par des équipements plus efficaces et en intégrant des énergies renouvelables. Le plan de rénovation énergétique des bâtiments (PREB) lancé par le gouvernement français en 2018 vise en l'occurrence à rénover 500 000 logements par an d'ici 2022 et apporte de nombreuses solutions de subventions et d'aide financière en ce sens (MTECT, 2021).

Un des autres leviers est la construction de bâtiments neufs à basse consommation d'énergie qui doivent être construits avec des normes de performance énergétique élevées, telles que la norme RT2012 en vigueur en France depuis 2012, ou la norme RE2020 applicable depuis le 1er janvier 2022 pour les bâtiments à usage d'habitation. Ces normes encouragent l'utilisation de matériaux et de techniques de construction durables et la production d'énergies renouvelables sur place (MTECT, 2023).

1.4 Rétrospective de la rénovation énergétique en France

La rénovation énergétique est un domaine où la réglementation évolue constamment, au grès des gouvernements successifs et de l'intégration toujours plus forte des questions climatiques. Précipitée par les deux chocs pétroliers, elle s'attaquait en vérité à une question fondamentale : la dépendance de notre modèle économique à l'énergie. Depuis, elle n'a cessé de prendre de l'ampleur en s'ouvrant d'une part à d'autres secteurs que le logement, et d'autre part en élargissant progressivement ses objectifs.

L'effondrement du dollar américain en 1973 et la guerre naissante au Moyen-Orient provoquent un séisme sans précédent dans la jeune histoire de l'énergie : le premier choc pétrolier. On découvre que l'énergie peut devenir rare et donc chère. En découle une série de contremesures qui aboutissent en France à la création de l'Agence pour les économies d'énergie (AEE). Son objectif premier : réduire le besoin en pétrole dans les différents secteurs (industrie, transport, habitat, etc.), en s'attaquant à l'optimisation des consommations (ADEME, 2022). La première réglementation thermique voit alors le jour au milieu des années soixante-dix. Elle établit de nouvelles normes d'isolation thermique et de réglage des appareils de chauffage dans les habitations. Le second choc pétrolier entraîne lui une réaction différente, davantage centrée sur une production d'énergie décarbonée et

notamment renouvelable, avec en chef d'orchestre le tout nouveau Commissariat à l'Énergie Solaire (COMES) (Archives Nationales, 2001). La fusion de ces deux agences va donner naissance à l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie (AFME), chargée de mettre en œuvre un programme de réduction de la consommation d'énergie, principalement dans le secteur de l'industrie, et qui deviendra quelques années plus tard l'ADEME que nous connaissons aujourd'hui (ADEME, 2022). Viennent alors les premières réflexions sur les questions liées à la rénovation du bâtiment. Ces mesures d'incitation pécuniaires sont, dans un premier temps, destinées aux propriétaires de logements résidentiels et bâtiments tertiaires mais peuvent également prendre la forme d'un accompagnement aux travaux de rénovation.

Une première réponse intervient en 2005 avec la loi POPE (Legi France, 2005), et l'introduction d'un dispositif singulier dans le paysage alors modeste des aides à la rénovation : les Certificats d'Économies d'Énergie (CEE). Les CEE visent à inciter les vendeurs d'énergie à financer des travaux d'économies d'énergie chez le consommateur, qu'il soit un particulier, une entreprise ou un acteur public, sous contrôle des services de l'État. C'est une application détournée du principe du « pollueur payeur ». Le volume d'économies d'énergie que doivent financer les énergéticiens dits « obligés » dépend de leur volume de vente d'énergie, et l'enveloppe globale évoluera de manière exponentielle au fur et mesure des années, jusqu'à devenir en 2021 le 1er levier de financement de la rénovation des logements. Une petite révolution dans le domaine des politiques publiques, avec l'émergence d'un dispositif hybride où l'État fixe les règles et contrôle, et où les acteurs privés financent et mettent en œuvre.

Quelques années après l'instauration de ce dispositif, la rénovation quitte le seul giron des agences gouvernementales pour faire son entrée dans l'organigramme des directions centrales : la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) émerge et dispose dans son portefeuille des politiques de maîtrise de la demande en énergie (MEET, 2023). L'énergie devient une préoccupation environnementale : la DGEC est rattachée au ministère de l'écologie et non plus à Bercy. En parallèle, l'éco-prêt à taux zéro dit « éco-PTZ » est mis en place par la loi finance de 2009 pour pallier le manque d'investissement des banques privées (Service-Public, 2023). Bercy estimait alors à 80 000 le nombre de logements qui pourraient être rénovés grâce à cette aide chaque année. En 2019, moins 40 000 Eco-PTZ ont été mobilisés par les particuliers (moitié moins que ceux mobilisés pour l'accession à la propriété), principalement du fait d'un manque d'attractivité.

L'arrivée des Grenelles met sur le devant de la scène la question des émissions carbone et la lutte contre l'effet de serre. Avec les lois Grenelle I du 3 août 2009 (Legi France, 2009) et Grenelle II du 12 juillet 2010 (Legi France, 2010), la France se dote d'un plan de rénovation orienté vers la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'objectif fixé par ces deux Grenelle de l'environnement est de diviser par 4 ces émissions en 2050 par rapport à 2010, de

n'avoir que des bâtiments neufs à « énergie positive » en 2020 et surtout, de massifier la rénovation énergétique à raison de 500 000 rénovations lourdes par an.

Un plan mis à mal par une crise mondiale qui se déclenche dès 2007. Elle fragilise les banques, les États, mais aussi la situation des ménages et l'immobilier. Les années 2010 marquent donc sans surprise une mobilisation des pouvoirs publics en faveur de la lutte contre la précarité énergétique en France. L'Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (anciennement FNAH et aujourd'hui ANAH), créé en 1945 pour faire face à la crise du logement de l'après-guerre, s'empare de la question émergente de la précarité énergétique dès 2009. Le Grenelle II de l'environnement, dans son article 11, en pose une première définition officielle : « Est en situation de précarité énergétique [...] une personne qui éprouve dans son logement des difficultés particulières à disposer de la fourniture d'énergie nécessaire à la satisfaction de ses besoins élémentaires en raison de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat. ». Le message est clair : sortir de la précarité énergétique passe par la réalisation de travaux de rénovation. Ainsi, le 21 mars 2013 est lancé le Plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH) qui fixe les objectifs annuels attendus en matière de rénovation massive du parc des bâtiments existants, avec en priorité, la lutte contre la précarité énergétique (pour les années 2014 et 2017, 38000 et 50000 logements privés occupés par des personnes en situation de précarité). L'ADEME se charge du volet informatif, afin de simplifier les différentes démarches pour les particuliers, et l'ANAH propose un accompagnement de plus en plus orienté vers les ménages modestes. Par la suite, la loi de finance de 2014 va instaurer la TVA à taux réduit à 5,5% pour les travaux de rénovation énergétique ; à l'image de ce qui est appliqué sur certains produits de première nécessité.

La multiplication des aides complexifie cependant le parcours, qui en plus de se repérer dans les différents dispositifs nationaux et locaux, nécessite également de trouver des professionnels dignes de confiance : c'est pourquoi en 2011 est introduit le label « reconnu garant de l'environnement » (RGE), qui devient bien souvent une condition d'obtention des aides à la rénovation. Ce label, conçu pour filtrer la profession pour ne garder que les artisans formés aux dimensions énergétiques et environnemental, sera décrié au fil du temps, considéré comme trop simple à obtenir et à conserver. Des travaux sont d'ailleurs en cours en vue de le « fiabiliser » (MEF, 2023).

Dans la même lignée est créé en 2017 le CITE (Crédit d'Impôt à la Transition Énergétique) (MEF, 2021). Ce nouveau crédit permet à ceux qui effectuent des travaux de rénovation, de bénéficier d'une réduction sur leurs impôts, variable selon les travaux entrepris. Mais il présente un défaut majeur : on ne le perçoit – par déduction – qu'à la fin de l'année. C'est pourquoi il sera remplacé en 2020 par « MaPrimeRénov », qui sera accessible à tous, sans condition de revenus dès le 1er janvier 2021 (MEF, 2022). Plus attractive, cette aide est surtout versée directement après le dépôt du dossier, ce qui permet de limiter l'avance budgétaire. En parallèle le dispositif FAIRE, mis en place en 2019, a pour but d'informer et

d'accompagner au mieux les particuliers grâce à des conseillers indépendants. Du côté de l'État, l'accent est mis sur différentes opérations, notamment via les Certificats d'économie d'énergie (CEE), qui engendrent une multiplication des gestes de rénovation (Service Public, 2021). Mais cette politique de coup-à-coup et la forte croissance des objectifs en un temps limité entraîne dans son sillage une vague d'escrocs, qui jettent le discrédit sur une filière pourtant essentielle. Les contrôles se renforcent, tant du côté des acteurs privés que publics, le marché des CEE se vide progressivement des acteurs les moins scrupuleux mais le mal est fait : l'État concentrera désormais son attention sur la fraude et les pratiques commerciales abusives. Ironie du sort pour un secteur pourtant considéré comme socialement et écologiquement utile. Ce sont plus globalement les travaux subventionnés dits à 1 € et la question du reste à charge zéro qui reviennent semer le doute au plus haut niveau de l'État : la quasi-gratuité des travaux engendre-t-elle des problèmes de qualité ou ceux-ci trouvent-ils leur origine ailleurs ? Rend-elle le consommateur moins vigilant ? Ou n'est-elle pas une nécessité pour permettre aux plus modestes de rénover leur logement ?

A ce débat s'en ajoute un autre, plus technique. L'objectif « neutralité carbone », désormais fixé par l'Europe, entraîne un glissement subtil : l'efficacité énergétique doit avant tout viser les consommations d'énergie carbonée, ce qui semble fort logique. Mais la question du carbone, dans un pays au mix énergétique particulier comme celui de la France, importe un débat propre à l'autre versant de la transition énergétique : la production d'énergie. Privilégier l'efficacité « carbone », c'est privilégier une énergie plutôt qu'une autre. Mais lesquelles ? Le nucléaire ? Le gaz ? Selon quels critères ? Peut-on baisser sa consommation carbone sans pour autant baisser sa consommation d'énergie ? Le débat en cours sur la 5ème période des CEE devrait éclairer le devenir des politiques de rénovation en la matière. En attendant, le plan de relance présenté par le gouvernement français le 3 septembre 2020 confirme le nouveau statut des politiques de rénovation énergétique, autrefois axées sur l'économie et l'indépendance énergétique, et désormais recentrées sur les questions sociales et climatiques.

La multiplication des gestes de rénovation, sans forcément traiter le bâtiment dans son entièreté, laisse par ailleurs un chantier inachevé : celui de la rénovation globale, qui consiste à réaliser en une seule fois la totalité des travaux nécessaires à un logement dans un ordre logique ou mieux encore tout en même temps. Générant des économies importantes mais lourdes à financer, la rénovation globale permet en moyenne de diviser par 3 ou 4 la facture de chauffage. Les tous récents coup de pouce CEE rénovation globale et la nouvelle mouture de MaPrimeRénov' semblent aller en ce sens. Cependant, malgré l'ambition, la tâche reste ardue.

L'avenir nous dira si la France est enfin sur les rails de la rénovation du logement au standard basse consommation. Sinon, les mesures d'obligation mises en place dans les prochaines années pourraient souffler un vent de panique : diagnostic de performance énergétique obligatoire pour 2023 (Service Public, 2022), obligation de rénover les passoires

thermiques pour 2030 et puis du parc global privé d'ici 2040. Incitation et obligation devront certainement marcher de concert pour éviter un sentiment d'injustice ou d'écologie « punitive », écueils dans lesquels sont tombées d'autres mesures, à commencer par la fameuse taxe carbone.

1.5 Performances énergétiques et réglementations environnementales

La performance énergétique des bâtiments d'habitation fait référence à l'efficacité avec laquelle ces bâtiments utilisent l'énergie pour répondre aux besoins des occupants. Une bonne performance énergétique implique une utilisation optimale de l'énergie, une réduction des pertes d'énergie et une minimisation de l'impact environnemental.

Une des caractéristiques principales des bâtiments d'habitation ayant un impact fort sur la performance énergétique est l'isolation thermique. Une bonne isolation est essentielle pour réduire les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été. Une isolation adéquate des murs, des fenêtres, des toits et des planchers permet de maintenir une température confortable à l'intérieur du bâtiment, réduisant ainsi la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation.

Viennent ensuite les systèmes de chauffage et de climatisation. Ces systèmes représentent une part importante de la consommation d'énergie dans les bâtiments d'habitation. L'utilisation de systèmes de chauffage et de climatisation efficaces, tels que les pompes à chaleur, les chaudières à haute efficacité énergétique ou les climatiseurs à rendement élevé, peut contribuer à réduire la consommation d'énergie.

L'utilisation d'un éclairage économe en énergie, comme les lampes à LED, peut également réduire considérablement la consommation électrique d'un bâtiment d'habitation. En outre, l'utilisation de systèmes de contrôle de l'éclairage, tels que les détecteurs de présence et les variateurs d'intensité, permet d'optimiser l'utilisation de la lumière en fonction des besoins réels des usagers.

Les équipements électroménagers et électroniques, tels que les réfrigérateurs/congérateurs, les lave-linges, lave-vaisselles, les téléviseurs et les ordinateurs, contribuent également à la consommation d'énergie des bâtiments d'habitation. L'utilisation d'appareils économes en énergie permet de réduire la consommation globale. L'étiquette-énergie présente sur les appareils électroménagers résume leurs caractéristiques, en particulier en matière de performances énergétiques. Le choix entre différents modèles peut donc être fait sur la base d'un critère d'économie d'énergie.

L'intégration de sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire photovoltaïque pour la production d'électricité ou les systèmes solaires thermiques pour le chauffage de l'eau, peut contribuer à la réduction de la consommation d'énergie provenant de sources non renouvelables. Il en va de même pour les solutions de récupération de chaleur, telles que la ventilation mécanique contrôlée (VMC) double flux ou encore les récupérateurs de chaleur

dans les eaux usées. Ces systèmes de production d'énergie renouvelables ou de récupération de chaleur tendent à se démocratiser et à être de plus en plus simple à installer dans l'habitation et pour les usages domestiques.

Enfin, la sensibilisation et les comportements écoénergétiques sont les éléments de cohésion qui vont également contribuer et permettre la prise de conscience, la mise en place efficace et l'utilisation responsable des différentes solutions permettant d'améliorer la performance énergétique des bâtiments.

La performance énergétique des bâtiments d'habitation est alors devenue un enjeu majeur en raison de la nécessité de réduire nos consommations d'énergies, nos émissions de gaz à effet de serre et les coûts énergétiques. Des réglementations et des normes visant à promouvoir l'efficacité énergétique ont été mises en place dans de nombreux pays pour encourager les propriétaires et les occupants à adopter des pratiques écoénergétiques.

A l'origine de la recherche de performances énergétiques pour les bâtiments et les systèmes on retrouve l'histoire de la réglementation énergétique en France qui comprend un certain nombre de lois et de mesures mises en place pour encadrer la production, la distribution et l'utilisation de l'énergie :

- Années 1940-1950 : Après la Seconde Guerre mondiale, la France se concentre sur la reconstruction de son infrastructure énergétique. Des entreprises publiques, comme Électricité de France (EDF) et Gaz de France (GDF), sont créées pour assurer la production et la distribution d'électricité et de gaz naturel. Les années 1940-1950 ont jeté les bases de la politique énergétique française moderne, caractérisée par un mélange d'énergie nucléaire, hydraulique et thermique, ainsi que par une forte implication de l'État dans le secteur de l'énergie.
- Années 1970 : La crise pétrolière de 1973 et ses répercussions économiques poussent la France à se tourner vers l'indépendance énergétique et la diversification de ses sources d'énergie. Des efforts sont déployés pour développer l'énergie nucléaire, ce qui aboutit à la construction de centrales nucléaires à travers le pays.
- Loi sur l'énergie nucléaire de 1968 : Cette loi marque le début du programme nucléaire français et crée le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), chargé du développement de l'énergie nucléaire en France.
- Loi sur l'électricité de 2000 : Cette loi ouvre le marché de l'électricité à la concurrence et permet aux consommateurs de choisir leur fournisseur d'électricité. EDF perd son monopole sur la production et la fourniture d'électricité.
- Loi sur le gaz de 2003 : Cette loi suit un schéma similaire à la loi sur l'électricité de 2000 et ouvre le marché du gaz naturel à la concurrence.
- Années 2000-2010 : La France s'engage dans la transition énergétique en favorisant les énergies renouvelables et en mettant en place des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015 : Cette loi établit des objectifs ambitieux pour la transition énergétique en France, tels que la réduction de la consommation d'énergie, le développement des énergies

renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la lutte contre la précarité énergétique.

- Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de 2016 : La PPE est un document stratégique qui définit les orientations et les objectifs de la politique énergétique de la France sur plusieurs années. Elle est révisée régulièrement pour s'adapter aux évolutions technologiques et aux enjeux environnementaux. A travers la PPE la France s'engage notamment à réduire sa dépendance à l'égard du nucléaire et à augmenter la part des énergies renouvelables dans son mix énergétique. Des mesures sont prises pour encourager la production d'énergie solaire, éolienne, hydraulique et d'autres sources renouvelables.

Ces étapes retracent l'évolution de la réglementation énergétique en France, de l'établissement des entreprises publiques chargées de l'énergie à la libéralisation des marchés de l'électricité et du gaz, en passant par l'accent mis sur la transition énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

1.6 Méthodes et outils d'évaluation des performances

Il existe plusieurs méthodes et outils d'évaluation des performances des bâtiments d'habitation.

Les certifications énergétiques, telles que le label énergétique ou la certification LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), évaluent les performances énergétiques globales d'un bâtiment en tenant compte de critères tels que la consommation d'énergie, l'efficacité des équipements, l'isolation, etc. Ces certifications attribuent généralement une note ou une classe énergétique au bâtiment, permettant de le comparer à d'autres constructions similaires. Elles ne sont pas obligatoires et restent à la discrétion des promoteurs immobilier. Celles-ci permettent de certifier les performances énergétiques et environnementales d'un bâtiment.

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode qui évalue l'impact environnemental global d'un matériau, d'un système ou d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie, en prenant en compte les étapes de fabrication, de mise en œuvre, de vie en œuvre et de fin de vie. Les impacts sont ainsi pris en compte sur des aspects environnementaux, énergétique ou encore d'épuisement des ressources ou de recyclage. L'ACV permet donc d'identifier les étapes du cycle de vie ayant le plus d'impact et d'orienter les décisions vers des choix plus durables.

Les logiciels de simulation énergétique, tels que EnergyPlus, TRNSYS ou DesignBuilder, permettent d'évaluer les performances d'un bâtiment en simulant son comportement thermique et énergétique. Ces outils prennent en compte des paramètres tels que l'orientation, l'isolation, les systèmes de chauffage et de climatisation, les apports solaires, les usages, etc. Ils permettent d'analyser l'efficacité énergétique, de prévoir les besoins en chauffage et en refroidissement, et de comparer différentes stratégies de conception.

Des indicateurs de performance spécifiques peuvent également être utilisés pour évaluer certains aspects des bâtiments d'habitation. Par exemple, l'indice de consommation énergétique (kWh/m².an) permet d'évaluer la consommation d'énergie du bâtiment, le coefficient de transmission thermique global (valeur U) mesure l'efficacité thermique d'une paroi, et le facteur solaire (valeur g) quantifie la quantité d'énergie solaire transmise à travers un vitrage.

Des méthodes de mesure de la qualité de l'air intérieur, telles que la mesure des concentrations de polluants, la ventilation et les débits d'air, peuvent être utilisées pour évaluer le confort et la santé des occupants d'un bâtiment. Des outils tels que la mesure du CO₂ ou du taux d'humidité peuvent être utilisés pour quantifier les niveaux de polluants et assurer une bonne qualité de l'air intérieur.

Ces méthodes et outils d'évaluation des performances des bâtiments d'habitation permettent d'identifier les domaines où des améliorations peuvent être apportées en termes d'efficacité énergétique, de durabilité environnementale, de confort des occupants et de qualité de l'air intérieur. Ils jouent un rôle clé dans la conception, la construction et la rénovation des bâtiments pour répondre aux normes et objectifs de performance élevés.

En France, le calcul règlementaire des performances énergétiques des bâtiments est basé sur le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) (MTECS, 2023). Cet outil est utilisé pour l'évaluation et la communication des performances énergétiques d'un bâtiment. Il se base sur une méthode de calcul et sur l'analyse de divers paramètres afin de fournir des informations sur la consommation d'énergie du bâtiment et ses émissions de gaz à effet de serre. Les principaux éléments du DPE sont :

- Évaluation de la consommation d'énergie : Le DPE examine la consommation d'énergie d'un bâtiment en prenant compte différents aspects tels que le système de chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, la climatisation, la ventilation, l'éclairage, etc. Les caractéristiques du bâtiment, telles que son isolation thermique, ses matériaux de construction et son orientation, sont également considérés.
- Classement énergétique : Le DPE attribue une étiquette énergétique au bâtiment, allant de A à G, avec A représentant une performance énergétique optimale et G représentant une performance énergétique très faible. Cette étiquette permet de comparer facilement les performances énergétiques de différents bâtiments.
- Estimation des émissions de gaz à effet de serre : Le DPE évalue également les émissions de gaz à effet de serre associées à la consommation d'énergie du bâtiment. Cela inclut les émissions directes provenant des systèmes de chauffage et de production d'eau chaude, ainsi que les émissions indirectes liées à l'électricité consommée.
- Recommandations d'amélioration : Le DPE peut fournir des recommandations pour améliorer la performance énergétique du bâtiment. Celles-ci peuvent inclure des mesures telles que l'amélioration de l'isolation, le remplacement des équipements inefficaces par des modèles plus performants, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, etc.

Dans de nombreux pays Européen, le DPE est rendu obligatoire pour les transactions immobilières, les locations de logements et les bâtiments publics (European Commission, 2021). Il permet d'informer les propriétaires, les locataires et les acheteurs sur la performance énergétique d'un bâtiment et d'encourager la prise de décisions éclairées en matière d'efficacité énergétique (European Commission, 2021).

Le DPE vise alors à sensibiliser les propriétaires et les occupants des bâtiments vis-à-vis de leur consommation d'énergie, à promouvoir l'efficacité énergétique et à encourager la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il constitue un outil important dans la transition vers des bâtiments plus durables et économes en énergie.

Seulement, le diagnostic de performance énergétique prend en considération la consommation d'énergie primaire nécessaire aux différents usages du bâtiment et non la consommation d'énergie finale ce qui conduit à certaines polémiques.

L'énergie primaire désigne les sources d'énergies potentielles disponibles dans la nature (le bois, le gaz naturel, le soleil...) avant toute transformation. L'énergie finale correspond quant à elle à l'énergie livrée au consommateur pour répondre à ses besoins (avoir de l'électricité, chauffer sa maison...). L'énergie primaire représente donc la quantité totale d'énergie nécessaire pour fournir la quantité d'énergie finale consommée par l'utilisateur, c'est-à-dire en rajoutant à cette énergie finale l'énergie nécessaire à sa production et à son transport, en intégrant les notions de rendement de production et de pertes.

Ainsi des énergies comme le gaz, le pétrole, le bois sont des énergies primaires, car disponible dans la nature avant toute transformation. Elles sont parfois utilisables directement, mais le plus souvent elles doivent être transformées en une source d'énergie secondaire pour être utilisable et transportable facilement, et enfin consommée sous forme d'énergie finale. L'électricité en revanche n'est pas une énergie primaire car elle est obtenue par transformation de ressources naturelles dans des centrales de production avec un rendement moyen inférieur à 40 %. Elle doit ensuite être acheminée jusqu'aux lieux d'utilisation (d'où des pertes de transport) afin d'être consommée sous forme d'énergie finale.

Le Coefficient d'Énergie Primaire (CEP) est un l'indicateur correspondant à la consommation totale d'énergie primaire d'un bâtiment sur une année. Il s'agit de l'un des points clés de la réglementation thermique RE2020 et une manière de caractériser la quantité de ressources naturelles consommée et prélevée à la planète.

Pour le calcul de ce coefficient d'énergie primaire, la réglementation française impose l'utilisation d'un coefficient de conversion pour l'électricité permettant le passage de l'énergie finale, facilement calculable par simulation, à l'énergie primaire. Ce coefficient réglementaire est aujourd'hui de 2,30 (auparavant ce coefficient était fixé à 2,58) (The European Parliament and the Council of the European Union, 2018). Autrement dit, plus de

60 % de l'énergie primaire est perdue lors de la production et du transport ce qui en fait l'énergie la moins efficace. Ce coefficient est en revanche de 1 pour l'ensemble des autres énergies (gaz, fioul, charbon, bois, solaire) malgré les processus de transformation parfois nécessaires et le transport jusqu'aux points de consommations.

Le classement des performances énergétiques des bâtiments d'habitation est déterminé sur la base de la consommation d'énergie primaire et non sur la base de la consommation d'énergie finale. Ainsi pour une consommation d'énergie finale donnée sur un bâtiment d'habitation, selon la source d'énergie utilisée, la consommation d'énergie primaire pourra varier fortement et en particulier dans le cas de systèmes fonctionnant à l'électricité. Cela aura alors pour conséquence d'augmenter fortement l'indicateur CEP de ces bâtiments.

1.7 Problématique des bâtiments fonctionnant à l'énergie électrique

La problématique des bâtiments d'habitation dont les systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire (ECS) fonctionnent à l'énergie électrique est multifacette et peut être abordée sous différents angles. Voici quelques aspects clés de cette problématique :

- Consommation d'énergie et coûts élevés : Les bâtiments d'habitation utilisent de l'électricité pour diverses activités quotidiennes, telles que l'éclairage, le chauffage, la climatisation, la cuisson, l'utilisation d'appareils électroménagers ou encore la production d'eau chaude sanitaire. Cette consommation d'énergie peut être élevée ce qui entraîne des coûts énergétiques importants pour les occupants. Cela peut être un fardeau financier pour de nombreux ménages, en particulier ceux à faible revenu.
- Précarité énergétique : La précarité énergétique est une préoccupation majeure dans les bâtiments d'habitation fonctionnant à l'énergie électrique. Certains ménages peuvent avoir du mal à payer leurs factures d'électricité et peuvent être confrontés à des coupures de courant en raison de difficultés financières. Cela peut avoir des conséquences sur leur confort, leur santé et leur qualité de vie globale.
- Émissions de gaz à effet de serre : Comme mentionné précédemment, la production d'électricité peut être liée à l'utilisation de combustibles fossiles, ce qui entraîne des émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique. Les bâtiments d'habitation fonctionnant à l'électricité contribuent indirectement à ces émissions si l'électricité provient de sources non renouvelables.
- Gestion de la demande d'électricité : Les bâtiments d'habitation peuvent également être soumis à des pics de demande d'électricité, en particulier pendant les heures de pointe. Cela peut exercer une pression supplémentaire sur les réseaux électriques locaux et conduire à des problèmes de surcharge. Une gestion efficace de la demande d'électricité, par le biais de mesures telles que l'adoption de tarifs différenciés ou la mise en place de systèmes intelligents de gestion de l'énergie, peut contribuer à atténuer ces problèmes.
- Amélioration de l'efficacité énergétique : Une approche clé pour résoudre la problématique des bâtiments d'habitation fonctionnant à l'énergie électrique est d'améliorer leur efficacité énergétique. Cela peut inclure l'installation d'appareils électroménagers et d'équipements plus économes en énergie, l'isolation thermique pour réduire les pertes de chaleur, l'utilisation de systèmes de chauffage et de

climatisation efficaces, et la sensibilisation des occupants à adopter des comportements écoénergétiques.

En résumé, la problématique des bâtiments fonctionnant à l'énergie électrique concerne la consommation énergétique élevée, la dépendance aux combustibles fossiles, la fiabilité de l'alimentation électrique, la transition vers les énergies renouvelables et la gestion de la demande d'électricité. Ces défis nécessitent des solutions innovantes et une approche holistique pour rendre les bâtiments plus durables et efficaces sur le plan énergétique.

Pour améliorer les étiquettes énergétiques de ce type de bâtiments, le respect de la réglementation implique souvent, en plus des actions de limitation des déperditions, de procéder à un changement d'énergie en remplaçant le chauffage électrique par un chauffage à combustion.

Ces solutions sont coûteuses et complexes à mettre en œuvre en site occupé. Elles nécessitent la mise en œuvre de nouveaux réseaux sur l'ensemble des bâtiments. Pour le chauffage, l'ensemble des pièces des logements sont touchées et à consommation et performances égales, elles produisent finalement plus de gaz à effet de serre.

Une part significative des logements de la société *Immobilière Rhône-Alpes* sont équipés d'un système de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire électrique, individuel ou collectif. Du fait de l'utilisation importante de l'énergie électrique, ces logements, même isolés correctement, ont une étiquette énergétique défavorable, souvent E, F voire G et présentent parfois un niveau de confort insuffisant. Pour autant, leur bilan de gaz à effet de serre et les coûts pour les locataires ne sont pas défavorables.

1.8 Autoconsommation collective : perspectives et problématiques

1.8.1 Principe et perspectives

L'autoconsommation photovoltaïque est un système dans lequel un particulier ou une entreprise produit sa propre électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques et consomme cette électricité pour ses propres besoins, réduisant ainsi sa dépendance à l'égard de l'électricité provenant du réseau public. Les principes de l'autoconsommation photovoltaïque comprennent :

- Production d'électricité solaire : Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité continue (courant continu) à l'aide de cellules solaires.
- Onduleur : L'électricité continue produite par les panneaux solaires est ensuite acheminée vers un onduleur, qui la transforme en électricité alternative (courant alternatif) utilisable dans les bâtiments.
- Autoconsommation : L'électricité produite par les panneaux solaires est d'abord utilisée pour alimenter les appareils et les équipements électriques du bâtiment où se trouvent les panneaux. Cela réduit la demande d'électricité provenant du réseau public.

- Stockage (optionnel) : Dans certains cas, un système de stockage d'énergie, tel qu'une batterie, peut être intégré au système pour stocker l'électricité excédentaire produite pendant la journée et la restituer lorsque les panneaux solaires ne produisent pas d'électricité, comme la nuit.
- Injection du surplus (si autorisé) : Si le système photovoltaïque produit plus d'électricité que ce qui est consommé localement et que la réglementation le permet, le surplus peut être injecté dans le réseau électrique public, générant parfois des crédits ou une rémunération.
- Mesure et suivi : Un compteur bidirectionnel est généralement installé pour mesurer la quantité d'électricité produite par les panneaux solaires, la quantité consommée localement et la quantité injectée dans le réseau.
- Réduction de la facture d'électricité : L'autoconsommation photovoltaïque permet de réduire la facture d'électricité en réduisant la dépendance à l'égard du réseau électrique public. La quantité d'économies dépend de la taille du système, de la consommation d'électricité du bâtiment et de la réglementation locale.
- Durabilité environnementale : L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque réduit les émissions de gaz à effet de serre et contribue à la lutte contre le changement climatique en utilisant une source d'énergie propre et renouvelable.

Il convient de noter que les principes de l'autoconsommation photovoltaïque peuvent varier en fonction de la réglementation et des incitations gouvernementales en vigueur dans chaque région ou pays.

L'autoconsommation est dite individuelle lorsque la production photovoltaïque est destinée à un seul utilisateur final. Le générateur photovoltaïque peut alors être raccordé directement aux appareils et équipements électriques du bâtiment où se trouvent les panneaux.

L'autoconsommation est dite collective lorsqu'elle concerne plusieurs participants, tels que des voisins, des copropriétaires ou des membres d'une communauté, et qu'ils partagent l'électricité produite par un système photovoltaïque commun. La particularité de l'autoconsommation collective photovoltaïque réside dans le fait qu'elle nécessite un réseau de distribution pour répartir la production ainsi qu'un système de comptage bidirectionnel qui mesure la quantité d'électricité produite par le générateur, la quantité d'électricité consommée par chaque participant et la quantité d'électricité excédentaire injectée dans le réseau public, le cas échéant. Le partage de la production entre les différents consommateurs peut alors se faire de plusieurs façons. Par exemple, la quantité d'électricité que chaque participant reçoit peut dépendre de la taille de sa participation financière ou de sa consommation d'électricité.

Depuis le Décret n° 2021-895 du 5 juillet 2021 le cadre réglementaire Français de l'autoconsommation collective dans les habitations à loyer modéré (HLM) a été simplifié. Ce décret établit un cadre réglementaire qui permet l'installation de panneaux solaires photovoltaïques dans les ensembles de logements sociaux. Les points clés du décret incluent la mise en place de systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité, la distribution de cette électricité aux locataires, la réduction des factures d'électricité, et la possibilité pour

les locataires de participer financièrement au projet. Le décret vise à favoriser l'adoption de l'autoconsommation collective dans le logement social en offrant des avantages économiques et environnementaux aux locataires et aux propriétaires bailleurs tout en contribuant à la transition énergétique.

1.8.2 Problématique et contraintes

L'autoconsommation collective présente de nombreux avantages, notamment la réduction des factures d'électricité, la promotion de l'énergie renouvelable et la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, elle peut également être confrontée à plusieurs problématiques et défis, notamment :

- Réglementation complexe : La réglementation de l'autoconsommation collective peut être complexe et varier d'un pays à l'autre, voire d'une région à l'autre. Comprendre et respecter les règles locales peut être un défi pour les porteurs de projets et participants.
- Gestion et coordination : La gestion d'un système d'autoconsommation collective peut être compliquée, en particulier lorsque de nombreux participants sont impliqués. Il faut mettre en place des mécanismes de coordination, de gestion des contrats et de partage équitable de l'électricité produite.
- Investissement initial : L'installation de panneaux solaires photovoltaïques et d'autres infrastructures nécessaires peut représenter un investissement initial élevé. Les participants doivent souvent décider comment financer ces installations.
- Stockage d'énergie : Les systèmes d'autoconsommation collective peuvent bénéficier de systèmes de stockage d'énergie, tels que des batteries, pour lisser la production d'électricité solaire et la consommation. Cependant, ces systèmes peuvent également être coûteux et nécessitent une gestion appropriée.
- Équité entre les participants : Il peut y avoir des inégalités entre les participants en termes de contribution financière, de consommation d'électricité et de bénéfices. Assurer une répartition équitable des coûts et des avantages peut être un défi.
- Injection dans le réseau public : L'excédent d'électricité généré par un système d'autoconsommation collective peut être injecté dans le réseau électrique public, ce qui nécessite une réglementation adéquate pour déterminer comment cela est géré et compensé.
- Maintenance et durabilité : Les systèmes photovoltaïques nécessitent une maintenance régulière pour assurer leur efficacité à long terme. La gestion de la maintenance et le remplacement éventuel des équipements peuvent être des problématiques à prendre en compte.
- Adhésion et sensibilisation : Les participants doivent être informés et sensibilisés aux avantages de l'autoconsommation collective. Il peut être nécessaire de promouvoir et d'encourager leur adhésion aux projets.
- Évolution de la demande : Les habitudes de consommation d'électricité des participants peuvent évoluer avec le temps, ce qui peut rendre difficile la planification de la production d'énergie et de la gestion du système.

Parmi ces contraintes et problématiques, celle du déphasage entre production et consommation est une des plus impactante. En effet, le coût des batteries et les contraintes de

sécurité, de gestion et d'impact environnementaux auxquels elles sont associées conduisent beaucoup de projets d'autoconsommations collective en logement social à ne pas voir le jour. L'objectif d'un tel projet est d'apporter aux locataires des économies concrètes sur leur facture d'énergie en maximisant le taux d'autoconsommation, c'est-à-dire la part de production photovoltaïque consommée sur place. Pour ce faire il est nécessaire de mettre en phase la production électrique avec les usages or parmi les usages domestiques courants peu sont réellement en phase avec la production d'un générateur photovoltaïque. Le recours à des outils d'optimisation est donc essentiel pour pallier ce problème.

CHAPITRE 2 - ÉTUDES EXPERIMENTALES PREALABLES

Ce chapitre est dédié à l'étude expérimentale préliminaire mené dans le cadre du projet InER : *Innovation Énergétique dans la Rénovation*. L'objectif principal de cette étude est de mettre en place une instrumentation in situ dans les logements concernés par les opérations de rénovation. Cette instrumentation vise à collecter des données précises permettant de mieux comprendre les comportements énergétiques et les conditions environnementales des bâtiments.

Dans la section 2, nous décrivons la stratégie d'instrumentation adoptée pour cette étude. Cela implique la mesure des consommations électriques collectives et individuelles des bâtiments, la surveillance des températures et de l'humidité relative dans différentes pièces, ainsi que la mise en place de détecteurs d'ouverture/fermeture des portes et fenêtres donnant sur l'extérieur. Nous aborderons également la mesure de la consommation d'eau chaude sanitaire pour mieux appréhender le comportement des usagers, ainsi que la collecte des paramètres météorologiques tels que l'humidité, la température extérieure et l'ensoleillement.

La section 2.2 présente les appareils de mesure utilisés dans notre instrumentation. Nous expliquerons que cette instrumentation repose sur un ensemble de capteurs et d'appareils de mesure capables de recevoir et de transmettre des données à distance via le protocole de communication EnOcean. Nous mettrons en avant les avantages de ce protocole, notamment sa modularité, son interopérabilité, sa maturité technologique et sa présence dans de nombreux systèmes internationaux. Nous mentionnerons également le recours à la société OGGA, spécialisée dans les solutions intelligentes de gestion de l'énergie, pour la mise en place de cette instrumentation.

Dans la section 2.3, nous aborderons les aspects liés aux mesures brutes et au post-traitement des données. Nous expliquerons comment les données mesurées sont récoltées par les dispositifs EcoTouch et envoyées vers un serveur via une transmission par modem 4G. Nous décrivons le contrôleur intelligent EcoTouch et les capteurs, ainsi que la possibilité de récupérer les données en cas de problème sur un EcoTouch voisin. De plus, nous soulignerons l'importance de la mémoire interne des EcoTouch pour le stockage temporaire des données en cas d'indisponibilité de la transmission 4G. La stratégie d'instrumentation sera ensuite mise en place dans un cas réel et présentée dans la partie 2.4 avec pour terrain d'expérimentation la résidence Plateau à Villefontaine dans l'Isère.

Enfin, la section 2.5 se concentrera sur l'estimation de la production électrique photovoltaïque et son rôle dans le choix des solutions de rénovation. Nous expliquerons en détail les objectifs et la méthodologie adoptée pour cette étude, qui vise à évaluer le potentiel de production électrique à partir de panneaux solaires photovoltaïques. Nous présenterons

l'utilisation du logiciel BIMsolar, une plate-forme WEB communautaire et un logiciel connecté dédié à la valorisation des innovations solaires en architecture. Nous décomposerons les différentes étapes de l'étude, notamment la description du modèle 3D des bâtiments étudiés, l'utilisation des données météorologiques pour les simulations, le déroulement d'une simulation type et l'analyse des résultats pour plusieurs configurations de panneaux solaires.

2.1 Objectifs et stratégie d'instrumentation

La première étape du projet a été de mettre en place une instrumentation in situ des logements concernés par les opérations de rénovations. Cette instrumentation a eu pour premier objectif de mesurer avec les consommations électriques collectives et individuelles des appartements. Un second objectif a été de relever les températures et humidités relatives dans différentes pièces et de mettre en place des détecteurs d'ouverture/fermeture des portes et fenêtres donnant sur l'extérieur. Nous avons à mesurer également la consommation d'eau chaude sanitaire afin de mieux cerner le comportement des usagers. Enfin les dernières mesures concerneront les paramètres météorologiques avec une mesure d'humidité et de température à l'extérieures des bâtiments ainsi qu'une mesure de l'ensoleillement. Les schémas détaillés de disposition des capteurs et appareil de mesure dans les logements sont présenté en annexe 1 – « Schémas détaillées d'instrumentations des appartements ».

Les données recueillies durant cette expérimentation sont destinées à :

- Déterminer précisément les consommations collectives, individuelles et des parties communes.
- Catégoriser les postes à consommation par importances.
- Aider à l'identification des besoins de production pour l'autoconsommation.
- Appréhender les profils de comportement des occupants afin de déterminer l'impact sur les consommations énergétiques.
- Permettre la construction de modèles de comportement pour le bâtiment et ses usagers, qui serviront par la suite à la régulation du système mis en place.

Pour chaque logement instrumenté nous avons mesuré les consommations individuelles suivantes :

- chauffage électrique d'appoint ;
- consommation électrique pour l'ECS ;
- consommation volumique pour l'ECS ;
- éclairage ;
- prises.

Au niveau des consommations communes de chaque bâtiment, nous avons mesuré les consommations collectives suivantes :

- chauffage électrique commun en dalle ;
- ventilation mécanique contrôlée (VMC) ;
- ascenseur ;

- éclairage de parties communes.

Les températures sont quant à elles mesurées dans les logements au niveau de différentes pièces (séjour, cuisines et chambres). Nous aurons pour chaque grandeur (consommation, température, débit...) mesurée une information temporelle permettant de renseigner sur le moment précis de la journée où été prise la mesure.

Étant donné que les informations collectées se rapportent à des personnes physiques identifiées, elles présentent un caractère personnel et doivent être traitées (mesurées, enregistrées, organisées, conservées, utilisées, consulté, communiquée...) dans le respect du Règlement général sur la protection des données (RGPD).

Afin d'être en accord avec la RGPD, un certain nombre de principe ont dû être respectés. Il s'agit d'abord de garantir un traitement juste et transparent des données mesurées ; de définir des objectifs clairs et des finalités déterminées et explicitées auprès des personnes concernées ; puis d'assurer que les données collectées sont pertinentes et limitées à ce qui est nécessaire ; ainsi que de les conserver sous une forme permettant l'identification des personnes concernées pendant une durée n'excédant pas celle nécessaire ; enfin assurer un traitement qui garantit une sécurité appropriée et une protection contre le traitement non autorisé ou illicite et contre la perte, la destruction ou les dégâts d'origine accidentelle (intégrité et confidentialité).

Avant la mise en place de l'instrumentation, une campagne d'information a été réalisée chez les locataires dans le but de communiquer sur le projet InER et sur l'instrumentation préalable qui allait être mise en place.

2.2 Appareils de mesure

L'instrumentation se base sur un ensemble de capteurs et appareils de mesure capables de recevoir et transmettre de l'information à distance via le protocole de communication EnOcean. Il s'agit d'un protocole radio utilisant la fréquence de 868Mhz en Europe et qui a la particularité de nécessiter très peu d'énergie pour fonctionner. Les périphériques EnOcean ont la particularité de générer leur propre énergie, ce qui leur permet ensuite de restituer l'information d'état au contrôleur domotique via des principes assez simples et ingénieux telles que l'énergie solaire. Ses principaux avantages sont les suivants :

- modularité et interopérabilité ;
- maturité technologique ;
- présence dans de nombreux systèmes à l'international ;
- protocole ouvert et sécurisé ;
- réception et transmission de l'information.

Pour notre instrumentation, nous avons fait appel à la société OGGA qui propose des solutions de gestion intelligentes de l'énergie permettant entre autres de relever des informations à partir de capteurs placé à distance.

Eco-Touch®

La mesure de la consommation électrique se fait via le dispositif « Eco-Touch » du fabricant OGGA (Figure 1). Il s'agit d'un gestionnaire d'énergie à distance, alimenté en 230 V en amont d'un disjoncteur, capable de mesurer des consommations électriques, de recevoir et de transmettre des informations.

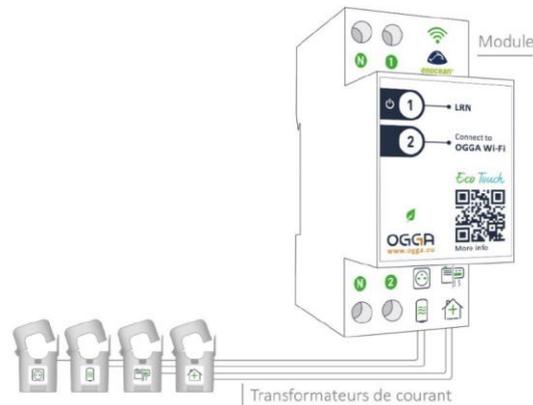


Figure 1 : Système « Eco-Touch » de la société OGGA (OGGA, 2023)

Le gestionnaire intelligent Eco-Touch® dispose de quatre tores (pinces ampèremétriques) permettant la mesure du courant. Ces tores sont placés sur :

- le départ général du compteur du logement ;
- les réseaux prise en amont des disjoncteurs divisionnaires ;
- le circuit d'eau chaude sanitaire d'appoint en amont du disjoncteur ;
- le circuit du radiateur électrique en amont du disjoncteur.

On est ainsi en capable de mesurer les consommations électriques totales du logement, de l'ensemble des prises électriques, de la production d'eau chaude sanitaire, ainsi que de l'ensemble des radiateurs.

Eco-Touch nous permet aussi de recueillir les informations provenant des différents autres capteurs installés dans le logement (température et humidité relative, détection d'ouverture/fermeture des portes et fenêtres et mesure de la consommation volumique d'ECS).

Mesure de température et humidité relative – Capteurs THX et THI

La mesure de température et d'humidité relative est communiquée via un capteur autonome, alimenté par un petit panneau solaire et une pile (Figure 2). Ces capteurs sont placés dans les séjours et les chambres et peuvent communiquer à distance en temps réel avec Eco-Touch®. Un autre capteur plus adapté aux conditions extérieures est placé à l'extérieur du bâtiment afin d'avoir une information sur les conditions météorologiques.

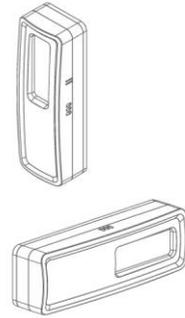


Figure 2 : Capteur de température de d'humidité relative (OGGA, 2023)

Ses principales caractéristiques sont :

- alimentation : panneau photovoltaïque ;
- plage de mesure de température : 0 °C à 40 °C (résolution 0.16 °C) ;
- plage de mesure d'humidité : 0 à 100 % ;
- montage mural : par adhésif double face ou vis ;
- pile CR1216 en option pour utilisation en zone sombre (autonomie 3 ans noir complet) ;
- protocole radio : EnOcean® ;
- portée : 30 m à l'intérieur
- dimensions : 80·26·18 mm.

Mesure du débit volumique d'eau chaude sanitaire – Capteurs IECS

Dans le but de mesurer la consommation d'eau chaude sanitaire (ECS) en termes de quantités et de période d'utilisation, nous avons mis en place un système composé de 3 éléments :

- Un compteur volumétrique directement raccordé au tuyaux d'ECS en sortie de cumulus (Figure 3). Il permet de mesurer le volume d'eau chaude qui sort du cumulus.



Figure 3 : Compteur volumétrique (ITRON, 2023)

- Afin de récupérer l'information à distance le compteur volumétrique est raccordé à un émetteur d'impulsion chargé d'émettre un signal à chaque tour du compteur de volume. L'émetteur d'impulsion est branché à son tour à un compteur d'impulsion chargé de compter le nombre d'impulsion et de transmettre l'information à l'Eco-Touch® (Figure 4 et Figure 5).

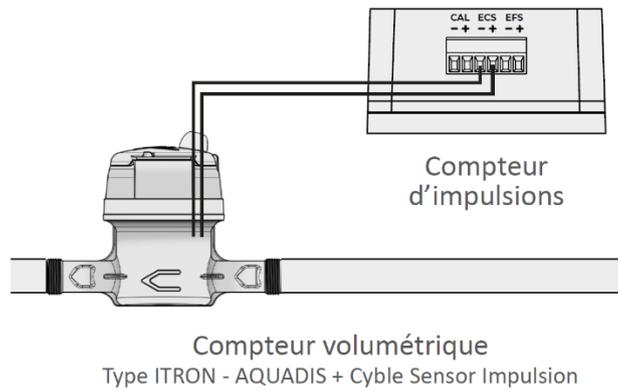


Figure 4 : Principe de la mesure du volume d'ECS (OGGA, 2023)

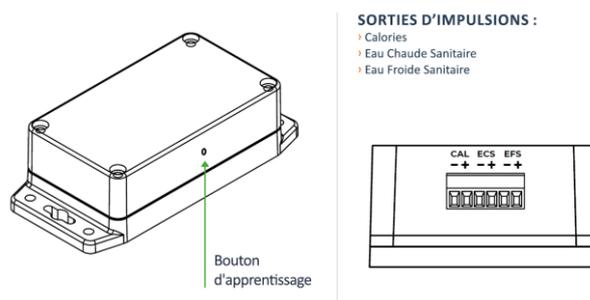


Figure 5 : Compteur d'impulsion multifluide (OGGA, 2023)

Détecteur d'ouverture/fermeture des portes et fenêtres – Capteurs DOF

Afin de mieux comprendre les comportements des usagers vis-à-vis du confort dans les logements, nous avons mis en place des détecteurs d'ouverture/fermeture des portes et des fenêtres (Figure 6). Ces systèmes, très discrets, nous permettent de savoir à quel moment les locataires aèrent leur logement et sur quelle durée. Ces périodes d'ouvertures des fenêtres donnant sur l'extérieur correspondent à des moments où le confort perçu par l'occupant est perturbé, d'où la nécessité d'aérer. Le système choisi pour effectuer ces mesures est composé d'un élément fixe qui se monte sur le dormant de la porte (ou fenêtre) et d'un élément mobile fixé sur le battant. Le signal est interrompu lorsque la porte est ouverte et que les deux éléments ne sont plus en face à face. L'information est alors transmise à Eco-Touch®.



Figure 6 : Détecteur d'ouverture/fermeture des portes et fenêtres (OGGA, 2023)

Mesure de la luminosité extérieure – Capteurs LIGHTTEXT

Pour la mesure de la luminosité extérieure (qui nous communique une information sur l'ensoleillement) on utilise une sonde de mesure de la luminosité (Figure 7). Cette sonde est autonome en énergie et muni d'une petite cellule solaire et d'une pile. L'information mesurée est transmise à un Eco-Touch® par protocole radio.



Figure 7 : Sonde de mesure de la luminosité extérieure (OGGA, 2023)

Les caractéristiques de la sonde sont :

- autonome en énergie ;
- plage de luminosité mesurée : 0 à 30000 Lux ;
- degré de protection IP54 ;
- température ambiante admissible : -20°C à +55°C ;
- montage par vissage ou collage.

Récupération de l'information

Les informations récoltées auprès des différents Eco-Touch® sont transmises sur un serveur sécurisé de la société OGGA auquel nous avons accès. Le transfert des données se fait via plusieurs modem 4G installés pour chaque bâtiment au RDC et au R+3.

2.3 Mesures brutes et post-traitement

Les données mesurées sont récoltées par l'ensemble des EcoTouch et envoyées sur un serveur via une transmission par modem 4G. Le serveur en question est propriété gérée par OGGA qui en assure la sécurité.

Chaque EcoTouch regroupe et remonte les informations d'un certain nombre de capteurs. Un EcoTouch est identifiés par un code à 5 caractères tandis qu'un capteur est identifié par un code à 8 caractères (Figure 8). En cas de problème sur un EcoTouch, les données mesurées peuvent être récoltés sur un EcoTouch voisin à condition qu'ils soient à une distance suffisante pour recevoir le signal. Les EcoTouch sont également dotés d'une mémoire interne de 8 GB permettant le stockage des données lorsque la transmission par modem 4 G n'est pas fonctionnelle.

Kit Ecotouch 004BE

- PF: Aralis
- ENOID: 0580BF21
- FMW: oggascv1-dev-00001_20200108132132

Accessoires	Nom	Id	Zone	FMW	Type
Sonde de thermostat	CAP-THX-34-SEJ - Séjour	051A8DC7	00	00000000	
Sonde de température intérieure secondaire	CAP-THX-34-CH1 - Chambre 1	058E4FE8	00	00000000	
Sonde de température intérieure secondaire	CAP-THX-34-CH2 - Chambre 2	051A9091	00	00000000	
Capteur d'ouverture de fenêtre	CAP-DOF-34-SEJ - Fenêtre séjour	051A9A64	00	00000000	
Capteur d'ouverture de fenêtre	CAP-DOF-34-CUI - Fenêtre cuisine	051A9A51	00	00000000	
Capteur d'ouverture de fenêtre	CAP-DOF-34-CH1 - Fenêtre chambre 1	051A9D0F	00	00000000	
Capteur d'ouverture de fenêtre	CAP-DOF-34-CH2 - Fenêtre chambre 2	051A9A63	00	00000000	

Figure 8 : Exemple d'un EcoTouch rattaché à 7 capteurs

L'ensemble des données mesurées par les capteurs sont récoltés par l'EcoTouch sous forme de fichiers .txt contenant une information temporelle de type timestamp (unix) et la valeur du paramètre mesuré (température, humidité relative, puissance...). Le timestamp (unix) désigne le nombre de secondes écoulées depuis le 1er janvier 1970 à minuit UTC. Cette méthode de mesure présente l'avantage de permettre la comparaison facile entre deux dates, d'être géré par la plupart des langages et est universelle puisque indépendante du fuseau horaire. En revanche le nombre en lui-même n'est pas parlant pour un humain et nécessite de passer par un convertisseur.

Ainsi les différentes mesures remontées par un EcoTouch donné se présentent sous forme d'un fichier, dont le nom correspond à l'identifiant de l'EcoTouch en question. Pour chaque paramètre mesuré on retrouve un fichier de description de la donnée mesurée et un ensemble de fichiers .txt contenant les mesures. La taille maximale des fichiers dans lesquelles sont écrit les mesures avant enregistrement et transmission est de 22 kilooctets. Atteint cette taille, le fichier .txt est fermé et enregistré et un nouveau fichier est créé. On retrouve alors dans le nom de chaque fichier .txt le type de données mesurée, le timestamp de la première mesure contenue dans le fichier et l'identifiant du capteur correspondant.

Les Tableau 1 et Tableau 2 répertorie les différents types de mesures remontées.

Tableau 1 : Mesures remontées par un EcoTouch en parties privatives

Nom de fichier	Paramètre mesuré	Unité
CH-	Consommations moyennes électriques Chauffage	[W]
EC-	Consommations moyennes électrique ECS	[W]
PR-	Consommations moyennes électrique prises	[W]
TO-	Consommations moyennes électrique totale	[W]
TEMP	Températures intérieures	[°C]
HUM	Humidités relatives intérieures	[%]
HANDLE	Ouvertures/Fermetures des fenêtres	[0/1]
IECS-	Consommations en ECS	[l/s]

Tableau 2 : Mesures remontées par un EcoTouch en parties communes

	Paramètre mesuré	Unité
PH1	Consommations moyennes électriques phase 1	[W]
PH2	Consommations moyennes électriques phase 2	[W]
PH3	Consommations moyennes électriques phase 3	[W]
TO-	Consommations moyennes électriques totale	[W]
TEMPEXT	Températures extérieures	[°C]
LIGHTTEXT	Luminosités extérieures	[lux]

Le post-traitement des données est indiqué dans l'Annexe 2 – « Post-traitement des données d'instrumentation ».

2.4 Instrumentation de la résidence Le PLATEAU



Figure 9 : Vue aérienne de la résidence Le PLATEAU

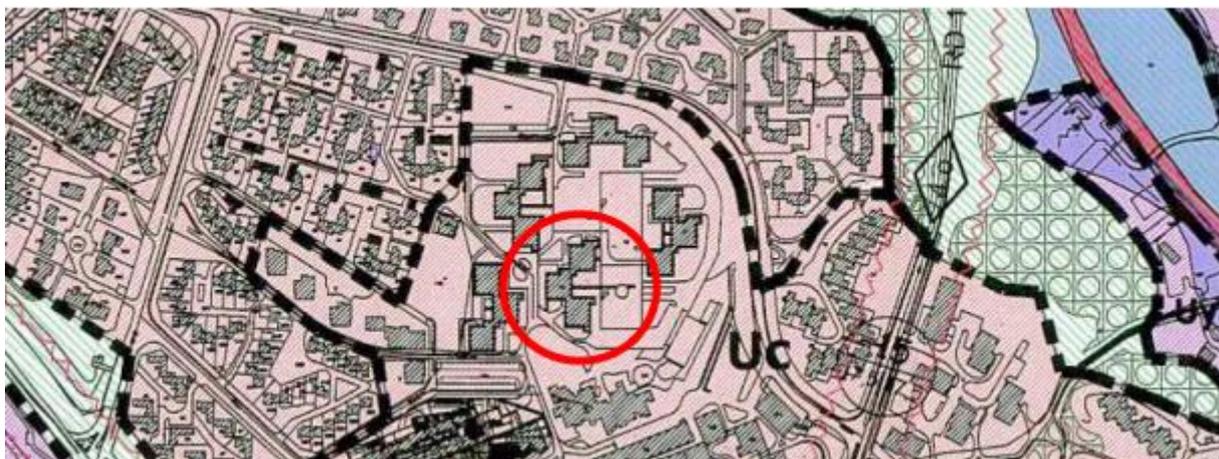


Figure 10 : Vue cadastrale de la résidence Le PLATEAU

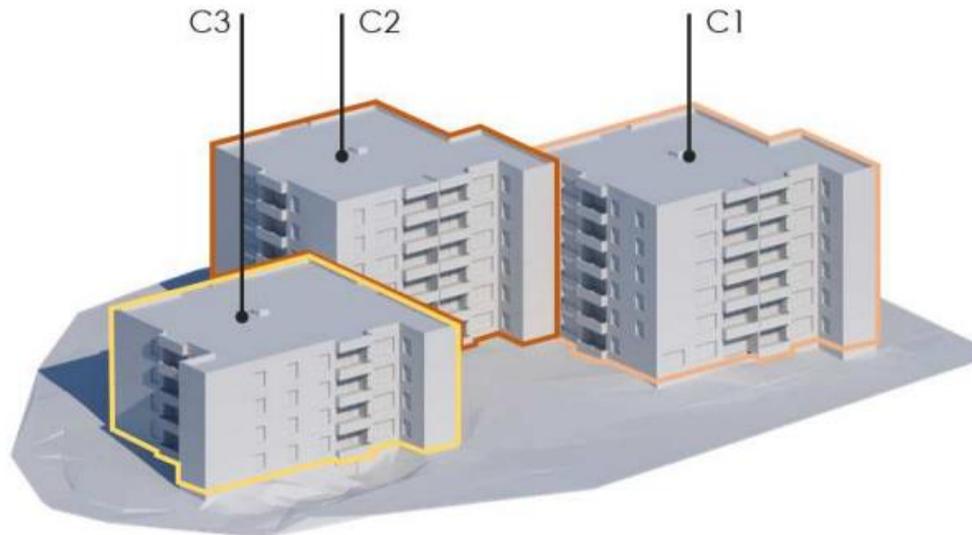


Figure 11 : Maquette 3D de la résidence Le PLATEAU

2.4.1 Contexte urbain et stratégie d'instrumentation

L'opération consiste en la réhabilitation de 67 logements collectifs sociaux, répartis sur trois bâtiments, C1, C2 et C3 construits en 1973 et situés sur la commune de Villefontaine dans l'Isère (Tableau 3).

Tableau 3 : Surfaces et typologies des logements

Bâtiments	Niveau	Logements	Répartition par type					SHAB
			F1	F2	F3	F4	F5	
C1	5	24	0	1	12	11	0	1756
C2	5	24	0	1	12	11	0	1760
C3	3	19	4	7	0	0	8	1299
Total		67	4	9	24	22	8	4815

L'enjeu principal de cette opération est l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments dans un objectif de réduire les charges locatives pour les habitants tout en améliorant le confort dans les logements en atteignant un niveau de performance minimal équivalent à l'étiquette C et si cela est envisageable.

Sur la résidence Le Plateau, un ensemble de 8 logements a été instrumenté. La stratégie mise en œuvre consiste à instrumenter tous les logements d'un même niveau afin de limiter les coûts d'instrumentation pouvant être occasionnés par des équipements trop éloignés les uns des autres mais également de balayer les différentes typologies de logement.

Les logements instrumentés sont les 4 appartements du niveau R+2 du bâtiment C2 (deux T3 et deux T4, Figure 12) et 4 autres appartements du niveau R+3 du bâtiment C3 (deux T2 et deux T5, Figure 13).

2.4.2 Implantation des capteurs et appareils de mesure

Pour chaque logement il a :

- un Eco-Touch® placé dans le boîtier électrique et branché pour la mesure des consommations électriques ;
- plusieurs capteurs de température/humidité (fonction du nombre de pièce) ;
- plusieurs détecteurs d'ouverture/fermeture des portes et fenêtres donnant sur l'extérieures ;
- un compteur volumétrique avec émetteur et compteur d'impulsion raccordé en sortie de chauffe-eau électrique.

Pour les parties communes, nous avons mis en place sur les bâtiments C2 et C3 six Eco-Touch® au total (Figure 14) :

- au niveau R+1 du bâtiment C2 pour la mesure des résilles du plancher bas du R+2 ;
- au niveau R+2 du bâtiment C2 pour la mesure des résilles du plancher haut du R+2 ;
- au niveau du RDC du bâtiment C2 pour la mesure des consommations liées à l'ascenseur, l'éclairage et la VMC ;
- au niveau R+2 du bâtiment C3 pour la mesure des résilles du plancher bas du R+3 ;
- au niveau R+3 du bâtiment C3 pour la mesure des résilles du plancher haut du R+3 ;
- au niveau du RDC du bâtiment C3 pour la mesure des consommations liées à l'ascenseur, l'éclairage et la VMC.

Les sondes de température extérieure et de luminosité sont installées sur la toiture terrasse du bâtiment C3.



Figure 12 : Instrumentation du R+2 - bâtiment C2



Figure 13 : Instrumentation du R+3 - bâtiment C3

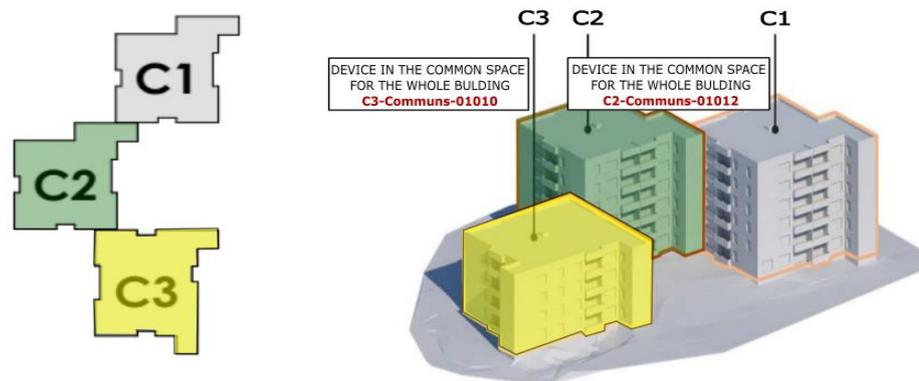


Figure 14 : Instrumentation des parties communes des bâtiments C2 et C3

Les parties communes sont équipées de manière à mesurer la consommation électrique des moyens généraux (ascenseurs, éclairages, contrôle d'accès) et des planchers chauffants électriques. La puissance des planchers chauffants est mesurée de manière à avoir pour un étage courant la puissance consommés par les dalles supérieure et inférieure. Ces mesures se fond sur le niveau R+2 du bâtiment C2 et sur le niveau R+4 du bâtiment C3 (Figure 15).



Figure 15 : Mesure de la consommation électrique des planchers chauffants

2.4.3 Analyse de données d'instrumentation

Tableau 4 : Ouverture et fermeture des fenêtre du logement 004BE

Appartement	004BE
Type	T3
Surface	69 m ²
Période	Du 24/02/2020 au 01/03/2020

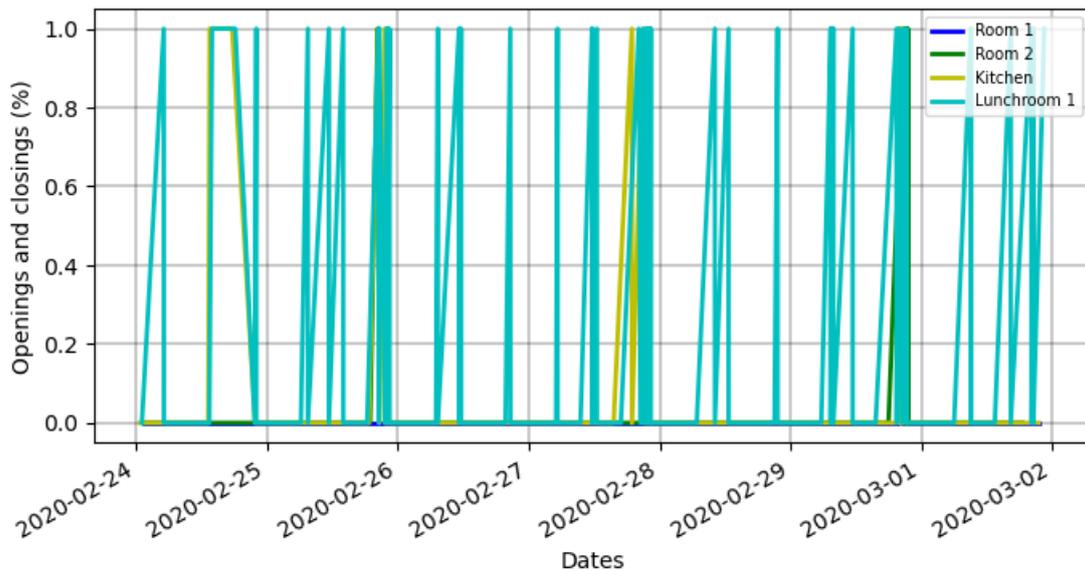


Figure 16 : Ouverture/fermeture de fenêtres / App 004BE / Hiver

Tableau 5 : Consommations électriques et d'ECS du logement 004BE

Appartement	004BE
Type	T3
Surface	69 m ²
Période	Du 24/02/2020 au 01/03/2020

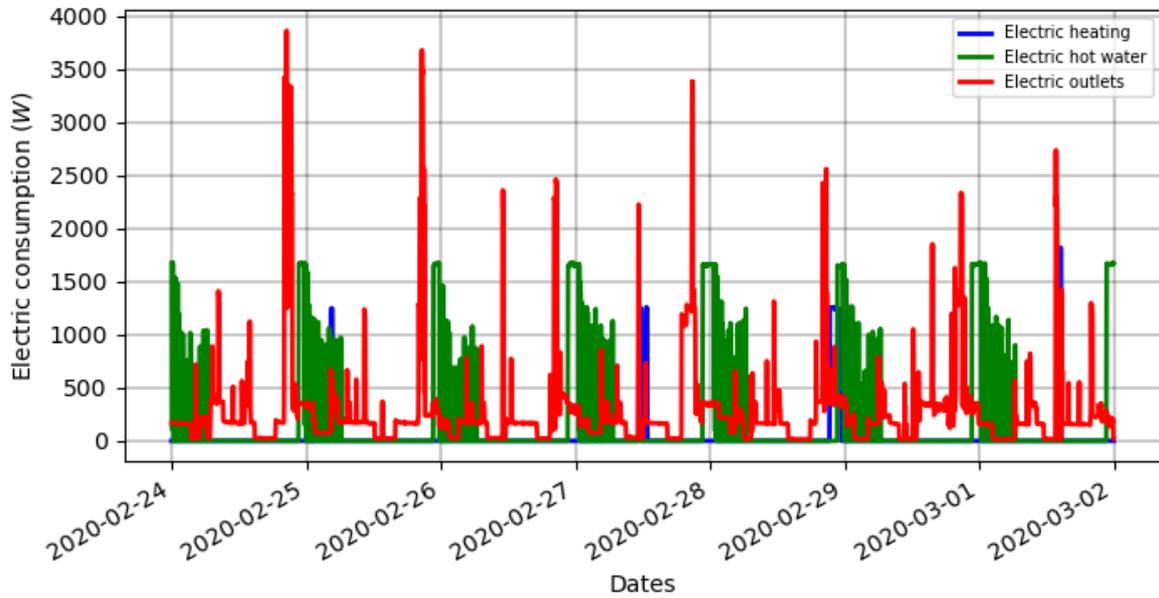


Figure 17 : Consommations électriques / App 004BE / Hiver

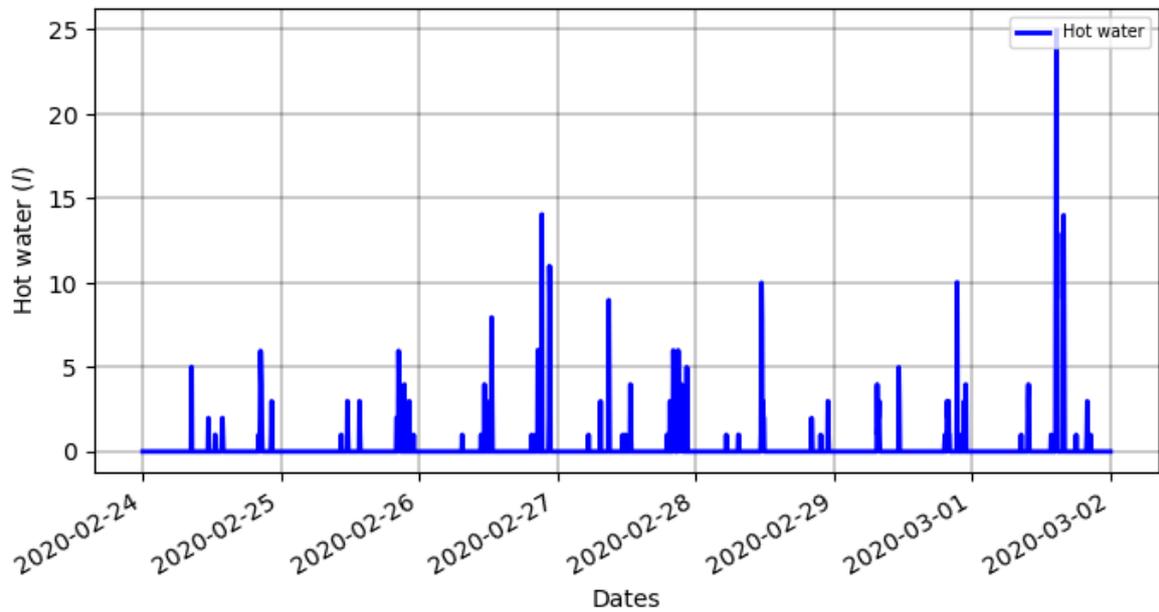


Figure 18 : Consommation volumique d'ECS / App 004BE / Hiver

Tableau 6 : Températures et humidité relatives du logement 004BE

Appartement	004BE
Type	T3
Surface	69 m ²
Période	Du 24/02/2020 au 01/03/2020

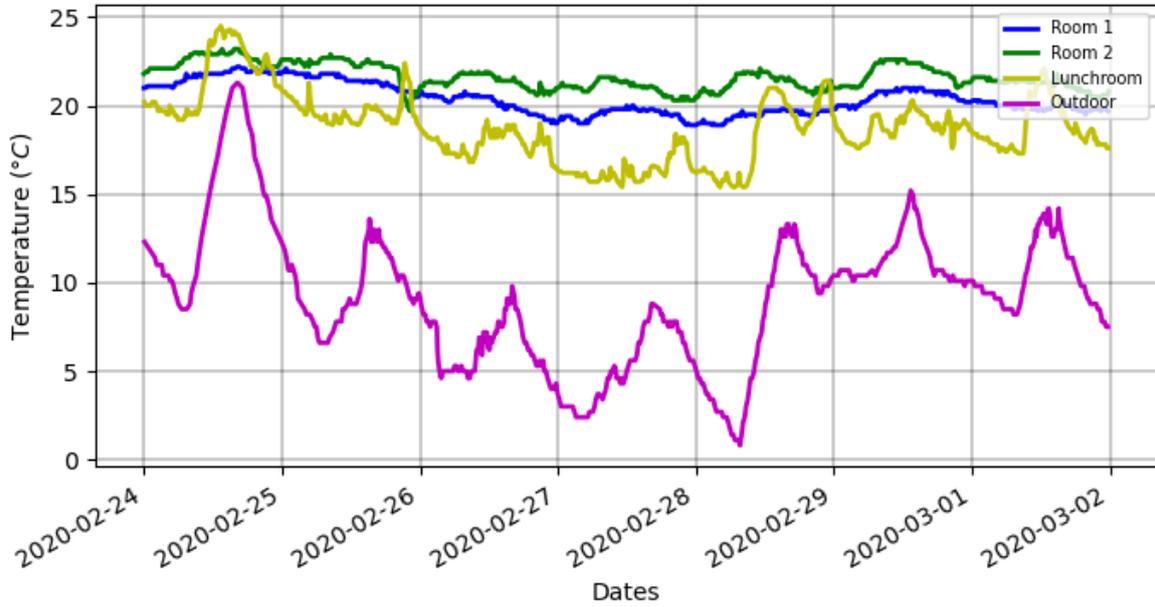


Figure 19 : Températures / App 004BE / Hiver

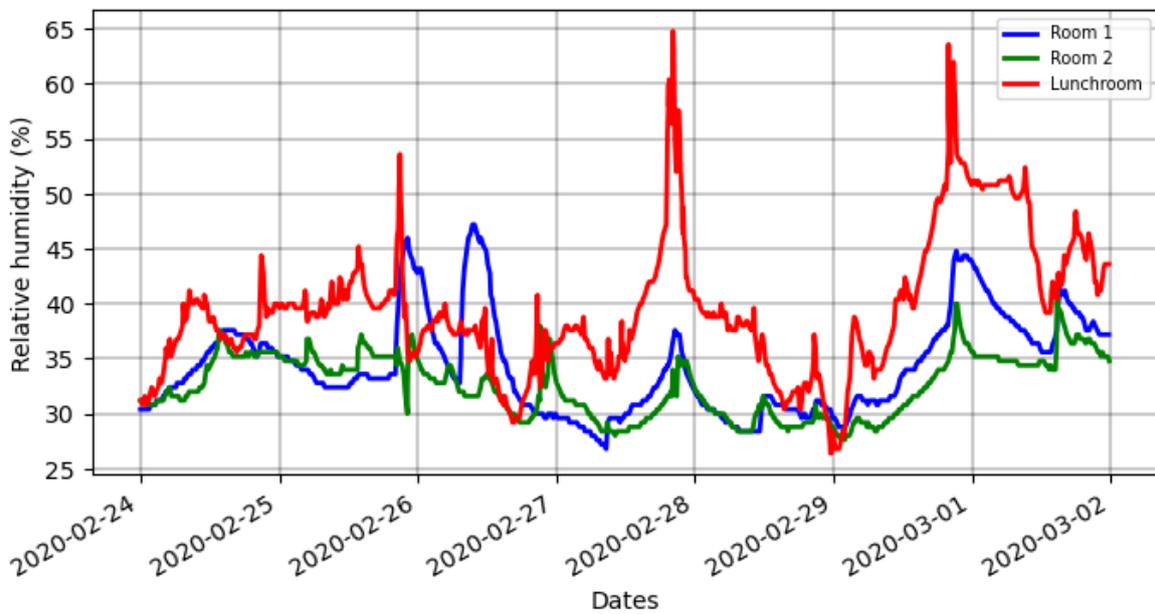


Figure 20 : Humidités relatives / App 004BE / Hiver

Tableau 7 : Consommation du chauffage électrique collectif sur les niveaux R+1 et R+2

Parties communes	Bât C2
Type	Chauffage électrique collectif
Surface totale	300 m ²
Période	Du 24/02/2020 au 01/03/2020

Floor heating electrical consumption / R+1 building C2

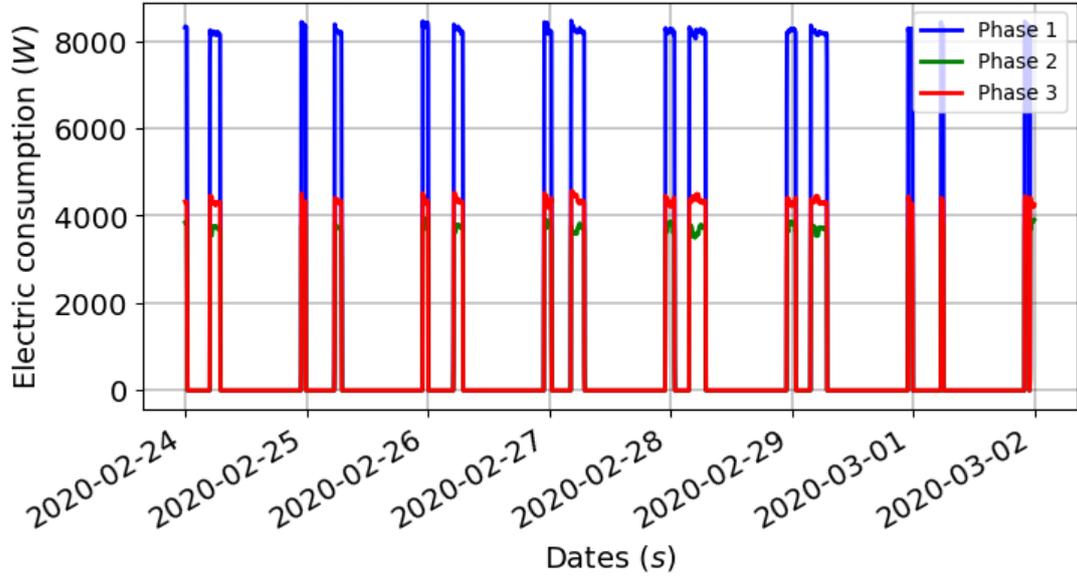


Figure 21 : Consommations électriques du planchers chauffants R+1 / Bât C2 / Hiver

Floor heating electrical consumption / R+2 building C2

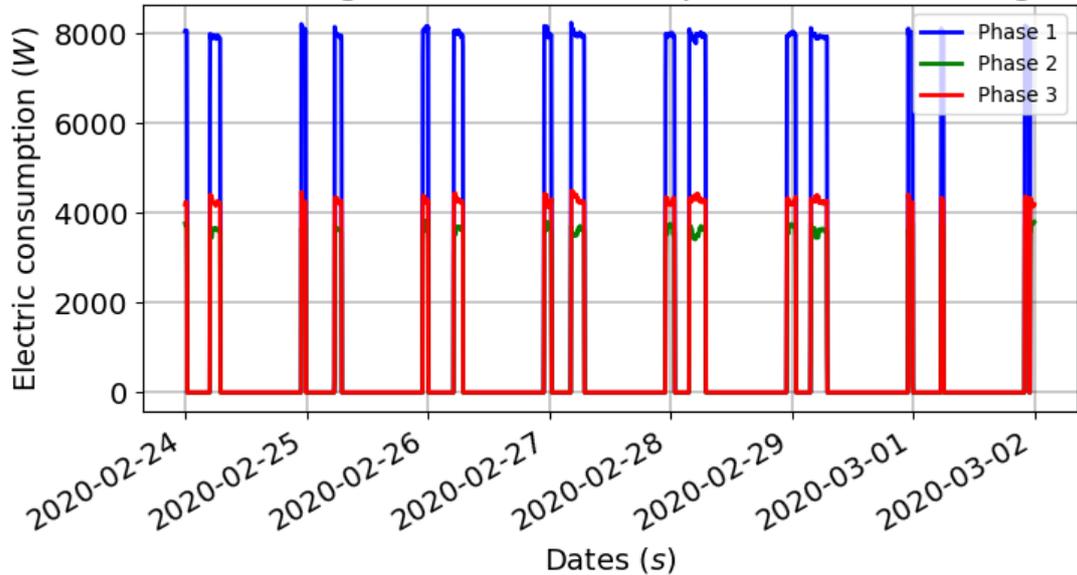


Figure 22 : Consommations électriques du planchers chauffants R+2 / Bât C2 / Hiver

Tableau 8 : Consommations électriques des parties communes

Parties communes	Bât C2
Type	Consommations électriques des parties communes
Surface totale	300 m ²
Période	Du 24/02/2020 au 01/03/2020

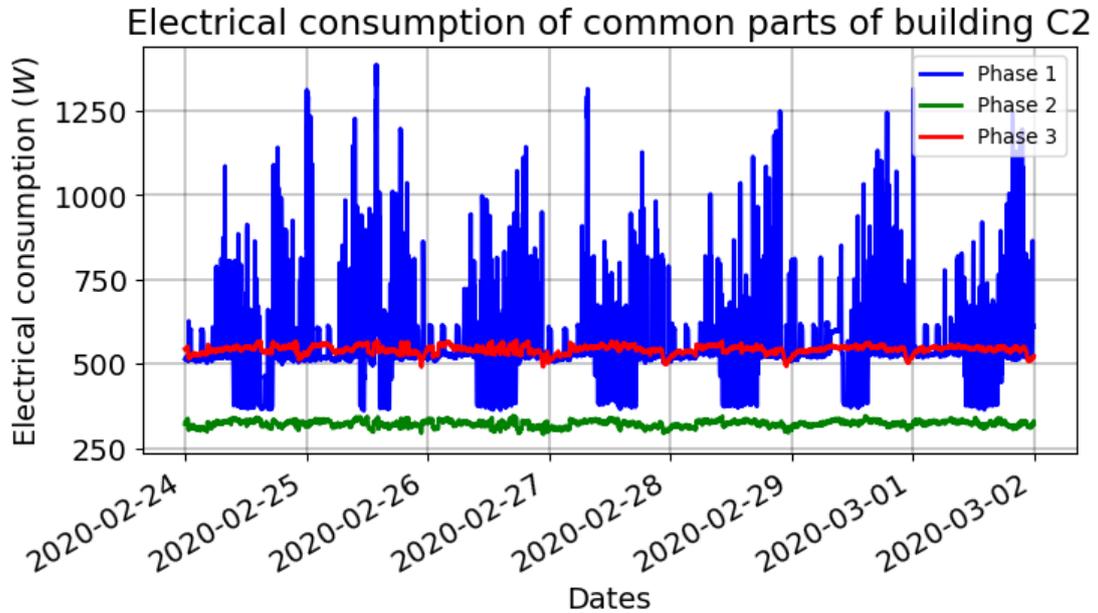


Figure 23 : Consommations électriques des communs / Bât C2 / Hiver

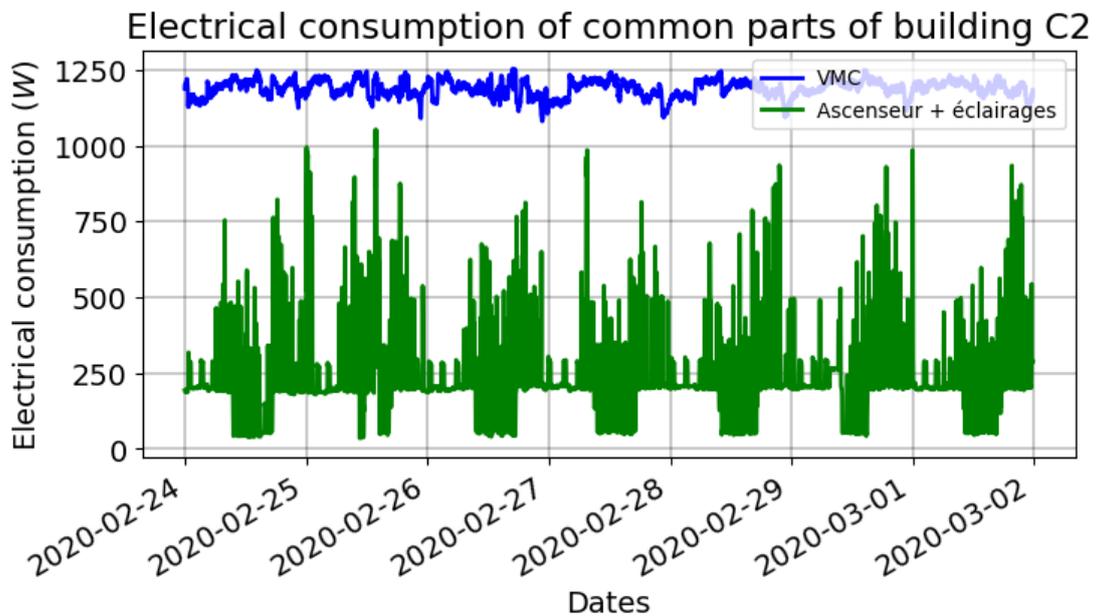


Figure 24 : Consommations électriques détaillées des communs / Bât C2 / Hiver

A l'échelle du logement, l'instrumentation a permis de déterminer les consommations électriques précises de différents usages ainsi que les consommations volumiques d'ECS. On voit ainsi sur les Figure 17 et Figure 18 les consommations électriques et volumiques d'ECS du logement 004BE. On remarque notamment que la consommation des auxiliaires (prises électriques) représente l'appel de puissance le plus important avec une occurrence en milieu de journée et le soir probablement due aux équipements de cuisines et de lavage. La production d'ECS via le cumulus électrique est le poste qui consomme le plus d'énergie à l'échelle du logement étant donné son fonctionnement sur des plages pouvant aller jusqu'à 6h. Cependant le mode de fonctionnement « heure creuse » des cumulus (clairement visible sur la Figure 17) permet d'optimiser le coût de fonctionnement via la tarification proposés par les fournisseurs. La Figure 18 permet quant à elle de se rendre compte des volumes d'ECS puisées et des fréquences de puisage. On remarque notamment en comparant les deux figures que le puisage et la production d'ECS ne se font pas aux mêmes moments de la journée. Enfin on remarque que la consommation électrique pour la production d'appoint de chauffage est très faible. Cela s'explique principalement par la présence du plancher chauffant électrique performant et d'une isolation relativement bonne.

Les Figure 19 et Figure 20 représentent les températures et humidités relatives dans différentes pièces sur une période d'une semaine en hiver. Couplées à la Figure 16 qui représente les fréquences d'ouvertures et de fermetures des fenêtres ces deux précédentes figures permettent de représenter le confort au sein du logement. On voit par exemple que les températures dans les chambres sont relativement constantes tandis que la température extérieure à des amplitudes pouvant aller de 20°C la journée à 0°C la nuit. Le séjour, beaucoup plus sujet à l'ouverture de fenêtre, notamment du fait de l'utilisation du balcon, présente une fluctuation de température plus importante que les chambres. On voit également sur la Figure 20 la fluctuation des humidités relative. Malheureusement l'humidité relative extérieure n'est pas mesurées mais il aurait été intéressant d'en disposer afin de la comparer aux humidités relatives intérieures. On peut cependant supposer qu'elle est plus élevée à l'extérieur en hiver. On voit sur cette figure que les humidités relatives des chambres présentent des pointes, qui reflètent leur occupation, principalement les soirs et la nuit. On remarque également deux pointes d'humidités relatives importantes dans le séjour sans baisse significative de température malgré une forte corrélation avec l'ouverture de la fenêtre donnant sur le balcon.

Les Figure 21 et Figure 22 représentent les consommations électriques du plancher chauffant électrique sur deux niveaux bien précis : le R+1 et le R+2. On voit que la puissance appelée est très importante : environ 16 kW par niveau. A l'échelle de la résidence c'est près de 500 kW de puissance électrique nécessaire au fonctionnement de ces planchers chauffants. Si l'on se penche sur un étage ces 16 kW permettent de chauffer environ 320 m² de plancher soit environ 50 W par m² de plancher. Ramené à un logement de 80 m² cela représente 4000 W de puissance électrique. Ces systèmes de plancher chauffant électrique sont donc très performants d'autant plus qu'ils fournissent un très bon confort thermique du fait du mode de diffusion de la chaleur et qu'ils ont une excellente inertie thermique grâce à la dalle en béton. Renforcés par une isolation thermique par extérieur ils représentent une solution de chauffage très intéressante du point de vue des consommations énergétiques du bâtiment et du confort des occupants.

La récolte et l'analyse de ses données de consommation et de confort à l'échelle des logements et des parties communes s'est faite sur plusieurs mois et a permis d'identifier des comportements type ainsi que des besoins spécifiques. Ces données ont permis par la suite d'alimenter des réflexions sur les solutions de rénovations potentielles que nous aborderons plus loin.

2.5 Estimations de productibles électriques photovoltaïques

2.5.1 Objectifs et méthode

Dans le but d'étudier les solutions envisageables dans le cadre de la rénovation énergétique de la résidence « Le Plateau », tant du point de vue des systèmes énergétiques que des technologies de stockage nécessaires, il nous est apparu important de déterminer à la fois le potentiel de production électrique photovoltaïque et les consommations réelles post rénovation des bâtiments.

Afin de mener cette première étude de la production d'énergie électrique potentielle à partir de panneaux solaires photovoltaïques, nous avons choisi d'utiliser le logiciel BIMsolar qui est à la fois une plate-forme WEB communautaire et un logiciel connecté dédiés à la valorisation des innovations solaires en architecture. Fondée en juin 2015, la société EnerBIM qui a développé le logiciel BIMsolar se spécialise dans les solutions numériques pour la transition énergétique destinées au bâtiment et en vue de permettre une interopérabilité des données du BIM (Building Information Modeling).

Cette étude sera divisée en plusieurs parties. Nous verrons d'abord une description succincte du logiciel et du modèle 3D des bâtiments étudiés. Puis sera présenté un descriptif des données météorologiques utilisées pour les simulations. Ensuite nous présenterons le déroulement d'une simulation type ainsi que les différents paramètres d'entrée des modèles dans BIMsolar. Enfin nous ferons une analyse des résultats de simulations obtenues pour plusieurs configurations types. Puis nous terminerons cette étude par une conclusion permettant de synthétiser les étapes menées et ouvrant des pistes pour la suite du projet.

2.5.2 Modèle 3D

Afin de pouvoir évaluer le potentiel photovoltaïque nous avons créé un modèle 3D de nos bâtiments à partir du logiciel SketchUp. Il s'agit d'un logiciel de modélisation 3D à l'origine créé pour l'architecture et qui est utilisé maintenant dans d'autres domaines (urbanisme, menuiserie, scénographie, graphisme...). Ce choix a été fait car le logiciel est simple d'utilisation et présente de nombreuses fonctionnalités. Entre autres l'organisation efficace du modèle permettant de créer facilement des variantes d'un même projet ainsi que le format des fichiers SKP qui est très répandu et qui peut être lu par le logiciel BIMsolar.

Les bâtiments voisins ont également été intégrés en respectant les dimensions et les distances réelles afin de pouvoir tenir compte des effets d'ombrage qui sont déterminants dans le cas d'une étude d'installation solaire. L'orientation des bâtiment vis-à-vis du nord, qui est

essentiel pour le calcul du rayonnement solaire, a également été définie conformément à la réalité. La Figure 25 montre le rendu obtenu avec une représentation des formes globales mais suffisante des bâtiments bien que le logiciel SketchUp permette d'aller bien plus dans les détails.

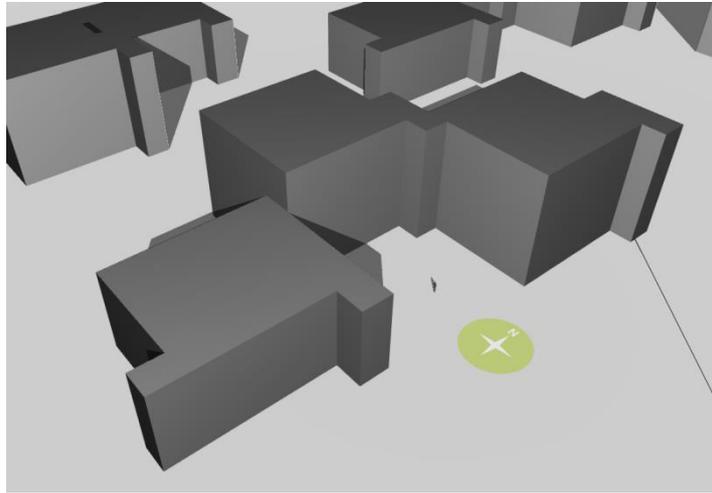


Figure 25 : Vu du modèle 3D de la résidence

2.5.3 Données météorologiques

BIMsolar possède ses propres fichiers météo. Cependant il est également possible d'importer d'autres données météo au format .csv en indiquant les données correspondantes :

- rayonnement direct normal (Wh/m^2)
- rayonnement diffus (Wh/m^2)
- température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

Afin de comparer les résultats obtenus avec d'autres outils de simulation, nous avons importé nos propres fichiers météo issus du site de la Commission Européenne pour les services de la science et de la connaissance (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). Ces données météo fournissent différentes informations (rayonnement direct, global et diffus, vitesse du vent, température de l'air et hauteur du soleil) en fonction de la position géographique et pour une période allant du 01-01-2005 00h00 au 31-12-2016 23h00. Afin d'exploiter ces données dans le logiciel BIMsolar, nous les avons moyennées dans le but de recréer une année type plus représentative.

La résidence Le Plateau se situe à une altitude de 284 m. Nous pouvons lire sur la Figure 26 l'azimut et la hauteur du soleil observable à Villefontaine en fonction de la période de l'année et de l'heure de la journée. La courbe rouge correspond à la course solaire au solstice d'été tandis que la courbe verte correspond au solstice d'hiver.

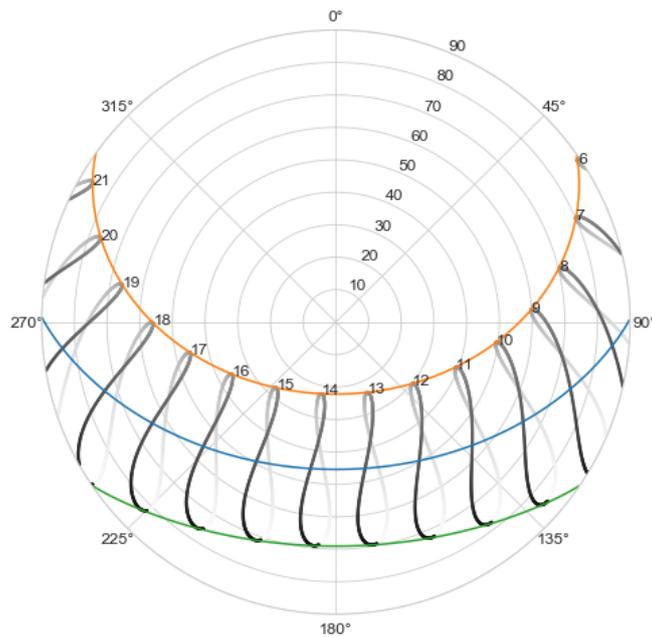


Figure 26 : Trajectoire solaire à Villefontaine.

Les figures suivantes représentent les températures en degrés Celsius (Figure 27 et Figure 28) et le rayonnement solaire en Wh/m² (Figure 29 et Figure 30) pour les périodes les plus chaudes et les plus froides de cette année type.

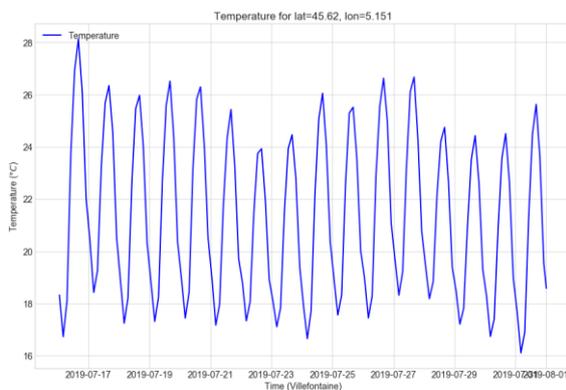


Figure 27 : Température extérieure pour la période la plus chaude (du 15-07 au 31-07)

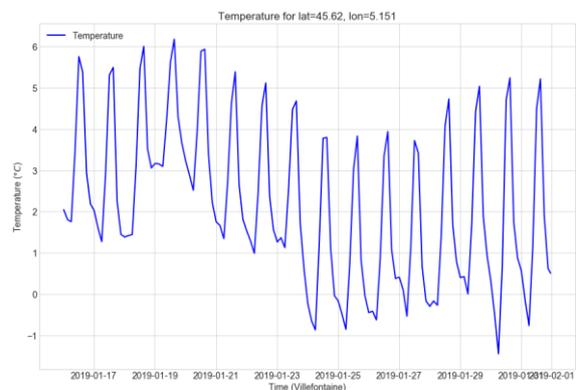


Figure 28 : Température extérieure pour la période la plus froide (du 15-01 au 31-01)

Nous pouvons voir que les valeurs maximales du rayonnement solaire direct pour la période la plus chaude se situent entre 500 et 700 Wh/m² aux alentours de 12 h. Pour la période la plus froide ces mêmes valeurs maximales se situent plutôt entre 180 et 300 Wh/m².

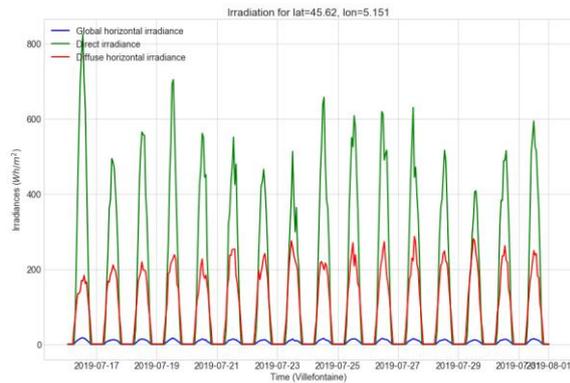


Figure 29 : Rayonnement solaire direct, diffus et global pour la période la plus chaude (du 15-07 au 31-07)

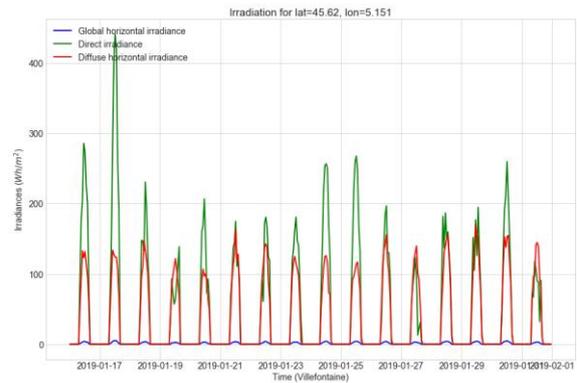


Figure 30 : Rayonnement solaire direct, diffus et global pour la période la plus froide (du 15-01 au 31-01)

La Figure 31 représente une vue 3D de la résidence Le Plateau à Villefontaine et des bâtiments voisins ainsi que les trajectoires solaires en fonction des saisons et de l'heure de la journée.

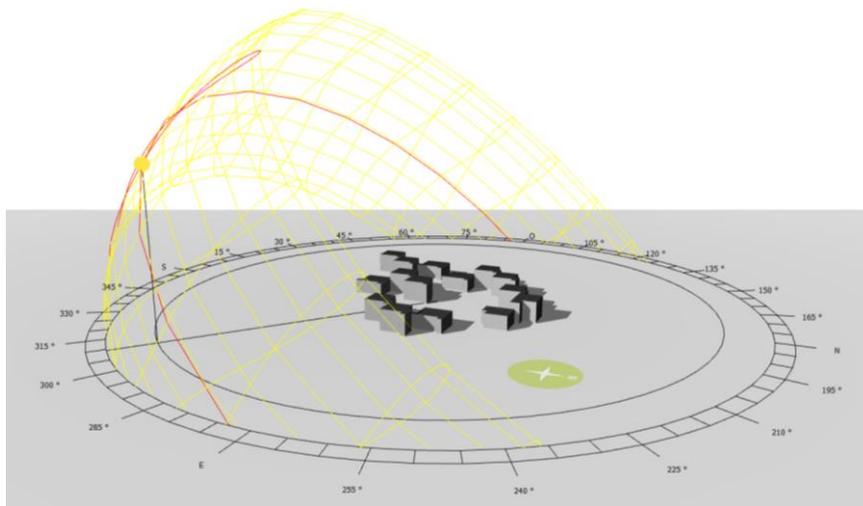


Figure 31 : Vu 3D de la trajectoire solaire au niveau de la résidence Le Plateau.

Sur la Figure 32 est représenté le rayonnement direct annuel moyen obtenu à partir du fichier météo. Ce rayonnement correspond à la quantité d'énergie solaire moyenne reçue sur la commune de Villefontaine au cours d'une année. Elle s'exprime en kWh/m². Le rayonnement global atteint est de 1175 kWh/m² sur les toitures.

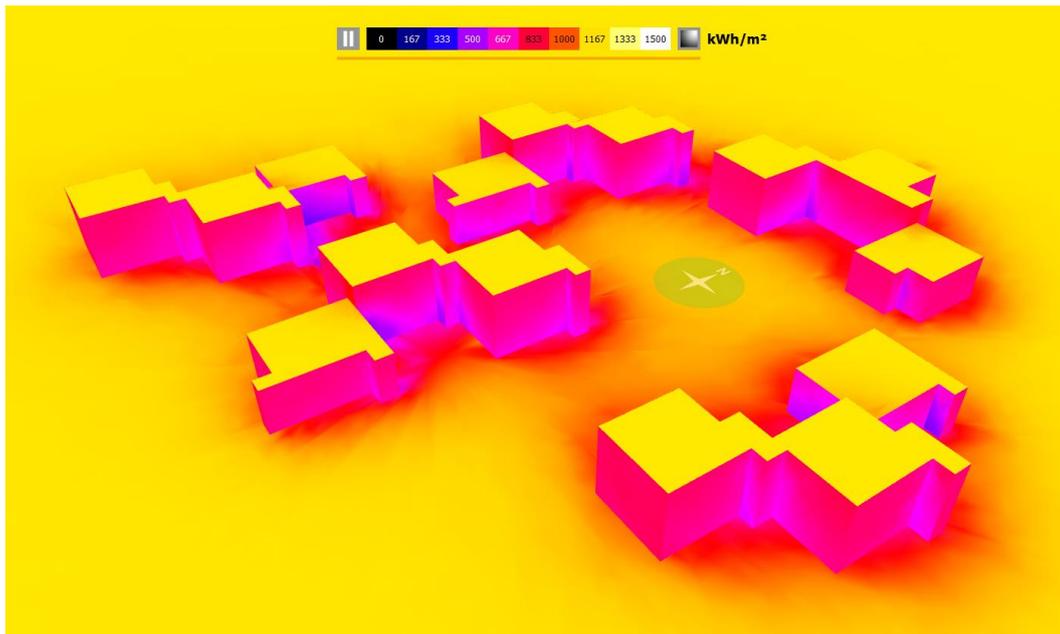


Figure 32 : Irradiance annuelle en kWh/m².

2.5.1 Définition du système photovoltaïque

Le système photovoltaïque se compose de panneaux solaires et d'onduleurs dont nous allons définir les propriétés et caractéristiques.

2.5.1.1 Panneaux solaires PV

Le choix de l'implantation des panneaux solaires et du système photovoltaïque se fait directement sur le logiciel. Plusieurs situations seront testées afin de dégager des tendances et avoir des ordres d'idée de la production électrique envisageable.

Nous définissons tout d'abord le modèle de panneau ainsi que différents paramètres d'implantation dont l'emplacement, l'orientation, l'inclinaison, le nombre de panneaux et l'espacement entre panneaux. BIMsolar possède une large bibliothèque de panneaux solaires parmi laquelle nous pouvons importer de nombreux modèles en fonction du fournisseur, de la puissance ou encore du type de technologie.

Les spécifications prises en compte sont les suivantes :

- technologie : monocristallin ou polycristallin
- puissance crête ou nominale [Wc]
- surface [m²]
- nombre de cellules
- nombre de diodes bypass (influence sur la production du panneau s'il est à l'ombre)
- température de fonctionnement nominale du module (NMOT : Nominal Module Operating Temperature)
- tension à puissance maximum : Vmpp [V]
- tension à circuit ouvert : Vocc [V] (correspond au nombre de volts produits sans charge)

- courant de court-circuit : I_{cc} [A] (courant produit lorsque les bornes du panneau sont connectées entre elles)
- courant à puissance maximum : I_{mpp} [V].

Une fois le modèle de panneau choisi nous définissons le nombre de rangées, l'espacement et l'implantation. L'espacement entre panneaux et entre rangées va exercer une influence sur l'ombrage subit par les panneaux. La Figure 33 montre l'implantation faite pour une configuration avec panneaux en toiture.

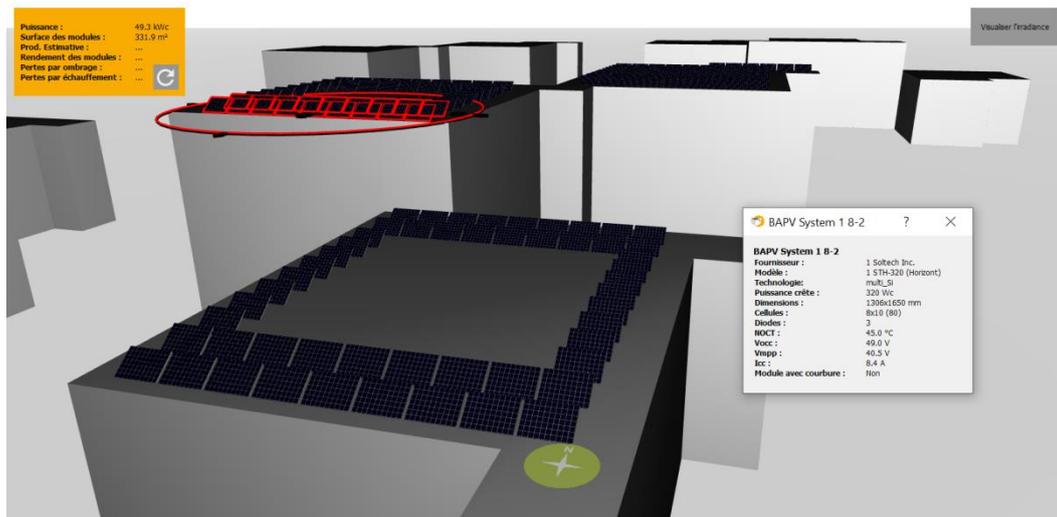


Figure 33 : Choix des panneaux PV et implantation

2.5.1.2 Onduleurs

La fonction principale de l'onduleur photovoltaïque est de convertir l'électricité produite avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité vers le réseau électrique. Il convertit le courant continu des modules en courant alternatif identique à celui du réseau. Durant cette conversion l'onduleur recherche à chaque instant le point maximal de fonctionnement (MPP) en fonction des caractéristiques (courant I et tension U) des modules photovoltaïques. Le choix du bon onduleur est alors important et significatif vis-à-vis de l'optimisation de la production.

Le choix de l'onduleur sur le simulateur BIMsolar se fait parmi une large bibliothèque toujours en fonction du fournisseur, de la puissance et de différentes autres caractéristiques parmi les suivantes :

- puissance
- tension maximale en courant continue : $V_{max DC}$ [V]
- intensité maximale en courant continue : $I_{max DC}$ [A]
- tension minimale de fonctionnement en courant continue : MPP $V_{min DC}$ [V]
- tension maximale de fonctionnement en courant continue : MPP $V_{max DC}$ [V]
- efficacités [%]
- section et résistance électrique linéique des câblages.

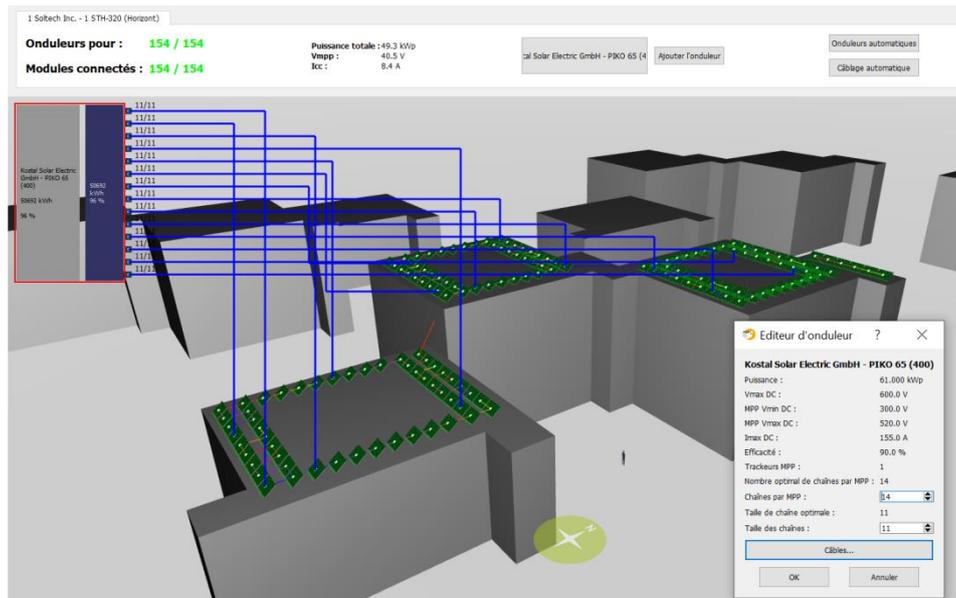


Figure 34 : Choix des onduleurs et câblage des modules.

Une fois le choix de l'onduleur fait, en fonction également du nombre de panneaux à connecter, les différents raccordements correspondant aux câblages sont réalisés. La section des câbles ainsi que leur résistance électrique linéique est prise en compte par le logiciel. Un raccordement optimal avec des distances de câblage réduites au maximum permettra d'avoir de meilleurs résultats de simulations. La Figure 34 présente l'interface logicielle permettant de réaliser le choix d'onduleur et les raccordements correspondants.

2.5.2 Simulations de production électrique

Afin de comparer les solutions de production envisageables nous allons simuler quatre configurations :

- panneaux en toitures
- panneaux en toitures optimisés
- cellules photovoltaïques silicium intégrées aux éléments de façade.
- cellules photovoltaïques CISG intégrées aux éléments de façade.

L'objectif étant de dégager un ordre de grandeur de la production électrique possible afin de mener d'autres études en lien avec les systèmes énergétiques recevables et les solutions de stockages envisageables.

2.5.2.1 Simulation 1 : Panneaux en toitures

Pour cette première simulation le matériel choisi en termes de générateur photovoltaïque (modules solaire et onduleurs) sont données dans les

Tableau 9 et Tableau 10.

Tableau 9 : Choix des panneaux (simulation 1).

Panneaux solaires photovoltaïques	
Fournisseur	Soltech Inc.
Modèle	STH-320 (Horizontal)
Technologie	Polycristallin
Puissance crête	320 Wc
Dimensions	1.306 x 1.650 m
Cellule photovoltaïque	8 x 10 (80 par panneau)
Diode bypass	3
NMOT	45°C
V _{mpp}	40.5 V
V _{oc}	49.0 V
I _{cc}	8.4 A

Tableau 10 : Choix des onduleurs (simulation 1)

Onduleurs	
Fournisseur	Kostal Solar Electric GmbH
Modèle	PIKO 65 (400)
Puissance	61.000 kWp
V _{max} DC	600 V
I _{max} DC	155 A
MPP V _{min} DC	300 V
MPP V _{max} DC	520 V
Efficacités	90 %
Résistance électrique linéique	0.028 ohm/mm ² /m
Section	4.0 mm ²

La configuration choisie en termes de nombre de panneaux et de disposition sont données dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Configuration de panneaux solaires (simulation 1).

Panneaux solaires photovoltaïques	
Nombre de panneau installés	154
Surface totale	331.8 m ²
Inclinaison des panneaux	40°
Espacement entre panneaux	0.10 m
Espacement entre rangés	0.60 m

Sur la Figure 35 nous pouvons voir la production photovoltaïque journalière estimée. Celle-ci est nettement plus importante en été, ce qui est cohérent. Nous constatons également qu'il peut y avoir des fluctuations importantes d'un jour à l'autre sur des périodes proches, cela

étant essentiellement dû à la variation du rayonnement solaire direct et diffus dépendant de la couverture nuageuse.

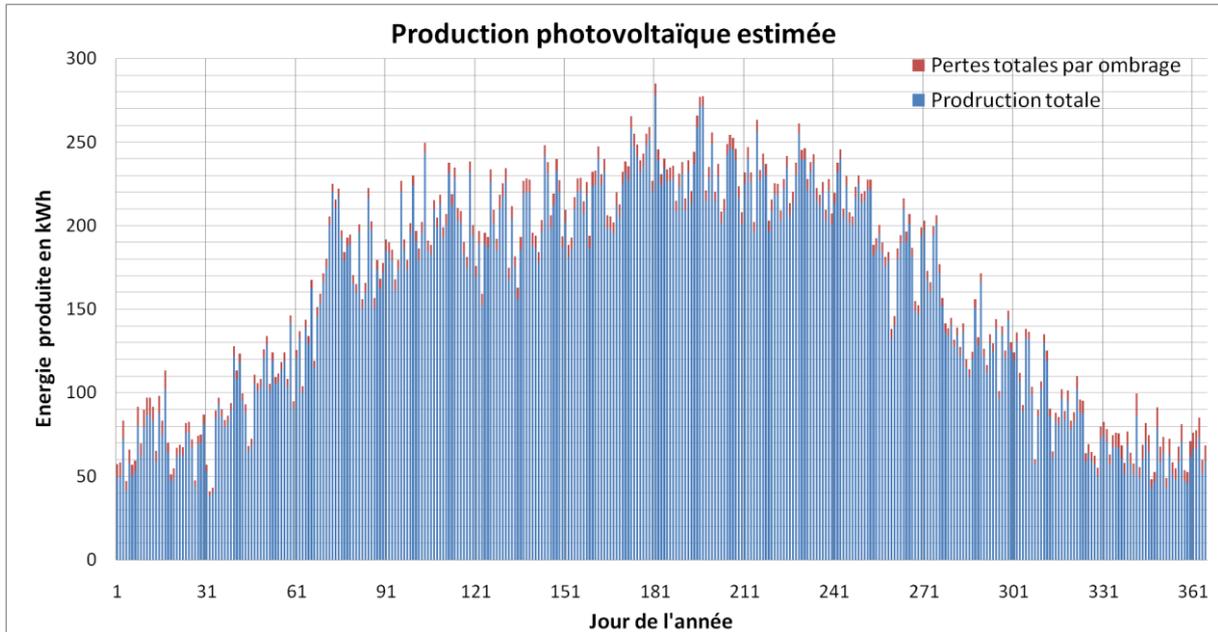


Figure 35 : Production électrique journalière estimée (simulation 1)

Si nous représentons ces productions de façon mensuelles (Figure 36) il est possible de noter qu'il y a un écart de production important entre les mois de décembre et juillet.

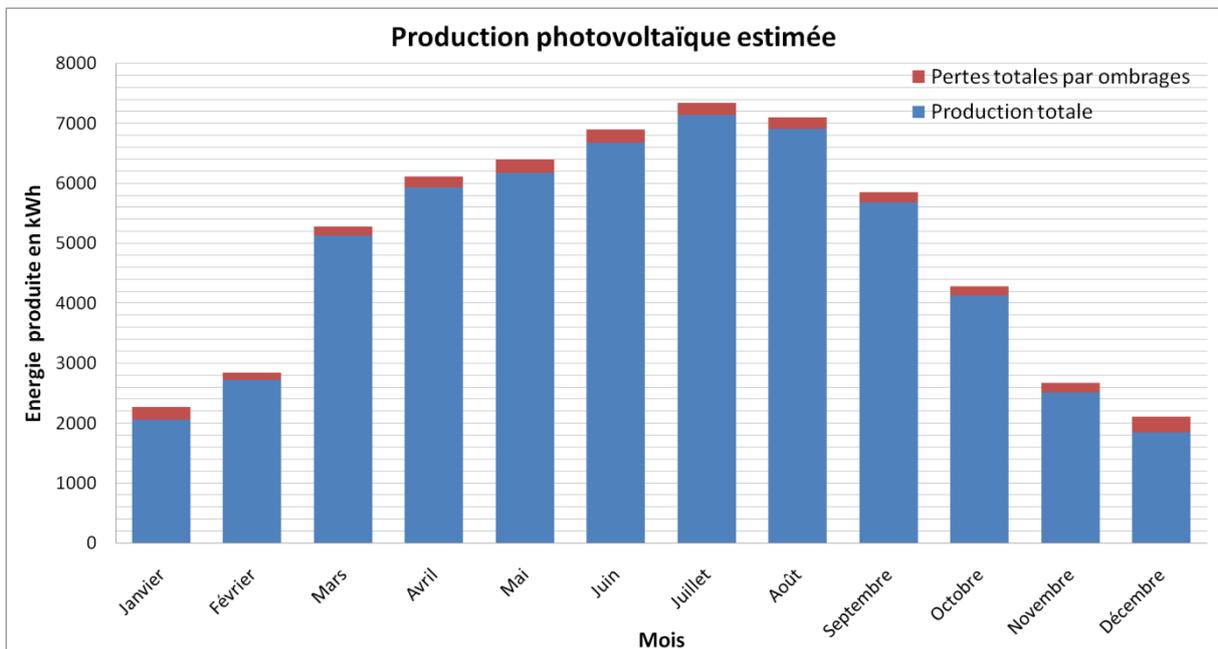


Figure 36 : Production électrique mensuelle estimée (simulation 1)

Le Tableau 12 représente la même production photovoltaïque estimée mais détaillée mensuellement. Nous remarquons alors de façon plus globale que le mois de décembre est le moins profitable avec 1850 kWh d'électricité produite tandis que le mois de juillet

permettrait de produire environ 7130 kWh. L'essentiel de la production, c'est-à-dire 67%, se fait entre les mois d'avril et septembre ce qui représente une problématique majeure étant donné que ce sont des périodes sans chauffage.

Nous remarquons également que les pertes par ombrage sont proportionnellement plus importantes sur les mois d'hivers lorsque la hauteur du soleil est au plus bas. Ces pertes par ombrage étant principalement dues à l'ombre créée par les panneaux voisins.

Tableau 12 : Production électrique mensuelle estimée (simulation 1)

	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrages [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	2061	213	3,6%	10,3%
Février	2727	119	4,8%	4,4%
Mars	5128	153	9,0%	3,0%
Avril	5932	183	10,4%	3,1%
Mai	6175	215	10,8%	3,5%
Juin	6677	215	11,7%	3,2%
Juillet	7132	207	12,5%	2,9%
Août	6905	191	12,1%	2,8%
Septembre	5682	167	10,0%	2,9%
Octobre	4133	144	7,3%	3,5%
Novembre	2512	164	4,4%	6,5%
Décembre	1850	262	3,3%	14,2%
Total	56914	2231	100,0%	

Cette estimation, dans le cas d'une configuration bien spécifique et plutôt favorable vis-à-vis du nombre de panneaux installés et de la surface réellement disponible en toiture, donne une idée du potentiel de production électrique photovoltaïque.

2.5.2.2 Simulation 2 : Panneaux en toitures optimisés

Pour cette seconde simulation le modèle de panneau solaire choisi est le même que précédemment. Seul le modèle d'onduleur et la configuration des panneaux vont changer dans le but de réduire le nombre de panneaux tout en optimisant la production vis-à-vis des pertes par ombrage. Ce choix de réduire le nombre de panneaux a été fait dans le but de créer un handicap vis-à-vis de la surface réellement disponible qui est supposée moins importante. En effet, des gaines de ventilation et autres systèmes sont présents sur les toitures terrasses des bâtiments.

Les caractéristiques de l'onduleur choisi pour cette simulation sont données dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Choix des onduleurs (simulation 2)

Onduleurs	
Fournisseur	Kostal Solar Electric GmbH
Modèle	PIKO 65 (400)
Puissance	61.000 kWp
Vmax DC	600 V
Imax DC	155 A
MPP Vmin DC	300 V
MPP Vmax DC	520 V
Efficacités	90 %
Résistance électrique linéique	0.028 ohm/mm ² /m
Section	4.0 mm ²

La configuration choisie est donnée dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Configuration de panneaux solaires (simulation 2)

Panneaux solaires photovoltaïques	
Nombre de panneau installés	130
Surface totale	280.1 m ²
Inclinaison des panneaux	40°
Espacement entre panneaux	0.40 m
Espacement entre rangés	1.20 m

Il est possible de voir sur les Figure 37 et Figure 38 que les pertes par ombrage sont moins importantes que pour la simulation précédente. Nous constatons cependant les mêmes fluctuations journalières simplement dues au fichier météo identique.

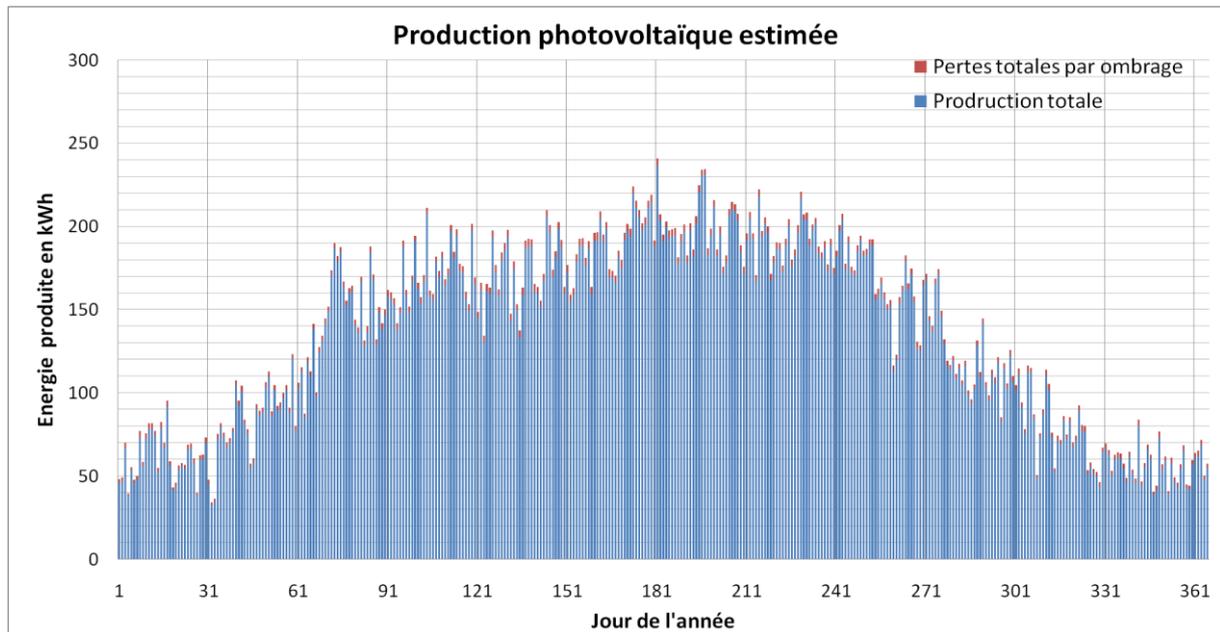


Figure 37 : Production électrique journalière estimée (simulation 2)

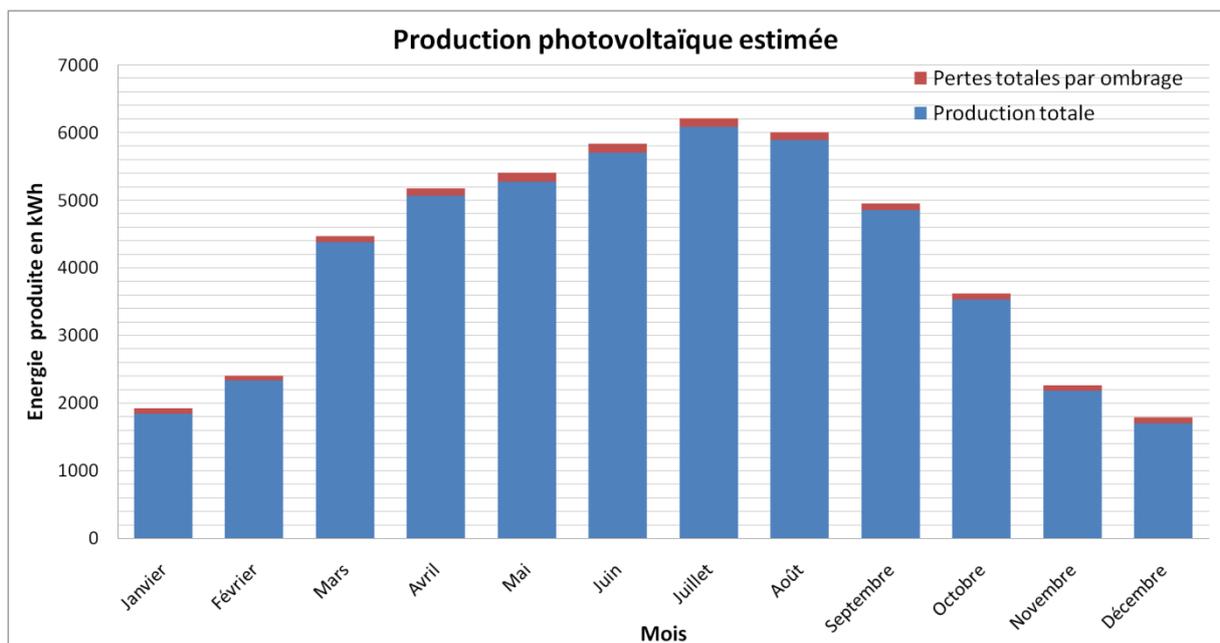


Figure 38 : Production électrique mensuelle estimée (simulation 2)

Le Tableau 15 reprend plus en détail les résultats de cette simulation. Nous remarquons que le taux de pertes par ombrage a globalement diminué grâce à une réduction du nombre de panneaux et à une augmentation des espacements. En revanche le taux de production est toujours de 67% entre les mois d'avril et septembre.

Tableau 15 : Production électrique mensuelle estimée (simulation 2)

Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	------------------------

Janvier	1840	82	3,8%	4,5%
Février	2331	77	4,8%	3,3%
Mars	4377	93	9,0%	2,1%
Avril	5067	111	10,4%	2,2%
Mai	5278	130	10,8%	2,5%
Juin	5703	130	11,7%	2,3%
Juillet	6088	126	12,5%	2,1%
Août	5893	116	12,1%	2,0%
Septembre	4851	101	9,9%	2,1%
Octobre	3529	90	7,2%	2,6%
Novembre	2179	82	4,5%	3,8%
Décembre	1701	85	3,5%	5,0%
Total	48838	1225	100%	

Finalement, la production diminue de 14 % alors que les pertes par ombrage diminuent de 45% ce qui représente une optimisation conséquente et probablement un gain économique non négligeable.

2.5.2.3 Simulation 3 : Cellule de silicium en façades

Bien que les toitures soient l'endroit préféré pour l'installation de systèmes solaires photovoltaïques du fait de leur ensoleillement privilégié, les façades sont elles aussi de plus en plus utilisées dans le but d'augmenter les capacités de production du fait de leurs surfaces plus importantes. Il est important de noter que le ratio entre la surface des façades et la surface de la toiture d'un bâtiment augmente avec la hauteur de celui-ci.

Pour cette troisième simulation nous allons étudier un cas de production photovoltaïque avec une solution de type BIPV (Building Integrated PhotoVoltaïcs). Il s'agit d'un concept relativement récent consistant à intégrer des cellules photovoltaïques dans l'enveloppe du bâtiment et conduisant à établir une relation entre l'architecture, la structure et la production d'énergie renouvelable.

Deux principaux types de technologie BIPV existent :

- Les modules de silicium cristallin : ces modules sont constitués de plusieurs cellules en cristaux de silicium (monocristal ou polycristal), généralement de dimension 150 x 150 mm branchées entre elles.
- Les modules à couche mince : Ils sont constitués d'un semi-conducteur de quelques microns d'épaisseur (par exemple alliage CIGS : cuivre, indium, gallium et sélénium), généralement installés sur du verre conducteur. La transparence est obtenue sur certains films par ablation de multitude de trous micrométriques au laser permettant ainsi de laisser passer la lumière.

Pour cette simulation nous utiliserons des modules de silicium cristallin intégrés aux éléments de façade. L'objectif étant de déterminer la quantité d'énergie électrique productible en utilisant des cellules photovoltaïques intégrées aux éléments de façade.

Les modules utilisés pour la simulation sont constitués de plusieurs cellules élémentaires hexagonales. Nous avons choisi pour ces cellules un modèle standard dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Cellule élémentaire BIPV silicium

	Technologie	Mono silicium
	Fournisseur	Lumos
	Modèle	LSX Pseudo 3bb
	Puissance crête	4.7 Wc
	Dimensions	156 x 156 mm
	V _{oc}	0.66 V
	V _{mpp}	0.53 V
	I _{cc}	9.40 A

Pour des raisons esthétiques nous supposons que les modules recouvrent la quasi-totalité des surfaces de façade non vitrées sur toutes les orientations afin de garantir une homogénéité dans l'apparence des bâtiments. La surface totale recouverte est de 1800 m². Les Figure 39, Figure 40 et Figure 41 montrent de quelle façon ont été implantés les modules de façade, en accord avec les plans et les cotations réelles des bâtiments. L'irradiance solaire y est également représentée. Nous constatons sans surprise que les façades Nord et Ouest reçoivent moins de flux, ce qui va a priori avoir un impact sur la production électrique des panneaux situés sur ces façades.

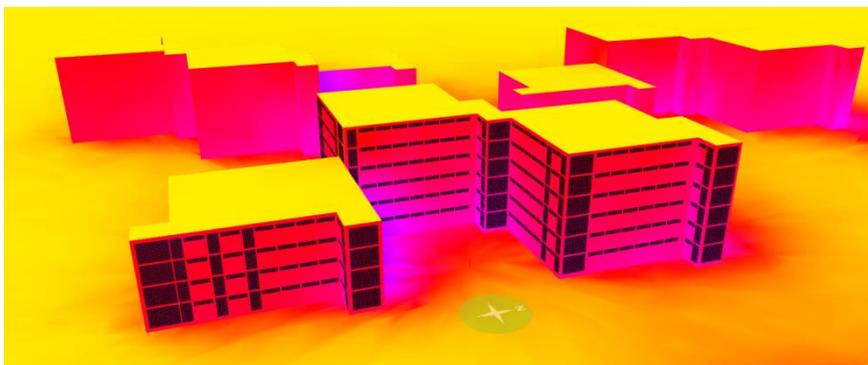


Figure 39 : Implantation BIPV de silicium vu Est

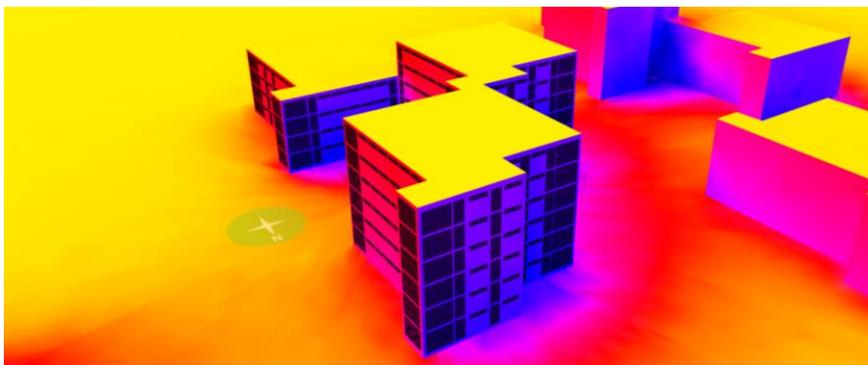


Figure 40 : Implantation BIPV de silicium vu Nord

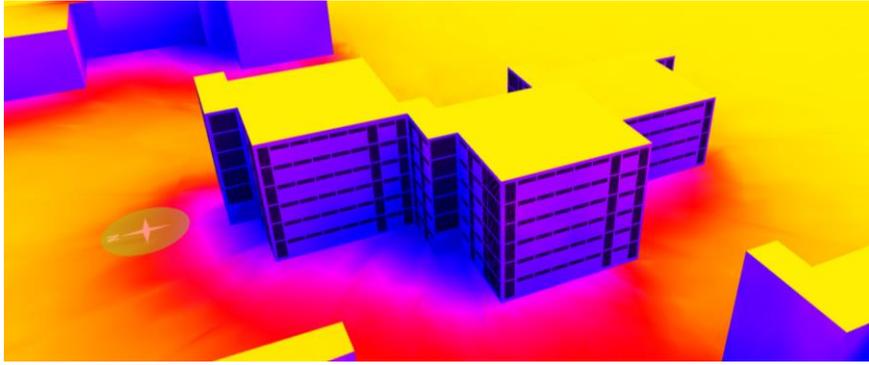


Figure 41 : Implantation BIPV de silicium vu Ouest

A partir de ces cellules élémentaires sont construits différents modules avec des dimensions variables et des caractéristiques spécifiques dépendant du nombre de cellules et de leurs assemblages. Ces caractéristiques sont calculées de façon automatique par le logiciel.

La Figure 42 représente la production électrique pour chaque mois d'une année type en fonction de l'orientation des façades. Nous pouvons remarquer que les façades orientées Est sont celles qui produisent le plus d'énergie avec un maximum de 5700 kWh en juillet. Cet effet est dû au fait que les façades Est reçoivent un rayonnement dont l'angle d'incidence sur les panneaux solaires est relativement faible du fait de l'inclinaison à 90° de ces derniers.

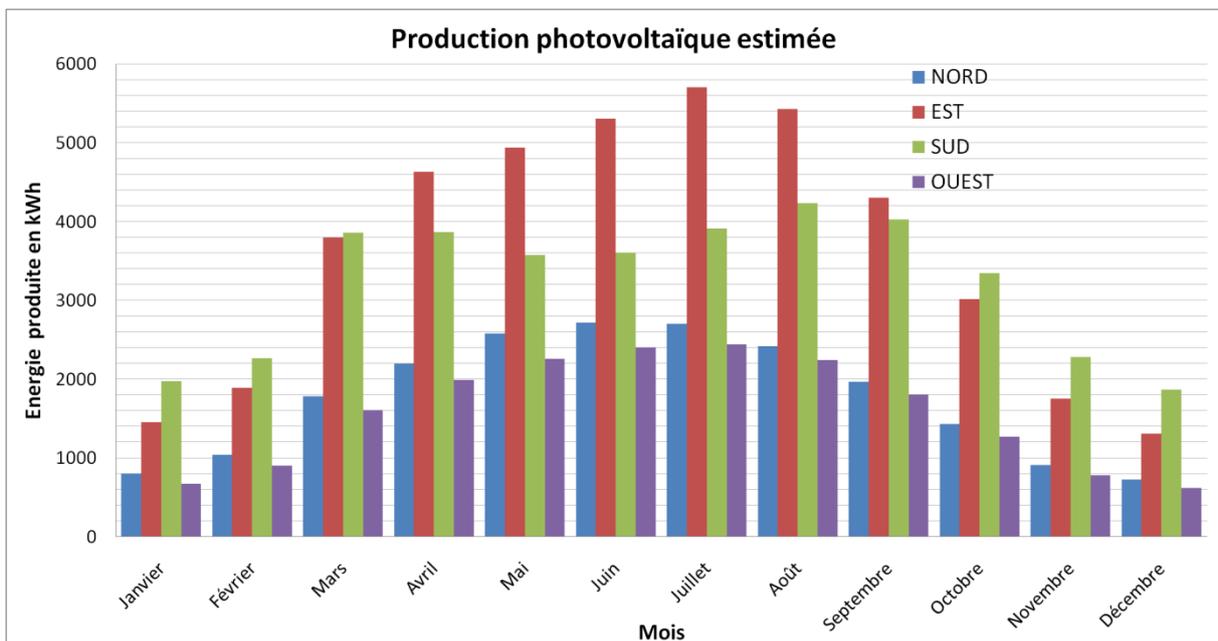


Figure 42 : Production électrique mensuelle estimée (simulation 3)

Les façades Ouest et Nord sont celles qui produisent le moins avec une production minimale de 618 kWh sur l'intégralité des façades Ouest pour le mois de décembre. L'ombrage des bâtiments voisins est le principal responsable de ce phénomène. Les façades Sud reçoivent quant à elles une quantité d'énergie relativement importante mais qui est handicapée par l'angle d'incidence du rayonnement solaire qui devient important en été d'où la stagnation (voir légère décroissance) pour les mois d'avril à août.

Il est possible de voir sur la Figure 43 les pertes par ombrage sur les différentes façades en fonction de la période de l'année. Nous remarquons que les façades Nord sont celles qui subissent le plus ces effets d'ombrage du fait de leur orientation désavantageuse. Il est à noter que ces mêmes façades subissent un rayonnement essentiellement diffus et donc plus faible ce qui conduit à un rapport perte par ombrage/production relativement important. Les façades Sud sont celles qui subissent naturellement le moins de pertes par ombrage. Certaines façades Sud en subissent tout de même du fait de la géométrie des bâtiments.

Le Tableau 17 présente de façon globale les résultats obtenus pour une année type en fonction de l'orientation des façades. Nous pouvons y voir que la production annuelle totale atteint 122756 kWh ce qui est une quantité d'énergie non négligeable et qui représente 2,5 fois celle produite par les panneaux de toiture dans la simulation 2. L'inconvénient d'une telle configuration en façade réside dans les pertes par ombrage qui sont conséquentes avec quasiment 30 % pour les façades Ouest. Il est alors possible d'imaginer un compromis utilisant des panneaux de façade photovoltaïques et d'autres sans modules PV mais présentant le même aspect visuel afin de garantir une homogénéité esthétique.

L'annexe 3 – « Estimation du productible PV » présente de façon plus détaillée les résultats obtenus en fonction de l'orientation.

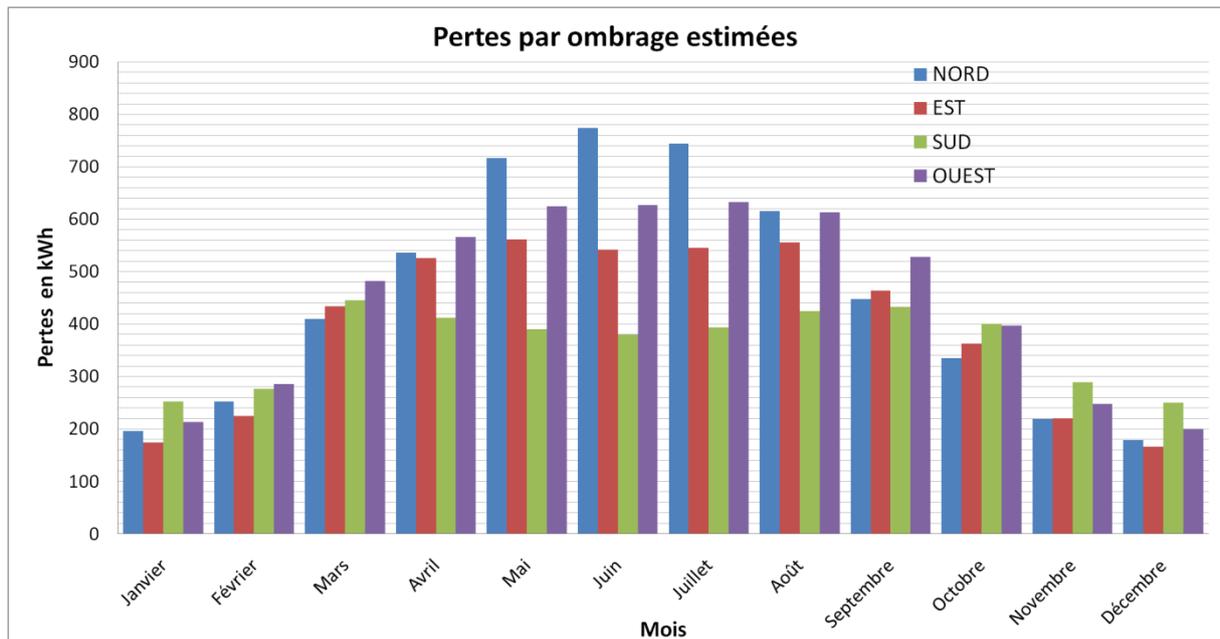


Figure 43 : Pertes par ombrage mensuelle estimées (simulation 3)

Tableau 17 : Production électrique annuelle (simulation 3)

Orientation	Production annuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de pertes par ombrage
NORD	21298	5424	25,5%

EST	43572	4777	11,0%
SUD	38858	4347	11,2%
OUEST	19018	5417	28,5%
Total	122746	19965	

2.5.2.4 Simulation 4 : Cellule CIGS en façades

Pour cette dernière simulation nous utiliserons des cellules photovoltaïques de type CIGS. Il s’agit d’un alliage de cuivre, indium, gallium et sélénium utilisé sous forme de couche mince polycristalline fonctionnant sur le même principe que les cellules de silicium pour générer de l’électricité à partir d’un rayonnement lumineux. Parmi les avantages de ce type de cellule il est à noter qu’elles ne présentent aucun problème de toxicité pour la santé ou l’environnement, permettent de s’affranchir du silicium et peuvent être construites sur un substrat flexible.

Les rendements pour des modules commerciaux sont généralement compris entre 9% et 12% avec des maximums pouvant atteindre 20% en laboratoire. Il s’agit là des rendements les plus élevés parmi les cellules de type couche mince. Le principal inconvénient de ces cellules étant leur coût plus élevé et la raréfaction de certains métaux, notamment l’indium.

Afin de comparer les résultats entre eux nous avons conservé la même disposition en façade et une surface recouverte la plus identique possible (Figure 44).

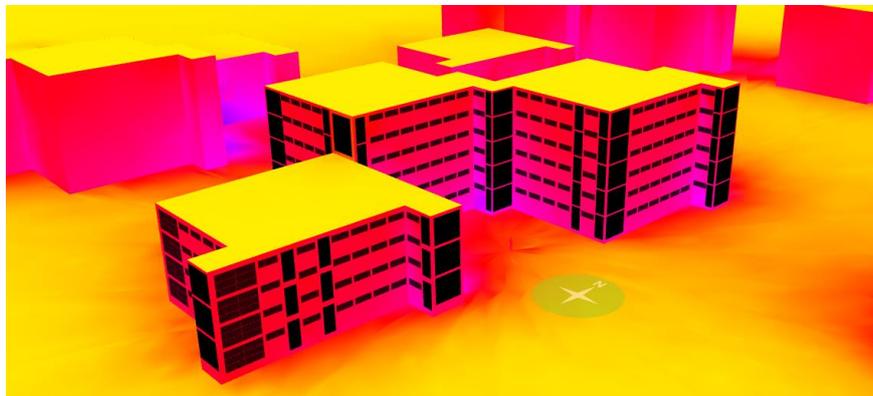
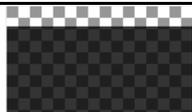


Figure 44 : Implantation BIPV en CIGS ou Est

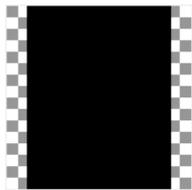
Les modules utilisés ont été conçus à partir de deux types de cellule CIGS élémentaires. Les Tableau 18 et Tableau 19 présentent leurs caractéristiques. La différence au niveau des caractéristiques physiques de ces deux types de cellules est due à leur dimension élémentaire qui n’est pas du tout la même. Les cellules de type 1 sont rectangulaire alors que les cellules de type 2 sont longiligne.

Tableau 18 : Cellule élémentaire BIPV CIGS – type 1

	Technologie	CIGS
	Fournisseur	Sunpartner
	Modèle	DGS S20

Puissance crête	98.8 Wc
Dimensions	2020 x 730 mm
V _{oc}	52.00 V
V _{mpp}	36.00 V
I _{cc}	15.00 A

Tableau 19 : Cellule élémentaire BIPV CIGS – type 2

	Technologie	CIGS
	Fournisseur	Avancis
	Modèle	Skala Black
	Puissance crête	2.1 Wc
	Dimensions	8 x 1544 mm
	V _{oc}	1.18 V
	V _{mpp}	0.91 V
	I _{cc}	2.59 A

Nous pouvons voir sur la Figure 45 que les résultats obtenus pour la simulation 4 sont très similaires à ceux de la simulation 3. En effet, seul le rendement des cellules utilisées et le choix des onduleurs vont influencer sur la production estimée. Cette similarité permet de confirmer que le processus de modélisation est cohérent.

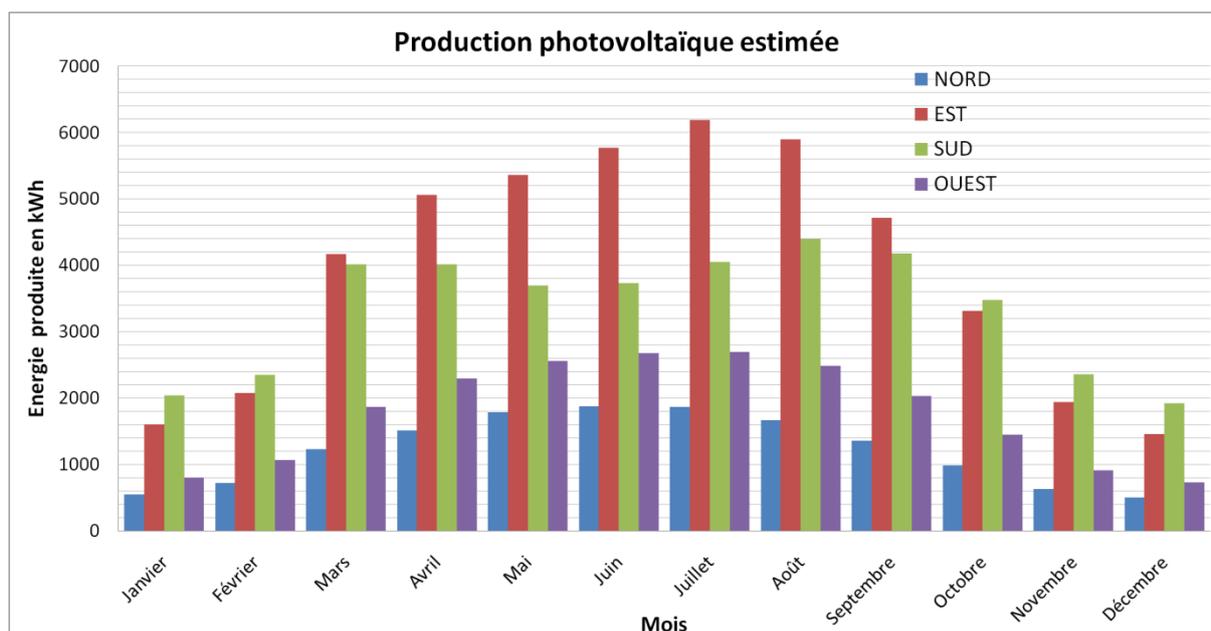


Figure 45 : Production électrique mensuelle estimée (simulation 4)

Nous obtenons pour cette dernière simulation les productions présentées dans le Tableau 20 avec une production annuelle de 124004 kWh.

Tableau 20 : Production électrique annuelle (simulation 4)

Orientation	Production annuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de pertes par ombrage
-------------	---------------------------	--------------------------	----------------------------

NORD	14666	4042	27,6%
EST	47556	5010	10,5%
SUD	40222	4111	10,2%
OUEST	21561	5786	26,8%
Total	124004	18950	

L'objectif de cette étude était de déterminer le potentiel de production électrique d'une installation photovoltaïque mise en place dans le cadre de la rénovation future de la résidence « Le Plateau » situé à Villefontaine. Cette estimation est un point de départ pour les études futures et nous servira à faire des choix en termes de systèmes énergétiques et de stockages envisageables.

L'étude menée a consisté à simuler différents scénarios de production photovoltaïque au niveau des bâtiments de la résidence. Le premier scénario a eu pour but de modéliser une installation en toiture avec mise en place d'un nombre maximum de panneaux photovoltaïque. Avec 332 m² de surface installée pour 154 panneaux nous obtenons une production électrique annuelle de 56914 kWh/an et un maximum de 7132 kWh pour le mois de juillet. Le problème s'est trouvé dans le taux de pertes par ombrage dû au faible espacement nécessaire entre les panneaux afin d'en installer suffisamment. Ce taux de perte atteint 14,2 % au mois de décembre ce qui est gênant.

Un second scénario a alors été réalisé dans le but d'optimiser le nombre et la disposition des panneaux afin de réduire les pertes par ombrage et le coût d'installation. Avec cette fois une surface de 280 m² pour 130 panneaux nous obtenons une production annuelle en baisse de seulement 14% soit 48838 kWh/an tandis que les pertes par ombrage sont diminuées de 45 % avec seulement 5 % de perte au mois de décembre. Nous pouvons en conclure que le choix des panneaux et leur disposition est un facteur essentiel dans l'optimisation d'une installation photovoltaïque.

Du fait de sa position sur le marché et de son prix de plus en plus intéressant nous avons étudié dans un troisième scénario le cas d'une installation de panneaux intégrés à l'enveloppe de type « Building-integrated photovoltaics » (BIPV) avec cellules de silicium. Pour des raisons esthétiques nous ne pouvons pas nous restreindre aux seules façades recevant le rayonnement solaire et avons simulé cette solution pour l'ensemble des façades de nos bâtiments. Nous avons obtenu pour une surface recouverte de 1 800m² une production électrique annuelle de 122 746 kWh/an. En revanche les pertes par ombrage sont conséquentes et difficilement évitables : 16 % de perte global sur l'année principalement dues aux façades Nord et Ouest où les pertes atteignent 28%.

Différentes technologies de BIPV existent et nous avons simulé un dernier scénario où il à été mis en place des cellules de type CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium) sur une surface identique. Ces cellules présentent l'avantage d'être très fines et donc faciles à intégrer au bâti

et de ne présenter aucun risque pour l'environnement et la santé. Elles détiennent actuellement le record de rendement pour les cellules de type couches minces avec 20,4% obtenu en laboratoire. La production annuelle obtenue avec cette technologie est légèrement supérieure : 124 004 kWh/an.

Dans le cas d'une production de type scénario 2 et en supposant une consommation moyenne en chauffage de 100 kWh/m² par an, la surface d'habitation chauffable en autoconsommation est seulement de 480 m² ce qui représente environ 8 appartements de type 3. Dans l'hypothèse où cette consommation moyenne atteindrait après rénovation 50 kWh/m² le nombre de logement de type 3 chauffables en autoconsommation passeraient à 16.

Nous remarquons tout de suite la limitation due à la surface des toitures. Il est donc impératif si nous souhaitons atteindre un maximum d'autoconsommation de recourir aux technologies BIPV. De plus si les scénarios 2 et 3 sont combinés il est théoriquement possible d'atteindre une production électrique annuelle de 171580 kWh/an. Dans l'hypothèse d'une consommation moyenne de 50 kWh/m² il serait alors possible de chauffer en autoconsommation 3431 m² de logement soit environ 57 logements de type 3. Attention, ce calcul est indicatif et ne tiens pas compte du déphasage entre la production estivale plus importante et le besoin hivernal.

Cette étude a permis d'avoir une idée plus précise de la capacité de production électrique envisageable pour la résidence « Le Plateau ». Elle permettra par la suite d'aider à identifier les solutions énergétiques les plus avantageuses ainsi que les technologies et volumes de stockages nécessaires. Il apparaît aussi qu'il sera très intéressant d'envisager dès à présent la mise en place de cellules photovoltaïques dans les éléments de façades intégrés au bâtiment pour atteindre un maximum d'autoconsommation. Les questions seront alors : est-ce possible du point de vue réglementaire ? Quelles technologies seront à privilégier en fonction des situations ? Sous quelles formes ces systèmes pourront être intégrés aux façades ?

2.6 Potentiels de l'autoconsommation collective

2.6.1 Analyse des consommations électriques actuelles

Les consommations électriques actuelles de la résidence ont pu être estimées à partir d'appareils de mesure mis en place in situ. Ces appareils ont permis de mesurer les puissances électriques appelées par postes au niveau de différents logements ainsi que les puissances électriques appelées au niveau des parties communes.

La puissance électrique nécessaire pour alimenter le chauffage de base en dalle représentent la part la plus important des consommations du bâtiment. Il fonctionne en heure creuse lors de périodes de chauffe hivernal et la puissance appelée lors du fonctionnement est de l'ordre de 500kW, ce qui est très important (Figure 46). Au vu des contraintes diverses du projet, de la surface disponible en toitures et des dernières technologies en matière de module PV, le

générateur électrique photovoltaïque envisagé et pré-dimensionné dans le cadre de nos études est de 60kWc (condition standardisée de fonctionnement et de rendement). Par principe de fonctionnement le générateur photovoltaïque serait en déphasage (jour/nuit et été/hiver) avec le chauffage de base en dalle et pas suffisamment puissant pour alimenter ce dernier. Il n'est donc pas envisageable d'utiliser la production PV pour alimenter le chauffage de base en dalle.

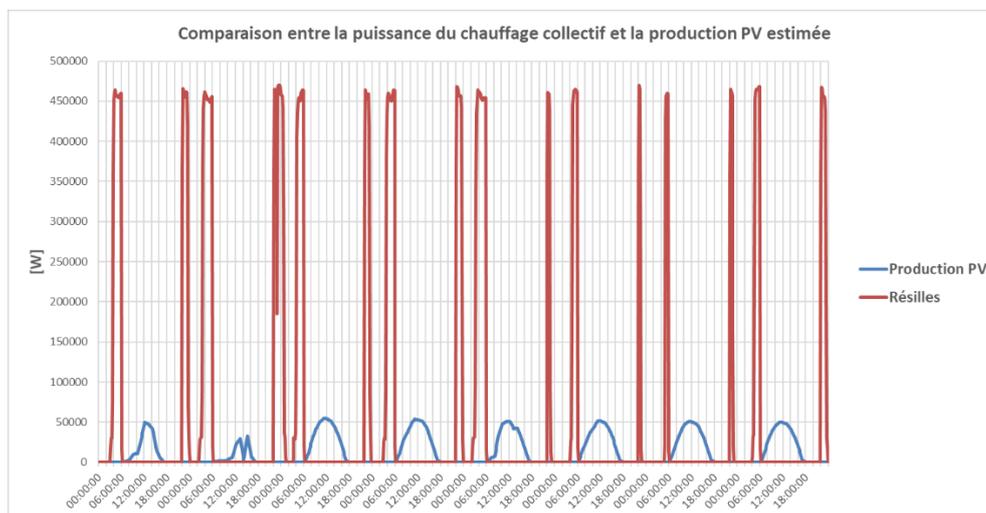


Figure 46 : Comparaison entre la puissance électrique totale du chauffage électrique collectif et la production PV estimées pour une période de chauffe.

On constate en revanche qu'au niveau des consommations électriques individuelles (puissances appelées), l'ECS est le poste le plus important en volume et le plus régulier (périodicité) pour les locataires (Figure 47). On remarque également que les ballons d'ECS fonctionnent en heures creuses afin d'accumuler de l'eau chaude la nuit pour la journée. De plus, ils fonctionnent de manière constante toute l'année, quel que soit la saison, et les puissances électriques des ballons varient de 1250W à 2200W en fonction des typologies d'appartement.

Table 1 : Informations sur un des logements instrumentés

Appartement	004BE
Type	T3
Surface	69 m ²
Période	Du 24/02/2020 au 01/03/2020

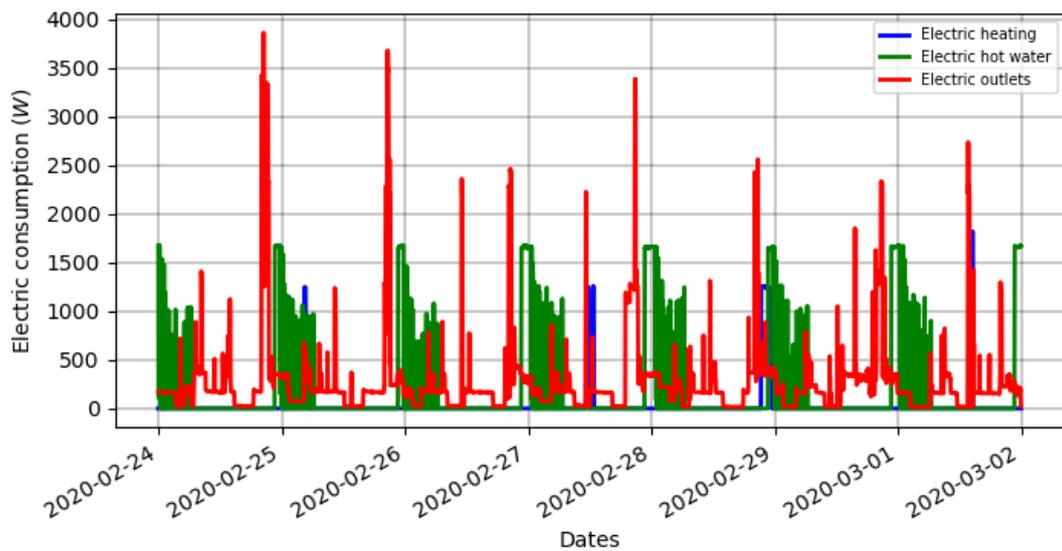


Figure 47 : Consommations électriques / App 004BE / Hiver 2020

En analysant ces données de puissances électriques appelées pour la production d'ECS on identifie clairement la marche nocturne des ballons correspondant au fonctionnement en heures creuses. Les Figure 48 et Figure 49 ci-dessous représentent les puissances électriques appelées par l'ECS pour 7 appartements. On y observe clairement que les ballons d'ECS se mettent en route vers 20h et s'arrêtent vers 4h le lendemain (sur la période considérée) et ce pour la majorité des cumulus électriques instrumentés.

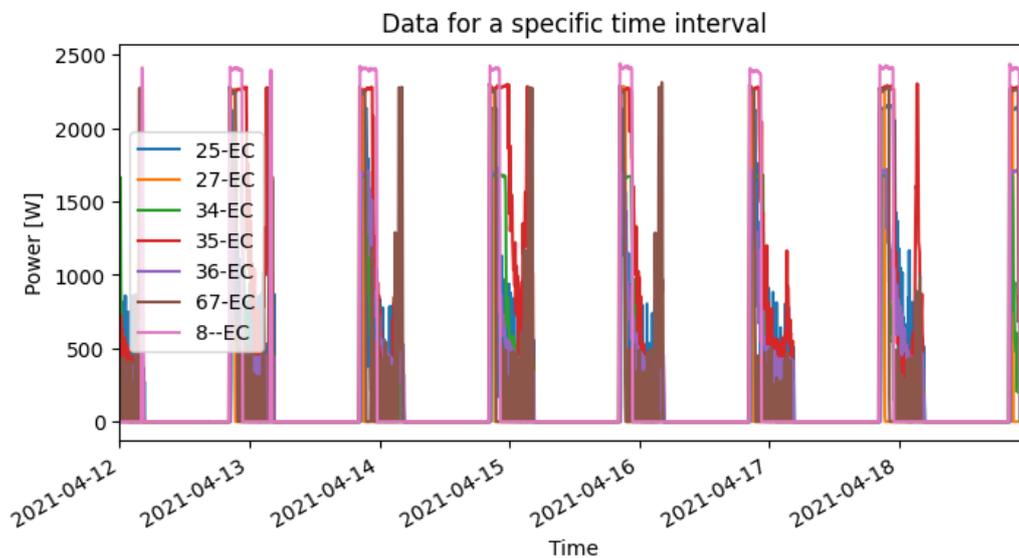


Figure 48 : Fonctionnement en heure creuse des ballons d'ECS – 1/2

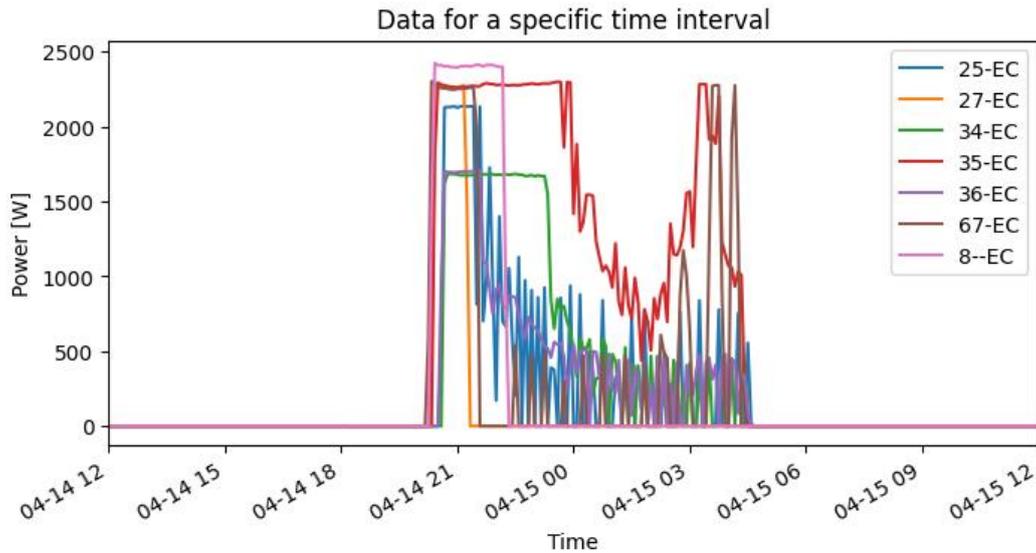


Figure 49 : Fonctionnement en heure creuse des ballons d'ECS – 2/2

Les puissances électriques appelées chaque jour pour l'ECS fluctuent beaucoup. D'un logement à un autre et d'une période à une autre les besoins varient ce qui rend difficile la prédiction individuelle. En revanche, la moyenne des puissances électriques appelées pour l'ECS par chaque logement (courbe verte en gras sur la Figure 50) est relativement constante et donc plus facilement prévisible.

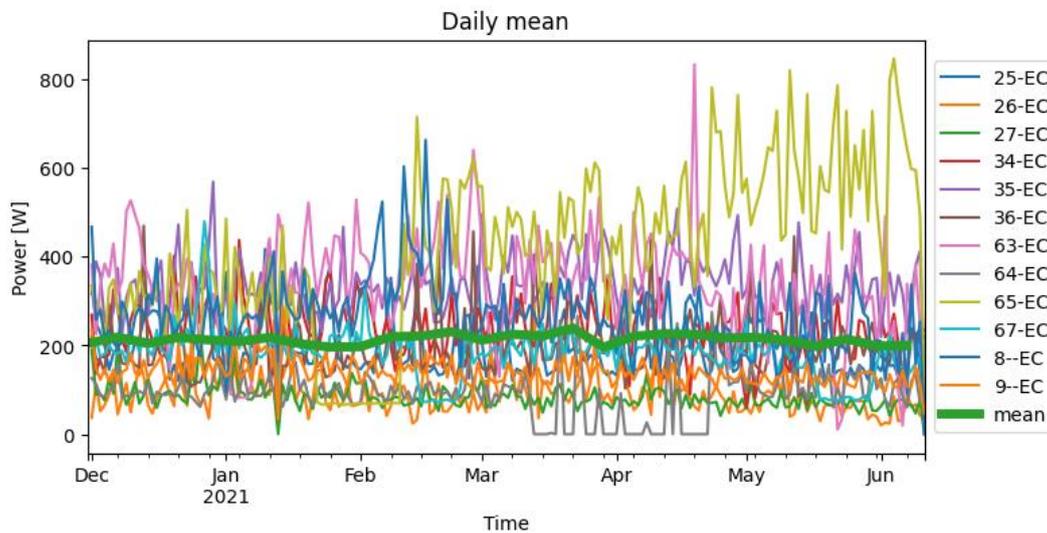


Figure 50 : Consommation électrique journalière et moyenne totale

Si l'on s'intéresse aux fréquences de marche arrêt des ballons on remarque, comme vu précédemment, que la majorité des ballons ont un fonctionnement avec option HP/HC. Cependant on constate que certains ballons conservent un fonctionnement standard qui ne tient pas compte des HC. Dans ce type de fonctionnement le ballon va maintenir en permanence une certaine température de l'eau en se mettant en marche quel que soit l'heure et le tarif de l'électricité. Cette différence de fonctionnement d'un logement à l'autre peut être due à l'option choisi par le locataire lors de la souscription de son contrat de fourniture

d'électricité ou au choix d'un locataire de volontairement (ou non) basculer sont cumulus en fonctionnement standard.

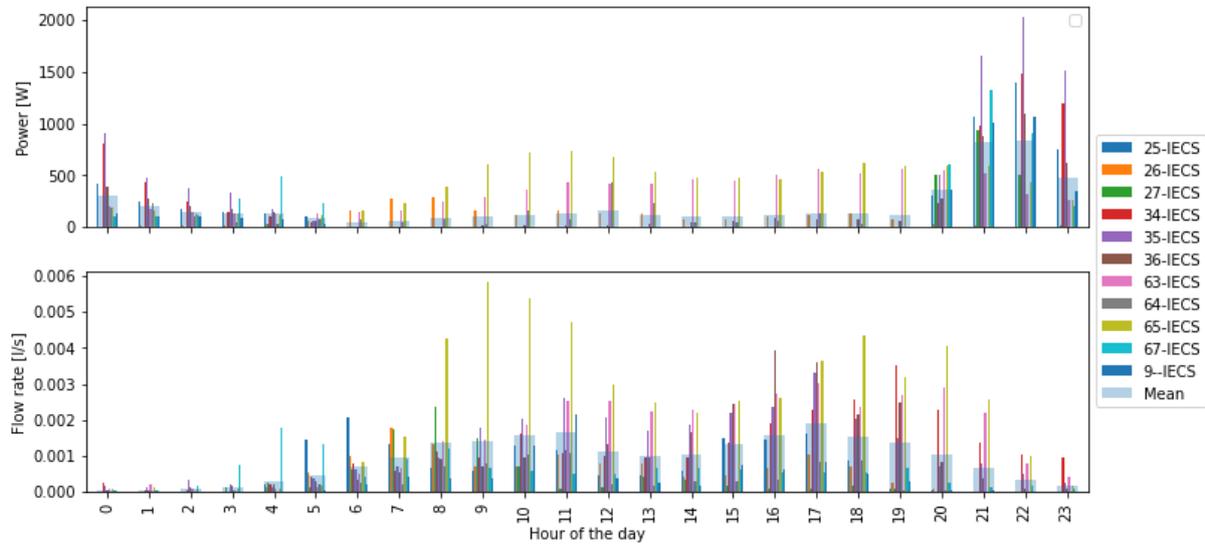


Figure 51 : Puissances électriques et consommations volumiques moyennes des ballons d'ECS par heure

En ce qui concerne les consommations volumiques d'ECS on remarque un premier pic de consommations d'eau chaude en fin de matinée et un second pic en fin d'après-midi/début de soirée (Figure 51). Globalement, les consommations d'ECS se font donc la journée hors des périodes de marche des ballons et présentent donc un déphasage avec la production d'ECS qui a plutôt lieu la nuit.

Par le biais d'une extrapolation des données de mesure disponibles, les besoins électriques agrégés de l'ensemble de la résidence (excepté le chauffage de base) ont pu être estimés et représentés sur la Figure 52. Les postes suivants sont pris en compte :

- Puissance électrique totale appelée par les 67 logements ;
- Puissance électrique totale appelée par les parties communes des 3 bâtiment (sans le chauffage électrique collectif).

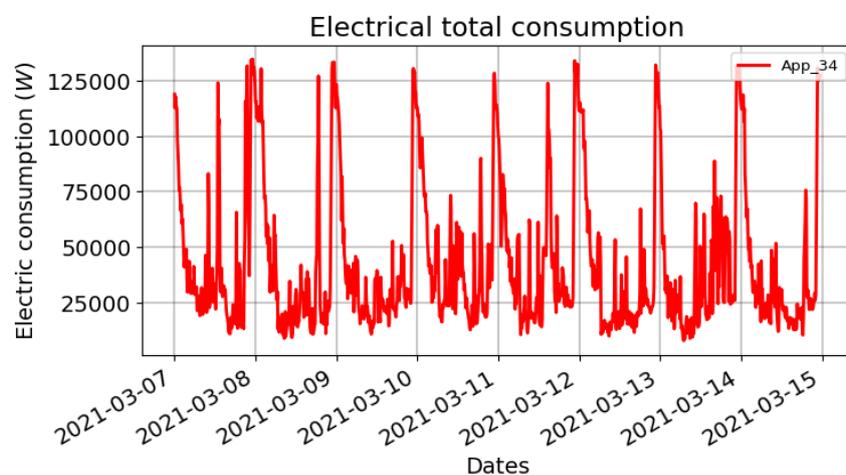


Figure 52 : Puissance électrique appelée estimées de l'ensemble de la résidence / Juin 2021

2.6.2 La production électrique PV prévisionnelle

Un scénario de générateur photovoltaïque a été défini après divers études. Il prend en compte des contraintes financières, d'implantation et de vulnérabilité des installations. Il est décrit dans le tableau ci-dessous. La puissance prévue est de 60kWc. Il n'est pas prévu de stockage cependant une optimisation des usages en vue de maximiser le taux d'autoconsommation est prévue.

La réalisation d'un projet de réhabilitation en bâtiment résidentiel collectif nécessite de respecter le budget alloué qui peut se présenter sous la forme d'une enveloppe globale ou d'un budget au logement. Ce budget s'accompagne généralement d'un objectif à atteindre en termes d'étiquette énergétique.

Outre les contraintes financières il y a les contraintes techniques et de faisabilité. Dans le cadre du projet InER et dans l'objectif de mettre en place une production électrique photovoltaïque sur le bâtiment, la première étape a été la réalisation d'une étude de structure afin de déterminer la capacité portante de la dalle. Une fois la capacité portante vérifiée par note de calcul, les contraintes techniques ont conduit au choix d'une solution spécifique de fixation des modules photovoltaïque sur le complexe d'étanchéité (

Figure 53 et Figure 54) et à un calepinage des modules tenant compte des éléments déjà présents sur la toiture (Tableau 21).



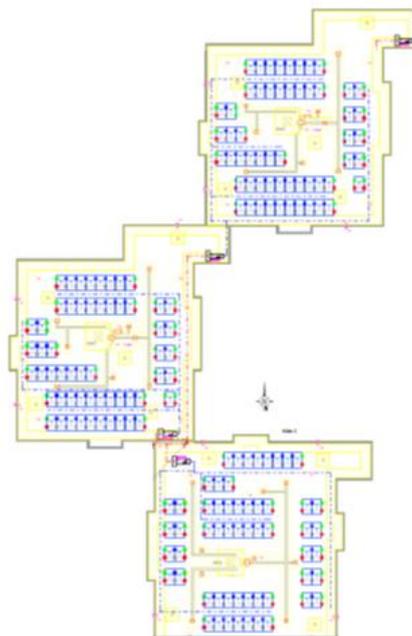
Figure 53 : Photo des modules photovoltaïques posé sur plots thermosoudés



Figure 54 : Principe du système de plots thermosoudés

Tableau 21 : Caractéristiques de l'installation photovoltaïque

Représentation du générateur photovoltaïque



Implantation	Modules monocristallins avec structure sur plots
Orientation	Sud
Inclinaison	35°
Nombre panneaux, surface et puissance	163 panneaux – 270 m ² – 60 kWc
Avantages	• Tarif d'achat ≤ 100 kWc (10,23€/kWh)

	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne orientation • Investissement limité • Limite des coûts d’installation • Solution idéale dans le cadre d’une réfection d’étanchéité
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Masque proche (éléments techniques en toiture) • Surface mobilisée lors de la réfection de la membrane d’étanchéité
Production électrique annuelle estimée	78037 kWh
Taux d’autoconsommation moyen estimé	53 % (sans optimisation)
Taux d’autoproduction moyen estimé	36 % (sans optimisation)

Afin de déterminer les taux d’autoconsommations et d’autoproductions ainsi que les surplus prévisionnels, des comparaisons entre consommation et estimation de production PV ont été faites (Figure 55, Figure 56 et Figure 57).

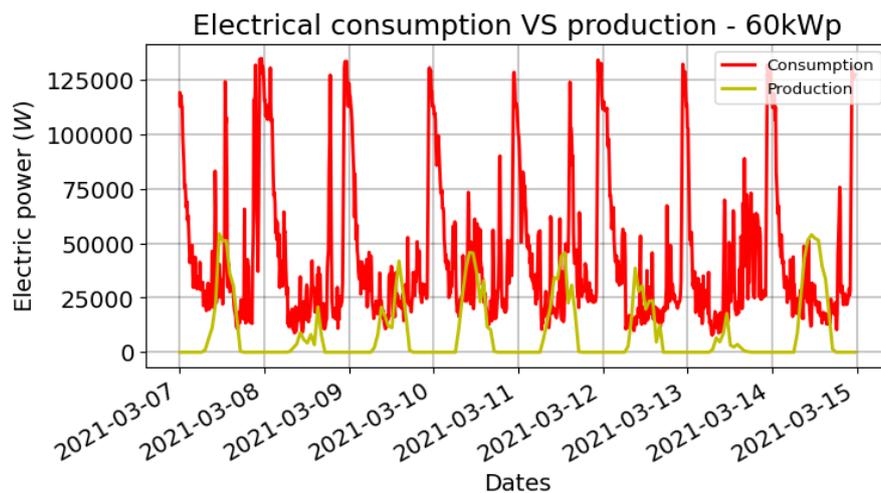


Figure 55 : Consommations électriques totales (rouge) - Estimation de productible PV pour 60 kWc (jaune)

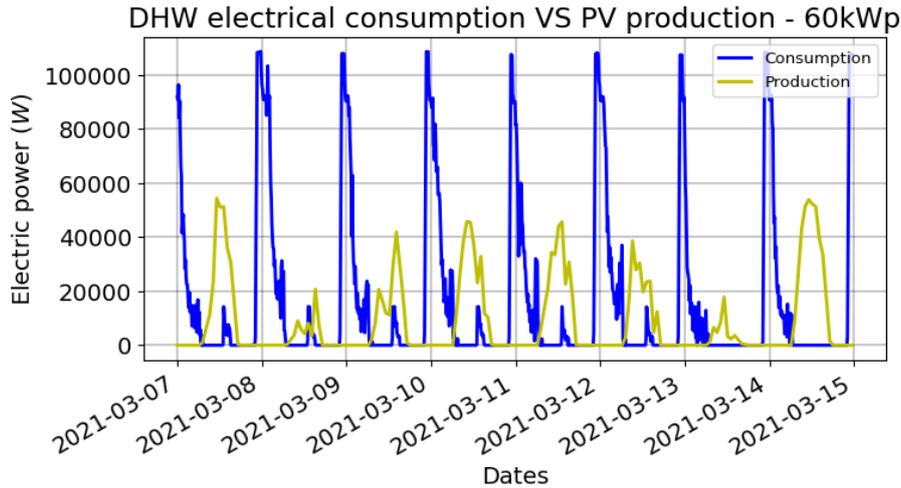


Figure 56 : Consommation électrique totale ECS (bleu) - Estimation de productible PV pour 60 kWc (jaune)

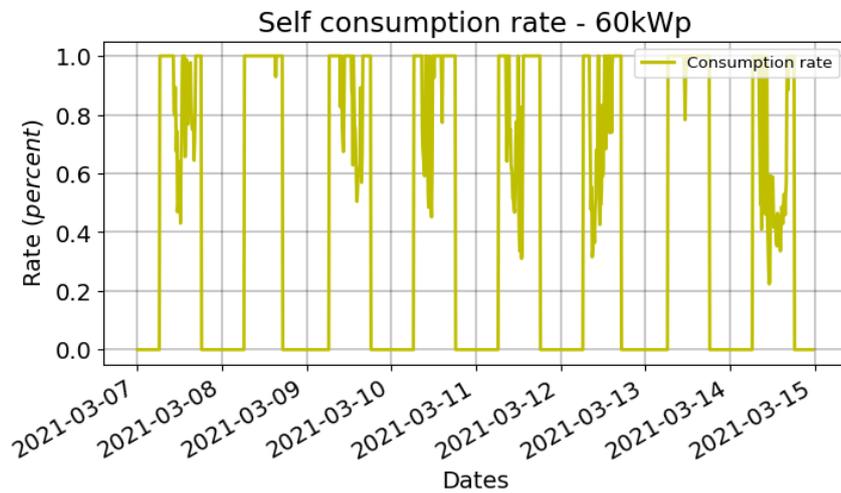


Figure 57 : Variation du taux d'autoconsommation pour une installation PV de 60kWc

Il est important de préciser que le surplus de production PV est proportionnel à la puissance PV installée. Plus la puissance PV installée est importante et plus le surplus de production sera important. Cependant la puissance maximale potentiellement installable pour le générateur PV sera limitée par plusieurs contraintes qui vont être d'ordre technique (surface disponible en toiture, charge admissible de la structure porteuse, performances caractéristiques de modules PV...), économique (coût de l'installation) ou administrative (puissance maximale autorisée dans le cadre des opérations d'ACC).

Afin de maximiser le taux d'autoconsommation sans utiliser de batteries nous avons décidé de piloter les usages dans le but de forcer la consommation en phase avec la production. Après analyse des consommations issues des mesures d'instrumentations le potentiel des ballons d'ECS a été identifié pour répondre à cet objectif. Les ballons d'ECS étant électriques et individuels ils sont simples à piloter via un contacteur. Ainsi ils permettent de stocker le surplus de production photovoltaïque de manière passive tout en limitant les coûts d'investissement.

Ce choix a engendré une nouvelle problématique qui est celle du pilotage optimal des ballons d'ECS. Nous avons alors travaillé avec la société OGGA dans le but de développer une solution de monitoring et de pilotage dédiée aux opérations d'autoconsommation collective en logement social avec optimisation du surplus de production. Après avoir présenté les résultats de notre instrumentation et notre réflexion globale sur la solution envisagée nous avons élaboré un cahier des charges fonctionnel afin d'analyser finement le besoin, décrire les fonctions attendues et identifier les contraintes. Ainsi une solution technique a pu être mise en place :

- Sur le terrain, des gestionnaires d'énergie mesurent en temps réel les consommations communes et individuelles des locataires ainsi que la production réelle photovoltaïque. En fonction du taux d'autoconsommation réel à un instant donné ils vont avoir pour rôle de mettre en route ou éteindre les ballons d'ECS de manière optimisée et indépendantes. Ce pilotage des ballons d'ECS permet de garantir un taux d'autoconsommation maximal proche de 100%. Les bénéfices pour les locataires sont alors maximums.
- Une plateforme dédiée au suivi de l'opération d'ACC permet de visualiser à distance les consommations individuelles, collectives et la production. Elle permet également le suivi administratif de l'opération d'ACC tel que la définition des coefficients de répartition, l'entrée ou la sortie de participants ou encore la correspondance avec le gestionnaire du réseau public de distribution d'électricité.

Cette partie du projet ne sera pas développée dans le cadre de ce mémoire de thèse. Cependant nous souhaitons le présenter succinctement pour montrer les enjeux et les perspectives mis en évidence lors de cette thèse de doctorat.

2.7 Conclusions

Ce chapitre a présenté la première étape essentielle du projet InER, qui consiste à mettre en place une instrumentation in situ dans les logements concernés par les opérations de rénovations. L'objectif principal de cette instrumentation est de mesurer avec précision les consommations électriques collectives et individuelles des bâtiments, ainsi que de relever d'autres paramètres importants tels que les températures, l'humidité, et les ouvertures/fermetures des portes et fenêtres. La consommation d'eau chaude sanitaire et les données météorologiques sont également prises en compte.

L'instrumentation repose sur des capteurs et des appareils de mesure interconnectés utilisant le protocole de communication EnOcean, qui se distingue par sa faible consommation d'énergie et son ouverture, permettant la réception et la transmission d'informations de manière efficace. Pour cette instrumentation, la société OGGA a été sollicitée en raison de ses solutions de gestion intelligente de l'énergie.

Les données mesurées sont collectées par des appareils EcoTouch, puis envoyées à un serveur via une transmission 4G sécurisée gérée par OGGA. En cas de problème, les données

peuvent être récoltées par un EcoTouch voisin, assurant ainsi la fiabilité des informations recueillies.

Une fois l'instrumentation en place, l'étude s'est focalisée sur l'estimation de la production électrique photovoltaïque, en utilisant le logiciel BIMsolar. Les simulations ont permis de comparer différentes configurations, allant des panneaux solaires en toiture à leur intégration dans les éléments de façade. Cette étude préliminaire a fourni un ordre de grandeur de la production électrique possible, ouvrant ainsi la voie à d'autres études sur les systèmes énergétiques recevables et les solutions de stockage envisageables.

Dans la continuité de ce travail, le chapitre suivant abordera l'utilisation d'une approche multicritère pour aider à la décision, en s'appuyant sur l'état de l'art et une étude bibliographique approfondie. Cette méthodologie permettra de prendre en compte différents critères d'évaluation et de définir des scénarios potentiels de rénovation pour la résidence "Le Plateau." Le chapitre 8 détaillera ensuite cette méthodologie et présentera un exemple d'application concrète afin d'évaluer les performances des différentes solutions envisagées. L'ensemble de ces travaux vise à fournir des recommandations éclairées pour la suite du projet InER.

CHAPITRE 3 - L'AIDE À LA DECISION MULTICRITERE : ÉTAT DE L'ART ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

3.1 Histoire, état de l'art et fondement

3.1.1 La question du choix

Le secteur du bâtiment est aujourd'hui responsable d'un tiers de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂, une valeur qui selon le scénario normal de l'IEA devrait augmenter de 50% d'ici 2050. Confrontés à cette situation, nombreux sont les pays à mettre en place des mesures afin d'atteindre des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, des mesures qui ne peuvent se contenter d'être appliquées aux constructions neuves mais qui doivent également se généraliser aux bâtiments existants (European Commission, 2021; International Energy Agency, 2015). La solution est alors de réaliser des actions de rénovation énergétique à la fois sur l'enveloppe des bâtiments et sur leurs équipements (Huang, et al., 2012; Kwonsik, et al., 2019). Les alternatives de rénovation sont multiples et diversifiées : amélioration de l'isolation du bâti, réduction par diverses mesures de la charge thermique de chauffage et/ou de climatisation, ajout de moyen de production d'énergie renouvelable (Lizana, et al., 2016). Mais parmi les nombreuses solutions de rénovation énergétique laquelle sélectionner ?

De fait, le décisionnaire est confronté à un véritable défi pour répondre à cette question aux objectifs et critères multiples. Sélectionner l'alternative idéale revient à prendre en compte les aspects économique, technique, environnemental et, peu mentionné dans la littérature, l'aspect social. Autant d'aspects qui vont entrer en contradiction lors du processus de sélection (Lizana, et al., 2016). Des méthodes avec un processus clair et défini sont nécessaires.

C'est là que les méthodes d'aide à la décision interviennent pour supporter le décisionnaire dans son choix. Ce projet de recherche se focalisera plus particulièrement sur les méthodes d'analyse multicritère pour l'aide à la décision (Multiple Criteria Decision Analysis) qui permettent de prendre explicitement en compte la complexité de la prise de décision humaine, la pluralité des points de vue des acteurs, et les contradictions naturelles entre les critères (ex : coût et qualité). Le principe général des méthodes d'analyse décisionnelle multicritère (MCDA) est simple, cependant il existe un panel de méthodes et d'approches diverses.

Cette partie du rapport porte sur l'établissement d'une méthodologie d'analyse multicritère pour aider et accompagner les acteurs de la rénovation énergétique à faire des choix lors de projets de rénovation/réhabilitation énergétique. Plus particulièrement, ce projet se base sur un cas d'étude concret, le projet du bailleur social Immobilière Rhône-Alpes de rénover la résidence du Plateau à Villefontaine dans l'Ain.

Le Projet InER, objet d'étude du présent rapport, s'inscrit dans une démarche d'innovation énergétique au sein du secteur de la rénovation des bâtiments d'habitation collectifs chauffés par l'énergie électrique. Son principal enjeu est de conserver l'énergie électrique pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Un second enjeu consiste à s'inscrire et initier un processus d'autoconsommation énergétique collective en produisant localement une énergie renouvelable et en la stockant de manière à contrôler et optimiser le surplus de production. Enfin le troisième enjeu consiste à mettre en place une méthodologie d'aide à la décision afin de comparer des scénarios de rénovation énergétique parmi un panel de scénarios envisageables, viables et réalistes, autant d'un point de vue technique et économique que social et environnemental. En annexe 9 se trouve le « Rapport du CETHIL » relatif au Projet InER, remis dans le cadre de cette thèse à l'entreprise Immobilière Rhône Alpes.

Face à la complexité du projet et à la pluralité des enjeux qui le structurent, l'analyse multicritère semble être une réponse adaptée et à la hauteur du problème posé. Il a donc été décidé de bâtir un protocole d'aide à la décision basé sur l'analyse multicritère et la méthode ELECTRE TRI et dont le cas d'étude de la résidence « Le Plateau » à Villefontaine serait le terrain d'expérimentation et de développement pour cette nouvelle méthodologie.

Les analyses économiques, telles que l'approche coûts-avantages-faisabilité, sont largement utilisées lors de la prise de décisions d'investissement, qu'elles soient publiques ou privées (Ciulla, et al., 2016). Cependant, les limites de cette approche sont multiples, principalement en raison de leur incapacité à prendre en compte l'exhaustivité et la complexité du problème ou les différentes opinions des diverses parties prenantes (Napoli, 2018). C'est pourquoi les méthodes d'analyse multicritère sont de plus en plus utilisées, car elles prennent en compte non seulement les aspects économiques, mais aussi des critères tangibles et intangibles exprimés de manière quantitative ou qualitative (Mejjaoui & Alzahrani, 2020). Elles sont donc particulièrement bien adaptées à la complexité des questions liées à l'énergie puisqu'elles traitent des interactions entre de multiples parties prenantes (investisseurs publics, investisseurs privés, utilisateurs, etc.) sur divers aspects et impacts, tels que la protection de l'environnement, les actifs territoriaux, l'économie, la préservation architecturale, etc. (Napoli, et al., 2020).

D'une manière générale on peut définir l'Aide à la Décision Multicritère (MCDA) comme un protocole d'aide à la décision permettant de classer des éléments en les évaluant selon différents critères. Il s'agit d'une méthode pour traiter un problème de choix qui comporte plusieurs aspects, en fonction des souhaits des décideurs. Ces multiples facettes doivent être prises en compte simultanément, en tenant compte des souhaits des parties prenantes, afin de soutenir leur décision (Mateo, 2012). Une méthode d'analyse multicritère de décision est applicable à des problèmes très complexes comportant de nombreuses incertitudes et objectifs contradictoires. Les MCDA permettent de rendre un problème plus compréhensible, transparent et accessible. Les outils de prise de décision, tels que ceux couramment utilisés

dans les entreprises, sont souvent simplistes et manquent de précision. Cependant, il existe une variété de méthodes d'aide plus avancées et sophistiquées qui fournissent une plus large gamme d'informations, ce qui les rend plus adaptées à la prise de décision (Euro, 2001).

Il existe plusieurs méthodes d'analyse, dans lesquelles le type de données utilisées et le degré d'incertitude pris en compte varient. Toutes ces méthodes comprennent généralement 6 étapes principales :

- Définir le problème
- Générer des alternatives
- Établir les critères d'évaluation et leur ordre d'importance
- Évaluer les alternatives par rapport aux critères pour former la matrice de performance
- Sélectionner la méthode multicritère
- Classer les alternatives

Deux niveaux d'acteurs sont impliqués dans le processus, un niveau de gestion et un niveau d'ingénierie. L'équipe de gestion est souvent celle qui commande l'analyse, les membres de l'équipe sont appelés décideurs. Ils définissent le problème et font le choix final de l'alternative. L'équipe technique définit les différentes possibilités, les différents critères et réalise l'analyse pour obtenir un classement des possibilités. Les décideurs ont le choix d'accepter ou de rejeter les résultats de l'analyse réalisée par l'équipe technique (Mateo 2012).

L'Aide à la décision multicritère est donc un outil d'aide à la décision utilisé pour soutenir le décideur lors d'un choix entre plusieurs alternatives. Différentes méthodes d'analyse multicritères existent pour aider à la prise de décision. Elles diffèrent par leur typologie, la logique de leur processus, leur facilité d'utilisation, leur capacité à considérer différents points de vue et à empêcher ou non la compensation des critères (Greco, et al., 2016). Elles ont également plusieurs principes de base en commun, tels que la définition d'un ensemble d'actions envisagées pour répondre au problème posé, la définition d'au moins deux critères distincts pour lesquels chaque action sera évaluée, et enfin un décideur (Bisdorff, et al., 2015). Les scénarios, actions ou alternatives correspondent aux différentes solutions que l'on souhaite évaluer. Ils doivent être définis de manière précise et distincte pour pouvoir les évaluer correctement. Les critères représentent les indicateurs ou les repères sur lesquels les actions seront évaluées. Ils doivent être décrits avec précision et respecter certaines règles.

La rénovation énergétique du parc immobilier est un défi à multiples entrées. Les parties prenantes de ce nouvel enjeu font face à un processus de décision alambiqué, aux objectifs pluriels devant conjuguer aspect économique, impact social et évaluation environnementale. A cela s'ajoute la singularité de chaque variable étudiée, et la nature de leur évaluation. Comment comparer une consommation énergétique à des critères plus qualitatifs tels que le confort visuel ou l'acceptation sociale ? En ces termes, l'identification du meilleur scénario de rénovation est un véritable défi technique. Et, plus la palette des critères de décision est

importante, plus la solution choisie sera satisfaisante mais plus la méthodologie décisionnelle sera complexe.

L'analyse des scénarios de rénovation énergétique requiert donc des méthodes d'analyse multicritère afin d'accompagner les décideurs dans leur plan d'action. Ces méthodes permettent de comparer et/ou classer différents scénarios selon des critères donnés. La MCDA apparaît donc être un outil indispensable pour les acteurs de la rénovation énergétique dans la mesure où elle autorise une perception globale des enjeux ainsi qu'une analyse intégrale d'un problème aux multiples entrées.

Plusieurs exemples d'analyse multicritère pour la rénovation énergétique des bâtiments existent dans la littérature. Ammar H.A. Dehwah et al. (H.A. Dehwah, et al., 2022) ont étudié plusieurs scénarios pour la rénovation d'un village en un complexe hôtelier à énergie nette zéro, en considérant le confort thermique, l'efficacité énergétique et la production photovoltaïque. Xiangjie Chen et al. (Chen, et al., 2020) ont sélectionné et défini plusieurs mesures individuelles d'efficacité énergétique et les ont combinées en 18 ensembles d'améliorations pour des bâtiments résidentiels en Norvège. Ces ensembles de mesures ont ensuite été évalués en tenant compte, d'une part, de la réduction de l'énergie primaire, des coûts globaux, du délai de récupération ou de la réduction des émissions de carbone et, d'autre part, de l'aspect social à travers les points de vue des différentes parties prenantes.

Que peut-on attendre d'une analyse multicritère ? La MCDA peut être analysée comme une méthode d'aide à la décision permettant d'assister des parties prenantes dans un processus de décision complexe. Elle permet de clarifier des décisions, ou de recommander des solutions au regard des enjeux décrits par les décideurs. Ainsi, la MCDA ne fait pas loi car le décideur est libre de s'en affranchir ou de s'y référer. Dans cette mesure, on peut attendre de l'MCDA :

- D'éclairer des problèmes complexes, en particulier en identifiant les solutions possibles, leurs conséquences et les enjeux du problème
- De structurer le processus de décision en construisant une méthodologie précise prenant en compte la globalité des enjeux du problème
- D'améliorer la collaboration entre les différentes parties-prenantes
- De légitimer la décision finale

3.1.2. Différentes méthodes d'analyse multicritère

Traditionnellement, les analyses économiques telle que l'approche Coûts-Bénéfices sont largement répandues lors de la prise de décision dans le secteur de l'investissement public et privé. Cependant les limites de cette approche sont multiples et tiennent surtout de l'incapacité de cette approche à prendre en compte l'intégralité de la complexité du problème ou encore l'avis des différentes parties prenantes. Dans cet esprit, les méthodes d'analyse multicritère sont de plus en plus utilisées car elles peuvent prendre en compte l'aspect économique mais également des critères tangibles et intangibles exprimés quantitativement ou qualitativement. Ainsi, les méthodes MCDA sont tout particulièrement adaptées aux

décisions de rénovation énergétique du fait de leur complexité car cette approche flexible permet de faciliter le dialogue entre décisionnaire, analyste, et scientifique ce qui explique leur popularité grandissante.

Diverses méthodes de MCDA existent pour soutenir la prise de décision, elle se différencient par leur typologie, la logique de leur processus, leur facilité d'utilisation, leur capacité à prendre en compte différents points de vue et à empêcher ou pas la compensation des critères, ... Cet article se propose d'étudier les principales méthodes pour l'analyse multicritère afin de choisir celle qui sera la plus adaptée dans le cadre du projet InER. Cette méthode sera par la suite appliquée au cas d'étude de Villefontaine.

Michel GRABISCH, Professeur des universités à Paris 1 Panthéon-Sorbonne, propose de diviser l'ensemble des méthodes MCDA selon deux approches distinctes (Grabisch & Perny, 2003; Grabisch, 2008) :

- Les méthodes de type « Agréger-Comparer » ou méthodes d'agrégation.
- Les méthodes « Comparer-Agréger » ou méthodes de sur-classement.

Les premières consistent à construire un critère unique de synthèse à partir de l'ensemble des critères. Une alternative évaluée selon n critères est alors réduite en une seule valeur qui est équivalente à une évaluation de synthèse. Par la suite les actions sont comparées entre elles selon cette évaluation globale (Figure 58). Pour leur part, les méthodes de sur-classement s'affranchissent des limites qu'impliquent les méthodes d'agrégation pour proposer une analyse plus fine et plus cohérente avec le processus humain de prise de décision. Ces méthodes comparent dans un premier temps les alternatives sur chacun des n critères, puis agrègent les conclusions tirées de chacun des critères. Les alternatives vont être comparées les unes par rapport aux autres ou par rapport à des alternatives de référence afin de les classer sans pour autant les résumer à une valeur unique (Figure 59). Dans les sections suivantes, ces deux familles de méthodes MCDA sont illustrées pour leur utilisation dans le domaine de la rénovation énergétique.

Aggregate - Compare

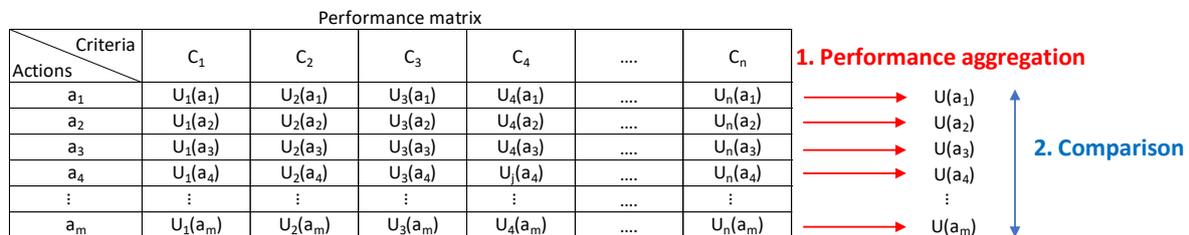


Figure 58 : Schématisation graphique du principe de la méthode « Agréger-Comparer »

Compare - Aggregate

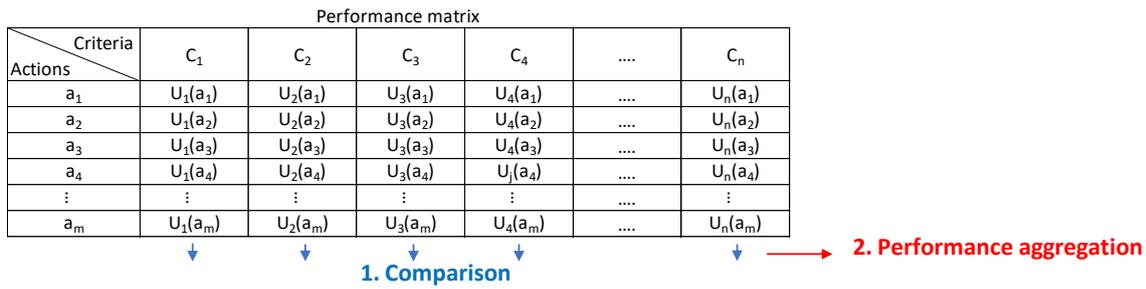


Figure 59 : Schématisation graphique du principe de la méthode « Comparer-Agréger »

3.2 Méthode « Agréger-Comparer » ou méthodes d'agrégation

Ces méthodes supposent que des formules mathématiques peuvent synthétiser les performances par rapport à tous les critères en une valeur numérique résultant en une somme pondérée. Plus cette valeur de synthèse est élevée, plus l'action est préférée. Ainsi, la comparaison de deux actions est déterminée par leur position respective sur l'échelle de valeur (Greco, et al., 2016). L'exploitation de cette approche d'agrégation conduit à l'élaboration d'une classification stricte des actions, de la plus préférable à la moins préférable. L'inconvénient de cette approche est qu'elle exclut toute possibilité d'incomparabilité entre les actions.

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), largement utilisée dans le domaine de l'énergie (Saaty, 1977; Saaty, 1987), consiste à calculer et à attribuer une valeur numérique synthétique, comprise entre 0 et 1, à chaque action selon une hiérarchie et une pondération des critères prédéfinies. Les valeurs obtenues sont regroupées dans une matrice qui est ensuite soumise à diverses opérations pour obtenir la valeur du poids des critères (Piton, et al., 2018). Enfin, la valeur de synthèse attribuée à chaque action est la somme pondérée de chaque critère. L'approche présente un phénomène de compensation puisqu'une bonne évaluation sur un critère peut compenser une mauvaise évaluation sur un autre critère, ce qui peut ne pas être acceptable, selon le contexte de la prise de décision (Papathanasiou & Ploskas, 2018; Napoli, et al., 2020).

Les applications de cette méthode sont nombreuses. Elle a par exemple été utilisée en 2018 dans un contexte rural au Népal pour classer les barrières économiques, sociales et politiques qui s'opposent à la diffusion de solutions d'énergie renouvelable dans les régions éloignées (Laxman Prasad & Yeonbae, 2018). Au Brésil, la méthode AHP a été utilisée pour hiérarchiser les pratiques durables réalisables applicables à une ville (Lange Salvia, et al., 2019). Un autre exemple d'utilisation de la méthode AHP est celui d'Oberhausen, en Allemagne, où elle a été utilisée pour classer les zones en situation de pauvreté énergétique (März, 2018). Un dernier exemple d'utilisation de la méthode AHP se trouve en Italie, où elle a été utilisée pour évaluer un score de restauration et pour créer des priorités parmi différentes conceptions alternatives (Ruggeri, et al., 2020).

La méthode TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) n'était pas très utilisée dans le secteur de l'énergie. Elle consiste à sélectionner une action qui est la plus proche de la "meilleure alternative" et la plus éloignée de la "pire alternative" (Rekkal, et al., 2020). Cette position entre la meilleure et la pire alternative est évaluée par une distance euclidienne qui fournit un classement cardinal des alternatives. TOPSIS est partiellement compensatoire et ne fournit aucune indication sur la qualité de la solution proposée.

Les domaines d'application de la méthode TOPSIS sont nombreux : on le retrouve dans la logistique et la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la conception, l'ingénierie et les systèmes de fabrication, ainsi que dans la gestion des affaires et le marketing (Behzadian, et al., 2012). Elle présente les avantages d'être facile à utiliser, d'avoir des poids déjà incorporés dans les procédures de comparaison, et d'être rationnelle et compréhensible. Cependant, certaines caractéristiques de cette méthode sont limitatives, comme le fait que les attributs doivent nécessairement être des valeurs cardinales, l'exclusion des critères qualitatifs ou le phénomène d'inversion de rang (Wang & Luo, 2009; Garcia-Cascales & Lamata, 2012).

D'autres méthodes relativement récentes et identifiées dans la littérature utilisent la théorie des ensembles flous ou « fuzzy sets » pour la prise de décision multicritères. Ces méthodes se basent sur différents modèles de cette théorie comme les « intuitionistic fuzzy sets » (IFSs), les « pythagorean fuzzy sets » (PFSs) ou les « q-rung orthopair fuzzy sets » (q-ROFSs). L'essence de cette approche repose sur le principe que les modèles utilisés de la théorie des nombres flous expriment l'incertitude des opinions individuelles pour obtenir des résultats de modélisation plus sensibles, concrets et réalistes. Ces méthodes ont donc l'avantage de considérer les incertitudes des évaluations et permettent une grande flexibilité d'utilisation en fonction de la problématique. Riaz et al. (Riaz & Raza Hashmi, 2019) ont proposé la méthode des « Linear Diophantine fuzzy sets » (LDFS) pour améliorer les méthodologies IFSs, PFSs et q-ROFSs et résoudre certaines de leurs limites. Ils proposent également l'introduction de paramètres de référence et l'utilisation de fonctions de score pour obtenir plusieurs procédures de classification. Riaz et al. (Riaz, et al., 2020) proposent également une amélioration plus robuste de la méthode q-ROFSs avec l'introduction d'opérateurs d'agrégation d'Einstein ainsi que de plusieurs fonctions de score appliquées à la résolution de problèmes de planification énergétique au Pakistan.

Enfin, de nombreuses autres méthodes d'agrégation ont également été utilisées dans le secteur de l'énergie. Ci-dessous quelques-unes d'entre elles :

- Les méthodes MAUT ou MAVT (Multi-Attribute Utility or Value Theory) ont été utilisées, par exemple, pour évaluer cinq alternatives de production d'énergie (Yilan, et al., 2020) ;
- Les méthodes LCC (Life Cycle Cost) ou LCA (Life Cycle Assessment) basées sur l'analyse du cycle de vie en termes d'impact financier et environnemental ont été

proposées, par exemple, pour calculer une performance globale en considérant les deux impacts avec des pondérations variables (Cetiner & Edis, 2014) ;

- Les méthodes MILP (Mixed Integer Linear Programming) qui, par exemple, ont été utilisées pour choisir les stratégies optimales de rénovation énergétique des bâtiments existants (Mejjaoui & Alzahrani, 2020) ;
- D'autres méthodes, telles que SMART, MACBETH, etc.

Les méthodes d'agrégation ne sont pas très adéquates dans le cas de problèmes de décision basés sur des paramètres qualitatifs. En effet, elles imposent une condition stricte, sous forme d'équation, dont il serait déraisonnable de penser qu'elle puisse satisfaire toutes les situations du monde réel (Greco, et al., 2016). De même, l'utilisation de certaines méthodes d'agrégation nécessite la normalisation des évaluations, mais ces évaluations sont souvent faites sur des critères d'unités et d'échelles différentes, ce qui conduit à des résultats différents selon la méthode de normalisation utilisée (Maystre & Bollinger, 1998).

3.3 Méthode « Comparer-Agréger » ou méthodes de surclassement

Pour résoudre les problèmes soulevés par les méthodes d'agrégation, tels que les phénomènes de compensation, d'inversion de rang ou l'obligation d'utiliser des valeurs numériques, les méthodes d'aide à la décision dites de sur-classement ont été développées et se sont largement répandues dans le domaine de l'énergie (Napoli, et al., 2020). Elles transcrivent plus fidèlement la pensée humaine sur un problème complexe, mais elles sont nettement plus difficiles à mettre en œuvre. L'idée de l'approche par sur-classement est de permettre aux décideurs de donner leur préférence entre deux actions évaluées selon un critère qu'ils expriment par préférence ("P"), indifférence ("I") ou incomparabilité ("R") (Gal, et al., 1999).

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations) a été mise au point dans ses versions PROMETHEE I et PROMETHEE II par J.P. Brans et al (Brans, 1982). Elle a connu un fort succès et a été développée dans de nombreuses autres versions : PROMETHEE III (méthode de classement par intervalles), PROMETHEE IV (cas continu), module interactif visuel GAIA permettant une représentation graphique de la méthodologie (Brans & Mareschal, 2002). Les versions V et VI sont apparues plus tard pour des applications plus spécifiques, suivies des versions PROMETHEE GDSS, Tri et Cluster (Behzadian, et al., 2010).

La méthode PROMETHEE conduit globalement à un classement des actions, basé sur les degrés de préférence, qui permet de définir à quel degré une action est préférée à une autre. En général, les étapes comprennent la comparaison par paire d'actions sur chaque critère, puis le calcul d'un indicateur de flux positif ou négatif par critère qui est représentatif du degré de préférence ou non d'une action par rapport à toutes les autres et, enfin, l'agrégation de ces derniers dans un indicateur global (Papathanasiou & Ploskas, 2018). Ses propriétés mathématiques et sa facilité d'utilisation ont contribué à son succès en médecine, en chimie, en investissement, en banque et en planification des effectifs.

La méthode PROMETHEE est l'une des plus utilisées dans le domaine de l'environnement et de nombreux articles ont été publiés sur le sujet. Les versions I et II ont été utilisées, par exemple, pour résoudre un problème de gestion des déchets qui impliquait des critères très contradictoires (Briggs, et al., 1990). De même, pour évaluer les performances économiques, environnementales et sociales d'un bâtiment à énergie zéro en Italie, un modèle basé sur la méthode PROMETHEE a été mis en place pour évaluer seize actions possibles (Dell'Anna, et al., 2020). Une autre utilisation de PROMETHEE, couplée à la méthode Analytic Hierarchy Process pour définir les pondérations des critères, a été faite pour étudier les actions de planification énergétique à long terme. L'objectif était de déterminer la durabilité des actions actuelles et futures en matière d'électricité en Iran selon dix-huit dimensions techniques, économiques, environnementales et sociales (Aryanpur, et al., 2019).

La méthode ELECTRE ("ELimination Et Choix Traduisant la Réalité") est apparue dans sa première version au milieu des années 1960 lorsqu'elle a été proposée par Bernard Roy et ses collègues de la société de conseil européenne SEMA. Les méthodes dites "économiques" et mono critères de sommes pondérées utilisées à l'époque n'étaient pas satisfaisantes et présentaient de nombreux inconvénients (Rogers, et al., 2000). Bernard Roy a alors développé la méthode ELECTRE I (David & Damart, 2011). Cependant, elle ne connaîtra un réel succès qu'en 1968, date à laquelle les bases de la méthode de surclassement sont posées (Roy, 1968).

Par rapport aux méthodes MCDA présentées précédemment, cette famille de méthodes a la particularité de proposer une double procédure de tri des alternatives (distillation pessimiste/optimiste ou top-down/bottom-up). Le principe général de ces méthodes est basé sur l'analyse des relations existantes entre les actions au moyen de pseudo-critères qui correspondent à la différence entre les évaluations de deux alternatives (Gwo-Hshiung & Jih-Jeng, 2011). Selon le décideur, les règles de préférence et de dominance entre les actions peuvent varier, mais les trois types de comportement restent inchangés : préférence "P", indifférence "I" et incomparabilité "R" (Greco, et al., 2016).

Plusieurs méthodes ELECTRE existent et peuvent être utilisées pour résoudre des problèmes de décision spécifiques. Elles sont particulièrement intéressantes à utiliser dans les situations suivantes (Schärlig, 1996) :

- Le nombre de critères sur lesquels les solutions doivent être évaluées est important.
- Certaines actions sont évaluées sur des échelles qui ne sont pas adaptées à la comparaison de différences.
- Il existe une forte hétérogénéité dans la nature des échelles associées aux critères choisis. Cette hétérogénéité rend difficile la création d'une échelle unique commune aux critères.
- La compensation d'un score défavorable sur un critère par un score favorable sur un autre critère ne peut être acceptable pour le décideur. De telles situations nécessitent la mise en œuvre de procédures d'agrégation non compensatoires.

- Pour au moins un critère, des différences mineures dans les préférences ne devraient pas modifier le classement de manière significative. D'où la nécessité d'introduire des seuils discriminants (de préférences et d'indifférences).

La méthode ELECTRE III a été utilisée dans des projets de différentes tailles et dans de nombreux domaines, comme l'évaluation des alternatives énergétiques possibles utilisant les énergies renouvelables appliquées aux maisons individuelles (Catalina, et al., 2011), ou dans les problèmes liés à la demande croissante d'électricité (Georgopoulou, et al., 1997). L'utilisation de cette méthode se retrouve également dans la comparaison des actions pour la mise en œuvre des technologies d'énergie renouvelable (Beccali, et al., 2003). L'inconvénient est un processus prolongé parce que toutes les paires d'alternatives possibles doivent être examinées, parce que cette méthode ne donne aucune information sur la qualité des actions (bonnes ou mauvaises) mais donne un classement relatif et non absolu.

Pour surmonter ces inconvénients, la méthode ELECTRE Tri a été développée. Elle simplifie le processus en introduisant des actions caractéristiques évaluées mathématiquement, par des experts, ou définies par les décideurs, dans le but de classer les actions possibles en catégories hiérarchiques C^k (Greco, et al., 2016). Le processus est plus efficace que dans ELECTRE III car il suffit de comparer les alternatives avec chacun des scénarios caractéristiques de référence, ce qui conduit à une réduction du nombre de combinaisons. Les principes de base restent les mêmes que pour ELECTRE III, avec l'introduction d'un point de coupure λ et d'un niveau de crédibilité σ qui sont utilisés dans les procédures de tri une fois que les comparaisons ont été faites et les relations de surclassement obtenues. Par exemple, la méthode ELECTRE Tri-NC (Almeida-Dias, et al., 2012) a été appliquée au secteur de la rénovation énergétique en distinguant cinq catégories pour classer les 210 actions traitées selon leur performance générale : excellent (C^1), bon (C^2), modéré (C^3), faible (C^2) et mauvais (C^1) (Napoli, et al., 2020).

3.4 Choix d'une méthode d'analyse multicritère

Face au problème du choix des solutions lors des opérations de rénovation de l'habitat collectif et aux enjeux associés, l'analyse multicritères est une méthode appropriée pour comparer et aider à définir un programme de rénovation. Parmi les méthodes de surclassement, la méthode ELECTRE Tri, présentée dans la section précédente, a été choisie comme la plus adaptée au problème du choix, pour quatre raisons.

En premier lieu, il s'agit d'une méthodologie adaptée à des problèmes complexes, permettant la comparaison de nombreuses actions par rapport à de nombreux critères, tant quantitatifs que qualitatifs, et permettant l'utilisation de différentes échelles d'évaluation.

En outre, la méthode ELECTRE Tri n'ordonne pas les solutions de la meilleure à la pire, mais les classe dans des catégories de performance, hiérarchisant ainsi les actions au sein de groupes définis par l'utilisateur, ce qui permet un classement « subjectif » grâce à l'implication du décideur.

Ensuite, l'utilisation d'actions caractéristiques et la division des actions en catégories fournit des informations sur la performance globale des différentes actions et permettent de classer chaque action de manière absolue. Cet aspect est essentiel pour la sélection d'une action de rénovation énergétique, car cette dernière ne doit pas seulement être la meilleure des actions considérées mais doit également avoir une bonne performance globale et non relative.

Enfin, l'introduction de différents seuils permet de prendre en compte les incertitudes liées aux calculs et à l'évaluation des performances et d'éviter le phénomène indésirable de compensation. Il en va de même pour l'introduction d'un seuil défini par l'utilisateur, qui permet de classer les scénarios en fonction de leur crédibilité.

Nous avons donc choisi ELECTRE Tri comme méthode d'analyse multicritère pour aider au processus de décision de la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels. Pour mettre en œuvre cette analyse, il est essentiel de définir d'abord de manière objective et complète les différentes actions de rénovation envisagées. Il s'agit ensuite de définir les critères d'évaluation retenus, qui doivent décrire le problème dans sa globalité, être évaluables au regard des moyens disponibles, et être discriminants quant aux alternatives choisies. Enfin, une méthode de pondération des critères devra être définie pour donner à chaque critère un poids représentatif de son importance pour les décideurs.

Cependant le choix de mettre en place une méthodologie d'analyse multicritère et plus particulièrement le choix de la méthode ELECTRE Tri entraîne certaines problématiques. Les scénarios de rénovation potentiels doivent être clairement définis et évalués de façon rigoureuse et identique. La pondération des critères d'évaluation doit refléter les préférences des décisionnaires et permettre une comparaison exhaustive et complémentaire des scénarios potentiels sans se compenser mutuellement. Les paramètres de la méthode ELECTRE Tri doivent être définis de manière pertinente et reproductible et permettre un classement distingué des scénarios en vue d'une prise de décision justifiée. Enfin, le résultat du classement des scénarios doit être soumis à une analyse de sensibilité afin d'identifier les phénomènes de compensation ainsi que les critères et paramètre exerçant une influence importante sur les résultats.

La méthodologie proposée a été mise en place en considérant ces problématiques et en tâchant d'y apporter des solutions pertinentes et nouvelles.

3.5 Scénarios, critères et pondérations

3.5.1 Définition des scénarios potentiels de rénovation

Beaucoup d'ouvrages spécialisés en analyse décisionnelle et en recherche opérationnelle commencent la formulation du problème par une affirmation du type "étant donné un ensemble A d'alternatives". En réalité, l'ensemble A des alternative n'est jamais "donné". Il est en fait construit au cours du processus d'aide à la décision et, la plupart du temps, défini plusieurs fois (Matsatsinis & Grigoroudis, 2018). Lors de la mise en place d'une méthode d'analyse multicritère pour l'aide à la décision la première étape après avoir posé le

problème consiste donc à définir les scénarios ou alternatives que l'on va confronter, comparer.

Dans le cas de la rénovation énergétique des bâtiments d'habitation collectifs, nous proposons de définir cet ensemble A des alternatives ou des scénarios de rénovation potentiels en se basant sur des mesures écoénergétiques élémentaires combinées en groupes de mesures. Chaque combinaison de mesures écoénergétiques représente alors un scénario global de réhabilitation centré sur un poste de consommations au sein du bâtiment. Ces actions élémentaires seront ainsi choisies au sein de chaque groupe de manière à pouvoir être mises en place dans le cadre d'un programme de réhabilitation et apporter une amélioration du point de vue des consommations énergétiques du bâtiment, de l'impact environnemental, du coût pour le locataire et du confort pour les locataires. Il s'agit donc d'actions pouvant être réalisées par le maître d'ouvrage propriétaire du bâtiment. Bien entendu tout ce qui concerne les équipements personnels des locataires comme, le type de plaque de cuisson, de réfrigérateur ou encore de lave-linge, n'étant pas pris en compte ici puisque indépendant de la volonté du propriétaire ou bailleur.

Dans le cas de la réhabilitation des bâtiments d'habitation collectifs nous proposons les catégories d'actions élémentaires suivantes :

- Système de chauffage collectif et/ou individuel ;
- Système de production d'ECS collectif et/ou individuel ;
- Système de ventilation mécanique contrôlée ;
- Production locale d'énergie ;
- Menuiseries extérieures ;
- Isolation de l'enveloppe (murs extérieurs, toitures et plancher bas).

A partir de l'identification de ces catégories et pour chacune d'entre elle il va être possible de définir des actions élémentaires réalistes et réalisables permettant d'améliorer les performances et le confort du bâtiment existant. Il sera par exemple possible de définir plusieurs systèmes de chauffage (électrique, rayonnant, à accumulation, gaz, collectif, individuel...) ainsi que plusieurs types de production d'ECS (en accumulation, instantané, semi-instantané, solaire thermique, thermodynamique sur air extrait).

3.5.2 Définitions et choix des critères

Lors de l'utilisation d'une méthode d'aide à la décision multicritère (MADM), il est essentiel de définir soigneusement les critères qui seront utilisés pour évaluer et comparer les différentes options ou alternatives. Les critères servent de base pour attribuer des poids, mesurer les performances et classer les alternatives. Les critères doivent ainsi être exhaustifs, non redondants, indépendants, mesurables et en nombre limité.

L'objectif est d'élaborer une liste de critères solide et pertinente pour le problème de décision préalablement défini dans le but d'évaluer de manière plus efficace et équilibrée les différentes alternatives.

En résumé, la définition des critères en MADM est une étape cruciale dans le processus d'aide à la décision, et elle devrait être réalisée avec soin pour garantir que les résultats de l'analyse multicritère reflètent de manière adéquate les préférences et les objectifs des décideurs.

3.5.3 Affectation des pondérations

Une fois les critères d'évaluation définis, il faut déterminer leur importance relative dans le contexte de la prise de décision. Le critère " A " est-il plus pertinent pour le choix final du décideur que le critère " B " ? Comment quantifier ce rapport de prévalence entre les critères ? Cette étape clé de l'analyse multicritères consiste donc à attribuer des poids à chacun des critères retenus ; il existe de nombreuses méthodes pour déterminer les poids à attribuer aux critères.

La procédure de Simos, ou méthode des cartes, est particulièrement utilisée dans le contexte des méthodes de sur-classement telles que ELECTRE (Simos, 1990). Cette procédure permet aux décideurs, pas nécessairement experts en analyse multicritères, d'exprimer facilement leurs souhaits concernant la pondération des critères dans chaque contexte. Elle consiste à présenter aux décideurs ou à des groupes d'experts un jeu de cartes correspondant à chaque critère. La consigne est alors de classer ces critères (cartes) par ordre croissant d'importance sur une grille (Figure 60). Il est possible de regrouper plusieurs critères d'importance égale et de laisser des espaces entre deux cartes consécutives pour marquer la différence d'importance (Wang, et al., 2009). À la suite de ce classement, les critères reçoivent une pondération normalisée.

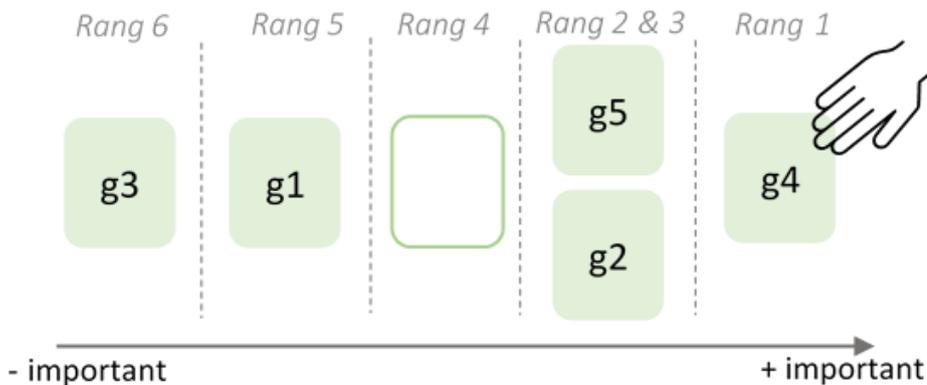


Figure 60 : Schematic representation of the SRF weighting procedure.

La procédure de Simos a été revisitée en 2002 et nommée procédure SRF (Figueira & Roy, 2002). Elle propose une variation de la méthode initiale avec l'introduction d'un ratio noté Z correspondant au rapport entre le poids du critère le plus important et celui du moins important (Rocchi, et al., 2018). C'est ce ratio qui va permettre de normaliser les poids des critères obtenus. Ainsi, la variation de Z entraîne une modification des poids (Napoli, et al., 2020). Les poids ainsi obtenus seront désignés par $\{w_1, \dots, w_j, \dots, w_n\}$.

Dans notre cas nous avons décidé, pour des raisons de facilité d'utilisation, de mettre en place cette méthode de pondération via un tableur. Nous avons donc implémenté la méthode SIMOS révisée (ou SRF) dans un tableur afin de permettre aux décisionnaires de classer facilement les critères selon leur ordre de préférence. Cela a ensuite permis de calculer automatiquement les pondérations correspondantes en suivant la procédure. L'annexe 6 – « Pondération des critères d'évaluation » présente ce tableau et ses différentes feuilles de calcul. Les étapes de la procédure SRF sont décrites dans l'annexe 7 – « Protocole pondération méthode SRF (SIMOS REVISEE) » et issues de la méthode expliquée par J. Figueira et B. Roy dans leur publication *Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure* [2002] (Figueira & Roy, 2002).

3.6 Conclusion sur la méthodologie proposée

La méthodologie proposée précédemment est classique et ne présente jusqu'ici pas de particularité puisque qu'elle s'appuie sur les principes de base de l'analyse multicritère appliqués au domaine du bâtiment et de la rénovation énergétique. Les seules originalités se trouvent dans la définition des scénarios de rénovation potentiels basés sur des catégories d'actions élémentaires et dans la mise en place d'un tableur pour faciliter le classement des critères par ordre d'importance et automatiser le calcul des pondérations qui en découlent selon la méthode SRF.

Dans la partie suivante nous appliquerons ces premiers concepts à un cas réel d'aide à la décision pour l'optimisation du choix des solutions potentielles de rénovation. Ces premières étapes de la méthodologie proposée seront détaillées, mises en application concrète et complétées par la définition de paramètres spécifiques à la méthode ELECTRE-Tri.

CHAPITRE 4 - METHODOLOGIE ET EXEMPLE D'APPLICATION

Ce chapitre présente la méthodologie développée pour aider à la décision multicritère dans le contexte spécifique de la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs. Nous avons choisi comme cas d'étude un projet de réhabilitation de 67 logements collectifs sociaux, concernant la résidence "Le Plateau" située à Villefontaine, 38090. L'objectif principal de cette réhabilitation est d'améliorer les performances énergétiques de la résidence, d'embellir les façades et de rendre les bâtiments plus accessibles. La réhabilitation thermique sera réalisée en site occupé, en tenant compte des contraintes spécifiques liées au type de bâtiment et à son fonctionnement à l'énergie électrique.

Avant de présenter la méthodologie en détail, nous établirons le contexte et les objectifs du projet initial qui visait à rechercher, étudier, expérimenter et évaluer une solution de rénovation des systèmes de chauffage collectif et d'eau chaude sanitaire individuel fonctionnant à l'électricité. Cette solution comprend l'exploitation de la production et du stockage d'énergie en local, l'autoconsommation, l'optimisation-réduction des consommations et le pilotage intelligent et automatisé des systèmes.

La première étape a consisté à choisir une résidence parmi le patrimoine de la société 3F-Immobilière Rhône-Alpes répondant à certaines conditions spécifiques. La résidence sélectionnée devait être inscrite dans la planification de réhabilitation, présenter une mauvaise étiquette énergétique vis-à-vis du diagnostic de performance énergétique, être un bâtiment d'habitation collectif représentatif du parc de la société et fonctionner à l'énergie électrique. Ces critères ont permis d'identifier la résidence "Le Plateau" comme un cas d'étude approprié pour la méthodologie d'aide à la décision multicritère.

La méthodologie se déroulera en plusieurs étapes, qui seront illustrées par le cas concret de la réhabilitation de la résidence "Le Plateau." Tout d'abord, nous définirons les scénarios potentiels de rénovation en prenant en compte différentes actions élémentaires, chacune ciblant un aspect spécifique de la rénovation énergétique. Ensuite, nous procéderons à la définition des critères d'évaluation pertinents pour mesurer la performance des scénarios par rapport aux objectifs du projet. Cette étape clé permettra d'appréhender les contraintes économiques, techniques, sociales et environnementales dans l'évaluation des scénarios.

Une fois les critères définis, nous attribuerons des poids à chacun d'entre eux, reflétant leur importance relative dans le processus de prise de décision. Cette pondération permettra de mieux appréhender les priorités du projet et de hiérarchiser les critères en fonction des motivations des décideurs.

Ensuite, nous aborderons la méthodologie d'évaluation des performances, qui nous permettra de comparer les différents scénarios de rénovation sur la base des critères définis.

Pour ce faire, nous considérerons les coûts d'investissement et d'entretien, ainsi que les durées de vie des systèmes élémentaires composant les scénarios.

Enfin, nous mettrons en œuvre l'algorithme de surclassement ELECTRE Tri, qui permettra d'effectuer une analyse multicritère approfondie des différents scénarios de rénovation, en prenant en compte les contraintes et les incertitudes associées aux données d'entrée.

Ce chapitre s'achèvera par une analyse de sensibilité et des recommandations, permettant d'examiner l'influence des fluctuations potentielles des données sur le processus de prise de décision, tout en fournissant des pistes pour l'optimisation des choix en matière de rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs. La méthodologie développée ici a pour ambition de guider efficacement les décideurs dans leur choix stratégique, en tenant compte des enjeux complexes liés à la rénovation énergétique des bâtiments collectifs, pour une meilleure transition vers un avenir énergétique durable.

4.1 Cas d'étude, contexte et objectifs

Initialement le projet prévoyait de rechercher, étudier, expérimenter et évaluer sur une résidence une solution de rénovation des systèmes de chauffage collectif et d'eau chaude sanitaire individuel fonctionnant à l'électricité en exploitant la production et le stockage d'énergie en local, l'autoconsommation, l'optimisation-réduction des consommations et le pilotage intelligent et automatisé des systèmes.

Afin de mettre en œuvre la méthodologie d'aide à la décision multicritère développée nous avons donc choisi une résidence parmi le patrimoine de la société 3F-Immobilière Rhône-Alpes remplissant certaines conditions. Tout d'abord il devait s'agir d'une résidence inscrite dans la planification stratégique de réhabilitation et présentant une mauvaise étiquette énergétique vis-à-vis du DPE. La résidence en question devait également être de type bâtiment d'habitation collectif avec un minimum de logement afin d'être représentative du parc de la société et donc être un bon cas d'étude en vue de la reproductibilité de la méthodologie. Enfin, cette résidence devait avoir la particularité de fonctionner à l'énergie électrique et donc être particulièrement compliqué à réhabiliter du fait de la réglementation et des coefficients de conversion d'énergie appliqué à l'électrique lors du calcul des DPE.

Les différentes étapes de la méthodologie proposée seront donc illustrées dans le cas d'un projet de réhabilitation de 67 logements collectifs sociaux situé à Villefontaine dans l'Isère. Le projet a pour objectif principal l'amélioration des performances énergétique de la résidence ainsi que l'embellissement architecturale des façades et l'accessibilité des bâtiments. Cette réhabilitation vise à améliorer le confort d'été et d'hiver par une réhabilitation thermique en site occupé. La résidence est composée de trois bâtiments C1, C2 et C3 construits en 1973 et regroupant des logements allant du F1 au F5. La surface habitable totale de la résidence est de 4815 m² (Figure 61, Figure 62, Figure 63).



Figure 61 : General view of the housing complex used to exemplify the methodology.



Figure 62 : East side of the housing complex.



Figure 63 : Top view of the housing complex.

Un diagnostic thermique réalisé par un bureau d'études indépendant a permis de déterminer la consommation d'énergie primaire de la résidence en appliquant une méthode de calcul réglementaire (Tableau 22) et de catégoriser le bâtiment au regard des étiquettes énergétiques et d'émissions conventionnelles de gaz à effet de serre (Tableau 23). Ce diagnostic a également permis de déterminer la consommation énergétique par poste et d'identifier les leviers d'action potentiels pour améliorer l'étiquette énergétique.

Tableau 22 : Summary of the regulatory thermal calculations.

Buildings	Net Floor Area [m ²]	Primary Energy Consumption [kWh/m ² .yr]	Distribution of Primary Energy Consumption by Use [kWh/m ² .yr]			
			Heat	DHW	Light	Vents
B1	2107	323	240	67	6	10
B2	2112	326	243	67	6	10
B3	1559	365	280	69	6	10

Tableau 23 : primary energy consumption and greenhouse gas emissions.

Buildings	Primary Energy Consumption [kWh/m ² .yr]		Greenhouse Gas Emission [kgeqCO ₂ /m ² .yr]	
	Value	Range	Value	Range
B1	323	231 to 330 E	18	11 to 20 C
B2	326	231 to 330 E	18	11 to 20 C
B3	365	331 to 365 F	20	11 to 20 C

Le diagnostic thermique réalisé sur la résidence a également mis en évidence les déficiences de l'enveloppe des trois bâtiments. Le coefficient de transfert thermique global H , a été estimé et comparé à un coefficient H_{max} . H_{max} représente le coefficient de transfert thermique global relatif à l'enveloppe et calculé en fonction des caractéristiques thermiques des composants de références. Cette valeur fait partie des garde-fous de la réglementation thermique française. La comparaison montre clairement que les bâtiments peuvent être qualifiés de mal isolés (Tableau 24).

Tableau 24 : Overall heat coefficients H .

Buildings	H_{max} [W/m ² K]	H [W/m ² K]	Différence
B1	1.00	1.25	-25%
B2	0.92	1.19	-29%
B3	0.86	1.15	-34%

Ce premier diagnostic a permis d'identifier la distribution globale des déperditions thermiques de la résidence comme moyenne des trois bâtiments (Figure 64). Il apparaît tout d'abord que le renouvellement d'air et les fenêtres (respectivement 28% et 25% des déperditions) sont les postes les plus importants. En effet, l'enveloppe du bâtiment est

actuellement composée de fenêtres en bois simple vitrage d'ancienne génération, et le système de ventilation est de type simple flux avec des unités d'extraction autorégulatrices situées dans les salles de bain. Les murs extérieurs et les ponts thermiques (respectivement 21% et 19% des déperditions) sont les deuxièmes leviers de performance énergétique les plus importants. L'importance des ponts thermiques s'explique par la présence d'un système de chauffage électrique par le sol qui entraîne des pertes importantes au niveau des liaisons entre les murs et les sols.

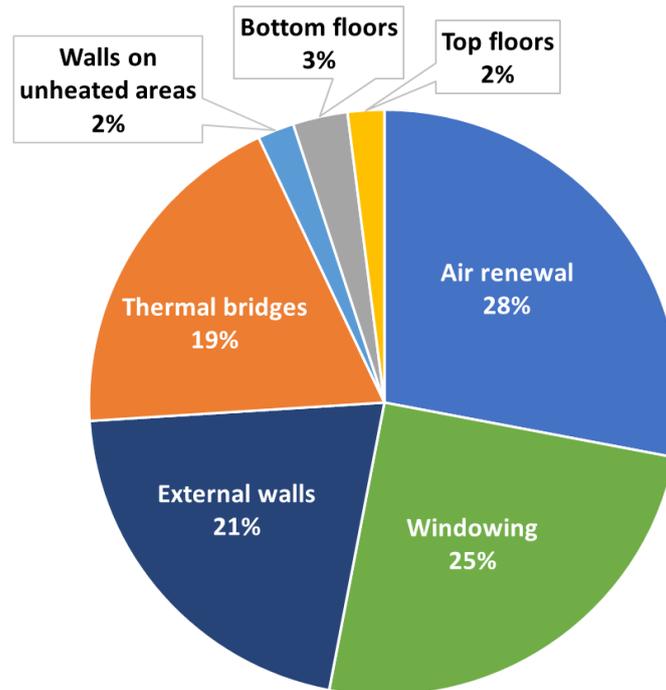


Figure 64 : Distribution of heat loss by type.

4.2 Présentation des étapes de la méthodologie

La méthodologie et l'étude de cas présentées ici sont spécifiques aux bâtiments résidentiels collectifs. L'objectif est de résoudre le problème du choix des stratégies de rénovation énergétique pour ce type de bâtiment en considérant différentes contraintes propres qui peuvent être économiques, techniques, sociales ou environnementales. Dans cette section, nous présentons les étapes de la méthodologie proposée et l'étude de cas sur laquelle elle sera expérimentée.

Afin d'utiliser la méthode ELECTRE Tri pour la sélection d'un programme de rénovation de bâtiments résidentiels collectifs, nous proposons la méthodologie suivante qui peut s'appliquer de manière générale à tout type de problème de prise de décision.

Étape 1 - Identification des objectifs

La mise en place d'un processus d'aide à la décision multicritères commence nécessairement par l'identification des décideurs, l'établissement du contexte de la décision et la définition des objectifs. Ceux-ci doivent être spécifiques, mesurables, réalistes et planifiés et seront

nécessairement associés aux critères d'évaluation utilisés dans la méthode d'analyse. Il est souvent utile de les classer et d'identifier les objectifs qui sont « distants » de ceux qui sont « immédiats ». Les objectifs distants sont généralement formulés de façon indirecte et en lien avec des stratégies globales propres à l'entreprise. Ils doivent généralement être reformulés en objectifs immédiats, plus perceptible, afin de faciliter l'analyse. Les objectifs immédiats sont ceux qui peuvent être directement liés aux résultats d'une action ou d'un ensemble restreint d'actions.

Étape 2 - Définition des scénarios de rénovation réalisables

La méthode proposée ici consiste à identifier les actions élémentaires de rénovation qui permettent d'agir sur des composants ou des systèmes spécifiques. Les actions élémentaires de rénovation sont des actions qui modifient un composant ou un système spécifique afin d'améliorer ses performances. Ces actions élémentaires peuvent agir, par exemple, sur le système de chauffage, l'isolation thermique extérieure, le remplacement des fenêtres ou le choix d'un système de production d'eau chaude sanitaire (ECS). L'objectif est ensuite de construire des scénarios globaux de rénovation pertinents à partir de combinaisons cohérentes de ces actions élémentaires de rénovation qui pourraient être mises en œuvre dans un programme de rénovation.

Étape 3 - Définition des critères d'évaluation

Pour définir les critères d'évaluation, il est nécessaire de réunir les décideurs ainsi que toutes les parties prenantes. L'objectif est d'identifier et de décrire précisément les critères qui permettront une évaluation objective des différents scénarios par rapport aux objectifs attendus du projet.

Étape 4 - Pondération des critères

Pour évaluer les scénarios de rénovation au regard des besoins du décideur, il est ensuite nécessaire d'attribuer des poids aux différents critères. Cette pondération peut être réalisée suivant plusieurs méthodes et permet d'attribuer une importance relative aux différents critères d'évaluations. Elle est primordiale dans le cas de la rénovation énergétique puisqu'elle reflète les préférences du décideur quant à l'atteinte des différents objectifs du projet.

Étape 5 - Evaluation des performances

Elle consiste à évaluer la performance de chaque scénario de rénovation globale au regard des critères définis en s'appuyant sur les compétences et l'expertise des acteurs, partenaires et collaborateurs. Suivant les méthodes d'analyse multicritère, l'évaluation peut être quantitative et basée sur des données mesurables ou bien qualitative et basée sur l'appréciation de spécialistes. Elle peut aussi être absolue et construite indépendamment des autres scénarios ou relative et basée sur une échelle spécifiquement formalisée. C'est sur la base de ces performances que seront comparés les différents scénarios.

Étape 6 - Définition des paramètres exécution de la méthode

Suivant la méthode d'aide à la décision choisi il va être nécessaire de définir un ou plusieurs paramètres spécifiques. Ces paramètres entre généralement en compte dans la méthode de calcul de l'agrégation des performances et servent de curseur pour refléter au mieux les préférences des décisionnaires. Une fois ces paramètres définis il s'agit ensuite d'exécuter l'ensemble des calculs propres à la méthode d'analyse multicritère choisi.

Étape 7 – Analyse des résultats

Une fois le classement ou la notation des alternatives obtenues il est courant d'examiner les résultats afin de détecter d'éventuelles incohérences et réaliser une analyse de sensibilité. Cette dernière permet de détecter des variations de classement ou de notations anormales.

Étape 8 - Recommandation

La dernière étape consiste à sélectionner la ou les meilleures solutions identifiées aux regards des objectifs initialement définis.

4.3 Définition des scénarios potentiels de rénovation

Dans notre cas d'étude, un ensemble de différents scénarios de rénovation a été envisagé. Ils sont composés d'actions élémentaires, chacune concernant un aspect particulier, choisies en collaboration avec les concepteurs et les fabricants afin de prendre en compte au mieux les objectifs du projet. À partir de ces actions élémentaires, des scénarios de rénovation globaux sont élaborés (Chen, et al., 2020). Une attention particulière est accordée à la cohérence des scénarios globaux : ils sont construits en veillant à la compatibilité et à la pertinence des actions élémentaires. L'objectif ici est de construire des scénarios de rénovation efficaces par rapport aux objectifs définis et pouvant être évalués selon les critères qui seront définis.

Pour construire les scénarios possibles de rénovation énergétique, nous avons d'abord défini plusieurs actions élémentaires de rénovation, réparties en sept catégories. Les objectifs directs de ces actions élémentaires sont l'amélioration du confort thermique et convivial pour les utilisateurs, ainsi que la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre du bâtiment. Ces sept catégories contiennent des actions spécifiques d'amélioration individuelle des performances énergétiques définies selon la méthodologie de la Directive européenne sur la performance énergétique 2002/91/CE (European Commission, 2002).

- Chauffage par le sol électrique existant :
 - o Maintenu ;
 - o Déconnecté.
- Chauffages auxiliaires individuels :
 - o Radiateur électrique radiant existant ;
 - o Radiateur électrique intelligent et connecté ;
 - o Accumulateur électrique intelligent et connecté ;
 - o Radiateurs basse température à eau chaude ;
 - o Sèche-serviettes automatisé.
- Production d'eau chaude sanitaire (ECS) :

- Ballon d'eau chaude électrique individuel existant ;
- Ballon d'eau chaude électrique individuel intelligent et connecté ;
- Ballon d'eau chaude thermodynamique individuel intelligent et connecté ;
- Chaudière à gaz individuelle à condensation ;
- Thermodynamique collective ;
- Ballon d'eau chaude solaire individuel + ballon d'eau chaude solaire centralisé.
- Système de ventilation :
 - Ventilation mécanique contrôlée existante ;
 - Ventilation mécanique simple flux avec unité d'extraction sensible à l'humidité.
- Production d'énergie locale :
 - Aucune ;
 - Panneaux solaires photovoltaïques sur le toit ;
 - Panneaux solaires thermiques sur le toit ;
 - Panneaux solaires hybrides sur le toit.
- Fenêtres extérieures :
 - Pas de remplacement de la menuiserie extérieure ;
 - Fenêtres en PVC à double vitrage ;
 - Fenêtres parietodynamique en bois à triple vitrage ;
 - Remplacement des portes-fenêtres des balcons par des portes-fenêtres en PVC à double vitrage.
- Isolation des murs extérieurs :
 - Conservation de l'isolation existante ;
 - Isolation thermique extérieure.

À partir de ces actions élémentaires de rénovation et de leur association selon différentes combinaisons cohérentes, sept scénarios de rénovation globaux ont été définis :

- S1 : maintien du chauffage électrique individuel existant et de l'ECS ;
- S2 : amélioration du chauffage électrique individuel et de l'ECS, version 1 ;
- S3 : amélioration du chauffage électrique individuel et de l'ECS, version 2 ;
- S4 : chauffage électrique individuel et ECS thermodynamique individuelle ;
- S5 : chauffage au gaz individuel et ECS ;
- S6 : chauffage électrique individuel et ECS thermodynamique collective ;
- S7 : chauffage électrique individuel et ECS solaire collective.

Chacune de ces sept catégories de scénarios de rénovation globaux a ensuite été divisée en 4 variantes ($S_{i,1}$ à $S_{i,4}$ avec $i = \{1; 2; 3; 4; 5; 6; 7\}$), dans lesquelles les systèmes de chauffage et d'ECS sont identiques tandis que le type de production d'énergie renouvelable et les menuiseries sont modifiés pour évaluer leur impact sur les performances. Par exemple, certains scénarios de rénovation globaux ne tiennent compte que du remplacement des fenêtres du balcon ou de l'installation de production d'énergie solaire photovoltaïque, tandis que d'autres envisagent le remplacement de toutes les fenêtres extérieures et l'installation de production d'énergie solaire thermique. Au total, $m = 28$ scénarios potentiels ont été évalués (Figure 65).

N°	Basic renovation actions																																				
	a ₁	a _{1.1}	a _{1.2}	a ₂	a _{2.1}	a _{2.2}	a _{2.3}	a _{2.4}	a _{2.5}	a ₃	a _{3.1}	a _{3.2}	a _{3.3}	a _{3.4}	a _{3.5}	a _{3.6}	a ₄	a _{4.1}	a _{4.2}	a ₅	a _{5.1}	a _{5.2}	a _{5.3}	a _{5.4}	a ₆	a _{6.1}	a _{6.2}	a _{6.3}	a _{6.4}	a ₇	a _{7.1}	a _{7.2}					
Global renovation scenarios	Existing collective electric heating floor																																				
	S _{1.1}	•																•																			
	S _{1.2}	•																•																			
	S _{1.3}	•																•																			
	S _{1.4}	•																•																			
	S _{2.1}	•					•											•																			
	S _{2.2}	•					•											•																			
	S _{2.3}	•					•											•																			
	S _{2.4}	•					•											•																			
	S _{3.1}			•														•																			
	S _{3.2}			•														•																			
	S _{3.3}			•														•																			
	S _{3.4}			•														•																			
	S _{4.1}			•														•																			
	S _{4.2}			•														•																			
	S _{4.3}			•														•																			
	S _{4.4}			•														•																			
	S _{5.1}			•														•																			
	S _{5.2}			•														•																			
	S _{5.3}			•														•																			
	S _{5.4}			•														•																			
	S _{6.1}		•															•																			
	S _{6.2}		•															•																			
	S _{6.3}		•															•																			
	S _{6.4}		•															•																			
	S _{7.1}		•															•																			
	S _{7.2}		•															•																			
	S _{7.3}		•															•																			
	S _{7.4}		•															•																			

Figure 65 : Global retrofit scenarios from individual exclusive actions.

Lors de la construction de ces sept catégories de scénarios de rénovation globaux à partir des actions élémentaires individuelles, une attention particulière a été accordée à l'homogénéité et à la cohérence des combinaisons. Une attention particulière a également été portée au scénario $S_{1.1}$, qui représente l'état initial du bâtiment sans aucune modification de l'enveloppe ou des systèmes techniques. Ce scénario sert de référence pour comparer les autres scénarios et déterminer leur impact sur les performances. Il est important de noter que tous les scénarios de rénovation globaux construits de cette manière ont en commun l'installation de sèche-serviettes dans les salles de bains pour améliorer le confort thermique des logements de manière simple et économique, ainsi que l'installation d'isolation thermique par l'extérieur, qui est l'une des premières mesures à prendre pour réduire la

consommation énergétique du bâtiment. L'annexe 4 – « Définition des scénarios de rénovation » reprend la construction des scénarios de rénovation.

4.4 Définitions et choix des critères d'évaluation

L'étape suivante consiste à décider comment comparer la contribution des différents scénarios à la réalisation des objectifs du projet. Cela nécessite la construction d'une famille cohérente de critères qui seront notés $\{g_1, \dots, g_j, \dots, g_n\}$ avec $n = 16$. Ces critères utilisés pour mesurer la performance des scénarios comparés par rapport à l'atteinte des objectifs, sont entre les mains des décideurs, dont les motivations doivent être parfaitement définies et comprises (Wang, et al., 2022). Puisqu'ils servent d'indicateurs de performance, ils doivent être mesurables dans le sens où il doit être possible de les évaluer au moins qualitativement pour apprécier la performance attendue de chaque scénario par rapport au critère considéré. De nombreux exemples de critères existent dans la littérature (Wang & Luo, 2009; Rocchi, et al., 2018; Napoli, et al., 2020).

Dans le domaine de la rénovation énergétique, les critères sont généralement regroupés en trois grandes familles : économiques, techniques et environnementaux. Néanmoins, une quatrième famille, les critères sociaux, est de plus en plus prise en compte et apparaît comme essentielle dans les procédures MCDA liées à la rénovation de logements collectifs où les actions entraînent une conséquence directe sur les personnes occupant les logements (Lizana, et al., 2016). Il apparaît donc important de prendre en compte ces quatre aspects dans l'élaboration des critères.

Il apparaît également utile de regrouper les critères en familles, notamment en raison de leur nombre. Ce regroupement permet une meilleure analyse du problème puisqu'il met en évidence la manière dont les scénarios se compensent et se reclassent au regard des objectifs clés (UK Government, 2009). Cela facilite également la détermination des poids, puisque l'allocation des poids peut se faire d'abord entre les critères appartenant à une même famille, puis entre les familles elles-mêmes. Enfin, ce choix de regroupement par famille permet d'augmenter le nombre de critères retenus pour l'analyse décisionnelle, contrairement à d'autres méthodes telles que celle développée par Zacà et al (Zacà, et al., 2015), dans laquelle le nombre de critères considérés est limité à 5. Une des difficultés de la sélection des critères est que le nombre de critères doit être relativement faible pour ne pas introduire des phénomènes de redondance ou de répétitivité. Une décision bien fondée doit être basée sur des critères peu nombreux, indépendants et complémentaires (Wang & Luo, 2009; Dirutigliano, et al., 2017).

Ainsi, en première approximation, on peut facilement se retrouver avec plus de cinquante critères exhaustifs, alors qu'une fourchette de six à vingt critères spécifiques serait beaucoup plus efficace. Pour obtenir des critères cohérents, complémentaires et exhaustifs, plusieurs règles doivent être respectées (UK Government, 2009) :

- Pertinence : les critères doivent être pertinents par rapport à l'objectif de la décision. Ils doivent refléter les aspects importants et les enjeux du problème à résoudre.
- Non-redondance : les critères ne doivent pas se chevaucher ou être redondants. Chaque critère devrait apporter une information unique et distincte à l'analyse.
- Mesurabilité : les critères doivent être mesurables ou quantifiables de manière objective. Cela signifie que des données ou des informations concrètes peuvent être collectées pour évaluer chaque critère.
- Indépendance : les critères doivent être indépendants les uns des autres, ce qui signifie que la variation d'un critère ne doit pas influencer directement la variation d'un autre critère.
- Hiérarchisation : les critères peuvent être hiérarchisés pour refléter leur importance relative. Certains critères peuvent avoir plus de poids que d'autres dans le processus de décision.
- Compréhensibilité : les critères doivent être compréhensibles et explicites, de sorte que les décideurs et les parties prenantes puissent les comprendre et les interpréter facilement.
- Consistance : les critères et les pondérations associées doivent être cohérents avec les objectifs et les préférences des décideurs. La méthode utilisée pour établir les pondérations doit être transparente.
- Sensibilité : les critères doivent être sensibles aux différences entre les alternatives. Ils doivent permettre de distinguer clairement les performances relatives des alternatives.
- Flexibilité : les critères doivent être suffisamment flexibles pour s'adapter aux variations potentielles dans les circonstances ou les préférences des décideurs.
- Validité : les critères devraient être validés pour s'assurer qu'ils mesurent réellement ce qu'ils sont censés mesurer et qu'ils sont appropriés pour le problème spécifique.
- Le nombre : un trop grand nombre de critères peut entraîner un effort analytique supplémentaire dans l'évaluation des données d'entrée et rendre la communication de l'analyse plus difficile.

Chaque critère a donc été défini en posant les trois questions suivantes : Que voulons-nous évaluer ? Pourquoi évaluons-nous un scénario en fonction de ce critère ? Quels outils, ressources ou méthodes avons-nous pour évaluer ces critères pour chaque scénario ? L'annexe 5 – « Définition des critères d'évaluation » présente de façon plus détaillée la description des critères d'évaluation.

L'ensemble des critères sélectionnés g_i est donné dans le Tableau 25, classés selon les quatre familles : économique, technique, sociale et environnementale. Chaque critère sera ensuite évalué de manière qualitative, quantitative ou binaire selon une unité d'évaluation spécifique.

Tableau 25 : Ensemble des critères d'évaluation.

	N°	Nom	Eval.	Unités
1. Economi	$g_{1.1}$	Coût d'investissement	Quantit.	€ HT.
	$g_{1.2}$	Coût de réinvestissement sur une durée de 30 ans	Quantit.	€ HT.

		Possibilité d'aides financières et subventions particulières	Quantit.	€ HT.
	$g_{1.3}$			
	$g_{1.4}$	Coût de fonctionnement	Quantit.	€ HT.
	$g_{1.5}$	Rentabilité énergétique de la solution	Quantit.	€ HT/kWh.m ² .an
2. Technique	$g_{2.1}$	Facilité d'intégration au bâti existant	Qualit.	0/5 points
	$g_{2.2}$	Mise en oeuvre en site occupé	Binaire	Oui/Non
	$g_{2.3}$	Facilité d'entretien / Maintenance	Qualit.	0/5 points
	$g_{2.4}$	Facilité de Comptage / Pilotage / Gestion de l'énergie	Qualit.	0/5 points
3. Social	$g_{3.1}$	Impact sur le coût pour le locataire	Quantit.	€ HT.
	$g_{3.2}$	Niveau de confort thermique	Qualit.	0/5 points
	$g_{3.3}$	Niveau de confort acoustique	Qualit.	0/5 points
	$g_{3.4}$	Esthétique et encombrement	Qualit.	0/5 points
4. Environ.	$g_{4.1}$	Efficacité énergétique	Quantit.	kWh/m ² .an
	$g_{4.2}$	Emissions de CO ₂ évitées	Quantit.	Ton de CO ₂ /an
	$g_{4.3}$	Lieu de production	Quantit.	km

4.5 Pondération des critères

Pour déterminer les poids des seize critères, nous avons suivi trois étapes indépendantes. La première consiste à classer les quatre familles de critères en utilisant la procédure de pondération SRF, afin de leur attribuer un poids absolu (Tableau 26). La deuxième consiste à classer indépendamment les sous-critères au sein de chaque famille pour leur attribuer un poids relatif. Enfin, les poids absolus de chaque critère sont calculés en multipliant leurs poids relatifs par ceux des familles correspondantes. De cette manière, le caractère normalisé des poids est préservé et la procédure est facilitée par rapport au nombre de critères à classer (Tableau 27, Tableau 28, Tableau 29 et Tableau 30). Les poids ainsi obtenus seront désignés par $\{w_1, \dots, w_j, \dots, w_n\}$.

Tableau 26 : Pondération des 4 familles

N°	Familles de critères	
F_1	45.00	Economique
F_2	25.00	Technique
F_3	15.00	Social
F_4	15.00	Environnemental

Tableau 27: Poids des critères économiques

1. Economique		
N°	Relative	Absolue
<i>g</i>_{1.1}	27.27	12.27
<i>g</i>_{1.2}	23.64	10.64
<i>g</i>_{1.3}	9.09	4.09
<i>g</i>_{1.4}	27.27	12.27
<i>g</i>_{1.5}	12.73	5.73

Tableau 28: Poids des critères techniques

2. Technique		
N°	Relative	Absolue
<i>g</i>_{2.1}	28.57	7.14
<i>g</i>_{2.2}	42.85	10.71
<i>g</i>_{2.3}	14.29	3.57
<i>g</i>_{2.4}	14.29	3.57

Tableau 29: Poids des critères sociaux

3. Social		
N°	Relative	Absolue
<i>g</i>_{3.1}	40.90	6.14
<i>g</i>_{3.2}	31.82	4.77
<i>g</i>_{3.3}	13.64	2.05
<i>g</i>_{3.4}	13.64	2.05

Tableau 30: Poids des critères environnementaux

4. Environnemental		
N°	Relative	Absolue
<i>g</i>_{4.1}	50.00	7.50
<i>g</i>_{4.2}	33.33	5.00
<i>g</i>_{4.3}	16.67	2.50

4.6 Méthodologie d'évaluation des performances

Comme présenté dans la section précédente, vingt-huit scénarios de rénovation énergétique ont été construits à partir d'actions élémentaires de rénovation (Figure 65). Pour évaluer la performance économique de ces différents scénarios de rénovation énergétique, nous avons recherché les coûts d'investissement (achat et installation) et les coûts d'entretien de chaque système élémentaire auprès des fournisseurs et des entreprises de maintenance afin de calculer le coût global de chaque scénario de rénovation. Une partie des coûts utilisés pour l'évaluation des critères économiques sont présentés en annexe 8 – « Estimatif des coûts de fourniture et de pose de différents matériels ». Nous avons également déterminé, en fonction de la durée de vie moyenne de chaque système élémentaire qui compose les scénarios, quel serait le coût de réinvestissement pour l'entreprise sur une période de trente ans. Cette période représente un intervalle de maintenance majeure, courant dans le secteur du bâtiment.

Pour évaluer la performance des scénarios de rénovation énergétique en ce qui concerne les critères techniques et sociaux, nous avons fait appel à des consultants en ingénierie et en sociologie spécialisés dans le domaine du bâtiment et de la transition énergétique. L'objectif était d'évaluer des critères qualitatifs spécifiques par une note de 0 à 5. Le principe de la notation consiste à attribuer à chaque action élémentaire au sein de la même catégorie de système (par exemple : production d'ECS) une note représentative de sa performance relative pour le critère considéré. La même procédure est suivie pour chaque catégorie d'actions élémentaires et tous les critères qualitatifs. Ensuite, une note est construite selon une distribution linéaire entre le scénario de rénovation globale avec la meilleure note et celui

avec la plus mauvaise note pour les critères qualitatifs considérés. Cela nous donne, pour les critères $g_{2.1}$, $g_{2.3}$, $g_{2.4}$, $g_{3.2}$, $g_{3.3}$ et $g_{3.4}$, une note sur une échelle de cinq, représentant la performance de chaque scénario.

Pour comparer les scénarios du point de vue de leur performance énergétique, nous avons fait appel à des consultants en ingénierie spécialisés dans la simulation thermique des bâtiments, capables de modéliser tous les scénarios envisagés. L'outil informatique utilisé pour la modélisation simule le comportement du bâtiment et de ses différents composants et systèmes. De nombreuses simulations ont été effectuées en faisant varier les paramètres d'entrée (système de chauffage, production d'ECS, type de fenêtres, production d'énergie locale, etc.) afin de déterminer la consommation d'énergie primaire et finale de chaque scénario.

Ce processus d'évaluation, avec le soutien des fournisseurs et des installateurs d'équipements techniques, d'un cabinet de sociologie spécialisé, de bureaux d'ingénierie technique et de spécialistes de la gestion locative, a permis de construire la matrice de performance présentée dans le Tableau 31 et le Tableau 32. Elle contient les évaluations de chaque scénario de rénovation globale présenté dans la Figure 65, par rapport aux différents critères définis dans le Tableau 25.

4.7 Algorithme de surclassement ELECTRE Tri

4.7.1 Présentation

Une fois que la matrice de performance est obtenue, une procédure d'analyse multicritère de la décision (MCDA) peut être utilisée pour classer les scénarios. Nous avons développé un algorithme qui reproduit la procédure de la méthode ELECTRE Tri de manière rapide et automatisée (Maystre, et al., 1994). Cette méthode est basée sur un processus d'assignation des scénarios à plusieurs catégories de classement appelées C^k , caractérisées par des scénarios de référence caractéristiques supérieurs et inférieurs appelés b^k . Ces scénarios de référence peuvent être définis par les utilisateurs et leurs performances sont données pour délimiter les catégories de classement. Pour la mise en œuvre de la méthode, le langage de programmation Python a été choisi pour sa syntaxe lisible et sa facilité d'utilisation, pour sa popularité et sa polyvalence en termes de support informatique. Le code Python développé dans le cadre de ce travail de recherche ainsi que les données utilisées sont entièrement disponibles et libres d'accès (Daniel & Ghiaus, 2022) (https://github.com/Soul-Daniel/ELECTRE_Tri_B.py-2.0).

Tableau 31 : Matrice de performance (Part 1/2).

Scenarios	Economiques					Techniques			
	$g_{1.1}$	$g_{1.2}$	$g_{1.3}$	$g_{1.4}$	$g_{1.5}$	$g_{2.1}$	$g_{2.2}$	$g_{2.3}$	$g_{2.4}$
	[€ HT.]	[€ HT.]	[€ HT.]	[€ HT.]	[€/kWh/ m ² .an]	[/5]	[OUI/ NON]	[/5]	[/5]
$S_{1.1}$	0	1 757 134	0	82 701	0	5.00	OUI	4.38	3.57
$S_{1.2}$	1 008 654	551 661	952 088	41 346	5933	3.33	OUI	5.00	3.57
$S_{1.3}$	1 260 874	711 361	991 697	36 119	6591	3.00	OUI	5.00	3.57
$S_{1.4}$	905 165	551 661	917 604	42 268	5457	3.67	OUI	5.00	3.57
$S_{2.1}$	1 239 757	551 661	955 885	40 971	6771	2.33	OUI	4.38	4.29
$S_{2.2}$	1 397 247	625 566	996 168	28 230	6736	1.67	OUI	3.75	3.57
$S_{2.3}$	1 636 981	785 266	1 035 489	23 290	7185	1.33	OUI	3.75	3.57
$S_{2.4}$	1 282 394	390 966	995 521	28 762	6255	2.00	OUI	3.75	3.57
$S_{3.1}$	1 344 232	610 011	957 187	41 692	7140	2.00	OUI	4.38	5.00
$S_{3.2}$	1 522 330	683 916	1 031 776	28 197	7087	1.33	OUI	3.75	4.29
$S_{3.3}$	1 751 844	843 616	1 070 386	23 760	7526	1.00	OUI	3.75	4.29
$S_{3.4}$	1 385 515	449 316	1 030 933	28 758	6545	1.67	OUI	3.75	4.29
$S_{4.1}$	1 531 907	775 596	1 070 213	32 638	6586	1.67	OUI	3.75	5.00
$S_{4.2}$	1 635 756	849 501	1 110 816	19 664	6342	1.00	OUI	3.13	4.29
$S_{4.3}$	1 899 185	1 009 201	1 149 305	15 369	6895	0.67	OUI	3.13	4.29
$S_{4.4}$	1 517 360	614 901	1 109 597	20 507	5980	1.33	OUI	3.13	4.29
$S_{5.1}$	1 427 140	787 239	1 124 178	26 341	5284	1.33	NON	2.50	2.86
$S_{5.2}$	1 555 978	861 144	1 131 706	12 639	5229	0.67	NON	1.88	2.14
$S_{5.3}$	1 796 800	1 020 844	1 204 438	10 007	5867	0.33	NON	1.88	2.14
$S_{5.4}$	1 492 598	626 544	1 131 267	12 444	5027	1.00	NON	1.88	2.14
$S_{6.1}$	1 372 026	811 447	1 030 582	35 809	6507	1.67	OUI	3.13	2.86
$S_{6.2}$	1 526 016	885 352	1 071 164	22 827	6466	1.00	OUI	2.50	2.14
$S_{6.3}$	1 717 070	1 045 052	1 109 732	18 439	6767	0.67	OUI	2.50	2.14
$S_{6.4}$	1 377 529	650 752	1 070 150	23 678	5934	1.33	OUI	2.50	2.14
$S_{7.1}$	1 404 394	847 315	995 961	37 880	6790	1.00	NON	0.63	0.71
$S_{7.2}$	1 533 952	921 220	1 070 209	24 669	6603	0.33	NON	0.00	0.00
$S_{7.3}$	1 771 679	1 080 920	1 109 007	20 125	7057	0.00	NON	0.00	0.00
$S_{7.4}$	1 432 939	686 620	1 035 825	25 267	6251	0.67	NON	0.00	0.00

Tableau 32 : Matrice de performance (Part 2/2)

Scenarios	Sociaux				Environnementaux		
	$g_{3.1}$	$g_{3.2}$	$g_{3.3}$	$g_{3.4}$	$g_{4.1}$	$g_{4.2}$	$g_{4.3}$
	[€ HT.]	[/5]	[/5]	[/5]	[kWh/ m ² .an]	[Ton of CO2/an]	[km]
$S_{1.1}$	368	0.00	5.00	4.00	0	0	0
$S_{1.2}$	182	2.78	5.00	4.00	170	65	418
$S_{1.3}$	159	3.33	5.00	4.00	191	74	690
$S_{1.4}$	186	2.22	5.00	4.00	166	64	418
$S_{2.1}$	168	4.44	4.00	4.00	183	71	2368
$S_{2.2}$	141	4.44	4.00	4.00	207	80	2448
$S_{2.3}$	118	5.00	4.00	4.00	228	88	2720
$S_{2.4}$	144	3.89	4.00	4.00	205	79	2448
$S_{3.1}$	162	2.22	3.00	2.00	188	73	2368
$S_{3.2}$	133	2.22	3.00	2.00	215	83	2448
$S_{3.3}$	113	2.78	3.00	2.00	233	90	2720
$S_{3.4}$	136	1.67	3.00	2.00	212	82	2448
$S_{4.1}$	114	2.22	1.00	0.00	233	90	2314
$S_{4.2}$	86	2.22	1.00	0.00	258	99	2394
$S_{4.3}$	66	2.78	1.00	0.00	275	106	2666
$S_{4.4}$	91	1.67	1.00	0.00	254	98	2394
$S_{5.1}$	164	0.56	0.00	1.00	270	104	2425
$S_{5.2}$	135	0.56	0.00	1.00	298	115	2505
$S_{5.3}$	113	1.11	0.00	1.00	306	118	2777
$S_{5.4}$	137	0.00	0.00	1.00	297	114	2505
$S_{6.1}$	138	3.89	5.00	5.00	211	81	2618
$S_{6.2}$	110	3.89	5.00	5.00	236	91	2698
$S_{6.3}$	90	4.44	5.00	5.00	254	98	2970
$S_{6.4}$	114	3.33	5.00	5.00	232	89	2698
$S_{7.1}$	142	4.44	3.00	3.00	207	80	2548
$S_{7.2}$	114	4.44	3.00	3.00	232	89	2628
$S_{7.3}$	93	5.00	3.00	3.00	251	97	2900
$S_{7.4}$	117	3.89	3.00	3.00	229	88	2628

L'algorithme de surclassement ELECTRE Tri se déroule en trois étapes principales :

- Importation des données d'entrée du problème : matrice de performance, poids des critères, scénarios de référence caractéristiques et seuils ;
- Traitement des données en utilisant la méthode ELECTRE Tri ;
- Affichage des résultats.

Dans ce qui suit, nous nommerons les différents paramètres de la manière suivante :

- $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_m\}$ L'ensemble des scénarios potentiels ;
- $F = \{g_1, g_2, \dots, g_j, \dots, g_n\}$ L'ensemble des critères ;
- $W = \{w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n\}$ L'ensemble des poids des critères ;
- $B = \{b^0, b^2, \dots, b^k, \dots, b^q\}$ L'ensemble des scénarios de référence caractéristiques avec $q \geq 2$;
- $C = \{C^1, C^2, \dots, C^k, \dots, C^q\}$ L'ensemble des catégories de classement ;
- q_j, p_j, v_j L'ensemble des seuils d'indifférence, de préférence et de veto tels que $q_j \leq p_j \leq v_j$.

Dans les expressions suivantes, nous noterons $g_j(S_i)$ la performance du scénario S_i par rapport au critère g_j . Nous utiliserons également le paramètre μ_j défini par l'équation (1) pour représenter la performance moyenne de tous les scénarios sur un critère donné, et le paramètre $\sqrt{V_j}$ défini par l'équation (2) pour représenter la racine carrée de la variance des performances sur un critère donné.

$$\mu_j = \mu(g_j) = \frac{\sum_{i=1}^m g_j(S_i)}{m} \quad (1)$$

$$\sqrt{V_j} = \sqrt{V(g_j)} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (g_j(S_i) - \mu_j)^2} \quad (2)$$

4.7.2 Définition des seuils de tolérance

Pour comparer les différents scénarios un par un selon chaque critère, il est nécessaire de définir des seuils. Ces seuils déterminent si un scénario est préféré, équivalent, pire ou ne peut pas être comparé à un autre. Ils prennent en compte la nature imparfaite des données lors de l'évaluation des performances des scénarios, ainsi que l'arbitraire qui affecte la définition des critères. Ainsi, trois seuils doivent être définis pour chaque critère :

- Le seuil d'indifférence " q_j " : il indique, pour un critère donné, la différence maximale de performance en dessous de laquelle deux solutions ne peuvent pas être comparées. $|g_j(S_\alpha) - g_j(S_\beta)| \leq q_j$ Représente un avantage non significatif d'un scénario sur l'autre, ce qui signifie que S_α est indifférent à S_β selon le critère g_j , noté $S_\alpha I_j S_\beta$.
- Le seuil de préférence " p_j " : il indique, pour un critère donné, la différence minimale de performance à partir de laquelle une solution sera préférée à une autre. $g_j(S_\alpha) - g_j(S_\beta) > p_j$ Représente un avantage significatif de S_α sur S_β , ce qui signifie que S_β est strictement préféré à S_β selon le critère g_j , noté $S_\alpha P_j S_\beta$.

- Le seuil de veto " v_j " : il est caractéristique de la méthode ELECTRE Tri et évite le phénomène de compensation des critères. Le seuil de veto représente, pour un critère donné, l'écart de performance au-delà duquel la préférence d'un scénario sur un autre ne peut pas être compensée par un meilleur critère. $g_j(S_\alpha) - g_j(S_\beta) > v_j$ Représente une préférence stricte de S_α sur S_β quel que soit le critère considéré, noté $S_\alpha P S_\beta$.

Dans la méthode ELECTRE Tri, ces seuils correspondent à des valeurs absolues caractérisant la différence de performance entre deux scénarios comparés et pour un critère donné. Ils peuvent être définis par les décideurs qui les choisissent en fonction de leurs préférences et des écarts de performance qui ont du sens pour eux, comme dans le cas d'un coût d'investissement par exemple. Cependant, le décideur n'est pas toujours un expert sur certains critères et peut ne pas être en mesure de définir ces seuils. Pour notre étude de cas, nous avons choisi de définir ces seuils de tolérance comme un certain pourcentage de la performance moyenne des scénarios indépendamment pour chaque critère. Ce choix a été fait pour des raisons pratiques liées au grand nombre de critères et à la nature expérimentale de la méthodologie développée. Définir les seuils de cette manière permet également de les faire varier facilement, en modifiant les paramètres γ , pour analyser l'impact sur le classement des scénarios. Dans notre étude de cas, nous avons défini le seuil d'indifférence comme suit :

$$q_j = \gamma_q \cdot \mu_j \quad (3)$$

où $\gamma_q = 5 \%$, le seuil de préférence est le suivant :

$$p_j = \gamma_p \cdot \mu_j \quad (4)$$

où $\gamma_p = 15 \%$, et le seuil de veto est le suivant :

$$v_j = \gamma_v \cdot \mu_j \quad (5)$$

où $\gamma_v = 30 \%$. Nous avons obtenu les valeurs des seuils présentées dans le Tableau 33.

Tableau 33 : Définition des seuils de la méthode ELECTRE Tri

N°	Unités	Seuils		
		q_j	p_j	v_j
$g_{1.1}$	[€ HT.]	70 942	212 825	468 215
$g_{1.2}$	[€ HT.]	39 260	117 781	259 118
$g_{1.3}$	[€ HT.]	50 819	152 458	335 408
$g_{1.4}$	[€ HT.]	1 436	4 309	9 480
$g_{1.5}$	[€/kWh/m ² .an]	309	926	2 037
$g_{2.1}$	[0/5]	0.08	0.23	0.51
$g_{2.2}$	[O/N]	0	1	2
$g_{2.3}$	[0/5]	0.15	0.45	0.98
$g_{2.4}$	[0/5]	0.15	0.45	0.99
$g_{3.1}$	[€ HT.]	7	21	45
$g_{3.2}$	[0/5]	0.14	0.43	0.94

$g_{3.3}$	[0/5]	0.15	0.45	0.99
$g_{3.4}$	[0/5]	0.14	0.41	0.90
$g_{4.1}$	[kWh/m ² .an]	11	33	74
$g_{4.2}$	[Ton of CO2/an]	4	11	24
$g_{4.3}$	[km]	113	338	744

4.7.3 Définition des scénarios caractéristiques de référence

L'objectif de la procédure ELECTRE Tri est d'attribuer les différents scénarios à un ensemble de catégories classées du pire au meilleur et notées $\{C^1, \dots, C^k, \dots, C^q\}$ avec $q \geq 2$ (Almeida-Dias, et al., 2010). Ces catégories de classement sont délimitées par des scénarios de référence caractéristiques également appelés scénarios de référence aux limites ou scénarios limites et notés $\{b^0, b^1, \dots, b^k, \dots, b^q\}$. Ils représentent les frontières entre deux catégories de classement consécutives ; cela signifie que le scénario de référence inférieur d'une catégorie meilleure est également le scénario de référence supérieur d'une catégorie consécutive moins bonne. Il est important de noter que b^0 est le scénario de référence inférieur et b^q est le scénario de référence supérieur. Ces scénarios de référence inférieur et supérieur les plus élevés, sont construits à partir des meilleures et des pires performances des scénarios de rénovation selon les équations (6) et (7). Ils représentent respectivement les performances les meilleures et les pires sélectionnées parmi les scénarios $g_j(S_i)$ quel que soit le critère g_j considéré.

$$g_j(b^0) = \begin{cases} -\max(g_j(S_i)) - p_j & \text{dans le cas de critères indirects} \\ \min(g_j(S_i)) - p_j & \text{dans le cas de critères directs} \end{cases} \quad (6)$$

$$g_j(b^q) = \begin{cases} -\min(g_j(S_i)) + p_j & \text{dans le cas de critères indirects} \\ \max(g_j(S_i)) + p_j & \text{dans le cas de critères directs} \end{cases} \quad (7)$$

Le seuil de préférence est utilisé dans ces expressions pour garantir une préférence stricte lors de la procédure de classement. Selon que la performance pour le critère considéré doit être maximisée (directe) ou minimisée (indirecte), la construction des performances de ces scénarios de référence inférieur et supérieur sera différente.

Il est important de noter que les critères ont un type qui peut être direct, indirect ou binaire. Les critères de type indirect sont caractérisés par des performances que l'on préfère minimiser et les performances des scénarios pour ces critères sont de signe négatif. En revanche, les critères de type direct sont caractérisés par des performances que l'on préfère maximiser.

Pour cette application, nous avons choisi de créer six scénarios de référence caractéristiques $B = \{b^0, b^1, b^2, b^3, b^4, b^5\}$. Ces six scénarios caractéristiques seront utilisés pour délimiter cinq catégories $C = \{C^1, C^2, C^3, C^4, C^5\}$ et représentent pour b^1 la frontière entre C^1 et C^2 , et pour b^2 la frontière entre C^2 et C^3 . Le choix de cinq catégories a été fait pour limiter le nombre de scénarios caractéristiques à définir tout en permettant une classification suffisamment

distinctive. De plus, pour cette application d'aide à la décision, une classification selon cinq catégories de classement était suffisante pour les décideurs.

En général, l'ensemble des scénarios de référence doit être construit par un processus interactif entre l'analyste et le décideur. Ce processus rend l'application de la méthode ELECTRE Tri plus longue et complexe. Pour éviter ce problème, et compte tenu de la nature expérimentale de ce projet et du grand nombre de critères et de scénarios à comparer, nous avons choisi de définir ces scénarios de référence à l'aide d'une méthode statistique fixé par l'équation (8).

$$g_j(b^k) = \begin{cases} -(\mu_j + \delta_j^k \sqrt{V_j}) & \text{dans le cas de critères indirects} \\ \mu_j + \delta_j^k \sqrt{V_j} & \text{dans le cas de critères directs} \end{cases} \quad (8)$$

Cela permet de construire les scénarios de référence de façon équitable et objective. Nous obtenons les résultats présentés dans le Tableau 34. Dans la définition de ces scénarios de référence, le paramètre δ_j^k est utilisé comme variable d'ajustement pour obtenir la répartition la plus équilibrée possible des scénarios de rénovation dans les différentes catégories de classement C^k , et ce indépendamment pour chaque critère. Le graphique de la Figure 66 schématise, pour chaque critère, la répartition des scénarios dans les catégories délimitées par les scénarios caractéristiques de référence.

Tableau 34 : Définition des scénarios caractéristique de référence.

N°	Unités	Type	b^0	b^1	b^2	b^3	b^4	b^5
$g_{1.1}$	[€ HT.]	INDIRECT	-2 112 010	-1 667 495	-1 528 955	-1 418 833	-1 330 025	212 825
$g_{1.2}$	[€ HT.]	INDIRECT	-1 874 915	-928 689	-837 382	-680 856	-602 593	-273 185
$g_{1.3}$	[€ HT.]	INDIRECT	-152 458	963 728	1 031 134	1 071 156	1 111 178	1 356 896
$g_{1.4}$	[€ HT.]	DIRECT	-87 010	-38 545	-28 729	-24 522	-18 913	-5 698
$g_{1.5}$	[€/kWh/m ² .an]	BINARY	-8 452	-6 853	-6 717	-6 376	-5 491	926
$g_{2.1}$	[0/5]	DIRECT	-0.23	0.71	1.20	1.54	2.09	5.00
$g_{2.2}$	[O/N]	BINARY	0	0	0	1	1	1
$g_{2.3}$	[0/5]	DIRECT	-0.45	1.93	2.60	3.26	4.00	5.00
$g_{2.4}$	[0/5]	DIRECT	-0.45	1.98	2.35	3.30	4.28	5.00
$g_{3.1}$	[€ HT.]	INDIRECT	-389	-160	-137	-115	-99	-46
$g_{3.2}$	[0/5]	DIRECT	-0.43	1.78	2.23	3.74	4.19	5.00
$g_{3.3}$	[0/5]	DIRECT	-0.45	1.00	2.10	3.36	4.08	5.00
$g_{3.4}$	[0/5]	DIRECT	-0.41	0.59	1.87	3.14	4.41	5.00
$g_{4.1}$	[kWh/m ² .an]	DIRECT	-33	194	223	234	257	340
$g_{4.2}$	[Ton of CO ₂ /an]	INDIRECT	-11	60	74	82	90	117
$g_{4.3}$	[km]	INDIRECT	-3308	-2737	-2657	-2496	-2376	338

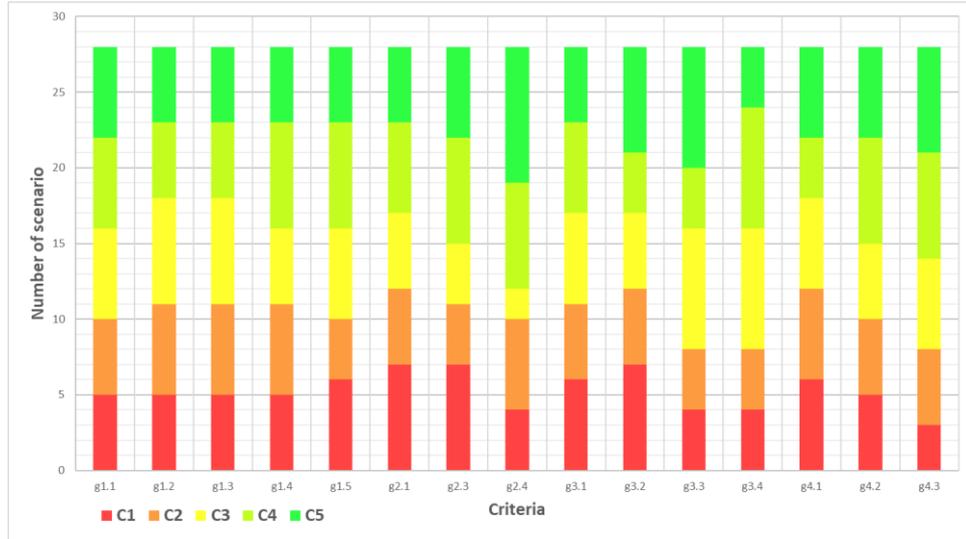


Figure 66 : Répartition des scénarios de rénovation dans les différentes catégories de classement pour chaque critère.

Dans le but de respecter le caractère ordonné et distinct des catégories de classement C^k , il est nécessaire de maintenir une certaine dominance successive entre les scénarios de référence caractéristiques b^k et b^{k+1} . Cette condition de dominance peut être définie comme suit :

$$\begin{aligned} \forall j, g_j(b^{k+1}) &\geq g_j(b^k) \text{ and,} \\ \exists j, g_j(b^{k+1}) &> g_j(b^k), k = 0, \dots, q \end{aligned} \quad (9)$$

Ainsi, deux scénarios de référence caractéristiques permettent de délimiter correctement deux catégories de classement si et seulement si b^{k+1} est au moins faiblement préféré à b^k pour au moins un critère. Comme proposé par J. Almeida-Dias et al. à travers les degrés de crédibilité, équation (20), cette condition de séparabilité peut être exprimée en termes de séparabilité faible (Almeida-Dias, et al., 2010) :

$$\sigma(b^k, b^{k+1}) < 1, h = 0, \dots, q \quad (10)$$

Séparabilité stricte :

$$\sigma(b^k, b^{k+1}) < \frac{1}{2}, h = 0, \dots, (q - 1) \quad (11)$$

Et séparabilité hyper-stricte :

$$\sigma(b^k, b^{k+1}) = 0, h = 0, \dots, (q - 1) \quad (12)$$

4.7.4 Seuil de crédibilité

Le seuil de crédibilité λ peut être défini comme le plus petit niveau de valeur de crédibilité compatible avec l'affirmation $S_i > b^k$. Cela nous permet de décider des relations de sur-classification existantes entre deux scénarios S_i et b^k . Cependant, les valeurs de λ observées dans la littérature se situent le plus souvent entre 0,60 et 0,75, comme la méthode appliquée

par Rocchi et al. (Rocchi, et al., 2018) qui propose un point de coupure égal à la somme des poids des trois critères les plus significatifs ($\lambda = 0.7415$) (Rocchi, et al., 2018). Il est important de noter que plus la valeur du seuil de crédibilité est élevé, plus il conduira à des situations d'incomparabilités.

Pour estimer le paramètre des seuils de crédibilité minimum, J. Almeida-Dias et al. (Almeida Dias, et al., 2008) ont proposé la relation suivante :

$$\lambda_{min} = \max_{k=0, \dots, (q-1)} \{\sigma(b^k, b^{k+1})\} \quad (13)$$

où $\sigma(b^k, b^{k+1})$ représente le degré de crédibilité de l'affirmation $b^k > b^{k+1}$. Selon la relation (13), le paramètre du seuil de crédibilité minimum est estimé à $\lambda_{min} = 0$ dans notre étude de cas. Cela reflète une séparabilité hyper-strict entre les différents scénarios de référence caractéristiques et donc une définition optimale des catégories de classement.

4.7.5 Implémentation de l'algorithme ELECTRE Tri

L'algorithme peut être divisé en trois étapes principales. La première consiste à traiter les données d'entrée du problème nécessaires à l'exécution de la procédure ELECTRE Tri résumée dans la Figure 72. Les données d'entrée à prendre en compte sont la matrice de performances, les poids des critères, les seuils de tolérance et les scénarios caractéristiques.

La matrice de performances peut être représentée par :

$$M_{ij} = g_j(S_i) \quad (14)$$

où les lignes i correspondent aux différents scénarios tandis que les colonnes j correspondent aux critères d'évaluation. Ensuite, les indicateurs suivants de la méthode ELECTRE Tri sont calculés.

Indices de concordance

Les indices de concordance par critères sont donnés par les équations (15).

$$\begin{aligned} c_j(S_i, b^k) &= 0 \Leftrightarrow p_j < g_j(b^k) - g_j(S_i) \\ 0 < c_j(S_i, b^k) < 1 &\Leftrightarrow q_j < g_j(b^k) - g_j(S_i) \leq p_j \\ c_j(S_i, b^k) &= 1 \Leftrightarrow g_j(b^k) - g_j(S_i) \leq q_j \end{aligned} \quad (15)$$

Ils s'expriment à travers les seuils d'indifférence et de préférence. Ils sont quantifiés par une valeur entre $[0,1]$ représentant le degré de fiabilité de l'affirmation "le scénario S_i est au moins aussi bon que le scénario limite b^k pour le critère donné g_j ". Plus $c_j(S_i, b^k)$ se rapproche de 1, plus il y a de similarité entre S_i et b^k . D'une manière générale les indices de concordance peuvent se calculer par l'expression (16).

$$c_j(S_i, b^k) = \text{Min} \left\{ 1, \text{Max} \left(0, \frac{g_j(S_i) - g_j(b^k) + p_j}{p_j - q_j} \right) \right\} \quad (16)$$

Il est donc nécessaire de calculer les indices de concordance de manière réciproque $c_j(S_i, b^k)$ et $c_j(b^k, S_i)$ pour prendre en compte l'affirmation opposée. La Figure 67 schématise le principe de concordance d'une alternative par rapport à un profil de référence et le rôle des seuils de préférence et d'indifférence.

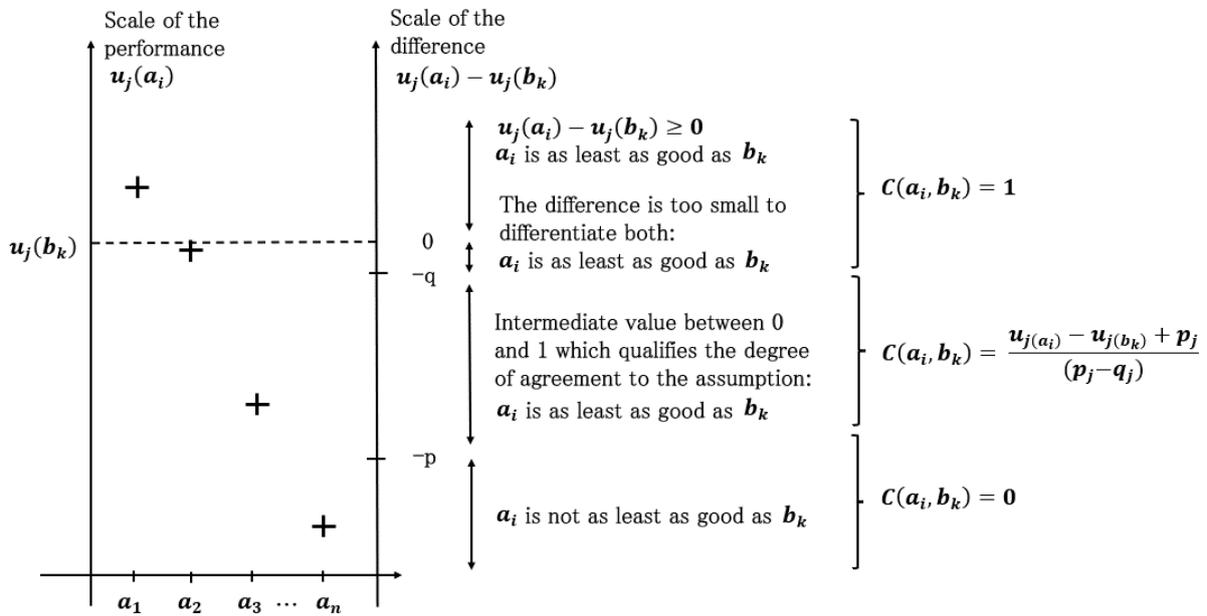


Figure 67 : Concordance d'une alternative par rapport à un profil.

Indices de discordance

Les indices de discordance par critères sont donnés par les équations (17).

$$\begin{aligned}
 d_j(S_i, b^k) = 1 &\Leftrightarrow v_j < g_j(b^k) - g_j(S_i) \\
 0 < d_j(S_i, b^k) < 1 &\Leftrightarrow p_j < g_j(b^k) - g_j(S_i) \leq v_j \\
 d_j(S_i, b^k) = 0 &\Leftrightarrow g_j(b^k) - g_j(S_i) \leq p_j
 \end{aligned} \tag{17}$$

Ils s'expriment à travers les seuils de préférence et de veto. Ils sont quantifiés par une valeur entre [0,1] et permettent de déterminer dans quelle mesure il y a une discordance avec l'affirmation " S_i surpasse b^k pour le critère donné g_j ". Il atteint sa valeur maximale lorsque le critère g_j met son veto à la relation de surclassement. Le calcul des indices de discordance peut être généralisé par l'expression (18).

$$d_j(S_i, b^k) = \min \left\{ 1, \max \left(0, \frac{g_j(b^k) - g_j(S_i) - p_j}{v_j - p_j} \right) \right\} \tag{18}$$

Il est également nécessaire, conformément à la procédure ELECTRE Tri, de calculer les indices de discordance de manière réciproque afin d'évaluer à la fois l'affirmation précédente $d_j(S_i, b^k)$ et son opposé $d_j(b^k, S_i)$. La Figure 68 schématise le principe de discordance d'une alternative par rapport à un profil de référence et le rôle des seuils de préférence et de veto.

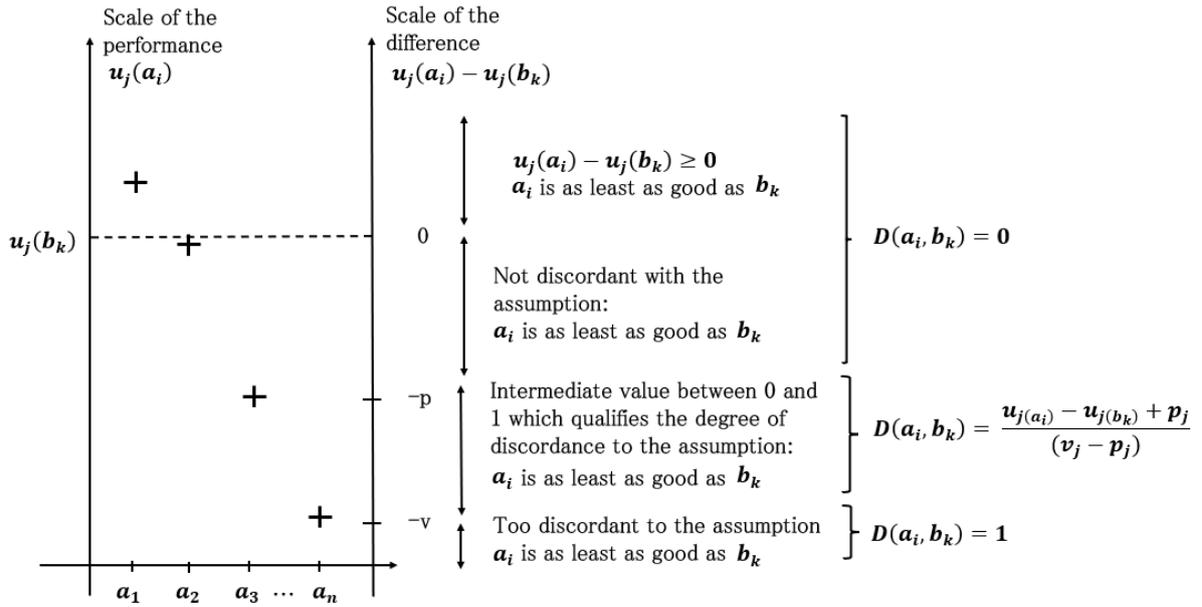


Figure 68 : Discordance d'une alternative par rapport à un profil.

Indices de concordance globale

Les indices de concordance globale sont donnés par l'équation (19).

$$C(S_i, b^k) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \cdot c_j(S_i, b^k)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (19)$$

Ils permettent de déterminer dans quelle mesure il y a une concordance avec l'affirmation « S_i surpasse globalement b^k ».

Degrés de crédibilité

Dans la méthode ELECTRE Tri, la plausibilité des relations de surclassement entre les paires de scénarios et de scénarios de référence caractéristiques varie d'une paire à l'autre et est finalement représentée par la crédibilité du surclassement.

$$\sigma(S_i, b^k) = C(S_i, b^k) \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(S_i, b^k)}{1 - C(S_i, b^k)} \quad (20)$$

Construction des relations de surclassement

L'étape suivante consiste à déterminer les relations de surclassement en utilisant la valeur du seuil de coupe lambda et les valeurs de degré de crédibilité pour décider des quatre relations suivantes : préférence de S_i sur b^k ">", préférence de b^k sur S_i "<", indifférence "I" ou incompatibilité "R" (Figure 69 et Figure 70).

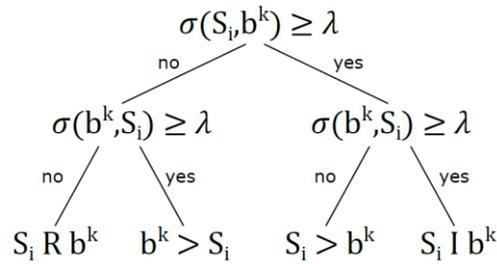


Figure 69 : Organigramme de construction de la relation de surclassement.

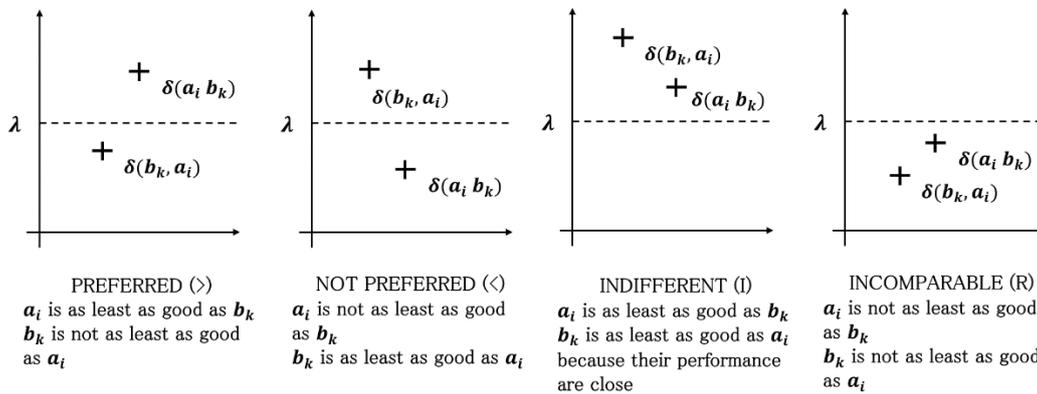


Figure 70 : Schéma des relations entre les alternatives et les profils.

Enfin, deux procédures de classement spécifiques à la méthode ELECTRE Tri sont effectuées : le "classement optimiste" et le "classement pessimiste". Chacune de ces procédures de classement attribue les scénarios étudiés à l'une des catégories de classement $C = \{C^1, C^2, C^3, C^4, C^5\}$ (Figure 71). La différence entre les deux procédures réside dans l'utilisation de la relation d'incompatibilité (R) :

- Classement optimiste : une relation d'incompatibilité entre un scénario S_i et un scénario de référence limite b^k fait passer le scénario dans la catégorie de performance supérieure C^{k+1} .
- Classement pessimiste : une relation d'incompatibilité entre un scénario S_i et un scénario de référence limite b^k fait passer le scénario dans la catégorie de performance inférieure C^{k+1} .

Un ensemble de rangs médians, représentant le classement moyen des scénarios par rapport aux procédures de classement optimiste et pessimiste, est également calculé et noté $R = \{R(S_1), R(S_2), \dots, R(S_i), \dots, R(S_m)\} = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_m\}$. Cela facilite la comparaison des scénarios, en particulier dans le cas où les deux procédures de classement ne conduisent pas au même classement. Ainsi, un scénario classé comme C^2 par le classement optimiste et C^1 par le classement pessimiste appartiendra à la catégorie C^{21} avec un rang médian de $R_i = 1.5$ (il sera moins préférable qu'un scénario appartenant à la catégorie C^{22} avec un rang médian de $R_i = 2$).

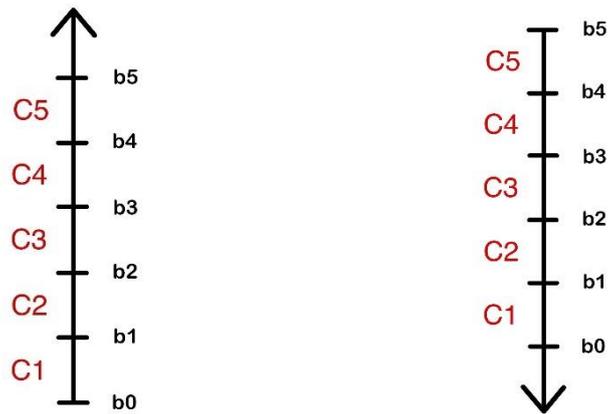


Figure 71 : Schéma des procédures de classement

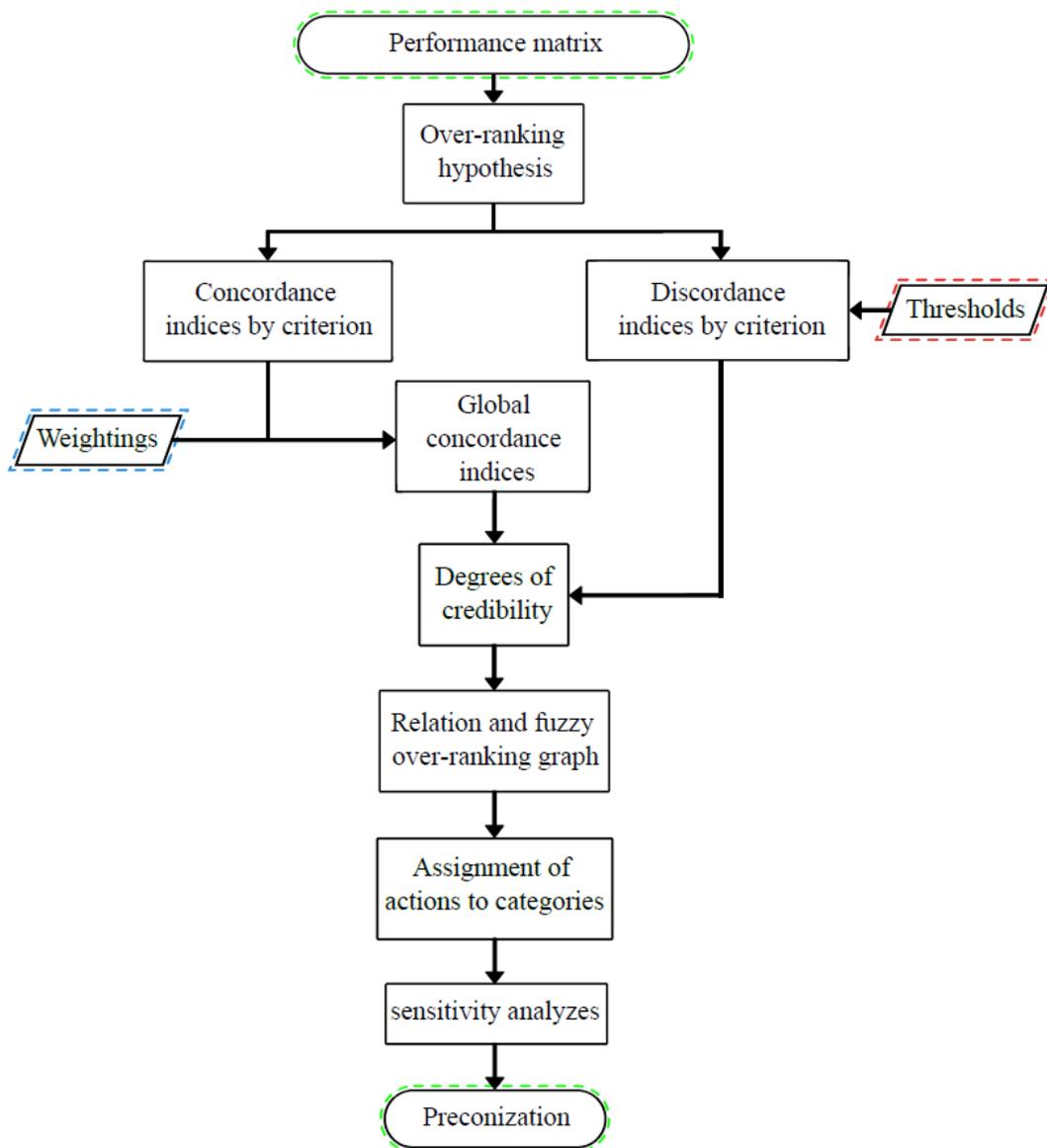


Figure 72 : Organigramme de la procédure ELECTRE Tri.

4.7.6 Première analyse des résultats et limitations

Après avoir exécuté l'algorithme ELECTRE Tri pour différents seuils de crédibilité, nous obtenons les classements optimistes et pessimiste présentés dans les Tableau 35 et Tableau 36. A partir de ces classements on calcule les rangs médians de chaque scénario, comme illustré dans la Figure 74.

Les scénarios les mieux classés sont $S_{2,2}$, $S_{2,3}$ et $S_{2,4}$. Ce sont les scénarios pour lesquels le système de chauffage au sol est conservé, ce qui offre un confort supérieur aux occupants grâce à l'isolation thermique extérieure. Ces trois scénarios ont également la particularité de conserver des systèmes de chauffage supplémentaires par des panneaux rayonnants programmables et la production d'ECS par des réservoirs de stockage électriques individuels, ce qui améliore le niveau de confort pour les utilisateurs tout en minimisant les nuisances et les exigences d'espace. Enfin, ces trois scénarios ont également en commun l'installation d'une production d'électricité photovoltaïque en autoconsommation collective.

La principale différence entre ces trois scénarios réside dans le choix du remplacement des fenêtres extérieures. Parmi les actions de rénovation élémentaires possibles pour le remplacement des fenêtres extérieures, on trouve :

- Le remplacement de toute la fenêtre par du double vitrage ;
- Le remplacement de toute la fenêtre par du triple vitrage parietodynamique ;
- Le remplacement uniquement des fenêtres du balcon par du double vitrage.

Pour distinguer ces trois scénarios et trouver une solution optimale par rapport aux critères initialement définis, il est possible de faire varier le seuil de crédibilité et ainsi contraindre davantage le classement des scénarios. Il est important de noter que plus le seuil de crédibilité est élevé, plus l'affirmation d'un statut de surclassement sera exigeante. Son augmentation crée alors des situations d'incomparabilités qui conduisent à une classification des scénarios concernés dans des catégories inférieures.

Ce phénomène est clairement visible dans la Figure 73, qui montre l'apparition du phénomène d'incomparabilité en fonction du seuil de crédibilité. À partir de $\lambda \geq 0.75$, on observe une augmentation progressive du nombre de scénarios qui ne peuvent pas être comparés à un scénario de référence caractéristique. Ces cas d'incomparabilité sont des situations où la classification du scénario concerné sera plus floue et moins pertinente. Il semble donc plus intéressant de maintenir un seuil de crédibilité inférieur ou égal à $\lambda \leq 0.75$ pour obtenir un classement basé sur des relations de surclassement bien fondées.

Tableau 35 : Classement optimiste.

Classements Optimistes					
Scenarios	C1	C2	C3	C4	C5
$S_{1.1}$		X			
$S_{1.2}$			X		
$S_{1.3}$			X		
$S_{1.4}$			X		
$S_{2.1}$			X		
$S_{2.2}$					X
$S_{2.3}$				X	
$S_{2.4}$				X	
$S_{3.1}$			X		
$S_{3.2}$				X	
$S_{3.3}$				X	
$S_{3.4}$				X	
$S_{4.1}$			X		
$S_{4.2}$			X		
$S_{4.3}$			X		
$S_{4.4}$			X		
$S_{5.1}$		X			
$S_{5.2}$		X			
$S_{5.3}$		X			
$S_{5.4}$		X			
$S_{6.1}$				X	
$S_{6.2}$				X	
$S_{6.3}$			X		
$S_{6.4}$				X	
$S_{7.1}$		X			
$S_{7.2}$		X			
$S_{7.3}$		X			
$S_{7.4}$		X			

Tableau 36 : Classement pessimiste

Classements Pessimistes					
Scenarios	C1	C2	C3	C4	C5
$S_{1.1}$	X				
$S_{1.2}$		X			
$S_{1.3}$		X			
$S_{1.4}$		X			
$S_{2.1}$		X			
$S_{2.2}$					X
$S_{2.3}$			X		
$S_{2.4}$			X		
$S_{3.1}$		X			
$S_{3.2}$			X		
$S_{3.3}$			X		
$S_{3.4}$			X		
$S_{4.1}$		X			
$S_{4.2}$		X			
$S_{4.3}$		X			
$S_{4.4}$		X			
$S_{5.1}$	X				
$S_{5.2}$	X				
$S_{5.3}$	X				
$S_{5.4}$	X				
$S_{6.1}$			X		
$S_{6.2}$			X		
$S_{6.3}$		X			
$S_{6.4}$			X		
$S_{7.1}$	X				
$S_{7.2}$	X				
$S_{7.3}$	X				
$S_{7.4}$	X				

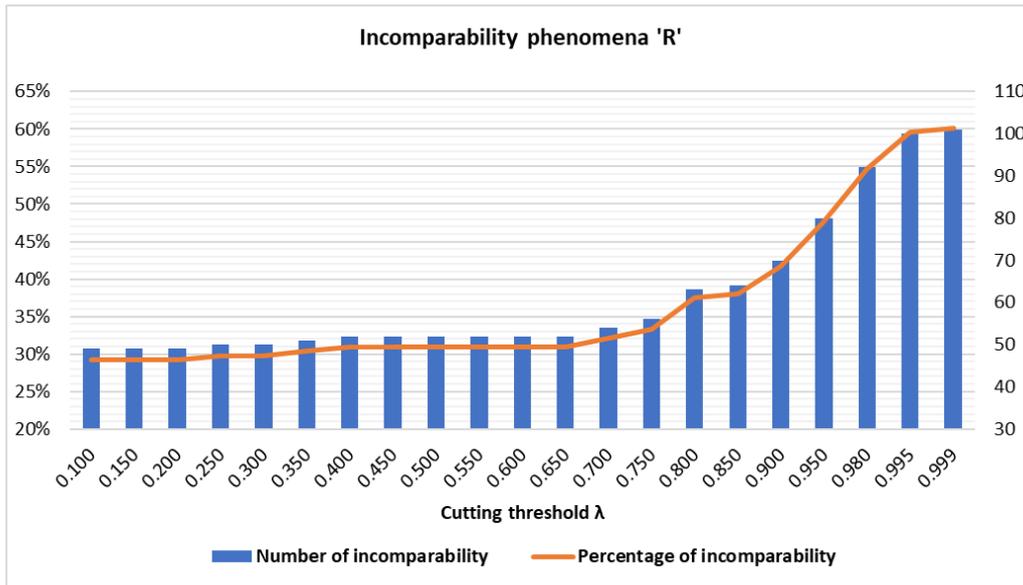


Figure 73 : Apparition du phénomène d'incomparabilité en fonction de λ

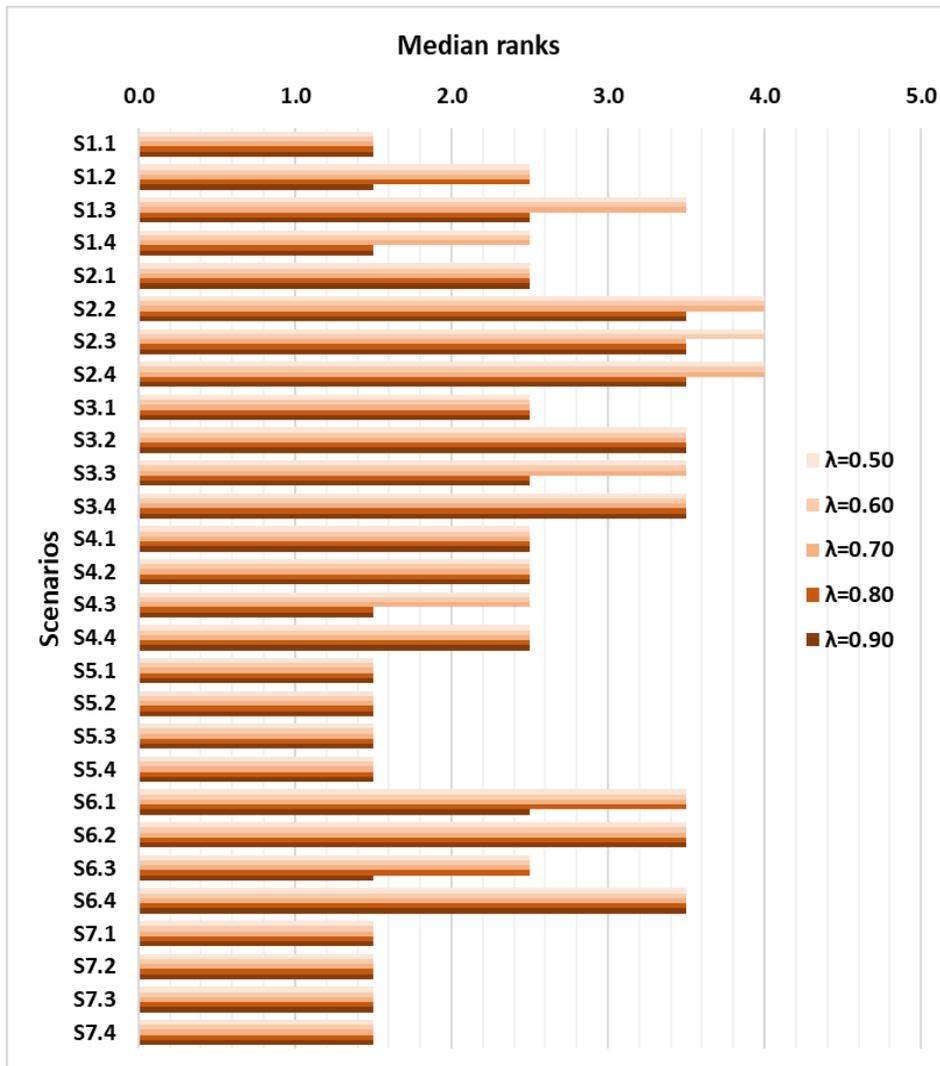


Figure 74 : Rangs médians pour cinq valeurs λ .

Dans cette méthodologie, toutes les données d'entrée sont regroupées dans la matrice de performance sous forme de valeurs précises. Cependant, cela ne représente pas tout à fait la réalité ; les valeurs sont en réalité soumises à des fluctuations, des imprécisions. Cela est principalement dû à deux facteurs : l'incertitude et la variabilité des données. L'incertitude reflète le fait que les mesures sont sujettes à des erreurs aléatoires et des erreurs systématiques causées par des biais ou des déviations systématiques dans le processus de mesure, ce qui peut introduire des variations dans les valeurs mesurées (Faber, 2005). La variabilité représente la fluctuation due aux effets cinématiques, cinétiques et spatio-temporels (Chau, et al., 2005). Cette dernière peut varier de manière significative dans le futur en fonction de plusieurs facteurs. Si l'on prend l'étude du prix de l'énergie comme exemple, il peut changer rapidement, notamment dans le contexte actuel. Par exemple, en France, le prix du MWh est passé de 50 euros au début de 2021 à près de 700 euros à l'été 2022 (Anne, 2023).

Ces fluctuations des données ne sont pas représentées dans les données de la matrice de performance. Cependant, si elles étaient incluses, elles entraîneraient des conséquences importantes dans le processus ELECTRE Tri et les résultats du classement. En effet, les premières étapes de la méthode consistent à comparer les valeurs de la matrice de performance aux profils de référence b^k , ce qui permet le calcul de la concordance C et de la discordance D selon les différents seuils q , p et v (respectivement le seuil d'indifférence, le seuil de préférence et le seuil de veto). Une fluctuation des données peut conduire à un veto sur une alternative ou à lever le veto et avoir un impact important sur la classification des alternatives Figure 75.

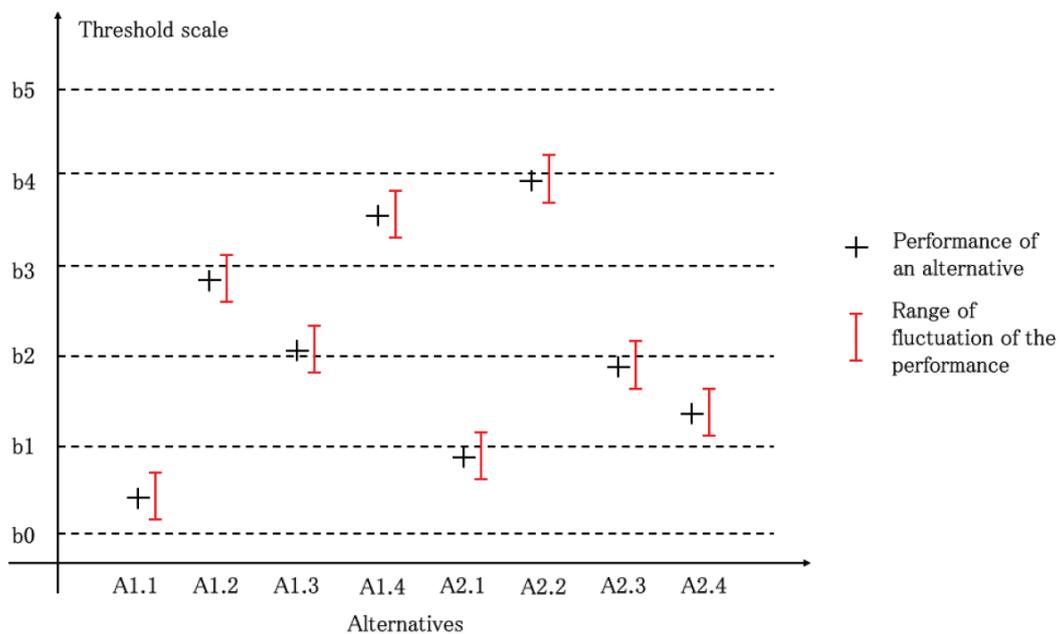


Figure 75 : Fluctuations des données concernant le seuil d'un critère.

Il est donc nécessaire de coupler cette analyse multicritère à une analyse de sensibilité afin d'évaluer l'impact des fluctuations de performances sur les résultats de classements et ainsi avoir des données non figées représentatives de la réalité et pour obtenir des résultats plus robustes (P. Barde & J. Barde, s.d.).

4.8 Sensibilité, analyse et recommandations

4.8.1 Introduction

Pour tenir compte des fluctuations potentielles des données d'entrée dans la prise de décision, une nouvelle approche est proposée au niveau de la définition et de l'utilisation des données d'entrée. Cette approche, qui peut être qualifiée de probabiliste et qui est décrite dans la suite, permet d'introduire les incertitudes et les variabilités dans les données d'entrée et de tenir compte de ces imprécisions dans le résultat des classements et dans la prise de décision.

L'incertitude est introduite à travers deux éléments principaux :

- La représentation des données sous forme de distributions de probabilité, par opposition à des valeurs précises.
- La méthode de Monte Carlo, une technique statistique qui utilise des échantillons aléatoires, appliquée à ces distributions.

Cette technique permet notamment :

- L'incorporation de fluctuations dans les données d'entrée dans la méthode ELECTRE Tri.
- L'obtention de résultats contenant plus d'informations et de contexte pour mieux les interpréter dans le cas d'alternatives classées dans la même catégorie.
- L'intégration d'alternatives avec des informations limitées dans la méthode ELECTRE Tri, car elles peuvent être ajoutées avec la précision qu'elles présentent une grande incertitude.

Ainsi cette nouvelle approche permet de renforcer la robustesse et la fiabilité du processus de prise de décision en tenant compte de l'incertitude et de la variabilité des données d'entrée du problème.

4.8.2 Données d'entrées

Pour intégrer la fluctuation des données dans la matrice de performance, Van de Shoot propose d'utiliser des fonctions de densité de probabilité (PDF, pour Probability Density Functions) (Van de Schoot, et al., 2013). Une fonction de densité de probabilité est une expression mathématique qui décrit la distribution de probabilité d'une variable aléatoire discrète (Kenton, 2022). Il existe différents types de PDF qui peuvent être utilisés pour représenter la distribution de différents types de phénomènes, notamment la distribution uniforme, exponentielle, normale et de Poisson (Harrison, 2010). Ces courbes permettent, en fonction de leurs paramètres, d'exprimer et de mesurer les connaissances sur les données d'entrée.

Dans le contexte de l'étude de cas, il a été décidé d'utiliser un seul type de distribution pour représenter l'ensemble des données : la distribution normale, également connue sous le nom de distribution gaussienne. Cette décision repose sur deux raisons principales :

- La distribution normale est couramment utilisée pour représenter des valeurs réelles, notamment dans des domaines tels que les sciences sociales, l'économie et les sciences naturelles, où la véritable distribution des données peut ne pas être connue exactement (Simonton, 2022).
- La distribution normale est une approximation fréquente de la distribution des données, même si ce n'est pas la véritable distribution sous-jacente, lorsque de nombreux échantillons sont pris (Lyon, 2014). Cela a été démontré par des statisticiens tels que Pierre-Simon Laplace, à travers des expérimentations dans divers domaines, où la normalité des données est observée à mesure que la taille de l'échantillon augmente.

La distribution normale nécessite deux paramètres pour être décrite :

- La valeur moyenne μ
- L'écart type σ

La distribution normale est notée $N(\mu, \sigma^2)$. Notez que la variance est $V = \sigma^2$. Pour cette raison, dans le reste du projet, les calculs seront effectués avec la valeur moyenne μ et la variance V en tant que paramètres.

4.8.3 Méthode de Monte Carlo

Pour atteindre l'objectif d'une plus grande robustesse, le code ELECTRE Tri est exécuté de manière répétée en faisant varier légèrement les valeurs de la matrice de performance. Étant donné la complexité de l'étude de cas, qui comprend 28 scénarios et 16 critères, il ne serait pas envisageable d'évaluer toutes les combinaisons possibles de valeurs de performance. Ainsi, pour obtenir des résultats plus robustes, la méthode de Monte Carlo est mise en œuvre pour générer des ensembles de données à partir de fonctions de distribution de probabilité, et utiliser ces ensembles de données dans la procédure ELECTRE Tri.

La méthode de Monte Carlo est une technique statistique qui repose sur l'échantillonnage aléatoire et la modélisation statistique pour estimer les opérations dans des systèmes complexes (Harrison, 2010). Elle peut être utilisée pour appliquer une méthode à un ensemble de fonctions de probabilité en générant de manière répétée un ensemble de données. Un point de données est échantillonné à partir de chaque distribution, et la méthode est appliquée à l'ensemble de données ainsi généré. En répétant ce processus un grand nombre de fois, la méthode produit des résultats qui sont représentatifs des distributions sous-jacentes des données d'entrée, ce qui permet d'incorporer l'incertitude présente dans les données dans notre processus de prise de décision.

Pour appliquer la méthode de Monte Carlo à ELECTRE Tri, il convient de suivre les étapes suivantes :

Étape 1 : Définition des fonctions de distribution de probabilité (PDFs).

L'hypothèse sous-jacente est que les valeurs sont données sous la forme de fonctions de distribution de probabilité plutôt que de valeurs nettes. Par conséquent, la performance de chaque scénario par rapport à chaque critère est considérée comme une distribution de probabilité, en tenant compte de l'incertitude des données. La performance d'un scénario S_i par rapport à un critère g_j est donc représentée par :

$$S_i(g_j) = F_j(x) \quad (21)$$

Avec F_j la fonction densité de probabilité du critère g_j .

Ainsi, la première étape consiste à sélectionner une valeur dans chaque distribution. En conséquence, une nouvelle matrice de performance est formée à l'aide des valeurs sélectionnées dans les distributions.

Étape 2 : Mise en œuvre d'ELECTRE Tri.

Une fois l'ensemble de données obtenu, le code reproduisant la méthode ELECTRE Tri est exécuté pour calculer les classements optimiste et pessimiste de chaque scénario. Supposons par exemple les résultats présentés dans le Tableau 37 avec 3 scénarios et 5 catégories de classement.

Tableau 37 : Exemple de classements optimistes et pessimistes obtenus

Scénarios	C1	C2	C3	C4	C5	Scénarios	C1	C2	C3	C4	C5
a1.1		X				a1.1			X		
a1.2				X		a1.2				X	
a1.3	X					a1.3	X				

Étape 3 : Obtention d'un ensemble de résultats.

La dernière étape consiste à répéter les deux premières étapes plusieurs fois pour générer un grand nombre de classements optimistes et pessimistes. Les classements successifs sont ainsi mémorisés et permettent d'obtenir une répartition (distribution) des scénarios dans les catégories. Ces deux ensembles de classements pour chaque alternative sont ensuite convertis en pourcentages pour obtenir des tableaux qui affichent la probabilité de chaque classement alternatif dans chaque catégorie et ainsi donner une sensibilité des résultats en pourcentage vis-à-vis des fluctuations des performances des scénarios. Si l'on reprend notre exemple précédent on obtient les Tableau 38 et Tableau 39.

Tableau 38 : Exemple de classement pessimiste des scénarios par catégories

Scénarios	C1	C2	C3	C4	C5
a1.1	10.2	25.9	63.9	0	0
a1.2	0	0	100	0	0
a1.3	0	2.5	45.7	39.3	12.5

Tableau 39 : Exemple de classement optimiste des scénarios par catégories

Scénarios	C1	C2	C3	C4	C5
a1.1	0	15.7	63.6	21	0
a1.2	0	0	6.4	93.6	0
a1.3	0	0	13.2	62.3	24.5

L'un des principaux avantages de la procédure proposée ici est la possibilité d'obtenir des résultats plus détaillés et plus précis. Ces tableaux non seulement catégorisent les alternatives, mais montrent également leur sensibilité aux changements dans les données d'entrée.

4.8.4 Application au cas d'étude

La procédure révisée d'intégration de la méthode de Monte Carlo avec la méthode d'aide à la décision ELECTRE Tri a été appliquée à l'étude de cas. À l'étape initiale, comme détaillé précédemment, l'incertitude des données est incorporée en exprimant les données sous forme de fonctions de densité de probabilité, plus précisément des distributions normales. Pour définir la distribution normale $N(\mu, \sigma^2)$ pour chaque scénario par rapport à chaque critère, deux paramètres sont nécessaires : la valeur moyenne μ et la variance $V = \sigma^2$. La valeur moyenne est déterminée à partir de la matrice de performance initiale, tandis que la variance varie en fonction du critère en question.

Cette mise en œuvre a été réalisée grâce à un code Python. Le lien Binder ci-dessous permet de consulter le notebook Jupyter contenant la mise en œuvre de la méthode, ainsi que des explications détaillées de chaque étape de calcul. Le notebook Jupyter est accessible via ce [lien](#). On obtient les résultats en pourcentage présentés dans les Tableau 40 et Tableau 41.

Pour vérifier la validité de la nouvelle procédure, il est nécessaire de s'assurer que les résultats obtenus sont cohérents. Pour ce faire, les résultats obtenus avec une variance très faible doivent être identiques à ceux obtenus en n'implémentant que des valeurs précises.

L'algorithme a d'abord été mis en œuvre en appliquant la méthode classique ELECTRE Tri sans ajouter la nouvelle procédure comprenant Monte Carlo. L'algorithme a ensuite été implémenté une deuxième fois, en intégrant la nouvelle procédure et en appliquant une variance très faible ($V = 0.000001$) avec un nombre de répétitions : $rep = 10\ 000$. Etant donné que la variance est très faible, chaque alternative a été classée 10 000 fois dans la même catégorie. De plus, cette catégorie de classement correspond à la catégorie obtenue avec la matrice de performance initiale et la méthode ELECTRE Tri originale. La nouvelle procédure implémentée est donc valide.

Tableau 40 : Classements optimistes obtenus avec la nouvelle procédure

Classements optimistes						
Scenarios	C1	C2	C3	C4	C5	Tot.
S _{1.1}	0	100	0	0	0	100
S _{1.2}	0	28.4	71	0.6	0	100
S _{1.3}	0	0.7	65.8	33.3	0.2	100
S _{1.4}	0	41.9	58	0.1	0	100
S _{2.1}	0	14.5	82.6	2.9	0	100
S _{2.2}	0	0.2	3.1	53.9	42.8	100
S _{2.3}	0	2.2	7.3	65.7	24.8	100
S _{2.4}	0	0.1	3	57.8	39.1	100
S _{3.1}	0	14.4	82.3	3.3	0	100
S _{3.2}	0	1.3	4.3	94.4	0	100
S _{3.3}	0	7.4	34.9	57.7	0	100
S _{3.4}	0	0	6.4	93.6	0	100
S _{4.1}	0	0	100	0	0	100
S _{4.2}	0	0.4	99.6	0	0	100
S _{4.3}	0	33	67	0	0	100
S _{4.4}	0	0	100	0	0	100
S _{5.1}	0	100	0	0	0	100
S _{5.2}	0	100	0	0	0	100
S _{5.3}	0	92.9	7.1	0	0	100
S _{5.4}	0	100	0	0	0	100
S _{6.1}	0	0.1	40.7	58.1	1.1	100
S _{6.2}	0	0.3	11.6	87.9	0.2	100
S _{6.3}	0	21.7	75.9	2.4	0	100
S _{6.4}	0	0.3	0.7	94	5	100
S _{7.1}	0	100	0	0	0	100
S _{7.2}	0	100	0	0	0	100
S _{7.3}	0	100	0	0	0	100
S _{7.4}	0	100	0	0	0	100

Tableau 41 : Classements pessimistes obtenus avec la nouvelle procédure

Classements pessimistes						
Scenarios	C1	C2	C3	C4	C5	Tot.
S _{1.1}	100	0	0	0	0	100
S _{1.2}	28.4	71	0.6	0	0	100
S _{1.3}	0.7	65.8	33.3	0.2	0	100
S _{1.4}	41.9	58	0.1	0	0	100
S _{2.1}	14.5	82.6	2.9	0	0	100
S _{2.2}	0.2	3.1	53.9	42.8	0	100
S _{2.3}	2.2	7.3	65.7	24.8	0	100
S _{2.4}	0.1	3	57.8	39.1	0	100
S _{3.1}	14.4	82.3	3.3	0	0	100
S _{3.2}	1.3	4.3	94.4	0	0	100
S _{3.3}	7.4	34.9	57.7	0	0	100
S _{3.4}	0	0	6.4	93.6	0	100
S _{4.1}	0	100	0	0	0	100
S _{4.2}	0.4	99.6	0	0	0	100
S _{4.3}	33	67	0	0	0	100
S _{4.4}	100	0	0	0	0	100
S _{5.1}	100	0	0	0	0	100
S _{5.2}	100	0	0	0	0	100
S _{5.3}	92.9	7.1	0	0	0	100
S _{5.4}	100	0	0	0	0	100
S _{6.1}	0.1	40.7	58.1	1.1	0	100
S _{6.2}	0.3	11.6	87.9	0.2	0	100
S _{6.3}	21.7	75.9	2.4	0	0	100
S _{6.4}	0.3	0.7	94	5	0	100
S _{7.1}	100	0	0	0	0	100
S _{7.2}	100	0	0	0	0	100
S _{7.3}	100	0	0	0	0	100
S _{7.4}	100	0	0	0	0	100

4.8.5 Analyse des résultats

L'objectif de cette section est d'évaluer les résultats de la nouvelle procédure mise en place en les comparant à ceux obtenus grâce à la méthode ELECTRE Tri. Comme indiqué précédemment, les résultats sont présentés sous forme de classements en pourcentage pour chaque catégorie et alternative.

Tout d'abord, les résultats obtenus avec la nouvelle procédure sont comparés à ceux de la méthode ELECTRE Tri afin de déterminer les informations supplémentaires fournies et les méthodes d'analyse appropriées.

Ensuite, l'incorporation de la variance dans les données sera examinée pour déterminer si toutes les alternatives sont affectées de manière similaire.

1ère remarque : Les alternatives sont distribuées dans les catégories.

Le résultat obtenu est un tableau avec le pourcentage de chaque alternative à classer dans chaque catégorie. Cette nouvelle représentation des résultats apporte des informations significatives. Dans les Tableau 42 et Tableau 43, les résultats obtenus avec et sans la nouvelle procédure peuvent être comparés. Cela a été appliqué à l'étude de cas, et l'accent est mis sur le classement optimiste des quatre scénarios $S_{2.1}$, $S_{2.2}$, $S_{2.3}$ et $S_{2.4}$. Cette analyse est également valable pour les autres alternatives et pour le classement pessimiste.

Tableau 42 : Classement optimiste obtenu sans la nouvelle procédure pour 4 alternatives

Scenarios	C1	C2	C3	C4	C5
$S_{2.1}$			X		
$S_{2.2}$					X
$S_{2.3}$				X	
$S_{2.4}$				X	

Tableau 43 ; Classement optimiste obtenu avec la nouvelle procédure pour 4 alternatives

Scenarios	C1	C2	C3	C4	C5	Tot.
$S_{2.1}$	0	14.5	82.6	2.9	0	100
$S_{2.2}$	0	0.2	3.1	53.9	42.8	100
$S_{2.3}$	0	2.2	7.3	65.7	24.8	100
$S_{2.4}$	0	0.1	3	57.8	39.1	100

Cela fournit des informations importantes sur les alternatives. En effet, en se concentrant sur l'alternative $S_{2.1}$, on peut observer que dans la méthode classique ELECTRE Tri, elle est classée dans la catégorie 3. La nouvelle procédure montre qu'en intégrant les fluctuations des données, cette alternative est effectivement classée la majorité du temps (82,6%) dans la catégorie 3, mais est également classée 14,5% du temps dans la catégorie 2 et 2,9% du temps dans la catégorie 4.

De plus, cela fournit des informations sur la possibilité de classer les alternatives face à l'incertitude et à la variance. Entre deux alternatives qui semblent équivalentes en termes de classement, le pourcentage de classement dans d'autres catégories permet de les différencier. Lorsqu'on examine deux alternatives qui sont préalablement classées dans différentes catégories comme $S_{2.2}$ et $S_{2.4}$, grâce à l'intégration de la fluctuation, ces deux alternatives sont également classées dans les catégories 2, 3 et 5. Cependant, l'alternative $S_{2.2}$ est plus souvent classée dans la catégorie 5 (42,8%) que l'alternative $S_{2.4}$ qui est seulement présente 39,1% du temps dans la catégorie 5. Ces résultats permettent donc de confirmer que l'alternative $S_{2.2}$ est meilleure que l'alternative $S_{2.4}$ et permettent ainsi aux décideurs de distinguer deux alternatives qui semblaient initialement égales mais qui en réalité présentent une sensibilité propre aux fluctuations d'entrée.

Cette allocation permet alors une étude plus spécifique des actions élémentaires et la méthode de construction des scénarios permet d'observer l'impact de ces actions élémentaires sur les classements. Cette information supplémentaire permet d'observer plus précisément si une action élémentaire améliore les performances globales d'une alternative ou non.

Le Tableau 44 regroupe les résultats obtenus pour 4 alternatives : $S_{2,1}$, $S_{2,2}$, $S_{3,1}$, $S_{3,2}$. Toutes les alternatives du groupe 2 sont équipées d'un panneau radiant électrique et d'un plancher électrique existant, tandis que toutes les alternatives du groupe 3 disposent d'un chauffage électrique à accumulation sans plancher chauffant électrique. Sinon, ces deux familles d'alternatives sont construites de la même manière, les alternatives avec l'indice 2 se distinguant des alternatives avec l'indice 1 par la présence de panneaux solaires sur le toit. Les alternatives avec un indice 1 ne disposent d'aucun système d'énergie autonome.

Tableau 44 : Classement optimiste obtenu pour 4 scénarios

Scénarios	C1	C2	C3	C4	C5	Tot.
$S_{2,1}$	0	14.5	82.6	2.9	0	100
$S_{2,2}$	0	0.2	3.1	53.9	42.8	100
$S_{3,1}$	0	14.4	82.3	3.3	0	100
$S_{3,2}$	0	1.3	4.3	94.4	0	100

En analysant ces résultats, il est facilement observable que les alternatives incluant des panneaux solaires sont mieux catégorisées.

2ème remarque : L'impact de la variance.

Les alternatives ne répondent pas uniformément aux distributions appliquées par les critères. Certaines alternatives peuvent être classées dans 4 catégories différentes, tandis que d'autres sont toujours classées dans une seule catégorie. Les Tableau 45 et Tableau 46 suivants correspondent au classement optimiste obtenu avec la nouvelle procédure pour les alternatives de la famille 2 : $S_{2,1}$, $S_{2,2}$, $S_{2,3}$ et $S_{2,4}$, et la famille 7 : $S_{7,1}$, $S_{7,2}$, $S_{7,3}$ et $S_{7,4}$.

Les deux familles de scénarios ont été exposées à des fluctuations avec des écart-types similaires. Cependant, il est important de noter que les alternatives de la famille 2 peuvent être classées dans quatre catégories distinctes en fonction de leurs valeurs de fluctuation, tandis que les alternatives de la famille 7 sont systématiquement classées dans la même catégorie.

Cette disparité de classification est influencée par divers facteurs, notamment la proximité des performances des scénarios par rapport aux seuils établis. Même une légère déviation dans les données peut entraîner le dépassement du seuil, ce qui entraîne une classification différente. De plus, le poids attribué à chaque critère évalué joue également un rôle, car une variation des performances d'un critère ayant un poids élevé est plus susceptible d'affecter les résultats globaux.

Tableau 45 : Classement optimiste obtenu avec et sans la nouvelle procédure pour 4 alternatives

Scenarios	C1	C2	C3	C4	C5	Tot.
$S_{2.1}$	0	14.5	82.6	2.9	0	100
$S_{2.2}$	0	0.2	3.1	53.9	42.8	100
$S_{2.3}$	0	2.2	7.3	65.7	24.8	100
$S_{2.4}$	0	0.1	3	57.8	39.1	100

Tableau 46 : Classement optimiste obtenu avec la nouvelle procédure pour les alternatives des familles 2 et 7

Scenarios	C1	C2	C3	C4	C5	Tot.
$S_{7.1}$	0	100	0	0	0	100
$S_{7.2}$	0	100	0	0	0	100
$S_{7.3}$	0	100	0	0	0	100
$S_{7.4}$	0	100	0	0	0	100

4.9 Conclusions

Ce chapitre a présenté la mise en œuvre de la méthodologie d'aide à la décision multicritère dans le contexte d'un projet de réhabilitation énergétique de la résidence "Le Plateau." L'objectif initial du projet était de rechercher, étudier, expérimenter et évaluer une solution de rénovation des systèmes de chauffage collectif et d'eau chaude sanitaire individuel fonctionnant à l'électricité, en exploitant la production et le stockage d'énergie en local, l'autoconsommation, l'optimisation des consommations et le pilotage intelligent des systèmes.

La méthodologie développée a permis de répondre à ce défi complexe en prenant en compte différentes contraintes économiques, techniques, sociales et environnementales propres aux bâtiments résidentiels collectifs. Pour ce faire, nous avons choisi une résidence parmi le patrimoine de la société 3F-Immobilière Rhône-Alpes, répondant à des critères spécifiques, tels qu'une mauvaise étiquette énergétique et un fonctionnement à l'énergie électrique.

Les différentes étapes de la méthodologie ont été présentées et appliquées à ce cas d'étude. Nous avons défini des scénarios potentiels de rénovation en collaboration avec les concepteurs et les fabricants, en veillant à leur cohérence et à leur compatibilité. Ensuite, nous avons défini une famille de critères d'évaluation mesurables pour apprécier la performance de chaque scénario par rapport aux objectifs définis.

La pondération des critères a été réalisée pour déterminer leur importance relative dans la prise de décision, et nous avons ensuite évalué la performance économique des scénarios en prenant en compte les coûts d'investissement, d'entretien et de réinvestissement sur une période de trente ans.

Enfin, nous avons introduit une approche probabiliste pour prendre en compte les fluctuations potentielles des données d'entrée et ainsi tenir compte des incertitudes dans les résultats des classements et dans la prise de décision.

Ce chapitre a été une illustration concrète de l'application de la méthode d'analyse multicritère présentée dans le chapitre précédent. Les résultats obtenus ont permis de guider les décideurs dans leur choix de stratégies de rénovation énergétique, en privilégiant les solutions les plus performantes sur les plans économiques et environnementaux. Ces travaux ouvrent des perspectives pour une prise de décision éclairée et raisonnée dans le domaine de la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs. Dans la suite de la thèse, nous aborderons les conclusions générales tirées de l'ensemble de ces études, ainsi que les recommandations pour l'avenir.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Devant le défi que représente la rénovation des bâtiments existants et la nécessité de sélectionner parmi un éventail complexe de solutions pour atteindre divers objectifs et garantir une réhabilitation durable, nous avons décidé d'adopter une méthodologie d'analyse multicritères. Les méthodes d'analyse décisionnelle multicritères (MCDA) constituent en effet un outil précieux pour comprendre les problèmes environnementaux complexes en tenant compte d'une variété de critères d'évaluation et de la classification de différentes alternatives.

Lors de l'élaboration de cette méthodologie d'analyse multicritères, nous avons identifié des critères spécifiques qui définissent les aspects essentiels d'une opération de réhabilitation de logements sociaux. Ces critères capturent les défis liés à la rénovation énergétique pour les gestionnaires de logements sociaux, en tenant compte des exigences des autorités publiques et des besoins des locataires, tout en respectant les contraintes budgétaires et en visant à minimiser la complexité des phases de travaux.

Afin de permettre aux décideurs de préciser leurs préférences concernant la pondération des critères, nous avons utilisé la méthode de pondération SRF, spécialement conçue pour les méthodes de surclassement MCDA, et l'avons mise en œuvre au moyen d'un outil dédié. Cet outil suit rigoureusement le processus de la méthode SRF et permet aux utilisateurs non familiers de classer facilement les critères par ordre d'importance croissante à l'aide de listes déroulantes. Grâce à cette approche, une pondération précise a été obtenue, même en présence d'un grand nombre de critères d'évaluation.

En ce qui concerne l'élaboration des scénarios de rénovation, nous avons adopté une approche innovante qui implique la création d'actions fondamentales associées à des sous-scénarios pour chaque élément. Ensuite, à partir de ces actions fondamentales, nous avons construit des scénarios de rénovation complets et cohérents.

Pour évaluer ces scénarios de rénovation à la fois quantitativement et qualitativement au regard des différents critères retenus, nous avons travaillé en étroite collaboration avec différents spécialistes, chacun ayant son propre domaine d'expertise. D'importantes quantités de données de formes et de structures différentes ont ainsi été récoltées, traitées et analysées pour évaluer la performance des différentes solutions envisagées. Une méthode de notation qualitative a également été utilisée pour comparer les actions individuelles afin de donner une note globale à chaque scénario.

Un aspect original de cette analyse multicritères a également été la construction de scénarios caractéristiques, caractérisant les catégories de classement, de manière statistique à partir des évaluations des différents scénarios. L'objectif était d'obtenir une dispersion homogène des scénarios autour de ces scénarios caractéristiques, pour chaque critère. Cette stratégie a

permis d'obtenir un premier classement relatif des scénarios, qui donne une vision globale moins figée de la performance de chaque scénario.

A travers ce travail de recherche nous nous sommes également confrontés au fait que malgré la disponibilité des données, il est essentiel de reconnaître l'incertitude et la variabilité inhérentes à ces informations. Pour tenir compte de ces incertitudes, nous avons proposé de représenter les performances des critères par des distributions de probabilités. Il est possible de traiter efficacement ces distributions de probabilités et les fluctuations des données en intégrant des méthodes d'analyse décisionnelle multicritères, telles que ELECTRE Tri, avec une implémentation de Monte Carlo, ce qui permet d'obtenir un classement plus solide des alternatives.

Nous avons donc proposé une nouvelle procédure probabiliste, qui apporte une amélioration significative à la méthode initiale en fournissant un taux de fiabilité des classements pour chaque alternative dans chaque catégorie. Cette approche probabiliste basée sur les fonctions de densité de probabilité permet d'obtenir un classement plus robuste des alternatives. Elle facilite également la comparaison d'alternatives qui étaient auparavant classées au même niveau et difficiles à départager. Cela permet notamment un examen plus détaillé de l'influence des actions élémentaires dans le classement des scénarios. Enfin, cette méthode offre une meilleure appréhension de la dépendance des résultats vis-à-vis des données d'entrée, tout en facilitant la découverte d'une gamme plus étendue de résultats possibles grâce à l'utilisation de distributions de probabilités plutôt que de valeurs absolues.

Après cette investigation et analyse et à la suite de l'application pratique de la méthodologie dans un logement collectif, il est possible d'établir un premier retour d'expérience. Tout d'abord, nous constatons que la méthodologie proposée dans ce rapport de thèse serait coûteuse à déployer à grande échelle et sur de nombreuses résidences aux caractéristiques différentes. Les études et analyses, réalisées afin de construire la matrice de décision, présentent un coût d'étude et d'ingénierie important, proportionnel au nombre de scénarios à évaluer et au nombre de critères à étudier.

Un temps d'analyse important doit également être considéré pour réaliser les différentes études, évaluer les scénarios et synthétiser les résultats. Selon la quantité et la complexité des éléments à analyser, ce temps peut être important pour un projet comme celui présenté.

La réussite de ce type d'analyse multicritères repose également sur une collaboration efficace entre les parties impliquées. Selon les critères établis, il peut s'avérer nécessaire de solliciter diverses expertises, chacune étant associée à l'évaluation des scénarios. Cette approche interdisciplinaire exige une coopération étroite entre les parties prenantes et le décideur.

La méthodologie développée dans le cadre de ce projet a finalement permis de répondre à la problématique du « Choix » en accompagnant un acteur majeur de la rénovation énergétique sur les solutions envisageables pour son patrimoine immobilier.

L'intérêt principale de la méthodologie mise en place est sa pertinence pour ce type de problématique de choix complexe, nécessitant la prise en compte d'un nombre important de paramètres. Il a ainsi été possible d'identifier précisément et dans la phase d'étude, les solutions aux meilleurs potentiels. Cette identification argumentée et vérifiée par des analyses et études d'ingénieries a permis d'aiguiller la société Immobilière Rhône Alpes dans le choix du scénario de rénovation le plus intéressant du point de vue de ses objectifs et contraintes.

Le Projet InER a également permis l'identification de solutions nouvelles, pertinentes et efficaces vis-à-vis de la problématique de l'autoconsommation collective photovoltaïque et du déphasage entre production et consommations. Un des freins technique et économique principale de ce type de dispositif réside dans le déphasage entre la production photovoltaïque et les consommations et dans la nécessité d'utiliser un moyen de stockage souvent coûteux et à fort impact environnemental. La solution de stockage et de pilotage mise en place dans le Projet InER répond parfaitement à cette problématique en apportant un résultat remplissant les objectifs et s'affranchissant des contraintes auxquelles sont confrontés beaucoup de projet d'autoconsommation collective.

Dans un premier temps, un retour d'expérience après travaux est attendu. Celui-ci permettra d'analyser l'efficacité de la solution déployée et la pertinence de la méthodologie d'analyse multicritère mise en place. Les mesures qui seront faites par les appareils de pilotage permettront d'analyser avec précision les performances du pilotage et de l'optimisation. De même, les bénéfices pour les locataires pourront être mesurés. Ce retour d'expérience permettra également d'identifier les éventuels problèmes ainsi que les difficultés à résoudre lors de la reproduction de la solution sur d'autres résidences.

Etant donné les besoins, dans le cadre de la thèse, de nouvelles connaissances et contenus scientifiques, la méthodologie d'analyse multicritère mise en place a été développée sur la base d'une méthode existante à laquelle ont été apporté des améliorations majeures. Ce développement a été réalisé avec des outils de R&D non nécessairement exploitables de manière opérationnelle par un utilisateur non familier. Une transposition de la méthode sur un outil plus accessible serait donc une perspective de travail future afin de permettre à un plus grand nombre l'utilisation de cette méthodologie d'aide à la décision développée pour le choix de scénarios de rénovation énergétiques.

Une troisième perspective consisterait à optimiser le dimensionnement de la production photovoltaïque et de la production d'ECS en vue d'augmenter le surplus de production tout en continuant d'assurer la capacité d'absorption à 100% dans les ballons d'ECS. Cette perspective d'amélioration est bien entendu relative aux opérations d'autoconsommations collectives employant le même type de solutions de pilotage et de stockage. Elle permettrait ainsi de diminuer la taille des ballons d'ECS, d'augmenter la production et le bénéfice pour

les locataires et d'améliorer les performances du bâtiment du point de vue énergétique et environnemental.

Une dernière perspective d'amélioration se trouve dans le pilotage du stockage et des ballons d'ECS. Il pourra être envisagé la mise en place d'un algorithme intelligent de pilotage capable d'apprendre et d'identifier le comportement des usagers. Le pilotage de la production d'ECS pourrait ainsi être réalisés de manière optimale en fonction d'une part de la production photovoltaïque et d'autre part des besoins de locataires. Ceci dans un but d'amélioration du confort.

Ce travail de thèse a par ailleurs débouché sur deux autres thèses au laboratoire CETHIL de l'INSA Lyon. Une première qui étudie les possibilités de l'analyse multicritères pour la rénovation des bâtiments par une méthode d'inférence statistique dite « Inférence bayésienne ». L'intérêt de cette approche étant la possibilité de prendre en compte les incertitudes et imprécision dans l'évaluation des scénarios de rénovation. Une seconde qui étudie des possibilités en termes de pilotage basé sur la « Commande prédictive ». L'objectif étant de mettre en place des modèles de prédiction de la production photovoltaïque basé sur les prévisions météo et de prédiction des besoins et consommations d'ECS basée sur les mesures, en vue d'optimiser le pilotage des systèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- 3F Immobilier Rhône-Alpes, 2022. *Rapport d'activité*, s.l.: s.n.
- ADEME, 2018. *Climat, air et énergie - chiffres-clés*, s.l.: ISSN : 2273-4961.
- ADEME, 2020. *La rénovation énergétique et environnementale des bâtiments tertiaires*. s.l.:ISBN : 979-10-297-1471-9 - mars 2020.
- ADEME, 2022. *Notre histoire*. s.l.:ADEME.
- Almeida Dias, J., Figueira, J. & Roy, B., 2008. Electre Tri-C: A Multiple Criteria Sorting Method Based on Central Reference Actions. *Cahier du LAMSADE*, Volume 274.
- Almeida-Dias, J., Figueira, J. & Roy, B., 2010. ELECTRE TRI-C: A multiple criteria sorting method based on characteristic reference actions. *European Journal of Operational Research*, Volume 204, pp. 565-580.
- Almeida-Dias, J., Figueira, J. & Roy, B., 2012. A multiple criteria sorting method where each category is characterized by several reference actions: The ELECTRE TRI-NC method. *European Journal of Operational Research*, Volume 217, pp. 567-579.
- Anne, D.-G., 2023. *Le prix de l'électricité en sept questions*. [En ligne].
- Archives Nationales, 2001. *Commissariat à l'énergie solaire (COMES) (1972-1983)*. s.l.:Inventaire - 20010454/1-20010454/42.
- Aryanpur, V. et al., 2019. An overview of energy planning in Iran and transition pathways towards sustainable electricity supply sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 112, pp. 58-74.
- Ascione, F. et al., 2017. Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance. *Energy and Buildings*, Volume 144, pp. 303-319.
- Beccali, M., Cellura, M. & Mistretta, M., 2003. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28(13), pp. 2063-2087.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R., Albadvi, A. & Aghdasi, M., 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 01 01, 200(1), pp. 198-215.
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M. & Ignatius, J., 2012. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), pp. 13051-13069.
- Bisdorff, R., C. Dias, L., Meyer, P. & Mousseau, V., 2015. *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria: Case Studies*. s.l.:Springer.
- Boutchenik, B., 2022. *Chiffres clés du logement*. s.l.:Ministère de la transition écologique et de la cohésion sociale.
- Brans, J.-P., 1982. *L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE*. Québec, Canada, Presses de l'Université Laval, pp. 183-213.

- Brans, J.-P. & Mareschal, B., 2002. *Prométhée - gaia - une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Ellipses éd. s.l.:s.n.
- Briggs, T., Kunsch, P. & Mareschal, B., 1990. Nuclear waste management: An application of the multicriteria PROMETHEE methods. *European Journal of Operational Research*, Volume 44, pp. 1-10.
- Butler, J., Jia, J. & Dyer, J., 1997. Simulation techniques for the sensitivity analysis of multi-criteria decision models. *European Journal of Operational Research*, Volume 103, pp. 531-546.
- Calama-González, C. M., Symonds, P., León-Rodríguez, Á. L. & Suárez, R., 2022. Optimal retrofit solutions considering thermal comfort and intervention costs for the Mediterranean social housing stock. *Energy and Buildings*, Volume 259, p. 111915.
- Catalina, T., Virgone, J. & Blanco, . E., 2011. Multi-source energy systems analysis using a multi-criteria decision aid methodology. *Renewable Energy*, 36(8), pp. 2245-2252.
- Centre Régional des Énergies Renouvelables; HESPUL, 2018. *Intégration du photovoltaïque dans une opération de logement social*, s.l.: AROSH PC - UR Hlm en Nouvelle-Aquitaine; Union sociale pour l'habitat.
- Cetiner, I. & Edis, E., 2014. An environmental and economic sustainability assessment method for the retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, Volume 74, pp. 132-140.
- Chau, T., Young, S. & Redekop, S., 2005. Managing variability in the summary and comparison of gait data. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2(22).
- Chen, X. et al., 2020. Multi-criteria assessment approach for a residential building retrofit in Norway. *Energy & Buildings*, Volume 215, p. 109668.
- Chen, Y., Yu, J. & Khan, S., 2013. The spatial framework for weight sensitivity analysis in AHP-based multi-criteria decision making. *Environmental Modelling & Software*, Volume 48, pp. 129-140.
- Ciulla, G., Galatiodo, A. & Ricciu, R., 2016. Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings. *Energy and Buildings*, Volume 128, pp. 649-659.
- Colorni, A. & Tsoukiàs, A., 2013. *What Is a Decision Problem? Preliminary Statements*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Cosse, E., 2022. Un Français sur deux vit ou a vécu dans une habitation à loyer modéré. *La Nouvelle République*, p. 24/10/2022.
- D'Amico, A., Ciulla, G., Tupenaite, L. & Kaklauskas, A., 2020. Multiple criteria assessment of methods for forecasting building thermal energy demand. *Energy & Buildings*, Volume 224, p. 110220.
- Daniel, S. & Ghiaus, C., 2022. *ELECTRE Tri-B MCDA : an object oriented multi-criteria decision analysis tool in Python*, s.l.: s.n.
- David, A. & Damart, S., 2011. Bernard Roy et l'aide multicritère à la décision. *Revue Française de Gestion*, 5(214), pp. 15-28.
- Dell'Anna, F. et al., 2020. Designing a decision support system to evaluate the environmental and extra-economic performances of a nearly zero-energy building. *Smart and Sustainable Built Environment*, Volume 9, pp. 413-442.

- Dirutigliano, D., Delmastro, C. & Torabi Moghadam, S., 2017. Energy efficient urban districts: A multi-criteria application for selecting retrofit actions. *International Journal of Heat and Technology*, 35(1), pp. 49-57.
- Escudié, J.-N., 2020. 85% des locataires du parc social sont satisfaits de leur logement. *Banque des territoires*, p. 06/02/2020.
- Euro, B., 2001. Multi-criteria analysis for environmental management. *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, Volume 10.
- European Commission, 2012. *Establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings*, s.l.: Official Journal of the European Union.
- European Commission, 2021. *Certificates and inspections*. [En ligne] Available at: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/certificates-and-inspections_en [Accès le 10 2021].
- European Commission, 2021. *Energy Performance Certificates*. [En ligne] Available at: https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-factsheets-topics-tree/energy-performance-certificates_en [Accès le 10 2021].
- European Commission, 2021. *Renovation wave*. [En ligne] Available at: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en [Accès le 10 2021].
- Eurostat, 2020. *Energy data*, s.l.: European Commission.
- Faber, M. H., 2005. On the Treatment of Uncertainties and Probabilities in Engineering Decision Analysis. *Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering*, Volume 127, p. 243–248.
- Faivre, R. et al., 2013. *Analyse de sensibilité et exploration de modèles Application aux sciences de la nature et de l'environnement*. s.l.:Quæ.
- Figueira, J. & Roy, B., 2002. Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *European Journal of Operational Research*, 01 06, 139(2), pp. 317-326.
- Gal, T., Stewart, T. & Hanne, T., 1999. *Multicriteria Decision Making: Advances in MCDM Models, Algorithms, Theory, and Applications*. Hagen: Springer US.
- Garcia-Cascales, S. & Lamata, T., 2012. On rank reversal and TOPSIS method. *Mathematical and Computer Modelling*, 56(5), pp. 123-132.
- Georgopoulou, E., Lalas, D. & Papagiannakis, L., 1997. A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, Volume 103, pp. 38-54.
- Grabisch, M., 2008. Une approche constructive de la décision multicritère. *Traitement du Signal*, 22(4), pp. 321-337.
- Grabisch, M. & Perny, P., 2003. Agrégation multicritère. Dans: *Utilisations de la logique floue*. s.l.:Hermes Science Publications.

- Greco, S., Ehrgott, M. & Figueira, J. R., 2016. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Survey*. New York: Springer International Series in Operations Research & Management Science.
- Gwo-Hshiung, T. & Jih-Jeng, H., 2011. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- H.A. Dehwah, A., Haredy, A. & Krarti, M., 2022. Retrofit analysis of historical buildings to net-zero energy: Case study of the Ain village, Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, Volume 258, p. 111826.
- Hamby, D. M., 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, Volume 32, p. 135–154.
- Harrison, R. L., 2010. Introduction to Monte Carlo Simulation. *AIP Conference Proceedings*, Volume 1204, pp. 17-21.
- Hoorens, D., 2022. Hlm en chiffres. *Repères n°102, Union Sociale pour l'Habitat*, p. 31/08/2022.
- Huang, Y., Niu, J. & Chung, T., 2012. Energy and carbon emission payback analysis for energy-efficient retrofitting in buildings-overhang shading option. *Energy and buildings*, Volume 44, pp. 94-103.
- IEA, 2022. *World Energy Outlook*, s.l.: International Energy Agency.
- INSEE, 2019. *Tableaux de l'économie française: 2.3 Changement climatique et effet de serre*, s.l.: s.n.
- INSEE, 2021. *37,2 millions de logements en France au 1er janvier 2021, INSEE Focus n° 254*. s.l.:s.n.
- International Energy Agency, 2015. *Energy Technology Perspectives*, s.l.: s.n.
- International Energy Agency, 2021. *Buildings: A source of enormous untapped efficiency potential*, s.l.: s.n.
- IRENA, 2022. *Renewable energy targets in 2022 A guide to design*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA, 2022. *World Energy Transitions Outlook*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- ITRON, 2023. *Aquadis+*. [En ligne] Available at: <https://www.itron.com/fr/solutions/product-catalog/aquadis-dn15--dn20>
- Kenton, W., 2022. *The Basics of Probability Density Function (PDF), With an Example*. [En ligne] Available at: <https://www.investopedia.com/terms/p/pdf.asp>
- Kwonsik, S., Yonghan, A., Joseph, A. & Nahyun, K., 2019. Development of an Energy Saving Strategy Model for Retrofitting Existing Buildings: A Korean Case Study. *Energies*, 12(9), pp. 1-17.
- Lange Salvia, A., Londero Brandli, L., Leal Filho, W. & Locatelli Kalil, R. M., 2019. An analysis of the applications of Analytic Hierarchy process (AHP) for selection of energy efficiency practices in public lighting in a sample of Brazilian cities. *Energy Policy*, Volume 132, pp. 854-864.
- Laxman Prasad, G. & Yeonbae, K., 2018. An analysis on barriers to renewable energy development in the context of Nepal using AHP. *Renewable Energy*, Volume 129, pp. 446-456.
- Legi France, 2005. *Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique*. s.l.:Assemblée nationale et le Sénat.
- Legi France, 2009. *Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*, s.l.: L'Assemblée nationale et le Sénat.

Legi France, 2010. *Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement*. s.l.:L'Assemblée nationale et le Sénat.

Leyva López, J. C., Solares, E. & Rui Figueira, J., 2022. An evolutionary approach for inferring the model parameters of the hierarchical ELECTRE III method. *Information Sciences*, Volume 607, pp. 705-726.

Lizana, J., Barrios-Padura, Y., Molina-Huelva, M. & Chacartegui, R., 2016. Multi-criteria assessment for the effective decision management in residential energy retrofitting. *Energy and Buildings*, Volume 129, pp. 284-307.

Lyon, A., 2014. Why are Normal Distributions Normal ?. *The British Journal for the Philosophy of Science*, Volume 65.

März, S., 2018. Assessing the fuel poverty vulnerability of urban neighbourhoods using a spatial multi-criteria decision analysis for the German city of Oberhausen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, pp. 1701-1711.

Mateo, J. R. S. C., 2012. *Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry*. s.l.:Springer Science & Business Media.

Matsatsinis, N. & Grigoroudis, E., 2018. *Preference Disaggregation in Multiple Criteria Decision Analysis*. s.l.:Springer Cham.

Maystre, L. Y. & Bollinger, D., 1998. *Aide à la négociation multicritère*. s.l.:Presses polytechniques et universitaires romandes.

Maystre, L. Y., Pictet, J. & Simos, J., 1994. *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Lausanne: PPUR Presses Polytechniques.

MEET, 2023. *Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)*. s.l.:Ministères Écologie Énergie Territoires.

MEET, 2023. *Pollution de l'air : origines, situation et impacts*, s.l.: Ministères Écologie Énergie Territoires.

MEF, 2021. *Le crédit d'impôt transition énergétique (CITE)*. [En ligne] Available at: <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/credit-impot-transition-energetique-cite>

MEF, 2022. *MaPrimeRénov' : la prime pour la rénovation énergétique*. [En ligne] Available at: <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/prime-renovation-energetique>

MEF, 2023. *MEF (2022) Professionnels du bâtiment : comment obtenir la mention « reconnu garant de l'environnement » (RGE) ?*. [En ligne] Available at: <https://www.economie.gouv.fr/entreprises/batiment-label-rge>

Mejjaouli, S. & Alzaharani, M., 2020. Decision-making model for optimum energy retrofitting strategies in residential buildings. *Sustainable Production and Consumption*, Volume 24, pp. 211-218.

Merlet, Y. et al., 2022. Integration of phasing on multi-objective optimization of building stock energy retrofit. *Energy and Buildings*, Volume 257, p. 111776.

Ministère de la Transition Ecologique, 2021. *Chiffres clés du climat: France, Europe et Monde*, s.l.: Service des Données et Etudes Statistiques (SDES).

Ministère de la Transition Ecologique, 2022. *Chiffres clés de l'énergie, Edition 2022*, Paris: Service des Données et Etudes Statistiques.

Ministère de la Transition Ecologique, 2022. *Chiffres clés du climat, Edition 2022*, Paris: Service des Données et Etudes Statistiques.

Ministère de la Transition Ecologique, 2022. *Chiffres clés du logement, Edition 2022*, Paris: Service des Données et Etudes Statistiques.

Ministère de la Transition Ecologique, 2022. *Favoriser le passage à l'échelle de l'autoconsommation collective*, Paris: Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature.

Ministère français de la transition écologique, 2019. *Bilan énergétique de la France pour 2017*, s.l.: Service de la Donnée et des Etudes Statistiques (SDES).

Ministère français de la transition écologique, 2019. *Données et études statistiques: pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports*. [En ligne] Available at: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-residentiel> [Accès le 2020].

Moradi, S., Yousefi, H., Noorollahi, Y. & Rosso, D., 2020. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*, Volume 29, p. 100478.

MTECS, 2023. *Diagnostic de performance énergétique - DPE*. [En ligne] Available at: <https://www.ecologie.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe>

MTECT, 2021. *Plan de rénovation énergétique des bâtiments*. s.l.:Ministère de la transition écologique et de la cohésion sociale.

MTECT, 2022. *Construction et performance environnementale du bâtiment*, s.l.: Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.

MTECT, 2023. *Réglementation environnementale RE2020*. s.l.:Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.

MTECTa, 2022. *Chiffres et statistiques du logement social*. Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires: s.n.

MTECTb, 2022. *Chiffres clés du logement, Edition 2022*, s.l.: Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.

MTES, 2020. *La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, s.l.: Ministère de la transition écologique et solidaire.

MTES, 2022. *Stratégie nationale bas-carbone, 21/07/2022*, s.l.: Ministère de la transition écologique et solidaire.

MTESa, 2020. *La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, s.l.: Ministère de la transition écologique et solidaire.

Mukkavaara, J. & Shadram, F., 2021. An integrated optimization and sensitivity analysis approach to support the life cycle energy trade-off in building design. *Energy and Buildings*, Volume 253, p. 111529.

Napoli, G., 2018. *The Complexity of Value and the Evaluation of Complexity: Social Use Value and Multi-criteria Analysis*. Rome, s.n., pp. 187-198.

- Napoli, G. et al., 2020. Supporting public decision process in buildings energy retrofitting operations: The application of a Multiple Criteria Decision Aiding model to a case study in Southern Italy. *Sustainable Cities and Society*, Volume 60, p. 102214.
- Observatoire français de l'Industrie Electrique (OIE), 2020. *Primaire ou finale: comment comptabiliser l'énergie ?*, s.l.: s.n.
- OGGA, 2023. *Logement-intelligent*. [En ligne] Available at: <https://www.ogga.fr/logement-intelligent/>
- OID, 2022. *Baromètre de la performance énergétique et environnementale des bâtiments en France*, Paris: Observatoire de l'immobilier Durable.
- Ongpeng, J. M. C. et al., 2020. Multi-Criteria Decision Analysis for Energy Retrofit in Buildings. *Chemical Engineering Transaction*, Volume 81.
- Ortiz, J. et al., 2016. Comfort and economic criteria for selecting passive measures for the energy refurbishment of residential buildings in Catalonia. *Energy and Buildings*, Volume 110, pp. 195-210.
- P. Barde, M. & J. Barde, P., s.d. What to use to express the variability of data: Standard deviation or standard error of mean?. *Perspectives in Clinical Research*.
- Papathanasiou, J. & Ploskas, N., 2018. *Multiple Criteria Decision Aid: Methods, Examples and Python Implementations*. 1st Edition éd. s.l.:Springer International Publishing.
- Piton, G., Philippe, F., Tacnet, J.-M. & Gourhand, A., 2018. Aide à la décision par l'application de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) à l'analyse multicritère des stratégies d'aménagement du Grand Büech à la Faurie. *Sciences Eaux & Territoires*, Issue 26, pp. 54-57.
- R. Vasquez, V. & B. Whiting, W., 2005. Accounting for Both Random Errors and Systematic Errors in Uncertainty Propagation Analysis of Computer Models Involving Experimental Measurements with Monte Carlo Methods. *Risk Analysis*, Volume 25, pp. 1327-1687.
- Rekkal, K., Rekkal, S. & Abdesselam, B., 2020. *Utilisation d'une méthode multicritère d'aide à la décision pour le choix d'une énergie renouvelable*. Algérie, s.n.
- Riaz, M. & Raza Hashmi, M., 2019. Linear Diophantine fuzzy set and its applications towards multi-attribute decision-making problems. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 37(4), pp. 5417-5439.
- Riaz, M. et al., 2020. A Robust q-Rung Orthopair Fuzzy Information Aggregation Using Einstein Operations with Application to Sustainable Energy Planning Decision Management. *Energies*, Volume 13, p. 2155.
- Rocchi, L. et al., 2018. Sustainability evaluation of retrofitting solutions for rural buildings through life cycle approach and multi-criteria analysis. *Energy and Buildings*, Volume 173, pp. 281-290.
- Rogers, M., Bruen, M. & Maystre, L.-Y., 2000. *Electre and Decision Support: Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment*. s.l.:Springer US.
- Roy, B., 1968. Classement et choix en présence de points de vue multiples. Volume 8, pp. 57-75.
- Ruggeri, A. G. et al., 2020. Planning energy retrofit on historic building stocks: A score-driven decision support system. *Energy and Buildings*, Volume 224, p. 110066.
- Saaty, T. L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), pp. 234-281.

- Saaty, T. L., 1987. The analytic hierarchy process: what it is and how it is used. *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 9, pp. 161-176.
- Sahabuddin, M. & Khan, I., 2021. Multi-criteria decision analysis methods for energy sector's sustainability assessment: Robustness analysis through criteria weight change. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(101380).
- Schärlig, A., 1996. *Pratiquer ELECTRE et PROMÉTHÉE: Un complément à décider sur plusieurs*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Scholten, L., Schuwirth, N., Reichert, P. & Lienert, J., 2015. Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis – An application to water supply infrastructure planning. *European Journal of Operational Research*, Volume 242, pp. 243-260.
- Service Public, 2021. *Certificats d'économie d'énergie (CEE) "Standard"*. [En ligne] Available at: <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F35584>
- Service Public, 2022. *L'audit énergétique obligatoire reporté en avril 2023: ce qu'il contient et qui peut le réaliser*. [En ligne] Available at: <https://www.service-public.fr/particuliers/actualites/A15675#:~:text=Passoires%20thermiques-.L%27audit%20énergétique%20obligatoire%20reporté%20en%20avril%202023%20%3A%20ce%20qu.etc%20qui%20peut%20le%20réaliser&text=Initialement%20prévu%20à%20partir%20du.of>
- Service-Public, 2023. *Éco-prêt à taux zéro (éco-PTZ)*, s.l.: s.n.
- Simonton, D. K., 2022. *Distribution, Normal..* [En ligne] Available at: <https://www.encyclopedia.com/science-and-technology/mathematics/mathematics/normal-distribution>
- Simos, J., 1989. *L'évaluation environnementale: un processus cognitif négocié*, Lausanne: EPFL.
- Simos, J., 1990. *Évaluer l'impact sur l'environnement : Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*, s.l.: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- The European Parliament and the Council of the European Union, 2018. *Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency*, s.l.: Official Journal of the European Union.
- Torres-Rivas, A., Palumbo, M., Jiménez, L. & Boer, D., 2022. Self-consumption possibilities by rooftop PV and building retrofit requirements for a regional building stock: The case of Catalonia. *Solar Energy*, Volume 238, pp. 150-161.
- UK Government, 2009. *Multi-criteria analysis: a manual*, London: Communities and Local Government Publications.
- V. Andrieux, O. Ribon & N. Riedinger, 2020. Bilan énergétique de la France pour 2020. *Ministère de la transition écologique*.
- Van de Schoot, R. et al., 2013. A Gentle Introduction to Bayesian Analysis: Applications to Developmental Research. *Child Development*, Volume 85, pp. 842-860.
- Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F. & Zhao, J.-H., 2009. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), pp. 2263-2278.

Wang, Y.-M. & Luo, Y., 2009. On rank reversal in decision analysis. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5-6), pp. 1221-1229.

Wang, Y. et al., 2022. An innovative retrofit Motivation-Objective-Criteria (MOC) approach integrating homeowners' engagement to unlocking low-energy retrofit in residential buildings. *Energy & Buildings*, Volume 259, p. 111834.

Yilan, G., Kadirgan, M. N. & Çiftçioğlu, G. A., 2020. Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey. *Renewable Energy*, Volume 146, pp. 519-529.

Zacà, I., D'Agostino, D., Congedo, P. M. & Baglivo, C., 2015. Assessment of cost-optimality and technical solutions in high performance multi-residential buildings in the Mediterranean area. *Energy and Buildings*, Volume 102, pp. 250-265.

Annexe 1 – Schémas détaillées d'instrumentations des appartements

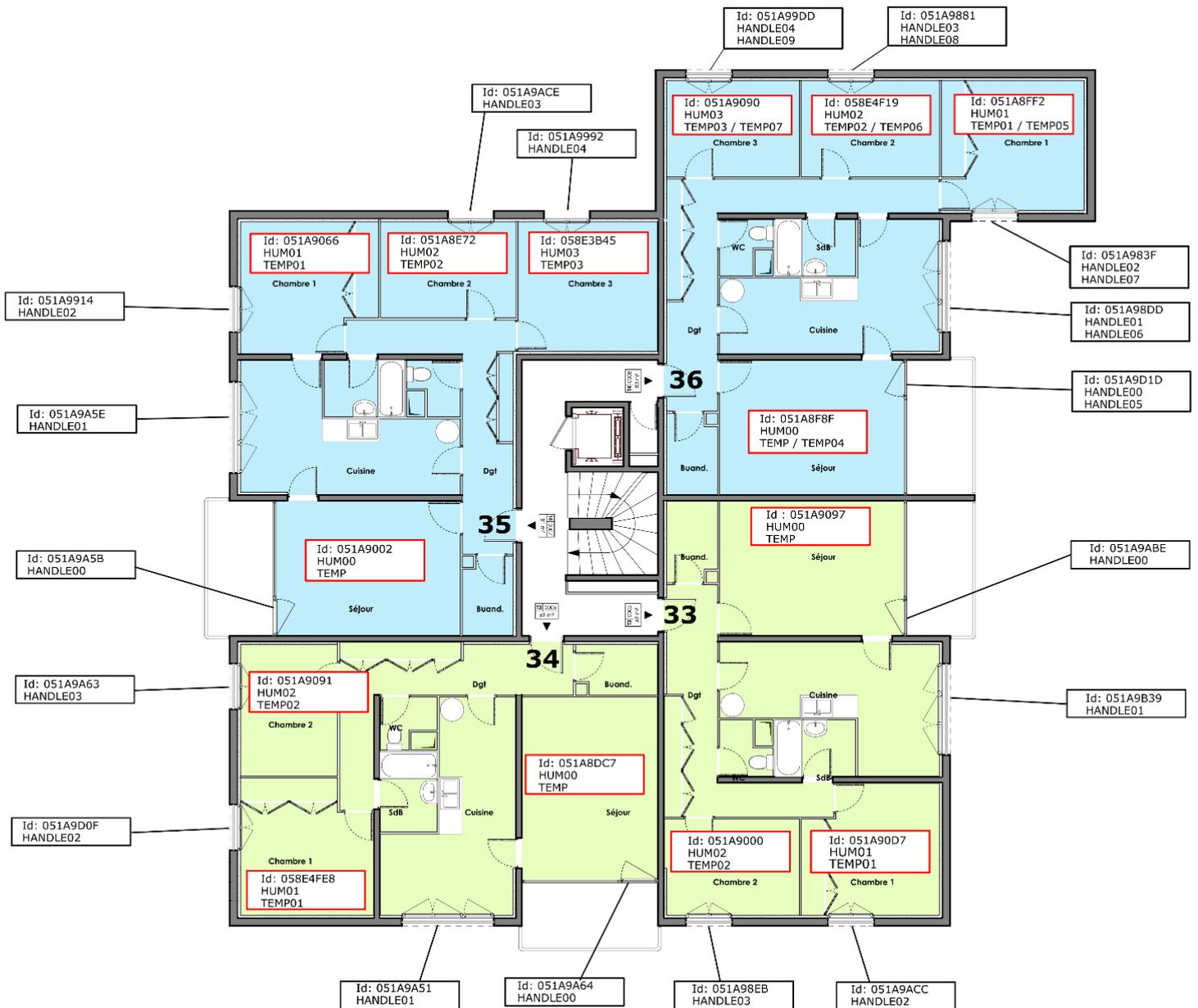


Figure 76 : Schémas détaillées d'instrumentations des appartements du bâtiment C2

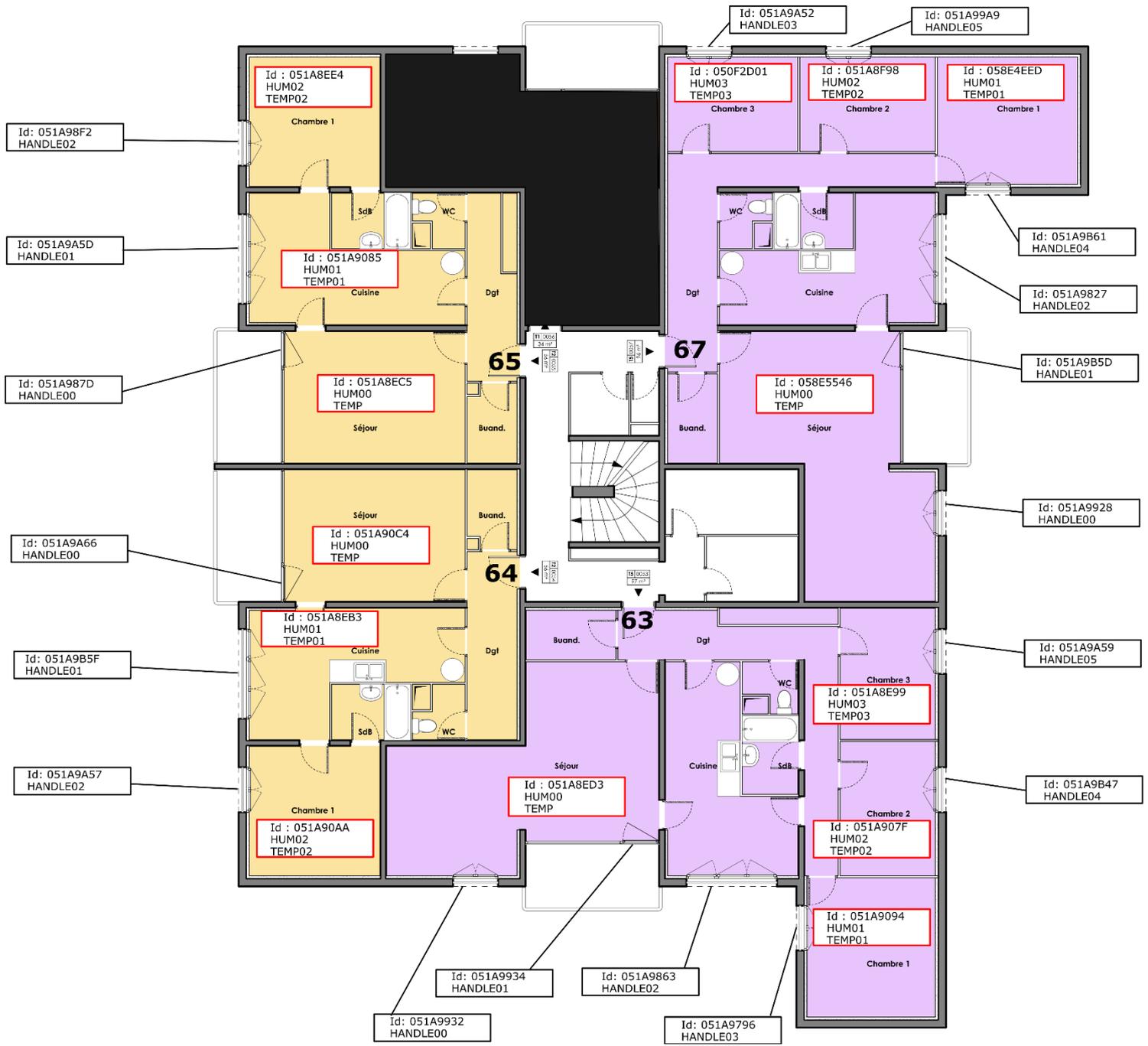


Figure 77 : Schémas détaillées d'instrumentations des appartements du bâtiment C3

Annexe 2 - Post-traitement des données d'instrumentation

Le traitement des données se fait sous python via l'environnement de développement PyCharm.

Nous avons choisi de traiter les données en créant un code par EcoTouch. Les types de données et les noms de fichiers étant sensiblement différents d'un code à un autre cette solution nous est apparue la plus fiable et la plus simple en comparaison à un méthode de plus hauts degrés dans laquelle nous aurions mis en place une programmation orienté objet et un code unique pour traiter l'ensemble des EcoTouch. Solution qui a été testé mais qui s'est avéré moins efficace.

Chaque code est structuré de la même façon en 4 parties.

- Initialisations : on crée les différents variables et matrices qui vont être utilisé par la suite
- Lecture des données de mesure : on va chercher les données dans les bons dossiers pour les agréger dans des matrices afin de les traiter par la suite.
- Affichage graphique
- Sauvegarde des données traitées dans un fichier « .pkl »

Initialisation

Dans cette première partie on va créer les différentes variables propres au logement et à l'EcoTouch associé.

```
number = '67-003BA'          # Nom de l'EcoTouch
App_type = 'T5'              # Type d'appartement
App_surf = 96                 # Surface d'appartement
plotting = True              # Booléen permettant l'affichage ou non des résultats
save_fig = False             # Booléen permettant la sauvegarde ou non des figures
save_data_to_pkl = False     # Booléen permettant la sauvegarde ou non des données
save_data_to_xlsx = False
```

```
electric_heat_P = np.zeros((0, 2)) # On créer le vecteur qui va contenir les
consommations électriques moyennent de chauffage - Idem autres conso élec
```

```
temp_ch1 = np.zeros((0, 2)) # On créer le vecteur qui va contenir les
températures de la chambre 1 - Idem autres températures
```

```
humidity_ch1 = np.zeros((0, 2)) # On créer le vecteur qui va contenir les
humidité relatives de la chambre 1 - Idem autres humidités
```

```
window_ch1 = np.zeros((0, 2)) # On créer le vecteur qui va contenir les
informations d'O/F de la fenêtre de la chambre 1 - Idem autres fenêtres
```

```
hot_water = np.zeros((0, 2)) # On créer le vecteur qui va contenir les
consommations volumique d'ECS
```

Lecture des données de mesure

Dans cette seconde partie on va commencer par récupérer les différents fichiers .txt, et les agglomérer pour n'avoir qu'une seule liste de donnée par mesures.

```
electric_heat_files = glob.glob('01_Mesures_brutes/{}/CH-
*.mes.txt'.format(number))
for file in electric_heat_files:
```

```

    if len(np.loadtxt(file).shape) == 1:
        electric_heat_P = np.append(electric_heat_P,
np.loadtxt(file).reshape(1, 2), axis=0)
    else:
        electric_heat_P = np.append(electric_heat_P, np.loadtxt(file),
axis=0)

```

On va ensuite les trier par ordre croissant de timestamp pour garantir la chronologie des mesures ce qui peut ne pas être le cas lors de l'écriture des données par l'EcoTouch.

```

electric_heat_P = electric_heat_P[electric_heat_P[:, 0].argsort()]

```

Dans un troisième temps on transforme les données afin d'avoir une information sur l'énergie consommée lorsqu'il s'agit d'une mesure de puissance « electric_heat_E » ou sur le volume d'ECS puisé lorsqu'il s'agit d'une mesure de débit d'eau « hot_water_vol ».

```

electric_heat_E = [((electric_heat_P[i + 1, 0] - electric_heat_P[i, 0]) * electric_heat_P[i, 1]) / 3600
    for i in range(len(electric_heat_P[:, 0]) - 1)]
electric_heat_E.append(0)

```

Dans un quatrième temps on crée un vecteur « electric_heat_dt » qui va contenir les dates au format datetime afin que ce soit plus compréhensible.

```

electric_heat_dt = [dt.datetime.fromtimestamp(t) for t in electric_heat_P[:, 0]]

```

Enfin ces différentes matrices vont être stockées dans une structure de type DataFrames via la bibliothèque Panda du langage Python « electric_heat_pd ».

```

electric_heat_pd = pd.DataFrame({"datetime": electric_heat_dt, "timestamp": electric_heat_P[:, 0],
    "power": electric_heat_P[:, 1], "energy": electric_heat_E})

```

On procède de manière identique pour le traitement des données issus des différents capteurs.

Affichage graphique

Il s'agit dans cette partie de choisir la période qui nous intéresse puis tracer les variations de mesures pour les différents capteurs sur cette période.

Dans un premier temps on définit sous les variables « start » et « end » le début et la fin de la période d'affichage. Ces périodes sont transformées en timestamp afin de pouvoir les comparer aux timestamp des données de mesures.

```

start = dt.datetime.timestamp(dt.datetime(year=2022, month=2, day=1,
hour=0, minute=0, second=0))
end = dt.datetime.timestamp(dt.datetime(year=2022, month=3, day=1, hour=23,
minute=59, second=59))

```

Ensuite, pour chaque mesure on va rechercher les indices, dans la colonne correspondant au timestamp des données mesurées, qui se rapproche le plus des dates de début et de fin choisies pour l’affichage.

```
i_E1 = np.where(electric_heat_P[:, 0] == electric_heat_P[:,
0]).flat[np.abs(electric_heat_P[:, 0] - start).
          argmin()])[0][0]
i_E2 = np.where(electric_heat_P[:, 0] == electric_heat_P[:,
0]).flat[np.abs(electric_heat_P[:, 0] - end).argmin()])[0][0]
```

Enfin, on affiche et enregistre les figures représentant les données de mesure pour la période choisie.

```
plt.rcParams.update({'font.size': 14})
plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.plot(electric_heat_dt[i_E1:i_E2], electric_heat_P[i_E1:i_E2, 1], '-',
color='b', lw=2, label='Electric heating')
plt.plot(electric_hw_dt[i_E3:i_E4], electric_hw_P[i_E3:i_E4, 1], '-',
color='g', lw=2, label='Electric hot water')
plt.plot(electric_outlets_dt[i_E5:i_E6], electric_outlets_P[i_E5:i_E6, 1],
'-', color='r', lw=2, label='Electric outlets')
plt.plot(electric_tot_dt[i_E7:i_E8], electric_tot_P[i_E7:i_E8, 1], '-',
color='y', lw=2, label='Electric total')
plt.gcf().autofmt_xdate()
plt.grid(color='k', ls='-', lw=0.3)
plt.title('Electrical consumption for apartment {}'.format(number))
plt.xlabel('Dates')
plt.ylabel('Electric consumption ($W$)')
plt.legend(loc='upper right', markerscale=0.3, fontsize='x-small')
plt.show()
plt.savefig("02_Mesures_post_traitées/{}/Electric_consumptions.png".format(
number), orientation='landscape', format='png', bbox_inches='tight',
pad_inches=0.2)
```

Sauvegarde des données traitées

Dans cette quatrième partie, les données traitées et mises sous formes de DataFrames sont enregistrées dans un dossier nommées « 02_Mesures_post_traitées » à l’intérieur d’un sous dossier correspondant à l’EcoTouch concédée. Il existe ainsi pour chaque EcoTouch un dossier contenant l’intégralité des données mesuré par l’instrumentation et au format. pkl (pickling).

```
# recording of electrical consumption measurement data
electric_heat_pd.to_pickle("02_Mesures_post_traitées/{}/Heating_elec_consum
ption.pkl".format(number))

# recording of temperature measurement data
temp_sej_pd.to_pickle("02_Mesures_post_traitées/{}/Temp_room_1.pkl".format(
number))

# recording of relative humidity measurement data
humidity_ch1_pd.to_pickle("02_Mesures_post_traitées/{}/Humidity_room_1.pkl"
.format(number))

# recording of hot water measurement data
hot_water_pd.to_pickle("02_Mesures_post_traitées/{}/Hot_water_consumption.p
kl".format(number))

# recording of window opening measurement data
window_sej1_pd.to_pickle("02_Mesures_post_traitées/{}/Window_lounge_1.pkl".
format(number))
```


Annexe 3 - Estimation du productible PV

Tableau 47 : Production électrique mensuelle pour les façades Nord (simulation 3)

NORD				
Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	801	196	3,8%	24,5%
Février	1042	253	4,9%	24,3%
Mars	1784	410	8,4%	23,0%
Avril	2197	536	10,3%	24,4%
Mai	2582	717	12,1%	27,8%
Juin	2722	774	12,8%	28,4%
Juillet	2702	744	12,7%	27,5%
Août	2423	615	11,4%	25,4%
Septembre	1970	447	9,2%	22,7%
Octobre	1436	335	6,7%	23,3%
Novembre	911	219	4,3%	24,0%
Décembre	729	179	3,4%	24,5%
Total	21298	5424	100%	

Tableau 48 : Production électrique mensuelle pour les façades Sud (simulation 3)

SUD				
Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	1974	252	5,1%	12,8%
Février	2270	277	5,8%	12,2%
Mars	3859	445	9,9%	11,5%
Avril	3873	413	10,0%	10,7%
Mai	3576	390	9,2%	10,9%
Juin	3613	380	9,3%	10,5%
Juillet	3914	394	10,1%	10,1%
Août	4239	425	10,9%	10,0%
Septembre	4032	433	10,4%	10,7%
Octobre	3351	400	8,6%	11,9%
Novembre	2284	289	5,9%	12,7%
Décembre	1873	250	4,8%	13,3%
Total	38858	4347	100%	

Tableau 49 : Production électrique mensuelle pour les façades Est (simulation 3)

EST				
Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	1454	174	3,3%	12,0%
Février	1891	226	4,3%	11,9%
Mars	3799	434	8,7%	11,4%
Avril	4634	526	10,6%	11,4%
Mai	4943	561	11,3%	11,3%
Juin	5313	542	12,2%	10,2%
Juillet	5708	545	13,1%	9,6%
Août	5431	556	12,5%	10,2%
Septembre	4309	463	9,9%	10,8%
Octobre	3018	363	6,9%	12,0%
Novembre	1758	221	4,0%	12,6%
Décembre	1314	167	3,0%	12,7%
Total	43572	4777	100%	

Tableau 50 : Production électrique mensuelle pour les façades Ouest (simulation 3)

OUEST				
Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	675	214	3,5%	31,7%
Février	901	286	4,7%	31,8%
Mars	1608	482	8,5%	30,0%
Avril	1995	566	10,5%	28,4%
Mai	2260	624	11,9%	27,6%
Juin	2407	626	12,7%	26,0%
Juillet	2448	632	12,9%	25,8%
Août	2244	613	11,8%	27,3%
Septembre	1807	528	9,5%	29,2%
Octobre	1275	397	6,7%	31,2%
Novembre	781	248	4,1%	31,7%
Décembre	618	199	3,2%	32,3%
Total	19018	5417	100%	

Tableau 51 : Production électrique mensuelle pour les façades Nord (simulation 4)

NORD				
Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	550	147	3,8%	26,7%
Février	716	190	4,9%	26,5%
Mars	1226	307	8,4%	25,1%
Avril	1514	401	10,3%	26,5%
Mai	1781	532	12,1%	29,9%
Juin	1879	573	12,8%	30,5%
Juillet	1864	551	12,7%	29,6%
Août	1670	457	11,4%	27,4%
Septembre	1355	335	9,2%	24,7%
Octobre	986	251	6,7%	25,4%
Novembre	625	164	4,3%	26,3%
Décembre	500	134	3,4%	26,8%
Total	14666	4042	100%	

Tableau 52 : Production électrique mensuelle pour les façades Est (simulation 4)

EST				
Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	1605	167	3,4%	10,4%
Février	2080	222	4,4%	10,7%
Mars	4167	437	8,8%	10,5%
Avril	5058	551	10,6%	10,9%
Mai	5365	616	11,3%	11,5%
Juin	5767	596	12,1%	10,3%
Juillet	6187	609	13,0%	9,8%
Août	5901	607	12,4%	10,3%
Septembre	4717	472	9,9%	10,0%
Octobre	3316	362	7,0%	10,9%
Novembre	1941	212	4,1%	10,9%
Décembre	1452	160	3,1%	11,0%
Total	47556	5010	100%	

Tableau 53 : Production électrique mensuelle pour les façades Sud (simulation 4)

SUD				
Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	2036	246	5,1%	12,1%
Février	2350	260	5,8%	11,1%
Mars	4016	402	10,0%	10,0%
Avril	4017	381	10,0%	9,5%
Mai	3695	371	9,2%	10,1%
Juin	3730	366	9,3%	9,8%
Juillet	4047	376	10,1%	9,3%
Août	4392	397	10,9%	9,0%
Septembre	4182	401	10,4%	9,6%
Octobre	3475	374	8,6%	10,8%
Novembre	2357	282	5,9%	12,0%
Décembre	1923	254	4,8%	13,2%
Total	40222	4111	100%	

Tableau 54 : Production électrique mensuelle pour les façades Ouest (simulation 4)

OUEST				
Mois	Production mensuelle [kWh]	Pertes par ombrage [kWh]	Taux de production annuel	Taux de pertes mensuel
Janvier	802	240	3,7%	29,9%
Février	1067	323	4,9%	30,2%
Mars	1870	531	8,7%	28,4%
Avril	2290	603	10,6%	26,3%
Mai	2559	660	11,9%	25,8%
Juin	2678	654	12,4%	24,4%
Juillet	2696	654	12,5%	24,3%
Août	2481	633	11,5%	25,5%
Septembre	2026	557	9,4%	27,5%
Octobre	1450	434	6,7%	30,0%
Novembre	909	274	4,2%	30,1%
Décembre	732	224	3,4%	30,5%
Total	21561	5786	100%	

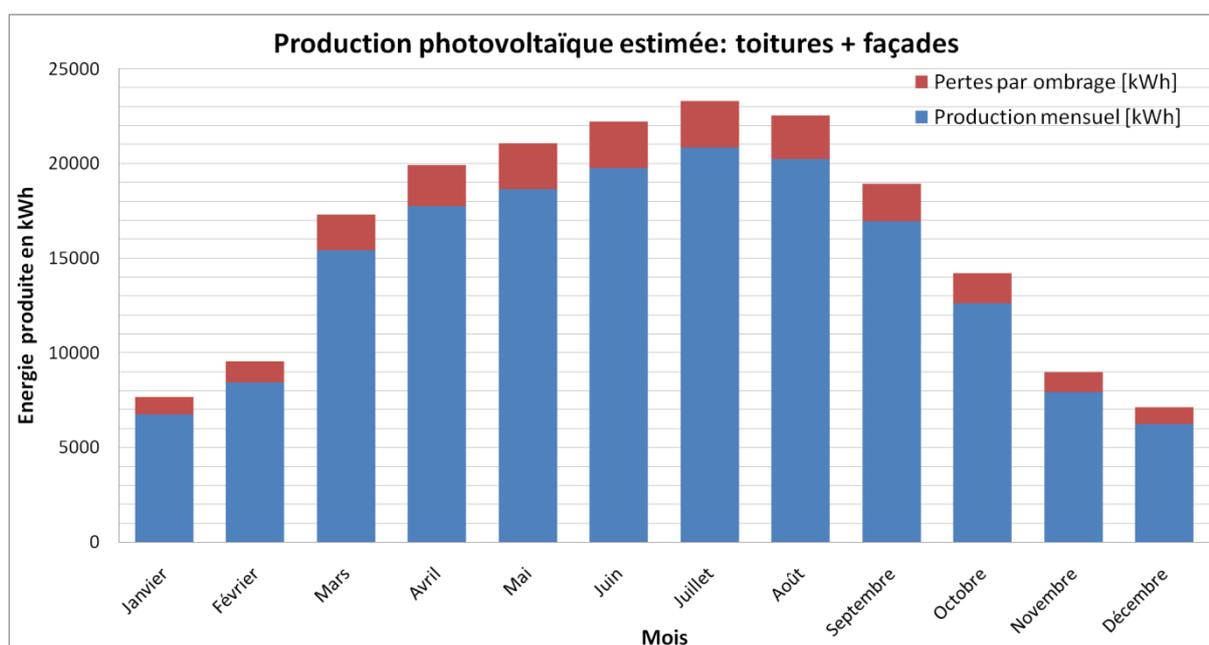


Figure 78 : Production électrique mensuelle estimée toitures + façades

Annexe 4 - Définition des scénarios de rénovation

Actions potentielles élémentaires de rénovation		Scénarios globaux de rénovation envisagés																											
		S _{1.1}	S _{1.2}	S _{1.3}	S _{1.4}	S _{2.1}	S _{2.2}	S _{2.3}	S _{2.4}	S _{3.1}	S _{3.2}	S _{3.3}	S _{3.4}	S _{4.1}	S _{4.2}	S _{4.3}	S _{4.4}	S _{5.1}	S _{5.2}	S _{5.3}	S _{5.4}	S _{6.1}	S _{6.2}	S _{6.3}	S _{6.4}	S _{7.1}	S _{7.2}	S _{7.3}	S _{7.4}
S₁	Plancher chauffant électrique existant																												
	Plancher chauffant électrique conservé	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Plancher chauffant électrique débranché	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S₂																												
	Chauffage d'appoint																												
S _{2.1}	Connecteurs électrique existants	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S _{2.2}	Panneau électrique rayonnant Atlantic Tatou				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S _{2.3}	Chauffage électrique à accumulation Atlantic Galapagos					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S _{2.4}	Radiateurs à eau basse températures Viessman									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S _{2.5}	Sèche serviette Atlantic Lunis					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S₃	Eau chaude sanitaire																												
	S _{3.1}	Ballon électrique individuel existant	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S _{3.2}	Ballon électrique individuel Atlantic Vizengo				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S _{3.3}	Ballon thermodynamique individuel Atlantic Calypso								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S _{3.4}	Chaudière gaz à condensation individuelle Atlantic Noia									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S _{3.5}	ECS thermodynamique collective Atlantic Hydrapac																	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S _{3.6}	Préparateur ECS solaire individuel Viessmann Vitocell 100-W																											
S₄	Système de ventilation																												
	Système de VMC existant	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
S _{4.1}	VMC simple flux collective Atlantic COMETE + bouches hygro A																												
S₅	Production d'énergie																												
	Aucune	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	Panneaux solaires photovoltaïques en toiture Dualsun Flash					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S _{5.2}	Panneaux solaires thermiques en toiture Dualsun Spring								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
S _{5.3}																													
S₆	Actions de remplacement des menuiseries principales																												
	Aucun remplacement des menuiseries principales	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	DV Les Menuiseries Françaises Virtuose				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	TV panétodynamique Hidret EnH + TV SGG Climatop XN			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S _{6.4}	Remplacement Menuiseries balcon uniquement avec S _{6.2}				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S₇	Actions d'isolation par l'extérieur																												
	Conservation de l'isolation en l'état	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
S _{7.1}	Action d'isolation thermique par l'extérieur																												
S _{7.2}		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Figure 79 : Scénarios de rénovation global construit à partir d'actions élémentaires exclusives.

N°	Actions potentielles élémentaires de rénovation	Durées de vie considérées [années]	Difficulté d'intégration [>3]	Difficulté d'entretien / Maintenance [>3]	Difficulté de Comptage / Pilotage [>3]	Niveau de confort thermique [<3]	Niveau de nuisances acoustique [>3]	Esthétique et encombrement [>3]	Actions à la charge du locataire [>3]	Lieu de production [km]
s₁										
Plancher chauffant électrique existant										
S _{1.1}	Plancher chauffant électrique conservé	30+	-	1	1	3	-	-	-	-
S _{1.2}	Plancher chauffant électrique débranché	30+	-	0	0	0	-	-	-	-
s₂										
Chauffage d'appoint										
S _{2.1}	Convecteurs électrique existants	0	0	0	2	2	0	2	2	0
S _{2.2}	Panneau électrique rayonnant Atlantic Tatou	20	1	0	1	3	0	1	1	765
S _{2.3}	Chauffage électrique à accumulation Atlantic Gaspagos	15	2	1	1	2	1	3	1	765
S _{2.4}	Radiateurs à eau basse températures Viessman	30+	3	2	3	1	2	3	3	520
S _{2.5}	Sèche serviette Atlantic Lunis	15	1	1	1	1	1	1	1	765
s₃										
Eau chaude sanitaire										
S _{3.1}	Ballon électrique individuel existant	0	0	0	2	2	1	1	1	0
S _{3.2}	Ballon électrique individuel Atlantic Vizengo	15	1	0	1	3	1	1	1	420
S _{3.3}	Ballon thermodynamique individuel Atlantic Calypso	20	2	1	1	3	3	3	2	366
S _{3.4}	Chaudière gaz à condensation individuelle Atlantic Nara	20	2	2	2	1	3	2	3	722
S _{3.5}	ECS thermodynamique collective Atlantic Hydropac	20	3	2	3	2	0	0	0	670
S _{3.6}	Préparateur ECS solaire individuel Viessmann Vitocell 100-W	20	2	3	3	3	2	2	1	520
s₄										
Système de ventilation										
S _{4.1}	Système de VMC existant	0	0	2	-	-	-	-	-	0
S _{4.2}	VMC simple flux collective Atlantic COMETE + bouches hygro A	15	1	1	-	-	-	-	-	30
s₅										
Production d'énergie										
S _{5.1}	Aucune	30	0	0	0	-	-	-	-	0
S _{5.2}	Panneaux solaires photovoltaïques en toiture Dualsun Flash	30	2	1	1	-	-	-	-	80
S _{5.3}	Panneaux solaires thermiques en toiture Dualsun Spring	20	3	3	3	-	-	-	-	80
s₆										
Actions de remplacement des menuiseries principales										
S _{6.1}	Aucun remplacement des menuiseries principales	10	0	-	-	0	-	-	-	0
S _{6.2}	DV Les Menuiseries Françaises Virtuose	20	2	-	-	2	-	-	-	388
S _{6.3}	TV parietodynamique Ridaret-EnR + TV SGG Climatop XN	30	3	-	-	3	-	-	-	660
S _{6.4}	Remplacement Menuiseries balcon uniquement avec s 6.2	20	1	-	-	1	-	-	-	388
s₇										
Actions d'isolation par l'extérieur										
S _{7.1}	Conservation de l'isolation en l'état	20	0	-	-	0	-	-	-	-
S _{7.2}	Action d'isolation thermique par l'extérieur	20	2	-	-	3	-	-	-	-

[>3] Notation indirect: une note élevée est négative pour le critère considéré et inversement pour une note basse
[<3] Notation direct: une note élevée est positive pour le critère considéré et inversement pour une note basse

Figure 80 : Notations des performances relatives des actions élémentaires pour un critère considéré

Annexe 5 - Définition des critères d'évaluation

Définition des critères pris en compte dans la méthode MCDA			
N°	Critères	1. Economiques	
		Description	Intérêt
Moyen d'évaluation			
B.1.1	Coût d'investissement propriétaire	Coût d'investissement (travaux (fourniture et pose) + honoraires + divers), pour l'entreprise, d'un scénario de rénovation comprenant la thermique du bâtiment et les systèmes de production et d'émission de chaleur.	Permet de prendre en compte le coût d'investissement d'une solution afin d'évaluer la faisabilité économique vis-à-vis du budget attribué à l'opération.
B.1.2	Coût de réinvestissement sur une durée de 30 ans	Coût du remplacement des équipements arrivés en fin de vie sur la période ou coût de remplacement de composants important en coût sur la période	Permet de mesurer le coût global d'une solution et son impact sur la gestion d'une résidence
B.1.3	Possibilité d'aides financières et subventions particulières	Ce critère a pour but de considérer les aides financières et subventions dont pourrait bénéficier l'entreprise ou le bailleur, lors de la mise en place de la solution considérée. L'objectif étant simplement d'identifier s'il existe ou non des subventions particulières	→ https://www.photovoltaïque.info/fr/tarifs-dachat-et-autoconsommation/autres-aides-financieres/appels-a-projets-et-aides-regionales/#contexte → https://www.edf.fr/collectivites/le-mag/le-mag-collectivites/strategie-energetique-territoriale/autoconsommation-les-aides-disponibles-pour-les-collectivites
B.1.4	Coût de fonctionnement	Coûts annuels relatifs aux opérations d'entretien et de maintenance (réparation, remplacements, consommables, ...) liés au fonctionnement du système et non répercutables sur les charges des locataires. Contrats d'exploitation et de maintenance de type P3.	Difficile à évaluer précisément (voir avec mainteneurs et contrats de maintenance P3).
B.1.5	Rentabilité énergétique de la solution	Quel est le rapport entre le coût d'investissement pour la solution considérée et le gain en termes de réduction de consommation énergétique finale	Calculé à partir des estimations fournies par le BET
2. Techniques			
N°	Critères	Intérêt	
		Description	Moyen d'évaluation
B.2.1	Facilité d'intégration au bâti existant	Capacité de la solution à s'intégrer dans un bâtiment existant. Il peut s'agir de la nécessité d'avoir ou non besoin de locaux de taille suffisante disponible pour la mise en place d'un système, de la portance suffisante des toitures, terrasses ou des façades ou encore de la facilité d'intégration architecturale. On évaluera aussi à travers ce critère la nécessité ou non de réaliser des percements et réservations, de tirer de nouveaux circuits hydrauliques et/ou électriques...	Critère qualitatif et consistant à comparer les différentes solutions entre elles à partir de la connaissance des composants de la solution envisagée. Evaluation par une notation qui sera défini par comparaison subjective entre les solutions en considérant la + et la - contraignante.
B.2.2	Mise en œuvre en site occupé	Possibilité de réalisation des travaux et de mise en œuvre de la solution en site occupé. Faut-il reloger les locataires pour réaliser les travaux ?	Evaluation à priori au regard de la solution considérée et en concertation avec les entreprises spécialisées. Critère binaire.
B.2.3	Facilité d'entretien / Maintenance	Facilités d'entretien du point de vue de la fréquence d'entretien, de l'accès aux systèmes sur le site et dans les bâtiments ou logements concernés, la disponibilité des entreprises chargées de l'entretien et de la maintenance ainsi que la disponibilité (matérielle et géographique) des éventuels pièces ou éléments de remplacement en cas de panne.	Evaluation qualitative par le biais des informations fournies par le BET et les entreprises partenaires. Evaluation par une notation qui sera défini par comparaison subjective entre les solutions en considérant la + et la - contraignante.
B.2.4	Facilité de Comptage / Pilotage / Gestion de l'énergie	Les systèmes ayant une action sur la régulation sont-ils simples à piloter (vannes, contacteur, régulateur de puissance...), Le comptage de l'énergie produite et fournit individuellement aux locataires est-il facile à réaliser.	Critère qualitatif qui compare les différents scénarios entre eux au regard des caractéristiques de leurs organes de régulation. Evaluation par une notation qui sera défini par comparaison subjective entre les solutions en considérant la + et la - contraignante.

Figure 81 : Définition des critères économiques et techniques

3. Sociaux			
N°	Critères	Description	Moyen d'évaluation
			Intérêt
Es.1	Impact sur le coût pour le locataire	Ce critère doit permettre d'évaluer l'impact qu'aura une solution sur le montant des charges (appelées directement par un tiers comme un fournisseur d'énergie par exemple) du locataire en prenant en compte les coûts supplémentaires et les économies réalisées.	L'objectif est de tenir compte de l'impact économique bénéfique pour le locataire des différentes solutions. Un des buts premiers du projet étant de lutter contre la précarité énergétique.
Es.2	Niveau de confort thermique	Critère est essentiel malgré son caractère abstrait et subjectif. Il reflète le confort thermique apparent potentiellement ressenti par les locataires au regard de la solution évaluée.	On s'intéressera ici au mode de diffusion de la chaleur et sensations associées et à l'humidité de l'air. On pourra également appuyer sur les indices PMV (Predicted Mean Vote) et PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Evaluation par une notation.
Es.3	Niveau de confort acoustique	Ce critère permet de prendre en compte les nuisances sonores que pourrait engendrer une solution du fait de ses composants et de son principe de fonctionnement.	On s'intéressera ici aux niveaux sonores des équipements installés que l'on pourra retrouver sur les fiches techniques des produits. On procède pour à une évaluation par notation.
Es.4	Esthétique et encombrement	Evaluation de l'intégration pratique et esthétique d'une solution au sein du logement. On comparera ici l'aspect général et la taille du composant à installer ainsi que son emplacement dans le logement.	Critère subjectif évalué à partir d'un étude sociologique sur le comportement et les attentes des locataires. Ce critère peut être évalué en exposant les scénarios possibles aux locataires et en relevant leurs préférences.
4. Environnementaux			
N°	Critères	Description	Moyen d'évaluation
			Intérêt
Es.1	Efficacité énergétique	Energie économisée mesurée par rapport à l'état initial.	La mesure de l'efficacité énergétique est importante dans la mesure où elle permet d'identifier quelle solution apporte les meilleurs gains énergétiques. Ce critère permet d'atteindre l'objectif initial de réduction des consommations énergétiques globales.
Es.2	Emissions de CO2 évitées	Quantité de CO2 non émis dans l'environnement associé aux gains de consommations énergétique et au type d'énergie finale utilisé.	Pour obtenir les émissions évitées, il suffit de multiplier les kWh valorisés par le contenu en CO2 des kWh qui ont été évités. Ce calcul prend implicitement en compte le mix énergétique français et ses différentes sources de production d'électricité ainsi que leur émission de CO2 par kWh.
Es.3	Lieu de production	Représente la distance géographique moyenne de production des composants de la solution considérées vis-à-vis du lieu de mise en œuvre.	Fiches FDES Base de données INIES Fiches ACERMI

Figure 82 : Définition des critères sociaux et environnementaux

Annexe 6 - Pondération des critères d'évaluation

Détermination des pondérations par la méthode SRF (SIMOS révisée) - Projet INER

INFORMATIONS

Ces tableaux Excel représentent la première étape dans le processus de pondérations des critères et sous-critères relatifs aux systèmes. L'objectif est de hiérarchiser les familles de critères et critères les uns par rapport aux autres par le biais de ces feuilles Excel. Le calcul des poids de chaque critère se fait ensuite automatiquement en fonction de la hiérarchisation choisie. La méthode utilisée pour le calcul s'appelle la Méthode SRF (SIMOS Révisée).

Il s'agit dans un premier temps de classer chaque critère au sein de chaque famille grâce aux cellules de type "liste" configurées. Les critères doivent être classés du plus importants aux moins importants selon votre point de vu. Si plusieurs critères vous semblent avoir la même importance ils peuvent être placés au même rang sur la même ligne. Si un critère vous semble beaucoup plus important que les suivants une ou plusieurs lignes vides peuvent être rajoutées. A noter qu'il n'existe pas de règle pour la position d'un critère dans la liste : le moins important peut par exemple aussi bien se retrouver sur la ligne 15. Enfin, un ratio Z vous sera demandé pour chaque tableau afin de fixer le rapport d'importance entre le critère le plus important et le critère le moins important.

Dans un second temps il s'agira de classer les 4 familles de critères avec la même méthode dans le tableau 5. Les familles doivent être classées de la plus importante à la moins importante selon votre point de vu. Il est également possible d'avoir des familles avec une importance identique ou avec des écarts appuyés.

Les tableaux : 1. [Les critères économiques] - 2. [Les critères techniques] - 3. [Les critères sociaux] - 4. [Les critères environnementaux] - 5. [Les 4 grandes catégories de critères pour les systèmes]

La définition de chaque critère est donnée dans la feuille excel nommée "Critères".

1. Classement des critères ECONOMIQUES

	g1.1 Coûts d'investissement propriétaire	g1.2 Coût de réinvestissement sur une durée de 30 ans	g1.3 Possibilité d'aides financières et subventions particulières
	g1.4 Coût de fonctionnement		
Rang			
Plus important	1	Coût d'investissement propriétaire	Coût de fonctionnement
	2	Coût de réinvestissement sur une durée de 30 ans	
	3		
	4		
	5	Rentabilité énergétique de la solution	
	6	Possibilité d'aides financières et subventions particulières	
	7		
	8		
	9		
	10		
	11		
	12		
	13		
	14		
Moins important	15		
Ratio Z	3		

Figure 83 : Classement par ordre d'importance des critères économiques

2. Classement des critères TECHNIQUES

g2.1 Facilité d'intégration au bâti existant		g2.2 Mise en œuvre en site occupé		g2.3 Facilité d'entretien / Maintenance	
g2.4 Facilité de Comptage / Pilotage / Gestion de l'énergie					
Rang					
Plus important	1	Mise en œuvre en site occupé			
	2	Facilité d'intégration au bâti existant			
	3	Facilité d'entretien / Maintenance			
	4		Facilité de Comptage / Pilotage / Gestion de l'énergie		
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				
	13				
	14				
Moins important	15				
Ratio Z					3

3. Classement des critères SOCIAUX

g3.1 Impact sur le coût pour le locataire		g3.2 Niveau de confort thermique		g3.3 Niveau de confort acoustique	
g3.4 Esthétique et encombrement					
Rang					
Plus important	1	Impact sur le coût pour le locataire			
	2	Niveau de confort thermique			
	3				
	4	Esthétique et encombrement			Niveau de confort acoustique
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				
	13				
	14				
Moins important	15				
Ratio Z					3

Figure 84 : Classement par ordre d'importance des critères techniques et sociaux

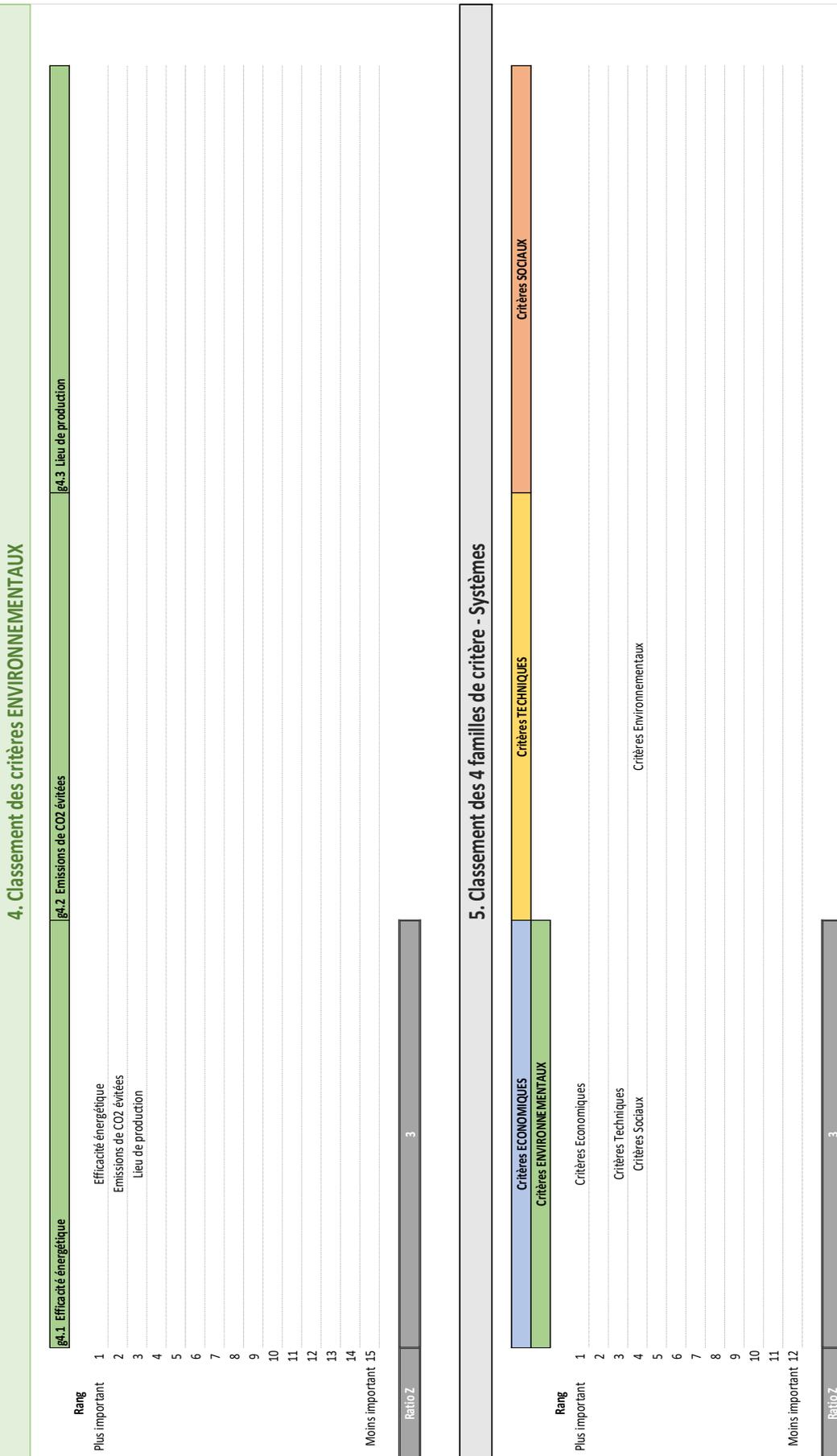


Figure 85 : Classement par ordre d'importance des critères environnementaux et des familles de critères

5. Pondération des 4 FAMILLES de critère - Systèmes

1	2	3	4	n	k'	k*	k ^u	k ^v	d _{base}	M	d _{base} × (M)	→ L	L _{base}	→ L _{base}	F+	F-	k _i
0	0	0	0	0	3.000000	45.000000	45.00	0.000222	0.000000	1	0.00022222	0	0.000000	0	0	1	45.00
0	0	0	0	0	1.666667	25.000000	25.00	0.00400	0.000000	1	0.0004	0	0.000000	0	0	1	25.00
0	0	0	0	0	1.000000	15.000000	15.00	0.006667	0.000000	1	0.00666667	0	0.00666667	0	0	1	15.00
0	0	0	0	0	1.000000	15.000000	15.00	0.006667	0.000000	1	0.00666667	0	0.00666667	0	0	1	15.00
0	0	0	0	0	6.666667	2	100.00	0	0	m	(v-m-n)	0	0	0	0	4	100.00
0	0	0	0	0	3	0.666667				4							
0	0	0	0	0													
0	0	0	0	0													
0	0	0	0	0													
1	F3	F4	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1.000000					
2	F2	0	0	1	1	1	2	1	1.666667								
3	0	0	0	0	0	0	0	0									
4	F1	0	0	0	0	0	0	0									
				n					e								
				4					3								

Figure 88 : Calcul des pondérations issues des classements pour les familles de critères

Pondération critères d'évaluation

5. Pondération des 4 familles de critère - Systèmes			
N°			
F1	45.00	Critères Economiques	
F2	25.00	Critères Techniques	
F3	15.00	Critères Sociaux	
F4	15.00	Critères Environnementaux	
	100.00		
1. Pondération des critères ECONOMIQUES - Systèmes			
g1.1	27.27	Coût d'investissement propriétaire	12.27
g1.2	23.64	Coût de réinvestissement sur une durée de 30 ans	10.64
g1.3	9.09	Possibilité d'aides financières et subventions particulières	4.09
g1.4	27.27	Coût de fonctionnement	12.27
g1.5	12.73	Rentabilité énergétique de la solution	5.73
Tot.	100.00		
2. Pondération des critères TECHNIQUES - Systèmes			
g2.1	28.57	Facilité d'intégration au bâti existant	7.14
g2.2	42.85	Mise en œuvre en site occupé	10.71
g2.3	14.29	Facilité d'entretien / Maintenance	3.57
g2.4	14.29	Facilité de Comptage / Pilotage / Gestion de l'énergie	3.57
Tot.	100.00		
3. Pondération des critères SOCIAUX - Systèmes			
g3.1	40.9	Impact sur le coût pour le locataire	6.14
g3.2	31.82	Niveau de confort thermique	4.77
g3.3	13.64	Niveau de confort acoustique	2.05
g3.4	13.64	Esthétique et encombrement	2.05
Tot.	100.00		
4. Pondération des critères ENVIRONNEMENTAUX - Systèmes			
g4.1	50	Efficacité énergétique	7.50
g4.2	33.33	Emissions de CO2 évitées	5.00
g4.3	16.67	Lieu de production	2.50
Tot.	100.00		100.00

Figure 89 : Résultats des pondérations

Annexe 7 - Protocole pondération méthode SRF (SIMOS REVISEE)

1. Pourquoi utiliser SRF plutôt que Simos ?

La procédure liée à la méthode SIMOS implique de convertir directement le classement (le rang de chaque critère) en poids. Cela limite grandement le groupe de poids possibles car le ratio entre le poids du critère le plus important et celui du moins important est imposé. Dans ce cas, s'il n'y a pas de cartes blanches introduites dans le classement, ce ratio est automatiquement égal au nombre total de critères.

Par exemple, prenons 4 critères a, b, c et d. Admettons que le décideurs classe ces critères selon l'ordre suivant : a, b, c, d et sans insérer de cartes blanches. On obtient respectivement les poids suivants : 1, 2, 3, 4. Donc le poids du critère d est 4 fois plus important que celui du critère a. Ce ratio est automatiquement déduit de la méthode de Simos, sans que les préférences du décideur entrent en compte. Ainsi, un jeu de poids tels que 3, 4, 5, 6 ou 6,7,8,9 pourrait peut-être mieux correspondre aux attentes du décideur. Mais ces jeux de poids ne peuvent être obtenus par la méthode de Simos.

2. Pour l'Analyse des résultats

L'analyse des résultats se fait via un **tableur**. Les étapes données ci-dessous sont issues de la méthode expliquée par J. Figueira et B. Roy dans leur publication *Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure* [2002], accessible à cette adresse : [\[http://185.23.121.66/drupal/sites/default/files/Roy_SRF_Simos%20procedure.pdf\]](http://185.23.121.66/drupal/sites/default/files/Roy_SRF_Simos%20procedure.pdf).

2.1. Détermination des poids non-normalisés

- On renseigne le **nombre de « rangs »**, noté r , issu du classement : 1 critère occupe 1 rang, 2 critères ex aequo occupe également 1 rang. 1 case blanche n'occupe aucun rang. Par convention, le **RANG 1 CORRESPOND AU CRITERE LE MOINS IMPORTANT**.
- On renseigne le **nombre de case blanche**, noté e'_r , entre le rang r et $r+1$. S'il y a n rangs, la case correspondant à e'_n ne sera pas remplie.
- On déduit la colonne e_r correspondant à $e'_r + 1$
- Calcule de e qui est égal à la somme de tous les e_r telle que $\sum_{r=1}^{n-1} e_r$
- Calculer u égal à $\frac{z-1}{e}$ (où Z est le ratio défini précédemment par le décisionnaire). Pour u , garder 6 chiffres après la virgule.
- En déduire le **poids non-normalisé** associé au rang r , noté $k(r)$, donné par $k(r) = 1 + u(e_0 + \dots + e_{r-1})$ avec e_0 égal à 0.

2.2. Détermination des poids normalisés

Afin que la **somme des poids soit égale à 100**, il est nécessaire de normaliser les poids.

On prend $k'_i = k(r)$, k'_i est le poids non normalisé du critère i au rang r .

- Calcul de K qui est la somme des poids non-normalisé de chaque critère k'_i . (**Rmq** : si plusieurs critères sont ex-aequo, cela signifie qu'ils ont le même poids non-normalisé $k(r)$, il ne faut pas oublier de multiplier $k(r)$ par le nbr de critères associés à ce rang dans la somme K').
- Calcul de k_i^* donné par $k_i^* = \frac{100}{K'} k'_i$
- On note k_i'' , la troncature de k_i^* à W décimales après la virgule. On a 3 options :
 - $W = 0$ (aucun chiffre après la virgule)
 - $W = 1$ (1 chiffre après la virgule)

- $W = 2$ (2 chiffres après la virgule)
- On note K'' la somme des k_i'' , en réalité cette somme n'est pas exactement égale à 100 du fait des arrondis. Cependant, la méthode SRF prévoit un algorithme pour déterminer si, pour trouver les poids finaux k_i dont la somme vaut 100, il faut arrondir k_i^* en dessous ou en dessous. Pour cela il faut :
 - On calcule v , donné par $v = 10^W * (100 - K'')$
 - Entrer TOUS les critères dans un tableau, classés du plus au moins important (du rang 1 au rang n).
 - Calculer pour chaque critère d_i , l'erreur relative en arrondissant k_i^* à la hausse, et \bar{d}_i , l'erreur relative en arrondissant k_i^* à la baisse. Ainsi on a :
 - $d_i = \frac{10^{-W} - (k_i^* - k_i'')}{k_i^*}$ et $\bar{d}_i = \frac{k_i^* - k_i''}{k_i^*}$
 - Ce des ratios on établit 2 listes :
 - La liste L , caractérisée par le tri des critères selon leur valeur d_i par ordre croissant
 - La liste \bar{L} , caractérisée par le tri des critères selon leur valeur \bar{d}_i par ordre décroissant
 - De ces listes on en déduit un sous ensemble M . M comprend tous les critères dont $d_i > \bar{d}_i$. On note m le nombre de critères compris dans M .
 - On définit 2 sous-ensembles
 - F^+ , les critères de cet ensemble seront arrondis à la hausse
 - F^- , les critères de cet ensemble seront arrondis à la baisse
 - Déterminons quels critères sont dans F^+ et dans F^-
 - Si $m + v \leq n$ (avec n le nombre de critères et m v définis précédemment), alors, les critères de l'ensemble M ainsi que les $n - v - m$ derniers critères de la liste \bar{L} (et n'appartenant pas à M), seront dans l'ensemble F^-
 - Si $m + v > n$, alors les $n - v$ derniers critères de la liste L (et n'appartenant pas à M), seront dans l'ensemble F^+
 - Maintenant que l'on sait comment arrondir k_i (à W chiffre après la virgule), on en déduit les poids normalisés k_i des critères.

Annexe 8 - Estimatif des coûts de fourniture et de pose de différents matériels

ECS Thermodynamique individuel Atlantic Calypso		ECS Thermodynamique individuel Atlantic Calypso		ECS Thermodynamique individuel Atlantic Calypso		ECS Thermodynamique individuel Atlantic Calypso		ECS Thermodynamique individuel Atlantic Calypso	
Modèle	P [W]	Prix (€ TTC)	Prix (€ HT)	Pose (€ HT)	Prix (€ HT / W)	Quantité	Coût (€ HT)	Coût (€ HT)	Coût global
200 L	1800	2 357 €	2 143 €	1 220 €	1.19	37	2 143 €	2 143 €	2 143 €
250 L	1800	2 448 €	2 225 €	1 280 €	1.24	30	2 225 €	2 225 €	2 225 €
nombre d'appareils 200L : 37									
nombre d'appareils 250L : 30									
Coût global : 229 581 € HT									
Chaudière individuelle gaz Atlantic Naia 2 Micro		Chaudière individuelle gaz Atlantic Naia 2 Micro		Chaudière individuelle gaz Atlantic Naia 2 Micro		Chaudière individuelle gaz Atlantic Naia 2 Micro		Chaudière individuelle gaz Atlantic Naia 2 Micro	
Modèle	P _{th} [kW]	Prix (€ TTC)	Prix (€ HT)	Pose (€ HT)	Prix (€ HT / W)	Quantité	Coût (€ HT)	Coût (€ HT)	Coût global
Micro 25	18.5	2 525 €	2 295 €	843 €	0.124	4	2 295 €	2 295 €	2 295 €
Micro 30	21.6	2 764 €	2 513 €	888 €	0.116	33	2 513 €	2 513 €	2 513 €
Micro 35	25	3 127 €	2 843 €	929 €	0.114	30	2 843 €	2 843 €	2 843 €
Réseau secondaire et accessoires : 177 399 € HT									
Coût pose : 605 46 € HT									
Coût global : 283 845 € HT									
Chaudière collective gaz cogénération Viessmann Vitobloc 200		Chaudière collective gaz cogénération Viessmann Vitobloc 200		Chaudière collective gaz cogénération Viessmann Vitobloc 200		Chaudière collective gaz cogénération Viessmann Vitobloc 200		Chaudière collective gaz cogénération Viessmann Vitobloc 200	
Modèle	P [W]	Prix (€ TTC)	Prix (€ HT)	Pose (€ HT)	Prix (€ HT / W)	Quantité	Coût (€ HT)	Coût (€ HT)	Coût global
P. Thermique	39 kW	209 €	190 €	300 €	0.18	0	190 €	190 €	190 €
P. Electrique	20 kW	253 €	230 €	300 €	0.14	147	230 €	230 €	230 €
Consommation gas	62 kW	297 €	270 €	300 €	0.15	0	270 €	270 €	270 €
Rendement total	94.90%	358 €	325 €	300 €	0.12	75	325 €	325 €	325 €
Economies en EP	28.40%								
Coût appareils : 7									
Coût pose : 8									
Coût global : 0 € HT									
Radiateurs à eau basse températures Viessman		Radiateurs à eau basse températures Viessman		Radiateurs à eau basse températures Viessman		Radiateurs à eau basse températures Viessman		Radiateurs à eau basse températures Viessman	
Modèle	P [W]	Prix (€ TTC)	Prix (€ HT)	Pose (€ HT)	Prix (€ HT / W)	Quantité	Coût (€ HT)	Coût (€ HT)	Coût global
1	1030	209 €	190 €	300 €	0.18	0	190 €	190 €	190 €
2	1700	253 €	230 €	300 €	0.14	147	230 €	230 €	230 €
3	1775	297 €	270 €	300 €	0.15	0	270 €	270 €	270 €
4	2633	358 €	325 €	300 €	0.12	75	325 €	325 €	325 €
Coût global : 12 4785 € HT									
ECS Thermodynamique collectif sans appoint Atlantic Hydrapac + ballons de stockage		ECS Thermodynamique collectif sans appoint Atlantic Hydrapac + ballons de stockage		ECS Thermodynamique collectif sans appoint Atlantic Hydrapac + ballons de stockage		ECS Thermodynamique collectif sans appoint Atlantic Hydrapac + ballons de stockage		ECS Thermodynamique collectif sans appoint Atlantic Hydrapac + ballons de stockage	
Modèle	P [kW]	Prix (€ TTC)	Prix (€ HT)	Pose (€ HT)	Prix (€ HT / W)	Quantité	Coût (€ HT)	Coût (€ HT)	Coût global
Hydrapac 11B 25	9.29	38 500 €	35 000 €	5 750 €		6	35 000 €	35 000 €	35 000 €
Ballon Corflex 1500L						1			
Ballon Corflex 2000L						2			
Ballon Corhydro 1500L						3			
Réchauffeur de boude		800 €	727 €	150 €		3	727 €	727 €	727 €
Réseau primaire et accessoires		37 125 €	33 750 €	0 €		1	33 750 €	33 750 €	33 750 €
Réseau secondaire et accessoires		50 490 €	45 900 €	0 €		1	45 900 €	45 900 €	45 900 €
Coût appareils : 21 000 € HT									
Coût accessoires : 81 832 € HT									
Coût pose : 31 950 € HT									
Coût global : 323 782 € HT									
PAC air/air monobloc EnrPlanet EnrOne		PAC air/air monobloc EnrPlanet EnrOne		PAC air/air monobloc EnrPlanet EnrOne		PAC air/air monobloc EnrPlanet EnrOne		PAC air/air monobloc EnrPlanet EnrOne	
Modèle	P _{chaud} [W]	P _{froid} [W]	Prix (€ TTC)	Prix (€ HT)	Pose (€ HT)	Quantité	Coût (€ HT)	Coût (€ HT)	Coût global
800 ENR	1700	1650	880 €	800 €	350 €	19	800 €	800 €	800 €
1000 ENR	2100	2040	1 100 €	1 000 €	350 €	19	1 000 €	1 000 €	1 000 €
1200 ENR	2360	2350	1 364 €	1 240 €	350 €	19	1 240 €	1 240 €	1 240 €
nombre d'appareils : 19									
Coût appareil : 23 560 € HT									
Coût pose : 6 650 € HT									
Coût global : 30 210 € HT									
VMC simple flux par extraction collective MVN		VMC simple flux par extraction collective MVN		VMC simple flux par extraction collective MVN		VMC simple flux par extraction collective MVN		VMC simple flux par extraction collective MVN	
Modèle	P [W]	Prix (€ TTC)	Prix (€ HT)	Pose (€ HT)	Prix (€ HT / W)	Quantité	Coût (€ HT)	Coût (€ HT)	Coût global
Avent'Air			1 500 €			4	1 500 €	1 500 €	1 500 €
nombre d'appareils : 4									
Coût appareil : 6 000 € HT									
Coût pose : 6 000 € HT									
Coût global : 6 000 € HT									
VMC simple flux par extraction collective Atlantic COMETE		VMC simple flux par extraction collective Atlantic COMETE		VMC simple flux par extraction collective Atlantic COMETE		VMC simple flux par extraction collective Atlantic COMETE		VMC simple flux par extraction collective Atlantic COMETE	
Modèle	P [W]	Prix (€ TTC)	Prix (€ HT)	Pose (€ HT)	Prix (€ HT / W)	Quantité	Coût (€ HT)	Coût (€ HT)	Coût global
VMC			1 200 €			3	1 200 €	1 200 €	1 200 €
Bouches hygro/App			80 €			199	80 €	80 €	80 €
Entrée d'air autoréglable			50 €			289	50 €	50 €	50 €
nombre caissons : 3									
nombre bouches : 199									
nombre d'entrée : 289									
Coût appareil : 33 970 € HT									

Modèle	P [W]	Prix [€ TTC]	Prix [€ HT]	Pose [€ HT]	Prix [€ HT / W]	Quantité	Coût global
Panneaux rayonnant Atlantic TATOU PI Connecté							
	500	283 €	257 €	166 €	0.51	0	0 € HT
	750	283 €	257 €	166 €	0.34	147	62181 € HT
	1000	300 €	273 €	176 €	0.27	0	0 € HT
	1250	328 €	298 €	192 €	0.24	0	0 € HT
	1500	349 €	317 €	204 €	0.21	0	0 € HT
	2000	418 €	380 €	245 €	0.19	75	46875 € HT
							109056 € HT
Sèche serviette Neomitis Lamelis Ecosens 2							
	500	813 €	739 €	250 €	1.48		nombre d'appareils
	750	906 €	824 €	250 €	1.10		Coût global
	1000	1 027 €	934 €	250 €	0.93		71958 € HT
Sèche serviette Atlantic Lunis							
	500	341 €	310 €	130 €	0.62		nombre d'appareils
	750	396 €	360 €	157 €	0.48		Coût global
							34639 € HT
Ballon ECS individuel Atlantic Vizengo							
	6.453	460 €	418 €	500 €	918		nombre d'appareils 150L
	12.675	551 €	501 €	500 €	1001		nombre d'appareils 200L
							Coût global
							63996 € HT
Ballon ECS individuel Atlantic Zeneo							
	6.453	870 €	791 €	396 €	1187		nombre d'appareils 150L
	12.675	980 €	891 €	446 €	1337		nombre d'appareils 200L
							Coût global
							84029 € HT
Ballon ECS individuel Atlantic Lineo							
	6.678	569 €	517 €	265 €	782		nombre d'appareils 150L
	6.91	609 €	554 €	280 €	834		nombre d'appareils 200L
							Coût global
							53954 € HT
Préparateur ECS solaire individuel Viessmann Vitocell 100-W							
	6.678	2 200 €	2 000 €	500 €	2500		nombre d'appareils 200L
	6.91	2 750 €	2 500 €	600 €	3100		nombre d'appareils 300L
							Coût global
							185500 € HT
Chauffage à accumulation Atlantic Galapagos PI Connecté							
horizontal	750	543 €	494 €	372 €	0.66	0	0
horizontal	1000	583 €	530 €	399 €	0.53	0	0
horizontal	1250	670 €	609 €	459 €	0.49	0	0
horizontal	1500	726 €	660 €	497 €	0.44	0	0
horizontal	2000	880 €	800 €	603 €	0.40	75	105225 € HT
vertical	1000	692 €	621 €	521 €	0.69	0	0
vertical	1500	869 €	790 €	595 €	0.53	0	0
vertical	1800	1 047 €	952 €	717 €	0.53	0	0
bas	700	605 €	550 €	414 €	0.79	0	0
bas	1000	671 €	610 €	459 €	0.61	0	0
bas	1400	838 €	762 €	574 €	0.54	0	0
							105225 € HT

Capteurs solaires thermiques - Bât C1, C2 & C3					
	U	Qté	TVA	Prix Unitaire	Montant HT
Capteurs solaires thermiques	u	171		750 €	128 250 €
Supports & intégration	ens	1		3 600 €	3 600 €
RESEAU PRIMAIRE					19 650 €
Réseau dont calorifuge, purge équilibrage...	u	1		3 800 €	3 800 €
Pompe	u	1		1 700 €	1 700 €
groupes de sécurité - expansion	u	1		750 €	750 €
ballon solaire 1000l + échangeur noyé	u	3		2 800 €	8 400 €
Divers (aménagement local en attique)	ens	1		5 000 €	5 000 €
RESEAU SECONDAIRE					15 300 €
Réseau dont calorifuge, purge équilibrage...	ens	1		3 500 €	3 500 €
Vannes DANFOSS MTCV	ens	3		350 €	1 050 €
Finitions habillage réseaux	ens	1		3 500 €	3 500 €
Traitement de l'eau (electromagnétique)	ens	1		6 500 €	6 500 €
Pilotage résistance électrique des CE	ens	3		250 €	750 €
Regulation		1		3 200 €	3 200 €
Divers					3 350 €
Etudes - dossier administratif	ens	1		850 €	850 €
DOE - plans	ens	1		850 €	850 €
Mise en service essais et réglages	ens	1		850 €	850 €
Consuel	ens	1		800 €	800 €
Contrat de maintenance	ens	1			800 €
				Tot.	174 150 €
				TVA	34 830 €

Capteurs solaires photovoltaïques - Bât C1, C2 & C3					
	U	Qté	TVA	Prix Unitaire	Montant HT
Capteurs photovoltaïque	u	171		245 €	41 895 €
Supports & intégration	ens	1		7 500 €	7 500 €
Onduleurs					10 060 €
SOLAREEDGE SE 12,5K	u	1		3 800 €	3 800 €
Optimiseurs	u	56		60 €	3 360 €
Extension de garantie	ens	1		2 900 €	2 900 €
Câblages et cheminements					9 400 €
Cablage DC	ens	1		900 €	900 €
Cablage AC	ens	1		4 700 €	4 700 €
Cheminements	ens	1		1 100 €	1 100 €
Protection DC	ens	1		900 €	900 €
Protection AC	ens	1		900 €	900 €
Mise à la terre	ens	1		900 €	900 €
Monitoring		1		1 100 €	1 100 €
Divers					3 350 €
Etudes - dossier administratif	ens	1		850 €	850 €
DOE - plans	ens	1		850 €	850 €
Mise en service essais et réglages	ens	1		850 €	850 €
Consuel	ens	1		800 €	800 €
Contrat de maintenance	ens	1			600 €
				Tot.	73 905 €
				TVA	14 781 €

	Unités	Fenêtres S	Fenêtres M	Baies vitrées	Dépose + Pose	
		1,20 x 1,68m	2,40 x 1,68m	3,50 x 2,20m		
DV Les menuiseries françaises Virtuose	[€ HT]	700 €	750 €	1 000 €	300 €	PVC
TV SGG Climatop XN	[€ HT]	1 000 €	1 500 €	2 000 €	300 €	ALU
TV bois parietodynamique Ridoret EnR	[€ HT]	1 000 €	1 250 €	1 500 €	300 €	BOIS

	Unités	1,68 x 1,20m	2,26 x 1,20m	1,68 x 2,50m
		m ²		
surface		2.016	2.712	4.2
Nombre	#	159	72	58

	Prix [€ HT]	1,68 x 1,20m	2,26 x 1,20m	1,68 x 2,50m	Total [€ HT]	
Remplacement DV (15-25ans)	[€ HT]	159 000 €	75 600 €	75 400 €	310 000 €	PVC
Remplacement TV SGG (25-30ans)	[€ HT]	206 700 €	129 600 €	133 400 €	469 700 €	ALU
Remplacement TV bois (25-35ans)	[€ HT]	206 700 €	111 600 €	104 400 €	422 700 €	BOIS

	Epaisseur mm	Prix HT €/m ²	Pose HT €/m ²	Total HT €/m ²	€HT
Actions d'isolation thermique des murs extérieures					
ITE – PSE Knauf Therm ITEX Th38 SE FM+ ep 160mm	160	20 €	80 €	100 €	260 856 €
ITE – mousse résolique Weber Webertherm XM Ultra ep 140mm	140	70 €	80 €	150 €	391 284 €
ITE – laine de roche Rockwool Ecorock Duo ep 140mm	140	37 €	80 €	117 €	305 202 €
ITE – fibre de bois Pavatex Pavawall Smart ep 160mm	160	42 €	80 €	122 €	318 244 €
ITE – liège Weber Webertherm XM Natura ep 160mm	160	65 €	80 €	145 €	378 241 €
ITE - PSE Graphité Hirsch Cellomur Ultra ECA	130	20 €	80 €	100 €	260 856 €
ITE - Isolation paille de riz - AKACIA FBT PR	160	16 €	80 €	96 €	250 422 €
Actions d'isolation des plancher bas sur sous-sol et vide sanitaire					
Flocage en laine projetée Isover	120-140	60 €	40 €	100 €	122 000 €
PSE Knauf Therm ITEX Th38 SE EN ep 115mm	115	20 €	40 €	60 €	73 200 €
PSE Graphité Hirsch Graphipan 31 ECA	100	20 €	40 €	60 €	73 200 €
Actions d'isolation et d'étanchéité des toitures terrasses					
Aucun remplacement de l'isolation des toitures terrasses	-	-	-	-	-
PUR Soprema Efigreen Alu + ep 120mm	120	147 €	40 €	187 €	228 140 €
PUR Soprema Efigreen Duo + ep 100mm	100	136 €	40 €	176 €	214 720 €
PUR Soprema Efigreen Duo + ep 120mm	120	141 €	40 €	181 €	220 820 €
PUR Soprema Efigreen Duo + ep 140mm	120	141 €	40 €	181 €	220 820 €
PUR Soprema Efigreen Duo + ep 160mm	120	151 €	40 €	191 €	233 020 €
Fibre bois Steico étanche ep 180mm	120	136 €	40 €	176 €	214 720 €
Fibre bois Steico étanche ep 200mm	120	136 €	40 €	176 €	214 720 €
Coût total moyen					619 762 €

Résumé des surfaces à isoler	
Nom	Surface [m ²]
Façade Nord	755.0
Façade Sud	619.2
Façade Est	643.9
Façade Ouest	590.5
Total Façade	2608.6
Plancher bas sur sous-sol	1220
Toiture terrasse	1220

Bâtiment	Lgts	F1	F2	F3	F4	F5	SHAB	nb Salon
C1	24	0	1	12	11	0	1756	24
C2	24	0	1	12	11	0	1760	24
C3	19	4	7	0	0	8	1299	27
Tot	67	4	9	24	22	8	4815	75

Bâtiment	nb Chambre	nb Cuisine	nb SDB	nb WC	nb WC + SDB	nb Fenêtres S	nb Fenêtres N	nb Baies
C1	58	24	24	24	0	58	25	23
C2	58	24	24	24	0	58	25	23
C3	31	19	19	17	2	43	22	12
Tot	147	67	67	65	2	159	72	58

Projet InER

**INNOVATION ÉNERGÉTIQUE
POUR LA RÉNOVATION**

Un partenariat entre un bailleur social et un laboratoire de recherche

Une démarche scientifique

Une solution pour la rénovation énergétique

Table des matières

1. Genèse	5
Les enjeux environnementaux du secteur du bâtiment.....	5
Performances énergétiques et réglementation environnementale	6
Problématique des bâtiments fonctionnants à l'énergie électrique	7
Rétrospective de la rénovation énergétique en France	7
2. Partenariat.....	10
Porteur du projet : Immobilière Rhône-Alpes	10
Partenaires : CETHIL – INSA LYON	10
Objectifs	11
Bénéfices attendus du Projet InER.....	11
3. La démarche d'analyse multicritère	13
Focus – Instrumentation	13
La question du choix	13
L'analyse multicritère.....	14
Etapas clés de la méthodologie	17
Cas d'étude et d'expérimentation.....	18
Définition des scénarios potentiels de rénovation.....	21
Définitions et choix des critères	23
Affectation des pondérations.....	29
Méthodologie pour l'évaluation des performances	31
Paramètre spécifique à la méthode ELECTRE Tri.....	33
Algorithme d'exécution de la méthode ELECTRE Tri.....	36
Analyse du classement des scénarios et recommandation.....	37
4. La solution retenue et développée	40
Le programme de travaux retenu / réalisé	40
Valorisation des Certificats d'Economies d'Energie (CEE)	41
5. Autoconsommation collective : problématique, pilotage, optimisation et suivis.....	42
Périmètre de la solution de gestion et pilotage.....	42
Prestations en cours de développement et de mise en place.....	42
Analyse succincte des consommations électriques	43
La production électrique PV prévisionnelle	47
Spécifications fonctionnelles et techniques de la solution	50
6. Bénéfices attendus de la solution développée	58
7. Conclusion.....	59
8. Perspectives.....	61
Annexes.....	63

1. Genèse

Les enjeux environnementaux du secteur du bâtiment

En 2016, les émissions mondiales de CO₂ s'élevaient à 353 631 Méga tonnes, une augmentation de près de 59 % par rapport à 1990. Responsable de plus de 36% de ces émissions, le secteur du bâtiment doit subir une profonde mutation pour s'adapter aux enjeux environnementaux contemporains. Ces enjeux, lourdement rappelés à l'occasion des derniers rapports spéciaux du GIEC, alertent sur l'extrême urgence à contenir le réchauffement planétaire et ses conséquences par une diminution drastique des émissions de dioxyde de carbone.

Au regard de ce bilan alarmant, la transition énergétique est une clé dans la maîtrise des émissions de CO₂ et des consommations d'énergie. Au-delà de la dimension environnementale, cette transition énergétique doit permettre un progrès de l'ordre social par la lutte contre la précarité, le gain de confort et le soulagement des factures énergétiques. Hélène Peskine écrit à ce sujet « La transition énergétique ne peut s'entendre que si le progrès environnemental qu'elle génère [...] est porteur de progrès social. Elle est un projet mondial de solidarité ».

En France, chaque année, les constructions neuves ne représentent que 1% du parc immobilier. Alors, pour atteindre l'objectif que se fixe la France de disposer d'ici 2050 d'un parc de logement atteignant entièrement le niveau bâtiment basse consommation (BBC), la rénovation énergétique des logements est le principal levier d'action. La rénovation énergétique des logements est un processus complexe impliquant de nombreux acteurs, des objectifs variés, parfois dissonants mêlant intérêts environnementaux, sociaux et économiques qu'il est souvent difficile à concilier.

Le travail de recherche, effectué dans le cadre de ce rapport, s'inscrit dans ce contexte singulier et a pour dessein d'accompagner les acteurs de la rénovation énergétique dans l'élaboration d'une stratégie de rénovation par le biais d'un processus d'aide à la décision adapté. En tant que fil rouge, le projet d'appuiera sur un cas d'étude réel, la résidence du Plateau à Villefontaine : un ensemble de 3 bâtiments, regroupant 67 logements. Cette résidence fait actuellement l'objet d'un plan de rénovation énergétique enclenché par le bailleur social Immobilière Rhône-Alpes. Elle est également au cœur du projet InER, un projet visant à optimiser les choix en matière de rénovation énergétique sur des bâtiments tout électrique grâce à des méthodes d'analyse multicritère et de permettre l'autoconsommation collective.

Au même titre, ce projet de recherche vise également à élaborer une méthodologie d'aide à la décision par analyse multicritère, adaptée au cas d'étude de Villefontaine. Il s'appuie dans un premier temps sur une bibliographie riche permettant de positionner ce travail par rapport à l'état de l'art, et sur le développement détaillé de la méthode d'analyse multicritère retenue. Dans une seconde partie, plusieurs verrous techniques seront à lever par la mise en place de processus nouveaux. L'objectif étant d'aboutir à la matrice de décision qui permettra alors d'appliquer la méthode d'aide à la décision retenue. Enfin, un guide destiné aux acteurs de la rénovation énergétique souhaitant mettre en place une méthode d'aide à la décision a été développé dans le cadre de ce projet de recherche.

Le projet InER, détenteur de nombreuses informations relatives aux bâtiments existants et scénarios de rénovation, va permettre de nourrir ce travail et d'alimenter les algorithmes d'aide à la décision issus du projet de recherche. La méthodologie développée pour ce cas d'étude aura pour vocation d'être transposable à tout autre projet de rénovation énergétique en bâtiment d'habitation collectif.

L'approche usuelle pour les rénovations énergétiques des bâtiments consiste à d'abord limiter les déperditions énergétiques des ouvrages et d'ensuite améliorer les performances énergétiques des équipements.

Dans un premier temps, la limitation des déperditions est obtenue par l'isolation de l'enveloppe des bâtiments : isolation des façades, remplacement des menuiseries extérieures (fenêtres, portes-fenêtres,

portes d'entrée...) par des menuiseries moins déperditives. L'amélioration de l'étanchéité du bâtiment participe de cette limitation des déperditions. Le traitement des déperditions permet de diminuer les besoins énergétiques des bâtiments. Les équipements peuvent ainsi être calibrés sur ces nouveaux besoins diminués.

L'amélioration des performances énergétiques des équipements consiste à recourir à des équipements, pour l'essentiel de production et de diffusion de la chaleur mais également de ventilation, performants. C'est-à-dire que l'on recherche à mettre en œuvre des équipements qui consommeront le moins d'énergie pour un confort à minimum équivalent et souvent amélioré.

Performances énergétiques et réglementation environnementale

La réglementation thermique prend en considération la consommation d'énergie primaire (C_{EP}) et les émissions de gaz à effet de serres (GES) nécessaires aux différents usages du bâtiment.

L'énergie primaire désigne les sources d'énergies potentielles disponibles dans la nature (le bois, le gaz naturel, le soleil...) avant toute transformation. L'énergie finale correspond quant à elle à l'énergie livrée au consommateur pour répondre à ses besoins (avoir de l'électricité, chauffer sa maison...). Cette énergie finale atteint alors le dernier stade de la chaîne de transformation de l'énergie.

L'énergie finale est la quantité d'énergie consommée et facturée à son point d'utilisation. L'énergie primaire représente la quantité totale d'énergie nécessaire pour fournir la quantité d'énergie finale consommée par l'utilisateur, c'est-à-dire en rajoutant à cette énergie finale l'énergie nécessaire à sa production et à son transport, en intégrant les notions de rendement de production et les pertes.

Le Coefficient d'Énergie Primaire (C_{EP}) correspond à la consommation totale d'énergie primaire d'un bâtiment sur une année. C'est un indicateur qui permet d'améliorer le bilan énergétique et carbone des nouvelles constructions. Il s'agit d'ailleurs de l'un des points clés de la réglementation thermique RE2020. Elle est la seule manière de caractériser la quantité de ressources naturelles consommée et prélevée à la planète.

Des énergies comme le gaz, le pétrole, le bois sont des énergies primaires, car elles sont utilisables sans transformation. L'électricité n'est pas une énergie primaire : elle est obtenue par transformation de ressources naturelles dans des centrales de production avec un rendement moyen inférieur à 40% et doit être acheminée jusqu'aux lieux d'utilisation (d'où des pertes de transport).

En France, la réglementation impose l'utilisation d'un coefficient de conversion pour l'électricité entre énergie primaire et énergie finale qui est de 2,30 (Auparavant ce coefficient était fixé à 2,58). Autrement dit, plus de 60 % de l'énergie primaire est perdue lors de la production et le transport de l'énergie électrique. Ce coefficient est de 1 pour l'ensemble des autres énergies (en l'absence de transformation).

Ainsi pour une consommation d'énergie finale donnée sur un bâtiment d'habitation, selon la source d'énergie utilisée, la consommation d'énergie primaire pourra varier fortement et en particulier dans le cas de systèmes fonctionnant à l'électricité.

Le classement des performances énergétiques des bâtiments d'habitation est déterminé sur la base de la consommation d'énergie primaire et non sur la base de la consommation d'énergie finale (C_{EF}). Ainsi pour un même besoin d'énergie, dans les diagnostics réglementaires, l'utilisation de l'énergie électrique est fortement pénalisée.

Du fait des coefficients réglementaires de conversion d'énergie et de l'utilisation de l'énergie électrique pour le chauffage, ces résidences, même isolées correctement, se retrouvent souvent avec une étiquette énergétique défavorable (E, F ou G) lors de l'établissement des diagnostics réglementaires (Diagnostic de Performance Énergétique...).

Problématique des bâtiments fonctionnants à l'énergie électrique

Pour améliorer les étiquettes énergétiques de ce type de bâtiments, le respect de la réglementation implique souvent, en plus des actions de limitation des déperditions, de procéder à un changement d'énergie en remplaçant le chauffage électrique par un chauffage à combustion.

Ces solutions sont coûteuses et complexes à mettre en œuvre en site occupé. Elles nécessitent la mise en œuvre de nouveaux réseaux sur l'ensemble des bâtiments. Pour le chauffage, l'ensemble des pièces des logements sont touchées et à consommation et performances égales, elles produisent finalement plus de gaz à effet de serre.

Une part significative des logements d'Immobilier Rhône-Alpes sont équipés d'un système de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire électrique, individuel ou collectif. Du fait de l'utilisation importante de l'énergie électrique, ces logements, même isolés correctement, ont une étiquette énergétique défavorable, souvent E, F voire G et présentent parfois un niveau de confort insuffisant. Pour autant, leur bilan de gaz à effet de serre et les coûts pour les locataires ne sont pas défavorables.

Rétrospective de la rénovation énergétique en France

La rénovation énergétique est un domaine où la réglementation évolue constamment, au grès des gouvernements successifs et de l'intégration toujours plus forte des questions climatiques. Précipitée par les deux chocs pétroliers, elle s'attaquait en vérité à une question fondamentale : la dépendance de notre modèle économique à l'énergie. Depuis, elle n'a cessé de prendre de l'ampleur en s'ouvrant d'une part à d'autres secteurs que le logement, et d'autre part en élargissant progressivement ses objectifs.

L'effondrement du dollar américain en 1973 et la guerre naissante au Moyen-Orient provoquent un séisme sans précédent dans la jeune histoire de l'énergie : le premier choc pétrolier. On découvre que l'énergie peut devenir rare et donc chère. En découle une série de contremesures qui aboutissent en France à la création de l'Agence pour les économies d'énergie (AEE). Son objectif premier : réduire le besoin en pétrole dans les différents secteurs (industrie, transport, habitat, etc.), en s'attaquant à l'optimisation des consommations. La première réglementation thermique voit alors le jour au milieu des années soixante-dix. Elle établit de nouvelles normes d'isolation thermique et de réglage des appareils de chauffage dans les habitations. Le second choc pétrolier entraîne lui une réaction différente, davantage centrée sur une production d'énergie décarbonée et notamment renouvelable, avec en chef d'orchestre le tout nouveau Commissariat à l'Energie Solaire (COMES). La fusion de ces deux agences va donner naissance à l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (AFME), chargée de mettre en œuvre un programme de réduction de la consommation d'énergie, principalement dans le secteur de l'industrie, et qui deviendra quelques années plus tard l'ADEME que nous connaissons aujourd'hui. Viennent alors les premières réflexions sur les questions liées à la rénovation du bâtiment. Ces mesures d'incitation pécuniaires sont, dans un premier temps, destinées aux propriétaires de logements résidentiels et bâtiments tertiaires mais peuvent également prendre la forme d'un accompagnement aux travaux de rénovation.

Une première réponse intervient en 2005 avec la loi POPE, et l'introduction d'un dispositif singulier dans le paysage alors modeste des aides à la rénovation : les Certificats d'Economies d'Energie. Les CEE visent à inciter les vendeurs d'énergie à financer des travaux d'économies d'énergie chez le consommateur, qu'il soit un particulier, une entreprise ou un acteur public, sous contrôle des services de l'Etat. C'est une application détournée du principe du « pollueur payeur ». Le volume d'économies d'énergie que doivent financer les énergéticiens dits « obligés » dépend de leur volume de vente d'énergie, et l'enveloppe globale évoluera de manière exponentielle au fur et mesure des années, jusqu'à devenir en 2021 le 1er levier de financement de la rénovation des logements. Une petite révolution dans

le domaine des politiques publiques, avec l'émergence d'un dispositif hybride où l'Etat fixe les règles et contrôle, et où les acteurs privés financent et mettent en œuvre.

Quelques années après l'instauration de ce dispositif, la rénovation quitte le seul giron des agences gouvernementales pour faire son entrée dans l'organigramme des directions centrales : la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) émerge et dispose dans son portefeuille des politiques de maîtrise de la demande en énergie. L'énergie devient une préoccupation environnementale : la DGEC est rattachée au ministère de l'écologie et non plus à Bercy. En parallèle, l'éco-prêt à taux zéro dit « éco-PTZ » est mis en place par la loi finance de 2009 pour pallier le manque d'investissement des banques privées. Bercy estimait alors à 80 000 le nombre de logements qui pourraient être rénovés grâce à cette aide chaque année. En 2019, moins de 40 000 Eco-PTZ ont été mobilisés par les particuliers (moitié moins que ceux mobilisés pour l'accession à la propriété), principalement du fait d'un manque d'attractivité.

Changement de braquet, avec l'arrivée des Grenelle, qui met sur le devant de la scène la question des émissions carbone et la lutte contre l'effet de Serre. Avec les lois Grenelle I du 3 août 2009 et Grenelle II du 12 juillet 2010, la France se dote d'un plan de rénovation orienté vers la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment consomme en effet plus de 40% de l'énergie, et émet un quart des émissions nationales GES. L'objectif fixé par ces deux Grenelle de l'environnement est de diviser par 4 ces émissions d'ici 2050, de n'avoir que des bâtiments neufs à « énergie positive » en 2020 et surtout, de massifier la rénovation énergétique à raison de 500 000 rénovations lourdes par an.

Un plan mis à mal par une crise mondiale qui se déclenche dès 2007. Elle fragilise les banques, les Etats mais aussi la situation des ménages et l'immobilier. Les années 2010 marquent donc sans surprise une mobilisation des pouvoirs publics en faveur de la lutte contre la précarité énergétique en France. L'Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (anciennement FNAH et aujourd'hui ANAH), créé en 1945 pour faire face à la crise du logement de l'après-guerre, s'empare de la question émergente de la précarité énergétique dès 2009. Le Grenelle II de l'environnement, dans son article 11, en pose une première définition officielle : « Est en situation de précarité énergétique [...] une personne qui éprouve dans son logement des difficultés particulières à disposer de la fourniture d'énergie nécessaire à la satisfaction de ses besoins élémentaires en raison de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat. ». Le message est clair : sortir de la précarité énergétique passe par la réalisation de travaux de rénovation. Ainsi, le 21 mars 2013 est lancé le Plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH) qui fixe les objectifs annuels attendus en matière de rénovation massive du parc des bâtiments existants, avec en priorité, la lutte contre la précarité énergétique (pour les années 2014 et 2017, 38000 et 50000 logements privés occupés par des personnes en situation de précarité). L'ADEME se charge du volet informatif, afin de simplifier les différentes démarches pour les particuliers, et l'ANAH propose un accompagnement de plus en plus orienté vers les ménages modestes. Par la suite, la loi finance de 2014 va instaurer la TVA à taux réduit à 5,5% pour les travaux de rénovation énergétique ; à l'image de ce qui est appliqué sur certains produits de nécessité.

La multiplication des aides complexifie cependant le parcours, qui en plus de se repérer dans les différents dispositifs nationaux et locaux, nécessite également de trouver des professionnels dignes de confiance : c'est pourquoi en 2011 est introduit le label RGE, qui devient bien souvent une condition d'obtention des aides à la rénovation. Ce label, conçu pour filtrer la profession pour ne garder que les artisans formés aux dimensions énergétiques et environnementales, sera décrié au fil du temps, considéré comme trop simple à obtenir et à conserver. Des travaux sont d'ailleurs en cours en vue de le « fiabiliser ».

Dans la même lignée est créé en 2017 le CITE (Crédit d'Impôt à la Transition Énergétique). Ce nouveau crédit permet à ceux qui effectuent des travaux de rénovation, de bénéficier d'une réduction sur leurs impôts, variable selon les travaux entrepris. Mais il présente un défaut majeur : on ne le perçoit – par déduction – qu'à la fin de l'année. C'est pourquoi il sera remplacé en 2020 par MaPrimeRénov', qui sera accessible à tous, sans condition de revenus dès le 1er janvier 2021. Plus attractive, cette aide est

surtout versée directement après le dépôt du dossier, ce qui permet de limiter l'avance budgétaire. En parallèle le dispositif FAIRE, mis en place en 2019, a pour but d'informer et d'accompagner au mieux les particuliers grâce à des conseillers indépendants. Du côté de l'Etat, l'accent est mis sur différentes opérations, notamment via les CEE, qui engendrent une multiplication des gestes de rénovation. Mais cette politique de coup-à-coup et la forte croissance des objectifs en un temps limité entraîne dans son sillage une vague d'escrocs, qui jettent le discrédit sur une filière pourtant essentielle. Les contrôles se renforcent, tant du côté des acteurs privés que publics, le marché des CEE se vide progressivement des acteurs les moins scrupuleux mais le mal est fait : l'Etat concentrera désormais son attention sur la fraude et les pratiques commerciales abusives. Ironie du sort pour un secteur pourtant considéré comme socialement et écologiquement utile. Ce sont plus globalement les travaux subventionnés dits à 1 € et la question du reste à charge zéro qui reviennent semer le doute au plus haut niveau de l'Etat : la quasi-gratuité des travaux engendre-t-elle des problèmes de qualité ou ceux-ci trouvent-ils leur origine ailleurs ? Rend-elle le consommateur moins vigilant ? Ou n'est-elle pas une nécessité pour permettre aux plus modestes de rénover leur logement ?

A ce débat s'en ajoute un autre, plus technique. L'objectif « neutralité carbone » désormais fixé par l'Europe entraîne un glissement subtil : l'efficacité énergétique doit avant tout viser les consommations d'énergie carbonée, ce qui semble fort logique. Mais la question du carbone, dans un pays au mix énergétique particulier comme celui de la France, importe un débat propre à l'autre versant de la transition énergétique : la production d'énergie. Privilégier l'efficacité « carbone », c'est privilégier une énergie plutôt qu'une autre. Mais lesquelles ? L'électricité nucléaire ? Le gaz ? Selon quels critères ? Peut-on baisser sa consommation carbone sans pour autant baisser sa consommation d'énergie ? Le débat en cours sur la 5ème période des CEE devrait éclairer le devenir des politiques de rénovation en la matière. En attendant, le plan de relance présenté par le gouvernement français le 3 septembre 2020 confirme le nouveau statut des politiques de rénovation énergétique, autrefois axées sur l'économie et l'indépendance énergétique, et désormais recentrées sur les questions sociales et climatiques.

La multiplication des gestes de rénovation, sans forcément traiter le bâtiment dans son entièreté, laisse par ailleurs un chantier inachevé : celui de la rénovation globale, qui consiste à réaliser en une seule fois la totalité des travaux nécessaires à un logement dans un ordre logique ou mieux encore tout en même temps. Générant des économies importantes mais lourdes à financer, la rénovation globale permet en moyenne de diviser par 3 ou 4 la facture de chauffage. Les tous récents Coup de pouce CEE Rénovation globale et la nouvelle mouture de MaPrimeRénov' semblent aller en ce sens. Cependant, malgré l'ambition, la tâche reste ardue.

L'avenir nous dira si la France est enfin sur les rails de la rénovation du logement au standard basse consommation. Sinon, les mesures d'obligation mises en place dans les prochaines années pourraient souffler un vent de panique : diagnostic de performance énergétique obligatoire pour 2022, obligation de rénover les passoires thermiques pour 2030 et puis du parc global privé d'ici 2040. Incitation et obligation devront certainement marcher de concert pour éviter un sentiment d'injustice ou d'écologie « punitive », écueils dans lesquels sont tombées d'autres mesures, à commencer par la fameuse taxe carbone.

2. Partenariat

Afin de sortir de cette logique de recours au chauffage à combustion, **Immobilière Rhône-Alpes** (SA d'HLM) s'est associé avec le **CETHIL** (laboratoire de recherche rattaché à l'INSA de Lyon) dans un partenariat qui ambitionne de rechercher, étudier, mettre en œuvre/expérimenter et évaluer des solutions de rénovation pouvant être facilement déployées techniquement et économiquement sur toutes les installations existantes voire être mises en œuvre en rénovation d'autres types de système de chauffage.

Ce partenariat s'est formalisé par l'encadrement d'une thèse CIFRE intitulée : « Optimisation dans la rénovation énergétique des bâtiments d'habitation collectif ».

Porteur du projet : Immobilière Rhône-Alpes

Immobilière Rhône-Alpes est une société du groupe 3F (Groupe Action Logement). Elle gère un patrimoine de près de 19 000 logements sociaux sur les 250 000 que gère l'ensemble des sociétés du groupe 3F.

Immobilière Rhône-Alpes se positionne au deuxième rang des Entreprises Sociales pour l'Habitat (ESH) de la région Auvergne-Rhône-Alpes et connaît une dynamique soutenue de développement et de rénovation de son patrimoine.

Immobilière Rhône-Alpes s'inscrit pleinement dans les objectifs des pouvoirs publics de rénovation énergétique des bâtiments et de transition énergétique. Engagée depuis plusieurs années dans la recherche de solutions adaptées aux usages, moyens et attentes de ses locataires, Immobilière Rhône-Alpes souhaite poursuivre la mise en œuvre de solutions répondant le mieux à ses objectifs économiques, sociétaux et environnementaux.

Une part significative des logements d'Immobilière Rhône-Alpes sont équipés d'un système de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire électrique, individuel ou collectif.

Du fait de l'utilisation importante de l'énergie électrique, ces logements, même isolés correctement, ont une étiquette énergétique défavorable, souvent E, F voire G et présentent parfois un niveau de confort insuffisant. Pour autant, leur bilan de gaz à effet de serre et les coûts pour les locataires ne sont pas défavorables.

Partenaires : CETHIL – INSA LYON

Le Centre de Thermique et d'Énergétique (CETHIL) est une unité mixte de recherche (UMR 5008) de l'INSA Lyon, du CNRS et de l'Université Claude-Bernard Lyon 1. Les applications des travaux menés au CETHIL sont variées, dans des secteurs tels que l'aéronautique et le spatial, l'automobile, l'électronique, l'habitat, le nucléaire et les énergies renouvelables. Elles sont souvent rendues nécessaires par les besoins de la transition énergétique.

Les recherches du laboratoire couvrent les domaines de la thermique et de son application à divers systèmes énergétiques. Le CETHIL est un des seuls laboratoires au niveau national et international qui traite en continuum une gamme aussi étendue d'échelles de longueurs et de températures : de la nanostructure au bâtiment, de l'hélium liquide à la combustion en passant par le coulis de glace.

Objectifs

Les objectifs de ce partenariat sont de rechercher des solutions qui, au-delà d'être techniquement et économiquement réalisables, devront répondre à plusieurs objectifs :

- Amélioration de l'étiquette énergétique des bâtiments,
- Réduction/optimisation des consommations d'énergie, et des émissions de GES,
- Réduction/optimisation/maîtrise des coûts d'usage,
- Coût d'investissement maîtrisé,
- Production et utilisation locale d'énergie renouvelable,
- Stockage local « écologique » de l'électricité produite localement (limiter l'usage de batteries),
- Optimisation de l'utilisation de l'électricité produite et stockée localement,
- Améliorer et optimiser le confort,
- Améliorer et optimiser la gestion des systèmes (privilégier les systèmes autonomes),
- Permettre aux locataires un suivi et un pilotage si souhaité,
- Ne nécessiter que très peu voire aucun accompagnement des locataires à leur bon usage,
- Optimiser voire supprimer la gestion et les coûts de maintenance et d'entretien,
- Pouvoir être mis en œuvre en site occupé,
- Pouvoir être reproductibles pour être déployées sur d'autres patrimoines.

La recherche de solutions se porte également sur les thématiques suivantes :

- Production locale d'électricité par système photovoltaïque,
- Optimisation de l'autoconsommation par le stockage thermique (dans la structure du bâtiment, dans les ballons d'eau chaude, dans des accumulateurs inertiels...) et par la gestion des consommations, des sources d'énergie et des usages.

Chaque solution étudiée doit être comparée à des solutions utilisant d'autres sources d'énergie (gaz, réseaux thermiques, ...), d'autres moyens d'utilisation ou de stockage de l'électricité (PAC, batteries, ...). Cette comparaison devra être réalisée sur tous les objectifs.

Les conditions de leur mise en œuvre et de leur efficacité devront être précisément définies pour envisager leur déploiement sur d'autres sites d'habitation.

Bénéfices attendus du Projet InER

Le projet InER ambitionne :

- De réduire et améliorer la maîtrise des charges de ses locataires,
- De contribuer à réduire globalement les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre,
- De développer des solutions de production renouvelable locale, en autoconsommation, avec stockage, pouvant se rapprocher de l'autonomie énergétique,
- De développer des solutions de rénovation/amélioration énergétique, avec conservation de l'énergie électrique, reproductibles, pour ses résidences en chauffage électrique,
- De contribuer à l'amélioration du confort de ses locataires,
- De développer des solutions optimisant la gestion/maintenance.

Le Projet ambitionne donc de trouver une ou des solutions reproductibles de rénovation des installations existantes de chauffage électrique collectif et individuel. Déployés sur différents projets de réhabilitation, ces solutions permettraient de conserver l'énergie électrique pour le chauffage, de développer l'utilisation et le stockage de l'énergie renouvelable produite localement, tout en améliorant l'étiquette énergétique des bâtiments. Enfin ces solutions devront privilégier un mode de fonctionnement

autonome ne nécessitant pas l'interventions des locataires tout en améliorant leur confort et réduisant leurs charges.

La reproductibilité de la ou des solutions développées devra pouvoir s'appliquer sur le patrimoine d'Immobilière Rhône-Alpes et plus largement sur le patrimoine de sociétés ayant des enjeux similaires.

3. La démarche d'analyse multicritère

Focus – Instrumentation

La première étape du projet InER a été la mise en place d'une instrumentation in situ des logements concernés par les opérations de rénovations. Cette instrumentation a pour premier objectif de mesurer avec précision les consommations électriques collectives et individuelles des bâtiments. Un second objectif est de relever les températures et humidité relative dans différentes pièces et de mettre en place des détecteurs d'ouverture/fermeture des portes et fenêtres donnant sur l'extérieur. Un intérêt pour les travaux futurs est également de mesurer la consommation d'eau chaude sanitaire afin de mieux cerner le comportement des usagés. Enfin les dernières mesures concernent les paramètres météorologiques avec une mesure d'humidité et de température à l'extérieures des bâtiments ainsi qu'une mesure de l'ensoleillement.

Voir annexe « Instrumentation » pour plus de détail.

La question du choix

Le secteur du bâtiment est aujourd'hui responsable d'un tiers de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂, une valeur qui selon le scénario normal de l'IEA devrait augmenter de 50% d'ici 2050. Confrontés à cette situation, nombreux sont les pays à mettre en place des mesures afin d'atteindre des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, des mesures qui ne peuvent se contenter d'être appliquées aux constructions neuves mais qui doivent également se généraliser aux bâtiments existants. La solution est alors de réaliser des actions de rénovation énergétique à la fois sur l'enveloppe des bâtiments et sur leurs équipements. Les alternatives de rénovation sont multiples et diversifiées : amélioration de l'isolation du bâti, réduction par diverses mesures de la charge thermique de chauffage et/ou de climatisation, ajout de moyen de production d'énergie renouvelable. Mais parmi les nombreuses solutions de rénovation énergétique laquelle sélectionner ?

De fait, le décisionnaire est confronté à un véritable défi pour répondre à cette question aux objectifs et critères multiples. Sélectionner l'alternative idéale revient à prendre en compte les aspects économique, technique, environnemental et, peu mentionné dans la littérature, l'aspect social. Autant d'aspects qui vont entrer en contradiction lors du processus de sélection. Des méthodes avec un processus clair et défini sont nécessaires.

C'est là que les méthodes d'aide à la décision interviennent pour supporter le décisionnaire dans son choix. Ce projet de recherche se focalisera plus particulièrement sur les méthodes d'analyse à critères multiples (Multiple Criteria Decision Analysis) qui permettent de prendre explicitement en compte la complexité de la prise de décision humaine, la pluralité des points de vue des acteurs, et les contradictions naturelles entre les critères (ex : coût et qualité). Le principe général de l'analyse multicritère (AMC) est simple, cependant il existe un panel de méthodes et d'approches diverses.

Cette partie du rapport porte sur l'établissement d'une méthodologie d'analyse multicritère pour aider et accompagner les acteurs de la rénovation énergétique à faire des choix lors de projets de rénovation/réhabilitation énergétique. Plus particulièrement, ce projet se base sur un cas d'étude concret, le projet du bailleur social Immobilière Rhône-Alpes de rénover la résidence du Plateau à Villefontaine dans l'Ain.

Le Projet InER, objet d'étude du présent rapport, s'inscrit dans une démarche d'innovation énergétique au sein du secteur de la rénovation des bâtiments d'habitation collectifs chauffés par l'énergie électrique. Son principal enjeu est de conserver l'énergie électrique pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Un second enjeu consiste à s'inscrire et initier un processus d'autoconsommation énergétique

collective en produisant localement une énergie renouvelable et en la stockant de manière à contrôler et optimiser le surplus de production. Enfin le troisième enjeu consiste à mettre en place une méthodologie d'aide à la décision afin de comparer des scénarios de rénovation énergétique parmi un panel de scénarios envisageable, viables et réalistes, autant d'un point de vue technique et économique que social et environnemental.

Face à la complexité du projet et à la pluralité des enjeux qui le structurent, l'analyse multicritère est être une réponse adaptée et à la hauteur du problème posé. Il a donc été décidé de bâtir un protocole d'aide à la décision basé sur l'analyse multicritère et la méthode ELECTRE TRI et dont le cas d'étude de la résidence « Le Plateau » à Villefontaine serai le terrain d'expérimentation et de développement pour cette nouvelle méthodologie.

L'analyse multicritère

L'Analyse Multicritère (AMC) est un outil d'aide à la décision utilisé pour soutenir le décideur lors d'un choix entre plusieurs alternatives. Cette analyse comprend de nombreuses méthodes qui sont cohérentes avec la manière dont le cerveau humain prend des décisions. Les méthodes d'AMC sont nombreuses mais possèdent certains principes communs de base très simples : la définition d'un jeu d'actions/alternatives/solutions envisagées pour répondre à la problématique posée, la définition d'au moins deux critères distincts pour lesquelles chaque action est évaluée, et enfin un décideur. Ce processus de décision est adapté à la complexité des thématiques de l'énergie car il permet de traiter les interactions entre des acteurs multiples (investisseurs publics, investisseurs privés, utilisateurs, ...) sur divers aspects et impacts (protection de l'environnement, atouts du territoire, économie, préservation de l'architecture, ...).

La rénovation énergétique du parc immobilier est un challenge à multiples entrées. Les parties prenantes de ce nouvel enjeu font face à un processus de décision alambiqué, aux objectifs pluriels devant conjuguer aspect économique, impact social et évaluation environnementale. A cela s'ajoute la singularité de chaque variable étudiée, et la nature de leur évaluation. Comment comparer une consommation énergétique à des critères plus qualitatifs tels que le confort visuel ou l'acceptation social ? En ces termes, l'identification du meilleur scénario de rénovation est un véritable challenge technique. Et, plus la palette des critères de décision est importante, plus la solution choisie sera satisfaisante mais plus la méthodologie décisionnelle sera compliquée.

L'analyse des scénarii de rénovation énergétique requiert donc des méthodes d'analyse multicritère afin d'accompagner les décideurs dans leur plan d'action. Ces méthodes permettent de comparer et/ou classer différents scénarii selon des critères donnés. L'AMC apparaît donc être un outil indispensable pour les acteurs de la rénovation énergétique dans la mesure où elle autorise une perception globale des enjeux ainsi qu'une analyse intégrale d'un problème aux multiples entrées.

Que peut-on attendre d'une analyse multicritère ? L'AMC peut être analysée comme une méthode d'aide à la décision permettant d'assister des parties prenantes dans un processus de décision complexe. Elle permet de clarifier des décisions, ou de recommander des solutions au regard des enjeux décrits par les décideurs. Ainsi, l'AMC ne fait pas loi car le décideur est libre de s'en affranchir ou de s'y référer. Dans cette mesure, on peut attendre de l'AMC :

- D'éclairer des problèmes complexes, en particulier en identifiant les solutions possibles, leurs conséquences et les enjeux du problème
- De structurer le processus de décision en construisant une méthodologie précise prenant en compte la globalité des enjeux du problème
- D'améliorer la collaboration entre les différentes parties-prenantes
- De légitimer la décision finale

Différentes méthodes

Traditionnellement, les analyses économiques telle que l'approche Coûts-Bénéfices sont largement répandues lors de la prise de décision dans le secteur de l'investissement public et privé. Cependant les limites de cette approche sont multiples et tiennent surtout de l'incapacité de cette approche à prendre en compte l'intégralité de la complexité du problème ou encore l'avis des différentes parties prenantes. Dans cet esprit, les méthodes d'analyse multicritère sont de plus en plus utilisées car elles peuvent prendre en compte l'aspect économique mais également des critères tangibles et intangibles exprimés quantitativement ou qualitativement. Ainsi, les AMC sont tout particulièrement adaptées aux décisions de rénovation énergétique du fait de leur complexité car cette approche flexible permet de faciliter le dialogue entre décisionnaire, analyste, et scientifique ce qui explique leur popularité grandissante.

Diverses méthodes d'AMC existent pour soutenir la prise de décision, elle se différencient par leur typologie, la logique de leur processus, leur facilité d'utilisation, leur capacité à prendre en compte différents points de vue et à empêcher ou pas la compensation des critères, ... Cet article se propose d'étudier les principales méthodes pour l'analyse multicritère afin de choisir celle qui sera la plus adaptée dans le cadre du projet InER. Cette méthode sera par la suite appliquée au cas d'étude de Villefontaine.

Michel GRABISCH, Professeur des universités à Paris 1 Panthéon-Sorbonne, propose de diviser l'ensemble des méthodes d'AMC selon deux approches distinctes :

- Les méthodes de type « Agréger-Comparer » ou méthodes d'agrégation (Figure 1).
- Les méthodes « Comparer-Agréger » ou méthodes de sur-classement (Figure 2).

Les premières consistent à construire un critère unique de synthèse à partir de l'ensemble des critères. Une alternative évaluée selon n critères est alors réduite en une seule valeur qui est équivalente à une évaluation de synthèse. Par la suite les actions sont comparées entre elles selon cette évaluation globale. Pour leur part, les méthodes de sur-classement s'affranchissent des limites qu'impliquent les méthodes d'agrégation pour proposer une analyse plus fine et plus cohérente avec le processus humain de prise de décision. Ces méthodes comparent dans un premier temps les alternatives sur chacun des n critères, puis agrègent les conclusions tirées de chacun des critères. Les alternatives vont être comparées les unes par rapport aux autres ou par rapport à des alternatives de référence afin de les classer sans pour autant les résumer à une valeur unique.

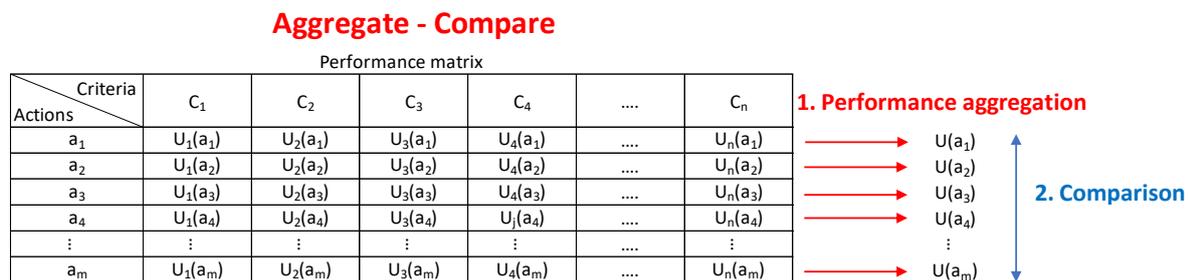


Figure 1 : Schématisation graphique du principe de la méthode « Agréger-Comparer »

Compare - Aggregate

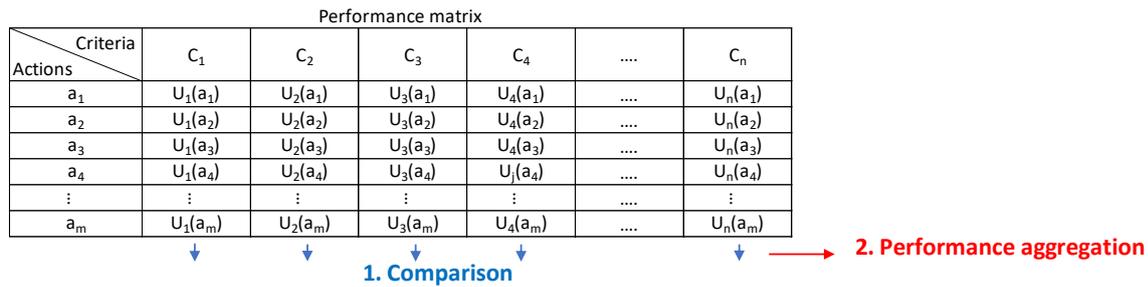


Figure 2 : Schématisation graphique du principe de la méthode « Comparer-Agréger »

La méthode retenue pour l'étude

Dans le cadre du projet InER nous avons souhaité évaluer différents scénarios de rénovation énergétique pour définir quelles solutions sont les plus pertinentes à mettre en œuvre. Ce type de décision nécessite la prise en compte de critères très variés, autant qualitatifs que quantitatifs, tels que des critères économiques, environnementaux, sociaux, techniques, ... Dans cette optique les méthodes d'agrégation qui utilisent uniquement des valeurs numériques et qui permettent le phénomène de compensation ne sont pas optimales pour résoudre un problème où les critères entreraient forcément en contradiction (les critères de coût s'opposent par exemple facilement à ceux portés sur l'environnement, de même que des aspects environnementaux peuvent diminuer le confort des logements et poser des problèmes sur le plan social). A cela s'ajoute la volonté, lors d'un projet de rénovation énergétique de mettre en œuvre la meilleure solution possible mais également une solution qui est performante. C'est pourquoi la méthode ELECTRE TRI qui affecte chaque action à une catégorie est particulièrement bien adaptée à ce type de décision. En effet, définie par des profils de référence, la catégorie dans laquelle est classée une action informe le décideur sur sa performance. Par ailleurs, les solutions de rénovation pouvant être très nombreuses le choix de la méthode ELECTRE TRI est cohérent car il minimise le nombre de comparaisons 2 à 2 des actions par rapport aux autres méthodes de sur-classement.

Une analyse plus approfondie de la méthode ELECTRE TRI met en lumière la division en deux versions distinctes. La méthode ELECTRE TRI classique basée sur des profils de référence limites qui servent à borner les catégories dans lesquelles seront classés les scénarios potentiels. Une amélioration de la méthode classique a conduit à l'élaboration en 2008 d'une méthode ELECTRE TRI-C qui pour sa part définit une catégorie de classement par une action centrale de référence. Plusieurs améliorations/adaptations plus ou moins mineures ont été apportées par la suite.

Le choix d'une méthode plutôt qu'une autre va dépendre de la capacité des parties prenantes, des analystes et des experts à coconstruire de manière interactive et itérative des profils de référence. ELECTRE TRI-B sera favorisée pour sa simplicité s'il est possible de définir des profils limites, mais dans le cas contraire ELECTRE TRI-C sera utilisée.

La partie bibliographique qui a précédé a permis de faire un état de l'art visant à analyser les particularités de l'analyse multicritère et ses différentes méthodes. Parmi ces dernières, la méthode ELECTRE TRI-B a été retenue comme la plus adaptée aux objectifs du cas d'étude pour les raisons expliquées à nouveau ci-après. Cette première conclusion est l'hypothèse de départ de ce rapport. De la même manière, à la suite de l'étude bibliographique, la seconde hypothèse retenue est l'utilisation de la méthode de pondération SRF. La mise en œuvre de cette méthode de pondération sera détaillée dans le présent rapport, ainsi que toute la chronologie de la méthode ELECTRE TRI.

La méthode d'analyse multicritère sélectionnée doit répondre aux objectifs du projet de rénovation énergétique de la résidence du Plateau à Villefontaine. Ainsi, ELECTRE TRI-B, en tant que méthode de sur-classement, a été retenue car elle présente quatre particularités qui en font la méthode la plus adaptée.

Hypothèse 1 - Méthode d'analyse multicritère retenue : ELECTRE TRI- B

Première particularité est l'introduction d'un seuil de véto qui permet d'éviter le phénomène indésirable de compensation d'une mauvaise performance sur un critère par un critère qui en aurait une meilleure (et ainsi éliminer des solutions présentant des performances inacceptables dans un certain domaine). Elle optimise les comparaisons et allège le processus par rapport aux autres méthodes ELECTRE, en comparant les scénarios à un nombre restreint de profils de référence, plutôt que tous les scénarios deux à deux. Cela diminue fortement le nombre de comparaisons. Troisièmement, la méthode ELECTRE TRI n'ordonne pas les solutions de la meilleure à la moins bonne mais les classe en catégories de performance, hiérarchisant ainsi les actions par groupe. Enfin, l'utilisation de profils de référence et la répartition des scénarios en catégories communique une information sur la performance générale des différentes alternatives. En effet, pour sélectionner un scénario de rénovation énergétique ce point est essentiel, ce dernier ne doit pas seulement être le meilleur des scénarios envisagés mais doit également présenter une bonne performance globale et non relative.

Hypothèse 2 - Méthode pour la pondération des critères : SRF

Dans cette méthode d'analyse multicritère où le nombre de critères peut être important, il convient d'adopter un protocole de pondération des critères approprié. Il faut que la charge décisionnelle soit la plus allégée possible, aussi la méthode de pondération SRF semble répondre à ces exigences. Simple à mettre en œuvre et intelligible pour les décideurs, SRF est la méthode de pondération retenue pour ce projet.

Etapes clés de la méthodologie

Pour utiliser la méthode ELECTRE Tri pour la sélection d'un programme de rénovation de bâtiments résidentiels collectifs, nous proposons la méthodologie suivante.

Étape 1 - Définition de scénarios de rénovation réalisables

La méthode proposée ici consiste à identifier des actions élémentaires de rénovation permettant d'agir sur des composants ou des systèmes spécifiques. Les actions de rénovation élémentaires sont des actions qui modifient un composant ou un système spécifique pour améliorer ses performances. Ces actions élémentaires peuvent agir par exemple sur le système de chauffage, l'isolation thermique par l'extérieur, le remplacement des fenêtres ou le choix d'un système de production d'eau chaude sanitaire (ECS). L'objectif est alors de construire des scénarios de rénovation globaux pertinents à partir de combinaisons cohérentes de ces actions élémentaires de rénovation pouvant être mises en œuvre dans un programme de rénovation.

Étape 2 - Définition et pondération des critères d'évaluation

Pour définir les critères d'évaluation, il est nécessaire de réunir les décideurs ainsi que toutes les parties prenantes. L'objectif est d'identifier et de décrire précisément les critères qui permettront une évaluation objective des différents scénarios par rapport aux objectifs du projet. Pour cette méthodologie, il a été choisi de regrouper les critères en familles pour permettre une meilleure analyse du problème mais aussi pour faciliter la détermination des poids.

Étape 3 - Pondération des critères

Pour évaluer les scénarios de rénovation au regard des besoins du décideur, il est alors nécessaire de pondérer les différents critères. Pour cela, nous utilisons la méthode de pondération SRF, qui est parfaitement adaptée à notre problème. Celle-ci sera présentée par la suite.

Étape 4 - Évaluation des performances

Il consiste à évaluer la performance de chaque scénario global de rénovation au regard des critères définis en s'appuyant sur les compétences et l'expertise des acteurs, partenaires et collaborateurs. Avec la méthode ELECTRE-Tri, l'évaluation peut être quantitative et basée sur des données mesurables ou elle peut être qualitative et basée sur l'appréciation de spécialistes. Il peut aussi être absolu et construit indépendamment des autres scénarios ou relatif et basé sur une échelle spécifiquement formalisée.

Étape 5 - Définition des paramètres de la méthode

Afin de comparer les différents scénarios avec la méthode ELECTRE-Tri, il est nécessaire de définir certains paramètres. Il s'agit des scénarios de référence caractéristiques, des seuils de tolérance et du seuil de crédibilité. Plusieurs façons de définir ces paramètres sont présentées dans la littérature. Nous proposons ici une nouvelle méthode basée sur une approche statistique.

Étape 6 - Recommandation

La dernière étape consiste à utiliser la méthode d'analyse multicritère choisie pour comparer et hiérarchiser les scénarios évalués et ainsi identifier ceux qui répondent le mieux aux objectifs définis par les décideurs. Il s'agit alors d'aider à faire un choix en préconisant les solutions les mieux adaptées au problème défini.

Cas d'étude et d'expérimentation

Les différentes étapes de la méthodologie proposée seront exemplifiées dans le cas d'un projet de réhabilitation d'un logement social collectif de soixante-sept appartements. Il s'agit d'un ensemble immobilier composé de trois immeubles mitoyens construits en 1973, avec des appartements du 1 au 5 pièces sur une surface habitable totale de 4815 m² (Figure 3, Figure 4 et Figure 5).



Figure 3 : Vue générale de la résidence servant à illustrer la méthodologie

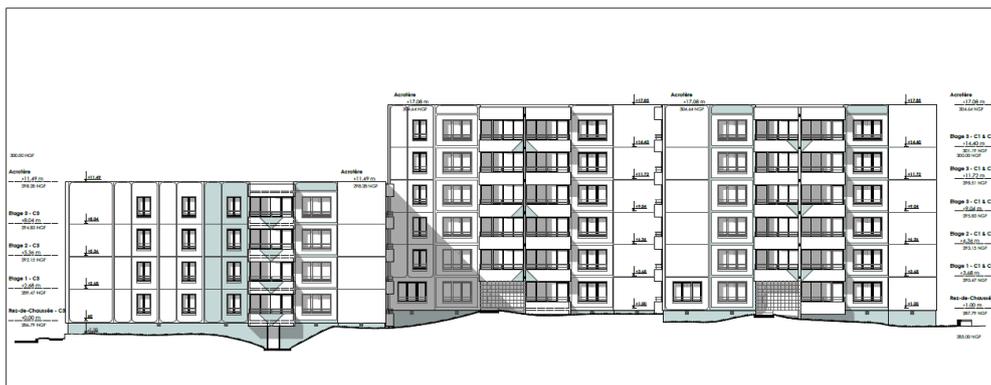


Figure 4 : Vue côté Est de la résidence



Figure 5 : Vue de dessus de la résidence

Un diagnostic thermique réalisé par un bureau d'études indépendant a permis de déterminer la consommation d'énergie primaire du logement en appliquant une méthode de calcul réglementaire (Tableau 1) et de catégoriser le bâtiment vis-à-vis des étiquettes énergie et émission de gaz à effet de serre conventionnel (Tableau 2). Ce diagnostic a également permis de déterminer la consommation énergétique par poste et d'identifier des leviers d'action potentiels pour améliorer l'étiquette énergétique.

Tableau 1 : Synthèse du calcul thermique réglementaire

Bâtiment	SHON [m ²]	Consommation d'énergie primaire [kWh/m ² . yr]	Répartition des consommations d'énergie primaire par usage [kWh/m ² . yr]			
			Chauffage	ECS	Eclairage	VMC
B1	2107	323	240	67	6	10
B2	2112	326	243	67	6	10
B3	1559	365	280	69	6	10

Tableau 2 : Etiquette réglementaire énergie et gaz à effet de serre

Bâtiment	Consommation d'énergie primaire [kWh/m ² .yr]	Émission de GES [kgeq _{co2} /m ² K]
B1	323 231 to 330 E	18 11 to 20 C
B2	326 231 to 330 E	18 11 to 20 C
B3	365 331 to 365 F	20 11 to 20 C

Le diagnostic thermique réalisé sur la résidence a également mis en évidence les déficiences de l'enveloppe des trois bâtiments. Le coefficient global de transfert de chaleur, H , a été estimé et comparé à un coefficient H_{max} . La comparaison montre clairement que les bâtiments peuvent être qualifiés de mal isolés (Tableau 3).

Tableau 3 : Coefficients thermiques globaux H

Bâtiment	H_{max} [W/m ² K]	H [W/m ² K]	variations
B1	1.00	1.25	-25 %
B2	0.92	1.19	-29 %
B3	0.86	1.15	-34 %

Ce premier diagnostic a identifié la répartition globale des déperditions thermiques de la résidence (moyenne des trois bâtiments) (Figure 6).

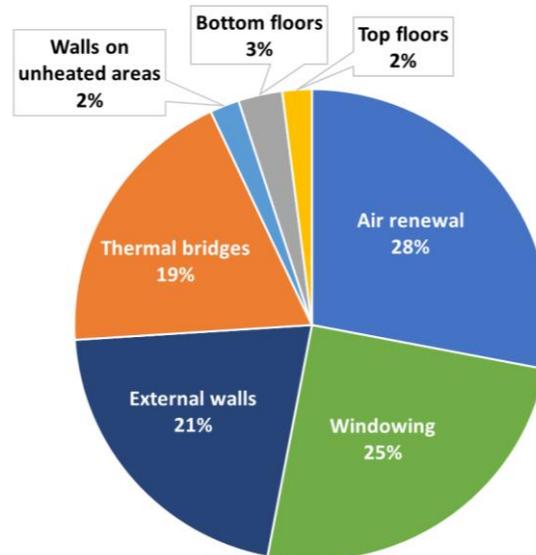


Figure 6 : Répartition des pertes de chaleur par type

Il apparaît, en premier lieu, que le renouvellement d'air et les fenêtres (respectivement 28 % et 25 % des pertes) sont les postes les plus importants. En effet, l'enveloppe du bâtiment est actuellement composée de fenêtres bois en simple vitrage ancienne génération et le système de ventilation est de type simple flux avec des bouches d'extraction autorégulées situées dans les salles de bains.

Les murs extérieurs et les ponts thermiques (respectivement 21 % et 19 % des pertes) sont les deuxièmes leviers de performance énergétique les plus importants. L'importance des ponts thermiques s'explique par la présence d'un système de chauffage au sol électrique entraînant de fortes pertes au niveau des liaisons entre murs et sols.

Définition des scénarios potentiels de rénovation

Différents scénarios de rénovation ont été envisagés. Ils sont composés d'actions élémentaires, chacune concernant un aspect particulier, choisies en collaboration avec des bureaux d'études et des fabricants pour tenir compte au mieux des besoins du projet. A partir de ces actions élémentaires, des scénarios globaux de rénovation sont construits. Une attention particulière est portée à la cohérence des scénarios globaux : ils sont construits en s'assurant de la compatibilité et de la pertinence des actions élémentaires. L'objectif ici est de construire des scénarios de rénovation réalisables, efficaces par rapport aux objectifs définis et évaluables au regard des critères qui seront définis.

Pour construire les scénarios possibles de rénovation énergétique, nous avons d'abord défini plusieurs actions élémentaires de rénovation que nous avons réparties en sept catégories. Ces sept catégories contiennent des actions individuelles spécifiques d'amélioration de la performance énergétique définies selon la méthodologie de la directive européenne sur la performance énergétique 244 :

- Chauffage au sol électrique existant :
 - conservé ;
 - déconnecté.
- Chauffages d'appoint individuels :
 - radiateur électrique rayonnant existant ;
 - radiateur électrique rayonnant intelligent et connecté ;
 - radiateur électrique à accumulation intelligent et connecté ;
 - radiateurs à eau chaude basse température ;
 - sèche-serviettes automatisé.
- Production d'eau chaude sanitaire (ECS) :
 - Ballon d'eau chaude électrique individuel existant ;
 - ballon d'eau chaude électrique individuel intelligent et connecté ;
 - ballon d'eau chaude individuel thermodynamique intelligent et connecté ;
 - chaudière gaz individuelle à condensation ;
 - ECS thermodynamique collective ;
 - ballon d'eau chaude solaire individuel + ballon d'eau chaude solaire centralisé.
- Système de ventilation :
 - conservation de la VMC existante ;
 - VMC simple flux avec bouches d'extraction hygroréglable.
- Production d'énergie locale :
 - non ;
 - panneaux solaires photovoltaïques sur le toit ;
 - panneaux solaires thermiques sur le toit ;
 - panneaux solaires hybrides sur le toit.
- Fenêtrage extérieur :
 - pas de remplacement des menuiseries extérieures ;
 - PVC double vitrage ;
 - bois pariétodynamique à triple vitrage ;
 - remplacement des fenêtres des balcon uniquement, par du double vitrage PVC.
- Isolation des murs extérieurs :
 - conserver l'isolation existante

- isolation thermique extérieure.

A partir de ces actions élémentaires de rénovation et de leur association selon différentes combinaisons cohérentes, plusieurs scénarios globaux de rénovation ont été construits et classés en sept catégories (Tableau 4) :

- S_1 : maintien du chauffage électrique individuel et l'ECS existants ;
- S_2 : chauffage individuel électrique et ECS amélioré en version 1 ;
- S_3 : chauffage individuel électrique et ECS amélioré en version 2 ;
- S_4 : chauffage électrique individuel et ECS thermodynamique individuelle ;
- S_5 : chauffage individuel au gaz et ECS ;
- S_6 : chauffage électrique individuel et ECS thermodynamique collective ;
- S_7 : chauffage électrique individuel et ECS solaire collectif.

Chacune de ces sept catégories de scénarios globaux de rénovation a ensuite été divisée en 4 variantes ($S_{i,1}$ à $S_{i,4}$ avec $i = \{1; 2; 3; 4; 5; 6; 7\}$) dans lesquelles les systèmes de chauffage et d'ECS sont définis et identiques tandis que le type de production d'énergie renouvelable et les menuiseries sont modifiés pour voir leur impact sur les performances. Par exemple, certains scénarios de rénovation globale envisagent uniquement le remplacement des fenêtres des balcons, ou l'installation d'une production d'énergie solaire photovoltaïque, tandis que d'autres envisagent le remplacement de toutes les fenêtres extérieures et l'installation d'une production d'énergie solaire thermique. Au total, 28 scénarios potentiels ont été évalués (Tableau 4).

Lors de la construction de ces sept catégories de scénarios de rénovation globale à partir d'actions élémentaires individuelles, une attention particulière a été portée à l'homogénéité et à la cohérence des combinaisons. Une attention particulière a également été portée au scénario $S_{1,1}$ qui représente l'état initial du bâtiment sans aucune modification de l'enveloppe ou des systèmes techniques. Ce scénario est une référence pour comparer les autres et déterminer leur impact sur les performances.

Il est important de noter que tous les scénarios de rénovation globale ainsi construits ont en commun l'installation de sèche-serviettes dans les salles de bains pour améliorer le confort thermique des logements de manière simple et économique, ainsi que la mise en place d'une isolation thermique de l'extérieur, qui est l'une des premières mesures de réduction des besoins énergétiques.

Tableau 4 : Scénarios globaux de rénovation à partir d'actions élémentaires

N°	Basic renovation actions																														
	a1	a1.1	a1.2	a2	a2.1	a2.2	a2.3	a2.4	a2.5	a3	a3.1	a3.2	a3.3	a3.4	a3.5	a3.6	a4	a4.1	a4.2	a5	a5.1	a5.2	a5.3	a5.4	a6	a6.1	a6.2	a6.3	a6.4	a7	a7.1
Global renovation scenarios	Existing collective electric heating floor																Existing controlled mechanical ventilation maintained Collective single flow CMV with humidity sensitive extract Renewable energy production Without Photovoltaic solar panels on roofs for self-consumption Thermal solar panels on roof Hybrid solar panel on roof Replacement of exterior joinery Without Double glazing on all exterior joinery Triple glazing on all exterior joinery Double glazing only on the balcony windows Exterior wall insulation Keeping the interior insulation as it is Exterior wall insulation														
	Electric heating floor maintained																														
	Electric heating floor disconnected																														
	Individual auxiliary heater																														
	S1.1	Existing electric individual radiator maintained																													
	S1.2	Programmable electric radiant radiator																													
	S1.3	Programmable electric storage radiator																													
	S1.4	Low temperature water radiator																													
	S2.1	Towel dryer in bathroom																													
	S2.2	Domestic hot water																													
	S2.3	Existing electric individual water heater maintained																													
	S2.4	Programmable individual electric water heater																													
	S3.1	Thermodynamic individual water heater																													
	S3.2	Thermodynamic individual water heater																													
	S3.3	Individual condensing gas water heater																													
	S3.4	Thermodynamic collective water heater																													
	S4.1	Individual solar water heater																													
	S4.2	Existing controlled mechanical ventilation maintained																													
	S4.3	Collective single flow CMV with humidity sensitive extract																													
	S4.4	Renewable energy production																													
	S5.1	Without																													
	S5.2	Photovoltaic solar panels on roofs for self-consumption																													
	S5.3	Thermal solar panels on roof																													
	S5.4	Hybrid solar panel on roof																													
	S6.1	Replacement of exterior joinery																													
	S6.2	Without																													
	S6.3	Double glazing on all exterior joinery																													
	S6.4	Triple glazing on all exterior joinery																													
	S7.1	Double glazing only on the balcony windows																													
	S7.2	Exterior wall insulation																													
	S7.3	Keeping the interior insulation as it is																													
	S7.4	Exterior wall insulation																													

Définitions et choix des critères

L'étape suivante consiste à décider comment comparer la contribution des différents scénarios à la réalisation des objectifs du projet. Ceci nécessite la construction d'une famille cohérente de critères que l'on notera $\{g_1, \dots, g_j, \dots, g_n\}$ avec $n = 16$. Ces critères, utilisés pour mesurer la performance des scénarios comparés par rapport à l'atteinte des objectifs, sont entre les mains des décideurs. Puisqu'ils servent d'indicateurs de performance, ils doivent être mesurables en ce sens qu'il doit être possible de les évaluer au moins qualitativement pour apprécier la performance attendue de chaque scénario par rapport au critère considéré. De nombreux exemples de critères existent dans la littérature.

Les critères sont généralement regroupés en trois grandes familles : économiques, techniques et environnementaux. Néanmoins, une quatrième famille, les critères sociaux, est de plus en plus prise en compte et apparaît comme incontournable dans les démarches d'AMC liées à la rénovation de logements

collectifs où les actions entraînent une conséquence directe sur les personnes occupant les logements. Il est donc apparu important de considérer ces quatre aspects dans l'élaboration des critères.

Il est apparu utile de regrouper les critères en familles, notamment en raison de leur nombre. Ces groupes permettent une meilleure analyse du problème puisqu'ils mettent en évidence la façon dont les scénarios se compensent et se reclassent par rapport aux objectifs clés. Ceci facilite également la détermination des poids puisque la répartition des poids peut se faire d'abord entre les critères appartenant à une même famille puis entre les familles elles-mêmes. Enfin, ce choix de regroupement par famille permet d'augmenter le nombre de critères retenus pour l'analyse décisionnelle, contrairement à d'autres méthodes où par exemple le nombre de critères pris en compte est limité à 5.

Une des difficultés du choix des critères est que le nombre de critères doit être relativement faible pour éviter d'introduire des phénomènes de redondance ou de répétabilité. Une décision bien fondée doit reposer sur quelques critères indépendants et complémentaires. Ainsi, en première approximation, on peut facilement se retrouver avec plus d'une cinquantaine de critères exhaustifs, alors qu'une fourchette de six à vingt critères spécifiques serait beaucoup plus efficace.

Pour obtenir des critères cohérents, complémentaires et exhaustifs, plusieurs règles doivent être respectées :

- Complétude : assurez-vous que tous les critères importants sont inclus. Pour ce faire, les objectifs doivent d'abord être bien définis.
- Redondance : vérifier qu'aucun critère sans importance n'est retenu. Il peut s'agir de critères non pertinents ou faisant double emploi.
- Indépendance mutuelle : l'attribution d'une note de performance sur un critère ne doit pas dépendre de la note de performance sur un ou plusieurs autres critères.
- Opérationnalité : il est important que chaque option puisse être évaluée par rapport à chaque critère. L'évaluation peut être objective, par rapport à une échelle de mesure communément acceptée, ou subjective, reflétant l'opinion d'un expert.
- Nombre : trop de critères peuvent entraîner un effort analytique supplémentaire pour évaluer les données d'entrée et rendre la communication de l'analyse plus difficile.

Chaque critère a ainsi été défini en posant les trois questions suivantes : Que veut-on évaluer ? Pourquoi évaluons-nous un scénario sur la base de ce critère ? De quels outils, ressources ou méthodes disposons-nous pour évaluer ces critères pour chaque scénario ?

L'ensemble des critères g_i retenus sont décrit ci-dessous et donnés dans le Tableau 5, classés selon les quatre familles économiques, techniques, sociales et environnementales.

Critères économiques (en gras les critères retenus pour l'évaluation)

Coût d'investissement propriétaire ($g1.1$) : Ce critère correspond au coût d'investissement (l'achat des fournitures, la pose et les honoraires) pour l'entreprise d'une alternative. Il évalue donc la faisabilité économique d'un scénario dans le cadre d'un budget attribué pour l'opération. Il s'agit d'une information aisément obtainable par le biais des bureaux d'études, on peut donc retenir ce critère pour les scénarios de rénovation globale.

Coût de réinvestissement sur une durée de 30 ans ($g1.2$) : A la manière du précédent critère, celui-ci mesure le coût d'une solution à très long terme (30 ans), il est également retenu pour les scénarios de rénovation globale.

Possibilité d'aides financières ou subventions particulières ($g1.3$) : Ce critère a pour but de considérer les potentielles aides financières et subventions dont pourrait bénéficier l'entreprise lors de la mise en

œuvre de la solution considérée. Ces aides pourraient avoir un impact non-négligeable sur le coût d'investissement de la solution et sont facilement estimables grâce aux informations disponibles sur le site internet du Ministère de l'Economie, des Finances et de la Relance. Du fait du potentiel impact de ces aides sur l'économie du projet, il a été choisi de retenir ce critère pour les scénarios de rénovation globale.

Coût de fonctionnement pour le propriétaire (g1.4) : à la manière du précédent critère, celui-ci est lié au contrat de maintenance de type P3 et des coûts de maintenance non-répercutable sur les charges du locataire. Ces coûts peuvent être estimés par le bureau d'étude, il a donc également été retenu pour les scénarios de rénovation globale.

Rentabilité énergétique de la solution (g1.5) : Ce critère décrit la rentabilité d'une alternative en rapportant ses coûts d'investissement et de maintenance de la solution considérée, à la réduction de la facture énergétique qui lui est associée. Ce critère est essentiel car il permet de rendre compte si l'investissement d'une alternative est justifié par rapport aux économies qu'elle engendre. Ce critère est facilement évaluable pour les systèmes, la consommation des locataires de la résidence étant connue avant travaux et pouvant être suivie après travaux. Ce critère a donc été retenu pour les scénarios de rénovation globale.

Possibilité de répercuter certains coûts d'investissement sur les charges locataire (g1.6) : pour certains types de travaux de rénovation énergétique, et sous certaines conditions définies par l'arrêté du 23.11.09, le bailleur peut demander une contribution du locataire à hauteur de 20€ par mois (contribution dépendante du nombre de pièces du logement), et donc un cofinancement des travaux (ANIL, s.d.). Ce critère est binaire, non déterminant et complexe à évaluer selon les scénarios. De ce fait il n'interviendra pas dans l'analyse multicritère.

Coût de fonctionnement pour le locataire (g1.7) : Ce critère correspond au coût de fonctionnement annuel pouvant être inclus dans les charges des locataires, lié au contrat de maintenance de type P1 et P25. Ce coût est associé à l'exploitation, l'entretien, ainsi qu'aux éventuels dépannages liés au fonctionnement de l'alternative. Ce critère permet ainsi de comparer les solutions par rapport à leur coût de fonctionnement (et non pas seulement leur coût d'investissement) et l'impact de ce coût sur les charges des locataires. Ce critère n'interviendra pas dans l'analyse multicritère.

Revente possible de l'énergie produite au réseau (g1.8) : ce critère binaire évalue la possibilité de revente d'énergie, en cas de surproduction locale d'énergie électrique. En effet, dans une démarche d'autoconsommation, il arrive souvent que les pics de productions d'énergie (vers midi) ne correspondent pas aux pics de consommation (en général le soir et le matin pour le résidentiel). Ainsi, ce critère permet d'évaluer la possibilité de valoriser ou non l'énergie électrique autoproduite par une revente sur le réseau. Même si ce critère est facilement évaluable, il ne concernait pas l'ensemble des systèmes étudiés, de ce fait il n'interviendra pas dans l'analyse multicritère.

Complexité de la revente (g1.9) : dans le cas d'une solution avec production locale d'énergie et de possibilité de revente sur le réseau (voir critère précédent), ce critère évalue le degré de complexité des démarches administratives à entreprendre la revente. Il rend compte des potentiels freins à la revente de l'énergie produite. Cependant, il nous est apparu qu'il était difficile d'évaluer un critère si subjectif (car caractérisant un « degré de complexité »), et comme pour le critère précédent il ne concerne pas tous les systèmes étudiés. Il n'a donc pas été retenu dans l'analyse multicritère.

Coût de réinvestissement sur une durée de 15 ans (g1.10) : Ce critère se rapporte au coût de remplacement des équipements et/ou composants devenus obsolètes après une période de 15 ans. Il permet donc de mesurer le coût d'une solution à une plus grande échelle de temps. Ce critère est pertinent car il prend en compte la maintenance des solutions étudiées. Il est aussi facilement quantifiable étant donné que les bureaux d'études disposent des données des fournisseurs relatives à la durée de vie des

composantes des systèmes. En revanche il est redondant avec le critère « Coût de réinvestissement sur une durée de 30 ans » et de ce fait, n'interviendra pas dans l'analyse multicritère.

Critères techniques (en gras les critères retenus pour l'évaluation)

Facilité d'intégration au bâti existant (g2.1) : ce critère caractérise la capacité de la solution à s'intégrer dans le bâti existant. En effet, une solution sera plus intéressante si elle engendre peu de travaux de restructuration (par exemple travaux d'amélioration de la portance, tirage de nouveaux circuits hydraulique, etc.), si elle s'accorde avec l'architecture du bâti ou encore si elle est peu encombrante. Ce critère est essentiel car des travaux additionnels peuvent être un véritable frein, à la fois sur l'économie du projet mais aussi sur les délais prévus du chantier. Il s'agit d'un critère qualitatif qui pourrait classer les solutions de la plus à la moins contraignante, et attribuer ainsi une note relative au classement. Ce critère étant discriminant pour les scénarios de rénovation globale, il a été retenu pour l'analyse multicritère.

Mise en œuvre en site occupé (g2.2) : Ce critère binaire relate de la possibilité de réaliser les travaux de mise en œuvre de la solution en site occupé. Il permet d'évaluer la nécessité ou non de reloger les locataires durant la période de travaux. Ce critère est important car le relogement des locataires peut engendrer des surcoûts significatifs et retarder le commencement du chantier : on préférera une solution dont l'installation ne serait pas inexécutable par la présence des locataires. Ce critère facilement estimable par le bureau d'études, a été retenu pour l'analyse multicritère des scénarios de rénovation globale.

Facilité d'entretien et maintenance (g2.3) : ce critère qualitatif décrit la facilité de maintenance de la solution considérée par rapport à sa fréquence d'entretien, de la facilité d'accès aux systèmes sur site, la disponibilité des entreprises chargées de l'entretien ainsi que la disponibilité (matérielle et géographique) des éventuelles pièces de remplacement en cas de panne. Ce critère est nécessaire pour l'analyse car on préférera une solution à la charge de maintenance moindre. Qualitatif, ce critère pourra être évalué par le bureau d'études qui dispose de connaissances solides sur les différents systèmes étudiés, ainsi qu'un retour d'expérience sur leur charge de maintenance. Ce critère a donc été retenu pour l'analyse multicritère des scénarios de rénovation globale.

Facilité de Comptage / Pilotage / Gestion de l'énergie (g2.4) : Les systèmes étudiés sont tous pilotables et automatisables à distance. Ce critère évalue donc la facilité avec laquelle le système pourra être contrôlé ainsi que la facilité avec laquelle l'énergie produite et distribuée pourra être comptabilisée. Ce critère qualitatif compare donc les différentes alternatives au regard des caractéristiques de leurs organes de régulation. On estime que ce critère sera aisément qualifiable par le bureau d'études et a donc été retenu pour la comparaison des scénarios de rénovation globale.

Complexité technique (g2.5) : ce critère relate de la difficulté à appréhender la technicité de la solution, ainsi que du niveau de connaissance relative à sa mise en œuvre, son fonctionnement et sa maintenance. Une solution serait d'autant plus valorisable qu'elle soit connue et maîtrisable par l'ensemble des partis prenants (installateurs, entreprises d'exploitation et maintenance, etc.). Cependant, nous avons estimé que ce critère n'était pas discriminant, et n'encourageait pas les solutions innovantes, nouvelles encore méconnues. Il a donc été écarté de l'étude.

Fiabilité et garantie (g2.6) : ce critère propose d'évaluer le risque de panne et les garanties associées pour le système considéré. S'appuyant sur les données des fournisseurs, dont l'intérêt est de promouvoir leurs produits, ce critère risque de manquer de subjectivité et de ne pas décrire réellement la fiabilité de la solution. Aussi, il n'a pas été retenu pour la comparaison des scénarios de rénovation globale.

Délais de mise en œuvre (g2.7) : Ce critère évalue le temps nécessaire d'intervention pour mettre en œuvre une action de rénovation donnée au regard des contraintes inhérentes aux projets. Ce critère est significatif car la durée des travaux à de forte répercussions sur le coût du projet ainsi que sur la gêne occasionnée auprès des locataires. Cependant, cet aspect a été intégré au premier critère technique « facilité d'intégration au bâti existant », et n'est donc pas un critère à lui tout seul.

Complexité juridique et administrative (g2.8) : A la manière du précédent, ce critère évalue la charge administrative (demandes d'autorisation, contrat d'exploitation, etc...) inhérente à chaque solution. Il a été décidé de ne pas prendre en compte ce critère car il semblait complexe à évaluer (beaucoup de données à rechercher, difficulté à mettre en place une échelle d'évaluation ou un classement des alternatives selon cet aspect).

Degrés de pérennité (g2.9) : ce critère permet de décrire le caractère impérisable ou non d'une solution, et le risque qu'elle soit contrainte de muter sous des pressions gouvernementales, sociale ou environnementale. Ce critère est très difficile à évaluer car, en plus d'être qualitatif, il repose sur des spéculations. Bien qu'écarté de l'analyse, cet aspect a été pris en compte lors de la sélection des scénarios à comparer.

Critères sociaux (en gras les critères retenus pour l'évaluation)

Impact sur le coût pour le locataire (g3.1) : ce critère doit permettre d'évaluer l'impact qu'aura une solution sur le montant des charges du locataire, en favorisant les solutions ayant un impact bénéfique sur la facture énergétique de ce dernier. Le critère reflète l'un des principaux enjeux de la rénovation énergétique, à savoir la lutte contre la précarité énergétique. Disposant de la facture énergétique avant travaux de plusieurs locataires, le bureau d'étude pourra aisément évaluer la facture après travaux attendue. Ce critère a donc été retenu pour l'analyse multicritère des scénarios de rénovation globale.

Niveau de confort thermique (g3.2) : Ce critère tend à rendre compte du confort thermique ressenti par les locataires à la suite de la mise en œuvre de la solution considérée. En effet, le confort du locataire est un point essentiel du projet, et une solution sera préférée si elle influence positivement cette notion de confort. Etant donné que les scénarios d'enveloppe présentent une résistance thermique équivalente et qu'il s'agit de matériaux disposés à l'extérieur du logement, ce critère ne sera retenu uniquement pour l'analyse des scénarios d'enveloppe. On pourra quantifier le niveau de confort en s'intéressant, par exemple, au mode de diffusion de la chaleur et la sensation associée (chaleur diffuse, effet grille-pain, etc...).

Niveau de confort acoustique (g3.3) : Ce critère évalue la gêne occasionnée par les nuisances sonores que pourrait engendrer une solution lors de son fonctionnement. En effet, le confort du locataire se traduit également par les aspects acoustiques non négligeables. C'est un critère qui se prête à la description des scénarios de rénovation globale, aussi il a été retenu pour leur analyse.

Esthétique et encombrement (g3.4) : ce critère évalue, du point de vue du locataire, l'intégration pratique et esthétique d'une solution au sein du logement. Ce critère est révélateur du degré d'acceptation d'une solution par les locataires. Son évaluation pourra être réalisée par le biais d'un questionnaire adressé aux locataires afin qu'ils puissent juger de l'ergonomie de la solution. Ce critère a donc été retenu pour la comparaison des scénarios de rénovation globale.

Actions à la charge du locataires (g3.5) : Ce critère permet d'évaluer si l'entretien et/ou la gestion des systèmes doit être pris en charge (tout ou en partie) par le locataire, et dépend du caractère collectif ou individuel du système étudié. Ce critère quantitatif est difficile à évaluer et dépend des spécifications particulières de chaque système. Pour ces raisons il a été écarté de l'analyse et ne sera pas utilisé pour l'évaluation des scénarios de rénovation globale.

Nécessité d'intervention du locataire (g3.6) : Ce critère binaire estime si l'intervention du locataire est nécessaire au bon fonctionnement d'un système. On préfère une solution autonome où aucune intervention n'est nécessaire. Cependant, dans le cadre du projet InER, seuls des systèmes autonomes ont été retenus pour l'analyse, ce critère n'est donc pas discriminant et a été écarté de l'analyse multicritère.

Critères environnementaux (en gras les critères retenus pour l'évaluation)

L'efficacité énergétique globale de la solution (g4.1) : ce critère mesure l'énergie économisée du fait de la solution mise en œuvre par rapport à l'état initial. Ce critère permet d'identifier les solutions permettant les meilleurs gains énergétiques et donc répondant le mieux à la problématique de départ qui est d'améliorer les performances énergétiques du bâtiment. Ce critère est discriminant pour l'analyse multicritère et la comparaison des scénarios de rénovation globale. Il a donc été retenu dans le cadre de l'analyse.

Emissions de CO2 évitées (g4.2) : ce critère mesure la quantité d'émission de CO2 évitée du fait de la solution mise en œuvre par rapport à l'état initial. Ce critère permet d'identifier les solutions permettant de réduire au maximum les émissions de CO2 et ainsi répondre à un des objectifs de départ qui est de réduire l'impact environnemental. Également discriminant, il a été retenu dans le cadre de l'analyse.

Le lieu de production (g4.3) : ce critère représente la distance géographique moyenne de production des composants de la solution considérée vis-à-vis du lieu de mise en œuvre. Il permet de prendre en compte la provenance et le lieu de production des matériaux et des systèmes au regard des transports nécessaires pour les acheminer jusqu'au chantier. On préférera une solution fabriquée à proximité du chantier, afin de réduire les émissions de CO2 liées au projet. On considère que l'on peut facilement connaître les usines les plus proches et les différents fabricants, et donc ce critère a été retenu pour la comparaison des scénarios de rénovation globale.

La durabilité (g4.4) : ce critère vise à évaluer la durée de vie d'une solution en tenant compte de sa mise en œuvre dans un environnement donné, afin de comparer les solutions vis-à-vis de leur tenue dans le temps. On favorisera une solution qui a une meilleure tenue dans le temps, évitant alors son remplacement précoce par un autre produit, et induisant ainsi un surcoût environnemental. Information quantifiable, elle est facilement trouvable via les données des fournisseurs. Ce critère est complexe à évaluer puisque la durée de vie des différentes actions élémentaires est difficile à connaître avec précision et variable d'une action à l'autre. Il n'a donc pas été retenu pour évaluer les scénarios de rénovation globale.

L'impact environnemental (g4.5) : ce critère mesure l'impact environnemental de la solution considérée vis-à-vis du réchauffement climatique, de l'acidification des sols et de l'eau, de la pollution de l'air et de l'eau. Ce critère répond aux enjeux de la rénovation énergétique qui s'inscrit dans une logique de construction raisonnée, à faible impact sur l'environnement. Ces données existant pour des matériaux tels que des isolants, mais étant difficile d'accès pour des systèmes, il n'a donc pas été retenu pour évaluer les scénarios de rénovation globale.

La consommation des ressources énergétiques (g4.6) : ce critère estime l'impact de la solution considérée sur la consommation de ressources énergétiques primaires totales, d'origine renouvelable et d'origine non-renouvelable. À l'image du critère précédent, les données relatives à ce critère ne sont disponibles pour des produits de type matériaux, mais difficile d'accès pour des systèmes. Il n'a donc pas été retenu pour évaluer les scénarios de rénovation globale.

L'impact sur l'épuisement des ressources abiotiques (g4.7) : ce critère permet de mesurer l'impact de la solution considérée sur l'épuisement des richesses et ressources naturelles non renouvelables telles

que les terres rares, ou les minerais. A l'image du critère précédent, les données relatives à ce critère ne sont disponibles pour des produits de type matériaux, mais difficile d'accès pour des systèmes. Il n'a donc pas été retenu pour évaluer les scénarios de rénovation globale.

Matière recyclée utilisée (g4.8) : Ce critère évalue la quantité de matériaux/composants recyclés présents dans la solution. Il favorise donc les scénarios impliquant des éléments recyclés, entraînant un impact environnemental moindre. Malgré son importance, ce critère ne peut être retenu dans les analyses car nous ne disposons pas d'informations nécessaires pour l'évaluer.

Recyclabilité (g4.9) : Ce critère évalue la recyclabilité du système/matériau considéré, et son pourcentage de revalorisation en fin de vie. Ce critère contribue à favoriser les produits recyclables, dont le traitement en fin de vie serait moins coûteux pour l'environnement. Comme le critère précédent, ce critère-ci est essentiel mais malheureusement non-évaluable au jour du projet compte-tenu des informations disponibles. Il a donc été écarté des analyses.

Tableau 5 : Critères d'évaluation

N°	Nom	Evaluation	Unité
1. Economique	<i>g1.1</i> Coût d'investissement propriétaire	quantitatif	€ HT.
	<i>g1.2</i> Coût de réinvestissement sur une durée de 30 ans	quantitatif	€ HT.
	<i>g1.3</i> Possibilité d'aides financières et subventions particulières	quantitatif	€ HT.
	<i>g1.4</i> Coût de fonctionnement	quantitatif	€ HT.
	<i>g1.5</i> Rentabilité énergétique de la solution	quantitatif	€ HT/kWh.m².an
2. Technique	<i>g2.1</i> Facilité d'intégration au bâti existant	quantitatif	note/5
	<i>g2.2</i> Mise en œuvre en site occupé	binaire	Yes/No
	<i>g2.3</i> Facilité d'entretien / Maintenance	qualitatif	note/5
	<i>g2.4</i> Facilité de Comptage / Pilotage / Gestion de l'énergie	qualitatif	note/5
3. Sociaux	<i>g3.1</i> Impact sur le coût pour le locataire	qualitatif	€ HT.
	<i>g3.2</i> Niveau de confort thermique	qualitatif	note/5
	<i>g3.3</i> Niveau de confort acoustique	qualitatif	note/5
	<i>g3.4</i> Esthétique et encombrement	qualitatif	note/5
4. Envi.	<i>g4.1</i> Efficacité énergétique	quantitatif	kWh/m².an
	<i>g4.2</i> Emissions de CO2 évitées	quantitatif	Tonne de CO ₂ /an
	<i>g4.3</i> Lieu de production	quantitatif	km

Affectation des pondérations

Une fois les critères d'évaluation définis, il faut déterminer leur importance relative dans le contexte décisionnel. Le critère "A" est-il plus pertinent pour le choix final du décideur que le critère "B" ? Comment quantifier ce rapport de prévalence entre critères ? Ainsi, cette étape clé de l'analyse multicritères consiste à attribuer des poids à chacun des critères retenus ; il existe de nombreuses méthodes pour déterminer les poids à attribuer aux critères.

La procédure de SIMOS, ou méthode des cartes, est particulièrement utilisée dans le cadre des méthodes de surclassement comme ELECTRE. Cette procédure permet aux décideurs, pas nécessairement experts

en analyse multicritères, d'exprimer facilement leurs souhaits quant à la pondération des critères dans chaque contexte. Il consiste à présenter un jeu de fiches correspondant à chaque critère à des décideurs ou à des groupes d'experts. La consigne est alors de classer ces critères (cartes) par ordre croissant d'importance sur une grille (Figure 7). Il est possible de regrouper plusieurs critères d'égale importance et de laisser des espaces entre deux cartes consécutives pour marquer la différence d'importance. À la suite de ce classement, les critères reçoivent une pondération normalisée.

La procédure de SIMOS a été revisitée en 2002 et nommée procédure SRF. Elle propose une variante de la méthode initiale avec l'introduction d'un rapport noté Z correspondant au rapport entre le poids du critère le plus important et le moins important. C'est ce rapport qui permettra de normaliser les poids des critères obtenus. Ainsi, la variation de Z entraîne une modification des poids.



Figure 7 : Schéma de principe de la procédure de pondération SRF

Pour déterminer le poids des seize critères, nous avons suivi trois étapes indépendantes. La première consiste à hiérarchiser les quatre familles de critères, selon la procédure de pondération SRF, pour leur attribuer un poids absolu (Tableau 6). La seconde consiste à hiérarchiser indépendamment les sous-critères au sein de chaque famille pour leur attribuer un poids relatif. Enfin, les poids absolus de chaque critère sont calculés en multipliant leurs poids relatifs par ceux des familles correspondantes. De cette façon, le caractère normalisé des poids est conservé, et la procédure est facilitée quant au nombre de critères à classer (Tableau 7, Tableau 8, Tableau 9 et Tableau 10).

Tableau 6 : Pondération des familles de critère

N°	Famille de critère	
F_1	45.00	Economique
F_2	25.00	Technique
F_3	15.00	Sociaux
F_4	15.00	Environnementaux

Tableau 7 : Critères économiques

1. Economique		
N°	Relatif	Absolu
<i>g</i> _{1.1}	27.27	12.27
<i>g</i> _{1.2}	23.64	10.64
<i>g</i> _{1.3}	9.09	4.09
<i>g</i> _{1.4}	27.27	12.27
<i>g</i> _{1.5}	12.73	5.73

Tableau 8 : Critères technique

2. Technique		
N°	Relatif	Absolu
<i>g</i> _{2.1}	28.57	7.14
<i>g</i> _{2.2}	42.85	10.71
<i>g</i> _{2.3}	14.29	3.57
<i>g</i> _{2.4}	14.29	3.57

Tableau 9 : Critères sociaux

3. Social		
N°	Relatif	Absolu
<i>g</i> _{3.1}	40.90	6.14
<i>g</i> _{3.2}	31.82	4.77
<i>g</i> _{3.3}	13.64	2.05
<i>g</i> _{3.4}	13.64	2.05

Tableau 10 : Critères environnementaux

4. Environnementaux		
N°	Relatif	Absolu
<i>g</i> _{4.1}	50.00	7.50
<i>g</i> _{4.2}	33.33	5.00
<i>g</i> _{4.3}	16.67	2.50

Méthodologie pour l'évaluation des performances

Comme présenté dans la section précédente, vingt-huit scénarios de rénovation énergétique ont été construits à partir d'actions élémentaires de rénovation. Pour évaluer la performance économique de ces différents scénarios de rénovation énergétique, nous avons recherché les coûts d'investissement (achat et installation) et les coûts de maintenance de chaque système élémentaire auprès des fournisseurs et des sociétés de maintenance pour calculer le coût global de chaque scénario de rénovation. Nous avons également déterminé, en fonction de la durée de vie moyenne de chaque système élémentaire composant les scénarios, quel serait le coût de réinvestissement pour l'entreprise sur une période de trente ans. Cette période représente l'intervalle d'entretien majeur, courant dans le secteur du bâtiment.

Pour évaluer la performance des scénarios de rénovation énergétique au regard de critères techniques et sociaux, nous avons fait appel à un bureau d'études en ingénierie technique et en sociologie spécialisé dans le domaine du bâtiment et de la transition énergétique. L'objectif était d'évaluer des critères qualitatifs spécifiques par une note de 0 à 5. Le principe de la notation consiste à attribuer à chaque action élémentaire au sein d'une même catégorie de système (ex : production d'ECS), une note représentative de sa performance relative pour critère considéré. La même procédure est suivie pour chaque catégorie d'actions élémentaires et tous les critères qualitatifs. Ensuite, un score est construit selon une distribution linéaire entre le scénario global de rénovation avec le meilleur score et celui avec le plus mauvais score pour les critères qualitatifs considérés. Cela nous donne, pour les critères *g*_{2.1}, *g*_{2.3}, *g*_{2.4}, *g*_{3.2}, *g*_{3.3} et *g*_{3.4}, une note sur une échelle de cinq représentant la performance de chaque scénario.

Pour comparer les scénarios du point de vue de leur performance énergétique, nous avons fait appel à des bureaux d'études spécialisés dans la simulation thermique du bâtiment capables de modéliser tous les scénarios envisagés. L'outil informatique utilisé pour la modélisation simule le comportement du bâtiment et de ses différents composants et systèmes via un moteur de calcul réglementaire conforme à la réglementation thermique. De nombreuses simulations ont été réalisées en faisant varier les paramètres d'entrée (système de chauffage, production d'ECS, type de fenêtres, production d'énergie locale, etc.) pour déterminer la consommation d'énergie primaire et finale de chaque scénario.

Ce processus d'évaluation, avec l'appui de fournisseurs et d'installateurs d'équipements techniques, d'un cabinet de sociologie spécialisé, de bureaux d'études techniques et de spécialistes de la gestion locative,

a permis de construire la matrice de performance présentée dans les Tableau 11 et Tableau 12Tableau 13. Elle contient les appréciations de chaque scénario global de rénovation présenté dans le Tableau 4, par rapport aux différents critères définis dans le Tableau 5.

Tableau 11 : Matrice de performance pour les scénarios de rénovation globale – 1/2

Scénarios	Economique					Technique			
	$g_{1.1}$	$g_{1.2}$	$g_{1.3}$	$g_{1.4}$	$g_{1.5}$	$g_{2.1}$	$g_{2.2}$	$g_{2.3}$	$g_{2.4}$
	[€ HT.]	[€ HT.]	[€ HT.]	[€ HT.]	[€/kWh/ m ² .an]	[/5]	[OUI/ NON]	[/5]	[/5]
S _{1.1}	0	1757134	0	82701	0	5.00	OUI	4.38	3.57
S _{1.2}	1008654	551661	952088	41346	5933	3.33	OUI	5.00	3.57
S _{1.3}	1260874	711361	991697	36119	6591	3.00	OUI	5.00	3.57
S _{1.4}	905165	551661	917604	42268	5457	3.67	OUI	5.00	3.57
S _{2.1}	1239757	551661	955885	40971	6771	2.33	OUI	4.38	4.29
S _{2.2}	1397247	760191	996168	28230	6736	1.67	OUI	3.75	3.57
S _{2.3}	1636981	919891	1035489	23290	7185	1.33	OUI	3.75	3.57
S _{2.4}	1282394	760191	995521	28762	6255	2.00	OUI	3.75	3.57
S _{3.1}	1344232	610011	957187	41692	7140	2.00	OUI	4.38	5.00
S _{3.2}	1522330	818541	1031776	28197	7087	1.33	OUI	3.75	4.29
S _{3.3}	1751844	978241	1070386	23760	7526	1.00	OUI	3.75	4.29
S _{3.4}	1385515	818541	1030933	28758	6545	1.67	OUI	3.75	4.29
S _{4.1}	1531907	775596	1070213	32638	6586	1.67	OUI	3.75	5.00
S _{4.2}	1400969	984126	1110816	27490	5432	1.00	OUI	3.13	4.29
S _{4.3}	1899185	1143826	1149305	15369	6895	0.67	OUI	3.13	4.29
S _{4.4}	1517360	984126	1109597	20507	5980	1.33	OUI	3.13	4.29
S _{5.1}	1427140	787239	1124178	26341	5284	1.33	NON	2.50	2.86
S _{5.2}	1555978	995769	1131706	12639	5229	0.67	NON	1.88	2.14
S _{5.3}	1796800	1155469	1204438	10007	5867	0.33	NON	1.88	2.14
S _{5.4}	1492598	995769	1131267	12444	5027	1.00	NON	1.88	2.14
S _{6.1}	1372026	811447	1030582	35809	6507	1.67	OUI	3.13	2.86
S _{6.2}	1526016	1019977	1071164	22827	6466	1.00	OUI	2.50	2.14
S _{6.3}	1717070	1179677	1109732	18439	6767	0.67	OUI	2.50	2.14
S _{6.4}	1377529	1019977	1070150	23678	5934	1.33	OUI	2.50	2.14
S _{7.1}	1404394	867115	995961	37880	6790	1.00	NON	0.63	0.71
S _{7.2}	1533952	1075645	1070209	24669	6603	0.33	NON	0.00	0.00
S _{7.3}	1771679	1235345	1109007	20125	7057	0.00	NON	0.00	0.00
S _{7.4}	1432939	1075645	1035825	25267	6251	0.67	NON	0.00	0.00

Tableau 12 : Matrice de performance pour les scénarios de rénovation globale – 2/2

Scénarios	Sociaux				Environnementaux		
	$g_{3.1}$	$g_{3.2}$	$g_{3.3}$	$g_{3.4}$	$g_{4.1}$	$g_{4.2}$	$g_{4.3}$
	[€ HT.]	[/5]	[/5]	[/5]	[kWh/m ² .an]	[Tonne de CO ₂ /an]	[km]
$S_{1.1}$	368	0.00	5.00	4.00	0	0	0
$S_{1.2}$	182	2.78	5.00	4.00	170	65	418
$S_{1.3}$	159	3.33	5.00	4.00	191	74	690
$S_{1.4}$	186	2.22	5.00	4.00	166	64	418
$S_{2.1}$	168	4.44	4.00	4.00	183	71	2368
$S_{2.2}$	141	4.44	4.00	4.00	207	80	2448
$S_{2.3}$	118	5.00	4.00	4.00	228	88	2720
$S_{2.4}$	144	3.89	4.00	4.00	205	79	2448
$S_{3.1}$	162	2.22	3.00	2.00	188	73	2368
$S_{3.2}$	133	2.22	3.00	2.00	215	83	2448
$S_{3.3}$	113	2.78	3.00	2.00	233	90	2720
$S_{3.4}$	136	1.67	3.00	2.00	212	82	2448
$S_{4.1}$	114	2.22	1.00	0.00	233	90	2314
$S_{4.2}$	86	2.22	1.00	0.00	258	99	2394
$S_{4.3}$	66	2.78	1.00	0.00	275	106	2666
$S_{4.4}$	91	1.67	1.00	0.00	254	98	2394
$S_{5.1}$	164	0.56	0.00	1.00	270	104	2425
$S_{5.2}$	135	0.56	0.00	1.00	298	115	2505
$S_{5.3}$	113	1.11	0.00	1.00	306	118	2777
$S_{5.4}$	137	0.00	0.00	1.00	297	114	2505
$S_{6.1}$	138	3.89	5.00	5.00	211	81	2618
$S_{6.2}$	110	3.89	5.00	5.00	236	91	2698
$S_{6.3}$	90	4.44	5.00	5.00	254	98	2970
$S_{6.4}$	114	3.33	5.00	5.00	232	89	2698
$S_{7.1}$	142	4.44	3.00	3.00	207	80	2548
$S_{7.2}$	114	4.44	3.00	3.00	232	89	2628
$S_{7.3}$	93	5.00	3.00	3.00	251	97	2900
$S_{7.4}$	117	3.89	3.00	3.00	229	88	2628

Paramètre spécifique à la méthode ELECTRE Tri

Une fois la matrice de performance obtenue, une procédure MCDA peut être utilisée pour classer les scénarios. Ici, nous avons choisi de développer un algorithme qui reproduit la procédure de la méthode ELECTRE Tri de manière rapide et automatisée. Cette méthode est basée sur un processus d'attribution de scénarios à plusieurs catégories de classement nommées C^k , caractérisées par des scénarios de référence de caractéristique supérieure et inférieure nommés b^k . Ces scénarios de référence peuvent être définis par les utilisateurs et leurs performances sont données pour délimiter les catégories de classement. Pour la mise en œuvre de la méthode, le langage de programmation Python a été choisi pour sa syntaxe lisible et sa facilité d'utilisation, pour sa popularité et sa polyvalence en termes de support informatique.

Définition des seuils de tolérance

Pour comparer les différents scénarios un à un selon chaque critère, il est nécessaire de définir des seuils. Ces seuils détermineront si un scénario est préféré, équivalent, moins bon ou non comparable à un autre. Ils tiennent notamment compte du caractère imparfait des données lors de l'évaluation de la performance des scénarios, ainsi que de l'arbitraire qui affecte la définition des critères. Ainsi, trois seuils doivent être définis pour chaque critère :

- le seuil d'indifférence " q_j " : il indique pour un critère donné l'écart maximum de performance en dessous duquel deux solutions ne peuvent être comparées.
- le seuil de préférence " p_j " : il indique pour un critère donné l'écart minimum de performance à partir duquel une solution sera préférée à une autre.
- le seuil de veto " v_j " : il est caractéristique de la méthode ELECTRE Tri et évite le phénomène de compensation de critères. Le seuil de veto représente, pour un critère donné, l'écart de performance au-delà duquel la préférence d'un scénario par rapport à un autre ne peut être compensée par un autre critère meilleur.

Dans la méthode ELECTRE Tri, ces seuils correspondent à des valeurs absolues caractérisant l'écart de performance entre deux scénarios comparés et pour un critère donné. Ils peuvent être définis par le décideur qui les choisit en fonction de ses préférences et des écarts de performance qui font sens pour lui, comme dans le cas d'un coût d'investissement par exemple. Cependant, il peut arriver que le décideur ne soit pas en mesure de définir ces seuils comme lorsqu'ils concernent une performance évaluée de manière qualitative par des experts. Pour notre étude de cas, nous avons choisi de définir ces seuils de tolérance comme un certain pourcentage de la performance moyenne des scénarios indépendamment pour chaque critère. Ce choix a été fait pour des raisons pratiques concernant le grand nombre de critères et en raison du caractère expérimental de la méthodologie développée. Définir ainsi les seuils permet également de les faire varier facilement, en modifiant les paramètres γ , afin d'analyser l'impact sur le classement des scénarios. Dans notre étude de cas, nous avons défini ces seuils comme respectivement égaux à 5%, 15% et 33% de la performance moyenne des scénarios pour un critère donné. On obtient les valeurs présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Définition des seuils

N°	Unités	Seuils		
		q_j	p_j	v_j
$g_{1.1}$	[€ HT.]	70942	212825	468215
$g_{1.2}$	[€ HT.]	39260	117781	259118
$g_{1.3}$	[€ HT.]	50819	152458	335408
$g_{1.4}$	[€ HT.]	1436	4309	9480
$g_{1.5}$	[€/kWh/m ² .an]	309	926	2037
$g_{2.1}$	[0/5]	0.08	0.23	0.51
$g_{2.2}$	[0/N]	0	1	2
$g_{2.3}$	[0/5]	0.15	0.45	0.98
$g_{2.4}$	[0/5]	0.15	0.45	0.99
$g_{3.1}$	[€ HT.]	7	21	45
$g_{3.2}$	[0/5]	0.14	0.43	0.94
$g_{3.3}$	[0/5]	0.15	0.45	0.99
$g_{3.4}$	[0/5]	0.14	0.41	0.90
$g_{4.1}$	[kWh/m ² .an]	11	33	74
$g_{4.2}$	[Tonne de CO ₂ /an]	4	11	24
$g_{4.3}$	[km]	113	338	744

Définition des scénarios caractéristiques de référence

L'objectif de la procédure ELECTRE Tri est d'affecter les différents scénarios à un ensemble de catégories ordonnées du pire au meilleur et notées $\{C^1, \dots, C^k, \dots, C^q\}$ avec $q \geq 2$. Ces catégories de classement sont délimitées par des scénarios de référence caractéristiques également appelés scénarios de référence aux limites ou scénarios aux limites et notés $\{b^0, b^1, \dots, b^k, \dots, b^q\}$. Ils représentent les frontières entre deux catégories consécutives de classement, cela signifie que le scénario limite inférieure d'une meilleure catégorie est également le scénario limite supérieure d'une catégorie consécutive moins bonne. Il est important de noter que b^0 est le scénario à la limite la plus basse et b^q est le scénario à la limite la plus élevée.

Ces scénarios aux limites inférieure et supérieure sont construits à partir des meilleures et des pires performances des scénarios de rénovation. Le seuil de préférence est utilisé dans ces expressions pour garantir une préférence stricte lors de la procédure de classement. Selon que la performance pour le critère considéré doit être maximisée (directe) ou minimisée (indirecte), la performance de ces scénarios aux limites inférieure et supérieure sera construite différemment.

Il est important de noter que les critères ont un type qui peut être direct, indirect ou binaire. Les critères de type indirect sont caractérisés par des performances qu'il est préférable de minimiser et les performances des scénarios pour ces critères sont de signe négatif. En revanche, les critères de type direct se caractérisent par des performances que l'on préfère maximiser.

Pour cette application, nous avons choisi de créer six scénarios de référence caractéristiques nommés $B = \{b^0, b^1, b^2, b^3, b^4, b^5\}$. Ces six scénarios caractéristiques serviront à délimiter cinq catégories appelées $C = \{C^1, C^2, C^3, C^4, C^5\}$ et représentent pour b^1 la frontière entre C^1 et C^2 et pour b^2 la limite en C^2 et C^3 . Le choix de cinq catégories a été fait pour limiter le nombre de scénarios caractéristiques à définir tout en permettant un classement suffisamment distinctif. De plus, pour cette application d'aide à la décision, un classement selon cinq catégories de classement était suffisant pour les décideurs. On obtient les valeurs présentées dans le Tableau 14.

Tableau 14: Définition des scénarios caractéristiques de référence

N°	Unités	Type	b^0	b^1	b^2	b^3	b^4	b^5
$g_{1.1}$	[€ HT.]	INDIRECT	-2112010	-1667495	-1528955	-1418833	-1330025	212825
$g_{1.2}$	[€ HT.]	INDIRECT	-1874915	-928689	-837382	-680856	-602593	-273185
$g_{1.3}$	[€ HT.]	INDIRECT	-152458	963728	1031134	1071156	1111178	1356896
$g_{1.4}$	[€ HT.]	DIRECT	-87010	-38545	-28729	-24522	-18913	-5698
$g_{1.5}$	[€/kWh/m ² .an]	BINARY	-8452	-6853	-6717	-6376	-5491	926
$g_{2.1}$	[0/5]	DIRECT	-0.23	0.71	1.20	1.54	2.09	5.00
$g_{2.2}$	[0/N]	BINARY	0	0	0	1	1	1
$g_{2.3}$	[0/5]	DIRECT	-0.45	1.93	2.60	3.26	4.00	5.00
$g_{2.4}$	[0/5]	DIRECT	-0.45	1.98	2.35	3.30	4.28	5.00
$g_{3.1}$	[€ HT.]	INDIRECT	-389	-160	-137	-115	-99	-46
$g_{3.2}$	[0/5]	DIRECT	-0.43	1.78	2.23	3.74	4.19	5.00
$g_{3.3}$	[0/5]	DIRECT	-0.45	1.00	2.10	3.36	4.08	5.00
$g_{3.4}$	[0/5]	DIRECT	-0.41	0.59	1.87	3.14	4.41	5.00
$g_{4.1}$	[kWh/m ² .an]	DIRECT	-33	194	223	234	257	340
$g_{4.2}$	[Tonne de CO ₂ /an]	INDIRECT	-11	60	74	82	90	117
$g_{4.3}$	[km]	INDIRECT	-3308	-2737	-2657	-2496	-2376	338

Habituellement, l'ensemble des scénarios caractéristiques doit être coconstruit à travers un processus interactif entre l'analyste et le décideur. Ce processus rend l'application de la méthode ELECTRE Tri plus longue et complexe. Afin d'éviter ce problème et compte tenu du caractère expérimental de ce projet et du grand nombre de critères et de scénarios à comparer, nous avons choisi de définir ces scénarios de référence à l'aide d'une méthode statistique.

Cela permet de construire les scénarios de référence de manière juste et objective. Nous obtenons les résultats présentés dans le Tableau 14. Dans la définition de ces scénarios de référence, nous utilisons une variable statistique d'ajustement pour obtenir la répartition la plus équilibrée possible des scénarios de rénovation au sein des différentes catégories de classement C^k , et indépendamment pour chaque critère. Le graphique Figure 8 schématise cette dispersion pour les différents critères.



Figure 8 : Répartition des scénarios de rénovation dans les différentes catégories de classement pour chaque critère

Algorithme d'exécution de la méthode ELECTRE Tri

L'algorithme de surclassement ELECTRE Tri consiste en trois étapes principales :

- importer les données d'entrée du problème : matrice de performance, poids des critères, scénarios caractéristiques et seuils ;
- traitement des données selon la méthode Electre Tri ;
- afficher les résultats.

Pour réaliser l'étape 2 nous avons choisie de reproduire sous forme d'un programme informatique les différentes étapes de calcul de la méthode ELECTRE Tri. Cela nous permet une grande liberté et beaucoup d'autonomie dans l'exécution.

Python doit sa popularité à sa polyvalence, mais aussi à sa flexibilité et sa facilité d'utilisation. En effet, il n'existe pas de règles figées pour la programmation de fonctionnalités ou la résolution de problèmes au sein de Python. De plus, grâce aux différents cadres de travail et de tests, il est possible d'automatiser des tests internes à la programmation et ainsi éviter les erreurs de codage. Ce qui est particulièrement utile et rassurant quand on est débutant.

Autre avantage, Python est un langage de programmation relativement simple à comprendre et donc à apprendre. Il suit une structure organisée avec une syntaxe simple et permet une utilisation des plus polyvalentes allant de simples applications web à des systèmes d'exploitation complets. Il est

aujourd'hui considéré comme le langage le plus apprécié par les débutants en programmation, qui le préfèrent aujourd'hui à Java.

Enfin, depuis qu'il a été mis en place, Python a généré une large communauté. Cela permet aux utilisateurs de s'entraider et de partager des bibliothèques de codes et des packages, qui leur permettent de ne pas partir de zéro lorsqu'ils écrivent leur première ligne de commande.

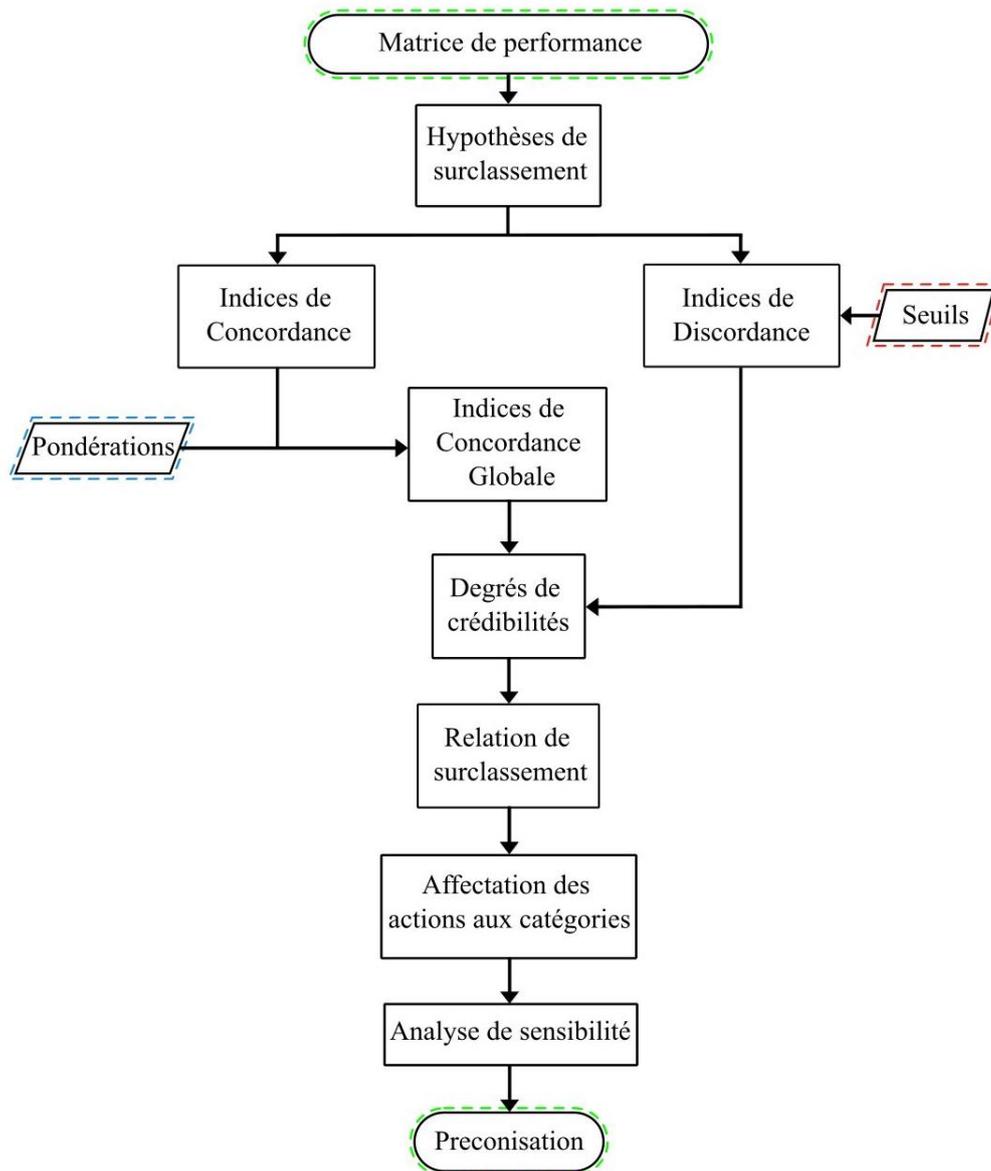


Figure 9 : Organigramme de la procédure ELECTRE Tri

Analyse du classement des scénarios et recommandation

L'algorithme ELECTRE Tri-B classe finalement chaque scénario dans une catégorie selon deux procédures optimiste et pessimiste. De nombreuses simulations ont été réalisées afin d'observer l'influence des différents paramètres d'entrée sur le classement final et ainsi analyser la sensibilité de la méthode (Voir Tableau 15).

On constate, à travers cette analyse, que les scénarios de rénovation les mieux classés sont ceux privilégiant la conservation du plancher chauffant et le remplacement des radiateurs rayonnants et ballons d'ECS par des systèmes ayant une meilleure efficacité. Ces scénarios sont d'autant plus intéressants s'ils sont couplés à un remplacement des menuiseries par du double vitrage et à une production d'électricité photovoltaïque locale en autoconsommation collective. Malgré un coût d'investissement plus important ces scénarios permettent de réduire les consommations d'énergie de même que les coûts pour les locataires. D'un point de vue technique ils sont simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas de changement d'énergie. Il s'agit des scénarios $S_{2.2}$, $S_{2.3}$ et $S_{2.4}$.

En revanche les scénarios nécessitant un changement d'énergie de l'électricité vers le gaz sont classés « Très mauvais » malgré des coûts d'investissement relativement faibles. Ceci s'explique par l'impact sur les émissions de GES de ses solutions ainsi que par leur complexité d'intégration au bâtiment existant qui nécessite la mise en place d'un réseau de canalisation pour le transport du gaz et des calories de chauffage. Il s'agit des scénarios $S_{5.1}$, $S_{5.2}$, $S_{5.3}$ et $S_{5.4}$.

Ensuite les solutions thermodynamiques individuelle et collective sont classées « Moyen » et « Mauvais » malgré de très bonnes performances énergétiques notamment lorsqu'elles sont couplées à une solution de production locale d'énergie renouvelable. Ce classement moyen est principalement dû à leur coût d'investissement élevé et à leur complexité d'intégration aux bâtiments existant et d'entretien/maintenance. Il s'agit des scénarios $S_{4.1}$, $S_{4.2}$, $S_{4.3}$ et $S_{4.4}$ et les scénarios $S_{6.1}$, $S_{6.2}$, $S_{6.3}$ et $S_{6.4}$.

Enfin les solutions avec production locale d'énergie solaire thermique et hybride sont également classées « Très mauvais » car complexes à mettre en place et coûteuse en termes d'investissement. Elles ne sont également pas simples à gérer d'un point de vue pilotage et répartition et sont plus délicates à l'entretiens. Il s'agit des scénarios $S_{7.1}$, $S_{7.2}$, $S_{7.3}$ et $S_{7.4}$.

D'une manière générale, on constate que la mise en place d'une production locale d'énergie de type photovoltaïque permet d'améliorer le classement des scénarios et ainsi viser d'avantage les objectifs initiaux du projet.

Tableau 15 : Classement des scénarios selon la méthode ELECTRE Tri

N°	Scénarios globaux de rénovation envisagés																Ch. élec indiv & ECS solaire th. collec.												
	S _{1,1}	S _{1,2}	S _{1,3}	S _{1,4}	S _{2,1}	S _{2,2}	S _{2,3}	S _{2,4}	S _{3,1}	S _{3,2}	S _{3,3}	S _{3,4}	S _{4,1}	S _{4,2}	S _{4,3}	S _{4,4}		S _{5,1}	S _{5,2}	S _{5,3}	S _{5,4}	S _{6,1}	S _{6,2}	S _{6,3}	S _{6,4}	S _{7,1}	S _{7,2}	S _{7,3}	S _{7,4}
Actions potentielles élémentaires de rénovation																													
S1																													
S _{1,1}	Plancher chauffant électrique existant	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
S _{1,2}	Plancher chauffant électrique conservé	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{1,3}	Plancher chauffant électrique débranché	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S2																													
S _{2,1}	Convecteurs électrique existants	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{2,2}	Panneau électrique rayonnant programmable	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{2,3}	Chauffage électrique à accumulation	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{2,4}	Radiateurs à eau basse températures	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{2,5}	Sèche serviette dans salle de bain	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{2,6}	Sèche serviette dans salle de bain	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S3																													
S _{3,1}	Eau chaude sanitaire	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{3,2}	Ballon électrique individuel existant	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{3,3}	Ballon électrique individuel	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{3,4}	Ballon thermodynamique individuel	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{3,5}	Chaudière gaz à condensation individuelle	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{3,6}	ECS thermodynamique collective	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{3,7}	Préparateur ECS solaire individuel	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{3,8}	Préparateur ECS solaire individuel	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S4																													
S _{4,1}	Système de ventilation	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{4,2}	Système de VMC existant	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{4,3}	VMC simple flux collective	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{4,4}	VMC simple flux collective	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S5																													
S _{5,1}	Production d'énergie	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{5,2}	Aucune	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{5,3}	Panneaux solaires photovoltaïques en toiture	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{5,4}	Panneaux solaires thermiques en toiture	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{5,5}	Panneau solaire hybride en toiture	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{5,6}	Panneau solaire hybride en toiture	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S6																													
S _{6,1}	Actions de remplacement des menuiseries principales	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{6,2}	Aucun remplacement des menuiseries principales	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{6,3}	TV par électrodynamique Rådet EnR + TV SGG Climatop XN	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
S _{6,4}	Remplacement Menuiseries balcon uniquement avec S _{6,2}	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S7																													
S _{7,1}	Actions d'isolation par l'extérieur	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{7,2}	Conservation de l'isolation en l'état	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{7,3}	Action d'isolation thermique par l'extérieur	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
S _{7,4}	Action d'isolation thermique par l'extérieur	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

[Excellent] ●
 [Bon] ●
 [Moyen] ●
 [Mauvais] ●
 [Très mauvais] ●

4. La solution retenue et développée

Le programme de travaux retenu / réalisé

Le but du projet est de réaliser des travaux de rénovations afin d'améliorer le confort des occupants et la qualité énergétique des bâtiments. L'objectif premier est d'atteindre un niveau de performance équivalent à l'étiquette C. Si cela est envisageable, essayer d'atteindre le niveau BBC Rénovation. Le projet est par ailleurs soumis au respect de la Réglementation Thermique dite « Élément par élément ».

Listes des interventions énergétiques proposées

Tableau 16 : Interventions sur l'enveloppe

Enveloppe	
Toiture terrasse	Remplacement du complexe (étanchéité et isolation) & protections collectives.
Façades	Isolation thermique extérieur (en laine de roche sous enduit en parties courantes et sous bardage au droit des entrées des allées).
Planchers bas	Isolation en sous face des planchers bas (vide sanitaire).
Loggias	Remplacement des ensembles menuisés (portes fenêtres et parties fixes) et des volets roulants. Fermeture des loggias.
Fenêtres	Les fenêtres, les occultations et les garde-corps des fenêtres des logements sont conservés.
Halls d'entrées – création de SAS thermiques	Isolation des plafonds et des murs des halls d'entrées, remplacement des ensembles d'entrées, portes pour SAS. Embellissements, interphonie & contrôle d'accès.

Tableau 17 : Interventions sur les parties communes et privatives

Parties communes & parties privatives	
Eclairages	Remplacement des hublots par des hublots à LED.
Mise en sécurité électrique	Mise en sécurité électrique des logements. Mise en sécurité électrique des parties communes.
Sécurité incendie	Eclairages de secours, condamnation des VO, remplacements des portes CF.
Accessibilité	Escaliers : adaptation PMR, nettoyage et plinthes. Accès aux allées : création de rampes pour les allées C1 & C2, mise à niveau allée C3.

Tableau 18 : Interventions sur les équipements techniques

Equipements techniques	
Chauffage	Conservation du chauffage en base. Remplacement des convecteurs électriques par des panneaux rayonnants avec programmation horaire, détection d'ouverture de fenêtre, en fonction de la température intérieure. Mise en place de sèches-serviettes électriques.
ECS	Remplacement et déplacement des BECS (y compris reprises des embellissements). T2 à T4 : Accumulation par un ballon électrique de 150 L, P = 1.65 kW. T5 : Accumulation par un ballon électrique de 200 L, P = 2.2 kW
Ventilation	Remplacement de toutes les installations en toiture : caissons, réseaux Remplacement des bouches d'extraction hygroréglable placées dans les pièces humides (cuisine, salle de bain et WC) et des bouches d'entrées d'air autoréglable placées dans les ouvrants des pièces de vie.
Panneaux PV en toiture	Installation de panneaux photovoltaïques en toiture terrasse. Raccordement des panneaux au réseau électrique. Déploiement d'une solution innovante de Pilotage et de suivis.

Valorisation des Certificats d'Economies d'Énergie (CEE)

Le dispositif des CEE repose sur une obligation de réaliser des économies d'énergie imposée aux vendeurs d'électricité, de gaz, de fioul domestique, de gaz de pétrole liquéfié et de chaleur ou de froid par réseaux (appelés les « obligés »).

Les obligés doivent s'acquitter de leurs obligations en présentant des certificats d'économies d'énergie (ou « certificats ») sous peine de devoir verser une pénalité libératoire de 2 centimes d'euro par « kWh CUMAC » manquant. Ces CEE peuvent être obtenus en contrepartie d'actions d'économies d'énergie réalisées sur leurs installations propres, ou bien via un échange avec des acteurs non obligés ou « éligibles », qui réalisent des actions d'amélioration de la consommation d'énergie sur leur parc.

Ce mécanisme permet alors de remplir trois fonctions majeures :

- Favoriser les actions de Maîtrise de l'Énergie,
- Toucher un secteur diffus, moins sensible aux politiques de l'Etat (typiquement, le consommateur particulier qu'un vendeur d'énergie peut accompagner à réaliser des économies d'énergie),
- Fournir une source de financement complémentaire aux acteurs souhaitant mettre en place un programme de travaux lié à l'amélioration énergétique de leur patrimoine.

Les dossiers de demande de certificats sont adressés au préfet du département et instruit par les directions régionales en charge de l'énergie (DRIRE ou DREAL) suivant les modalités prévues dans la circulaire du 26 novembre 2007. Le contenu des dossiers est défini par l'arrêté du 19 juin 2006.

Pour simplifier le dépôt des dossiers, des fiches d'opérations standardisées ont été créées pour définir les conditions d'éligibilité et la valorisation en économies d'énergie pour les opérations les plus courantes.

Les certificats délivrés sont exclusivement matérialisés par leur inscription sur un compte individuel ouvert dans le registre national des certificats d'économies d'énergie, dont la tenue peut être déléguée à une personne morale.

Nota Bene : il est préférable de mettre en concurrence plusieurs « Obligés » afin de valoriser au maximum les CEE. Ces organismes construisent intégralement les dossiers de demande de CEE.

Tableau 19 : kWh CUMAC valorisable dans le cadre des CEE

Préconisation	Réf fiche	Quantité	kWh CUMAC
Isolation thermique par l'extérieur	BAT-EN-102	2 695 m ²	6 468 000
Remplacement des portes fenêtres	BAR-EN-104	67	348 400
Isolation des plancher bas	BAT-EN-103	1 071 m ²	3 105 900
Mise en place d'une VMC simple flux hygroréglable type A	BAR-TH-127	67	1 402 176
Isolation des toitures terrasses	BAR-EN-105	1 224 m ²	1 713 600
Mise en place d'émetteur électrique à régulation électronique à fonctions avancées	BAR-TH-158	289	635 800

5. Autoconsommation collective : problématique, pilotage, optimisation et suivis

Une des problématiques de l'autoconsommation est le déphasage entre les périodes de production et les périodes de consommation. Une solution à ce problème est le stockage par batterie. Outre son coût élevé ce type de stockage présente un fort impact environnemental et encore trop peu de perspectives quant aux possibilités de recyclage des batteries. Afin d'éviter cette solution tout en favorisant l'autoconsommation plutôt que la révente et la réinjection sur le réseau électrique, il a été choisi de développer une solution de pilotage permettant d'optimiser certains usages afin de faciliter la consommation et le stockage aux périodes où il y a des surplus de production électrique photovoltaïque. Le choix des usages à piloter s'est porté, à la suite de plusieurs études, sur la production individuelle d'ECS qui est un poste de consommation important et permettant le stockage. De plus il est important de noter que l'ECS est consommée toute l'année et que la part qu'elle occupe dans les consommations électriques totales restera très peu variable même après une amélioration thermique de l'enveloppe du bâtiment.

L'objectif de la suite du présent rapport est donc de décrire le fonctionnement attendu de la solution de gestion, de pilotage, d'optimisation et de suivis pour une opération d'autoconsommation collective photovoltaïque en logement social.

La solution devra intégrer l'impact de la structure tarifaire des fournisseurs d'énergie réseau pour optimiser l'ACC sur les charges des locataires. La solution devra également, au-delà de la gestion du pilotage et du suivi de l'ACC, permettre de suivre le bon fonctionnement de la production photovoltaïque, de la VMC et du chauffage collectif. Elle devra être évolutive pour pouvoir suivre le bon fonctionnement d'autres équipements à l'avenir. Elle devra également, suivant les possibilités offertes par les installations existantes, gérer le chauffage collectif en lien avec la GTB en place, gérer le chauffage individuel d'appoint, l'éclairage et les prises des logements.

Périmètre de la solution de gestion et pilotage

Dans une première phase, le périmètre du projet comprendra essentiellement :

- Le pilotage des ballons d'ECS en vue d'optimiser l'autoconsommation et minimiser le surplus d'électricité réinjecté sur le réseau
- Le suivi et la gestion pour IRA de l'opération d'autoconsommation collective à travers une plateforme dédiée
- Le suivi et la gestion pour le locataire des consommations électriques individuelles

S'ajouteront ou pourront s'ajouter au cours du contrat :

- Le suivi des VMC de la résidence et plus largement du patrimoine IRA
- Le suivi du chauffage en base de type plancher chauffant électrique
- La régulation du chauffage en base via les systèmes/appareil du Prestataire

Prestations en cours de développement et de mise en place

Les prestations attendues sont les suivantes :

- Déploiement de la solution EcoTouch pour la gestion des consommations électriques des locataires ;

- Développement d'une solution de pilotage de l'ECS permettant d'optimiser le taux d'autoconsommation de l'opération d'ACC et les coûts énergétiques pour les locataires ;
- Fourniture d'une plateforme accessible 24h/24 et 7jours/7 permettant :
 - La collecte, le stockage et le traitement de données de mesures en provenance de sources diverses et multiples (consommations individuelles électriques et ECS, consommations électriques communes, production PV, objets ou appareils connectés, ...)
 - Le suivi des données collectées et analysées et en particulier pour la surveillance de l'opération d'ACC ;
 - L'actualisation des données collectées ;
 - La production de rapports et l'extraction de données aux formats spécifiques ;
 - La mise à disposition d'une application locataire de suivi et gestion des données de consommations et d'ACC ;
 - La gestion d'alertes ;
 - Gestion de l'archivage et de la purge des données suivants les instructions données par le client et ses prestataires.
- Fourniture d'une application locataire permettant de consulter leurs données de consommation et les informations liées à l'opération d'ACC ;
- Hébergement, maintenance et mise à jour de la solution, fourniture d'accès individuels et sécurisés, gestion de la sécurité et des sauvegardes ;
- Paramétrage et mise en œuvre de la solution ;
- Formation et transfert de compétences.

Analyse succincte des consommations électriques

Les consommations électriques actuelles de la résidence ont pu être estimées à partir d'appareils de mesure mis en place in situ. Voir annexe instrumentation pour plus de détail. Ces appareils permettent de mesurer les puissances électriques appelées par postes au niveau de différents logements ainsi que les puissances électriques appelées au niveau des parties communes.

La puissance électrique nécessaire pour alimenter le chauffage de base en dalle représente la part la plus importante des consommations du bâtiment. Il fonctionne en heure creuse lors de périodes de chauffe hivernal et la puissance appelée lors du fonctionnement est de l'ordre de 500kW, ce qui est très important (Figure 10). Au vu des contraintes du projet, de la surface disponible en toitures et des dernières technologies en matière de module PV, le générateur électrique photovoltaïque envisagé et pré-dimensionné dans le cadre de nos études sera d'environ 60kWc (condition standardisée de fonctionnement et de rendement). Par principe de fonctionnement le générateur photovoltaïque serait en déphasage (jour/nuit et été/hiver) avec le chauffage de base en dalle et pas suffisamment puissant pour alimenter ce dernier. Il n'est donc pas envisageable d'utiliser la production PV pour alimenter le chauffage de base en dalle.

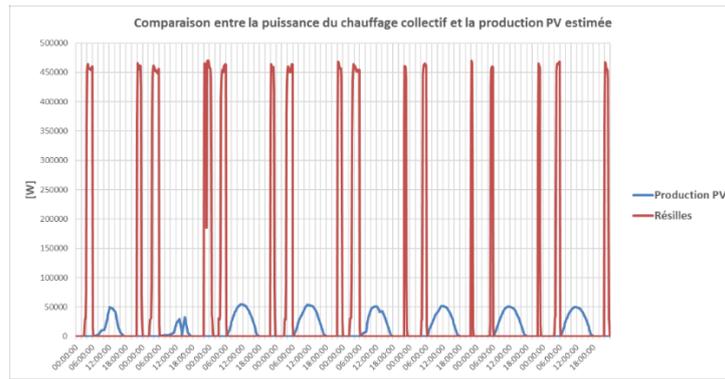


Figure 10 : Comparaison entre la puissance électrique du chauffage en dalle et la production PV estimées pour une période de chauffe

On constate en revanche qu'au niveau des consommations électriques individuelles (puissances appelées), l'ECS est le poste le plus important en volume et le plus régulier (périodicité) pour les locataires (Figure 11). On remarque également que les ballons d'ECS fonctionnent en heures creuses afin d'accumuler de l'eau chaude la nuit pour la journée. De plus, ils fonctionnent de manière constante toute l'année, quel que soit la saison, et les puissances électriques des ballons varient de 1250W à 2200W en fonction des typologies d'appartement.

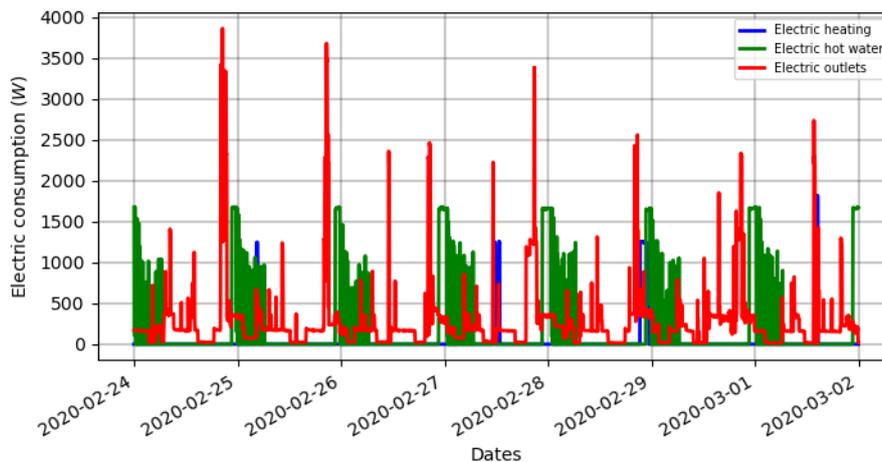


Figure 11 : Consommations électriques / App 004BE / Hiver 2020

En analysant ces données de puissances électriques appelées pour la production d'ECS on identifie clairement la marche nocturne des ballons correspondant au fonctionnement en heure creuses. Les deux figures ci-dessous (Figure 12 et Figure 13) représentent les puissances électriques appelées par l'ECS pour 7 appartements. On voit clairement que les ballons d'ECS se mettent en route vers 20h et s'arrêtent vers 4h le lendemain (sur la période considérée).

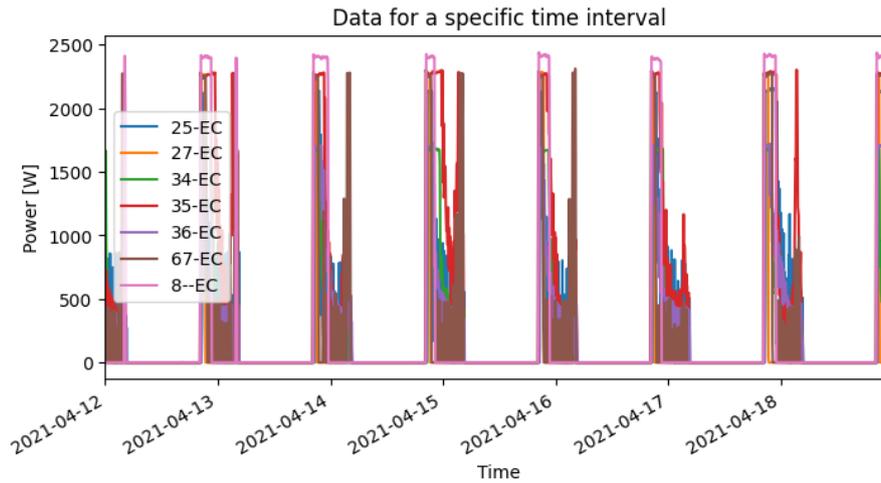


Figure 12 : Fonctionnement en heure creuse des ballons d'ECS – 1/2

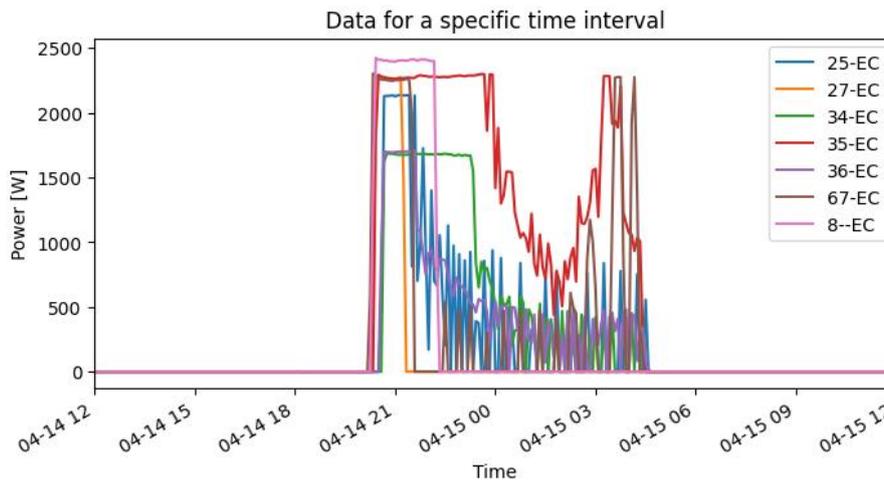


Figure 13 : Fonctionnement en heure creuse des ballons d'ECS – 2/2

Les puissances électriques appelées chaque jour pour l'ECS fluctuent beaucoup. D'un logement à un autre et d'une période à une autre les besoins varient ce qui rend difficile la prédiction individuellement. En revanche, la moyenne des puissances électriques appelées pour l'ECS par chaque logement (courbe verte en gras sur la Figure 14) est relativement constante et donc plus facilement prévisible.

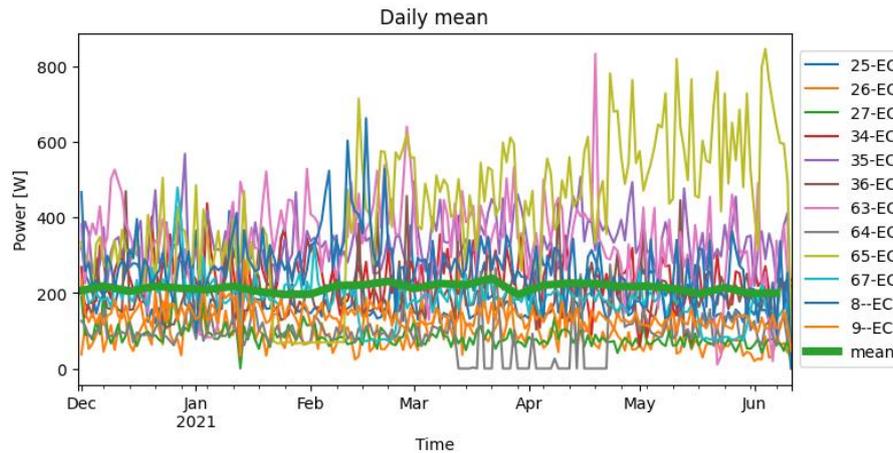


Figure 14 : Consommation électrique journalière et moyenne totale

Si l'on s'intéresse aux fréquences de marche arrêt des ballons on remarque, comme vu précédemment, que la majorité des ballons ont un fonctionnement avec option HP/HC. Cependant on constate que certains ballons conservent un fonctionnement standard qui ne tient pas compte des HC. Dans ce type de fonctionnement le ballon va maintenir en permanence une certaine température de l'eau en se mettant en marche quel que soit l'heure et le tarif de l'électricité. Cette différence de fonctionnement d'un logement à l'autre peut être due à l'option choisi par le locataire lors de la souscription de son contrat de fourniture d'électricité ou au choix d'un locataire de volontairement (ou non) basculer sont cumulus en fonctionnement standard.

En ce qui concerne les consommations volumiques d'ECS on remarque un premier pic de consommations d'eau chaude en fin de matinée et un second pic en fin d'après-midi/début de soirée (Figure 15). Globalement, les consommations d'ECS se font donc la journée hors des périodes de marche des ballons et présentent donc un déphasage avec la production d'ECS qui a plutôt lieu la nuit.

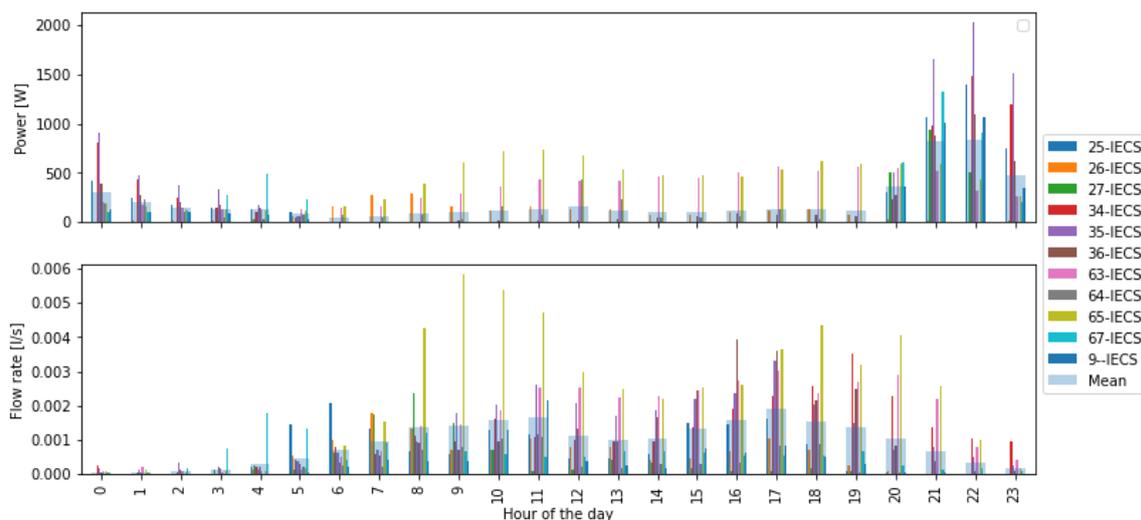


Figure 15 : Puissances électriques et consommations volumiques moyennes des ballons d'ECS par heure

Par le biais d'une extrapolation des données de mesure disponibles, les besoins électriques agrégés de l'ensemble de la résidence (excepté le chauffage de base) ont pu être estimés et représentés sur la figure ci-dessous (Figure 16). Les postes suivants sont pris en compte :

- Puissance électrique totale appelée par les 67 logements ;
- Puissance électrique totale appelée par les parties communes des 3 bâtiment.

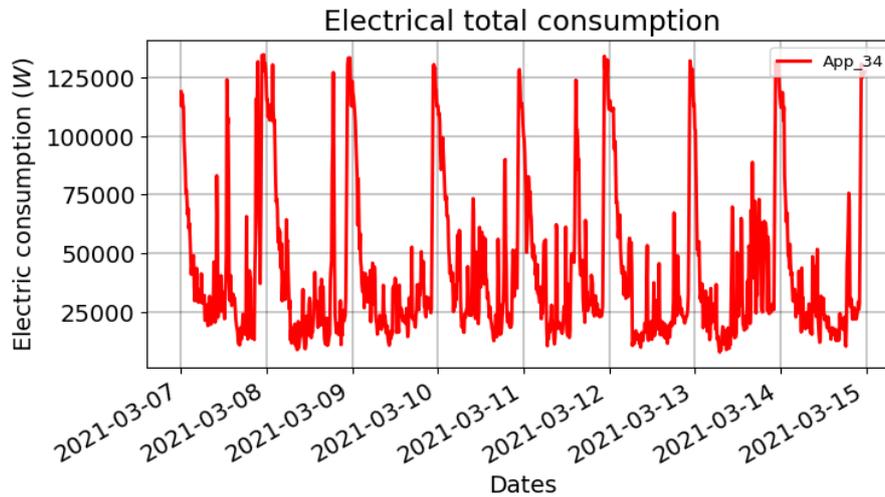


Figure 16 : Puissance électrique appelée estimées de l'ensemble de la résidence / Juin 2021

La production électrique PV prévisionnelle

Un scénario de générateur photovoltaïque a été défini après divers études. Le principe de pose des modules est présenté sur les Figure 17 et Figure 18 et les caractéristiques sont données dans le Tableau 20.



Figure 17 : Principe de fixation des modules photovoltaïques – 1/2

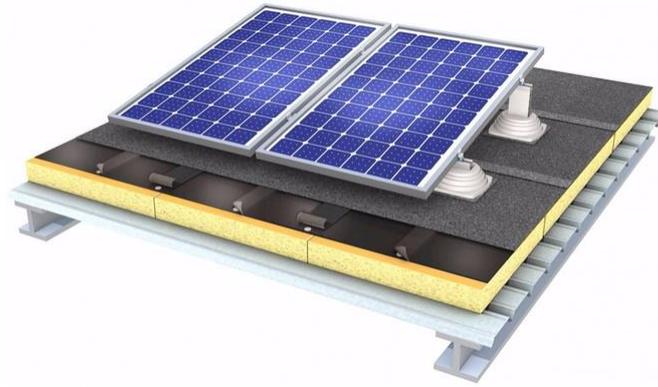


Figure 18 : Principe de fixation des modules photovoltaïques – 2/2

Tableau 20 : Caractéristiques de l'installation photovoltaïque

<p>Représentation du générateur photovoltaïque</p>	
<p>Implantation</p>	<p>Modules monocristallins avec structure sur plots</p>
<p>Orientation</p>	<p>Sud</p>
<p>Inclinaison</p>	<p>35°</p>
<p>Nombre panneaux, surface et puissance</p>	<p>163 panneaux – 270 m² – 60 kWc</p>
<p>Avantages</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tarif d'achat ≤ 100 kWc (10,23c€/kWh) • Bonne orientation • Investissement limité • Limite des coûts d'installation • Solution idéale dans le cadre d'une réfection d'étanchéité
<p>Inconvénients</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Masque proche (éléments techniques en toiture) • Surface mobilisée lors de la réfection de la membrane d'étanchéité
<p>Production électrique annuelle estimée</p>	<p>78037 kWh</p>
<p>Taux d'autoconsommation moyen estimé</p>	<p>53 % (sans optimisation)</p>
<p>Taux d'autoproduction moyen estimé</p>	<p>36 % (sans optimisation)</p>

Afin de déterminer les taux d'autoconsommations et d'autoproductions ainsi que les surplus prévisionnels, des comparaisons entre consommation et estimation de production PV ont été faites (Figure 19, Figure 20 et Figure 21). On constate qu'avec le dimensionnement fait et au vu des consommations du bâtiment, nous obtenons un très bon taux d'autoconsommation moyen de l'ordre de 80%. Grace au déploiement de la solution de pilotage, le taux d'autoconsommation pourra atteindre 100%.

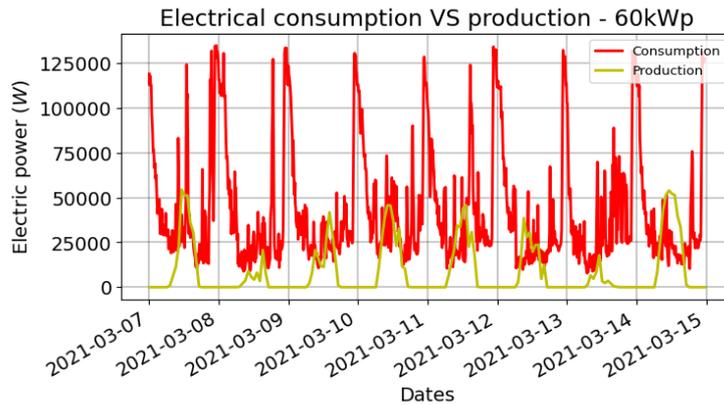


Figure 19 : Consommations électriques totales (rouge) - Estimation de productible PV pour 60 kWc (jaune)

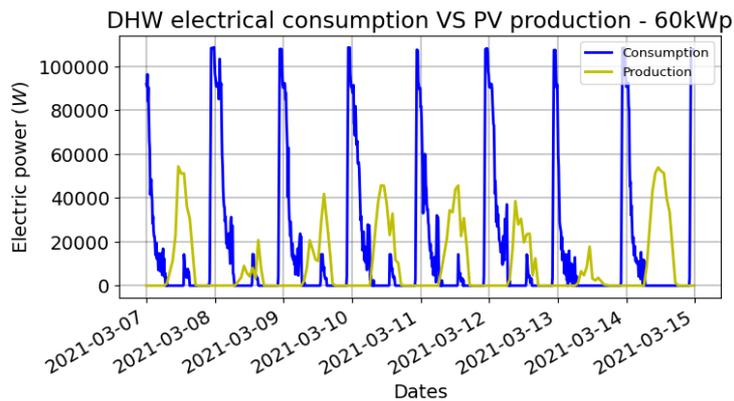


Figure 20 : Consommation électrique totale ECS (bleu) - Estimation de productible PV pour 60 kWc (jaune)

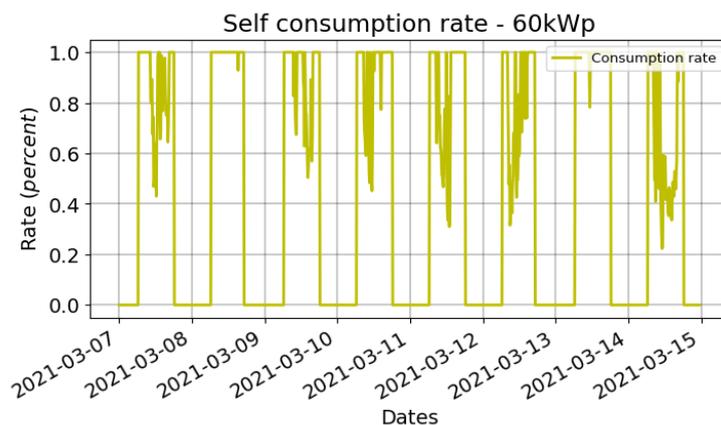


Figure 21 : Variation du taux d'autoconsommation pour une installation PV de 60kWc

Il est important de préciser que le surplus de production PV est proportionnel à la puissance PV installée. Plus la puissance PV installée est importante et plus le surplus de production sera important. Cependant la puissance maximale potentiellement installable pour le générateur PV sera limitée par plusieurs contraintes qui vont être d'ordre technique (surface disponible en toiture, charge admissible de la structure porteuse, performances caractéristiques de modules PV...), économique (coût de l'installation) ou administrative (puissance maximal autorisée dans le cadre des opérations d'ACC).

Spécifications fonctionnelles et techniques de la solution

Glossaire

Autoconsommation collective : L'autoconsommation collective repose sur le principe de la répartition d'une ou plusieurs productions d'énergie entre un ou plusieurs consommateurs proches physiquement. Quel que soit le type d'installation photovoltaïque — autoconsommation individuelle, collective ou vente totale — les électrons se déplacent de la même manière dans le réseau électrique, c'est à dire du lieu de production vers le lieu de consommation le plus proche. L'autoconsommation collective n'est donc pas un mode de répartition physique de la production d'électricité mais bien un mode de valorisation économique, au même titre que l'autoconsommation individuelle ou la vente totale.

PMO : La Personne Morale Organisatrice est l'entité juridique, association, copropriété ou coopérative qui représente l'ensemble des producteurs et consommateurs d'une opération d'ACC. Tous les participants à cette opération d'autoconsommation collective doivent en être adhérents. Les bailleurs sociaux bénéficient par ailleurs d'un cadre de mise en œuvre simplifiée de la constitution de la Personne Morale Organisatrice. Un bailleur social peut être lui-même la Personne Morale Organisatrice dans une opération le rassemblant avec ses locataires. Ses rôles sont de regrouper et faire le lien entre les producteurs et les consommateurs, signer une convention d'autoconsommation avec Enedis et déterminer les clés de répartition de l'électricité produite et les transmettre à Enedis.

HP : Heures pleines

HC : Heures creuses

PV : Photovoltaïque

PDL : Point de Livraison correspondant au compteur électrique

Taux d'autoconsommation : Rapport entre production utilisée et production totale

Taux d'autoproduction : Rapport entre production utilisée et consommation totale

Coefficients ou clés de répartition : Définis par la personne morale organisatrice (PMO), les coefficients de répartition indiquent dans quelles proportions l'électricité injecté sur le réseau doit être répartie entre les différents consommateurs. Cette répartition peut être :

- Statique (ou fixe) : à chaque consommateur est associé un coefficient statique qui peut être défini au prorata de l'investissement, de la surface du logement, de la consommation théorique des participants, etc. ;
- Dynamique par défaut : la clef est calculée pour chaque pas de temps de mesure, au prorata de la consommation réelle de chaque consommateur ;
- Dynamique par formule de calcul : une formule de calcul définie par la PMO permet de répartir la production et les surplus entre les consommateurs sur un pas de temps de 30 mn.

Répartition de la production : Le gestionnaire de réseau de distribution analyse à chaque pas de temps de mesure (10 ou 30 minutes) la production totale (somme des productions) et la consommation totale de l'opération et évalue :

- La part de production autoconsommée dans le cadre de l'opération ;
- La part de production non consommée et donc en surplus.

La part autoconsommée est répartie à chaque consommateur selon la clé de répartition déterminée par la PMO et transmise au gestionnaire de réseau. La PMO peut opter pour une clé de répartition fixe ou dynamique.

Le surplus de production doit être rattaché à un périmètre d'équilibre et peut être vendu dans le cadre d'une vente sur le marché ou d'un contrat de gré-à-gré.

Quote-part réelle : Quote-part de consommation électrique réellement consommé par un participant consommateur.

Quote-part calculée : Quote-part de consommation électrique calculée conformément aux clefs de répartition et pas nécessairement identique à la quote-part de consommation réelle.

Analyse fonctionnelle du besoin

Le besoin attendu dans le cadre de cette opération d'autoconsommation collective en logement social peut être représenté par l'approche global schématisé sur la Figure 22 :

- **L'environnement :** est représenté par le générateur photovoltaïque présent en toiture de la résidence et par l'ensemble des consommateurs (locataires et bailleur) qui vont pouvoir bénéficier de cette production locale d'énergie.
- **Les concepteurs :** sont représentés par la société IRA et ses partenaires qui vont travailler d'un commun accord à la transformation d'un besoin associé à une problématique en une solutions sous la forme d'un produit.
- **Le produit :** est représenté par une solution technique, informatique et algorithmique permettant un pilotage de la production et de la consommation en vue d'optimiser le taux d'autoconsommation et un suivi de l'opération tout au long de sa vie.

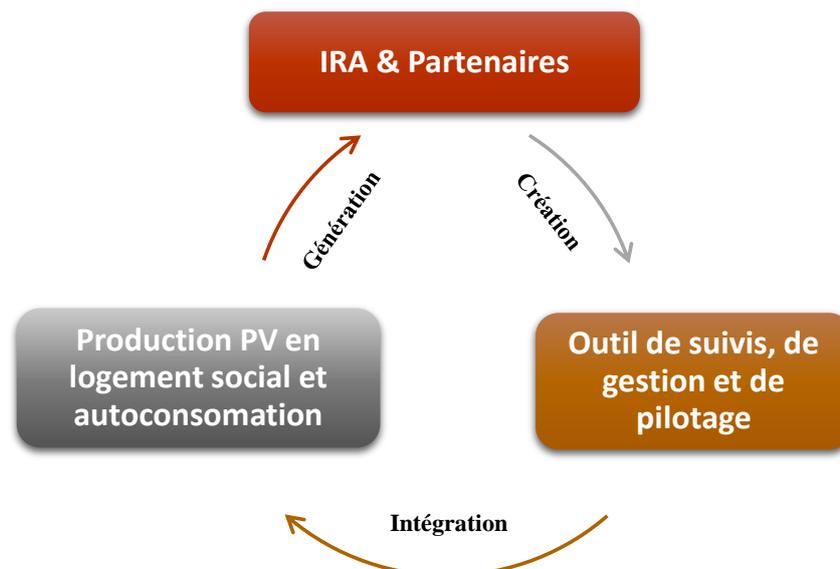


Figure 22 : Approche systémique de l'opération d'ACC

Définition de l'environnement et du contexte de la solution

Afin de définir les éléments qui vont constituer l'environnement du produit nous nous sommes intéressés à plusieurs questions.

A quoi, à qui le produit sert-il ?

La solution recherchée est un outil de gestion, de pilotage et de suivi qui doit servir à la fois à l'entreprise et ses différents services et également aux locataires participants à l'opération d'autoconsommation collective.

Dans quel but ?

Le but premier de la solution recherchée est le pilotage des consommations locales d'énergie en vue d'optimiser le taux d'autoconsommation par un ajustement du fonctionnement de la production individuelle d'ECS en phase avec la production PV disponible. Le but secondaire est le suivi à distance de l'opération d'ACC à la fois pour les consommateurs participants et le producteur propriétaire. Enfin le but tertiaire sera la gestion administrative de l'opération d'ACC vis à vis du gestionnaire de réseau et des participants consommateurs.

Sur qui et sur quoi le produit agit-il ?

La solution de pilotage agit passivement sur la production photovoltaïque et les différents postes de consommation. Elle agit ensuite activement et le plus simplement possible sur les ballons d'ECS individuel des locataires afin de réguler la production d'ECS en fonction des données de production et de consommation.

La Figure 23 est une représentation schématique de l'environnement de la solution/produit qui sera développée.

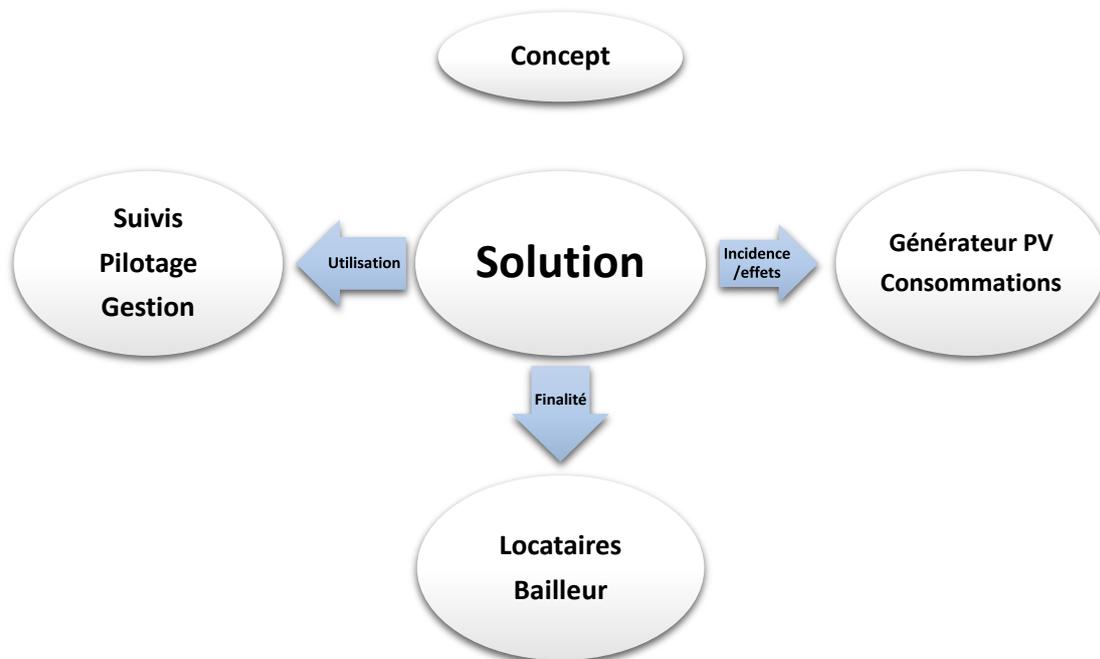


Figure 23 : Définition de l'environnement du produit

Le périmètre de l'opération d'ACC comporte ainsi quatre parties prenantes (Figure 24) :

- **Le producteur d'électricité photovoltaïque (et PMO)** : Immobilière Rhône Alpes propriétaire des installations photovoltaïques également personne morale organisatrice ;
- **Les consommateurs** : à la fois les locataires à travers leurs consommations individuelles et Immobilière Rhône Alpes et les locataires à travers les consommations des parties communes ;
- **Le gestionnaire de réseau** : ENEDIS ;
- **Le fournisseur d'électricité réseau** : EDF, Engie, TotalEnergies, Enercoop, Direct Energie...

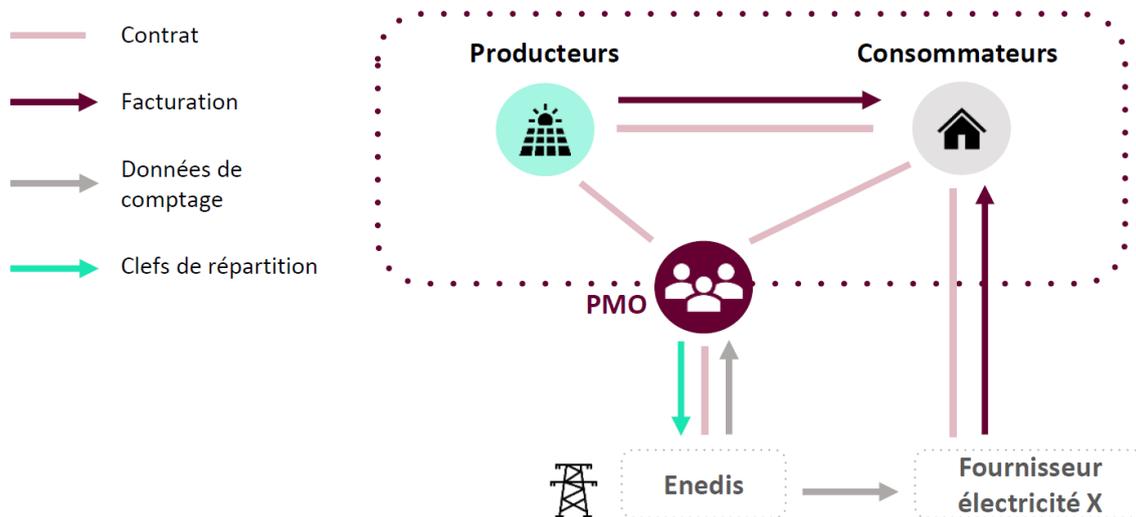


Figure 24 : Schéma de principe des échanges contractuels, financiers et opérationnels

Diagramme fonctionnel

Les objectifs précédemment énoncés permettent de définir plus précisément l'environnement de la solution de pilotage et de suivis :

- Le générateur photovoltaïque produisant localement de l'électricité ;
- Les consommations électriques individuelles des locataires (chauffage, ECS, Prises...) ;
- Les consommations électriques communes de la résidence (éclairage, ascenseur, VMC) ;
- La PMO (personne morale organisatrice) IRA-3F bailleur social et ses différents services, également propriétaire des installations photovoltaïques ;
- Le Prestataire, support technique et informatique pour le développement et le suivi de la solution de pilotage et de gestion de l'opération d'ACC ;
- Les locataires de la résidence en tant que client et participant physique à l'opération d'ACC et bénéficiaires de l'électricité localement produite ;
- ENEDIS en tant que gestionnaire de réseau et responsable de l'affectation des quotes-parts de production à chacun des participants consommateurs par le biais des compteurs communicant et des clefs de répartition ;
- Les ballons d'ECS des locataires utilisés comme moyen de stockage du surplus de production PV.

Cette démarche d'analyse fonctionnelle a été menée et construite de manière collective en réunissant les personnes représentant tous les services et tous les métiers concernés par le projet et la solution ambitionnée.

Le diagramme fonctionnel schématisé sur la Figure 26 (Annexe) permet une représentation simplifiée de la réalité et une description du fonctionnement. Les formes simples sont ainsi utilisées pour représenter les éléments étudiés et des flèches permettent de relier ces éléments entre eux.

Arborescence et description des fonctions attendues

L'arborescence fonctionnelle présentée sur la Figure 27 (Annexe) présente les fonctions attendues de la solution de pilotage et de suivi de l'opération d'autoconsommation collective.

Les fonctions principales décrivent les objectifs globaux que doit permettre d'atteindre la solution.

Les fonctions de services expriment les actions que doit réaliser le produit (la solution) avec son environnement pour remplir les objectifs globaux et satisfaire le besoin. Ces fonctions de services expriment uniquement la finalité.

Les fonctions techniques qui sont nécessaires aux fonctions de services et guident les concepteurs dans la recherche des solutions technologiques.

Le Tableau 21 présente la description détaillée des fonctions techniques.

Tableau 21 : Descriptions détaillées des fonctions techniques

Descriptions détaillées des fonctions techniques	
FT1	Mesurer les consommations électriques des parties communes sur 3 compteurs d'électricité général situés au RDC de chaque bâtiment. Collecter l'information de façon continue.
FT2	Mesurer les consommations électriques individuelles de chaque logement de la résidence. Plus précisément les consommations électriques liées au chauffage, à l'ECS, aux prises et les consommations totales. Collecter l'information de façon continue.
FT3	Mesurer en continue les caractéristiques du générateur photovoltaïque en toiture. La mesure peut être prise directement via l'onduleur et doit permettre de connaître à minima la production instantanée d'électricité. L'idéal serai de pouvoir également remonter des informations techniques permettant un suivi de l'état général du générateur PV afin d'envoyer des alertes en cas de dysfonctionnement.
FT4	Mesurer en continue les consommations volumiques individuelles d'ECS au niveau de la sortie eau chaude des ballons d'ECS. Il sera nécessaire pour cela d'installer des compteurs volumétriques en sortie eau chaude de chaque ballon avec capteurs et émetteurs d'impulsion (d'autres solutions peuvent être proposées sachant que les ballon d'ECS vont être remplacés). Ces mesures permettront entre autres de connaître l'état du stockage dans les ballons afin d'optimiser la distribution du surplus d'électricité. Mais également à plus long terme de développer des modèles de comportement afin de piloter les ballons de façon prédictive.
FT5	Les ballons d'ECS actuels seront remplacés et des propositions de produits compatibles avec EcoTouch peuvent dès maintenant être faites par le Prestataire. Piloter la marche/arrêt des ballons d'ECS via un actionneur placé en amont du contacteur HC/HP et commandé par EcoTouch. L'installation doit permettre de forcer la production d'ECS et donc la consommation électrique aux moments où la production PV est supérieure à la consommation totale du bâtiment. L'objectif est de ne pas réinjecter de surplus dans le réseau électrique afin d'optimiser le taux d'autoconsommation. Dans les cas où il n'y aura pas de surplus de production PV les ballons d'ECS devront fonctionner, selon l'option tarifaire du locataire, en HC (heures creuses).
FT6	Les radiateurs rayonnants actuels seront remplacés et des propositions de produits compatibles avec EcoTouch peuvent dès maintenant être faite par le Prestataire. À la suite du remplacement des radiateurs il sera souhaité de les piloter par zone en mettant en place des actionneurs de puissance sur chaque radiateur ainsi que des capteurs de température dans chaque zone.
FT7	Des capteurs de température seront mis en place dans les différentes pièces afin de relever les températures des différentes zones et permettre ainsi le pilotage des radiateurs. Les capteurs de température devront être disposés de façon durable, discrète et le plus autonome possible en énergie.

FT8	Les locataires auront le choix des températures de consignes pour chaque zone dans la limite d'une plage de température spécifique et à définir. Ce choix devra se faire via une commande murale si possible sans fil.
FT9	Afin de gérer la coupure centralisée de circuits électriques spécifiques, l'information de présence ou d'absence des locataires devra être relevée via un interrupteur positionné à l'entrée du logement.
FT10	Gérer la coupure centralisée et automatique de circuits électriques spécifiques pendant les absences. Il pourra s'agir du circuit d'éclairage, de chauffage ou de prises spécifiques.
FT11	<p>Une adaptation de la plateforme bailleur en adéquation avec les besoins de projets d'autoconsommation collective en logement social est souhaitée. Des propositions pourront être faite en ce sens. Il serait intéressant d'avoir par exemple une organisation de l'espace bailleur en parties :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Suivi technique (informations sur le générateur photovoltaïque, les consommateurs et les consommations, les performances du pilotage et de l'autoconsommation en général...); - Suivi administratif (gestion des coefficients de répartition, des participants à l'opération, des PRM, génération automatique des documents types à transmettre à ENEDIS pour la communication de données concernant le périmètre des participants à l'opération d'autoconsommation collective...); - Suivi financier (Collecte des factures électriques pour les parties communes, ... encore à définir précisément). <p>Dans le cadre de la FT11 il doit être possible, dans la partie administrative, d'ajouter ou de retirer un PRM (entrée/sortie de participants) et de générer automatiquement le document type (conformément à la note Enedis-FOR-CF 01E - Annexe 2) à transmettre à ENEDIS pour la mise à jour du périmètre de l'opération d'ACC.</p>
FT12	À la suite de l'adaptation de la plateforme bailleur pour des projets d'autoconsommation collective et à l'organisation de cette plateforme en 3 parties (décrites ci-dessus), il est souhaité la possibilité d'entrer et de modifier (dans la partie administrative) la valeur des coefficients statiques de répartition de la production autoconsommée entre les différents consommateurs. Ces coefficients faisant parties des données à transmettre à ENEDIS lors de mise à jour du périmètre de l'opération d'ACC.
FT13	Relever les informations relatives au chauffage collectif en dalle (puissances électriques appelées, températures de résilles, ...) et les afficher sous forme de graphique où la période d'affichage est définissable. L'objectif est de pouvoir consulter/vérifier les paramètres de fonctionnement du chauffage et d'avoir un suivi de ce dernier afin d'identifier d'éventuels dysfonctionnement. La possibilité d'extraire les données mesurées au format .xlsx est souhaitable.
FT14	De façon identique à la FT13, relever les informations relatives aux VMX de la résidence (puissances électriques appelées, delta de pression, ...). L'objectif est de pouvoir consulter/vérifier les paramètres de fonctionnement des VMC sur une même plateforme et d'avoir un suivi afin d'identifier d'éventuels dysfonctionnement.
FT15	Calculer de façon périodique, à partir des données mesurées les taux d'autoconsommation et d'autoproduction. Le taux d'autoconsommation représente le rapport entre la production utilisée et la production totale. Le taux d'autoproduction représente le rapport entre la production utilisée et la consommation totale.
FT16	Dans la partie "Suivi technique" il est souhaité entre autres un affichage graphique des données de productions, de consommations et d'autoconsommations. A minima il est souhaité la présence de courbes temporelles représentant la production et l'autoconsommation d'une part et la consommation et l'autoconsommation d'autre part. Également des diagrammes en secteur (ou anneau) représentant les proportions de production, de consommation et la répartition de la production entre les différents consommateurs.

FT17	Il est demandé également d'avoir la possibilité, à travers la partie "Suivi technique" de la plateforme bailleur, d'extraire des données de mesure sur des périodes choisies au format .xlsx
FT18	Pour chaque consommateur au sens large (locataires via leur application et bailleur via la plateforme) il doit être possible de consulter la part réelle et conventionnelle d'énergie électrique consommée provenant du réseau et de la production PV. La part réelle étant liée à la réalité des consommations vis-à-vis de la production tandis que la part conventionnelle est liée aux coefficients statiques de répartition définis par le bailleur. Il est souhaité que le bailleur ait accès sur la plateforme aux données individuelles de chaque locataire ainsi qu'aux données globales agrégées.
FT19	Il est souhaité également la mise en place d'alertes et éco-conseils personnalisés pour le locataire via son application. Ces alertes peuvent par exemple indiquer des dysfonctionnements d'équipement, ou donner des suggestions d'habitude pour optimiser l'autoconsommation ou réduire ses consommations énergétiques.

Définition des contraintes

Contraintes vis-à-vis de la RGPD

Les locataires consommateurs acceptant de participer à l'opération d'autoconsommation collective devront signer un accord dans lequel il leur sera demandé leur consentement au traitement de leurs données personnelles. Les données personnelles récoltées devront par conséquent être protégées et traitées de manière sécurisée.

Couverture prioritaire des consommations électriques communes

Le pilotage des ballons devra se faire qu'en cas de surplus de production photovoltaïque. Ce surplus de production photovoltaïque sera calculé par la différence entre les consommations totales du bâtiment (parties communes + individuelles) et la production PV totale. Ainsi il faudra s'assurer que les besoins électriques des parties communes soient couverts en priorité avant de mettre en marche les ballons d'ECS pour absorber un éventuel surplus.

Pas de temps de mesure et de calcul cohérent avec le pas de temps de mesure d'ENEDIS

Le pas de temps sur la base duquel seront faits les mesures et les calculs liés au pilotage devra correspondre, au maximum, au pas de temps utilisé par ENEDIS pour le calcul des courbes de mesures. Ce pas de temps de mesure pourra être de 10 minutes pour les Consommateurs et Producteurs avec puissance supérieure à 36 kVA.

Mise en marche volontaire des ballons d'ECS uniquement en cas de surplus de production

Il faudra veiller à ce que les ballons d'ECS ne se mette en route en heure pleine que s'il y a un surplus de production photovoltaïque et dans la limite du surplus disponible afin de ne pas engendrer de surcoût de consommation pour les locataires.

Pilotage optimal des ballons

Le pilotage des ballons d'ECS devra être optimisé et tenir compte des différentes puissances disponibles ainsi que de la capacité de stockage des ballons au regard des soutirages d'ECS déjà fait par les locataires. La répartition devra être la plus égalitaire possible entre les différents consommateurs et tenir compte des besoins en eau chaude de chacun d'entre eux.

Contrainte de réseau informatique numérique sans fil

Il ne devra pas y avoir de réseaux filaires allant des parties communes vers les logements afin de limiter la complexité des travaux. Le réseau informatique numérique reliant les systèmes entre eux au sein des

bâtiments devra être de type sans fil et à minima sans fil entre les partie communes et les logements. Un réseau Wifi indépendant et couvrant l'ensemble des trois bâtiments sera privilégié.

Labélisation

Il ne sera pas recherché de label spécifique pour ce projet (R2S-4-GRIDS ou autre). Pas de contraintes particulières à ce niveau.

Implantation en site occupé

Le développement de la solution et des systèmes devra être pensé pour une implantation en site occupé.

6. Bénéfices attendus de la solution développée

Bénéfices pour les locataires

Le pilotage des ballons d'eau chaude sanitaire, en adaptant la production d'eau chaude aux usages des locataires permettra, tout d'abord, l'amélioration des performances énergétiques de la production d'eau chaude. Cette économie d'énergie se répercute sur le coût de l'énergie qui est ainsi diminué. Cette adaptation aux usages des locataires permet de limiter les situations où la production d'eau chaude n'est pas en adéquation avec son usage. L'absence d'eau chaude lorsqu'elle est appelée est une source d'insatisfaction pour les locataires.

Bénéfices pour les opérations d'autoconsommation

Le projet InER permettra le développement des opérations d'autoconsommation sur les constructions neuves et sur le patrimoine existant. L'optimisation du taux d'autoconsommation permet une optimisation financière de ces opérations en limitant les aléas de la revente. Cet outil technologique permet donc de faire émerger un modèle économique viable pour les opérations d'autoconsommation qui participe à la maîtrise des charges des locataires.

Le développement de l'autoconsommation sur du logement social permet, à travers des coefficients de répartition de l'énergie produite, de s'assurer que cette répartition soit équitable, c'est-à-dire en fonction des besoins. Cela permet d'éviter de favoriser la consommation excessive d'énergie et donc de participer à la limitation de l'effet rebond.

Bénéfices pour la transition énergétique

Dans le cadre de la transition énergétique et dans les bâtiments d'habitation, il est recherché une diminution des besoins énergétiques, une amélioration des performances des équipements (pour éviter les pertes) et le recours à des énergies renouvelables.

La solution développée doit permettre d'agir :

- Sur l'amélioration des performances des équipements : la production de l'eau chaude est rapprochée temporellement de son usage ;
- Le recours à la ressource solaire qui est renouvelable.

L'intérêt particulier du système développé est d'utiliser les ballons d'eau chaude sanitaire comme stockage de l'énergie électrique produite. L'avantage est de recourir, pour le stockage, à de l'eau qui est une ressource renouvelable. Cet avantage est d'autant plus intéressant que l'eau qui sert pour le stockage a déjà un usage sanitaire. Ainsi le stockage est assuré par une ressource renouvelable en réutilisation d'une fonction existante. Il n'y a donc pas de prélèvement de la ressource de stockage.

7. Conclusion

Face à la problématique de la rénovation des bâtiments existants et au choix complexe de solutions potentielles pour atteindre des objectifs multiples et rendre une action de réhabilitation durable, nous avons choisi de mettre en œuvre une méthodologie d'analyse multicritères.

Dans le cadre de l'élaboration de cette méthodologie d'analyse multicritères, nous avons défini quelques critères caractéristiques d'une opération de réhabilitation de logements sociaux. Ces critères reflètent les enjeux de la rénovation énergétique pour les propriétaires de logements sociaux en fonction des contraintes des pouvoirs publics et des locataires tout en cherchant à respecter les budgets alloués et la nécessité d'avoir des phases de travaux les moins lourdes possibles.

Pour permettre aux décideurs de définir leurs préférences en termes de pondération des critères, la méthode de pondération SRF, spécifique aux méthodes de surclassement MCA, a été utilisée et mise en œuvre à travers un outil. L'outil développé suit exactement la procédure de la méthode SRF et permet, à travers des listes déroulantes, de classer les critères par ordre croissant d'importance. Cela a permis une pondération précise malgré le nombre de critères d'évaluation sélectionnés.

Pour la construction des scénarios de rénovation, nous avons introduit et utilisé une méthode originale consistant à définir des actions de base correspondant à des sous-scénarios pour chaque item. Puis nous avons construit des scénarios globaux de rénovation à partir de ces actions de base.

Pour évaluer ces scénarios globaux quantitativement et qualitativement au regard des différents critères retenus, nous avons travaillé en étroite collaboration avec différents spécialistes, chacun ayant son propre domaine d'expertise. D'importantes quantités de données, de formes et de structures différentes, ont ainsi été traitées pour calculer et juger de la performance des différentes solutions envisagées. Une méthode de notation qualitative a également été utilisée pour comparer les actions individuelles afin de donner une note globale à chaque scénario.

Un aspect original de cette analyse multicritères a également été la construction de scénarios caractéristiques, caractérisant les catégories de classement, de manière statistique à partir des évaluations des différents scénarios. L'objectif était d'obtenir une dispersion homogène des scénarios autour de ces scénarios caractéristiques, pour chaque critère. Cette stratégie a permis d'obtenir un premier classement relatif des scénarios, qui donne une première vision globale, moins figée, de la performance de chaque scénario.

Après cette investigation et analyse et à la suite de l'application pratique de la méthodologie dans un logement collectif, il est possible d'établir un premier retour d'expérience.

Tout d'abord, nous constatons que la méthodologie proposée dans cet article serait coûteuse à déployer à grande échelle et sur de nombreuses résidences aux caractéristiques différentes. Les études et analyses, réalisées afin de construire la matrice de décision, présentent un coût d'étude et d'ingénierie important, proportionnel au nombre de scénarios à évaluer et au nombre de critères à étudier.

Un temps d'analyse important doit également être considéré pour réaliser les différentes études, évaluer les scénarios et synthétiser les résultats. Selon la quantité et la complexité des éléments à analyser, ce temps peut être de 2 à 4 mois pour un projet comme celui présenté.

Une collaboration efficace entre les parties prenantes est également essentielle pour mener à bien ce type d'analyse multicritères. En fonction des critères définis, il peut être nécessaire de faire appel à différents domaines d'expertise, chacun étant lié à l'évaluation des scénarios. Cette interdisciplinarité nécessite une bonne collaboration entre les parties prenantes et le décideur.

La méthodologie développée dans le cadre de ce projet a finalement permis de répondre à la problématique du « Choix » en accompagnant un acteur majeur de la rénovation énergétique sur les solutions envisageables pour son patrimoine immobilier.

L'intérêt principale de la méthodologie mise en place est sa reproductibilité ainsi que son adaptabilité. Il a ainsi été possible d'identifier précisément et dans la phase d'étude, les solutions aux meilleurs potentiels. Cette identification argumentée et vérifiée par des analyses et études d'ingénieries a permis d'aiguiller la société IRA dans le choix du scénario de rénovation le plus intéressant du point de vue de ses objectifs et contraintes.

Le Projet InER a également permis l'identification de solutions nouvelles, pertinentes et efficaces vis-à-vis de la problématique de l'autoconsommation solaire photovoltaïque et du déphasage entre production et consommations. Un des freins technique et économique principale de ce type de dispositif réside dans le déphasage entre la production photovoltaïque et les consommations et dans la nécessité d'utiliser un moyen de stockage souvent coûteux et à fort impact environnemental. La solution de stockage et de pilotage mise en place dans le Projet InER répond parfaitement à cette problématique en apportant un résultat remplissant les objectifs et s'affranchissant des contraintes auxquelles sont confrontés beaucoup de projet d'autoconsommation collective.

8. Perspectives

Dans un premier temps, un retour d'expérience après travaux est attendu. Celui-ci permettra d'analyser l'efficacité de la solution déployée et la pertinence de la méthodologie d'analyse multicritère mise en place. Les mesures qui seront faites par les appareils de pilotage permettront d'analyser avec précision les performances du pilotage et de l'optimisation. De même, les bénéfices pour les locataires pourront être mesurés. Ce retour d'expérience permettra également d'identifier les éventuels problèmes ainsi que les difficultés à résoudre lors de la reproduction de la solution sur d'autres résidences.

Étant donné les besoins, dans le cadre de la thèse, de nouvelles connaissances et contenus scientifiques, la méthodologie d'analyse multicritère mise en place a été développée sur la base d'une méthode existante à laquelle ont été apportés des améliorations majeures. Ce développement a été réalisé avec des outils de R&D pas nécessairement exploitables de manière opérationnelle par un utilisateur lambda. Une transposition de la méthode sur un outil plus accessible sera donc une perspective de travail future afin de permettre à un plus grand nombre l'utilisation de cette méthodologie d'aide à la décision développée pour le choix de scénarios de rénovation énergétique.

Une troisième perspective consisterait à optimiser le dimensionnement de la production photovoltaïque et de la production d'ECS en vue d'augmenter le surplus de production tout en continuant d'assurer la capacité d'absorption à 100% dans les ballons d'ECS. Cette perspective d'amélioration est bien entendu relative aux opérations d'autoconsommations collectives employant le même type de solutions de pilotage et de stockage. Elle permettrait ainsi de diminuer la taille des ballons d'ECS, d'augmenter la production et le bénéfice pour les locataires et d'améliorer les performances du bâtiment du point de vue énergétique et environnemental.

Une dernière perspective d'amélioration se trouve dans le pilotage du stockage et des ballons d'ECS. Il pourra être envisagé la mise en place d'un algorithme intelligent de pilotage capable d'apprendre et d'identifier le comportement des usagers. Le pilotage de la production d'ECS pourrait ainsi être fait de manière optimale en fonction d'une part de la production photovoltaïque et d'autre part des besoins de locataires. Ceci dans un but d'amélioration du confort.

Ce travail de thèse a par ailleurs débouché sur deux autres thèses au laboratoire CETHIL de l'INSA Lyon.

Une première qui étudie les possibilités de l'analyse multicritères pour la rénovation des bâtiments par une méthode d'inférence statistique dite « Inférence bayésienne ». L'intérêt de cette approche étant la possibilité de prendre en compte les incertitudes et imprécisions dans l'évaluation des scénarios de rénovation.

Une seconde qui étudie des possibilités en termes de pilotage basé sur la « Commande prédictive ». L'objectif étant de mettre en place des modèles de prédiction de la production photovoltaïque basé sur les prévisions météo et de prédiction des besoins et consommations d'ECS basée sur les mesures, en vue d'optimiser le pilotage des systèmes.

Annexes

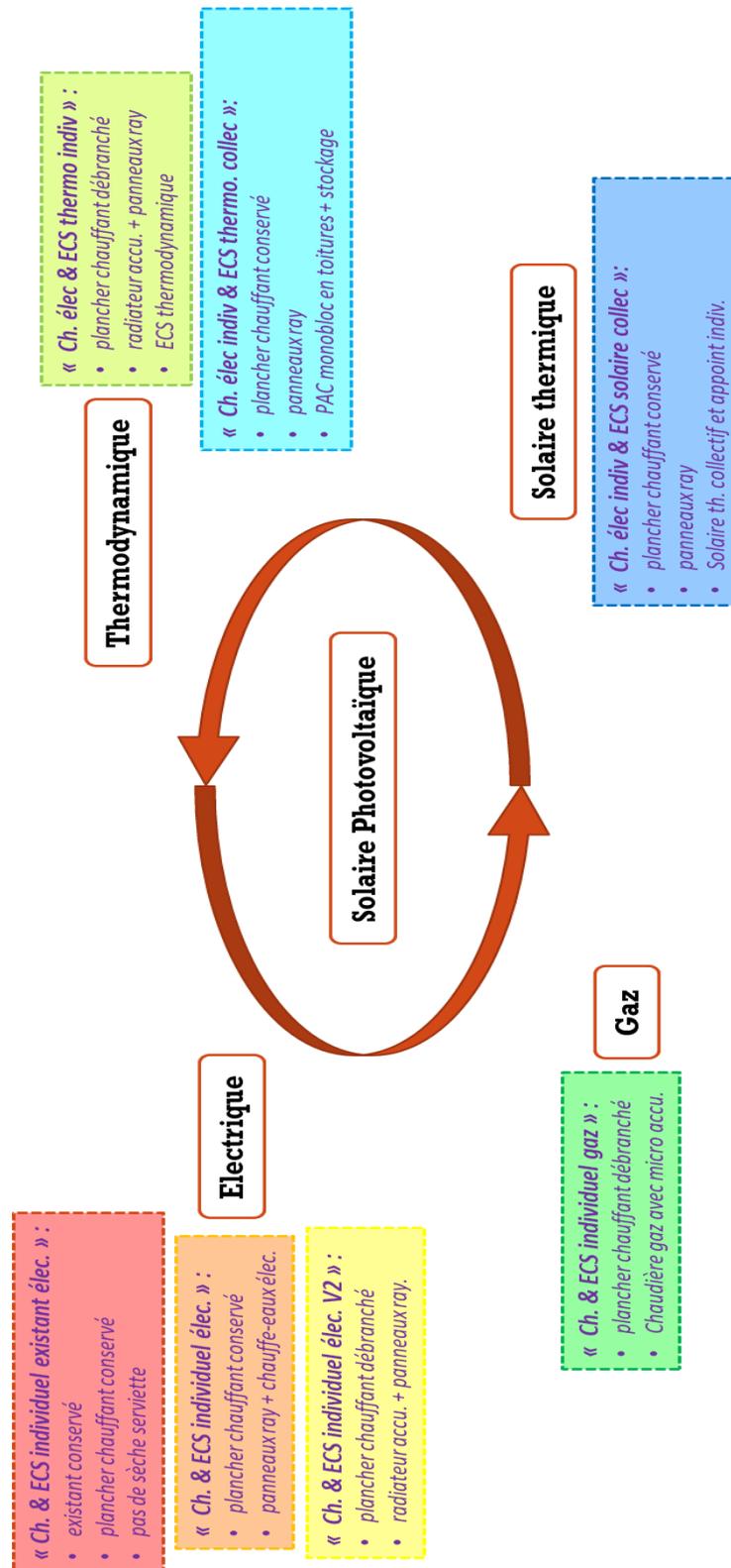


Figure 25 : Illustration des différents scénarios globaux de rénovation construits à partir d'actions élémentaires

Tableau 22 : Matrice de performances des différents scénarios de rénovation

Scénarios	Economiques					Techniques					Sociaux					Environnementaux		
	€1.1 [€ HT]	€1.2 [€ HT]	€1.3 [€ HT]	€1.4 [€ HT]	€1.5 [€HT/(kwh/m ² .an)]	€2.1 [5]	€2.2 [OUI/NON]	€2.3 [5]	€2.4 [5]	€3.1 [€ HT]	€3.2 [5]	€3.3 [5]	€3.4 [5]	€4.1 [kwh/m ² .an]	€4.2 [Tonne de CO2/an]	€4.3 [km]		
S _{1.1}	0	1757134	0	82701	0	5.00	OUI	4.38	3.57	368	0.00	5.00	4.00	0	0	0		
S _{1.2}	1008654	551661	952088	41346	5933	3.33	OUI	5.00	3.57	182	2.78	5.00	4.00	170	65	418		
S _{1.3}	1260874	711361	991697	36119	6591	3.00	OUI	5.00	3.57	159	3.33	5.00	4.00	191	74	690		
S _{1.4}	905165	551661	917604	42268	5457	3.67	OUI	5.00	3.57	186	2.22	5.00	4.00	166	64	418		
S _{2.1}	1239757	551661	955885	40971	6771	2.33	OUI	4.38	4.29	168	4.44	4.00	4.00	183	71	2368		
S _{2.2}	1397247	625566	996168	28230	6736	1.67	OUI	3.75	3.57	141	4.44	4.00	4.00	207	80	2448		
S _{2.3}	1636981	785266	1035489	23290	7185	1.33	OUI	3.75	3.57	118	5.00	4.00	4.00	228	88	2720		
S _{2.4}	1282394	390966	995521	28762	6255	2.00	OUI	3.75	3.57	144	3.89	4.00	4.00	205	79	2448		
S _{3.1}	1344232	610011	957187	41692	7140	2.00	OUI	4.38	5.00	162	2.22	3.00	2.00	188	73	2368		
S _{3.2}	1522330	683916	1031776	28197	7087	1.33	OUI	3.75	4.29	133	2.22	3.00	2.00	215	83	2448		
S _{3.3}	1751844	843616	1070386	23760	7526	1.00	OUI	3.75	4.29	113	2.78	3.00	2.00	233	90	2720		
S _{3.4}	1388515	449316	1030933	28758	6545	1.67	OUI	3.75	4.29	136	1.67	3.00	2.00	212	82	2448		
S _{4.1}	1531907	775596	1070213	32638	6586	1.67	OUI	3.75	5.00	114	2.22	1.00	0.00	233	90	2314		
S _{4.2}	1635756	849501	1110816	19664	6342	1.00	OUI	3.13	4.29	86	2.22	1.00	0.00	258	99	2394		
S _{4.3}	1899185	1009201	1149305	15369	6895	0.67	OUI	3.13	4.29	66	2.78	1.00	0.00	275	106	2666		
S _{4.4}	1517360	614901	1109597	20507	5980	1.33	OUI	3.13	4.29	91	1.67	1.00	0.00	254	98	2394		
S _{5.1}	1427140	787239	1124178	26341	5284	1.33	NON	2.50	2.86	164	0.56	0.00	1.00	270	5	2425		
S _{5.2}	1555978	861144	1131706	12639	5229	0.67	NON	1.88	2.14	135	0.56	0.00	1.00	298	33	2505		
S _{5.3}	1796800	1020844	1204438	10007	5867	0.33	NON	1.88	2.14	113	1.11	0.00	1.00	306	50	2777		
S _{5.4}	1492598	626544	1131267	12444	5027	1.00	NON	1.88	2.14	137	0.00	0.00	1.00	297	32	2505		
S _{6.1}	1372026	811447	1030582	35809	6507	1.67	OUI	3.13	2.86	138	3.89	5.00	5.00	211	81	2618		
S _{6.2}	1526016	885352	1071164	22827	6466	1.00	OUI	2.50	2.14	110	3.89	5.00	5.00	236	91	2698		
S _{6.3}	1717070	1045052	1109732	18439	6767	0.67	OUI	2.50	2.14	90	4.44	5.00	5.00	254	98	2970		
S _{6.4}	1377529	650752	1070150	23678	5934	1.33	OUI	2.50	2.14	114	3.33	5.00	5.00	232	89	2698		
S _{7.1}	1404394	847315	995961	37880	6790	1.00	NON	0.63	0.71	142	4.44	3.00	3.00	207	80	2548		
S _{7.2}	1533952	921220	1070209	24669	6603	0.33	NON	0.00	0.00	114	4.44	3.00	3.00	232	89	2628		
S _{7.3}	1771679	1080920	1109007	20125	7057	0.00	NON	0.00	0.00	93	5.00	3.00	3.00	251	97	2900		
S _{7.4}	1432939	686620	1035825	25267	6251	0.67	NON	0.00	0.00	117	3.89	3.00	3.00	229	88	2628		

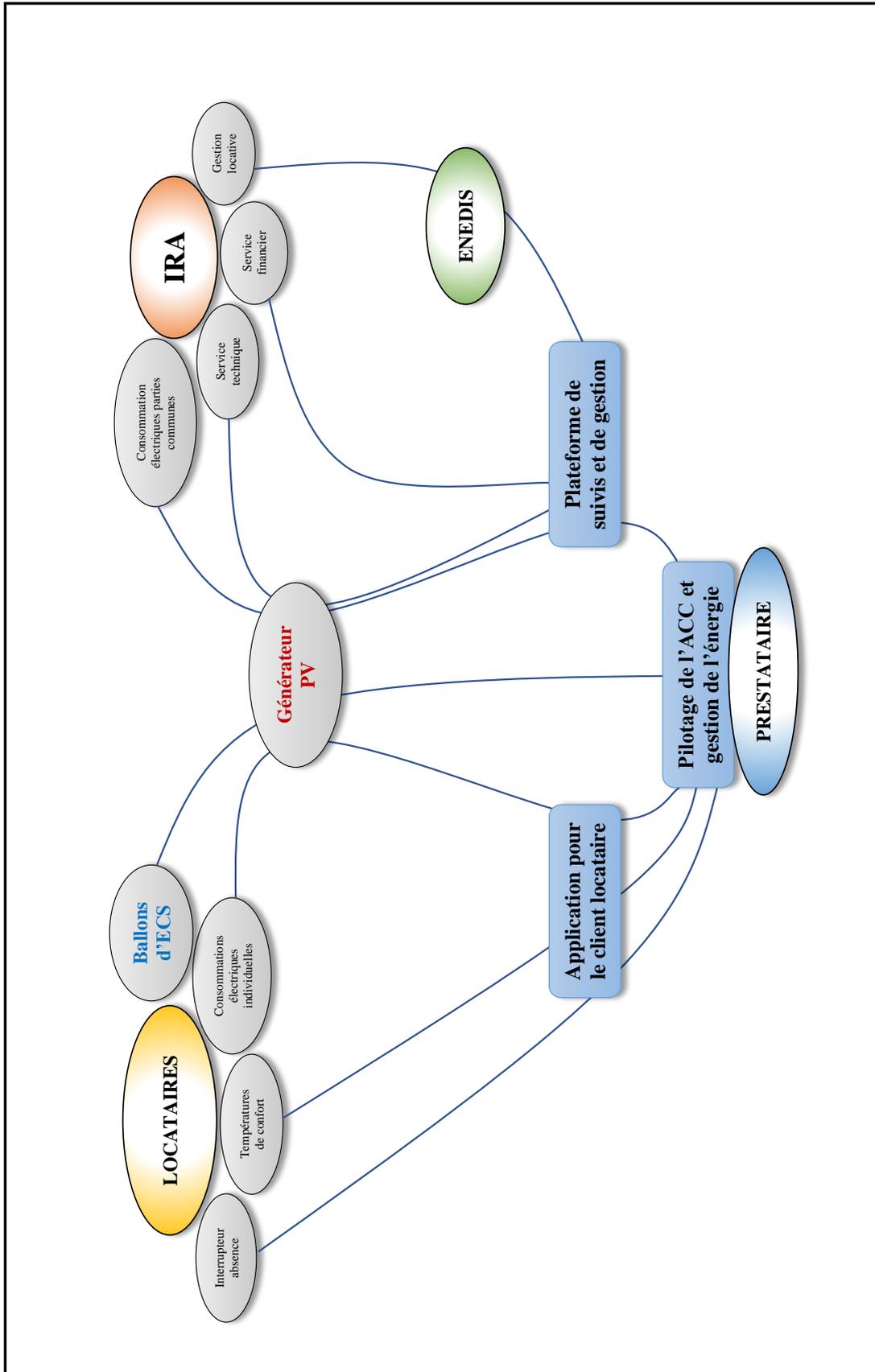


Figure 26 : Diagramme fonctionnel de la solution de pilotage

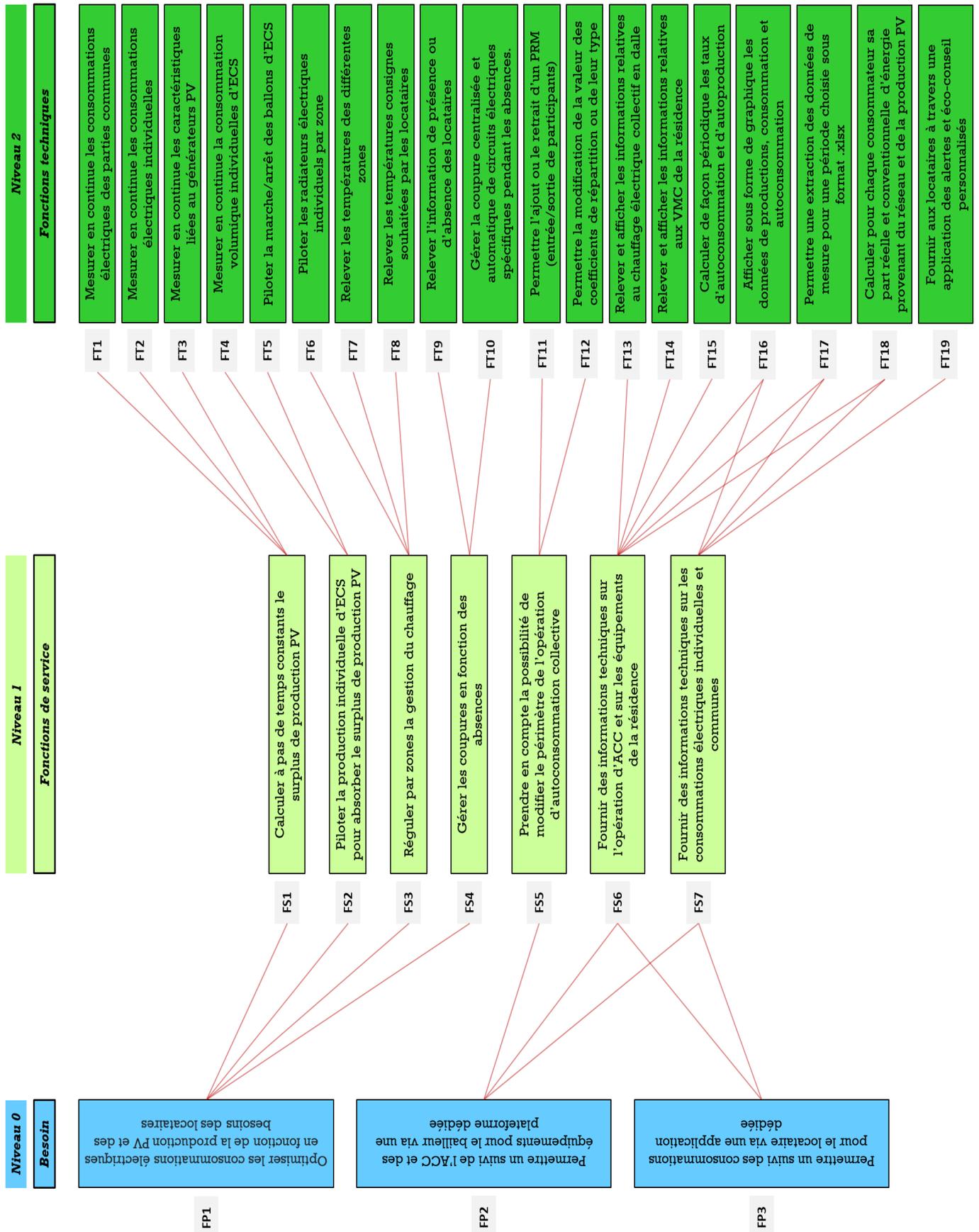


Figure 27 : Arborescence et description des fonctions attendues



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'INSA LYON, MEMBRE DE L'UNIVERSITE DE LYON.

NOM : DANIEL

DATE de SOUTENANCE : 8/12/2023

Prénoms : Souleymane

TITRE : Optimisation énergétique dans la rénovation du bâtiment

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2023ISAL0112

Ecole doctorale : Ecole Doctorale MEGA (ED 162)

Spécialité : Thermique Énergétique

RESUME :

Ce travail de thèse s'intéresse à la prise des décisions pour les choix de solutions de rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs. Comme seulement 1 % des nouvelles constructions sont ajoutées au parc immobilier chaque année en France, la rénovation est le levier principal dans la sobriété énergétique. L'objectif de la thèse est d'aider les acteurs de la rénovation énergétique à élaborer une stratégie de rénovation en utilisant une méthode d'aide à la décision adaptée. Le projet de recherche s'appuie sur un cas d'étude concret, une résidence qui comprend 67 logements répartis dans trois bâtiments.

Dans un premier temps, une étude expérimentale préliminaire est menée pour mettre en place une instrumentation dans les logements afin de collecter des données sur les comportements énergétiques et les conditions environnementales. Ensuite, une étude sur l'analyse multicritère justifie le choix de la méthode ELECTRE Tri pour aider à choisir les solutions de rénovation les plus appropriées, compte tenu de la complexité du projet. Basé sur ce choix, une méthodologie a été développée pour l'aide à la décision multicritère dans le contexte de la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs et appliquée sur un programme de rénovation d'une résidence de 67 appartements. Cette méthodologie comprend la définition de scénarios de rénovation, la pondération des critères, et l'évaluation économique des scénarios sur une période de trente ans. Les aspects originaux de la méthodologie sont la définition des familles de scénario, la création d'une matrice de décision pour la rénovation, et la prise en compte des incertitudes grâce à une approche probabiliste.

En résumé, la thèse vise à fournir une méthodologie complète et novatrice pour guider les décisions de rénovation énergétique dans le domaine des bâtiments résidentiels collectifs. Elle utilise des données concrètes, une analyse multicritère avec une famille de critères et une matrice de décision spécifique, ainsi qu'une approche probabiliste pour tenir compte des incertitudes, soulignant ainsi son originalité et son potentiel pour des applications pratiques.

MOTS-CLÉS : Thermique, Énergétique, Bâtiment, Rénovation, Analyse Multicritère, Aide à la décision, ELECTRE Tri

Laboratoire (s) de recherche : Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL)

Directeur de thèse : Christian GHIAUS

Président de jury :

Christian INARD, professeur de universités, Université de La Rochelle, rapporteur

Composition du jury :

Monika WOLOSZYN, professeure de universités, Université de Savoie Mont Blanc, rapporteuse

Gislain LIPEME-KOUYI, professeur de universités, INSA Lyon, examinateur

Christian GHIAUS, professeur de universités, INSA Lyon, directeur de thèse

Jean-Michel PARIS, Immobilier Rhône-Alpes, Groupe 3F, invité