



HAL
open science

La réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XXe siècle Projet démonstrateur sur les façades Jean Prouvé de l'immeuble Les Cèdres, 44 rue de la Favorite à Lyon

Mathilde Padilla

► To cite this version:

Mathilde Padilla. La réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XXe siècle Projet démonstrateur sur les façades Jean Prouvé de l'immeuble Les Cèdres, 44 rue de la Favorite à Lyon. Architecture, aménagement de l'espace. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon, 2022. Français. NNT : 2022ESAL002 . tel-04565941

HAL Id: tel-04565941

<https://hal.science/tel-04565941>

Submitted on 2 May 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

N° d'ordre NNT : 2022ESAL002

THÈSE DE DOCTORAT
de
L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE LYON

**École Doctorale n°483
Sciences Sociales**

Doctorat en architecture

Soutenue publiquement le 22/09/2022 par

Mathilde PADILLA

LA RÉHABILITATION DES FAÇADES LÉGÈRES DANS L'HABITAT DU XX^E SIÈCLE

Projet démonstrateur sur les façades Jean Prouvé de l'immeuble Les Cèdres,
44 rue de la Favorite à Lyon

Devant le jury composé de :

M. Franz GRAF	Professeur	EPFL	Examineur
M. Richard KLEIN	Professeur	ENSAP Lille	Rapporteur
Mme Giulia MARINO	Professeure	UC Louvain	Rapporteuse
Mme Béatrice MARIOLLE	Professeure	ENSAP Lille	Examineur
M. Simon TEXIER	Professeur	Université Picardie J. Verne	Examineur

M. Philippe DUFIEUX	Professeur	ENSA Lyon	Directeur de thèse
M. Olivier BALAY	Professeur	ENSA Lyon	Co-directeur de thèse

Résumé

L'intervention sur l'architecture du XX^e siècle constitue un défi majeur pour les professionnels qui œuvrent aux réhabilitations architecturales et urbanistiques en intégrant une démarche de transition écologique. Dans ce cadre, quels enjeux recouvrent aujourd'hui les expérimentations en architecture, considérant qu'il est essentiel de préserver les qualités historiques et patrimoniales d'un existant tout en tenant compte des conditions économiques des occupants, des exigences en termes de confort, comme de l'environnement ?

Cette recherche est conduite dans le cadre du programme scientifique de la Chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture « Habitat du Futur ». Elle poursuit l'ambition de définir d'une part une démarche expérimentale susceptible de trouver des développements contemporains en matière de réhabilitation de façades légères, tout en ayant un impact de chantier réduit sur l'intervention et le coût, et d'autre part d'améliorer les ambiances de vie. En effet, les citoyens, qui ont de tout temps cherché à moduler leurs perceptions sensibles du logement, du voisinage et de l'environnement, ressentent aujourd'hui des inconforts du fait du bâti et vont avoir à gérer, d'ici 2050, un changement climatique déjà opérant.

Conçu par les architectes François-Régis Cottin, Marcel Dallièrre et Alain Chastel, l'immeuble de la copropriété Les Cèdres, objet de la réhabilitation, est une expression radicale de la modernité. Il est doté de façades légères en mur-rideau, composées de panneaux sandwichs préfabriqués en aluminium signés par Jean Prouvé. Leur design mécanique et industriel reflète les méthodes constructives de l'époque. Leur finesse engendre néanmoins des problématiques d'isolation thermique et acoustique et un inconfort pour les habitants.

L'hypothèse consiste à renforcer l'enveloppe légère initiale par une seconde enveloppe économique constituée de matériaux biosourcés, en travaillant sur les filières de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les façades des logements construits dans cette région lors de la seconde moitié du XX^e siècle souffrent de stratégies d'amélioration thermique drastiques, sans évaluation des dégradations du confort lumineux, sonore et du flux ventilant qui en résultent. Pour inverser la tendance, la thèse propose de fabriquer un guide de diagnostic et d'expérimentation, avant intervention complète, pouvant s'adapter au secteur économique qui s'illustre aujourd'hui sur ce type de bâti, généralisant ainsi une approche éco-responsable et co-construite de la réhabilitation, et ceci dans le cadre très contraignant d'une copropriété. Afin d'améliorer les performances de l'immeuble, tout en préservant sa qualité plastique,

technique et patrimoniale, une recherche pluridisciplinaire est mise en place. Elle a débuté par un travail de diagnostics approfondis rythmé par des entretiens sur le vécu, des phases de recherches archivistiques, de relevés, de diagnostics architecturaux, patrimoniaux, thermiques, acoustiques, structurels et énergétiques, afin d'avoir une connaissance quasi exhaustive du bâtiment. S'en est suivie une période de conception explorant l'ensemble des expérimentations constructives et ambiantales possibles pour réhabiliter les façades légères de l'immeuble Les Cèdres, puis la réalisation de prototypes, à l'échelle 1 : 1, réalisés avec les Grands Ateliers Innovation Architecture de l'Isle d'Abeau et les entreprises partenaires.

L'expérimentation propose donc de concevoir et de tester un ensemble de prototypes cohérents selon la visée économique, écologique, ambiante, architecturale et patrimoniale recherchée, avant de passer à la réhabilitation complète. Le montage financier pour la copropriété a fait l'objet d'une recherche d'aides permettant aux habitants peu fortunés d'investir dans les travaux. La démarche proposée pourrait trouver de multiples applications sur un corpus d'immeubles du XX^e siècle ayant une façade légère, mais elle pourrait également être génératrice d'une attitude éco-responsable inaugurale pour réhabiliter les immeubles en copropriété de cette époque.

Remerciements

Le doctorat est une grande aventure, de développement scientifique, professionnel mais aussi personnel. Je tiens à remercier mes directeurs de thèse, messieurs les professeurs Philippe Dufieux et Olivier Balaÿ qui m'ont fait confiance pour mener ce projet et qui m'ont épaulée et encadrée tout au long de cette recherche. Leurs disponibilités et leurs conseils m'ont été d'un grand secours tant dans l'organisation de mes idées que dans la rédaction. Travailler ensemble fut l'expérience la plus enrichissante que j'ai eu le plaisir de mener et j'espère que nous aurons l'occasion de poursuivre nos collaborations.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Laurent Volay, architecte du patrimoine, ainsi que toute l'équipe d'archipat sans qui cette thèse en CIFRE n'aurait pu voir le jour. En tant que tuteur, Laurent s'est investi personnellement dans le développement de la recherche et des hypothèses. Il a pris le temps de m'accompagner et de me former alors que je n'étais qu'une jeune diplômée. Je le remercie chaleureusement pour ce travail de transmission et je suis ravie de poursuivre les travaux engagés ensemble au sein de cette belle agence.

Je remercie également l'ensemble des membres de notre équipe scientifique : TRIBU avec Karine Lapray et Héloïse Maire ; LASA avec Samuel Tochon et Sylvain Fenon ; DECARE avec René Hugues et KCM avec Stéphane Coquille. J'adresse aussi un remerciement tout particulier à Florence Delomier-Rollin, architecte urbaniste en chef de l'état, conseillère pour l'architecture à la DRAC Auvergne-Rhône-Alpes pour le soutien et l'implication qu'elle a apporté à ce projet de recherche. Un remerciement également au professeur Franz Graf, architecte et chercheur au laboratoire TSAM de l'EPFL, dont les travaux ont été une véritable source d'inspiration, ainsi qu'à Olivier Cinqualbre, conservateur du Centre Pompidou de nous avoir accueilli pour consulter les précieuses archives Prouvé.

J'adresse ensuite mes plus sincères remerciements à la Régie Franchet et Cie gestionnaire de l'immeuble Les Cèdres, et à son directeur, Renaud Franchet, de nous avoir offert un si beau sujet d'étude. Un immense merci également aux copropriétaires de l'immeuble qui nous ont ouvert leurs portes, ont répondu à nos questions et ont pris le temps de participer à cette recherche, et tout particulièrement Madame Rideau pour les nombreuses tasses de thé partagées, Madame Salaud-Salmon, Madame de Franqueville, Monsieur Burellier, Madame Ramangasoavina, pour les nombreux échanges que nous avons eu ensemble.

Je remercie également toute l'équipe des Grands Ateliers et notamment son directeur Maxime Bonnevie et son responsable des partenariats Pascal Gantet pour le soutien logistique et le réseau qu'ils ont su activer pour mener à bien l'expérimentation. Je remercie d'ailleurs tous les partenaires de la thèse qui ont œuvré à la réalisation des prototypes : les Compagnons du Devoir de Villefontaine et leur enseignant Eddy Giroux, ainsi que les entreprises Prodotti France et son dirigeant Cédric Dalard, Asymptote dirigée par Jérémie Chazotte, Steico et son représentant Olivier Mognon, Fermacell et monsieur René Ferré, Knauf et enfin Kiloutou et son responsable régional Vincent Gaviot. Tous se sont investis pour que cette expérimentation soit une réussite.

Merci également au ministère de la Culture et au bureau de la recherche en architecture, urbanisme et paysage pour le soutien financier et scientifique qu'ils ont apporté à cette recherche via le programme pluriannuel de recherche « Architecture du XX^e siècle, matière à projet pour la ville durable du XXI^e siècle ». Ce programme interministériel nous a offert d'intéressants échanges avec les autres équipes de recherche autour de problématiques communes qui ont su enrichir cette thèse. Le sujet de cet appel à projet est on ne peut plus actuel et extrêmement bien choisi.

Je remercie également les membres de la Chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture « Habitat du Futur » pour avoir fait émerger des recherches engagées, tournées vers l'avenir. Merci également aux laboratoires EVS-LAURE et AAU-CRESSON pour les ressources scientifiques que vous avez pu me fournir.

Je tenais à adresser des remerciements particuliers à l'école nationale supérieure d'architecture de Lyon au sein de laquelle j'ai été formée et qui m'a toujours offert un cadre d'enseignement et de discussion propice à l'épanouissement. J'ai passé parmi les plus beaux moments de ma vie entre ces murs de béton et dans ces ateliers de verre et de bois, et j'espère avoir la chance de pouvoir en passer d'autres.

Enfin, j'achèverai ces remerciements par une chaleureuse pensée envers les membres de ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible. Merci à mes parents pour les heures de relecture et de corrections. Vous êtes mes premiers enseignants et vos nombreux élèves et stagiaires ont eu la chance de croiser vos chemins. Merci enfin à mon mari pour sa patience, son soutien et son enthousiasme inébranlable à l'égard de chaque projet que j'engage.

Pour clore ce préambule, je vous souhaite une agréable lecture !

Sommaire

Introduction	19
Partie 1 : La réhabilitation des façades légères du XX^e siècle	19
1 – Un effort de définition : vers la question de la thèse	25
2 – Vers de nouvelles hypothèses	28
Partie 2 : Une spéculation méthodologique	31
1 – Une expérimentation constructive et polysensorielle	32
2 – Des sources au projet démonstrateur	32
Partie 3 : Améliorer plutôt que remplacer : un défi majeur à relever	35
Chapitre 1 : Une approche multiscalaire	39
Partie 1 : Les façades légères, une technique issue de l'architecture moderne	39
1 – Jean Prouvé et les façades légères	39
2 – L'industrialisation et la préfabrication	40
3 – Aux origines des façades légères	43
a. La Cité de Refuge	47
b. La Maison du Peuple de Clichy	49
4 – Le contexte lyonnais	51
Partie 2 : Un patrimoine en devenir	55
1 – L'obsolescence des composants	55
a. Une question d'entretien	55
b. Matériaux innovants, nouvelles technologies et réglementations thermiques	56
2 – Les façades-rideaux aux défis de la rénovation thermique	58
a. Le confort, premier vecteur de rénovation	58
b. L'urgence climatique et les économies d'énergie	60
3 – Les freins à la réhabilitation	62
a. Le déficit d'accompagnement des occupants	62
b. Le coût des travaux	63
c. Le défi des copropriétés	64
4 – Une question complexe	66
Partie 3 : Un corpus à définir et à identifier	67
1 – L'immeuble les Cèdres	67
a. Présentation	67
b. Des architectes à l'école de la modernité	67
c. Jean Prouvé et la région lyonnaise	70
d. Un immeuble-manifeste	72
<i>Insertion urbaine et aménagements extérieurs</i>	72

<i>Organisation spatiale</i>	73
<i>Études et chantier</i>	77
e. Les façades de l'immeuble Les Cèdres	79
f. Une conservation satisfaisante	85
<i>Le profil des copropriétaires</i>	86
<i>Technique et confort</i>	87
2 – Les façades industrielles de Jean Prouvé	89
a. Les différents types de façades légères	89
b. Les équipements des panneaux	97
<i>Menuiseries</i>	97
<i>Les protections solaires</i>	102
<i>Les systèmes de ventilation</i>	105
c. Une production menacée	106
Chapitre 2 : Une méthodologie expérimentale	109
Partie 1 : Les façades légères, un état de la question	109
1 – Le patrimoine du XX^e siècle	109
a. Une patrimonialisation fragile et inachevée	109
b. Des passoires thermiques ?	116
c. Les normes : des garants de confort ou des obstacles à la préservation du patrimoine ?	118
d. Le patrimoine à l'épreuve de la réhabilitation énergétique et environnementale	120
2 – Des pratiques diversifiées et des méthodologies à construire	123
a. L'acculturation des acteurs et du grand public	123
b. Le diagnostic exhaustif	126
c. Conservation, restauration, rénovation, réhabilitation ?	129
d. Le confort global	133
e. Les normes, des dispositifs contraignants à intégrer	135
f. Le prototype, garant d'un projet réussi ?	137
g. L'économie du projet de réhabilitation	139
h. Vers une approche globale	141
Partie 2 : La formation d'une équipe pluridisciplinaire	143
1 – L'équipe de recherche	145
2 – L'équipe de maîtrise d'œuvre	146
3 – Des entreprises spécialisées	147
4 – Un projet pédagogique	149
5 – Le conseil scientifique	151
6 – Un défi économique	152
Partie 3 : Les diagnostics	153
1 – Le diagnostic technique des panneaux	153
2 – Les problématiques thermiques	155
a. La thermique d'été	155
b. La thermique d'hiver	157
3 – Les enjeux de l'acoustique	158

4 – Les ambiances vécues	160
Partie 4 : De la conception à l'expérimentation	161
1 – Une conception adaptée et partagée	161
2 – Des propositions sous forme de variantes	163
3 – Expérimentations et prototypes	164
Chapitre 3 : Les diagnostics, un préalable obligé pour l'analyse de l'existant	167
Partie 1 : Les ambiances vécues par les habitants	168
1 – Qu'est-ce qu'un diagnostic « habitants et ambiances vécues » ?	168
a. Patrimoine et confort global	168
b. Diagnostics et entretiens	169
2 – Le ressenti des habitants	173
a. Quels regards sur leur immeuble ?	173
b. Les usages de la loggia	175
c. Fenêtres, ouvertures et occultations	175
d. L'environnement sonore de l'immeuble	178
e. Le chauffage et la ventilation	180
3 – Vers la définition d'un cahier des charges	181
Partie 2 : Le diagnostic architectural et patrimonial	183
1 – Les investigations archivistiques	183
a. François-Régis Cottin	183
b. Jean Prouvé	187
2 – Les relevés et les observations sur site	188
a. Redessiner l'existant	188
b. L'état sanitaire de l'immeuble	189
3 – Les sondages	193
a. Le diagnostic amiante et matières toxiques	193
b. Carottages et démontage partiel	194
Partie 3 : Les diagnostics thermiques	197
1 – La thermique d'été	197
a. La mesure des températures	197
<i>Les températures extérieures</i>	197
<i>La température du logement A (T3 au huitième étage)</i>	198
<i>La température du logement B (T5 au septième étage)</i>	199
<i>La température du logement C (T4 au troisième étage)</i>	200
<i>L'analyse des résultats</i>	201
<i>Conclusion sur les mesures de températures intérieures</i>	203
b. Les mesures de températures de surface sur les panneaux	205
c. La qualité de l'air et la ventilation	206
<i>L'évolution du taux d'humidité dans les logements (du 28 juin au</i>	
<i>3 juillet 2018)</i>	207
<i>L'évolution du taux de CO₂ dans le logement A (du 20 juin au</i>	
<i>4 juillet 2018)</i>	208
2 – La thermique d'hiver	209
a. Le diagnostic du système de chauffage	209

<i>La chaudière de l'immeuble</i>	209
<i>Les gaines techniques</i>	210
<i>L'eau chaude sanitaire</i>	211
b. L'analyse du confort dans les logements	211
<i>Les mesures des températures en hiver</i>	211
<i>La campagne de mesures à la thermographie infrarouge</i>	213
<i>Les mesures de températures de surface sur les panneaux Prouvé</i>	215
c. La qualité de l'air et l'efficacité de la ventilation	215
<i>Les mesures des débits de ventilation au niveau des bouches d'aération</i>	215
<i>Les mesures de l'humidité</i>	216
<i>Les mesures de CO₂ du logement A</i>	216
d. Conclusion pour l'amélioration du confort thermique d'hiver	216
3 – La simulation thermique dynamique	218
a. La modélisation de l'immeuble	218
b. Les hypothèses de modélisation	219
c. Le diagnostic de l'existant simulé	220
d. La description des travaux d'amélioration envisagés	223
e. Les résultats des simulations	225
<i>L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment</i>	225
<i>L'amélioration du confort d'été</i>	226
<i>L'amélioration des systèmes énergétiques</i>	229
f. Conclusions de l'étude	231
Partie 4 : Les diagnostics acoustiques	232
1 – Les mesures environnementales	232
a. L'environnement sonore du site	232
b. Les analyses des mesures acoustiques environnementales	233
2 – L'isolement acoustique des façades	234
a. Description des mesures réalisées	234
c. Les mesures acoustiques en champ proche	235
<i>Le logement C1 - Le local du gardien</i>	235
<i>Le logement C2 - T5 au 1^{er} étage de l'allée A (salon, loggia et chambre)</i>	235
<i>Le logement C3 - T5 au 3^e étage de l'allée B (salon et loggia)</i>	237
3 – L'isolement acoustique latéral	237
a. De loggia à loggia	237
b. De la loggia au salon	238
c. De la loggia à la cuisine	238
4 – L'acoustique intérieure	239
a. Les isolements acoustiques standardisés pondérés	239
b. Le niveau de bruits de chocs entre logements	241
5 – Un bilan acoustique à améliorer	242
Partie 5 : De la connaissance de l'existant au développement d'un projet de réhabilitation	243

Chapitre 4 : Réhabiliter l'immeuble Les Cèdres : stratégies et expérimentations	245
Introduction : Des enjeux à intégrer dans une démarche globale : vers l'élaboration d'un guide	245
Partie 1 : L'élaboration des hypothèses de travail	247
1 – Des objectifs conditionnés par les caractéristiques de l'existant	247
2 – Une méthode de conception collaborative	249
3 – Plusieurs niveaux d'interventions	251
4 – Quelles hypothèses pour les façades légères ?	253
a. Les joints et assemblages : une maintenance nécessaire	253
b. Les menuiseries	254
<i>Restauration ou restitution en double vitrage</i>	254
<i>Adjonction d'une double fenêtre</i>	259
c. Les parties pleines	261
d. Les équipements	263
<i>Protections solaires</i>	263
<i>Rideaux acoustiques</i>	265
Partie 2 : Fabrication et installation des prototypes : le temps de l'expérimentation	269
1 – Prototype de doublage 1 : restauration double-vitrage	271
a. Composition du prototype	271
<i>La menuiserie</i>	271
<i>Les parties pleines</i>	273
<i>L'occultation</i>	275
b. Mise en œuvre	275
c. Performances : les tests <i>in situ</i>	277
<i>Thermiques</i>	277
<i>Acoustiques</i>	278
d. Appréciation	279
e. Économie	279
2 – Prototype de doublage 2 : « Charte de Venise » double façade	281
a. Composition du prototype	281
<i>La menuiserie</i>	281
<i>Les parties pleines</i>	283
<i>L'occultation</i>	283
b. Mise en œuvre	283
c. Performances : les tests <i>in situ</i>	285
<i>Thermiques</i>	285
<i>Acoustique</i>	286
d. Appréciation	288
e. Économie	290
3 – Prototype de store extérieur et protection solaire	291
a. Composition du prototype	291
b. Mise en œuvre	293
c. Performances : les tests <i>in situ</i>	293
d. Appréciation	296

e. Économie	299
4 – Prototype de rideaux acoustiques : protection phonique et ventilation nocturne	299
a. Composition du prototype	299
b. Mise en œuvre	301
c. Performances : les tests <i>in situ</i>	301
<i>Acoustique</i>	301
<i>Thermique</i>	302
d. Appréciation	303
e. Économie	304
Partie 3 : Retour sur l'expérimentation, comparaison des solutions et des variantes	304
1 – Le prototype, un véritable outil de recherche et de conception	304
2 – L'économie, une préoccupation au cœur des réhabilitations en copropriété	306
a. Un montage financier délicat	306
b. Bénéfices, subventions et aides possibles	307
3 – Le tableau synoptique comme outil de comparaison	315
Partie 4 : Un guide pour la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XX^e siècle	328
Conclusion	337
Partie 1 : Rappel des questions et des objectifs de la recherche	337
Partie 2 : Améliorer l'existant par des pratiques expérimentales	338
Partie 3 : L'isolation des façades, une condition préalable ?	339
Partie 4 : Une solution idéale et des hybridations possibles	343
Partie 5 : Poursuite du développement des solutions avec les copropriétaires	344
Partie 6 : Une méthode transposable ?	346

Introduction

Partie 1 : La réhabilitation des façades légères du XX^e siècle

L'architecture contemporaine doit répondre aujourd'hui à deux défis majeurs : la transition écologique et la pénurie de logements qui provoquent la hausse des prix de l'immobilier et entraînent le décrochage de certaines catégories de la population. Face à cette situation tendue, la réhabilitation du parc de logements s'impose comme un enjeu de première importance ; en France, le secteur résidentiel représente 30 % des consommations d'énergie et pas moins de 18 % des émissions de gaz à effet de serre¹. Face à l'urgence climatique, cette réhabilitation doit être conduite avec célérité afin de participer à la frugalité énergétique du territoire et assurer le basculement vers une société post-carbone. Cette dernière remarque s'applique en particulier aux logements construits dans les décennies de l'après Seconde Guerre mondiale qui – conçus dans une période propice à l'exploitation des énergies fossiles – ne répondent pas aux enjeux d'isolation thermique et de réduction des consommations énergétiques, tout particulièrement les immeubles dotés de façades légères. De fait, cet important parc de logements a fait l'objet de nombreuses campagnes de rénovation ces dernières décennies, portées par des stratégies de transformations radicales ou de démolitions-reconstructions. Longtemps perçus comme de véritables « passoires thermiques », ces immeubles n'en constituent pas moins – pour certains d'entre eux – des témoins privilégiés de l'histoire de l'architecture contemporaine et cette remarque s'applique en particulier aux réalisations à caractère expérimental qui virent la mise en œuvre de procédés industriels innovants. Alors que les campagnes de rénovations thermiques se sont principalement appliquées sur les ensembles de logements sociaux, le temps semble venu de s'interroger sur les spécificités soulevées par la réhabilitation des copropriétés souvent confrontées à des équations économiques complexes en raison de populations à faibles revenus. Dans un contexte de prise de conscience croissante en faveur du patrimoine, mais encore des spécificités de la production architecturale du XX^e siècle, de nombreux programmes de recherches et de développement en cours – à l'image du programme REHA² mené par le PUCA (Plan urbanisme construction et architecture) – et des appels à projets du BRAUP (Bureau de la recherche en architecture, urbanisme et paysage)

1. Source : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>, 2020

2. <http://www.urbanisme-puca.gouv.fr/reha-la-rehabilitation-lourde-des-logements-un-r105.html>

du ministère de la Culture³ entendent développer des approches nouvelles en matière de rénovation et de réhabilitation.

Car la transition énergétique ne constitue pas le seul enjeu majeur auquel doivent répondre les immeubles construits dans les décennies de l'après Seconde Guerre mondiale, ceux-ci doivent également garantir le confort de leurs occupants dans ses multiples dimensions et acceptations. Encore faut-il rappeler que la notion culturelle de confort a sensiblement évolué depuis la « machine à habiter » du siècle dernier. Il est aujourd'hui avéré que les occupants vivent davantage leurs logements comme des espaces de « respiration⁴ » qu'ils ouvrent, ferment partiellement ou totalement selon l'enchevêtrement des sensations provenant des rues, des bâtiments habités, du vivant et du végétal, des activités et des phénomènes urbains⁵. Aussi, les qualités de vues qu'offrent les façades-rideaux ne préjugent pas, par exemple, des phénomènes acoustiques et thermiques qui demeurent souvent prégnants pour les habitants. En ce domaine, les réponses architecturales ne sont pas des plus évidentes, l'isolation thermique d'une façade démontre une certaine efficacité, mais renforce aussi la perception des bruits intérieurs, créant un inconfort de fait. De plus, l'environnement extérieur auquel sont soumis les logements a considérablement évolué. Le climat s'est réchauffé, les villes sont plus peuplées et plus bruyantes. La minceur des façades légères protège donc différemment les habitants des phénomènes extérieurs. En ce domaine, les questions économiques ne sont certainement pas à sous-estimer et cette remarque s'applique tout particulièrement aux immeubles de logements dotés de façades légères – procédé industriel qui répondait à une recherche de réduction des coûts de construction – et dont la réhabilitation soulève aujourd'hui d'épineuses questions. Autant le reconnaître, il demeure difficile d'apprécier statistiquement le nombre d'immeubles de logements construits au cours des Trente glorieuses au moyen de façades légères au regard notamment de l'importance de la préfabrication en béton qui s'impose à partir des années 1950. Plus que les façades-rideaux à proprement parler, ce sont véritablement les façades semi-rideaux qui se diffuseront le plus largement en matière d'immeubles d'habitations alors

3. On pense en particulier au programme pluriannuel de recherche « Architecture du XX^e siècle, matière à projet pour la ville durable du XXI^e siècle » mené en partenariat avec le ministère de la Culture, le ministère de la Transition écologique et solidaire, le ministère de la Cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, le Plan urbanisme construction architecture, l'Agence nationale pour le renouvellement urbain, la Caisse des dépôts et consignations et l'Union sociale pour l'habitat, entre 2016 et 2020.

4. Sloterdijk (Peter), « Ecumes : sphérologie plurielle », in *Sphères III (1998-2004)*, Paris, Hachette, 2006, 790 p. Canetti (Elias), *La conscience des mots (1975)*, traduit de l'allemand par Roger Lewinter, Paris, Albin Michel, 1984, 336 p.

5. Ingold (Tim), *Une Brève histoire des lignes (2007)*, traduit de l'anglais par Sophie Renaut, Bruxelles, Zones Sensibles, 2011, 256 p.

que le premier procédé connaîtra une longue postérité dans le domaine tertiaire. Est-il besoin de souligner la fragilité de ces éléments dans le cadre de campagnes de rénovation ? Alors que nombre d'immeubles pourvus de façades-rideaux ont été complètement transformés au cours des dernières décennies du XX^e siècle, la raréfaction de ce type de constructions doit nous inviter à adopter une attitude circonstanciée, attentive aux enjeux patrimoniaux tout autant qu'aux questions environnementales, architecturales, constructives et économiques.

Construites dans les décennies de l'après Seconde Guerre mondiale avec des éléments relevant souvent de la carrosserie, les façades légères sont arrivées à la fin d'un cycle qui nécessitait déjà une remise à niveau au cours des décennies 1980-1990. Certains de leurs composants originels ont effectivement perdu au fil des années l'essentiel de leur efficacité, qu'il s'agisse des assemblages des éléments constitutifs des parois, comme les joints et les vitrages, ou des matériaux composant les panneaux sandwichs. La réhabilitation de ces façades soulève des questions spécifiques, qu'elles soient d'ordres techniques, thermiques ou encore acoustiques dans un contexte de fragilisation croissante de ce type de bâti. Ces dernières années, plusieurs chantiers liés à des façades-rideaux ont vu le jour en France à la faveur de projets controversés, qu'il s'agisse de la restauration de l'immeuble de la CAF⁶ à Paris de Raymond Lopez, construit entre 1953 et 1959, par Arte Charpentier Architectes (2002-2009), de la restauration de la Maison du Peuple de Clichy, conduite entre 1995 et 1998, par Hervé Baptiste, comme de la Cité de refuge de Le Corbusier à Paris par François Chatillon et François Gruson (2016). On observe en particulier que dans ces derniers exemples le remplacement des éléments originaux est systématiquement présenté comme une obligation, voire une fatalité ; jamais leur conservation ou leur restauration n'est prise en compte dans les démarches de projets. Le chantier de rénovation de la CAF de Raymond Lopez – outre les épineuses questions techniques soulevées par ce chantier emblématique – a eu le mérite de souligner combien les problématiques d'authenticité demeurent au cœur des enjeux de transformation de ce type de construction dans des réflexions théoriques qui s'appliquent en réalité à l'essentiel du patrimoine contemporain, de l'« actualisation » des composants d'origine, remplacés par une façade plus performante, réinterprétée dans ses caractères, mais améliorée notamment d'un point de vue thermique et acoustique, jusqu'à la reconstruction « à l'identique » – ou plutôt proche de l'identique en termes d'image comme l'illustre notamment la rénovation du siège de Nestlé à Vevey (Suisse, 1996-2000) par Richter et Dahl Rocha architectes. Ainsi, les niveaux

6. Caisse d'allocations familiales



Caisse d'Allocation Familiale, Paris 15, Raymond Lopez, 1953-1959
Source : architecture de carte postale : <http://archipostalecarte.blogspot.com/>



Cité du Lignon, Vernier, George Addor, Dominique Julliard, Louis Payot, Jacques Bolliger, 1963-1971
© Claudio Merlini

de performances énergétiques sont prétextes à la définition de projets qui, invariablement, entraînent la disparition de la substance matérielle de l'existant et donc d'une part importante de la valeur patrimoniale des constructions. Face aux logiques utilitaires qui privilégient les solutions les plus destructrices, de nouvelles approches se font jour depuis une quinzaine d'années à la faveur d'investigations novatrices conduites en particulier au sein du Laboratoire des techniques et de la sauvegarde de l'architecture moderne (TSAM) sous la direction de Franz Graf, associé à Yvan Delemontey et Giulia Marino, qui ambitionnent de concilier patrimoine, économie et énergie en une visée synthétique⁷. On songe en particulier à la démarche conduite à propos de la Cité du Lignon à Genève⁸ dont les études menées par le TSAM ont permis de valider une série de mesures conservatoires nécessaires à la mise aux normes énergétiques d'une enveloppe de près de 120 000 m² de façade-rideau. L'objectif de cette dernière étude était de conserver au maximum la substance des façades et leur système constructif en élaborant quatre hypothèses d'intervention allant du remplacement complet des éléments à la dépose ou au remplacement partiel. Cette expérience fondatrice a largement stimulé la dynamique de la recherche conduite dans le cadre de cette thèse, notamment pour tout ce qui relève des analyses et des méthodologies. À ces apports essentiels, ce travail de recherche a souhaité développer une expérimentation reposant sur une analyse détaillée des performances environnementales fondées autant sur des diagnostics chiffrés que sur les ambiances vécues par les habitants. La démarche intègre ainsi une dimension polysensorielle, qui ne se limite pas au seul confort thermique, et prévoit une approche de la réhabilitation avec des matériaux biosourcés. Le projet démonstrateur repose sur une étude de la réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres à Lyon, copropriété construite par François-Régis Cottin en collaboration avec Jean Prouvé pour les façades-rideaux entre 1959 et 1962 et labellisé Patrimoine du XX^e siècle depuis 2003. L'équipe pluridisciplinaire réunie pour ce projet, épaulée dans sa démarche par la chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture « Habitat du Futur », a remporté un appel d'offre du programme interministériel de recherche « Architecture du XX^e siècle, matière à projet pour la ville durable du XXI^e siècle » permettant de financer la phase d'expérimentation. L'intégration à ce programme pluriannuel de recherche concrétise

7. Graf (Franz) et Marino (Giulia), dir. *Patrimoine moderne, économie, énergie. Stratégies d'intervention pour les grands ensembles, 1945-1975*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2015, 94 p. ; Graf (Franz), Delemontey (Yvan), dir. *Architecture industrialisée et préfabriquée : connaissance et sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012, 435 p.

8. Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. « La cité du Lignon 1963-1971, étude architecturale et stratégies d'intervention » in *Revue patrimoine et architecture, cahier hors-série*, Lausanne, Infolio, 2012 (rééd.2013), 160 p.

Façade légère, mur-rideau à grille, Campus de la Doua, Jean Prouvé



Façade légère, mur panneau, Tour Albert, Paris



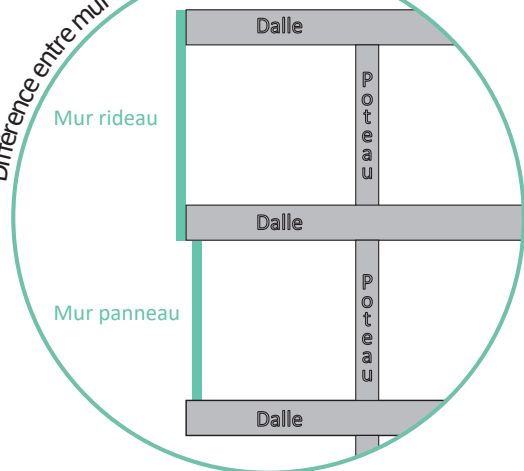
Façade légère, mur-rideau, Seagram Building, New-York



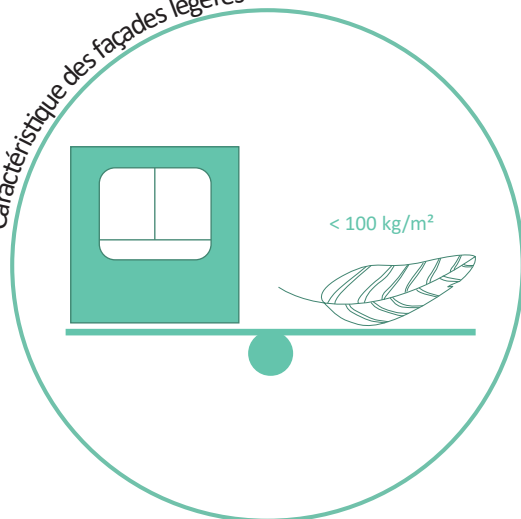
Un panneau du mur-rideau de l'immeuble Les Cèdres durant le chantier, 1960



Différence entre mur-rideau et mur panneau



Caractéristique des façades légères



l'un des principaux enjeux de la chaire « Habitat du Futur » qui consiste à relier le monde de la recherche à celui de la pratique dans le but de produire un habitat, neuf ou réhabilité, durable et soutenable. Cette recherche a suscité une véritable émulation entre praticiens, architectes, ingénieurs, constructeurs, chercheurs, gestionnaires et habitants dans le but de répondre aux enjeux soulevés par la réhabilitation des façades légères d'un immeuble qui s'impose comme l'une des constructions les plus emblématiques de la région lyonnaise dans les décennies de l'après-guerre.

1 – Un effort de définition : vers la question de la thèse

Avant toute chose, il convient de rappeler la définition des façades légères. Selon la norme NF P 28-001 de décembre 1990, une façade légère est une façade dont une des parois extérieures au moins est caractérisée par une masse inférieure à environ 100 kg/m² et qui est constituée de produits manufacturés généralement dotés de parements finis. Les façades légères ne sont pas porteuses. Elles sont littéralement « accrochées » à la structure du bâtiment et sont rigidifiées par leur propre ossature. Les façades légères sont mises en œuvre en fonction de leur position par rapport à l'ossature primaire. Les façades (ou murs) rideaux sont positionnées en avant de la structure primaire, isolant ainsi les nez-de-dalles et les refends tout en réduisant les éventuels ponts thermiques. La façade-rideau se développe alors comme une véritable enveloppe, une peau, autour du bâtiment. Les murs panneaux sont, quant à eux, fixés entre les planchers de l'ossature primaire. La technique du mur panneau, inséré entre les dalles semble avoir été privilégiée dans les immeubles de logements comme en témoignent par exemple les opérations Bron-Parilly (Rhône) ou encore Moncey-Nord à Lyon. Enfin, il existe également des murs rideaux à panneaux. Inventés par Jean Prouvé en 1935 pour la Maison du Peuple de Clichy, conçue par Eugène Beaudouin et Marcel Lods, ils se composent de panneaux préfabriqués qui intègrent l'ossature secondaire, les menuiseries, l'isolant, le parement extérieur et intérieur. Les murs rideaux à panneaux se distinguent des murs rideaux à système de grilles où l'ossature secondaire est visible et forme un quadrillage de lignes horizontales et verticales entre lesquelles s'ajoutent des éléments de remplissages pleins ou vitrés. Ajoutons que tous ces panneaux préfabriqués simplifient la construction en étant acheminés sur les chantiers comme produits finis à assembler.

Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, le mur-rideau s'impose comme un système constructif autonome et s'inscrit dans la différenciation constructive sur laquelle repose une

part essentielle de l'esthétique et de la culture modernistes, c'est-à-dire le développement de la construction à strates au moyen de composants spécialisés et de systèmes indépendants dont les façades de Prouvé constituent l'une des évolutions les plus achevées. Rappelons également que les produits industriels constitutifs du mur-rideau vont se développer de manière endogène, qu'il s'agisse des isolants, de l'étanchéité, du traitement des matériaux de surface comme des profilés complexes, mais encore des matériaux transparents ou opaques (résine de polyester, fibres de verre). Le mur-rideau est investi, au cours des Trente Glorieuses, d'un discours de modernité, conjuguant esthétique puriste et mode de production industriel.

Alors que ce type de façade a permis de répondre à de nombreux enjeux du XX^e siècle, tels que l'économie et la rapidité, au point de s'imposer comme l'un des symboles de la modernité de l'après-guerre, comment envisager aujourd'hui l'adaptation de ce type de dispositifs aux besoins du XXI^e siècle ?

En ce domaine, on ne peut que constater que nombre de réhabilitations entreprises sur les immeubles XX^e dotés de façades légères conduisent à des résultats peu satisfaisants, soit parce qu'elles aboutissent à la destruction complète des éléments originaux, soit parce qu'elles excluent les habitants des processus de conception alors qu'ils sont les plus à même d'apporter des connaissances sur les ambiances vécues de leurs logements dans le but d'en améliorer le confort. De plus, la gestion du confort est souvent reléguée aux technologies et à l'ingénierie alors que les habitants demandent des interventions plus ponctuelles et raisonnées⁹ concernant leur ambiance de vie¹⁰. Plongés dans un temps adiastrématique¹¹, ceux-ci passent le plus souvent d'une situation environnementale déséquilibrée à une autre. Il en ressort la quête d'une parenthèse temporelle dans l'animation frénétique de la ville, le besoin de rééquilibrer les ambiances, de chercher des intervalles sensibles dans le logement. Cette recherche sur la réhabilitation des façades légères s'intéresse alors à cette quête et aux fabriques d'ambiances qui se profilent dans la ville de demain, dans une urbanité qui installera

9. Picon (Antoine), *La Ville territoire des cyborgs*, Besançon, Les Éditions de l'Imprimeur, 1998, 112 p.

10. Cf. les travaux du CRESSON et du réseau Ambiance, notamment le projet dirigé par Pascal Amphoux portant sur « La réhabilitation architecturale à l'épreuve des ambiances » (2008).

11. Diastématique, du latin diastematicus, « qui procède par intervalle ». Nous renvoyons aux travaux de Gillo Dorfles, *L'Intervalle perdu (1980)*, traduit de l'italien par Marie-Thérèse Ketterer, Paris, Librairie des Méridiens, 1984, 206 p. ; Balaÿ (Olivier), Lapray (Karine), Leroy (Marie), Marie (Héloïse), « Ménager des oasis urbaines : des représentations à la fabrication », in *Territoires durables, de la recherche à la conception*, Paris, Parenthèses/ADEME, 2018, p. 51-63 ; Cf. Balaÿ (Olivier), « Oasis urbaine ou l'ambiance diastématique de la ville », in *Silences ! Rencontres – Architecture Musique Ecologie*, Paris, Les cahiers de l'Institut Musique Ecologie, Lucie éditions, 2018, p. 63-76.

probablement une certaine fixité pour une majorité de citoyens¹², notamment les plus démunis, les populations vieillissantes en l'occurrence¹³. La façade en tant qu'interface entre intérieur et extérieur, entre urbanité et logement, entre société et individualité, participe à cette quête d'ambiances modulables. Elle est au cœur des préoccupations d'un projet de réhabilitation, encore plus qu'une norme à atteindre. Dans ces conditions, il convient de requestionner les spécificités des façades légères du XX^e siècle et leur actualisation dans le cadre de ce projet de réhabilitation contemporain.

De ce qui précède, découle l'idée que la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XX^e siècle doit tout particulièrement répondre aux attentes des habitants loin des seules réponses technologiques. L'ingénierie peut certes résoudre de nombreuses questions techniques mais celles-ci s'accompagnent souvent d'un curieux sentiment de doute sur le sens de ses performances. Les véritables enjeux se situent peut-être ailleurs, notamment dans la quête de « l'intervalle » dans le ressenti. De même, la technique n'est peut-être plus seulement au service de la performance, elle viserait plutôt la modestie et l'écologie responsable. Dans cet ordre d'idées, l'habitant devient l'acteur principal de son confort et de ses ambiances. Est-il besoin de souligner en ce domaine combien la surisolation thermique annule la présence sonore extérieure et crée des inconforts en renforçant l'écoute des bruits intérieurs ? Comment éviter ces problématiques et trouver un équilibre entre confort d'usage, confort thermique et confort acoustique ? Appréhender la réhabilitation d'un immeuble doté de façades légères autrement que sous le seul critère de la performance énergétique vise à susciter chez les maîtres d'œuvre, les copropriétaires et les gestionnaires qui s'engagent dans des campagnes de travaux, une véritable prise de conscience dans une dynamique nouvelle qui poursuit l'ambition d'une recherche d'équilibre entre un ensemble de critères et d'enjeux conjuguant environnement, confort, énergie, économie, architecture et patrimoine tout en associant étroitement les habitants.

Au-delà des seules ambitions de confort, ce travail s'intéresse également aux qualités de mutabilité de ce type de bâti pour en mesurer les potentialités d'évolution et de transformation au regard de la valeur architecturale et patrimoniale considérant que la restauration d'éléments produits industriellement interroge tout particulièrement les problématiques

12. Serres (Michel), *Habiter*, Paris, Éditions Le Pommier, 2014, p. 159

13. Pour la première fois en 2014, le taux de personnes âgées souffrant de solitude dépasse la barre des 20 % (16 % en 2010, 24 % en 2014.) *We Demain, Une revue pour changer d'époque*, n° 17, mars 2017.

environnementales contemporaines. En deux mots, comment réhabiliter une façade constituée de composants peu, voire pas, écologiques avec des matériaux biosourcés tout en cherchant à préserver sa physionomie originelle ? Comment ces mêmes matériaux parviendraient-ils à dialoguer avec le langage industriel des façades légères ?

L'intervention sur l'architecture du XX^e siècle constitue donc un défi majeur pour les professionnels qui œuvrent aux réhabilitations architecturales et urbanistiques en intégrant une démarche de transition écologique. Habituellement, les architectes s'intéressent aux modalités de mutation du bâti existant en estimant de potentielles évolutions et transformations au regard d'un existant dont les qualités historiques, architecturales et urbaines sont reconnues ou restent à définir. Mais est-ce suffisant ? Au moment même où la démarche environnementale affiche toute sa pertinence pour viser une gestion plus éco-responsable de la planète, l'intervention sur l'existant exige plus que jamais un partage disciplinaire entre professionnels, ne serait-ce que pour arrêter des choix sur des questions aussi essentielles que celle de la matérialité des structures, des revêtements et des finitions, ainsi que sur des techniques constructives et de chantier tout en tenant compte des ambiances vécues par les habitants. Quels enjeux recouvrent aujourd'hui les démarches d'expérimentation considérant qu'il est essentiel de préserver les qualités historiques et patrimoniales de l'existant tout en tenant compte des conditions économiques des occupants comme des exigences normatives notamment en termes de confort ? Quelles hypothèses de travail soulève une telle démarche de projet appliquée à une copropriété¹⁴ ?

2 – Vers de nouvelles hypothèses

Ce projet de recherche poursuit l'ambition de définir, d'une part, une démarche de projet exemplaire susceptible de trouver des développements contemporains en matière de façades légères, tout en ayant un impact de chantier réduit sur l'intervention et le coût et d'autre part, d'améliorer des ambiances de vie. L'hypothèse de recherche est de renforcer l'enveloppe légère initiale par une seconde enveloppe économique constituée de matériaux biosourcés, en travaillant sur les filières de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les logements construits dans cette

14. La Loi n° 65-557 du 10 juillet 1965 fixant le statut de la copropriété des immeubles bâtis prévoit donc deux éléments distincts : les parties privatives et les parties communes. Les parties privatives sont gérées par chaque propriétaire et le coût d'entretien des parties communes est réparti entre les copropriétaires selon des parts relatives à leur partie privatives. Toute intervention sur l'aspect extérieur de l'immeuble et les parties communes relèvent donc d'une décision de copropriété. En revanche, toute intervention de réhabilitation à l'intérieur des logements dépend de l'accord du propriétaire.

région lors de la seconde moitié du XX^e siècle souffrent de stratégies drastiques d'amélioration thermique sans évaluation des dégradations du confort lumineux, sonore et du flux ventilant qui en résultent¹⁵. Or, historiquement, les citoyens ont de tout temps cherché à moduler les perceptions sensibles associées à leur logement. Quelles sont les valeurs constructives, sociales, économiques et sensibles associées à la double façade légère dans la réhabilitation des logements collectifs du XX^e siècle ? En testant ces valeurs à partir de prototypes à échelle 1 : 1, conçu en partenariat avec des entreprises, notre objectif est de démontrer que cette hypothèse peut s'adapter au secteur économique qui s'illustre aujourd'hui sur ce type de bâti, généralisant ainsi une approche éco-responsable et co-construite de la réhabilitation.

Nous proposons donc de mettre en œuvre une méthodologie de projet interdisciplinaire associée à une démarche expérimentale en vue de l'élaboration d'un projet de réhabilitation d'un immeuble-manifeste à forte valeur patrimoniale. Bien que la réhabilitation des façades légères en France concerne majoritairement les immeubles tertiaires, la méthode appliquée ici aux programmes de logements soulève des problématiques plus importantes en termes de confort. En effet, le tertiaire n'est que peu, voire pas, concerné par les questions de confort nocturne. De plus, les usagers passent davantage de temps dans leur logement où ils exigent un niveau de confort plus élevé. Une fois la méthode de réhabilitation développée pour le logement, il semble alors envisageable de la transposer à des programmes tertiaires dont les problématiques semblent moins complexes à résoudre. Il conviendra également de prendre en compte la perception de ces façades industrielles qui ne se limite pas aux seuls aspects visuels et constructifs. Si le point de vue des habitants sur l'esthétique ou la physionomie d'un tel immeuble demeure extrêmement variable selon la sensibilité des personnes interrogées, en revanche, les avis sont plus largement partagés sur le terrain polysensoriel qui prend en compte les dimensions thermiques, lumineuses, acoustiques et plus généralement d'espace de leur logement. L'observation de l'état actuel de l'immeuble donne quelques indications compte tenu du fait qu'une majorité d'habitants ont déjà remplacé leurs fenêtres d'origine par des menuiseries plus performantes en double vitrage, en dépit de l'incidence de tels remplacements sur l'homogénéité et l'authenticité visuelle de l'immeuble. D'un point de vue architectural, ces remplacements avec différents modèles de fenêtres, sans cohérence d'ensemble, apparaissent comme une détérioration de l'esthétique de l'édifice. Mais pour les habitants, ces nouvelles

15. Franz Graf et Giulia Marino (dir.), *Les Dispositifs du confort dans l'architecture du XX^e siècle : connaissance et stratégie de sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2016, 535 p.

fenêtres représentent une solution facile à mettre en œuvre pour améliorer la qualité de vie de leur logement. On le comprend, la fenêtre constitue un point sensible des projets de rénovation des ensembles résidentiels dans la mesure où elle constitue le premier élément sur lequel porte toute politique d'intervention qui vise à assurer aujourd'hui une meilleure performance énergétique. Malheureusement, les critères d'évaluations environnementaux ne tiennent compte que d'objectifs de performances qui empêchent parfois d'appréhender les avantages du maintien partiel d'éléments d'origine et des solutions « intermédiaires » visant une économie d'énergie grise – énergie oubliée dans les bilans thermiques labellisés. Le rapport entre efficacité des nouveaux types de fenêtres sur le marché et prix unitaire oblige les propriétaires à privilégier trop souvent des modèles qui, inévitablement, altèrent la perception et la qualité de l'espace, sans parler des problèmes liés à la dégradation des conditions hygrométriques des espaces intérieurs. Car, bien que la fenêtre soit un élément détachable du reste de l'enveloppe, sa fonction étanche est indissociable du reste de la façade. Il est évident qu'aujourd'hui les standards acoustiques, thermiques et d'étanchéité imposent de repenser la menuiserie des fenêtres, mais il est tout aussi avéré que certaines substitutions peuvent entrer en contradiction avec la nécessité de respiration du reste de la façade et des attentes de l'utilisateur. Un manque de ventilation entre intérieur et extérieur peut en effet causer des dommages irréversibles sur la santé des occupants et sur le bâtiment.

Il semble aujourd'hui important de proposer aux habitants des solutions alternatives qui ne se limitent pas à la seule fenêtre et qui puissent intégrer toutes les dimensions sensorielles, y compris la conservation de l'esthétique visuelle des façades légères. Si les propositions apportent un gain en confort associé à une pérennité patrimoniale, alors la perception que les habitants ont actuellement de leur logement sera améliorée. Des solutions sont proposées actuellement sur le marché pour améliorer les performances des façades légères. Elles prennent la forme de dispositifs de façades coulissantes en verre pour balcons, de panneaux, volets roulants ou brise-soleil à lames orientables pour les baies, de vitrages à changement d'opacité, de double peau respirante. Dans le cas des façades légères, il convient certainement d'intégrer ces systèmes dans des solutions spatiales cohérentes permettant de valoriser l'existant et d'inciter les maîtres d'ouvrage à y recourir grâce à la démonstration de leur apport économique et social dans le cadre d'une approche en coût global. Plutôt que d'explorer des solutions éléments par éléments, une solution d'amélioration globale des enveloppes légères doit être proposée et expérimentée. Partant de l'immeuble Les Cèdres, il restera également

à rédiger un guide méthodologique pouvant servir d'autres applications sur un corpus d'immeubles du XX^e siècle possédant des façades légères, apportant ainsi des solutions à des questions inhérentes à cette technique constructive.

Enfin, il semble nécessaire d'avoir recours à l'expérimentation. Compte tenu des changements climatiques actuels, privilégier les matériaux biosourcés s'impose comme une évidence afin de contribuer à faire du secteur de la construction une activité durable et respectueuse de l'environnement. Néanmoins, à ce jour, aucune réglementation n'oblige à leur emploi, raréfiant leur utilisation, d'autant plus sur les opérations de réhabilitation ou de rénovation dans lesquelles l'isolation par l'extérieur en polystyrène reste majoritairement employée. Cette recherche entend démontrer la faisabilité d'une réhabilitation privilégiant l'emploi de matériaux biosourcés. Pour ce faire, les solutions seront développées avec ce type de matériaux jusqu'à l'expérimentation à l'échelle 1 : 1, *in situ*.

Partie 2 : Une spéculation méthodologique

Pour valider ces hypothèses, ce travail entend recouvrir une approche pluridisciplinaire entre une multitude de facteurs : la recherche documentaire sur les techniques de façades légères et les techniques d'amélioration de leurs performances ; l'évaluation et la hiérarchisation patrimoniale ; la prise en compte de la perception des ambiances ; le confort bioclimatique, la luminosité, la sonorité et l'efficacité énergétique ; la valorisation de la qualité architecturale et patrimoniale ; la mise en œuvre d'une réhabilitation avec des matériaux biosourcés ; et l'approche sociologique d'un habitat à réhabiliter occupé par une population vieillissante et disposant de faibles moyens. Les solutions de réhabilitation doivent être aujourd'hui pensées selon une équation économique compatible avec une copropriété et un cahier des charges normatif. Une étude économique poussée doit également permettre un apport de connaissances sur la plus-value dégagée par l'ensemble des diagnostics réalisés en phase d'études. Ceux-ci engendreront-ils une économie globale ? L'observation attentive du vécu des habitants permettra-t-elle d'élaborer des solutions répondant à l'ensemble des enjeux ? Ces spéculations sont-elles susceptibles de revaloriser financièrement le patrimoine de la copropriété ? Autant de sujets qui demeurent encore peu abordés notamment dans le cadre de recherches en architecture. Au reste, la bibliographie demeure extrêmement lacunaire et ne permet pas d'aborder globalement l'ensemble de ces questions dans une visée synthétique.

Telle est l'une des ambitions de ce projet de recherche qui poursuit le dessein de faire émerger des solutions innovantes et adaptées en faveur de ce patrimoine fragilisé et encore peu considéré.

1 – Une expérimentation constructive et polysensorielle

Cette recherche propose également de recourir à l'expérimentation avant toute intervention définitive sur l'existant. La méthode mise en œuvre repose en effet sur un volet expérimental décisif qui doit permettre d'évaluer les différentes hypothèses élaborées en vue d'une telle réhabilitation tout en prenant en compte les enjeux patrimoniaux, environnementaux et les besoins des usagers. Les plus pertinentes seront prototypées à l'échelle 1 : 1, afin de les proposer aux habitants et aux membres de l'équipe de recherche, comme aux services instructeurs chargés d'autoriser de tels travaux, dans le but d'engager des choix circonstanciés à partir d'expériences *in situ*. Ces prototypes doivent également permettre de valider le travail interdisciplinaire des professionnels réunis autour de ce projet démonstrateur, d'anticiper les perceptions *in situ* et les méthodes de mises en œuvre du chantier futur en site occupé, mais encore de préciser le coût de l'opération. Par cette démarche, l'objectif est de prolonger la vie d'un édifice et de ses façades légères tout en respectant l'architecture, les conditions économiques de réalisation, le confort ainsi que les demandes sensibles des experts et des habitants.

La thèse tentera de retrouver cette cohérence perceptive en proposant des solutions permettant à la fois d'améliorer le confort de vie des occupants et les performances énergétiques, thermiques et acoustiques de la façade, tout en valorisant son caractère patrimonial dans un coût global raisonné permettant d'envisager la transposition de ces solutions à d'autres opérations.

2 – Des sources au projet démonstrateur

Afin de développer des solutions appropriées, les recherches se sont appuyées sur la consultation de nombreuses sources concernant l'immeuble Les Cèdres et les façades légères en général, notamment la production de Jean Prouvé et les archives de l'architecte François-Régis Cottin (1920-2013) qui signe les plans de l'immeuble. Les fonds photographiques ont apporté de nombreuses informations, notamment les photographies de chantier qui détaillent le processus de montage des éléments. C'est ainsi qu'ont été consultés les fonds Cottin aux

Archives municipales de Lyon et à la Société académique d'architecture de Lyon ainsi que les fonds Prouvé conservés aux Archives départementales de Meurthe et Moselle, versés au centre Georges Pompidou. A cela, s'ajoute la réunion d'une importante bibliographie, annexée en fin de volume, qui restitue le sujet dans son contexte historique et théorique, notamment au regard des enjeux patrimoniaux et techniques, en particulier pour tout ce qui relève des constructions préfabriquées, sans oublier les problématiques énergétiques et environnementales mais encore d'ambiances. Le travail de recherche s'est poursuivi par la constitution d'un corpus d'immeubles de logements dotés de façades légères à l'échelle de la région lyonnaise qui fut l'un des théâtres privilégiés de la préfabrication du logement dans les années de l'après-guerre, comme en témoigne en particulier l'opération industrialisée de Bron-Parilly (1953-1959). Ce chantier majeur, conduit sous la direction des architectes Pierre Bourdeix, Franck Grimal et René Gagès, vit la définition et la mise en œuvre de techniques innovantes de standardisation et de préfabrication. Cette dernière expérience devait connaître une certaine postérité dans la région lyonnaise si l'on en juge par l'important corpus d'immeubles de logements revêtus de panneaux industrialisés notamment sous la forme de façades légères appliquées en murs-panneaux et insérées entre les nez-de-dalle ; citons en particulier Le Montgolfier de René Gagès dans le 6^e arrondissement de Lyon (1959), Le Parc de Saint-Didier à Saint-Didier-au-Mont-d'Or (Rhône) de Gagès et Gabriel Roche (1965), La Mésangerie à Tassin-la-Demi-Lune (Rhône) de Franck Grimal (1965), le Rhodanien de Batton et Roustit (1961), comme le Constellation d'Auguste Murat dans le 3^e arrondissement de Lyon (1964)¹⁶. Il semblerait en revanche, que le seul immeuble de logements employant la technique du mur-rideau à panneaux construit à Lyon dans les années de l'après-guerre soit précisément Les Cèdres, réalisé par Cottin, Chastel, Dallièrre et Prouvé (1959-1962). Un autre immeuble de logements présente certes des panneaux aluminium placés devant les nez-de-dalle – la résidence Beau site 4 de Pierre Tourret construite à Lyon en 1961 –, mais il s'agit d'un semi-rideau¹⁷. Nous montrerons combien la singularité de l'immeuble Les Cèdres a permis de réunir une équipe pluridisciplinaire et de construire un projet démonstrateur de recherches portant sur la réhabilitation des façades légères à forte valeur patrimoniale.

16. Rey (Jacques), *Lyon, cité radieuse, une aventure du Mouvement moderne international*, Lyon, Libel, la Maison de l'architecture Rhône-Alpes, 2010, 141 p.

17. Selon la norme NF P 28-001, les façades semi-rideaux sont constituées de deux parois : une paroi extérieure légère, avec remplissage vitré ou opaque et une paroi intérieure lourde, en béton ou maçonnerie. C'est un cas intermédiaire dans lequel l'allège est constituée par un voile béton. Les châssis sont posés en avant du béton (comme un mur-rideau) et les allèges béton sont doublées à l'extérieur par un remplissage avec isolation sur béton.

La copropriété Les Cèdres, sur laquelle porte l'expérimentation de la thèse, a été labellisée Patrimoine du XX^e siècle en 2003 ; il est vrai que l'immeuble semble être le dernier, ou du moins l'un des derniers, à conserver des panneaux Prouvé de ce type appliqués à la construction de logements en France. En effet, si Prouvé développe d'autres panneaux de même type pour des programmes de logements contemporains – comme la Cité HLM Pierre Montillet au Blanc-Mesnil (Seine-Saint-Denis) avec Georges Candilis, Alexis Josic et Shadrach Woods (1957-1958) ; l'immeuble Baticoop à Dijon avec les architectes Maurice Blanc, Charles Pivot et Pierre Junillon (1958) ; la tour du Fer à Cheval à Roubaix de Guillaume Gillet (1958) ; un ensemble d'immeubles à Nanterre (Hauts-de-Seine) avec Jean Darras, Anatole Kopp et Charles Sébillotte (1959) – aucun de ces ensembles d'habitations n'a conservé ses éléments originels. Après Les Cèdres, Prouvé utilise majoritairement des panneaux de ce modèle, à l'origine du brevet de 1964, pour les équipements. La production de ce type de façades pour les logements demeure totalement expérimentale et relève presque du prototypage. Ce dernier caractère a bien souvent conduit à considérer ces panneaux comme éphémères, au point d'être le plus souvent remplacés lors des campagnes de rénovation dans les décennies 1980-1990. L'immeuble Les Cèdres demeure visiblement l'ultime témoin de l'histoire des panneaux sandwichs en aluminium appliqués aux immeubles de logements par Prouvé, ce qui lui confère une valeur patrimoniale insigne qu'il convient dès lors de préserver. Cet *unicum* offrait, en réalité, toutes les qualités requises pour servir de cas d'études à cette recherche. Les contacts avec la régie Franchet et C^{ie}, gestionnaire historique de l'immeuble qui possède une véritable « traçabilité » de la vie de l'édifice de sa construction à nos jours, ont permis de confirmer ces premières intuitions.

Sollicité dès janvier 2017 par les membres de la chaire « Habitat du Futur », Renaud Franchet, dirigeant de la régie éponyme, a fait part à l'équipe des difficultés rencontrées par les copropriétaires de l'immeuble : problèmes de confort d'été et d'hiver, nuisances sonores, systèmes de chauffage et de ventilation obsolètes, défauts d'étanchéité, etc. Conscients de la valeur patrimoniale de l'édifice et de sa façade, gestionnaire et copropriétaires s'interrogent depuis de nombreuses années sur les moyens d'améliorer les performances techniques et de rénover la façade emblématique. Ajoutons enfin que l'immeuble Les Cèdres regroupe des profils d'habitants variés, des personnes âgées, des familles, des jeunes couples ou des personnes seules. Les soixante appartements sont occupés, majoritairement par leurs propriétaires et treize logements par des locataires (2017). Certains propriétaires occupent les lieux depuis la construction, d'autres sont des primo-accédants. Selon la régie Franchet, les primo-accédants

restent en moyenne sept ans dans leur appartement. Cette durée d'occupation, relativement faible, montre que l'immeuble n'est pas totalement adapté aux attentes contemporaines en comparaison des statistiques nationales qui, en 2013, observaient une durée d'occupation des logements par les propriétaires de presque vingt ans en moyenne contre huit pour les locataires¹⁸. L'immeuble se distingue en outre par une grande mixité sociale et une majorité d'habitants disposent de moyens financiers limités. De ce fait, les solutions proposées pour la réhabilitation des façades légères de l'immeuble Les Cèdres doivent être les plus économiques possibles, ajoutant une complexité supplémentaire. Renaud Franchet, attentif aux difficultés qui pourraient survenir pour réhabiliter cet immeuble si particulier, sera très vite convaincu de la pertinence d'élaborer un programme de recherche notamment pour impliquer et responsabiliser les habitants. S'engage alors un travail visant à développer une recherche appliquée, croisant une multitude de champs disciplinaires, tout en associant étroitement gestionnaire et habitants.

Partie 3 : Améliorer plutôt que remplacer : un défi majeur à relever

La démarche initiée pour cette recherche entend réhabiliter cet immeuble en proposant d'adapter les performances normatives aux ressentis des habitants, quitte à faire évoluer la façade originelle en proposant aux habitants des modulations thermiques, lumineuses et acoustiques adaptées. L'enjeu est de partir des « résistances » que le bâtiment existant exerce sur le confort de vie des habitants, pour les améliorer par l'adjonction de dispositifs permettant de moduler les ambiances intérieures, à partir de composants économiques et écologiques. La prise en compte des défauts et des qualités spatiales, d'usages, matérielles, de confort, etc. de la façade légère initiale, et plus largement de l'édifice, permet d'ajuster les interventions sur ce type de bâti en s'affranchissant de présupposés quant à ses capacités. Il est ainsi possible d'envisager l'amélioration d'un dispositif existant plutôt que sa démolition/reconstruction, dans un contexte environnemental où l'économie de matière et d'énergie grise devient un enjeu majeur. De telles modifications seront néanmoins interrogées au regard des qualités patrimoniales de ce type d'édifice. À bien des égards, cette démarche représente un défi majeur pour les professionnels du patrimoine et du milieu de la construction, les chercheurs et les institutions : elle vise à déplacer l'obligation de performance environnementale vers une

18. Sources : enquête « Les ménages et leurs logements depuis 1970 » de mai 2018 par le CGEDD – conseil général de l'environnement et du développement durable.

FINANCEMENT DE LA THÈSE CIFRE SUR 3 ANS

MAÎTRISE D'OUVRAGE

Copropriété Les Cèdres, 44 rue de la Favorite
Son gestionnaire : Régie Franchet et C^{ie}



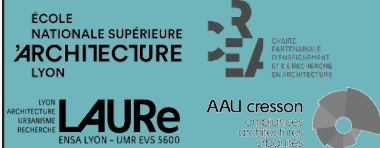
Financement : 15 000 € TTC

ÉQUIPE DE CONCEPTION, RÉALISATION DE LA RÉHABILITATION

	18 000 € TTC/an sur 3 ans = 54 000 € TTC
	Financés par la copro + crédit d'impôts recherche
	Financés par la copro + crédit d'impôts recherche
	Financés le programme de recherche « Archi XX »

ÉQUIPE DE PÉDAGOGIE ET RECHERCHE

ENSAL + Chaire Habitat du Futur
+ Directeurs de thèse :
Philippe DUFIEUX (EVS-LAURE)
Olivier BALAYÉ (AAU-CRESSON)
+ Doctorante :
Mathilde PADILLA



Agence nationale de la recherche et des technologies, porteuse du dispositif CIFRE



Financement :
14 000 € TTC/an sur 3 ans =
42 000 € TTC

Ministère de la Culture,
BRAUP : programme « Archi XX »



Programme pluriannuel de recherche 2016-2020
Architecture du XX^e siècle,
matière à projet
pour la ville durable du XXI^e siècle

En partenariat avec le ministère de la Transition écologique et solidaire et le ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales, en lien avec le Plan urbanisme construction architecture, l'Agence nationale pour le renouvellement urbain, le Centre des déchets et consignes et l'Union sociale pour l'habitat.

Financement :
65 000 € TTC

ÉQUIPE DE FABRICATION DES PROTOTYPES

Chaire Habitat du Futur
+ Doctorante :
Mathilde PADILLA



Financés le programme de recherche « Archi XX »

Les Compagnons du devoir de Villefontaine

Dons de temps passé et de fourniture

Entreprises partenaires :
KCM, Prodotti France,
Asymptote, Ferrari, Steico, Fermacell, Knauf

Dons de temps passé, de matériaux, et financés par le programme de recherche « Archi XX »

Entreprise initialement visée pour être partenaire de la recherche :
Lenoir Métallerie

Investissement initialement prévu de 60 000 € pour financer les prototypes : le partenariat n'ayant pas pu aboutir :

Réponse à l'appel d'offre de recherche pour financer les prototypes

obligation de performance en « bien-être global » – qui, de notre point de vue, mérite un appui financier peut-être encore plus légitime que la précédente – et à développer des méthodologies innovantes pour concilier amélioration du confort et valorisation patrimoniale. L'opération conduite dans le cadre de cette thèse repose sur plusieurs financements publics et privés, notamment via le dispositif CIFRE – Convention industrielle de formation par la recherche. La CIFRE permet de réaliser un doctorat au sein d'une entreprise privée qui finance le salaire du doctorant tout en étant aidée par une subvention de l'Agence nationale de la recherche et des technologies à hauteur de 14 000 € par an, pendant trois ans. Ce dispositif favorise le lien entre recherche et pratique en liant par convention et contrats de collaboration, une entreprise, structure d'accueil de la CIFRE, ici l'agence archipat ; un établissement d'enseignement supérieur, l'École nationale supérieure d'architecture de Lyon ; et des laboratoires, le LAURE et le CRESSON. Cette thèse est également réalisée dans le cadre de la chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture « Habitat du Futur ». A ce titre, elle dispose du soutien matériel de la plateforme d'expérimentation des Grands Ateliers Innovation Architecture, situés à Villefontaine, dont les nombreuses entreprises partenaires ont pu apporter leur expertise, des dons de matériaux et temps passé. Afin de financer les études en vue de la réalisation des prototypes, les copropriétaires ont à leur tour investi 15 000 € TTC sur deux ans¹⁹. La thèse a également été sélectionnée dans le cadre de la troisième session du programme pluriannuel de recherche « Architecture du XX^e siècle, matière à projet pour la ville durable du XXI^e siècle » porté par le ministère de la Culture. À cet effet, la recherche a reçu un soutien financier de 65 000 € TTC pour la conception et la fabrication des prototypes ainsi que la valorisation des résultats de la recherche. Le montage financier de la thèse est présenté dans le tableau ci-contre.

Grâce à ces apports financiers, aux ressources humaines et intellectuelles des différents partenaires, nous avons pu développer une méthodologie expérimentale, qui demeure pour une part complètement inédite, élaborée en collaboration avec une équipe d'ingénierie pluridisciplinaire et d'entreprises spécialisées. Outre les problématiques d'habitabilité, cette thèse interroge la valeur sociale, économique, tout autant que l'authenticité patrimoniale de l'héritage de Jean Prouvé, en questionnant sa réception par les habitants. L'intégration d'une double façade légère est-elle une réponse adaptée au secteur de la réhabilitation de demain ?

.....
19. 7 500 € par an pour les diagnostics réalisés par les bureaux d'étude sur l'immeuble existant puis sur les prototypes.

Comment la concevoir et la réaliser ? Quelles performances bioclimatiques peut-on viser et comment les atteindre à l'aide des matériaux biosourcés ?

Pour répondre à ces questions, un premier chapitre vise à définir les multiples enjeux de cette recherche en revenant sur les origines de la technique constructive des façades légères, ses spécificités et les défis auxquels les façades légères sont confrontées. Il aborde également la question de la patrimonialisation, parfois difficile, de ces éléments de construction industrielle à travers le corpus de l'étude. Le second chapitre détaille la méthodologie de recherche mise en œuvre en commençant par un état de la question, la formation de l'équipe pluridisciplinaire, les méthodes inédites de diagnostics et d'investigations mises en œuvre, puis le processus de conception et enfin l'expérimentation par prototypes. Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats des diagnostics architecturaux, patrimoniaux, thermiques, acoustiques et d'ambiances vécues, socle de connaissances pour la conception des hypothèses expérimentales. Celles-ci sont présentées dans le quatrième et dernier chapitre, qui revient sur la méthode de conception-fabrication des hypothèses, jusqu'aux prototypes et la définition d'une proposition de réhabilitation adaptée à l'immeuble. Nous clôturerons le recherche sur la première rédaction d'un guide à l'usage des architectes, des bureaux d'études techniques, des habitants et des régisseurs qui se destinent à réhabiliter les copropriétés de la seconde moitié du XX^e siècle.

Chapitre 1 :

Une approche multiscalaire

Partie 1 : Les façades légères, une technique issue de l'architecture moderne

1 – Jean Prouvé et les façades légères

L'intérêt de Prouvé pour les questions de constructions économiques n'est certainement plus à démontrer depuis ses premières expérimentations dont la célèbre Maison des Jours Meilleurs (1954) demeure l'un des symboles. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, l'État engage une politique de reconstruction afin de répondre aux immenses besoins en logements contemporains. Jusqu'alors peu répandue, la construction industrielle et préfabriquée se développe considérablement et se voit consacrée dans le cadre de chantiers expérimentaux développés sous l'égide du MRU (ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme), fondé en 1944. L'État entend alors promouvoir de nouveaux modes de conception et de fabrication de l'habitat en favorisant notamment la rationalisation des programmes et l'industrialisation des procédés de construction. L'objectif premier est de réduire les temps de chantier et d'abaisser la qualification de la main d'œuvre dans le but de réduire les coûts. Le développement de la préfabrication en série permet alors de réaliser des chantiers sur lesquels nombre d'éléments de second œuvre sont fabriqués en usine et assemblés *in situ*, qu'il s'agisse de la filière béton comme de la filière métal. La dissociation progressive de la structure et de l'enveloppe permet en particulier la conception des façades dites « légères », composées d'éléments fabriqués en série. Mais ces efforts demeurent très largement insuffisants comme l'illustre en particulier le vibrant appel de détresse radiophonique de l'abbé Pierre (1^{er} février 1954) qui souligne les conditions de précarité et d'insalubrité dans lesquelles vit une partie de la population. En marge des programmes nationaux, l'abbé Pierre fonde également Les Compagnons d'Emmaüs, communauté ouvrière de bâtisseurs. C'est dans ce contexte que Prouvé propose à l'abbé Pierre une solution de maison préfabriquée : la Maison des Jours Meilleurs. Cette maison de 57 m² comprend deux chambres, un vaste séjour et une cuisine incluse dans un

bloc sanitaire ménager. Ce bloc sanitaire est entièrement préfabriqué en acier. Il s'implante au centre de la dalle en béton de l'édifice et, supportant une poutre en tôle pliée, il forme l'ossature porteuse de la maison. L'enveloppe est constituée de panneaux sandwichs légers en bois thermoformé et la couverture est assurée par des tôles d'aluminium. Le prototype de la maison est monté sur les quais de la Seine en sept heures seulement. L'accueil du public est enthousiaste, à la hauteur de l'innovation proposée. Malheureusement, les normes eurent raison de ce prototype qui ne sera pas homologué pour une production en série, ses pièces d'eau n'ayant pas d'ouverture vers l'extérieur. Malgré cet échec, Prouvé persévère et poursuit ses recherches sur la préfabrication, cherchant à produire des éléments de qualité, dans un souci d'efficacité, d'économie financière et de matière. Prouvé s'oriente très tôt vers la production de façades légères préfabriquées et en réalise un certain nombre pour des opérations Emmaüs comme la Cité Pierre Montillet au Blanc-Mesnil (Seine-Saint-Denis) en 1957 des architectes Georges Candilis, Alexis Josic, Shadrach Woods ; mais également en lien avec Baticoop²⁰, dont un immeuble à Dijon de Blanc, Charles Pivot et Pierre Junillon en 1958 ; ou encore avec les Offices HLM comme la Cité des Pâquerettes à Nanterre (Hauts-de-Seine) des architectes Pierre Chazanoff, Jean Darras, Anatole Kopp, Charles Sébillotte construite en 1959.

Malgré l'échec de la Maison des Jours Meilleurs, les procédés industriels mis au point trouveront de nouvelles applications dans les réalisations postérieures de Prouvé qu'il s'agisse de programmes soutenus par l'État comme de projets initiés par des promoteurs privés notamment dans le cadre de copropriétés qui connaissent un développement considérable dans les années de l'après-guerre. C'est dans ce cadre que l'immeuble Les Cèdres est construit sur un terrain acheté par le Groupement des promoteurs lyonnais alors dirigé par Raymond Walch. Les principes qui régissent la production des logements sociaux se voient ainsi déclinés sur des immeubles en copropriété et c'est ainsi que Prouvé est missionné pour la conception des panneaux de façades de l'immeuble lyonnais.

2 – L'industrialisation et la préfabrication

L'industrialisation de la construction et la préfabrication connaissent un essor fulgurant à compter de la Reconstruction bien que ces techniques d'édification aient vu le jour quelques

20. Baticoop est une association regroupant des entreprises coopératives de construction, créée par le collectif des Castors (auto-constructeurs). En 1947, souhaitant mettre en œuvre tous les moyens pour accélérer la construction de logements, l'État vote une loi encourageant la création de ces coopératives. Baticoop est fondée en 1952.

dizaines d'années plus tôt. Rappelons brièvement que l'histoire de la préfabrication puise son origine dans les procédés industriels de construction élaborés aux États-Unis à la fin du XIX^e siècle avec l'édification des premiers gratte-ciel, notamment lors de la reconstruction de Chicago après le grand incendie de 1871. William Le Baron Jenney, architecte et ingénieur américain, élève de l'École centrale de Paris, joue un rôle important dans la reconstruction de la ville en mettant au point des techniques de construction en acier et des éléments préfabriqués pour l'élévation des premiers gratte-ciel. Il est notamment l'architecte du Home Insurance Building de Chicago, construit en 1885, qualifié de premier gratte-ciel au monde (ou de second puisqu'il dispute ce titre avec le New-York Tribune Building de Richard Morris Hunt, construit en 1875, mais qui dispose d'une architecture majoritairement maçonnée). L'industrialisation de la construction est synonyme de série, de rationalisation, de standardisation et de mécanisation. Les objectifs visés par cette nouvelle manière de construire sont de réduire au maximum les temps de chantier, construire plus rapidement et à plus grande échelle, de réduire les coûts, notamment ceux liés à la main d'œuvre, et de rationaliser la production architecturale par l'introduction de modules ou de cellules.

Dans l'entre-deux-guerres, ces notions sont explorées par plusieurs figures pionnières, de Le Corbusier à Auguste Perret, de Pol Abraham à Eugène Beaudouin et Marcel Lods. Dès le début des années 1920, Le Corbusier publie *Vers une architecture*²¹, ouvrage dans lequel il expose les principes industriels par la production en série d'éléments standards et de modules. Selon lui, les architectes modernes doivent construire des édifices en accord avec les nouveaux modèles technologiques : des « machines à habiter ». À cette même période, les architectes Eugène Beaudouin et Marcel Lods expérimentent l'industrialisation de la construction sur certains de leurs projets emblématiques et y associent la préfabrication d'éléments en usine. Ils appliquent ces procédés pour la première fois à grande échelle lors de la construction de la cité du Champs des Oiseaux à Bagneux (Hauts-de-Seine) commencée en 1927. La structure des édifices est constituée d'une grille métallique en acier, dotée d'éléments de remplissage préfabriqués en béton. Entre 1927 et 1939, 972 logements sont construits pour le compte de la société d'HBM (Habitations à bon marché) Pax²². Beaudouin et Lods renouvellent l'opération

21. Le Corbusier, *Vers une architecture*, Paris, Editions Crès, 1923, 254 p.

22. Tous les appartements, d'une à cinq pièces, sont équipés du chauffage central, d'une cuisine et de sanitaires privés. La cité est complétée par un centre social, un cabinet de consultation prénatale et de nourrissons, un poste de secours, une bibliothèque, des espaces sportifs et d'éducation, ainsi qu'un jardin d'enfants. Entre 1954 et 1958, deux bâtiments identiques dit « Nouveau Bagneux » sont construits sur le site, ajoutant deux cent quarante-trois logements à l'ensemble. Une partie de la cité est détruite entre 1987 et 1989.

pour la construction de la cité de la Muette à Drancy (Seine-Saint-Denis) entre 1929 et 1935, accompagnés de Prouvé pour la fabrication des équipements de menuiseries et serrureries. Le projet s'élève sur un terrain acquis en 1925 par l'office public d'HBM de la Seine sur décision de son président, Henri Sellier, qui entend développer le modèle de la cité-jardin dans les communes périphériques de Paris. Il confie le projet à Beaudouin et Lods après les avoir remarqués pour leur travail à la cité du Champs des Oiseaux à Bagneux (Hauts-de-Seine), notamment leur expérimentation de la préfabrication industrialisée *in situ* avec l'ingénieur Eugène Mopin. Ils renouvellent leur collaboration pour cette cité de 1 250 logements d'une à trois pièces. Le chantier est rationalisé à l'extrême et les usines de préfabrication sont édifiées sur place à proximité immédiate du chantier²³. Ces chantiers servent ensuite de modèles pour la généralisation des procédés d'industrialisation de la construction.

Peu de temps après, Beaudouin et Lods collaborent à nouveau avec Prouvé sur le projet de la Maison du Peuple de Clichy et s'associent également avec l'ingénieur Vladimir Bodiansky. L'édifice, construit entre 1935 et 1938, est le premier bâtiment préfabriqué à ossature métallique et mur-rideau de France. Le projet naît d'une commande du maire de Clichy qui lance un concours d'architectes pour la réalisation de la couverture du marché de la commune. Les architectes proposent alors une solution inédite, un marché au rez-de-chaussée, couvert par un étage aménageable en bureaux et salle polyvalente. Celle-ci peut être transformée selon les besoins. Le bâtiment est entièrement modulable grâce à un système de cloisons, plancher et toiture escamotables. Sa qualité lui vaut un classement au titre des monuments historiques en 1984. Ces trois opérations démontrent l'efficacité de la préfabrication pour la construction d'édifices innovants à grande échelle et témoignent également du soin et de la qualité apportés dans la mise au point de procédés de construction industriels.

À bien des égards, ces jalons fondateurs de l'histoire de la préfabrication devaient annoncer les expérimentations futures d'autant que la culture moderniste valorise particulièrement ces techniques de construction. Les constructions deviennent des chantiers « en gants blancs » où la main d'œuvre sur site n'a plus qu'à assembler des éléments finis – du moins en théorie. Des

.....
23. Le plan d'ensemble est constitué de cinq tours de quinze étages accueillant deux cent quatre-vingts logements. Les neuf cent soixante-dix autres sont répartis dans des barres en forme de peignes. En 1935, un immeuble de quatre étages et trois cent soixante huit logements, en forme de U, est ajouté. Initialement, plusieurs équipements doivent compléter l'ensemble, mais faute de moyens, seul le groupe scolaire et une douzaine de logements sont construits. Durant la guerre, la cité sert de camp d'internement et de camp de transit pour les prisonniers en attente de déportation. Après la guerre et quelques années de remise en état, la cité reprend son rôle premier d'habitation. En 1976, les tours et peignes sont détruits par le ministère de la Défense pour construire une caserne. Le 25 mai 2001, le bâtiment U, dernier témoin de l'existence de la cité, est classé au titre des monuments historiques.

systèmes sont mis au point pour construire rapidement et à moindre coût, comme l'illustre le coffrage tunnel qui permet de couler les voiles et les dalles simultanément. Le béton peut être également mis en œuvre sous forme de panneaux, poutres ou poteaux préfabriqués. Il est alors structurel ou sert de parement. Les surfaces vitrées s'agrandissent et le métal est de plus en plus fréquemment employé pour les structures, les menuiseries mais également en parement. Le contexte est particulièrement favorable au développement de ces techniques. La préfabrication et l'industrialisation de la construction apparaissent alors comme des solutions optimales. Rapidement, l'État souhaite sortir la production de logements de la préfabrication lourde, plus lente et nécessitant davantage de main d'œuvre. Les constructions et façades légères sont alors privilégiées. Celles-ci permettent de s'affranchir de certains systèmes de levage souvent difficiles à organiser sur le chantier et de réduire la main d'œuvre.

3 – Aux origines des façades légères

L'origine des façades légères pourrait remonter aux débuts de l'histoire de la construction si l'on considère que le principe consistant à intégrer des éléments de remplissage entre des ossatures porteuses est antérieur même à l'Antiquité. Certaines huttes primitives sont construites avec des ossatures composées de branchages aux sections plus importantes, remplies de paille, feuilles, torchis ou autres. Aux XII^e et XIII^e siècles, le passage de l'art roman et l'art gothique entraîne l'affinement des massifs porteurs et l'allègement des éléments de remplissage. D'une certaine manière, les immenses façades de la Sainte-Chapelle de Paris, composées majoritairement de vitraux insérés entre des éléments porteurs, annoncent les façades légères vitrées du XX^e siècle. Dès 1830, apparaissent également de grandes portes cochères en bois, intégrées entre deux trames structurelles et faisant toute la hauteur du rez-de-chaussée et de l'entresol. Ces portes aux dimensions monumentales comptent parmi les jalons précurseurs des façades légères. Au cours du XIX^e siècle, les progrès réalisés sur les menuiseries et les vitrages permettent de concevoir des croisées de très grandes dimensions comme l'illustre en particulier le traitement des fenêtres de l'aile du Louvre de Visconti et de Lefuel, dévolue au ministère des Finances de 1871 à 1989 ; les grandes baies passant au-devant des planchers de deux étages dans une disposition qui n'est pas sans annoncer celui des façades-rideaux. Dans les dernières décennies du XIX^e siècle, le développement des bow-windows²⁴ et des vérandas témoigne de l'attention des contemporains

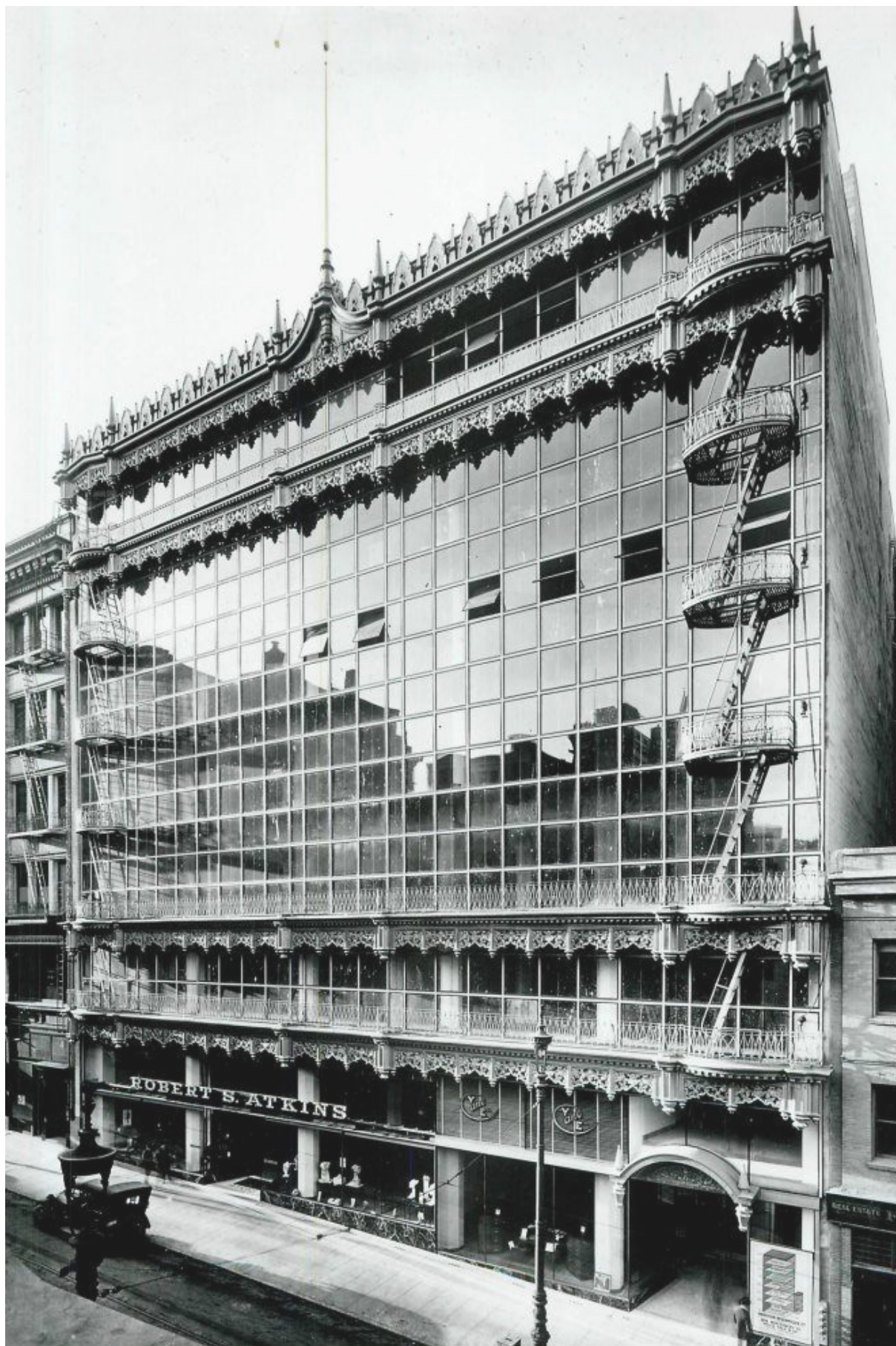
24. Baies vitrées formant une saillie en façade, oriel, ou fenêtre en encorbellement, de plan généralement trapézoïdal.

pour des espaces de vie plus ouverts sur l'extérieur et l'obtention d'une certaine transparence des enveloppes. Disposées en façades selon des trames verticales toute hauteur, ces dispositifs nouveaux créent les premiers éléments de façades rideaux en métal et en verre, comme sur les nouveaux magasins de la Samaritaine construits à Paris en 1925 par Henri Sauvage. De grandes baies verticales en menuiseries métalliques sont installées au nu extérieur de la façade et passent devant les nez-de-dalles. Elles présument des futurs murs rideaux en verre. Mais ces derniers exemples ne sauraient présager des formidables potentialités constructives des expériences contemporaines.

La mise au point des structures en béton armé et en métal permet d'affranchir la façade de ses contraintes structurelles. Les principes modernes de découpage fonctionnel des éléments de construction, associés au développement de la préfabrication, permettent de dégager des possibilités inédites. La structure, élément porteur, se détache alors de l'enveloppe, qui assure la protection, et des cloisons, qui agencent l'espace : naît alors la façade légère. Libérée de ses obligations structurelles, elle devient symboliquement une véritable membrane et s'assimile à la peau du squelette humain. A son image, elle assure une fonction protectrice, imperméable et isolante. Elle protège le corps qui correspond à la structure des édifices. Les gratte-ciel et buildings sont les premiers édifices bénéficiant de la construction de façades légères. Leur construction se développant verticalement, ces immeubles de grande hauteur ont besoin de s'alléger. Les architectes imaginent alors des structures poteaux-dalles ou poteaux-poutres de plus en plus souvent en métal pour réduire le poids, et dont les sections sont calculées pour répondre aux charges d'exploitation et supporter celle de l'édifice. Afin de réduire la charge au maximum, les réflexions s'orientent très tôt vers une réduction du poids de l'enveloppe à supporter. C'est ainsi que les façades légères deviennent une solution particulièrement adaptée pour la construction des gratte-ciel. Les premiers buildings sont construits à la fin du XIX^e siècle à Chicago (États-Unis) et adoptent progressivement l'emploi des murs rideaux comme au Reliance Building conçu par Charles B. Atwood et John Wellborn Root, entre 1890 et 1895. Ce dernier immeuble, construit en structure acier, est doté d'une façade brillante en verre et terre cuite blanche vernissée. Cette brillance et l'alternance de surfaces vitrées et de décors en terre cuite vernie fait toute sa singularité. Le Reliance Building est le premier gratte-ciel qui utilise le verre comme matériau principal dans la composition de ses façades et ce parti s'imposera pour l'essentiel des buildings du XX^e siècle. Ce dernier immeuble, qui se distingue par la légèreté de ses façades, leur capacité d'ouverture sur l'extérieur et leur luminosité, s'élève sur quatorze étages et accueille des cabinets

médicaux et dentaires pour lesquels la luminosité est essentielle. En 1970, il est reconnu pour ses qualités patrimoniales et entre dans le registre national des sites historiques américains. Le Reliance Building préfigure le devenir des futurs murs-rideaux dont le premier attesté est la façade du Hallidie Building de Willis Polk, construit à San Francisco en 1918 et qui constitue le premier immeuble doté d'un mur-rideau de verre continu sur l'ensemble de sa façade de huit étages. Sa transparence n'est rompue par aucun élément structurel, la façade se trouvant en avant de la structure porteuse. Elle est raidie par une grille de meneaux métalliques régulière qui divise les hauteurs d'étages en trois parties. À chaque niveau, la fenêtre supérieure est basculante pour favoriser la ventilation naturelle. Le rideau de verre est suspendu à un mètre de la structure qui se compose de poteaux hexagonaux de soixante-quinze centimètres de diamètre séparés, entre axes, d'environ six mètres. Le dimensionnement de la structure est effectué avec une précision extraordinaire, garantissant la légèreté de l'ensemble. Des balcons métalliques au décor Art nouveau peints en or complètent l'ensemble. L'édifice rompt complètement avec les réalisations contemporaines, qualifié de bâtiment « sans mur », il surprend autant qu'il fascine. Une trentaine d'années plus tard, le mur-rideau s'impose comme une technique obligée dans les programmes tertiaires et commerciaux. Chef d'œuvre de Willis Polk, le Hallidie Building fut longtemps considéré comme le premier bâtiment au monde doté d'un mur-rideau bien que cette affirmation ait été contestée en raison d'un projet antérieur de Walter Gropius et Adolf Meyer dont Polk semblait ignorer l'existence. Gropius et Meyer esquissent en effet un mur-rideau en verre similaire six années plus tôt pour les usines de souliers Fagus à Alfeld en Allemagne. Conçue au début des années 1910, la célèbre usine matérialise de nombreux préceptes du Mouvement moderne qui ne tarderont pas à être relayés par le Bauhaus de Gropius à Weimar, puis en 1924, à Dessau. Relevons que les façades légères de l'usine Fagus sont entièrement vitrées et raidies par des huisseries en acier. Le plus grand mur-rideau de l'ensemble se situe en façade du bâtiment principal et se développe sur trois niveaux. Ses larges baies vitrées contribuent à l'éclairage naturel des locaux, nécessaire au travail d'usine. La structure porteuse en béton armé est réduite à l'essentiel et le reste des façades est orné de briques ocres jaunes. La sobriété esthétique qui caractérise cette architecture pose les fondements de la production des architectes du Bauhaus. Les dispositions prises par les architectes reflètent la révolution issue de l'industrialisation. Cette usine demeure un symbole par ses innovations, tant en termes d'organisation du travail que du point de vue des techniques architecturales par l'emploi inédit de façades légères vitrées²⁵.

25. Elle est classée au titre des monuments historiques dès l'année 1946, et inscrite sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO, tout comme le bâtiment du Bauhaus de Dessau.



Halidie Building, San Francisco, Willis Polk, 1918

Carullo (Valeria), « Cladding innovation last century-style in San Francisco », in *The RIBA Journal*, 16 novembre 2018

a. La Cité de Refuge

En France, l'apparition des façades légères est plus tardive. Le premier architecte qui expérimente leur utilisation n'est autre que Le Corbusier pour la Cité de Refuge de l'Armée du Salut à Paris construite entre 1929 et 1933. Cet édifice est né d'une commande particulière émanant de l'Armée du Salut, implantée en France depuis 1881. L'Armée du Salut est une organisation caritative protestante qui vise à venir en aide aux populations pauvres et aux sans-logis en leur offrant un hébergement et une réinsertion sociale par le travail. Dans l'entre-deux-guerres, Albin Peyron, commandant de l'Armée du Salut en France, souhaite créer un vaste centre d'hébergement pouvant accueillir femmes, mères, enfants, hommes, familles et personnes âgées. Il missionne alors le célèbre architecte et imaginent ensemble le projet de Cité de Refuge, avec la complicité de Pierre Jeanneret, cousin et associé de Le Corbusier. Le projet de la Cité de Refuge devient rapidement un terrain d'expérimentations pour les deux architectes qui y voient le moyen de concrétiser leurs théories architecturales et sociales. Ils imaginent des plans fonctionnalistes, se déclinant selon les usages et les usagers. Bien que singulièrement contraints par les gabarits de hauteur du règlement d'urbanisme les obligeant à disposer les derniers niveaux en gradins, ils dessinent un bâtiment aux formes pures, géométriques et à la plastique d'un énorme paquebot. Le Corbusier matérialise dans ce projet un fragment de sa « Ville radieuse » en expérimentant de nouveaux concepts comme celui de la « respiration exacte ». Le contrôle des ambiances est l'un des éléments fondamentaux de la ville moderne et universelle selon Le Corbusier. Visant une architecture internationale, Le Corbusier pense que le logis doit s'affranchir des données climatiques et environnementales pour fonctionner et s'adapter aux besoins de ses occupants. L'un des fondements de la vie étant la respiration, il insiste sur la nécessité de respirer un air pur, à température constante et humidité régulière. Il développe alors un circuit de « respiration exacte » qui permet de renouveler et faire circuler l'air dans la maison, constamment à dix-huit degrés. Pour cela, la maison doit être totalement hermétique à l'extérieur grâce à l'adjonction de « murs neutralisants ». C'est ainsi que pour la Cité de Refuge, Le Corbusier et Jeanneret conçoivent une façade initialement totalement étanche, sans ouvrants. En pleine période puriste, Le Corbusier veut rendre cette façade la plus uniforme possible et imagine alors, avec l'aide de Saint-Gobain, un pan de verre de près de mille mètres carrés, raidi par une ossature métallique servant de support aux vitres fixes qui le composent. Positionné en porte à faux de la structure, il s'agit du premier mur-rideau construit en France. Désireux de faire un pied de nez aux règles d'urbanisme, Le Corbusier



Refuge de l'armée du Salut, Paris, Le Corbusier, 1929-1933
© FLC/ADAGP



Refuge de l'armée du Salut, Paris, Le Corbusier, 1929-1933 - François Gruson et François Chatillon, 2009-2015
Cl. Olivier Martin-Gambier, 2005, © FLC/ADAGP

inclina légèrement le pan de verre en direction du ciel, plaçant le nu extérieur de la façade quarante centimètres en retrait, lui permettant ainsi de s'intégrer aux gabarits réglementaires. Malheureusement, le système de respiration exacte est vivement critiqué dès les premiers jours d'occupation de la Cité. Peyron évoque un montant de chauffage excessif, les résidents se plaignent du bruit des moteurs la nuit, ceux-ci sont donc coupés. Mais, sans les moteurs, le renouvellement d'air nocturne est insuffisant et certains résidents se plaignent alors de difficultés respiratoires. Le Corbusier refuse cet échec qui met en péril toutes les théories qu'il imagine pour la Ville Radieuse. Il est néanmoins contraint d'intervenir et des châssis coulissants et battants finissent par être installés. Le caractère expérimental du projet conduit inévitablement à des remises en question. Pendant la Seconde Guerre mondiale, le bâtiment est peu entretenu et les vitres brisées par les bombardements sont remplacées par des planches de bois ou des murs de briques. Le 25 août 1944, un bombardement proche de la Cité termine de détruire la façade légère. En 1948, Le Corbusier propose un projet de réfection du pan de verre. L'Armée du Salut souhaite mener une réparation, mais refuse la remise en place du mur-rideau vitré et demande à l'architecte de concevoir une façade plus classique composée d'allèges isolées, de châssis fixes et de vasistas en partie haute. Le Corbusier accepte, ne souhaitant pas revivre la polémique des années 1930, et y ajoute des brises soleil en béton horizontaux et verticaux. La nouvelle façade se compose donc de modules légers préfabriqués en bois, qui s'insèrent entre des éléments saillant en béton. Sa construction s'achève en 1952. Le Corbusier imagine une polychromie de bleu, rouge et jaune, inspirée des teintes du drapeau de l'Armée du Salut, mais celle-ci n'est mise en œuvre qu'une dizaine d'années plus tard. La Cité de Refuge vient consacrer de nouvelles techniques de construction en généralisant la préfabrication et la mise en œuvre de façades dissociées de la structure.

b. La Maison du Peuple de Clichy

Après la construction du mur-rideau de la Cité de Refuge en 1933 par Le Corbusier, Beaudouin et Lods conçoivent le premier mur-rideau à panneaux préfabriqués avec Prouvé pour la maison du Peuple de Clichy. Détaillés dans le corpus Jean Prouvé de cette thèse, les panneaux de façades imaginés pour la Maison du Peuple de Clichy posent les fondements d'une longue série d'éléments de façades légères dont certains des grands principes sont encore aujourd'hui utilisés par les fabricants. Bien qu'aujourd'hui critiquées pour leurs faibles performances thermiques, leur esthétique industrielle et leur apparence démontable, les façades légères préfabriquées se présentent alors comme des dispositifs particulièrement adaptés. Au sens du

CIMUR (Comité d'information pour le développement des panneaux de façades et des murs rideaux), la façade légère est la traduction la plus sincère des principes modernes énoncés par Le Corbusier dès 1930 : une façade qui ne porte plus mais qui s'accroche à l'ossature du bâtiment. Leur esthétique est très exigeante dans le soin à apporter aux détails ; la complexité technique exigeant des études détaillées en particulier sur les joints et les assemblages. Le comité diffuse en 1965 un cahier des charges assurant une « bonne fabrication » des façades légères dans un ouvrage intitulé *Techniques françaises des façades légères*²⁶. Soulignons que le premier DTU²⁷ – Document technique unifié – sur les façades légères n'est rédigé qu'en mai 1961 et la technique n'est couverte par la garantie décennale qu'à partir de 1963. Toutes les façades légères construites avant la mise en œuvre de ces procédures officielles peuvent être considérées comme des prototypes expérimentaux. Les façades légères ont néanmoins trouvé rapidement leur place dans la production des architectes du XX^e siècle. Dans l'ouvrage cité précédemment, le CIMUR fait état d'une enquête réalisée par *L'Architecture Française* auprès de cinq cents architectes visant à déterminer ce qui, selon eux, fait la qualité des façades légères. L'avantage le plus cité est la rapidité de pose, la technique permettant d'installer trois mètres carrés de façade par homme et par heure. Ensuite, les architectes sont sensibles à l'esthétique que leur permet d'explorer les façades légères. Ils apprécient également leur fabrication industrielle, plus rapide, plus précise, offrant de meilleures conditions d'exécution et de travail. La technique est ainsi plus économique et apporte une solution au manque de main d'œuvre dans le secteur du bâtiment. L'aspect économique ayant une grande importance, les architectes sont également attentifs au gain de poids et de surface offert par les façades légères. Leur faible poids permet notamment de réaliser des économies sur les fondations et les ossatures porteuses. Elles sont particulièrement adaptées aux terrains sur lesquels il est difficile de faire de solides fondations. Les façades légères permettent également de gagner un supplément de surface utile pour une même surface construite grâce à leur faible épaisseur et donc de réaliser une économie sur le prix du mètre carré de plancher fini. Enfin, les architectes soulignent la durabilité et l'inaltérabilité des matériaux utilisés.

26. CIMUR, *Techniques françaises des façades légères, Murs-rideaux et panneaux de façades*, Paris, Editions Eyrolles, 1965, 486 p.

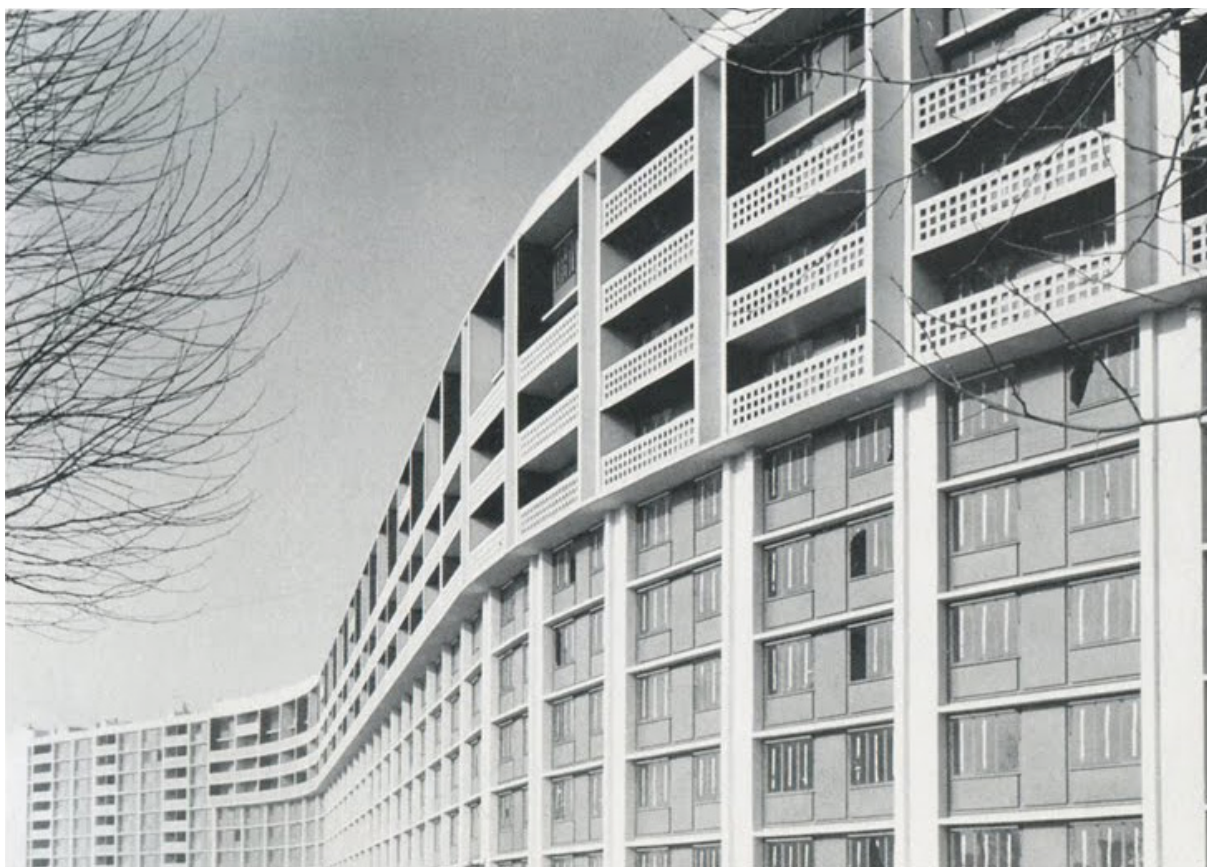
27. Les DTU sont les garants de la qualité de pose et de fabrication des éléments de construction. Rédigés sous formes de notices, ou cahiers des charges, ils sont opposables en cas de non-respect par les entreprises.

4 – Le contexte lyonnais

En région lyonnaise, le développement de l'architecture moderne et des façades légères est essentiellement lié au contexte social et politique de la ville au sortir de la Seconde Guerre mondiale. Dans ces années décisives, le ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme fixe trois objectifs pour l'ensemble du territoire : la reconstruction, la résolution de la crise du logement et l'accélération maîtrisée de l'urbanisation. En 1945, Jean Revillard est nommé délégué régional au MRU pour la région Rhône-Alpes. Il fonde l'Atelier régional d'urbanisme à Lyon et engage Franck Grimal (1912-2003), architecte et urbaniste. Celui-ci est alors associé au jeune diplômé de l'École régionale d'architecture de Lyon, René Gagès (1921-2008). En 1948, Eugène Claudius-Petit est nommé ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme et engage une ambitieuse politique de travaux en donnant une impulsion supplémentaire aux objectifs déjà fixés. Dans le même temps, l'Atelier régional d'urbanisme est chargé d'étudier un plan directeur pour la région lyonnaise inspiré de la Charte d'Athènes. Claudius-Petit lance alors le « secteur industrialisé du bâtiment » en 1951. L'objectif de cette organisation est d'initier des opérations de constructions de logements de grande envergure à l'initiative des offices HLM. La proximité politique entre Eugène Claudius-Petit et Laurent Bonnevey, alors président du Conseil général du Rhône, aide à hisser Lyon au rang de champ d'expérimentation privilégié. En 1951, Grimal et Gagès se voient confier une mission exploratoire destinée à identifier les terrains disponibles de l'agglomération en vue de la construction d'unités de voisinage. Ils s'appuient alors sur un schéma directeur et définissent des sites militaires susceptibles d'être désaffectés par l'armée et possédant des terrains libres : le fort et le domaine du château de la Duchère (Lyon), le fort de Montessuy à Caluire-et-Cuire (Rhône), le fort de Sainte-Foy-lès-Lyon (Rhône), le domaine militaire du Tonkin à Villeurbanne (Rhône) et la caserne de la Part-Dieu (Lyon). Peu de temps après, le site de Bron-Parilly (Rhône) est également retenu. Le programme prévoit alors la construction de quatre unités de voisinage à la Duchère, Caluire, Sainte-Foy-lès-Lyon et Bron-Parilly. Ce plan directeur est complété par deux sites complémentaires : la Part-Dieu et le Tonkin à Villeurbanne. Si l'opération de Sainte-Foy-lès-Lyon ne sera pas réalisée, celle-ci sera compensée par la construction d'autres logements lors de l'opération Moncey-Nord à proximité de la Part-Dieu. Les offices HLM et le MRU choisissent de soutenir la proposition de Bron-Parilly et ses 2 607 logements, soit l'opération la plus importante de la région lyonnaise (1954-1959) dans les années de l'après-guerre.



Maison du Peuple, Clichy-la-Garenne, Eugène Beaudouin, Marcel Lods, Vladimir Bodiansky et Jean Prouvé, 1935-1939
Die Poetik des technischen Objekts – © VBK, Wien, 2009



Unité de construction, Bron-Parilly, Pierre Bourdeix, René Gagès, Franck Grimal, 1954-1959
© SAAL

À Bron-Parilly, Grimal et Gagès rejettent la symétrie au profit du rythme et de séquences plastiques à la faveur d'un système d'immeubles convexo-concaves. Le plan de masse se compose d'unités de construction (UC) dotées de plans libres et qui ont pour unique contrainte leur structure, les gaines techniques et les pièces humides. Les appartements possèdent également des loggias qui rythment la façade. Les refends sont tous perpendiculaires à la façade selon une trame de cinq mètres quarante. Les cloisons intérieures sont mobiles et les façades légères sont composées de panneaux de métal et de verre – en rupture complète avec les traditions constructives lyonnaises habituées aux façades porteuses en béton de mâchefer. Ces dispositions seront fréquemment reprises dans les programmes de logements réalisés postérieurement. L'unité de voisinage de Bron-Parilly constitue la première grande opération du secteur industrialisé du bâtiment en France. Eugène Claudius-Petit met tout en œuvre pour sa réussite (dispense de permis de construire, non-respect des règles d'urbanisme en vigueur, etc.). Le projet réunit de nombreux professionnels. Pierre Bourdeix, plus expérimenté que ses confrères René Gagès et Franck Grimal, est nommé responsable officiel des opérations mais il s'efface et laisse la gestion réelle à Grimal et Gagès. Ils sont aidés par François-Régis Cottin, Jean Sillan, André Delessert, Pierre Turret, Michel Gode, Michel Marin, Joseph Maillet, Jean Maugy, Henri Mayoussier, Noël Albert et René Martin. Cette équipe d'architectes et d'urbanistes travaille ensemble et au sein du même atelier. Deux artistes sont également intégrés à l'équipe, le peintre Claude Idoux et le sculpteur Jean Amado, ainsi que deux paysagistes, Ingrid et Michel Bourne, et de nombreux ingénieurs réunis par Henri Moïse au sein du Groupement d'ingénieurs lyonnais créé pour l'occasion. L'équipe se passera de métreur et s'organise en couple architecte-ingénieur. Cette méthode a permis d'imaginer de nouvelles techniques d'exécutions selon trois principes : la standardisation des éléments, la préfabrication en usine des éléments de second œuvre et l'indépendance des corps d'état. Il en résulte la mise au point de nombreux procédés innovants. La structure est réalisée en coffrage tunnel, les façades intègrent l'isolation, l'étanchéité, les occultations, les protections solaires, l'aération et les menuiseries. Les architectes sollicitent un temps Prouvé pour réaliser les panneaux de façade, mais ses propositions, jugées trop expérimentales et trop chères par le MRU, seront refusées. Les façades sont finalement conçues par Brandt, ancien fabricant de véhicules militaires. Les cloisonnements sont réalisés dans l'usine ISOREL en fibres de bois comprimées entre deux contreplaqués moulés. Les cloisons sont ensuite pisto-scellées sur les sols et plafonds. Tous ces

éléments sont préfabriqués et n'ont plus qu'à être assemblés²⁸. L'opération fondatrice de Bron-Parilly connaîtra une longue postérité sur la production de logements de la région au point que son exemple sera imité sur les opérations contemporaines, qu'il s'agisse de la Duchère, de Montessuy à Caluire-et-Cuire comme de Moncey-Nord à la Part-Dieu.

En quelques années seulement, le coffrage tunnel et les façades légères ou semi-rideaux se diffusent et deviennent des techniques de constructions couramment employées à Lyon. Le secteur privé bénéficiera largement des avancées techniques et constructives développées dans le domaine social comme l'illustrent les nombreuses copropriétés qui voient le jour notamment à l'initiative du promoteur Raymond Walch, qui dès 1952, prospecte des tènements disponibles dans l'ouest lyonnais. Il commence par la construction de trois cent cinquante logements aux débuts des années 1960 à l'immeuble le Mont-Blanc sur la colline de Sainte-Foy-lès-Lyon avec Grimal, Gagès, Idoux, Amado ; Walch sera plus tard le promoteur de l'immeuble Les Cèdres.

Après la construction de Bron-Parilly, la préfabrication et l'industrialisation et les façades légères s'imposent dans de nombreuses opérations de logements de la région lyonnaise ; ces dernières étant le plus fréquemment appliquées sous la forme de murs-panneaux, insérés entre les nez-de-dalle. Au regard du corpus réuni pour les besoins de cette investigation, il semblerait que le seul immeuble de logements lyonnais employant la technique du mur-rideau soit la résidence Les Cèdres ; un autre immeuble de logements est recouvert de panneaux en aluminium passant devant les nez-de-dalle – la résidence Beau site 4 de Pierre Turret construite en 1962 –, mais il s'agit d'un semi-rideau. En raison de son caractère expérimental, nous montrerons que l'immeuble Les Cèdres constitue en réalité un véritable *unicum* à l'échelle de la région lyonnaise comme au niveau national ; dernier immeuble de logements à conserver encore ce type de panneaux de façade conçus par Prouvé.

28. Rey (Jacques), *Lyon, cité radieuse, op. cit.*

Partie 2 : Un patrimoine en devenir

1 – L’obsolescence des composants

a. Une question d’entretien

L’architecture du siècle dernier et particulièrement les façades légères, arrivent à un tournant de leur durée de vie. Bien que la majeure partie de la matière utilisée dans les façades légères soit encore en très bon état, comme les surfaces en aluminium, matériau particulièrement pérenne, certains de leurs composants commencent à être très altérés, nécessitant une restauration voire une réhabilitation leur permettant de s’adapter au contexte contemporain. Sur les façades légères, les points de fragilités se situent au niveau des joints qui se retirent, sèchent et s’effritent au fil du temps, provoquant des problèmes d’étanchéité à l’air et à l’eau. La problématique des joints est particulièrement préoccupante sur les façades légères qui sont constituées par une adjonction de nombreux modules préfabriqués, multipliant les assemblages. Il est visiblement important d’appréhender cette problématique assez tôt afin d’éviter que les infiltrations d’eau ne commettent de dégâts sur les autres composants du panneau. Celles-ci peuvent notamment faire rouiller leurs ossatures métalliques, fragilisant ainsi leur stabilité. L’eau peut également abîmer l’isolant dans le cas de panneaux sandwichs. Par exemple, les isolants fibreux supportent très mal l’humidité. La détérioration de l’isolant peut conduire à des inconforts pour les occupants, mais aussi plus largement, à la détérioration de la façade tout entière par la propagation de moisissures. Le polystyrène et le polyuréthane résistent davantage à l’eau mais celle-ci peut traverser les panneaux et altérer les finitions intérieures des logements. Outre les infiltrations, les joints abîmés peuvent permettre le passage de l’air et créer des inconforts pour les habitants ainsi que des ponts thermiques fragilisant la performance de l’enveloppe. Des joints de menuiseries détériorés peuvent également rendre leur manipulation difficile provoquant des inconforts d’usages pour les habitants, et particulièrement les personnes âgées qui, moins mobiles, doivent parfois déployer d’importants efforts physiques pour ouvrir leurs fenêtres, notamment les coulissantes qui se grippent facilement. Pour éviter ces problèmes récurrents, l’entretien régulier des joints et assemblages des façades légères est nécessaire. Cet entretien est d’autant plus important qu’il permet d’éviter la détérioration des matériaux pérennes des panneaux. C’est un point essentiel de l’objectif de frugalité en conservant les composants sains le plus longtemps

possible, dans le but de limiter la production de déchets, d'autant plus lorsque ces déchets sont potentiellement constitués en majorité de matériaux de très bonne qualité et dans un bon état de conservation. Les parements extérieurs ont une durée de vie plus importante que les joints mais peuvent également nécessiter un entretien selon leur nature. Les façades légères en verre, en acier inoxydable ou en aluminium ne demandent que peu d'entretien sur leurs surfaces. La dilatation est un autre problème récurrent dans les façades légères industrialisées. Il est nécessaire de prévoir un jeu entre la structure et les éléments de façades rapportés pour permettre le mouvement malgré des dilatations variées. Ces jeux sont ensuite comblés par les joints dont le rôle est primordial à tous les égards. On le comprend, les questions d'entretien demeurent déterminantes pour garantir la durabilité des différents composants.

b. Matériaux innovants, nouvelles technologies et réglementations thermiques

Plusieurs matériaux entrant dans la composition des façades légères ont connu de profondes évolutions au cours du XX^e siècle. La diffusion des doubles et triples vitrages, aux combinaisons complexes de gaz et de types de verre, a rendu les simples vitrages des années 1960 complètement caduques. Ils ne répondent plus aux exigences de confort et de performances thermiques et acoustiques actuelles. Sur les menuiseries, les techniques évoluent en permanence pour élaborer des châssis plus isolants, notamment par la rupture des ponts thermiques. D'une manière générale, l'élaboration de la première réglementation thermique, devenue effective en 1974, a provoqué la recherche et le développement de procédés plus isolants rendant nombre de façades légères obsolètes d'un point de vue réglementaire. Établie à la suite du premier choc pétrolier de 1973, la RT 1974 vise à réduire les consommations d'énergies fossiles en diminuant d'au moins 25 % la consommation énergétique des bâtiments, pour la faire passer de 300 kWh/m².an à 225 kWh/m².an. Pour cela, la réglementation impose aux propriétaires d'installer une isolation thermique et des appareils permettant de réguler le chauffage. Un coefficient G permettant d'évaluer les déperditions d'énergies dans un logement à travers ses parois et sa ventilation est mis en place. Au lendemain du second choc pétrolier de 1979, une nouvelle réglementation thermique est instaurée en 1982 avec pour objectif de limiter les consommations énergétiques des bâtiments à 170 kWh/m².an. S'ajoute alors au coefficient G, le coefficient B qui calcule les besoins de chauffage annuels en déduisant les apports solaires naturels. Un label haute isolation est associé à cette RT 1982 pour les logements neufs. La RT de 1988 élargit la réglementation à l'ensemble des

bâtiments, les deux précédentes étant réservées aux bâtiments résidentiels. Elle ajoute également le coefficient C qui permet d'identifier les besoins d'un logement en chauffage et eau chaude sanitaire en prenant en compte le rendement des équipements. L'émergence des préoccupations écologiques et environnementales amène à une évolution de la RT en 2000 qui inclut désormais le concept de développement durable. Les consommations doivent être réduite à 130 kWh/m².an, l'émission des gaz à effet de serre doit être limitée et la notion de confort d'été est intégrée. En 2005, la RT abaisse la consommation réglementaire maximum à 90 Wh/m².an. De nouveaux labels sont créés pour attester de la performance énergétique des bâtiments neufs qui disposent de consommations plus faibles que le seuil de références (labels haute performance énergétique : -10 % ; très haute performance énergétique : -20 % ; bâtiment basse consommation : < 50 kWh/m².an) ou qui utilisent des énergies renouvelables. La RT 2012 fixe le seuil de référence à 50 kWh/m².an, soit le seuil BBC de la précédente RT. L'objectif est ainsi d'économiser globalement 150 milliards de kWh et de limiter les émissions de CO₂. L'accélération du réchauffement climatique conduit à favoriser les bâtiments passifs, c'est à dire dont les consommations d'énergie sont à 0 kWh/m².an ou les bâtiments à énergie positive qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Ce sont les nouveaux objectifs de la RT 2020 qui entre en vigueur au 1^{er} janvier 2022. Depuis 1974, les réglementations thermiques contribuent progressivement à la réduction voire la suppression des consommations d'énergie des bâtiments neufs. Il convient néanmoins de tenter de s'en rapprocher lors des rénovations, le parc existant étant très vaste. De plus, en offrant à des constructions existantes la capacité d'atteindre les objectifs de la RT, la production de déchets, de gaz à effet de serre et d'énergie grise est considérablement réduite par rapport à une démolition-reconstruction.

L'augmentation du coût de l'énergie après les chocs pétroliers des années 1970 a naturellement conduit à cette recherche d'isolation pour abaisser les consommations de chauffage tout en maintenant un confort suffisant dans les logements. L'obsolescence des isolants dans les façades légères possède deux causes : leur épaisseur insuffisante et leur faible qualité environnementale. En effet, les isolants à base de matière plastique, comme le polystyrène ou le polyuréthane, les laines de roches et laines de verre, qui détiennent la part belle du marché contemporain sont aujourd'hui très contestés. Les laines minérales sont par exemple controversées pour le risque sanitaire qu'elles présentent lors de leur pose, et tous ces isolants sont décriés pour leur énergie grise et leur incidence environnementale. Dans le cas de matières existantes, il est préférable de les conserver, leur recyclage étant souvent difficile.

En cas de dépose, ces isolants se transforment alors en déchets et de l'énergie est dépensée pour la production de matériaux de remplacement. Lors d'une démarche de réhabilitation, la méthode la plus frugale doit être recherchée. Le contexte climatique actuel demande à ce qu'une attention particulière soit portée sur le choix des matériaux utilisés dans la construction en privilégiant les matériaux biosourcés, durables et issus de matières premières renouvelables. C'est dans ces conditions que les façades légères doivent s'adapter aux défis environnementaux.

2 – Les façades-rideaux aux défis de la rénovation thermique

a. Le confort, premier vecteur de rénovation

Le confort est une notion subjective, difficile à quantifier, sociologique, culturelle et psychologique. Au cours du XX^e siècle, les attentes des habitants en termes de confort ont considérablement évolué. Les logements sont de plus en plus équipés : eau courante, électricité, chauffage, sanitaires et salles de bain sans parler de la climatisation. Les niveaux de températures attendus par les habitants en été comme en hiver comportent une part de subjectivité et de ressenti propre à chaque individu. Certains habitants se satisfont d'un logement chauffé à dix-neuf degrés, d'autres, notamment les personnes âgées plus sédentaires ou les couples avec enfants en bas âges, demandent des températures plus élevées pour leur bien-être. Pour assurer un confort thermique aux usagers, plusieurs facteurs doivent être pris en compte comme les caractéristiques des équipements de chauffage, la température des parois, l'humidité de l'air ou hygrométrie, la qualité de la distribution de la chaleur, la capacité d'isolation de l'enveloppe, etc. De plus, la température intérieure de confort varie selon les saisons. Compte tenu de la variété des ressentis et de la subjectivité de la notion de confort, prévoir des systèmes de régulation adaptable et permettre aux occupants de gérer les ambiances de leur logement semblent être des solutions intéressantes. Même s'il existe des standards, pour la gestion du chauffage notamment, rendre l'habitant acteur de la gestion de son propre confort, et donc de ses propres consommations d'énergie, constitue une hypothèse tout à fait crédible pour garantir la durabilité des opérations de réhabilitation de façades légères. Bien entendu, pour que le projet soit viable, les conditions minimales de confort doivent pouvoir être atteintes avec des consommations d'énergie mesurées, ce qui est rendu possible par une meilleure isolation des enveloppes. Un juste équilibre doit être

trouvé entre production de chauffage et isolation permettant de conserver la chaleur. En été, cette isolation permet de se protéger de la chaleur extérieure et de conserver la fraîcheur obtenue par la ventilation nocturne. Le confort thermique est donc une donnée sur laquelle il est possible d'agir à plusieurs niveaux dans l'optique de son amélioration.

Outre la thermique, le confort phonique est également important pour les occupants qui souhaitent se protéger des bruits extérieurs comme intérieurs. D'après le baromètre Qualitel Ipsos de 2018, 42 % des français sont déjà entrés en conflit avec leur voisinage à cause des nuisances sonores intérieures²⁹. De plus, une isolation phonique insuffisante nuit à la qualité du sommeil des habitants et peut avoir des conséquences sur leur santé. L'acoustique d'un logement consiste en un savant dosage entre l'isolation vis-à-vis des bruits extérieurs et l'isolation vis-à-vis des bruits intérieurs. La trop grande isolation face aux bruits extérieurs peut en effet renforcer la perception des nuisances intérieures. Là aussi, la réhabilitation doit permettre de trouver un équilibre afin de garantir la pérennité de la façade. La luminosité d'un logement constitue également un vecteur essentiel de confort. L'apport de lumière naturelle est scientifiquement reconnu comme bénéfique pour le métabolisme. Mais comment concilier l'agrandissement des ouvertures pour l'apport de lumière et le confort thermique qui tend précisément à réduire les ouvertures notamment dans le cas de campagnes de travaux liés à l'isolation thermique ? Les baies vitrées peuvent être vectrices de ponts thermiques en hiver et d'importants apports de chaleur en été. De ce fait, il est nécessaire de choisir des menuiseries et des vitrages performants et de prévoir des protections solaires pour le confort d'été. Vivre dans un logement confortable relève également d'une question de santé. Une bonne gestion thermique, une bonne ventilation, respirer un air de qualité, utiliser des matériaux non émissifs de substances dangereuses, sont autant de critères qui permettent de prévenir les maladies.

Bien que ces critères varient d'une personne à l'autre et qu'ils ne soient pas quantifiables aisément, le confort est un besoin universel. L'enquête TREMI réalisée par l'ADEME en 2017 révèle que, sur les rénovations réalisées entre 2014 et 2016, la première motivation des français pour réaliser des travaux est l'amélioration du confort. Ce que corrobore le baromètre Qualitel de 2018 qui note que 48 % des français citent le confort comme motivation première pour une rénovation, contre 37 % qui citent l'économie de charge³⁰. Cette primauté donnée au confort semble évidente compte tenu du temps passé dans nos logements. Avec le réchauffement

29. Orso (Fabrice d'), *Rénovation, plus de 30 millions de logements*, Levallois-Perret, Editions PC, 2019, 111 p.

30. *Ibid.*

climatique en cours, il est important d'anticiper et de ne pas négliger le confort d'été au regard des prévisions d'augmentation des températures d'ici à 2050. Les protections solaires, l'isolation thermique face aux canicules estivales de plus en plus récurrentes, la gestion de l'acoustique, fenêtres ouvertes, lors de la ventilation nocturne, de la luminosité, malgré les protections solaires et du bon renouvellement d'air doivent être intégrées dans les réflexions portées lors de la réhabilitation des logements et de leurs enveloppes.

b. L'urgence climatique et les économies d'énergie

Le secteur du bâtiment représente 45 % des consommations d'énergie en France et 27 % de ses émissions de gaz à effet de serre³¹. Sur un parc existant de 35,4 millions de logements, 7,5 millions sont estimés être des passoires thermiques³², soit plus de 20 % des logements existants. Il est vrai que les logements construits au XX^e siècle avant les chocs pétroliers (1971 à 1979) et la mise en place concomitante de la première réglementation thermique (1974) ne sont pas conçus dans un souci d'économie d'énergie. Pour lutter contre le réchauffement climatique, l'État et les collectivités ont longtemps privilégié les normes et les labels pour la construction neuve bien que l'effort le plus important à déployer se situe dans l'existant. De nouveaux dispositifs sont mis en place depuis plusieurs décennies, mais doivent encore être généralisés pour accélérer le processus de rénovation. En plus de l'amélioration de leur confort, deux autres raisons peuvent pousser les habitants à rénover leurs logements dans le but d'en réduire les consommations d'énergies : la conscience écologique et les questions financières. En effet, la hausse du coût de l'énergie génère des dépenses importantes pour les ménages. Le chauffage représente 67 % des consommations énergétiques d'un foyer³³. L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment permet une réduction significative des déperditions, limitant les besoins de régulation thermique. Pour rappel, l'enveloppe d'un bâtiment est constituée de l'ensemble des parois qui séparent l'intérieur de l'extérieur : les façades (murs et fenêtres), le toit et les planchers. L'isolation de l'enveloppe devient alors une intervention prioritaire lors de la rénovation des logements.

Le mode de régulation thermique revêt à son tour une importance majeure en fonction des besoins et du type de logements. Il existe en effet un large choix de systèmes de chauffage tels

31. Charlot-Valdieu (Catherine), Outrequin (Philippe), Peskine (Hélène), *Réhabilitation énergétique des logements*, Antony, Editions le Moniteur, 2018, 325 p.

32. Orso (Fabrice d'), *Rénovation, plus de 30 millions de logements*, op. cit.

33. Source ADEME

que les poêles à bois, cheminées, pompes à chaleur, radiateurs électriques, chaudières à gaz, géothermie, etc. Le choix du système de chauffage dépend des objectifs attendus : chaleur radiante, réglage de la température dans toutes les pièces, programmation du chauffage à distance, système réversible permettant la ventilation en été, etc. Une isolation bien conçue permet d'opter pour des solutions de chauffage plus économiques, certes parfois moins performantes, mais qui suffisent à combler les faibles besoins de chauffage d'un logement bien isolé. Cet équilibre entre isolation et besoins de régulation thermique est un élément essentiel tant pour le confort que pour l'économie globale d'un projet de réhabilitation. Si l'isolation est trop faible, faire le choix d'un système de chauffage léger risque d'engendrer d'importantes consommations. 30 % des personnes sondées dans le baromètre Énergie-Info de 2018 du Médiateur national de l'énergie avouent restreindre leur chauffage pour ne pas avoir de factures trop élevées, surtout chez les 18-34 ans qui représentent 43 % des personnes interrogées. Toujours selon le même sondage, 74 % des ménages ayant réalisés des rénovations observent une baisse de leurs dépenses énergétiques.

Les prévisions des experts du GIEC (2018) évaluent un réchauffement annuel de +1,5°C que le réchauffement annuel actuel entre 2030 et 2052. Les conséquences dues au réchauffement climatique ne sont plus à démontrer : vagues de chaleur, augmentation des événements climatiques extrêmes, déstabilisation des calottes polaires, montée du niveau des océans, disparition d'espèces naturelles. Les accords de Paris de 2015 fixent un objectif de neutralité carbone en 2050. Cet objectif ne peut être atteint qu'en réalisant une transition énergétique rapide. Selon Charles Arquin, 50 % des émissions de gaz à effet de serre découlent de la construction d'un bâtiment et 50 % de son exploitation. La déconstruction-reconstruction engendre donc 50 % d'émissions à effet de serre supplémentaires par rapport à une construction existante conservée. Il apparaît très clairement que la réhabilitation et la rénovation constituent une solution préférable à la démolition-reconstruction. 40 % des gaz à effet de serre du bâtiment viennent du chauffage et le reste des matériaux utilisés. Employer des matériaux issus de ressources renouvelables et des matériaux locaux s'impose dès lors comme un enjeu majeur³⁴. Les architectes ont un rôle essentiel à jouer dans la promotion de l'utilisation des matériaux biosourcés afin de construire une intelligence collective à l'échelle du territoire. Si l'amélioration du confort des occupants et la transition énergétique des logements s'imposent

34. Propos recueillis dans l'ouvrage : Orso (Fabrice d'), *Rénovation, plus de 30 millions de logements*, Levallois-Perret, Editions PC, 2019, 111 p.

d'évidence pour les copropriétés, les campagnes de réhabilitation thermique se heurtent aujourd'hui encore à des freins qu'il convient d'identifier.

3 – Les freins à la réhabilitation

a. Le déficit d'accompagnement des occupants

Si les bailleurs sociaux bénéficient de programmes d'assistance à la rénovation, les copropriétés manquent cruellement d'accompagnement. Bien que des organismes tels que l'ADEME, l'Anah, ainsi que les collectivités, ou encore l'État, commencent à lancer des campagnes de sensibilisation et d'information, celles-ci restent peu connues des propriétaires et des locataires. Ceux-ci ont pourtant besoin de l'aide de professionnels pour faire les bons choix, résoudre leurs problèmes de confort, réduire leurs factures énergétiques, trouver des subventions, tout en respectant l'architecture de leur immeuble. Le recours à des professionnels est essentiel : un architecte pour concevoir le projet, des bureaux d'études pour faire des diagnostics précis afin de connaître la performance des enveloppes existantes, des équipements de chauffage et de ventilation et pour dimensionner les besoins, des artisans pour mesurer l'ampleur des travaux et établir des devis. Avant toute intervention sur un existant, un diagnostic complet doit être réalisé pour garantir la qualité de l'opération. Un examen scrupuleux de l'état de l'édifice est alors effectué. Ce diagnostic ne peut se limiter à la thermique comme le font les DPE – diagnostics de performances énergétiques – rendus obligatoires avant toute vente d'un bien immobilier. Dans l'optique d'une rénovation, une approche globale conjuguant acoustique, qualité de vie, santé, amélioration des usages, valorisation patrimoniale et architecturale du bien, amélioration du confort et économie du projet, permet de garantir la réalisation d'un projet de qualité. Pour ce faire, il semble pertinent de travailler en équipe pluridisciplinaire, intégrant des architectes, des thermiciens, des acousticiens, des ingénieurs structures, des économistes, des entreprises, etc. En ce domaine, un accompagnement personnalisé des propriétaires semble devoir s'imposer d'autant qu'ils prennent part activement aux échanges et aux discussions préalables.

Bien souvent, par manque d'accompagnement, les propriétaires n'osent s'engager dans une politique globale de rénovation, mais effectuent des travaux ponctuels. Ils réduisent ainsi leur coût d'investissement mais prennent le risque de réaliser des travaux moins efficaces et mal dimensionnés. Par exemple, la copropriété de l'immeuble Les Cèdres a récemment

investi dans la réfection de l'étanchéité de sa toiture, et par la même occasion, l'isolation thermique de celle-ci. Mais en l'absence de calculs globaux pour l'amélioration de l'enveloppe, une épaisseur de sept centimètres de polystyrène a été choisie pour son coût avantageux alors qu'une isolation de vingt centimètres de polyuréthane serait nécessaire pour atteindre un taux de subvention intéressant. Que faire dans ces conditions ? Financer de nouveaux travaux ? Compenser par un autre poste d'isolation ou par une production de chauffage plus importante ? Dans tous les cas, cela engendre un surcoût pour la copropriété. De même, face aux dysfonctionnements récurrents de l'ancienne chaudière celle-ci a été remplacée. Les besoins de chauffage sont alors calculés selon la capacité d'isolation de l'actuelle façade non réhabilitée. L'intervention en cours pour améliorer l'enveloppe de l'immeuble va conduire à une réduction des besoins de chauffage et la chaudière actuelle sera probablement d'une puissance supérieure aux besoins futurs. Une économie sur le système de chauffage peut être réalisée si les deux opérations sont conduites simultanément. La rénovation par une approche globale est bien plus efficace et permet de faire des économies en comparaison de travaux fractionnés. Son caractère raisonné permet également de bénéficier d'aides financières plus importantes. L'approche globale inclut nécessairement une réflexion sur la ventilation – fréquemment oubliée dans les diagnostics – qui se révèle certes indispensable mais, se heurte souvent aux principes de réalité économique. En réalité, ces bouquets de travaux permettent difficilement d'échelonner les dépenses, ce qui représente une contrainte souvent dissuasive pour les copropriétaires ; la seule alternative étant de veiller scrupuleusement aux délais entre les interventions pour rendre l'opération efficace le plus rapidement possible. L'autre inconvénient de la rénovation globale est le risque pour les habitants de ne pouvoir occuper le logement pendant la durée des travaux. Pour prévenir ce problème, les bailleurs sociaux peuvent réaliser des opérations dites « tiroirs » qui visent à déplacer temporairement des locataires vers des logements de courtoisie afin de réaliser les travaux dans leurs logements. Dans le cas de propriétaires occupants, les solutions de relogement sont plus limitées. Il faut donc penser la rénovation globale en réalisant des travaux en site occupé, ce qui constitue une difficulté supplémentaire.

b. Le coût des travaux

Le coût des travaux constitue le principal frein à la rénovation. Le budget des ménages n'est pas extensible et les travaux de rénovation demandent souvent d'importants investissements. Il existe de nombreuses aides à l'échelle nationale comme locale : plan bâtiment durable de

l'ADEME, programme Habiter Mieux de l'Anah, crédit d'impôts pour la transition énergétique, éco-prêt à taux zéro, taux de TVA réduit à 5,5 %, chèque énergie, prime coup de pouce économie d'énergie, etc. Selon une enquête Opinion Way-Teksial rendue publique en 2018, 78 % des personnes interrogées sont incapables de citer un de ses dispositifs, révélant ainsi le manque de lisibilité des subventions. Pourtant, toutes ces aides sont cumulables et peuvent financer jusqu'à la moitié des travaux³⁵. Malgré tout, les usagers se perdent dans le spectre des aides et des organismes à solliciter. Dans ces conditions, on comprend combien l'accompagnement à la recherche de financement constitue un point clé pour accélérer la rénovation du parc existant. L'étude Franfinance CSA « Les français et les travaux » indique que 22 % des propriétaires occupants ayant fait des travaux ont dépensé entre 2 000 et 5 000 €, 19 % entre 5 000 et 10 000 € et 14 % ont dépensé plus de 25 000 €. Ainsi, 45 % d'entre eux ont dépensé entre 10 000 et 25 000 €. On le constate, les travaux de rénovation demandent souvent d'importants investissements. Cependant, l'économie du projet ne doit pas être réfléchi uniquement en termes de coût d'investissement, mais aussi et surtout en coût global. Il faut inclure le retour sur investissement, les économies d'énergies réalisées ainsi que la valorisation du bien. Depuis la loi Grenelle II de 2010, qui impose l'affichage de la classe énergétique des logements (de A à G) dans les annonces immobilières, il faut également considérer la « valeur verte » du bien. En effet, rénover son logement représente généralement un investissement patrimonial valorisable à la revente. En 2017, en région Auvergne Rhône-Alpes, les appartements anciens rénovés notés A ou B se sont vendus 10 % plus cher que les appartements classés D. Les appartements classés C se sont vendus 5 % plus cher³⁶. L'univers économique de la rénovation est donc assez complexe et ne peut se limiter au coût d'investissement de départ. Pour pouvoir l'évaluer avec certitudes, l'accompagnement par un économiste de la construction spécialisé dans la rénovation se révèle hautement nécessaire.

C. Le défi des copropriétés

En France, les copropriétés représentent près de dix millions de logements avec une importante diversité de situations : 47 % sont des résidences principales occupées par leurs propriétaires, 30 % sont des résidences occupées par des locataires, 13 % des résidences secondaires et 10 % des logements vacants. 69 % font partie de petites copropriétés de moins

35. En 2019, l'Anah a financé 120 000 rénovations soit 15 % de plus que l'année précédente.

36. Source : bases de données des notaires de France BIEN et Perval, Orso (Fabrice d'), *Rénovation, plus de 30 millions de logements*, Levallois-Perret, Editions PC, 2019, 111 p.

de 10 logements et 2 % de copropriétés de plus de 100 logements. 26 % des logements en copropriété sont construits avant 1948, 32 % entre 1949 et 1974, 26 % entre 1975 et 1998 et 16 % après 1999. Plus de la moitié de ces logements sont construits avant la première réglementation thermique de 1974 et présentent, de fait, de faibles performances.

Dans la pratique, mener des travaux de réhabilitation dans une copropriété n'est pas chose aisée et nécessite une large adhésion des copropriétaires. En effet, les copropriétés sont constituées de parties privatives et de parties communes. Dans les parties privatives, chaque copropriétaire est libre d'effectuer les travaux qu'il souhaite, tant que ceux-ci n'affectent pas les parties communes, l'aspect extérieur de l'immeuble et la solidité du bâtiment. Ces travaux ne doivent en aucun cas changer la destination de l'édifice ou atteindre les parties privatives des autres copropriétaires. Toutefois, la loi Alur de 2015 permet à un vote de la copropriété d'imposer des travaux sur des parties privatives comme les menuiseries de façade. En revanche, d'autres travaux, considérés comme relevant des parties communes, concernent tous les copropriétaires, tels que la réfection des toitures, le ravalement des façades, les mises aux normes ou le changement des ascenseurs, etc. Ils sont soumis à un vote en assemblée générale. Par exemple, le remplacement de l'ensemble des fenêtres d'un immeuble pour un modèle commun peut être une décision de copropriété votée en assemblée générale à la majorité, tout comme la décision d'installer une isolation par l'extérieur. En revanche, l'isolation par l'intérieur est une décision propre à chacun qui ne peut être imposée par un vote de la copropriété. Dans ces conditions, il est difficile de concilier isolation de l'enveloppe et respect des qualités architecturales et patrimoniales d'un immeuble souvent détériorées par une isolation par l'extérieur. Quelques clauses particulières peuvent exister. Un copropriétaire qui aurait procédé au remplacement de ses fenêtres dans les dix dernières années ne se voit pas à nouveau obligé de remplacer ses fenêtres sur ordre de la copropriété. Les assemblées générales sont souvent le lieu de longs débats entre les copropriétaires avant d'aboutir au vote. En ce qui concerne les rénovations énergétiques, toutes les copropriétés ont obligation de réaliser des audits, mais seulement 10 % d'entre elles engagent ensuite les travaux. Plusieurs facteurs expliquent ce faible taux, à commencer par la lenteur et la rigidité des procédures, le nombre de décideurs, la situation financière de certains copropriétaires, le coût élevé des travaux, ou encore un retour sur investissement peu satisfaisant. Les audits énergétiques réglementaires et les diagnostics de performances énergétiques sont souvent difficiles à interpréter par les copropriétaires notamment lorsque ceux-ci ne sont

pas accompagnés dans cette démarche. Pour recueillir l'adhésion des copropriétaires, il est nécessaire de faire œuvre de pédagogie dès le début des études. Un dialogue et un climat de confiance doivent être instaurés au démarrage du projet. Ainsi, les concepteurs peuvent comprendre les attentes des copropriétaires et leur expliquer les enjeux de la réhabilitation de leur immeuble. Malgré les avancées considérables sur le sujet, en France, plus de cent mille copropriétés rencontrent des difficultés financières qui entraînent une dégradation progressive des édifices jusqu'à l'insalubrité. En 2018, l'Anah et l'ANRU ont lancé le Plan initiatives copropriétés qui s'est traduit par un investissement de 2,7 millions d'euros sur dix ans pour faciliter la rénovation de sept cents copropriétés sur le territoire national. Cette initiative représente un début prometteur mais les problèmes financiers sont encore le principal frein que rencontrent les copropriétés pour la rénovation. De telles questions se posent en des termes plus épineux encore dans le cas d'immeubles présentant des qualités patrimoniales reconnues comme la copropriété Les Cèdres.

4 – Une question complexe

Si chacun s'accorde à penser que la réhabilitation doit être vectrice de confort, de qualité de vie et de valorisation patrimoniale et que les logements doivent être à la fois plus économes en énergie, dans quelle mesure ces protocoles, ces préconisations théoriques sont-elles susceptibles de s'appliquer à un immeuble comme Les Cèdres ? Comment ces recommandations peuvent être adaptées à des cas de figure aussi particuliers ? Si la singulière technicité des façades légères doit être prise en compte dans leur réhabilitation, dans quelle mesure leurs caractéristiques propres sont susceptibles de contribuer à la définition des solutions d'amélioration ? Dès lors, comment concilier leur nécessaire adaptation aux besoins du XXI^e siècle tout en préservant leur caractère et leur identité ? Comment ces immeubles spécifiques remettent-ils en question les modes d'interventions ? Valorisation du patrimoine et travaux énergétiques sont-ils véritablement antinomiques ? L'isolation par l'extérieur, largement plébiscitée par les normes et bureaux d'études thermiques, ne permet pas toujours de conserver l'aspect originel d'une façade, notamment ses modénatures, et peut engendrer le développement de moisissures et la détérioration des matériaux d'origines ne supportant pas le confinement. En présence d'un édifice à forte valeur patrimoniale, l'isolation par l'intérieur peut être préférable. Dans tous les cas, les réflexions doivent tenir compte des spécificités de l'existant dans le dessein de concilier réhabilitation, confort, transition énergétique, économie et respect du patrimoine.

Partie 3 : Un corpus à définir et à identifier

1 – L'immeuble les Cèdres

a. Présentation

L'immeuble Les Cèdres est un immeuble de logements construit au numéro 44 de la rue de la Favorite dans le 5^e arrondissement de Lyon. Il tire son nom des deux grands cèdres présents sur son terrain avant la construction de l'immeuble, encore conservés à ce jour. Construit entre 1959 et 1962, il comprend soixante logements en copropriété. La copropriété est alors une idée nouvelle à Lyon, celle-ci n'apparaissant pas avant les années 1960, sur lequel les promoteurs lyonnais, réunis en groupement présidé par Raymond Walch, capitalisent afin d'offrir des immeubles résidentiels à des acquéreurs attentifs au confort moderne. C'est ainsi que Walch achète le terrain du 44 rue de la Favorite et crée la société civile Immobilière « Les Cèdres » qui devient le maître d'ouvrage de l'opération ; le promoteur se chargeant de la commercialisation des logements. Une fois ceux-ci vendus, une copropriété est créée et remplace la SCI. La régie Franchet, régie familiale lyonnaise, est désignée comme syndic de copropriété, fonction qu'elle occupe encore aujourd'hui.

b. Des architectes à l'école de la modernité

Une même communion d'esprit devait réunir Raymond Walch et les figures modernistes de la scène lyonnaise contemporaine ; François-Régis Cottin et Alain Chastel en l'occurrence pour Les Cèdres. Cottin suit l'enseignement secondaire des Chartreux et développe son goût pour les mathématiques et la géométrie. Bachelier à dix-sept ans, il entre en classe préparatoire de l'École des Beaux-Arts en 1937 aux côtés de René Gagès, qui s'illustrera à Bron-Parilly et, plus tardivement, au Centre d'échanges de Lyon Perrache (1978). En 1939, il est reçu premier au concours d'entrée de l'École régionale d'architecture de Lyon. Il intègre alors, toujours aux côtés de Gagès, l'Atelier Tony Garnier dirigé par Pierre Bourdeix. Cottin se fait rapidement remarquer comme un élève brillant notamment en raison de la qualité de ses rendus, au point de songer un temps à présenter le Grand Prix de Rome, en vain. Il est diplômé en 1949 pour *Un prieuré pour les missionnaires des campagnes en Dombes* dans lequel il revisite la construction en pisé avec le béton armé. Par la suite, il s'associe à l'architecte Henri Mayoussier et ils participent ensemble à l'élaboration du projet de Bron-Parilly dirigé par Gagès et Bourdeix. Ils



Immeuble Les Cèdres à sa construction, côté rue
© SAAL, fond 14B François-Régis Cottin

se séparent en 1957. Cottin crée alors sa propre agence dans un local qu'il partage avec une autre figure de la scène moderniste lyonnaise : Pierre Genton (1924-2004). En 1972, il réduit considérablement son activité et installe un temps son agence dans l'immeuble Les Cèdres où il partage un appartement avec l'architecte Paul Bouteille. Diplômé de l'École de Chaillot en 1975, Cottin s'impose également comme l'un des historiens lyonnais les plus respectés et participe à la renaissance de la Société académique d'architecture de Lyon, fondée en 1830, et exerce les fonctions d'archiviste de 1975 à 2013. L'architecte s'impose par des œuvres puissantes d'une modernité brutaliste hautement revendiquée comme l'annonçait déjà sa première réalisation : la chapelle de la Giraudière à Brussieu (Rhône) en 1950. Très tôt, il place le logement au cœur de ses préoccupations et réalise en particulier des maisons individuelles groupées autour de placettes le long du boulevard de ceinture à Vénissieux (Rhône) pour le compte de l'office HLM ; dernier programme dans lequel il revisite le rapport entre espaces privés et espaces publics. À la fin des années 1950, Cottin élabore le plan masse du quartier de la Duchère à Lyon avec Grimal et Coulon qui s'impose comme le second jalon après Bron-Parilly dans la généalogie des grands ensembles de la région lyonnaise. La même année, il conçoit les plans de l'immeuble Les Cèdres dans le quartier Saint-Just, toujours à Lyon. À la Duchère encore, il est également l'auteur de la tour Panoramique (1967-1972), de l'église du Plateau (1968) ainsi que du spectaculaire château d'eau (1967). Au cours de sa longue carrière, Cottin se distingue également en matière d'enseignement. Il rejoint Gagès au sein de l'atelier libre fondé par ce dernier en 1951 et y enseigne jusqu'à sa dissolution en 1968. Rationaliste, lecteur de Viollet-le-Duc et admirateur de l'architecture utopiste du siècle des Lumières, Cottin conçoit son activité à une échelle de temps long dans lequel le Mouvement moderne est appréhendé comme le produit d'un processus historique. En parallèle de l'atelier, il est nommé professeur de construction à l'École régionale d'architecture de Lyon de 1958 à 1964.

Pour le projet de l'immeuble Les Cèdres, Cottin s'associe à l'architecte Alain Chastel (1922-1986). Ensemble, ils réalisent les plans d'aménagements de l'immeuble, des logements et des abords. Chastel est également diplômé de l'École régionale d'architecture de Lyon. Un même sens de l'histoire devait réunir les deux architectes : Chastel fait partie de la Société historique, archéologique et littéraire de Lyon dès 1956 aux côtés de François-Régis Cottin qui en devient président entre 1974 et 1976. Son frère, Arnould Chastel, administrateur d'immeubles, est membre de l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Lyon avec Cottin qui la rejoint en 1976. Bien que moins connu que son associé, Chastel prit visiblement une part active à

l'élaboration de l'immeuble Les Cèdres. L'équipe est complétée par le chef d'agence de Cottin, Marcel Dallièr (1929-2020) qui termine tout juste ses études lors de la conception de l'immeuble et participe ensuite à la réalisation d'un immeuble au 45 avenue Marc-Sangnier à Villeurbanne, ou encore à la résidence Les Deux Amants dans le quartier de Champvert (Lyon). Relevons que Dallièr a lui-même habité l'immeuble Les Cèdres dans un logement situé au 6^e étage de l'allée B. La conception des façades légères de l'immeuble sera dévolue à Prouvé qui est associé à de nombreux projets en région lyonnaise dans les décennies 1960-1970.

C. Jean Prouvé et la région lyonnaise

Rappelons brièvement qu'après une première carrière de ferronnier au sein de l'École de Nancy, Prouvé oriente très tôt sa production vers l'architecture à la faveur des premières commandes de Robert Mallet-Stevens qui fait appel à lui pour la réalisation d'éléments d'aménagement intérieur dès 1926 ; Prouvé dépose d'ailleurs son premier brevet pour une cloison mobile en 1929. La même année, Mallet-Stevens associe Prouvé à la fondation de l'UAM (Union des artistes modernes) et dès lors, l'artiste nancéen multiplie les collaborations avec les plus grandes figures du moment, parmi lesquelles Charlotte Perriand, et participe en 1930 à la première exposition de l'UAM. Sa notoriété grandissant, les commandes affluent et en 1931, il crée « Les Ateliers Jean Prouvé » qui emménagent rue des Jardiniers à Nancy. Ces locaux, plus grands, permettent d'accueillir une trentaine de compagnons et de faire l'acquisition d'une presse-plier de quatre mètres de largeur, autorisant de plus grandes réalisations. En 1932, Prouvé fait la rencontre de Tony Garnier qui le missionne pour la production de salles d'opérations, de fenêtres à guillottes, ascenseurs, cloisons et portes pour la construction de l'hôpital de Grange-Blanche à Lyon. Cette commande importante oblige Prouvé à réorganiser ses ateliers et lui ouvre les portes de l'échelle industrielle. Une année plus tard, sa rencontre avec Beaudouin et Lods, adeptes de l'industrialisation de la construction et de la préfabrication, marque un tournant décisif dans sa carrière. Ils réalisent ensemble l'Aéro-club de Buc (Yvelines, 1935-1936), un prototype de maison de vacances démontable et surtout l'emblématique Maison du Peuple de Clichy en 1939. Ces collaborations fructueuses lui permettent d'accéder plus facilement à la commande auprès d'autres architectes et démontrent l'efficacité de ses procédés. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, Prouvé poursuit son développement et déménage ses ateliers à Maxéville près de Nancy. En raison de la pénurie d'acier, il commence à s'intéresser à l'aluminium et à en exploiter les potentialités. L'Aluminium Français, groupement commercial fondé en 1911, achète bientôt des parts

dans ses ateliers qui s'étendent sur 25 000 m², accueillent deux-cents ouvriers, atteignant la dimension industrielle ambitionnée par son fondateur. Mais Prouvé démissionnera en 1953 pour refonder quelques années plus tard une nouvelle société (Les Constructions Jean Prouvé) qui réalise de nombreux projets : le pavillon du centenaire de l'aluminium à Paris (1954), sa maison à Nancy (1954-1955), la buvette d'Évian (Haute-Savoie, 1957), une école à Villejuif (Val-de-Marne, 1957) sans compter la Maison des Jours Meilleurs (1954). Après cette période particulièrement féconde, Prouvé intègre la Compagnie industrielle du matériel de transport (CIMT) en 1956, importante firme métallurgique spécialisée dans la fabrication de wagons. Prouvé est responsable du département bâtiment et profite des moyens techniques importants disponibles dans les ateliers de la CIMT pour développer son invention de panneaux sandwichs pour murs-rideaux. Selon lui, la technique des façades légères est le seul moyen d'atteindre une production industrielle dans le domaine du bâtiment en fabricant des éléments standards en usine. Prouvé participe à des projets d'envergures avec la CIMT, notamment pour la conception de murs-rideaux qu'il s'agisse de l'aérogare d'Orly-sud (Henri Vicariot, 1959), de la tour Nobel à Puteaux (Jean de Mailly et Jacques Depussé, 1964-1966), de la faculté de médecine de Rotterdam (1965-1968) ou encore du siège de l'UNESCO, toujours à Paris (Bernard Zehrfuss, 1969). C'est au sein de la CIMT qu'il crée les panneaux préfabriqués qui composent la façade de l'immeuble Les Cèdres.

Au cours de sa carrière, Prouvé est associé à de nombreux projets dans la région lyonnaise à compter de sa collaboration avec Garnier pour l'hôpital de Grange-Blanche. Il réalise notamment la verrière, les rampes, balustrades, portes métalliques et cabines d'ascenseurs du célèbre garage Citroën construit dans le VII^e arrondissement de Lyon entre 1930 et 1932 par l'architecte Maurice-Jacques Ravazé. Gagès fera également appel à lui pour l'élaboration de façades industrialisées des unités de voisinage de Bron-Parilly en 1953. Quelques années plus tard, il réalise les murs-rideaux d'une vingtaine de bâtiments conçus par Jacques Perrin-Fayolle sur le campus de la Doua à Villeurbanne dont la construction débute en 1957 et participe à plusieurs commandes universitaires à Lyon parmi lesquelles les façades du restaurant du CROUS de Saint-Irénée, construit entre 1961 et 1968 dans le V^e arrondissement de Lyon, à quelques centaines de mètres de l'immeuble Les Cèdres ; ou encore les façades et structures métalliques triangulées de la faculté de Bron (Rhône) pour l'architecte René Dottelonde entre 1969 et 1973. Il collabore une seconde fois avec Gagès en tant qu'ingénieur-conseil pour l'élaboration des façades et structures métalliques de l'emblématique centre d'échanges

de Lyon Perrache en 1972. Deux ans plus tard, il concevra encore les façades des bureaux de l'agence GERAU à Vénissieux (Rhône) fondée par Jacques Rey, ancien élève et architecte assistant de Gagès. Le travail de Prouvé en région lyonnaise sera consacré lors de l'exposition *Lyon-Europe, 100 ans d'architecture moderne* (1988), dont Gagès assure le commissariat³⁷, comme la concrétisation de l'ambition du Mouvement moderne de concilier art et technique.

d. Un immeuble-manifeste

Insertion urbaine et aménagements extérieurs

L'immeuble Les Cèdres est implanté au cœur du V^e arrondissement dans les collines de l'ouest lyonnais entre les faubourgs de Saint-Just et du Point-du-Jour. En raison d'une situation privilégiée, l'immeuble surplombe la ville et le grand paysage sur sa face nord, lui permettant d'observer en premier plan la colline de Fourvière, en second plan celle de la Duchère et en arrière-plan les Monts du Lyonnais. Malgré cette position en surplomb, l'imposante barre parallélépipédique en aluminium est cachée par de nombreux masques visuels, que ce soit depuis les quartiers en pied de colline ou depuis la rue de la Favorite. Le tissu urbain environnant l'immeuble est constitué d'un patrimoine bâti assez disparate composé de villas et de jardins, de petits immeubles et de fragments urbains de l'ancien faubourg de Saint-Irénée. La parcelle de l'immeuble est située dans le périmètre de co-visibilité de l'église Sainte-Irénée qui fait l'objet d'un classement au titre des monuments historiques sur la liste de 1862. La rue de la Favorite n'est que peu urbanisée jusque dans les années 1950. Elle présente un tissu faubourien très aéré par des parcelles encore libres de toute construction. Les immeubles les plus anciens s'implantent majoritairement le long des rues. Dans les décennies de l'après-guerre, le tissu se développe de façon hétérogène, soit en lanières, les immeubles offrant leurs pignons à la rue, soit parallèlement à la rue mais en retrait, comme l'immeuble Les Cèdres. Cette position en retrait de la rue de la Favorite permet d'aménager un jardin qui met à distance l'immeuble de l'espace public et permet de réduire les vis-à-vis depuis les résidences construites de l'autre côté de la rue. Le jardin offre une large respiration végétale et s'inscrit dans la continuité des opérations voisines fortement végétalisées. Même après la construction de l'immeuble Les Cèdres, le quartier ne se densifie pas outre mesure et conserve de nombreux espaces de respirations particulièrement agréables. Suivant les principes issus du Mouvement moderne, l'immeuble est implanté au centre de sa parcelle, dont il occupe toute la largeur,

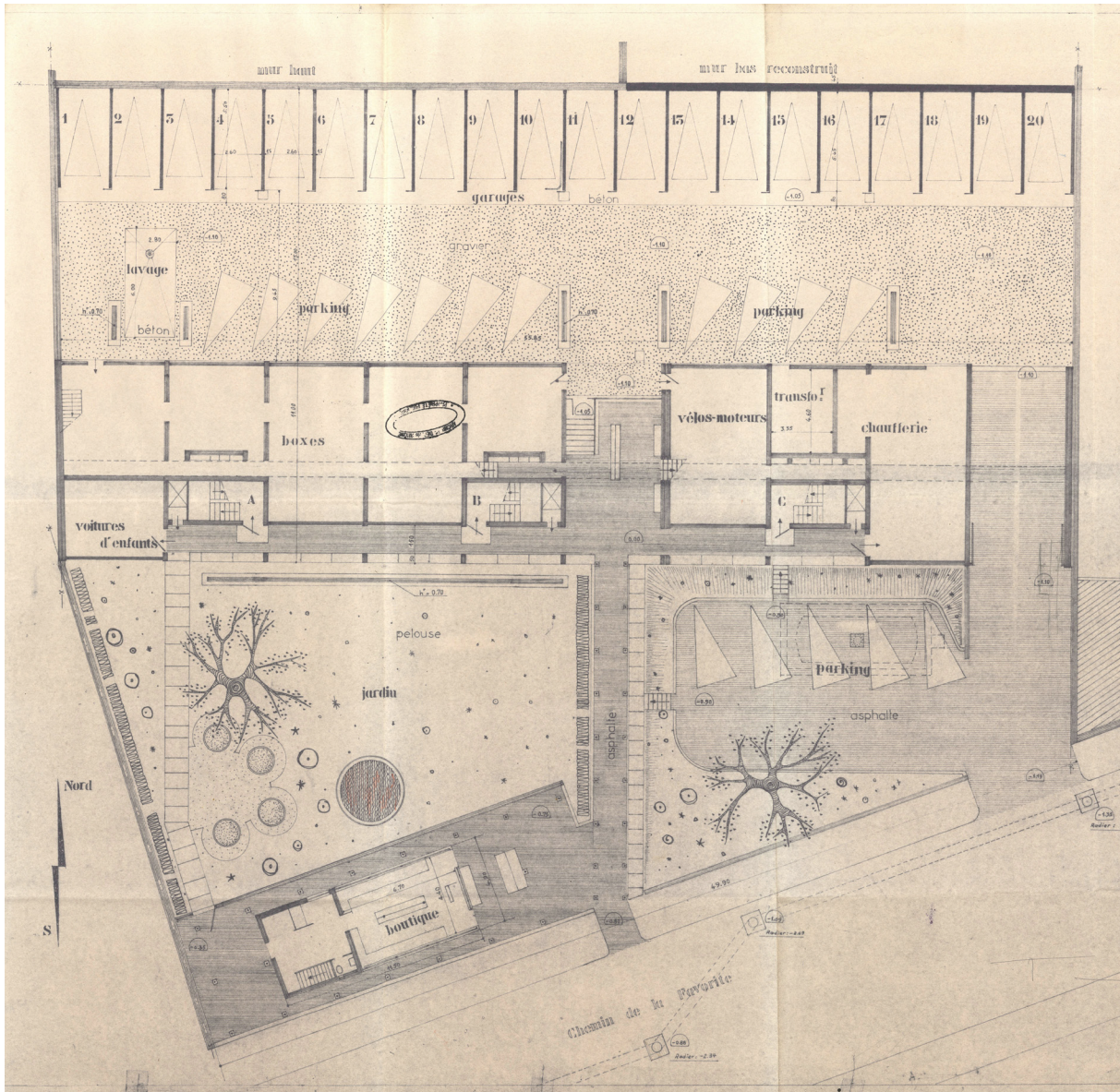
37. Roz (Michel), Charre (Alain), Bohigas (Oriol), Geist (Jonas), Rice (Peter), Crotti (Sergio), *Lyon-Europe, 100 ans d'architecture moderne : Milano, Barcelona, Birmingham, Frankfurt, Liège*, Pierre Mardaga éditeur, 1988, 251 p.

et ne respecte pas d'alignement ni de parallélisme à la rue. L'avant et l'arrière de la parcelle restent reliés par des traversées ménagées dans le rez-de-chaussée. À l'avant, il dispose d'un jardin arboré aménagé par les architectes qui profitent de la présence de grands cèdres sur la parcelle pour les intégrer à un projet paysager incluant les espaces de circulations. Quelques places de parking sont également aménagées en contrebas du jardin. Elles sont néanmoins masquées depuis la rue par un important filtre végétal. L'arrière de la parcelle forme un espace entièrement dédié aux véhicules avec vingt garages, onze places de stationnements et une aire de lavage ; remplacée par de nouvelles places de stationnement à la demande des habitants. La dissociation fonctionnelle, déterminante dans la culture de la modernité, distingue les parcours piétons et motorisés qui disposent d'accès et de cheminements différenciés. Les piétons accèdent au bâtiment depuis une rampe reliant la rue à l'édifice et peuvent alors traverser le bâtiment jusqu'aux garages par le hall d'entrée principal qui distribue également les caves. Une galerie, au sud, leur permet de rejoindre les distributions verticales donnant accès aux logements. Les véhicules entrent sur la parcelle par un accès à l'est, le long du mur d'enceinte et passent sous le bâtiment pour rejoindre les garages. L'aménagement extérieur de l'immeuble renvoie également à une logique de conception moderne : à chaque fonction son espace dédié.

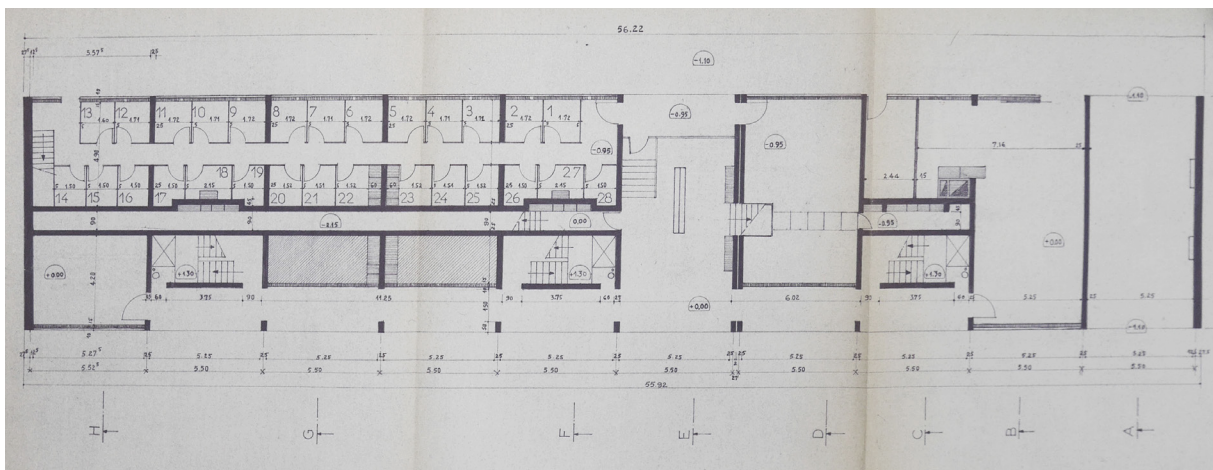
Organisation spatiale

L'immeuble s'élève à une trentaine de mètres de hauteur au moyen de neuf niveaux et d'un rez-de-chaussée en double hauteur. La volumétrie de la résidence Les Cèdres est simple : un parallélépipède rectangle sans aspérités. Seuls quelques édicules en toiture et le retrait opéré en rez-de-chaussée viennent rompre la volumétrie parallélépipédique du bâtiment. La barre de logements affiche une faible occupation du sol avec une emprise de seulement six cent quinze mètres carrés pour soixante logements, une loge de gardien et des locaux communs. À cette surface, s'ajoutent les trois cent vingt mètres carrés occupés par les garages disposés en fond de parcelle parallèlement à la barre. Ensemble, ils n'occupent que 38,5 % de la parcelle. Dans le projet initial, un magasin devait prendre place sur la rue. Finalement, ce dernier projet sera abandonné, le tissu pavillonnaire environnant n'offrant pas une grande attractivité commerciale. L'immeuble ne possédant qu'une fonction résidentielle, son implantation en retrait marque nettement la limite entre espace public et espace privé.

L'immeuble Les Cèdres est orienté selon un axe est/ouest. Ses façades principales sont largement ouvertes sur le sud et le nord. Le rez-de-chaussée de l'immeuble se développe sur



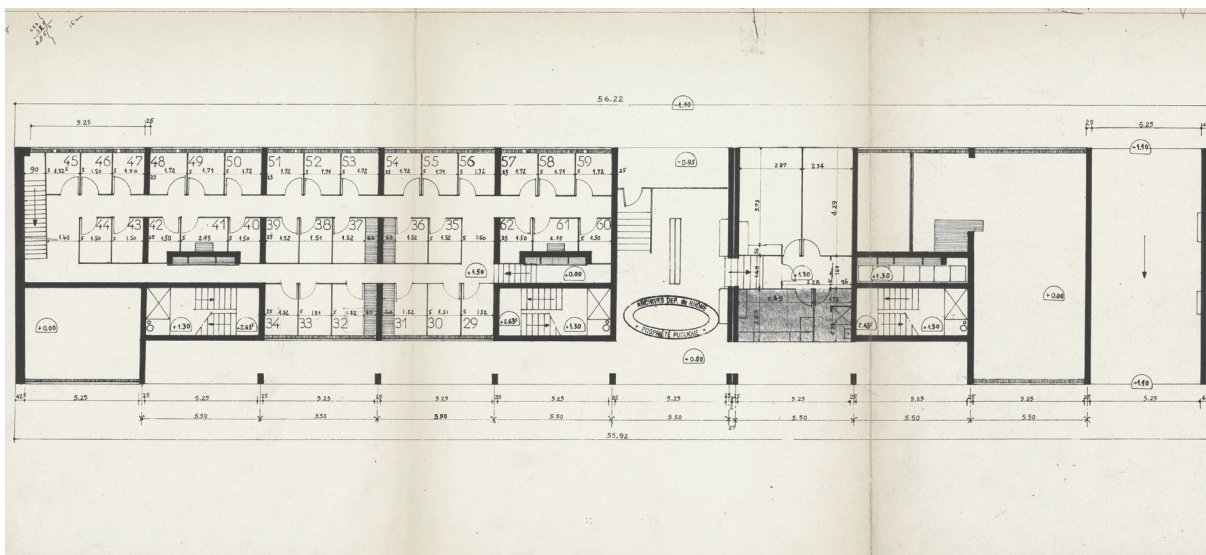
Plan masse et rez-de-chaussée, D2, éch. 1/100^e, mars 1959
 PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16



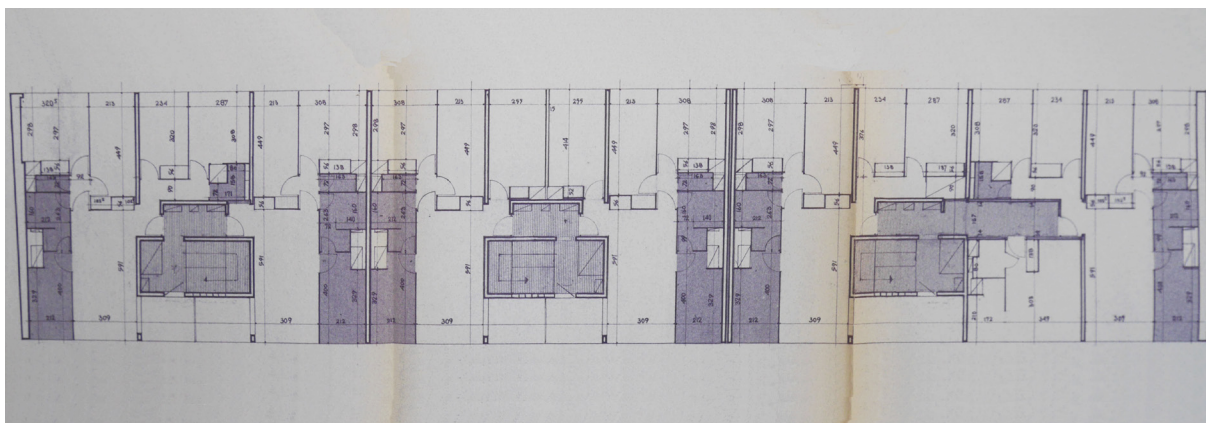
Plan des niveaux -0,95 et 0,00, D4, éch. 1/100^e, mars 1959
 PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16

plusieurs demi-niveaux et regroupe la totalité des locaux communs. Le niveau le plus bas est semi-enterré. Il est occupé par le vide sanitaire et par vingt-huit caves dans la partie ouest. Le hall commun traversant est quant à lui au niveau du sol (0,00 mètre) comme le local poubelle, le local poussette et la chaufferie. La loge du concierge et les premiers paliers de distribution verticale sont placés à 1,30 mètre au-dessus du sol. Le second niveau de caves se situe à 1,50 mètre du sol. L'accès des véhicules et les garages sont à -1,10 mètre. Cette complexité de niveaux permet d'optimiser au maximum l'utilisation du volume du rez-de-chaussée et permet également au logement du gardien d'être surélevé par rapport au niveau de la galerie extérieure piétonne dégagée par le retrait de la façade vis-à-vis des poteaux de structure. Le logement est ainsi protégé du regard des autres riverains. Cet imposant rez-de-chaussée est surmonté par neuf niveaux de logements fractionnés en trois allées : A, B et C. Les allées A et B se composent de trois trames structurelles chacune tandis que l'allée C, la plus à l'est, en possède quatre. Un joint de dilatation sépare l'allée C des deux précédentes. Chaque allée distribue des paliers de deux logements sauf l'allée C qui, dans ses six premiers niveaux, en distribue trois. En façade sud, l'emplacement des distributions verticales se devine par les panneaux des loggias qui diffèrent des panneaux courants. Les niveaux 1 à 6 forment les étages courants de l'immeuble. L'allée A est composée d'un T5 et d'un T3 par niveau, l'allée centrale B de deux T4, et l'allée C de deux T5 et d'un T1. L'immeuble possède une offre de logements extrêmement diversifiée lui permettant d'assurer une certaine mixité. Tous les séjours et cuisines sont situés côté sud et les chambres au nord. Les pièces humides sont regroupées au centre des appartements pour partager les gaines techniques. Les distributions horizontales sont au centre de l'immeuble afin de laisser les pièces servies en premier jour. La ventilation naturelle des logements est assurée par un système d'entrées d'air en façade sur les panneaux des cuisines, et de sorties par des conduits shunt dans les salles de bain et les WC. Tous les appartements sont traversants, hormis les T1, ce qui facilite la ventilation naturelle. Cottin équipe également l'ensemble des logements de loggias, sauf les T1 et les T5 du pignon est. Tous les plans d'appartements intègrent également des rangements afin de les rendre plus fonctionnels. Les niveaux 7 à 9 diffèrent toutefois des niveaux précédents au niveau de l'allée C où des T6 remplacent les T1 et les T5 du pignon.

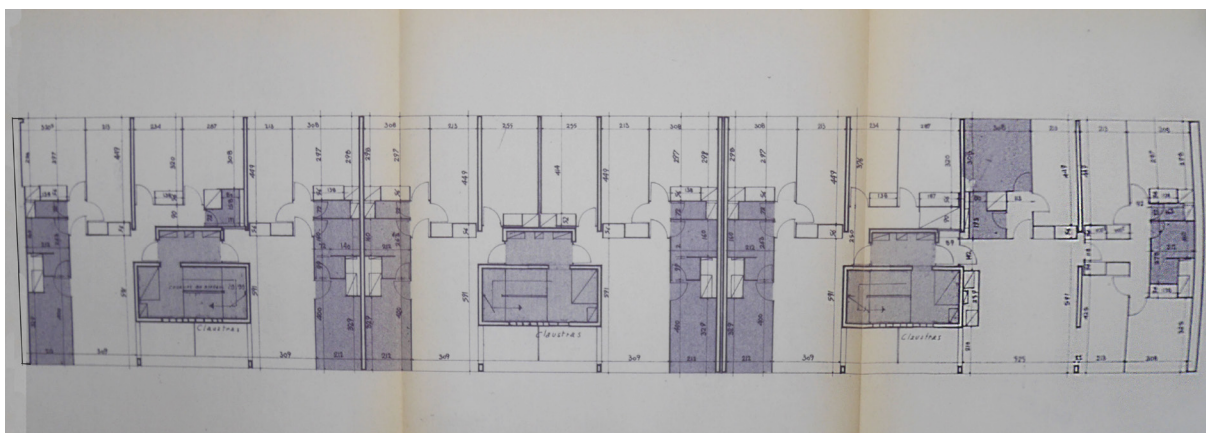
D'après le permis de construire, la structure verticale de l'immeuble est assurée par une succession de murs de refend de 0,25 mètre d'épaisseur en béton de gravier armé, selon une trame de 5,25 mètres entre chaque refend. Ils sont coulés sur la hauteur totale d'un étage. En



Plan des niveaux 0,00 ; 1,30 et 1,50, D5, éch. 1/100°, mars 1959
PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16



Plan des niveaux 3,97 ; 6,64 ; 9,31 ; 11,98 ; 14,65 et 17,32, D6, éch. 1/100°, mars 1959
PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16



Plan des niveaux 19,99 ; 22,66 et 25,33, D7, éch. 1/100°, mars 1959
PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16

rez-de-chaussée, au niveau de la galerie, les charges verticales sont reprises par des poteaux. Les fondations sont assurées par des murs continus ou semelles en béton de gravier. La structure horizontale se compose de dalles pleines en béton armé de 0,17 mètre d'épaisseur.

Études et chantier

Les études débutent en 1956 selon les documents disponibles aux Archives municipales de Lyon. Une première demande de permis de construire est déposée en mars 1957. Elle est acceptée en mai 1958, mais un permis modificatif est déposé en mars 1959. Il est définitivement approuvé en avril 1959. Entre le premier et le second permis de construire, la boutique atelier et le local commercial sont supprimés. Le premier permis inclut un parking couvert de deux niveaux accolés à l'immeuble, au nord. Deux rampes est et ouest permettent d'y accéder. Dans le permis modificatif, le nombre de garages couverts est réduit à vingt, sur un niveau, détaché de l'immeuble au fond de la parcelle. Les voitures y accèdent de plain-pied par une travée dégagée en rez-de-chaussée de l'immeuble. L'ensemble est complété par seize places de stationnement extérieures. Dans le nouveau permis de construire, une loge de gardien est intégrée en rez-de-chaussée ainsi que des édicules de machinerie en toiture. Un étage de logements est également ajouté portant leur nombre à neuf et le nombre de logements à soixante. Une fois le permis approuvé, les travaux démarrent en 1959, mené par l'entreprise générale Jangot-Bonneton et C^{ie}. La société est alors dirigée par Albert Routier, ingénieur centralien diplômé en 1923. L'entreprise Jangot-Bonneton, fondée par son grand-père en 1874, a collaboré avec Cottin sur certains immeubles à la Duchère et réalise également les magasins généraux à Vaise ou encore le tunnel de l'Île aux Souvenirs du parc de la Tête d'Or qui conduit au monument aux morts de Garnier. Les archives restent muettes quant à la collaboration qui s'instaure entre les trois architectes de l'immeuble et Prouvé. Des photographies retrouvées dans les fonds d'archives Jean Prouvé montrent des ouvriers du chantier procédant au montage du mur-rideau en aluminium. Deux hommes équipés qu'un treuil ou palan de levage suspendu en toiture suffisent pour assurer le montage des éléments. Ces nouvelles techniques permettent de mener le chantier relativement rapidement et celui-ci dure un peu moins de trois années pour l'ensemble des aménagements. Le chantier débute à la fin de l'année 1959. En 1961, le gros œuvre est achevé mais les abords sont encore en chantier. En 1962, les aménagements sont terminés et les premiers propriétaires emménagent, mais une photographie aérienne d'époque montre les garages encore inachevés ; ceux-ci ne seront livrés qu'en 1963.



Le chantier des Cèdres
© Centre Pompidou/MNAM-CCI/Bibliothèque Kandinsky

Outre ses qualités plastiques et constructives, l'immeuble se distingue par une exigeante recherche typologique. Si les modèles des barres de logements conçues dans les décennies de l'après-guerre à Lyon demeurent fortement influencés par la pensée corbuséenne contemporaine (structure sur pilotis, façades épaisses creusées de loggias, murs-panneaux légers, emploi systématique de béton net de décoffrage), on observe que l'immeuble Les Cèdres cherche délibérément à s'en distinguer pour rechercher une plasticité inédite en proposant un langage architectural plus « industriel » et « mécanique » qui lui vaut le surnom de « Mistral » à l'image du célèbre train assurant la liaison Paris-Nice de 1950 jusqu'en 1982. Selon Jacques Rey, « Ce bâtiment, dont le mur-rideau est étudié par Jean Prouvé, constitue peut-être l'expression la plus radicale et la plus aboutie du Mouvement moderne à Lyon³⁸ ». Ce caractère singulier, qui devait fortement contribuer à la valeur historique et patrimoniale de l'immeuble, justifiera sa labellisation « Patrimoine du XX^e siècle » en 2003. Si l'engouement autour de l'œuvre de Prouvé ne se dément pas – amplement alimenté par le marché de l'art –, on observe toutefois que ses réalisations demeurent extrêmement fragiles d'un point de vue patrimonial comme l'illustre en particulier l'« affaire » qui entoure l'intervention, un temps envisagée, de Rudy Ricciotti à la Maison du Peuple de Clichy. Si l'œuvre de Cottin ne bénéficie pas de la même notoriété, relevons toutefois qu'une esplanade a été inaugurée en 2019 au pied de la tour de la Duchère, après certes, de spectaculaires démolitions.

e. Les façades de l'immeuble Les Cèdres

La singularité de l'immeuble Les Cèdres tient à son enveloppe composée de panneaux préfabriqués. Ces panneaux donnent un aspect lisse et tramé aux deux façades principales nord et sud et leur confèrent une esthétique singulière ainsi qu'une finesse et une légèreté étonnantes sur un bâtiment aussi imposant. Le dessin de ces façades légères et uniformes se révèlent très différent de celles présentées dans les permis de construire consultés. En effet, les panneaux de façade étant dessinés et fabriqués par Prouvé à la CIMT, leurs esquisses ne figurent pas au permis de construire. Celles imaginées au stade du permis sont moins régulières et les loggias sont plus lisibles. Les ouvertures prévues dans le permis sont dotées de menuiseries rectangulaires classiques tandis que les menuiseries imaginées par Prouvé possèdent des angles arrondis donnant à l'immeuble une image de caravane, de paquebot ou encore de train. L'assimilation à une esthétique issue des moyens de transport est évidente. La

38. Rey (Jacques), *Lyon, cité radieuse, une aventure du Mouvement moderne international*, Lyon, Libel, la Maison de l'architecture Rhône-Alpes, 2010, 141 p.



La façade sud de l'immeuble Les Cèdres à sa livraison
© Centre Pompidou/MNAM-CCI/Bibliothèque Kandinsky

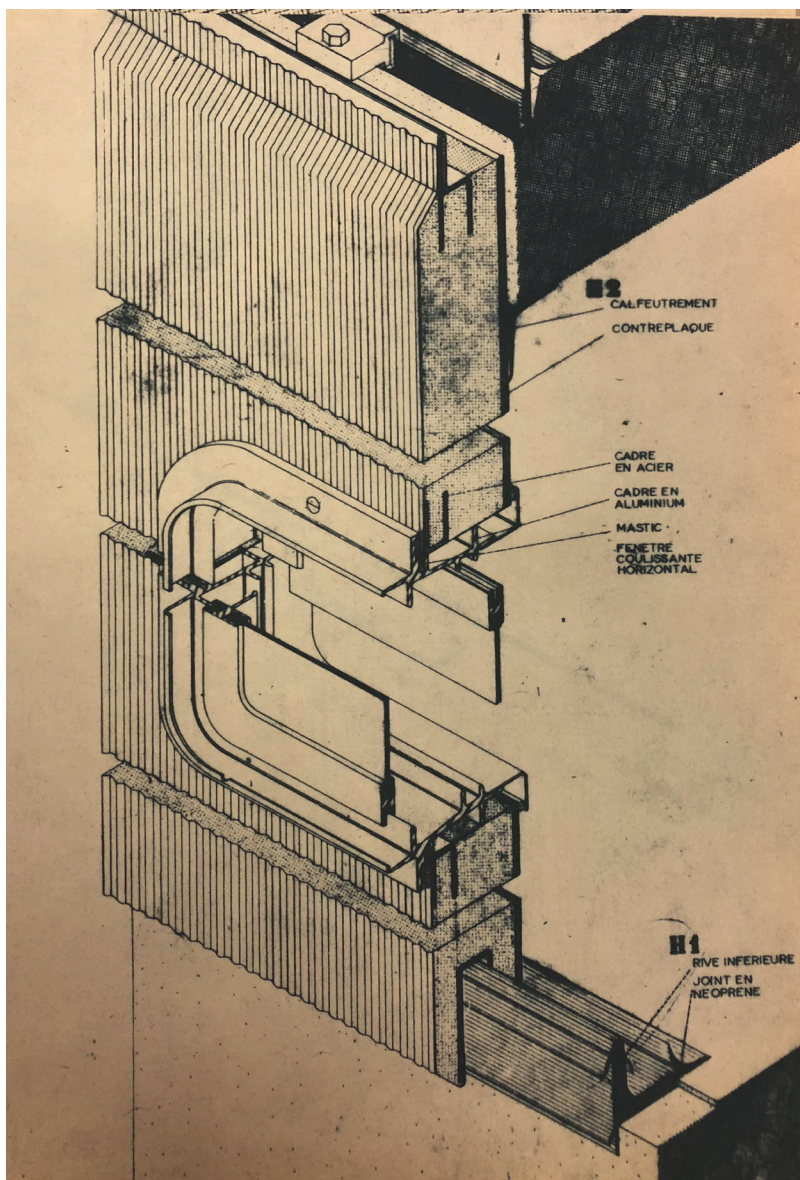


Le Mistral en 1956
© SNCF

fabrication des panneaux au sein d'une firme construisant des véhicules l'explique tout autant que la filiation de Prouvé aux grands industriels de l'automobile dont il admire les méthodes de travail. Pour autant, on sait combien son approche industrielle reste paradoxale, préférant impliquer les ouvriers de ses usines dans les étapes de conception et organisant régulièrement des réunions de travail autour d'un dessin ou d'une maquette. En réalité, sa démarche relève d'une dichotomie entre industrie et artisanat, répondant à des commandes complexes pour lesquelles il doit constamment réadapter les modèles standardisés qu'il imagine. Cherchant à la fois à répondre de la manière la plus adaptée possible aux commandes, tout en souhaitant optimiser la consommation de matière et les temps de fabrication, Prouvé conjugue ses compétences d'artisan ferronnier à celles de fabricant industriel. Le dessin ne différencie pas seulement les façades initialement présentées au permis et celles conçues par Prouvé. La technique employée a également évolué, les façades du permis sont en murs-panneaux composés d'éléments légers permettant de combler les vides entre refends et dalles. Cette disposition permet de lire la trame structurelle de l'immeuble, ce que la façade finalement réalisée efface totalement pour privilégier une « peau » lisse et homogène au point de rendre délicate les distinctions entre appartements et l'identification des différentes pièces. Ainsi, la façade ne laisse pas voir la combinatoire complexe mise en œuvre par Cottin pour offrir des appartements de différents types allant du T1 au T6. Seuls les panneaux de loggias, ouverts en partie haute, trahissent la trame des allées en façade sud. Un œil aguerrri et une observation plus détaillée des façades permettent d'identifier également les T1 et les T6 dont les panneaux varient quelque peu de la trame courante. Prouvé utilisera pas moins de cinq types de panneaux sur l'immeuble Les Cèdres dont les variations se situent au niveau des ouvertures ; tous les panneaux étant de mêmes dimensions. Les panneaux dits « classiques sud » composent la quasi-totalité de la façade méridionale. Ils disposent d'une fenêtre composée d'une allège vitrée fixe surmontée d'un coulissant à deux vantaux. Ce type est utilisé sur les pièces de séjour et les cuisines. Quelques unités se retrouvent en façade nord, dans les T6 des derniers niveaux de l'allée C dont les séjours sont traversants. Cent-dix panneaux sont de type « classiques sud », mais les panneaux les plus fréquents sont les « classiques nord » avec cent-soixante-quatorze unités. Ils composent les façades des chambres, côté nord. Sur ce type, Prouvé retire l'allège fixe vitrée pour donner plus d'intimité aux habitants dans les espaces de nuit. La fenêtre des panneaux « classiques nord » est donc moins haute que celle des « classiques sud ». La troisième famille de panneaux concerne les loggias et représente cinquante-quatre panneaux.



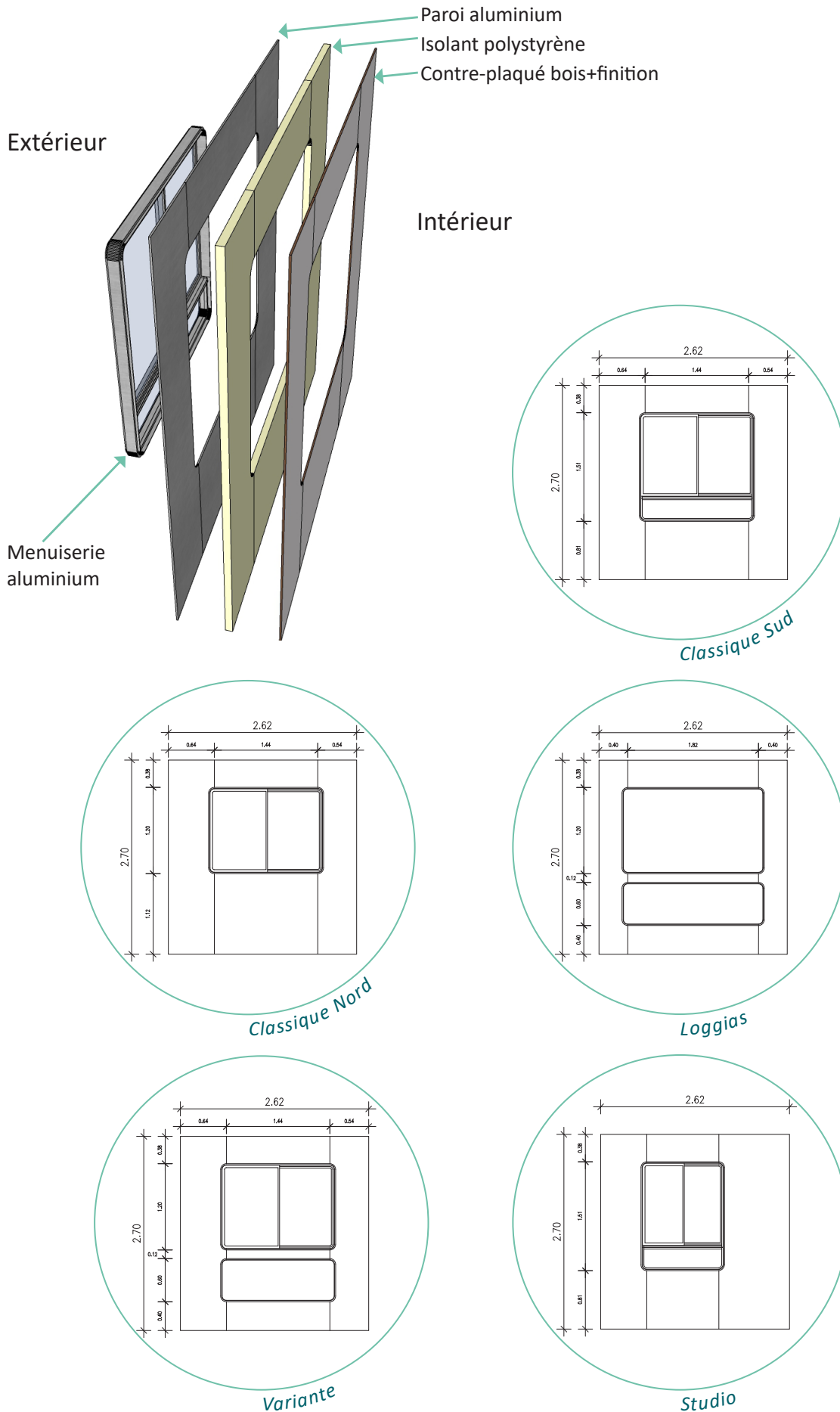
Façade sud, D15, éch. 1/100^e, mars 1959
PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16



Coupe verticale axonométrique d'un panneau
© Centre Pompidou/MNAM-CCI/Réserve d'architecture/230J139

Dans ce cas, Prouvé souhaitant faire bénéficier les habitants de la plus large ouverture possible vers l'extérieur, la partie pleine du panneau est considérablement réduite. En partie haute, une ouverture plus large que celle des fenêtres courantes est créée, tandis qu'en partie basse une allège vitrée est ménagée par un hublot en saillie du panneau. Ce hublot se retrouve en allège sur le type appelé « variante ». Le panneau est ensuite complété par une menuiserie identique à celle utilisée dans le type « classique nord ». Ce type « variante » est utilisé dans les séjours des appartements T6 situés dans les derniers niveaux de l'allée C, côté sud. L'objectif de Jean Prouvé, dans la conception de ce type, est d'apporter davantage de lumière naturelle dans les séjours des T6 plus profonds que ceux des autres appartements. Cette variante ne concerne que seize panneaux. Quelques panneaux de ce type sont également installés dans un appartement de l'allée B qui n'est autre que celui acheté par Marcel Dallièrre. Enfin, le dernier type de panneaux est le type « studios » qu'on retrouve au niveau des cuisines des T1 dans l'allée C côté sud. Il s'agit de panneaux « classiques sud » mais dont la largeur de la menuiserie est réduite pour s'adapter à la largeur des cuisines des studios, plus étroites. Il s'agit du type le plus rare, utilisé seulement six fois sur la façade. Dans la conception de ces cinq typologies de panneaux, Jean Prouvé s'interroge quant aux usages des espaces et leurs besoins en luminosité comme en intimité. Les panneaux de l'immeuble Les Cèdres se font l'écho des réflexions engagées par Prouvé une quinzaine d'années auparavant³⁹. Ils mesurent deux-cent-soixante-deux centimètres de large pour deux-cent-soixante-neuf centimètres de haut. Ils sont conçus par Prouvé entre 1959, date de dépôt du permis de construire, et 1960 l'année du début des travaux. D'un point de vue technique, les panneaux sont composés d'une feuille d'aluminium ondulée côté extérieur, d'une plaque de bois contreplaquée à l'intérieur et d'un remplissage en polystyrène. Les panneaux des loggias possèdent deux faces en aluminium strié. La solidité des panneaux est assurée par des cadres en acier internes. Les menuiseries sont formées de coulissants en aluminium et d'un simple vitrage de trois millimètres. Le reste des façades figuré dans le permis de construire a été réalisé sans modification : une galerie en rez-de-chaussée, trois allées tramées, l'emplacement des loggias et les parements du rez-de-chaussée (mosaïque de grès cérame et briques de mâchefer). Les pignons sont également plus détaillés dans la réalité que ceux du permis de construire et ont été réalisés en béton matricé coulé en place. Chaque niveau de dalle est marqué par un important joint creux qui contraste avec les reliefs verticaux du motif. On retrouve les mêmes motifs sur les refends apparents

39. Voir page 89 « Les façades industrielles de Jean Prouvé ».



du hall commun ouvert et de l'allée d'accès des véhicules en rez-de-chaussée. Ces éléments de façades, bien que moins significatifs que les panneaux sandwichs Prouvé, participent de la physionomie de l'immeuble.

f. Une conservation satisfaisante

Depuis sa construction, l'immeuble Les Cèdres a subi plusieurs modifications. Évidemment, les habitants ont chacun revu les aménagements intérieurs de leurs appartements en modifiant ou supprimant des cloisonnements, notamment pour ouvrir la cuisine sur les séjours ou pour supprimer une chambre. Quelques rares habitants ont procédé à une faible isolation thermique des façades, par l'intérieur ou à une isolation phonique vis-à-vis de l'appartement voisin. Outre ces changements peu visibles, les façades ont fait l'objet de diverses transformations au fil des décennies. Certaines loggias ont été par exemple fermées pour créer des espaces tempérés, non chauffés, servant soit de jardins d'hiver, soit d'atelier de peinture ou encore d'espaces de régulation de température l'été. D'autres copropriétaires ont étendu leurs séjours sur ces loggias en allant jusqu'à parfois les chauffer. Ces fermetures impliquent l'ajout d'une menuiserie coulissante à l'emplacement initial de l'ouverture vers l'extérieur qui participent de l'hétérogénéité des menuiseries qui se retrouve également sur les fenêtres courantes de l'immeuble. En effet, de nombreux habitants, cherchant à mieux isoler leur logement ont remplacé les menuiseries d'origine par des fenêtres modernes, plus récentes et dotées de doubles vitrages. Pour combler les angles arrondis des dormants, les menuisiers ont souvent ajouté un sur-châssis, parfois en bois. Dans ces conditions, le clair-de-vue des ouvertures se voit nettement diminué dans un sentiment d'autant plus accentué par les profils des nouvelles fenêtres dont les sections sont bien plus importantes que celles des menuiseries extrêmement fines conçues par Prouvé. Enfin, ces remplacements successifs n'étant pas entièrement coordonnés, l'immeuble présente aujourd'hui un catalogue d'une dizaine de modèles de menuiseries différentes conférant à l'ensemble un effet de mosaïque. En plus de ces transformations réalisées individuellement, la copropriété a mené deux campagnes de ravalement de façades. En 1983, le nettoyage de l'ensemble des panneaux en aluminium a été réalisé ainsi que la reprise de l'ensemble des joints verticaux entre les panneaux. Ces travaux ont été associés à des reprises de maçonnerie et d'étanchéité en toiture et sur les bandeaux. Les bétons du rez-de-chaussée ont été alors repeints et l'éclairage du hall d'entrée a été remplacé. Dans l'ensemble, ces travaux n'ont pas modifié la physionomie de l'immeuble. En revanche, au début des années 2000, une seconde intervention a considérablement altéré

la lecture d'ensemble des façades nord et sud. Les panneaux sont alors pourvus de bavettes horizontales entre chaque niveau et au-dessus de chaque menuiserie dans le but d'améliorer l'étanchéité de la façade. À cela, ont été ajoutés des couvre-joints en aluminium sur l'ensemble des joints verticaux. Les joints jusqu'ici traités en creux ont alors acquis un relief qui perturbe aujourd'hui la perception des façades. De plus, la finition aluminium de ces éléments, plus brillante que celle des panneaux, accentue leur visibilité. Ces nouveaux éléments tracent des lignes indésirables sur les façades dont le dessin originel accuse une très grande sobriété. Ces différentes modifications, particulièrement lisibles, ont progressivement modifié la lecture des façades sans en altérer toutefois le caractère.

Le profil des copropriétaires

L'immeuble Les Cèdres fait montre d'une véritable mixité sociale. Depuis sa construction, l'immeuble n'a aucun logement vacant, ce qui prouve l'intérêt porté aux appartements qui se vendent d'ailleurs assez rapidement. Les profils sont variés avec des personnes actives, des retraités, des étudiants, des familles et des jeunes couples. 67 % des habitants sont des propriétaires occupants, 28 % des locataires et 5 % sont des locataires sociaux⁴⁰. La moitié des habitants vivent dans leur logement depuis plus de dix ans, 15 % depuis moins d'un an, 30 % entre un et cinq ans et 5 % entre cinq et dix ans. 32 % des foyers se composent de cinq habitants, 4 % de quatre habitants, 24 % de trois habitants, 8 % de deux habitants et 32 % des logements sont occupés par des personnes seules⁴¹. 48 % des habitants ne s'estiment pas prêts à déménager contre 48 % qui pensent quitter leur logement d'ici quelques années pour seulement 4 % qui prévoient de partir dans l'année qui suit l'enquête. Les habitants interrogés évoquent souvent les problèmes de confort comme motif de leur départ, des mutations professionnelles, ou changements de vie. Les habitants vivent dans une ambiance chaleureuse de voisinage, presque assimilée à celle d'une communauté. Les voisins se connaissent, se rendent des services et sont globalement investis dans l'entretien et la vie de leur immeuble. Le conseil syndical se compose de dix habitants, sans président, jusqu'en 2021, où une présidente a été élue pour gérer les nombreux projets en cours. Dès le démarrage du projet, les habitants ont été attentifs à prendre en compte les réflexions portées par l'équipe et bénéficient d'une importante communication en direct ou par l'entremise du conseil syndical. Certains habitants sont particulièrement investis dans le projet et ont fondé une association, CARGO JP 44, pour

40. Trois appartements de l'immeuble appartiennent à des bailleurs sociaux.

41. Statistiques fournies en 2018 par la Régie Franchet et C^{ie}.

suivre les avancées de la recherche, communiquer sur l'œuvre de Prouvé et chercher des subventions pour permettre aux habitants de mener à bien les travaux préconisés. En effet, l'importante mixité sociale de la copropriété induit également une disparité des revenus avec une dominante de revenus modestes voire très modestes. Cette situation implique de réfléchir à une réhabilitation à visée économique. Trouver des aides financières conditionne la réalisation de la réhabilitation de l'immeuble et cette mission est menée de concert entre l'équipe, le conseil syndical, la régie de l'immeuble et l'association. Le principe de copropriété nécessite un vote à la majorité pour toute intervention sur les parties communes (façades, distributions, système de chauffage, ventilation, etc.). Pour que ce vote à la majorité puisse être obtenu, une certaine enveloppe budgétaire ne doit pas être dépassée. L'enquête menée en 2018⁴² permet de cibler une enveloppe de 12 000 € par logement, somme qui correspond au souhait d'investissement moyen des habitants. Cette faible possibilité d'investissement s'explique, en plus des faibles revenus des copropriétaires, par l'endettement déjà important des primo-accédants et le désintérêt de certaines personnes âgées. En réalité, l'amélioration de leur confort est le seul motif qui puisse les convaincre de s'engager dans une telle dépense.

Technique et confort

Les façades légères, construites il y a une soixantaine d'années, présentent aujourd'hui des fragilités nécessitant la maintenance ou le remplacement de certains de leurs composants. En effet, des pathologies peuvent s'observer dans ce type de façades légères préfabriquées notamment au niveau des joints. Parfois exposés aux intempéries et à l'ensoleillement, ces éléments peuvent se retirer, fragilisant alors l'étanchéité à l'eau et à l'air de la façade entière. Les premières déclarations des copropriétaires de la résidence Les Cèdres et de la régie au démarrage du projet révèlent des problèmes d'infiltration d'eau qui peuvent indiquer un défaut d'étanchéité. Les bavettes horizontales et couvre-joints verticaux posés lors d'un ravalement de façade dans les années 2000 n'ont pas apporté de solution au problème. L'observation de l'immeuble permet d'identifier rapidement des retraits au niveau des joints des menuiseries. Cette question constitue un point de vigilance important d'autant qu'ils sont souvent difficiles d'accès ce qui limite leurs possibilités d'entretien ou de remplacement. Sur les panneaux de l'immeuble Les Cèdres, les joints sont posés depuis l'intérieur et couverts par un couvre-joint qui assure en même temps la fonction

42. Igor Bougnot et Simon Robin, étudiants du DEM ATEC de l'ENSAL ont réalisé leur projet de fin d'étude sur l'immeuble Les Cèdres en 2018, même année que celle du démarrage de la thèse. Ils ont alors mené une enquête auprès des copropriétaires. Leur projet proposait notamment d'adjoindre, au-devant de la façade sud de l'immeuble, une double-peau constituée de modules de brises soleil métalliques orientables, permettant d'assurer le confort thermique d'été des habitants de l'immeuble.

d'assemblage entre deux panneaux. Il est impossible d'y accéder par l'intérieur sans démonter cet assemblage et risquer de mettre en danger la solidité de la façade. Une solution alternative doit être envisagée. Les assemblages, garant de la solidité du mur-rideau, doivent également être vérifiés avec attention. Dans le cas des panneaux sandwichs, selon la nature de l'isolant inséré dans le panneau, plusieurs problématiques peuvent se présenter. Les isolants de types laines de roche, laines de verre ou fibres non compactées peuvent se tasser au fil du temps en partie basse des panneaux, dégageant un pont thermique important sur le reste de la façade. Parfois, la finesse des façades légères ne permet pas de prévoir une épaisseur d'isolant suffisante induisant des problématiques thermiques et acoustiques à résoudre. De plus, les menuiseries des façades légères sont fréquemment équipées de simples vitrages qui sont insuffisants d'un point de vue de l'isolation. Cependant, ces pathologies apparaissent sur les façades légères par l'obsolescence des matériaux employés (simples vitrages, isolants peu performants) et par manque d'entretiens de ces façades (joints). Ces objets « mécaniques » complexes, dont les joints sont multipliés par l'assemblage de modules préfabriqués, nécessitent une maintenance adaptée faute de quoi des problèmes d'inconfort peuvent apparaître d'autant qu'il est aujourd'hui avéré que les occupants vivent davantage leurs logements comme des espaces de « respiration⁴³ » qu'ils ouvrent, ferment partiellement ou totalement selon l'enchevêtrement des sensations provenant des rues, des bâtiments habités, du vivant et du végétal, des activités et des phénomènes urbains⁴⁴. Ainsi, la perméabilité d'une façade légère peut être jugée très agréable pour la vue mais peu efficace pour l'ouïe.

L'immeuble Les Cèdres ne fait pas exception et les copropriétaires font régulièrement part des problématiques de confort qu'ils rencontrent. Lors des premiers échanges avec l'équipe pour mettre en place le projet, nombre d'entre eux évoquent des problèmes thermiques et acoustiques. En été, ils souffrent d'une importante chaleur qu'ils ne peuvent réduire en l'absence de protections solaires extérieures, ni d'une inertie suffisante pour conserver la fraîcheur obtenue grâce à la ventilation nocturne. Néanmoins, cet inconfort est inégal puisque les habitants des premiers niveaux, bénéficiant de l'ombre portée par la végétation du jardin ne ressentent pas ces températures excessives. En revanche, en hiver, ils signalent une sensation de froid venue du sol dès les premiers jours d'automne, leurs logements ne bénéficiant pas d'apports solaires

43. Sloterdijk (Peter), « Ecumes : sphérologie plurielle », in *Sphères III (1998-2004)*, Paris, Hachette, 2006, 790 p. ; Canetti (Elias), *La conscience des mots (1975)*, traduit de l'allemand par Roger Lewinter, Paris, Albin Michel, 1984, 336 p.

44. Ingold (Tim), *Une brève histoire des lignes (2007)*, traduit de l'anglais par Sophie Renaut, Bruxelles, Zones Sensibles, 2011, 256 p.

et la dalle entre le rez-de-chaussée et le premier étage n'étant que peu isolée. Les habitants des premiers niveaux demandent alors le déclenchement du chauffage collectif et une vague de chaleur envahit à nouveau les habitants des étages supérieurs qui cumulent chauffage et apports solaires, les obligeant à ouvrir leurs fenêtres, même en décembre. Ces questions liées à l'inconfort thermique ont fortement contribué à motiver les copropriétaires à participer au projet. Lors de la réalisation de l'audit énergétique réglementaire en 2017, ils ont pris la mesure de l'importance des problématiques thermiques de leur immeuble sans que des solutions réellement efficaces et adaptées leur soient proposées. Cet audit reste limité et n'observe que les questions énergétiques et thermiques laissant de côté les autres dimensions du confort. Cependant, de nombreux habitants soulignent le faible isolement acoustique des parois et la gêne que provoque la circulation de jour comme de nuit. Ces premières informations collectées ont conditionné la manière de fonder le sujet et ont permis de cibler les diagnostics à mettre en œuvre tout en confirmant la nécessité de mener une campagne de réhabilitation pour améliorer le confort des habitants et garantir la pérennité de la façade.

2 – Les façades industrielles de Jean Prouvé

a. Les différents types de façades légères

Auteur de procédés innovants, Prouvé dépose de nombreux brevets dès 1929. Les premiers portent sur des cloisons amovibles, fenêtres à guillottes, cabines d'ascenseurs en tôles pliées et kiosques. Au début de sa carrière, sa production se concentre sur des éléments de mobiliers, tels que des tables ou chaises dont certaines sont disputées sur le marché de l'art, ainsi que des éléments de ferronnerie d'art (rampes d'escaliers, lustres, grilles, portails, etc.) et de menuiserie (portes, fenêtres, cloisons). Puis, au début des années 1930, Prouvé s'intéresse de plus en plus à l'architecture et commence à concevoir des éléments de façades à plus grande échelle. En 1931, il conçoit notamment une vitrine d'une grande modernité avec une structure en acier inoxydable pour le magasin Gillet-Lafond à Nancy dont l'architecte est Pierre Le Bourgeois, figure de l'Art déco nancéien. Quatre ans plus tard, l'architecte des monuments nationaux Urbain Cassan le sollicite pour réaliser des panneaux de façades en acier inoxydable pour l'extension du siège de la Compagnie parisienne d'électricité. L'aéroclub entièrement préfabriqué de Buc, conçu avec Beaudouin et Lods, dispose de façades légères constituées de panneaux préfabriqués vitrés qui furent assemblés sur site. Ces premières réalisations lancent le concepteur sur ce nouveau marché que constitue la

façade industrialisée. Sa production d'éléments de façades prend une autre dimension lorsque Prouvé réalise le premier mur-rideau à panneaux préfabriqués de l'histoire pour la Maison du Peuple de Clichy dont on ne soulignera jamais assez le caractère expérimental et innovant comme l'illustre le mur-rideau en verre, raidi par une grille métallique. Pour les autres façades, il met en œuvre des panneaux préfabriqués composés de deux tôles légèrement cintrées, maintenues entre elles par des ressorts et intégrant un isolant. Certains panneaux disposent d'une partie vitrée avec possibilité d'ouverture. Les panneaux, contrairement à la structure qui est assemblée par soudure, sont uniquement accrochés à celle-ci. Ils passent au-devant de la structure formant ainsi un mur-rideau composé de différents modules métalliques assemblés. Prouvé développe par la suite ce procédé dans d'autres projets afin d'affiner le dessin des raidisseurs et optimiser la résistance du mur-rideau. Peu avant la guerre, il conçoit pour l'État des baraques pour les soldats, entièrement préfabriquées, pouvant être facilement transportables et montées en une journée sous la forme de modules nommés 4x4 ou 3x3⁴⁵, constitués d'une structure métallique et d'éléments de remplissages. Pour ceux-ci, Prouvé réemploie sa technique de panneaux isolés à double parois, dits panneaux sandwichs. Économisant le métal destiné à l'armement, il pare ses panneaux de revêtements en lames de bois. Deux hommes peuvent monter la baraque en quelques heures grâce à un procédé ingénieux d'assemblage à l'équilibre. À la fin de la guerre, il transpose ce procédé vers des modules plus importants (6x6, 8x8 ou encore 9x9) pour réaliser des maisons préfabriquées à destination des sinistrés de Lorraine en vue de la Reconstruction. Ces habitations d'urgence se composent d'une structure métallique à un ou deux portiques et de panneaux sandwichs de remplissage à ossature métallique et parement bois. En 1947, relancé par la fin des conflits armés et soutenu par L'Aluminium français, il dépose un premier brevet pour des panneaux à double parois en tôle d'aluminium⁴⁶. L'objectif est alors de créer des panneaux permettant « d'obtenir un isolement thermique et acoustique pratiquement parfait ». Dans ce but, il réduit au maximum les soudures, les contacts entre les deux parois du panneau sandwich et ménage des matelas d'air qui sont ainsi constitués : tôle cintrée, air, isolant thermique, air et tôle cintrée. Ces premiers panneaux sandwichs, encore rudimentaires, suivent le même procédé que les panneaux de la Maison du Peuple de Clichy. Deux parois d'aluminium indépendantes sont tendues par des ressorts et pourvues de laine de roche pour assurer l'isolation thermique des bâtiments.

45. Ces dénominations correspondent aux dimensions des modules : trois mètres par trois mètres ou quatre mètres par quatre mètres.

46. Brevet n° 921.344 du 05/05/1947, annexe n° 1

Fabriqués dans ses usines de Maxéville, il les utilise d'abord pour des maisons préfabriquées, notamment la Maison Métropole qu'il réalise en une vingtaine d'exemplaires en 1949 dans le cadre d'un programme lancé par le MRU de production industrielle de logements économiques. Prouvé se rend compte rapidement des possibilités offertes par cette technique et souhaite l'utiliser sur des immeubles à étages. Bien que ce procédé innovant peine à s'imposer dans la construction à grande échelle, Prouvé se lance alors dans un projet d'immeubles complètement industrialisés utilisant ces panneaux à la faveur du dépôt d'un second brevet en 1955⁴⁷. Persuadé que la préfabrication et l'industrialisation de la construction sont les seules solutions pour palier à la crise du logement et au besoin rapide de construction, Prouvé élabore dans ce dernier brevet une véritable théorie de l'industrialisation de la construction. Il aborde les sujets de l'optimisation du choix des matériaux, la réduction de la quantité de matière nécessaire pour construire, la réduction des coûts, la réduction des temps de chantier, l'amélioration du confort, la possibilité pour l'habitant de réguler la température de son logement, son humidité, de gérer ses ambiances de vie, des questionnements toujours d'actualité dans un contexte non plus de crise du logement, mais de crise environnementale et énergétique. En 1956, Prouvé intègre la CIMT et poursuit ses recherches sur les procédés de construction préfabriqués et réalise un prototype de panneaux sandwichs. Dans le catalogue CIMT, il en fait la description suivante :

« Le panneau se suffit à lui-même. Il est livré sur le lieu de montage totalement terminé, jusqu'au vitrage. C'est un sandwich dont les revêtements sont en métal, aluminium et acier, et l'âme en plastique expansé, polystyrène ou moltoprène. Pour la sécurité, le sandwich est armé extérieurement par un cadre en acier qui procure les feuillures des joints d'étanchéité. La tôle extérieure est agrafée à ce cadre. Les joints d'étanchéité se mettent en place par l'intérieur. Il s'agit de joints extensibles dont certains ont trente années de fonctionnement. Les baies étant découpées dans les panneaux, il est logique que leurs angles en soient arrondis, ce dont bénéficie la menuiserie. Cette dernière est en saillie à l'extérieur, plaquée sur le panneau. Un ébrasement intérieur est totalement dissocié de la fenêtre. Les coupures thermiques sont absolues. [...] Le panneau s'accroche comme un tableau à l'aide d'une cornière solidaire de la structure. Il est aussitôt réglé, niveau et aplomb. La garniture d'une façade consiste à juxtaposer et superposer des panneaux de même type.⁴⁸ »

47. Brevet n° 1.138.751 du 19/06/1955, annexe n°2

48. Sulzer (Peter), *Jean Prouvé, Oeuvre complète Volume 4 : 1954-1984*, Birkhäuser, 2005, 334 p.



Baraquement militaire 4x4, Jean Prouvé, 1939
© Galerie Patrick Seguin



Maison Métropole, Jean Prouvé, 1949
© Galerie Patrick Seguin



Cité Emmaüs Pierre Montillet, Le Blanc-Mesnil, Georges Candilis, Alexis Josic, Shadrach Woods et Jean Prouvé, 1957-1959
© ESK, 1984



Cité Baticoop, Dijon, Blanc, Pivot, Junillon et Prouvé, 1958-1960
© ADMM 230J766



Cité des Paquerettes, Nanterre, Sebillotte, Darras, Kopp et Prouvé, 1961
© ESK, 1984

En 1957, il parvient enfin à matérialiser ses ambitions à la cité HLM Emmaüs Pierre-Montillet au Blanc-Mesnil (Seine-Saint-Denis) dont les panneaux annoncent ceux de l'immeuble Les Cèdres, reprenant les mêmes principes hormis dans les assemblages qui sont réalisés alors par des pâtes de fixations extérieures apparentes en façade. Prouvé modifie rapidement ces assemblages pour les intégrer dans l'épaisseur des panneaux sandwichs, masqués par des couvre-joints intérieurs et ne laissant visible à l'extérieur qu'un joint creux périphérique au panneau. Ces nouvelles dispositions sont mises en œuvre dès l'année suivante à la cité Baticoop de Dijon ainsi que sur la Tour du Fer à Cheval de Roubaix conçue par l'architecte Guillaume Gillet, garantissant une meilleure étanchéité de l'ensemble de la façade. En 1959, il les utilise à nouveau pour les façades des immeubles de la Cité des Pâquerettes à Nanterre avec des fenêtres coulissantes. Ceux-ci sont très proches des panneaux utilisés sur Les Cèdres. De ces trois opérations de logements, aucun panneau n'a été conservé. Toutes ces façades sont aujourd'hui remplacées, rendant souvent les immeubles méconnaissables. La même année, Prouvé pose des panneaux sandwichs en aluminium sur le collège technique du vêtement de Paris, aujourd'hui lycée Paul-Poiret, dans le XI^e arrondissement. L'immeuble est protégé au titre du PLU de la Ville de Paris ce qui pourrait permettre la conservation de ses éléments de façade. Citons encore dans le même arrondissement le foyer des Jeunes de Charonne, toujours à Paris, conçu entre 1959 et 1960 par les architectes Agard et Raymond. Là encore, les panneaux ont pu être conservés, contrairement à ceux mis en place la même année au lycée technique Descartes à Antony (Hauts-de-Seine) de Beaudouin ou encore au collège Jean-Moulin de Chaville (Hauts-de-Seine) et à l'école primaire Albert-Aubel à Sainte-Geneviève-des-Bois (Essonne). En revanche, à l'école primaire de la Chataigneraie, construite à Chambourcy (Yvelines), les panneaux ont été partiellement conservés mais uniquement sur les murs pignons. Il semble au demeurant que les panneaux appliqués aux immeubles de logements soient encore plus difficiles à préserver que les panneaux utilisés pour des programmes scolaires ou sur des bâtiments publics. Les raisons de cette propension à la dépose dans des programmes de logements peuvent s'expliquer de plusieurs manières. Le design de ces panneaux reste peu commun et s'apparente davantage à un langage industriel, tertiaire, voire même à celui d'un train ou d'une caravane. Le besoin en confort dans un logement est également plus important et la méconnaissance de ces systèmes de façades pousse généralement à leur dépose pour des façades plus performantes. Les réglementations thermiques encouragent les propriétaires privés et obligent les bailleurs à procéder à des rénovations thermiques



Cité des Paquerettes, Nanterre, Sebillotte, Darras, Kopp et Prouvé, 1961
© «L'amour existe», film de Maurice Pialat, 1960



Cité des Paquerettes, Nanterre, Sebillotte, Darras, Kopp et Prouvé, 1961
© Centre Pompidou/MNAM-CCI/Bibliothèque Kandinsky



Cité des Paquerettes, Nanterre, Sebillotte, Darras, Kopp et Prouvé, 1961
© Centre Pompidou/MNAM-CCI/Bibliothèque Kandinsky



Cité des Paquerettes, Nanterre, Sebillotte, Darras, Kopp et Prouvé, 1961 - après rénovation
© OPHLM de Nanterre, s.d.

conduisant fréquemment à une modification ou au remplacement complet de l'enveloppe du bâtiment en privilégiant l'isolation thermique par l'extérieur. Enfin, la reconnaissance encore incertaine du patrimoine du XX^e siècle rend plus difficile la préservation de constructions de ce type, même si le cas des immeubles parisiens cités infirmerait ce sentiment.

Après avoir expérimenté ses panneaux sur de nombreux projets, Prouvé se rend compte que ces éléments ne peuvent avoir des dimensions identiques, surtout dans leur largeur. Jusqu'ici, chaque projet impose la fabrication d'un format de panneau, voire même de plusieurs, pour s'adapter aux trames structurelles. Afin de réduire les coûts de production, Prouvé réfléchit à une solution pour rendre adaptable la largeur des panneaux et standardiser le procédé. Il imagine un panneau constitué de deux montants latéraux intégrant les arrondis pour recueillir les menuiseries et d'un élément central. Ainsi, seul l'élément central varie ainsi que la largeur des menuiseries. La largeur des panneaux peut quant à elle varier entre cent vingt et trois cent trente centimètres selon des multiples de trente centimètres. La hauteur du panneau en revanche est fixe : deux cent quarante et un centimètres pour des façades légères dites panneaux et deux-cent-soixante-neuf centimètres pour des façades légères dites rideaux, celles-ci devant recouvrir les nez-de-dalle. Après les trames larges de cent-vingt à trois-cent-trente centimètres, Prouvé développe des modèles de panneaux à trame étroite, inférieure à cent vingt centimètres. Cette composition permet de créer des façades au rythme plus resserré. Ce nouveau brevet est déposé en 1964. Cependant, les panneaux de l'immeuble Les Cèdres achevé en 1962 suivent déjà ce procédé. Chaque panneau dispose de deux joints verticaux en bordure des angles arrondis qui trahissent l'utilisation de cette technique, encore imparfaite et au stade de prototype. En effet, sur l'immeuble Les Cèdres, les largeurs des montants latéraux sont encore variables, cette fois pour s'adapter à la largeur des ouvrants, la trame structurelle étant parfaitement régulière. En 1963, Prouvé teste ses panneaux à trame étroite sur les façades du siège de la CIMT ; ceux-ci n'existent plus aujourd'hui, les façades de l'immeuble ayant été entièrement démontées et remplacées. Ces deux chantiers servent de prototypes pour ce nouveau brevet nommé « Perfectionnements apportés aux panneaux préfabriqués pour bâtiments⁴⁹ ». Dans un brevet de 1963, « Perfectionnements apportés aux murs rideaux », Prouvé reconnaît lui-même que « ces murs rideaux donnent aussi, pour l'usager placé à l'intérieur de la bâtisse, une impression d'insécurité, résultant de la minceur

49. Brevet n° 1.411.235 du 07/08/1964, annexe n°3.

apparente inhabituelle des parois⁵⁰ », raison pour laquelle il tente d'apporter une épaisseur supplémentaire en renforçant la couche d'isolant côté intérieur. Malgré cette modification, ces panneaux ne sont plus utilisés par la suite sur des programmes de logements. En 1966, on en retrouve au centre sportif Pierre-Brossolette de Saint-Maur-des-Fossés (Val-de-Marne), en 1968 à la cité scolaire d'Orléans-La-Source (Loiret), pour laquelle il ajoute des brises soleils orientables horizontaux aux panneaux ; et en 1969 à l'Institut de l'environnement, 5 rue Erasme à Paris, aujourd'hui devenu l'École des Arts Décoratifs. Seuls les panneaux de la cité scolaire d'Orléans-La-Source sont en partie conservés mais leur système de protection solaire a été remplacé par des stores toiles.

Alors que nombre de façades de ce type ont été détruites, la conservation de celles de l'immeuble Les Cèdres s'impose aujourd'hui comme une évidence d'autant que l'état sanitaire de l'ensemble des matériaux, assemblages et composants des panneaux, hormis les joints, se révèle tout à fait satisfaisant. Les joints de menuiseries visibles sur les façades sont les joints d'origine qui ont donc une soixantaine d'années. Soumis aux intempéries et à la chaleur du soleil, ils se sont progressivement détériorés, engendrant des défauts d'étanchéité à l'air et à l'eau qui n'ont pas encore causé de dégâts irréparables sur les façades. Un entretien plus régulier et le remplacement des joints garantirait la pérennité de l'ensemble. L'objectif premier de ces panneaux était de répondre à un besoin de construction rapide et peu coûteuse tout en assurant l'étanchéité d'ensemble et une isolation thermique et acoustique minimum. Devenue insuffisante au regard des enjeux actuels, cette isolation doit être aujourd'hui repensée et renforcée.

Outre ces murs rideaux composés de panneaux préfabriqués assemblés, Prouvé travaille également à d'autres types de façades légères comme les murs rideaux à grilles. Ce dernier système inclut des panneaux pleins, des panneaux vitrés fixes ou ouvrants en tôle d'aluminium ou d'acier embouti ; l'élément le plus important étant le raidisseur qui constitue une grille tramée horizontalement au sein de laquelle s'insèrent les éléments en tôle et menuiseries. Ce système facilite considérablement l'adaptation des façades légères à tous types de structure. Le profil des raidisseurs⁵¹ est issu des recherches menées pour la Maison du Peuple de Clichy et sera également expérimenté sur le Pavillon du centenaire de l'aluminium. Initialement

50. Brevet n° 1.384.745 du 26/11/1963, annexe n°4.

51. Coley (Catherine), *Jean Prouvé. Jalons*, Collections du Musée National d'Art Moderne - Centre de Création Industrielle, Paris, Éditions du Centre Pompidou, 1993, p.56-57

réalisés en tôle pliée, ces éléments sont produits par extrusion grâce à l'évolution considérable des techniques de fabrication en aluminium. Les raidisseurs sont fixés verticalement sur le nu extérieur de la structure du bâtiment et maintiennent les éléments de remplissages standardisés par serrage. Le dessin des profils est d'une finesse extrême et la saillie qu'ils exercent sur les éléments de remplissages permet d'en apprécier toute la plastique. Pouvant alterner des éléments pleins et vitrés ou être totalement vitré, ce système de mur-rideau à grille est très flexible et permet de nombreuses variantes. Les éléments pleins sont généralement constitués de caissons en tôle isolés, soit avec un parement en tôle d'aluminium ondulé, soit en tôle laquée de différentes teintes. On observe d'ailleurs sur le campus de la Doua à Lyon les différentes possibilités offertes par le mur rideau à grilles avec des éléments en tôles laquées bleues ou blanches sur une résidence universitaire et des éléments en tôle d'aluminium ondulée pour les bâtiments de l'INSA (Institut national des sciences appliquées, 1957-1963). Prouvé utilise également cette technique pour la verrière d'entrée de l'Institut français des pétroles de Rueil-Malmaison (Hauts-de-Seine, 1955) de Pierre Dufau, ainsi que sur la façade vitrée de la galerie marchande de l'aérogare d'Orly sud, aux façades de l'hôtel de ville de Grenoble (Maurice Novarina, 1967) comme à celles du CROUS de la cité universitaire de Saint-Irénée à Lyon. Ce système à grilles offre plus d'assemblages et de jointures que les systèmes à panneaux préfabriqués et demandent donc un entretien plus attentif au niveau des joints pour garantir leur pérennité.

b. Les équipements des panneaux

Menuiseries

En ce qui concerne les menuiseries, Prouvé développe plusieurs modèles dans ses ateliers. Dès 1929, il met en œuvre ses propres fenêtres à guillotines à l'hôtel l'Ermitage de Vittel. À partir de ce modèle, il dépose le brevet n°700.217 en 1930⁵² pour des fenêtres à guillotine métalliques à deux châssis coulissants qui disposent d'un système d'ouverture doux et silencieux à chaînes et contrepoids, dont le système de manipulation est caché dans les montants latéraux. Prouvé utilise des chaînes de bicyclette, des roulements à billes et des tendeurs similaires à ceux utilisés dans l'aviation. Pour créer ses dispositifs, il n'hésite pas à recourir à des procédés mécaniques, issus majoritairement des moyens de transport. Son système parfaitement équilibré lui permet de s'affranchir du jeu laissé habituellement dans

52. Brevet n°700.217 du 08/08/1963, annexe n°5.



INSA - Campus de la Doua, Villeurbanne, Jacques Perrin-Fayolle et Jean Prouvé, 1957-1963
© Mathilde Padilla, 2018



Profil des raidisseurs de façades, Jean Prouvé
© Mathilde Padilla, 2018



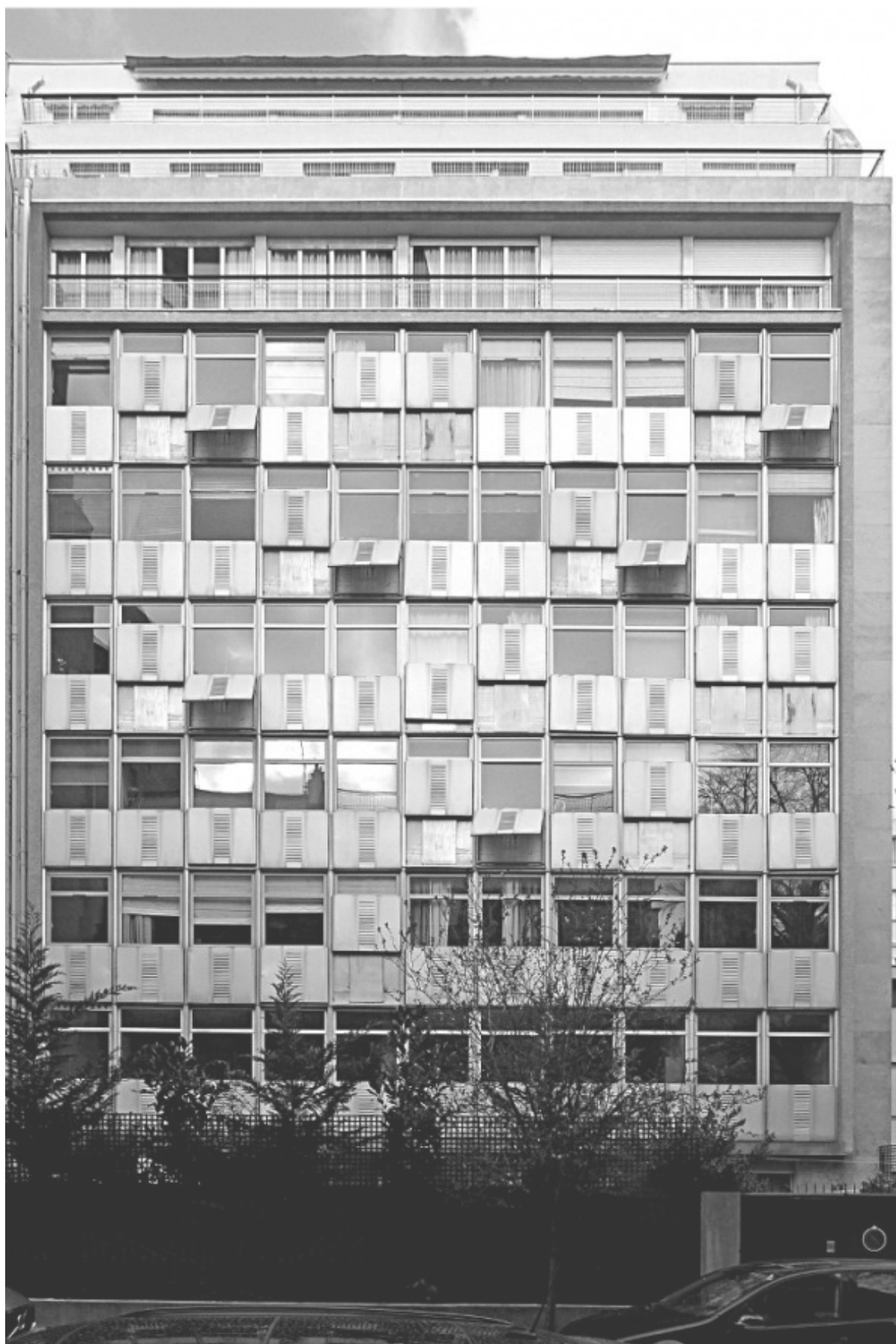
CROUS Allix, Lyon, Jacques Perrin-Fayolle et Jean Prouvé, 1957-1962
© Mathilde Padilla, 2018

les fenêtres à guillottes pour faciliter leur manipulation et donc de supprimer les nuisances sonores provoquées par le battement des châssis dans les coulisses lorsqu'il y a du vent. Ce procédé est notamment mis en œuvre à l'hôpital de Grange-Blanche en 1933⁵³. En 1939, Prouvé dépose un second brevet pour des fenêtres à guillotine (n° 853.226)⁵⁴. Il y présente un modèle de fenêtre pouvant également s'ouvrir par pivotement autour d'un axe vertical. Il s'agit donc d'un système d'ouverture mixte assez élaboré permettant à la fois une manipulation équilibrée des coulissants à guillotine et l'ouverture des vantaux. Pour ce faire, les châssis ne sont coincés dans le rail de coulisse que sur un côté, et celui-ci intègre des galets pour réaliser le pivot de la fenêtre, cachés dans le montant latéral concerné. De l'autre côté, la coulisse guide simplement le châssis sans le bloquer permettant l'ouverture du vantail. Ces châssis sont ensuite utilisés sur des panneaux de façades légères similaires à ceux de l'immeuble Les Cèdres, et disposent également d'angles arrondis et de simple vitrage. La réhabilitation de ce type de menuiseries et panneaux rencontrent les mêmes difficultés que pour les façades de l'immeuble Les Cèdres avec des problématiques similaires et accrues concernant l'isolation thermique, acoustique et la manipulation des ouvrants.

Au cours de la Seconde Guerre mondiale, Prouvé met entre parenthèse le développement de ses menuiseries métalliques à guillotine pour s'intéresser à la fabrication de baraques militaires préfabriquées pour lesquelles il recourt à des modèles de menuiseries en bois plus classiques comme des fenêtres à la française et, plus rarement, des fenêtres coulissantes ou battantes. L'emploi de ce type de menuiseries se justifie pour des raisons d'économie. Au lendemain de la guerre, il reprend ses travaux sur des menuiseries industrielles et met en œuvre des fenêtres à guillotine avec des allèges en aluminium amovibles pouvant servir de volet sur la maison Métropole ainsi que sur la maison des Jours Meilleurs. Le châssis vitré s'abaisse entre la partie fixe et la partie amovible de l'allège, permettant à celle-ci d'être levée même fenêtre ouverte. Pour ce système, Prouvé réemploie le dispositif du premier brevet et y ajoute un système de ressort. Il le met également en œuvre sur l'immeuble du square Mozart à Paris livré en 1954 (Lionel Mirabaud et Didier Gondolf architectes). Au cours des années 1950 et 1960, Prouvé utilise majoritairement des menuiseries à guillottes et des menuiseries coulissantes sur les

53. Certains de ces châssis sont encore conservés aujourd'hui. Un chantier de rénovation du site est en cours. La mise aux normes et le réaménagement des pavillons tendent à provoquer leur dépose. Archipat, qui compte parmi les équipes missionnées pour cette rénovation, a identifié ces châssis comme éléments à forte valeur patrimoniale et lance une campagne de sensibilisation pour leur conservation ou leur réemploi. Ces châssis sont d'autant plus intéressants qu'ils comptent parmi les derniers témoins de la collaboration entre Prouvé et Garnier sur cette opération emblématique.

54. Brevet n°853.226 du 19/04/1939, annexe n°6.



Immeuble du Square Mozart, Paris, Lionel Mirabaud, Didier Gondolff et Jean Prouvé, 1954
© RUAMPS

façades légères à panneaux préfabriqués. À la cité Baticoop de Dijon, la fenêtre à guillotine est positionnée sur la face extérieure du panneau et dispose également d'une imposte fixe. Les rails coulissants sont apparents et le châssis vitré descend au-devant de l'allège lors de l'ouverture de la fenêtre. Le profil en aluminium du rail fait le tour de la menuiserie et assure la fonction d'étanchéité à l'eau du dormant. Ces fenêtres à guillotine sont également mises en œuvre sur le collège technique du vêtement de Paris (1959) et au Centre d'études nucléaires de Grenoble (1959). Le même modèle est utilisé pour le Foyer des jeunes de Charonne (1959), couplé à des fenêtres coulissantes, comme sur la tour du Fer à Cheval à Roubaix. Prouvé utilise également des coulissants à la cité Emmaüs du Blanc-Mesnil (1957), à la cité des Pâquerettes de Nanterre (1959), à l'immeuble Les Cèdres (1962), à la résidence universitaire de l'École centrale de Chatenay-Malabry (1967) ou encore à l'Institut de l'environnement de Paris (1969). Ces menuiseries sont pratiquement toutes identiques. Elles se composent d'un dormant en aluminium profilé avec des rails permettant ensuite à deux châssis vitrés composés de profils en U dotés de simple vitrage d'y coulisser. Sur certains de ces immeubles, elles sont associées à des hublots fixes et certaines menuiseries sont tripartites avec deux châssis coulissants posés sur une allège vitrée fixe. Les coulissants seront également majoritairement utilisés dans les systèmes de murs rideaux à grille.

Prouvé étudie également une menuiserie en aluminium ouvrant à la française mais à un seul vantail qu'il utilise par exemple sur le siège de la CIMT (1963) ainsi qu'au centre sportif Pierre-Brossolette de Saint-Maur-Des-Fossés (Val-de-Marne). En 1965, il dépose d'ailleurs le brevet n°1.466.532 pour un modèle de fenêtres à la française avec battants susceptibles d'être ouverts par la droite comme par la gauche. D'une manière générale, les profilés dessinés par Prouvé sont d'une extrême finesse, utilisant seulement la matière nécessaire. Nombre de ses modèles de fenêtres disposent d'angles arrondis principalement en raison de facilités de découpe des panneaux qui se révèle plus délicate en angle droit. L'aluminium pouvant être cintré facilement, Prouvé choisit d'adapter les menuiseries aux découpes des panneaux. Le design de ces menuiseries aux angles arrondis devait fortement contribuer aux qualités plastiques des façades et identifier distinctement les réalisations de Prouvé. La majorité des menuiseries sont dotées de simples vitrages et leurs joints sont aujourd'hui en fin de vie. Nous le verrons, il est extrêmement complexe de refabriquer des menuiseries au dessin similaire incluant un double vitrage ainsi que des rupteurs thermiques. En effet, l'intégration d'un double vitrage nécessite un profil plus épais et les rupteurs de ponts thermiques, intégrés aujourd'hui dans

les menuiseries en aluminium, épaississent d'autant plus les profils et rendent leur cintrage plus délicat. Dans ces conditions et en l'absence de solutions industrielles adaptées, il semble au demeurant que des solutions intermédiaires originales permettant à la fois de conserver le dessin de Prouvé et d'améliorer les performances des châssis doivent être recherchées.

Les protections solaires

Les problématiques de confort d'été se font rapidement sentir sur les façades légères en raison de la difficulté à conserver la fraîcheur dans les logements par le manque d'inertie des parois, l'emploi de matériaux métalliques particulièrement conducteurs et l'importance des surfaces vitrées. L'intégration de protections solaires extérieures peut remédier à ce problème et Prouvé l'avait bien compris. Dans son brevet d'invention n°700.217 de 1930 pour les fenêtres à guillotine, il prévoit la mise en place d'un volet roulant et dès la fin des années 1940, lors de la conception de ses maisons démontables, il intègre une réflexion bioclimatique. En effet, bien que ces maisons aient vocation à être déplacées, il les conçoit avec des façades orientées qui conditionnent leurs implantations sur site. En façade sud, il est fréquent qu'il intègre une avancée de toit servant de casquette pour la protection solaire. Il n'est pas rare non plus d'y trouver des systèmes de brise-soleils en aluminium, fixes ou à lames orientables, notamment pour les maisons tropicales qui doivent s'implanter en climat chaud, mais également pour la maison Ferembal (1948). Il développe par la suite un système de volet métallique à guillotine. Positionné au niveau de l'allège, celui-ci coulisse pour se placer devant les fenêtres. La maison Ferembal dispose également de ce système, les volets métalliques ajourés sont cachés dans l'épaisseur des allèges en bois lorsqu'ils sont ouverts. Il est ensuite possible de les remonter à n'importe quelle hauteur pour gérer l'ensoleillement grâce à un système équilibreur à contrepoids similaire à celui mis en œuvre pour les fenêtres à guillotine. On retrouve ce même système à la maison Métropole (1949) dans des allèges en aluminium. Prouvé le transpose ensuite sur les panneaux préfabriqués destinés à la construction de façades légères, notamment sur les panneaux du siège de la Fédération nationale du bâtiment à Paris (Raymond Lopez, 1951). La Maison des Jours Meilleurs possède également ce système de volets, mais ceux-ci sont apparents, placés au-devant des allèges. Une version plus élaborée de ces allèges amovibles est mise en œuvre sur l'immeuble du square Mozart. Le volet se trouve devant l'allège en position ouverte, il peut ensuite se remonter devant la fenêtre et se projeter. Ces différentes positions du volet permettent de gérer l'ensoleillement selon les heures de la journée et les saisons. Le volet métallique est légèrement ajouré, davantage pour permettre

la ventilation de l'allège que pour laisser passer la lumière. Les panneaux du square Mozart forment de remarquables objets mécaniques complets, tour à tour allège, volet ou brise-soleil. La répétitivité du module sur l'ensemble de la façade n'engage aucune monotonie, l'aléatoire porté par l'usage varié des panneaux créant une véritable dynamique plastique. Les panneaux préfabriqués de l'immeuble du square Mozart comptent parmi les réalisations les plus abouties de Prouvé. Dans un autre registre, moins adaptable, Prouvé donne une double fonction aux raidisseurs de son système de façades rideaux à grilles. Dans le brevet n°1.411.236 de 1964, il reconnaît l'intérêt de disposer de profils profonds pour les raidisseurs afin que ceux-ci tiennent aussi un rôle de protection solaire. Mais le système possède ses limites, l'ombre portée des profils dépend de la course du soleil et ne permet ni de protéger l'entièreté du panneau ni d'être contrôlée. Afin de gérer plus librement le contrôle de l'ensoleillement, Prouvé fabrique des brises soleil escamotables à lames orientables en aluminium, brevetés par la CIMT. Il les utilise notamment à la cité scolaire d'Orléans-La-Source. Les lames sont fixées sur des coulisses verticales ; l'ensemble du système est maintenu en porte à faux sur le nu extérieur du panneau. En position fermée, les brise-soleils couvrent l'ensemble de la fenêtre, en position ouverte l'ensemble des lames se réunissent horizontalement devant la fenêtre, formant une casquette, juste assez haute pour laisser passer la vue. En position intermédiaire, les lames forment une persienne qui protège des rayons du soleil mais laissent passer la lumière. Ce système est également employé sur une façade rideau à grille sur le bâtiment administratif du lycée Jean-Moulin de Béziers (1965). Sur d'autres projets scolaires contemporains, Prouvé utilise des stores toiles à projection, notamment sur les façades légères du collège et du lycée de Saint-Egrève (Isère), ainsi que sur les lycées de Sarcelles (Val-d'Oise), Faverges (Haute-Savoie) et Grenoble. La même année, Zehrfuss sollicite Prouvé pour la construction du quatrième bâtiment du siège de l'UNESCO à Paris qui s'élève sur deux niveaux en sous-sol et s'organise autour de six patios pour lesquels sont conçus des panneaux de façades à double parois ventilées intégrant des stores vénitiens dans la lame d'air. Ces protections solaires intermédiaires sont certes moins efficaces que des protections solaires extérieures mais elles sont ainsi protégées des intempéries et restent plus efficaces que des stores intérieurs. Deux ans plus tard, Zehrfuss renouvelle cette collaboration pour le cinquième bâtiment de l'UNESCO (1967-1969) pour lequel Prouvé conçoit cette fois-ci des panneaux en tôles d'acier embouties aux rebords saillants formant des brise-soleils verticaux auxquels s'ajoutent des caillebotis métalliques horizontaux pour protéger les panneaux du soleil comme pour faciliter



Cité Scolaire, Orléans-La Source, Michel Andrault, Pierre Parat et Jean Prouvé, 1966-1968
© The Architect Newspaper

l'accès pour le nettoyage extérieur des vitrages. Ce même système de casquettes en caillebotis est mis en œuvre par Prouvé sur les bâtiments administratifs et les laboratoires du siège de Sandoz à Rueil-Malmaison (Burkhardt et Zehrfuss architectes, 1965-1968). Pour ce dernier projet, il conçoit des panneaux CIMT doté de double vitrage fixe, joints néoprènes, pare soleil en glace PARSOL mobiles et pare-soleil horizontaux en caillebotis. Prouvé réfléchit donc à la problématique du confort thermique d'été lors de l'élaboration de ces systèmes de panneaux. Néanmoins, il n'intègre pas de protections solaires à l'ensemble des éléments préfabriqués et nombre d'opérations de logements en sont dépourvues, comme l'immeuble Les Cèdres.

Les systèmes de ventilation

La ventilation est un autre élément qui témoigne des préoccupations de Prouvé pour le confort et les ambiances de vie. Les maisons tropicales devant être exportées en climat chaud, leur concepteur expérimente des systèmes de brise-soleils mais également des systèmes de ventilation. Certains panneaux de façade sont ajourés et sont profilés de sorte que l'eau, comme les intrus, ne puissent pénétrer. Le panneau vertical se compose de feuilles d'aluminium en vagues dont la partie inférieure est percée pour laisser passer l'air. Les toitures et les murs de la maison tropicale sont également équipés d'aérateurs. De forme circulaire et percés, ceux-ci sont positionnés en parties haute et basse des panneaux de façades. Leur ouverture est réglable, permettant de moduler l'entrée d'air. Prouvé réutilise ce système d'aérateurs réglables sur d'autres projets, notamment pour les panneaux du siège de la Fédération nationale du bâtiment à Paris et l'immeuble du square Mozart. Les aérateurs peuvent être de simples cercles percés dont l'ouverture peut être modulée par un cache positionné dans l'âme du panneau. D'autres modèles sont constitués d'un cercle avec quatre percements dont les ouvertures sont réglées grâce à une clé à oreilles. Prouvé positionne aussi les aérateurs dans les impostes vitrées de ses menuiseries comme au collège technique du vêtement à Paris. Au siège de l'UNESCO, il positionne ces ouïes dans la traverse basse et dans les montants des menuiseries. Tous ces systèmes sont réglables manuellement et permettent ainsi aux usagers de contrôler les entrées d'air dans leurs logements ou leurs bureaux. Pour les panneaux de l'immeuble Les Cèdres, comme pour ceux de la cité des Pâquerettes de Nanterre ou encore le lycée Jean Moulin de Béziers, Prouvé choisit d'installer un système de grilles simples permettant une entrée d'air constante. Les sorties se font le plus souvent au niveau des conduits et des gaines internes aux locaux. En revanche, les entrées d'air étant positionnées en partie basse des panneaux, en hiver, l'air froid pénètre dans les logements au niveau des jambes des usagers

qui se plaignent de l'inconfort ressenti et bouchent fréquemment les grilles. Les exigences et les normes en matière de ventilation ayant beaucoup évolué, des débits d'air plus importants sont actuellement recherchés. Pour adapter les façades légères à ces nouvelles exigences, il est souvent nécessaire de repenser complètement le système de ventilation d'autant que la surisolation de la façade peut induire des problématiques de condensation.

c. Une production menacée

La production de Prouvé est vaste et riche. Il produit beaucoup et expérimente sans cesse. Dès l'établissement de ses ateliers à Maxéville, il dispose d'un atelier de prototypes qui lui permet de tester les éléments qu'il imagine par la construction.

« Si je dessinais une chaise, je demandais qu'elle soit construite pour le lendemain et l'atelier de prototypes de mes usines m'apportait la chaise telle que je l'avais dessinée avec toutes ses fautes. Mais le lendemain, le meuble était fait. On le corrigeait. Il y a des corrections qui doivent se faire sur pièce et qui ne se font pas à la table à dessin⁵⁵ » affirmait-il.

Prouvé se place dans une dynamique de recherche permanente au sein de ses ateliers et n'hésite pas à investir beaucoup dans les prototypes, dans l'optique que la reproductibilité rende les opérations abordables. Il ne pense pas l'économie en termes d'investissement, mais en coût global. Il conçoit de nombreux systèmes de façades légères qui font tous preuve d'une véritable intelligence de conception et de fabrication. Ce corpus n'est encore pas identifié en totalité. Bien que les travaux de Peter Sulzer, sur lesquels repose une part essentielle du corpus de cette recherche, répertorient la quasi-totalité de sa production, il existe encore des opérations et systèmes non identifiés. Le restaurant du CROUS de Saint-Irénée à Lyon V^e en témoigne. L'intervention de Prouvé y est confirmée par l'utilisation du système de façade légère à grille avec ses raidisseurs caractéristiques et ses allèges en métal embouti. Pour identifier ce patrimoine, il est donc nécessaire d'observer finement les procédés de Prouvé, de connaître ses brevets d'inventions et ses archives, pour pouvoir repérer leur application sur des immeubles non encore identifiés. On comprend dans ces conditions toute l'importance de l'immeuble Les Cèdres, comme dernier témoin de l'utilisation du modèle de panneaux sandwichs en aluminium avec menuiseries coulissantes appliqué à un programme de logement. Bien que ce

55. Citation de Jean Prouvé, source : Coley (Catherine), *Jean Prouvé. Jalons, Collections du Musée National d'Art Moderne - Centre de Création Industrielle*, Paris, Éditions du Centre Pompidou, 1993, p. 34

dernier chantier soit expérimental, puisqu'il sert de prototype au brevet de 1964⁵⁶, il s'agit d'une expérience réussie, les panneaux présentant, soixante ans plus tard et sans entretien particulier, un excellent état général, leurs seules faiblesses résidant au niveau des joints et assemblages. Leur adaptation aux besoins et exigences du XXI^e siècle est nécessaire, mais comment la réaliser en conservant l'essence de ce patrimoine ? Comment préserver ce patrimoine, atteindre des performances thermiques et acoustiques permettant d'assurer le confort des habitants, par un projet économiquement viable pour les propriétaires ? Prouvé lui-même, au moment de la fabrication de ces façades, se pose des questions de confort, d'économie, de qualité architecturale et technique ; autant de réflexions qui doit être prises en compte à la faveur de la réhabilitation de ces façades. Pour mener à bien un tel projet, il semble nécessaire de mettre en œuvre une méthodologie d'intervention expérimentale, qui puisse prendre en compte l'ensemble des enjeux de patrimoine, de confort, de performances énergétiques et environnementales et d'économie.

56. Brevet n° 1.411.235 du 07/08/1964, annexe n°3.

Chapitre 2 :

Une méthodologie expérimentale

Partie 1 : Les façades légères, un état de la question

1 – Le patrimoine du XX^e siècle

a. Une patrimonialisation fragile et inachevée

La production architecturale du XX^e siècle est souvent menacée⁵⁷ et sa transformation représente un défi à relever comme l'illustrent les récents débats autour de la Maison du Peuple de Clichy⁵⁸ qui a fait récemment l'objet d'un projet controversé initié en 2016 dans le cadre de l'appel à projet « Inventons la Métropole du Grand Paris », consistant à adosser une tour de quatre-vingt-seize mètres à l'édifice pourtant classé au titre des monuments historiques depuis 1983 qui aurait surplombé une partie du bâtiment tout en noyant l'une des façades de la Maison du Peuple dans son socle. Comment envisager une telle opération sur un monument historique ? Bien que s'agissant d'un patrimoine récent, la qualité de sa structure métallique, sa particularité de premier bâtiment disposant de façades légères à panneaux préfabriqués et l'originalité de son organisation spatiale modifiable selon les usages grâce à un plancher, un toit et des cloisons amovibles, font de cet édifice un véritable monument pionnier de l'architecture moderne et métallique. La commune, propriétaire du bâtiment et les architectes du projet, Rudy Ricciotti et l'architecte en chef des monuments historiques Jacques Moulin, se justifient en expliquant que la construction de la tour demeure le seul moyen possible pour financer la restauration du monument, dont le montant est alors évalué entre vingt-cinq et quarante millions d'euros en raison notamment de mises aux normes complexes. Mais ce chiffrage ne semble reposer sur aucun diagnostic précis du bâtiment. En 2019, l'architecte Bernard Paurd ne manquera pas de contester une telle estimation en démontrant qu'un budget de quatre à huit

57. Larrochelle (Jean-Jacques), « Menaces sur le patrimoine architectural du XX^e siècle », in *Le Monde*, Paris, Société Editrice du Monde, 24-25/6/2018

58. Pousse (Jean-François), « Le défi de la transformation du patrimoine XX^e », in *Archiscopie n°13*, Paris, Cité de l'architecture et du patrimoine, 1/2018, p.72-81

millions d'euros pourrait suffire à réaliser un véritable diagnostic du bâtiment et une remise en état⁵⁹. Les débats se poursuivent dans la presse professionnelle. La SPPEF – Société pour la protection des paysages et de l'esthétique de la France – du groupe Sites et Monuments, a pris la défense de l'édifice aux côtés de Bernard Toulhier, conservateur général honoraire du patrimoine, qui conteste à son tour le projet qui, selon lui, écrase le bâtiment au mépris des lois sur les monuments historiques et accuse la commune de Clichy et le programme « Inventons la Métropole du Grand Paris » de braver le règlement du Plan local d'urbanisme (concernant le gabarit de hauteur) pour réaliser de la spéculation immobilière sur des édifices patrimoniaux⁶⁰. Jean-Philippe Hugron, rédacteur en chef du *Courrier de l'architecte* partage cette position et accuse également le programme « Inventons la Métropole du Grand Paris » de livrer en pâture le patrimoine du XX^e siècle francilien⁶¹. Si cet appel à projet a permis d'identifier de nombreux sites et édifice du XX^e siècle devant être réhabilités ou rénovés, les transformations envisagées conduisent le plus souvent à défigurer les édifices qu'il s'agisse de la Maison du Peuple comme des tours Nuages de Nanterre (Hauts-de-Seine) d'Emile Aillaud.

La Maison du Peuple de Clichy illustre parfaitement les débats qui entourent les questions soulevées par la patrimonialisation de l'architecture du XX^e siècle et son instrumentalisation : « il faut envoyer la Maison du Peuple à la ferraille⁶² », affirmait Jacques Moulin dans *Le Monde*, selon l'idée que la construction métallique a vocation à être éphémère et s'appuyant sur un discours de Lods expliquant qu'un édifice ne peut vivre plus de deux générations sans devenir obsolète. Bien qu'il s'agisse de propos volontairement provocateurs pour Bernhard Furrer⁶³, il n'en reste pas moins étonnant de voir un architecte en chef des monuments historiques envisager la destruction d'un monument classé. Celui-ci a vocation de témoin de l'histoire de son temps et nécessite au contraire d'être conservé dans sa plus grande authenticité.

59. Paurd (Bernard), « Pour une véritable restauration de la Maison du Peuple de Clichy », in *SPPEF, La préservation de l'architecture du XX^e siècle*, 4 juin 2019. <https://www.sppef.fr/2019/06/04/pour-une-veritable-restauration-de-la-maison-du-peuple-de-clichy/>

60. Toulhier (Bernard), « La Maison du Peuple de Clichy : un monument historique bafoué », in *SPPEF, La préservation de l'architecture du XX^e siècle*, 16 avril 2018. <http://www.sppef.fr/2018/04/16/la-maison-du-peuple-de-clichy-un-monument-historique-bafoue/>

61. Hugron (Jean-Philippe), « Le patrimoine du XX^e siècle de nouveau la cible d'Inventons la métropole du Grand Paris », in *Le Courrier de l'architecte*, Paris, Le Courrier de l'architecte, 4/4/2018

62. Moulin (Jacques), « Il faut envoyer la Maison du Peuple à la ferraille », in *Le Monde*, 16 avril 2019, https://www.lemonde.fr/idees/article/2019/04/16/il-faut-envoyer-la-maison-du-peuple-a-la-ferraille_5450730_3232.html

63. Furrer (Bernhard), « Faut-il protéger les monuments historiques des architectes en chef ? », in *SPPEF*, 8 mai 2019, <https://www.sppef.fr/2019/05/08/reponse-de-bernhard-furrer-a-la-tribune-de-jacques-moulin-intitulee-il-faut-envoyer-la-maison-du-peuple-a-la-ferraille/>

En raison de la forte valeur patrimoniale de l'édifice, ce projet controversé – aujourd'hui abandonné – et la médiatisation qui s'en est suivie ont érigé la Maison du Peuple de Clichy au statut de martyr de l'architecture moderne et de symbole de la défense du patrimoine contemporain. Mais ce dernier exemple n'est malheureusement pas isolé si l'on en juge par le cas de la célèbre tour siège de la Caisse d'allocations familiales de Paris, construite entre 1952 et 1955 par Raymond Lopez et Marcel Reby. Unanimement reconnue comme un jalon majeur de l'architecture de l'après-guerre en France, cette construction innovante se définit par une structure en acier constituée d'un noyau central sur lequel s'appuient des poutres en porte-à-faux, dont les profils s'affinent à mesure qu'ils s'éloignent du centre pour en réduire la charge. Le poids au droit des nez-de-planchers suspendus de la CAF devant être limité, celle-ci a été dotée de façades rideaux continues en Héliotrex et en lames d'aluminium. L'emploi de l'Héliotrex, résine polyester et fibres de verre⁶⁴, est alors complètement inédit. Des brise-soleils en lames d'aluminium complètent l'ensemble pour plus de confort. Ce chef-d'œuvre de l'architecture contemporaine a été inscrit à l'inventaire des monuments historiques en 1998 mais cette mesure a rapidement été annulée par le Tribunal administratif et l'édifice est un temps menacé de démolition. Sauvé *in extremis*, la tour est finalement vendue par la CAF en 2002 et a fait l'objet d'un concours promoteur-architecte l'année suivante, remporté par Dominique Hertzenberger et l'agence Arte Charpentiers Architectes⁶⁵. Le premier objectif de cette réhabilitation est la mise aux normes thermiques, acoustiques et de sécurité incendie de la tour. Ne faisant l'objet d'aucune protection, le bâtiment a été entièrement désossé. La structure métallique a certes été préservée, mais la totalité de l'enveloppe a été déposée et repensée. La façade si innovante en Héliotrex et lames d'aluminium a été sacrifiée pour répondre aux exigences de confort et de sécurité. N'était-il pas envisageable de trouver une solution permettant à la fois sa conservation et la réponse aux exigences normatives et d'usages ? Une nouvelle façade composée d'une double-peau vitrée de soixante centimètres intégrant des stores intérieurs et une ventilation naturelle a été mise en place en définitive, obligeant le renfort de la structure au droit des nez-de-planchers, donc la transformation des profils. L'intégration d'une double-peau plus légère ne pouvait-elle pas composer avec la façade d'origine conservée ? Toujours est-il que cette transformation radicale souligne plus encore la

64. Marino (Giulia), *Un Monument Historique controversé – La caisse d'allocations familiales à Paris 1953-2008*, Paris, Picard, 2009, 270 p.

65. L'architecte Dominique Hertzenberger est chargé du plan masse et de l'aménagement des logements, tandis que l'agence Arte Charpentiers Architectes se charge de la réhabilitation de la tour.



Campus de La Doua, Villeurbanne, Jacques Perrin-Fayolle et Jean Prouvé, 1957
© Mathilde Padilla, 2018

fragilité du patrimoine contemporain notamment dans le cadre d'opération de réhabilitation⁶⁶.

Le cas des façades légères, composées d'éléments assemblés, bien que théoriquement démontables, se révèle encore plus difficile à appréhender dans une dynamique de restauration comme le souligne Jacques Moulin dans sa tribune⁶⁷. Selon Richard Klein, président de DoCoMoMo France⁶⁸, avant de juger si une architecture est démontable, donc nomade, ou non, il faut « la situer » entre le patrimoine mobilier et immobilier⁶⁹. Où se situent précisément les façades légères ? Si l'on considère les façades d'un édifice comme des éléments de mobilier, alors il est tout à fait envisageable de les remplacer. En revanche si l'on considère les façades comme des éléments significatifs de l'architecture d'un édifice, indissociables du reste du bâtiment lui-même voué à être pérenne, il n'y a aucune raison de les considérer comme démontables. Tout objet assemblé n'est pas nécessairement conçu pour être démonté comme l'illustrent les façades légères de la Maison du Peuple composées de panneaux préfabriqués en tôles pliées⁷⁰. Étrangement, la renommée contemporaine de Prouvé semble plus assurée en matière d'éléments mobiliers qu'en matière d'architecture ; sa production de panneaux de façades, bien que conséquente, demeurant aujourd'hui moins reconnue⁷¹. Nous avons souligné à ce sujet que rares sont les façades de Prouvé qui nous sont parvenues dans leur état originel, de la cité Emmaüs du Blanc-Mesnil à la cité Baticoop de Dijon. Comment ne pas évoquer la transformation radicale des laboratoires de l'INSA à la Doua (Villeurbanne) dont les façades ont été remplacées par des panneaux neufs, similaires et dans le même temps, très différents. Sur le campus, nombre des bâtiments de l'INSA avaient été vêtus de murs-rideaux à ossature verticale en aluminium,

66. Gauthier Vanoverschelde a récemment soutenu un thèse intitulée « Histoire de l'architecture d'une administration sociale : les caisses d'allocations familiales », dirigée par Richard Klein. Il y présente l'importance des CAF dans l'histoire de l'architecture et la CAF centrale de la région parisienne y est présentée comme un symbole.

67. Moulin (Jacques), « Il faut envoyer la Maison du Peuple à la ferraille ». in *Le Monde*, 16 avril 2019, https://www.lemonde.fr/idees/article/2019/04/16/il-faut-envoyer-la-maison-du-peuple-a-la-ferraille_5450730_3232.html

68. Groupe de travail français pour la valorisation et la protection de l'architecture, de l'urbanisme et des paysages du XX^e siècle.

69. Klein (Richard), « Le pavillon du centenaire de l'aluminium, un patrimoine en pièces », in *Architecture industrialisée et préfabriquée : connaissance et sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012, p.121-138

70. Sulzer (Peter), *Jean prouvé, Œuvre Complète, vol. 1 : 1917-1933*, Basel, Birkhäuser, 1999, 240 p. ; Sulzer (Peter), *Jean prouvé, Œuvre Complète, vol. 2 : 1934-1944*, Basel, Birkhäuser, 2000, 352 p. ; Sulzer (Peter), *Jean prouvé, Œuvre Complète, vol. 3 : 1944-1954*, Basel, Birkhäuser, 2005, 384 p. ; Sulzer (Peter), *Jean prouvé, Œuvre Complète, vol. 4 : 1954-1984*, Basel, Birkhäuser, 2008, 334 p.

71. Des expositions récentes commencent néanmoins à s'y intéresser. On pense notamment à l'exposition « Jean Prouvé, architecte des jours meilleurs » organisée par la Fondation LUMA à Arles du 20 octobre 2017 au printemps 2018. <https://www.enrevenantdelexpo.com/2017/10/19/jean-prouve-architecte-des-jours-meilleurs-luma-arles/>

entre lesquels s'inséraient des éléments pleins sertis d'aluminium ondulé et bossé, en alternance avec des châssis vitrés en aluminium. La qualité des façades d'origine de Prouvé résidait dans le bossage arrondi des éléments d'allèges isolés et dans l'alternance entre ces éléments et les parties vitrées elles-mêmes redécoupées. La fenêtre coulissante s'intégrait entre deux bandeaux vitrés fixes et des joints noirs soulignaient élégamment les éléments et le dessin d'ensemble. Le projet conduit par Eiffage et les agences Patriarche et Reichen Robert et Associés a mené au remplacement de l'ensemble des façades par de nouvelles intégrant davantage d'isolant thermique, des menuiseries plus performantes et des protections solaires extérieures dont les coffres sont habilement camouflés dans l'épaisseur d'isolant rapporté. Dans l'ensemble, le dessin reprend certes les rythmes verticaux des ossatures aluminium et les découpages horizontaux des panneaux Prouvé mais le dessin des menuiseries est complètement modifié, les bossages se révèlent bien plus anguleux qu'à l'origine, l'aluminium des parements est plus bleuté et la surépaisseur induite par l'isolant ajoute des ombres portées sur les façades. Finalement, si l'esprit de l'intervention de Prouvé est plutôt respecté – au détriment certes du détail et de la finesse inimitable de son dessin – la matière quant à elle, est entièrement modifiée. Que deviennent les panneaux ainsi démontés ? Nombre d'entre eux se retrouvent dans des ventes aux enchères spécialisées. Une même remarque s'impose à propos de la reconversion du centre de tri postal de Nancy de Claude Prouvé et de Jacques André, architecte régional des Postes dont les murs-rideaux ont été conçus et fabriqués dans les ateliers Prouvé. Achievé en 1973, le centre de tri est menacé dans les années 2000 par un projet de restructuration du quartier de la gare. Défendu par de nombreux architectes et historiens, l'édifice fait finalement l'objet d'un concours en 2007 remporté par Marc Barani et Christophe Presle. Les deux architectes proposent de reconvertir le centre de tri en centre de congrès, de conserver l'édifice dans sa majeure partie et de lui accoler une extension afin de l'adapter à son nouvel usage. Les façades sont alors déposées et remplacées sur tous les niveaux suivant un dessin similaire, voire identique, à celui d'origine mise à part sur les façades nord et ouest où des vitrages toute hauteur sont mis en œuvre. Bien que la matière ne soit pas conservée, l'esprit de Prouvé semble préservé. Mais cela suffit-il à affirmer que le patrimoine est sauvegardé ? Des particularités techniques spécifiques, un langage industriel qui ne correspond plus aux standards actuels auxquels s'ajoutent des exigences normatives qui s'imposent aujourd'hui aux enveloppes des bâtiments fragilisent inmanquablement les façades légères des années 1960-1970⁷².

72. Martin (Pierre), *Façades légères en détail*, Antony, Editions du Moniteur, 2017, 386 p.

Malgré ces freins, la « fabrique du Patrimoine du XX^e siècle⁷³ » est en marche avec un taux de protection qui augmente au fil des décennies, bien que le pourcentage d'édifices construits au siècle dernier protégés au titre des monuments historiques ne dépasse pas 5 % aujourd'hui. Depuis de nombreuses années pourtant, le patrimoine du XX^e siècle mobilise chercheurs et praticiens notamment au sein des écoles nationales supérieures d'architecture notamment à la faveur de l'appel d'offre de recherche *Architecture du XX^e siècle, matière à projets pour la ville durable du XXI^e siècle* porté par le ministère de la Culture dont cette recherche a été lauréate de la troisième session en 2018. Les séminaires, colloques et journées d'études se sont également multipliés comme en témoigne en particulier une rencontre dédiée à la « Réhabilitation des logements du XX^e siècle : quelles perspectives de recherches & d'actions ? » coorganisée par le Labex AE&CC, l'ENSAG et la Métropole de Grenoble Alpes, qui a réuni des architectes, des élus, des bailleurs sociaux, des enseignants-chercheurs et des associations. Parmi les pistes soulignées au cours de ce dernier événement : la nécessité de travailler avec des partenaires diversifiés, l'identification de projets emblématiques pour mettre en place des actions avec les bailleurs sociaux et les copropriétés, la définition de réponses « sur mesure » ; la prise en considération des cycles de vie des matériaux, et l'implication des bureaux d'études, des architectes et des entreprises locales pour construire un projet durable et économique.

Nombre de ces enjeux correspondent précisément aux hypothèses étudiées lors du lancement de ce projet de thèse qui confirment la nécessité de réaliser des travaux pluridisciplinaires sur des projets démonstrateurs afin de définir des méthodes de réhabilitation plus respectueuses du patrimoine. Plus que jamais, il revient aux architectes de sensibiliser les usagers et les gestionnaires à la qualité comme aux singularités de l'architecture contemporaine. La faible isolation des façades légères induit des problématiques de confort thermique et acoustique, et surtout une nécessaire prise de distance critique par rapport aux standards d'isolation actuels⁷⁴. La finesse des façades et leur légèreté ne leur permettent ni d'avoir une bonne inertie thermique, ni d'avoir une masse suffisante pour s'isoler du bruit. Mais celles-ci ne peuvent-elles pas s'adapter à ces nouveaux enjeux ? Sont-elles véritablement incompatibles avec ces besoins d'isolation ? Ces nouvelles conditions justifient-elles la disparition de ces témoins des avancées techniques du siècle dernier ? D'autres solutions techniques sont-elles envisageables ?

73. *Revue de l'Art*, n° 186, Architecture du XX^e siècle, Paris, Ophrys, décembre 2014, 104 p.

74. Ménard (Jean-Pierre), « Façades légères », *Le Moniteur architecture*, n°41, 5/1993, p. 56-62

b. Des passoires thermiques ?

L'idée couramment admise selon laquelle les constructions du XX^e siècle sont complètement dépourvues d'isolation thermique doit être aujourd'hui sensiblement relativisée. Certes, avant 1974 et les chocs pétroliers, il n'existait aucune réglementation thermique fixant un seuil maximum de consommation de chauffage mais contrairement aux idées reçues, les architectes n'étaient pas indifférents aux problématiques d'isolation comme l'illustre, en ce qui nous concerne, les isolants introduits dans les panneaux sandwichs.

Comme le soulignent Franz Graf et Giulia Marino dans leur ouvrage *Les Dispositifs du confort dans l'architecture du XX^e siècle*⁷⁵, les architectes modernes initient de nouvelles façons d'appréhender le confort dans l'habitat. Le confort d'usage est désormais mis au cœur de leurs réflexions avec des pièces qui prennent de plus en plus d'importance : cuisine équipée, salle de bains et salle d'eau, buanderie etc. Une réflexion importante est également portée sur les apports de lumière naturelle avec un pourcentage de surfaces vitrées grandissant. La ventilation naturelle des logements entre également dans le processus de conception. Les appartements sont alors conçus traversants et l'agencement des pièces est réalisé pour faciliter les circulations d'air entrant et l'évacuation de l'air issu des pièces humides. Les conduits shunt sont principalement utilisés facilitant l'évacuation de l'air. Prouvé lui-même imaginera des systèmes de grilles fixes ou réglables manuellement par les usagers pour réguler les débits d'entrée d'air. Dans le cas de l'immeuble Les Cèdres, ces entrées d'air sont installées en partie basse des panneaux de cuisine. Franz Graf et Giulia Marino constatent également que deux écoles de gestion du confort se sont clairement dissociées au XX^e siècle. Certains architectes privilégient des méthodes dites « passives » ou « naturelles » comme nous l'avons vu précédemment, tandis que d'autres s'orientent vers des méthodes « actives » ou « artificielles ». Le développement technologique du XX^e siècle a permis à certains concepteurs d'orienter leur production vers des espaces complètement hermétiques au monde extérieur et dont les ambiances intérieures sont entièrement contrôlées par des systèmes de ventilation mécanique, de climatisation et évidemment, de chauffage. Le climat intérieur devient alors totalement artificiel et peut s'adapter à tout contexte environnemental. Le Corbusier écrit même, à l'issue du 3^e CIAM que les dispositifs mécaniques permettent d'atteindre « la respiration exacte » dans un bâtiment⁷⁶. Pour lui, le confort et la bonne respiration sont

75. Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XX^e siècle : connaissance et stratégie de sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2016, 535 p.

76. Le Corbusier, 1933, *La Ville radieuse. Soleil-Espace-Verdure*, Paris, Vincent Fréal, 1964, 345 p.

vitaux. Il est nécessaire de respirer un air de qualité, régulièrement renouvelé et à température constante. Si le confort est largement pris en compte par les architectes du siècle dernier, la plupart du temps leurs propositions revêtent un statut expérimental en dehors de toutes réglementations. Après 1974, les premières réglementations thermiques imposées font prendre conscience de la nécessité d'économiser les ressources et obligent les architectes à changer de méthodes. Le confort devant être maintenu en réduisant le chauffage et les consommations d'énergie, il devient donc impératif de renforcer l'isolation. La transition énergétique en cours et l'urgence climatique exigent aujourd'hui de repenser les manières de concevoir les logements au profit de solutions durables et écologiques. La réglementation thermique RT 2012, fixe un objectif de consommation énergétique primaire plafonnée à 50 kWh/m².an pour la construction neuve. Pour l'existant, l'arrêté du 22 mars 2017 fixe pour sa part les performances thermiques et la performance énergétique à atteindre en cas de rénovation. Depuis quelques années, le foisonnement des sigles HQE, BBC, BEPOS et des maisons passives⁷⁷ illustrent bien l'ambition de réussir à construire des édifices qui allient performance thermique et faible consommation énergétique.

En ce qui concerne les immeubles existants, se pose la question de leur capacité à atteindre ces objectifs, ou tout du moins de s'en approcher. Si le niveau de performances énergétiques et thermiques des bâtiments existants doit être amélioré, cette démarche ne doit pas exclure une réflexion en économie globale, tant financière qu'énergétique. Ainsi, dans le cas de façades légères possédant déjà un potentiel d'isolation, il semble pertinent de l'exploiter dans la composition d'une paroi globale plus performante, plutôt que d'envisager sa dépose et son remplacement qui impliqueraient la production de déchets et la fabrication plus importante de nouveaux éléments destinés à répondre à la norme. Il est inévitable de produire de nouveaux composants pour améliorer les performances d'une façade, mais en s'appuyant sur les potentiels de l'existant, ceux-ci peuvent être limités pour réduire l'énergie grise et l'empreinte carbone de la rénovation. En imaginant des solutions permettant au parc existant d'atteindre les performances du neuf tout en nécessitant une production moindre de matériaux, et donc de gaz à effet de serre, il semble se dessiner des réhabilitations durables, responsables et dont l'économie globale serait plus que soutenable.

77. HQE : Haute Qualité Environnementale ; BBC : Bâtiment Basse Consommation, label issu de la RT 2005 devenu la norme lors de l'élaboration de la RT 2012 ; BEPOS : Bâtiment à Energie POSitive, qui produit plus d'énergie qu'il en consomme ; maisons passives : qui consomme 90 % d'énergie de chauffage en moins qu'une maison classique.

c. Les normes : des garants de confort ou des obstacles à la préservation du patrimoine ?

La conjoncture environnementale contemporaine doublée d'une prise de conscience collective de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation des énergies fossiles induisent la mise en place de lois et normes à l'échelle nationale et internationale. Celles-ci ont pour objectif premier de permettre une transition écologique et énergétique rapide du secteur du bâtiment. Des seuils de consommations d'énergie maximum de plus en plus proches de zéro sont exigés pour les bâtiments neufs. Concernant les bâtiments existants, la norme est légèrement plus permissive situant le seuil maximal pour les logements entre 80 et 165 kWhep/m².an selon le type de chauffage et le climat. Les consommations du parc existant étant en moyenne estimée entre 240 et 260 kWhep/m².an, cette norme exige quand même une division de moitié, en moyenne, des consommations d'énergie⁷⁸. Cette réduction importante conduit nécessairement à la transformation des enveloppes des bâtiments dans le but d'améliorer leurs capacités d'isolation. Bien que ces normes soient initialement conçues dans un objectif environnemental et écologique, l'amélioration des capacités d'isolation des façades ne peut que participer à l'amélioration du confort thermique des habitants. Mais le confort ne se limite pas aux seules questions thermiques. La gestion des ambiances intérieures d'un logement doit davantage reposer sur le confort global qui se définit par la prise en compte de nombreux critères : confort thermique, confort d'été, confort hygrométrique, confort acoustique, confort visuel, confort d'usage (hygiène, sanitaire, équipements, accessibilité, etc.), renouvellement d'air, etc. Quantifier le confort global est difficile, sa perception restant forcément subjective et dépend de la sensation de chacun. On peut néanmoins se rapprocher d'un seuil de confort commun et, dans l'idéal, donner aux habitants des outils leur permettant de réguler leurs ambiances intérieures. Il existe des normes concernant l'acoustique et la réglementation thermique inclut de plus en plus la notion de confort d'été et de protection solaire, néanmoins, elles ne permettent pas de prendre en compte la totalité des subtilités qui définissent le confort global. De toute évidence, l'application stricte des

78. Lorsque le bâtiment rentre dans les trois critères suivants : sa Surface Hors Œuvre Nette (SHON) est supérieure à 1 000m² ; la date d'achèvement du bâtiment est postérieure au 1^{er} janvier 1948 ; et le coût des travaux de rénovation « thermique » décidés par le maître d'ouvrage est supérieur à 25 % de la valeur hors foncier du bâtiment, ce qui correspond à 382,50 € HT /m² pour les logements (au 1^{er} janvier 2017). Dans ces conditions, on dit que le bâtiment doit respecter la RT Existant Globale. Si le bâtiment n'entre pas dans ces critères, il doit respecter la RT Existant élément par élément, dont les performances sont fixées par l'arrêté du 22 mars 2017 modifiant l'arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants.

réglementations thermiques ne suffit pas à l'atteindre. Les études de confort, les audits en site occupé et l'observation du comportement des occupants doivent être intégrés aux diagnostics réglementaires pour adapter les choix constructifs futurs. Les habitants doivent être replacés au centre des questions de confort, aux côtés des problématiques d'économie d'énergie. Si les normes ne suffisent pas à garantir le confort des occupants⁷⁹, elles demeurent garantes d'une transition écologique équilibrée.

Les normes peuvent toutefois engendrer des situations paradoxales, comme pour la ventilation naturelle. Ce dispositif fréquemment utilisé au cours du XX^e siècle permet de renouveler l'air des logements sans consommer d'énergie supplémentaire. Système vertueux, il ne suffit cependant pas toujours pour correspondre aux débits de renouvellement d'air exigés par les normes. Dans un entretien paru en 2014 dans le magazine *Ecologik*⁸⁰, Alain Bornarel, fondateur du bureau d'études TRIBU (partenaire de la thèse), souligne l'importance de lier qualité de l'air intérieur, économies d'énergies, confort d'hiver et d'été, maintenance économique et aisée. Souhaitant favoriser au maximum l'utilisation de la ventilation naturelle, Alain Bornarel constate qu'elle se heurte à l'augmentation continue des exigences réglementaires. Selon lui, il convient de réadapter les réglementations actuelles en termes de renouvellement d'air pour qu'elles puissent concorder avec la nécessité d'éviter l'emploi de systèmes mécaniques consommateurs d'énergie ; la VMC (ventilation mécaniquement assistée) cédant progressivement la place à la VNAC (ventilation naturelle assistée et contrôlée) ou à d'autres systèmes hybrides. L'auteur insiste également sur l'importance de ne plus considérer uniquement la consommation d'énergie et le confort en hiver. Les changements climatiques en cours rendent en effet le confort d'été plus préoccupant. La ventilation naturelle s'impose alors comme une solution confortable, hygiénique et économe en énergie.

Les normes peuvent à la fois servir le projet au bénéfice d'une transition écologique efficace, comme exiger des efforts trop importants pour un immeuble existant nécessitant de recourir à des procédés mécaniques pour atteindre leurs objectifs. De même, il est demandé aux enveloppes d'assurer l'isolation parfaite des parois ainsi que l'étanchéité à l'eau et à l'air du bâtiment tout en permettant une ventilation et en intégrant des protections solaires pour le confort d'été. Ces efforts pour se conformer aux exigences normatives nécessitent souvent

79. Lavoye (Frédéry), Bœuf (Frédéric), Thellier (Françoise), *Qualité des ambiances dans le bâtiment, Le confort thermique de l'habitant*, Paris, Presses des Mines, 11/2015, 146 p.

80. Gauzin-Müller (Dominique), « Confort d'été passif : quelques solutions éprouvées », in *Ecologik n°38*, Paris, Editions A Vivre, 4-5/2014, p.54-57

d'importantes transformations. Comment dès lors préserver les caractéristiques d'une façade légère en tenant compte de ces contraintes ? Les façades légères sont-elles destinées à être systématiquement remplacées comme celles de La Doua ? Leur durée de vie est-elle véritablement limitée ? Une double-peau intérieure garantissant la conservation de la façade d'origine mais assumant le rôle d'isolation peut-elle être une solution adaptée ? Les normes actuelles rendent-elles impossibles la conservation et l'adaptation du patrimoine moderne ? Sur le projet de réhabilitation des Tours Nuages à Nanterre, l'agence RVA a fait le choix de mettre en œuvre une isolation thermique par l'extérieur recouverte d'un bardage métallique réfléchissant couvrant complètement les célèbres mosaïques de Fabio Reiti qui ornent les façades. Dans le cas d'un édifice à forte valeur patrimoniale, ne doit-on pas chercher à concilier amélioration thermique et conservation du patrimoine ? L'écriture d'une nouvelle norme réellement adaptée à la réhabilitation énergétique et environnementale des édifices patrimoniaux ne pourrait-elle pas apporter de nouveaux objectifs performants, réalisables et garantissant la préservation de notre patrimoine ?

d. Le patrimoine à l'épreuve de la réhabilitation énergétique et environnementale

À l'échelle nationale, le secteur du bâtiment représente aujourd'hui 43 % des consommations énergétiques. « Sur les 32,8 millions de logements que compte la France, 18,8 millions ont été construits avant 1974, date de la première réglementation thermique ; la consommation d'énergie moyenne des logements est estimée à 260 kWhep/m².an pour le secteur privé (et environ 10 % de moins pour le logement social)⁸¹ ». On comprend à la lecture de ces chiffres combien la rénovation du parc de logements existants représente l'un des principaux leviers d'amélioration environnementale⁸². L'isolation thermique devient une priorité absolue, mais dans l'existant, elle est mise en œuvre dans un contexte délicat de possibles fragilisations des parois, de perte de surface habitable mais aussi de fragilisation croissante du patrimoine. Une dichotomie semble ainsi se dessiner entre la nécessaire réhabilitation du patrimoine du XX^e siècle, sa préservation et sa valorisation. Elle s'illustre parfaitement sur le cas particulier des fenêtres. Le remplacement à l'identique des menuiseries tout en intégrant les exigences

81. Charlot-Valdieu (Catherine), Outrequin (Philippe), Peskine (Hélène), *Réhabilitation énergétique des logements*, Antony, Editions le Moniteur, 2018, 325 p.

82. Maugard (Alain), Pouget (André), *Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974 : le guide ABC*, Paris, EDIPA, 2011, 344 p.

croissantes d'isolation thermique et acoustique représente une importante difficulté⁸³. L'amélioration des performances de la fenêtre nécessite fréquemment de passer en double vitrage et en profilés à rupture de pont thermique. Il est parfois impossible de conserver le profil d'origine trop fin pour insérer un double vitrage, comme c'est le cas pour l'immeuble Les Cèdres. Les menuiseries supportant des doubles vitrages sont généralement plus épaisses que les modèles anciens, surtout lorsque les fenêtres d'origine sont en aluminium, bien que les fabricants verriers réalisent de plus en plus de progrès quant à la finesse des doubles vitrages. L'ensemble de ces contraintes rend difficile l'amélioration des performances de la fenêtre en conservant l'élégance et le caractère du dessin d'origine. L'enjeu principal se trouve pourtant ici : comment concilier rénovation énergétique et respect du patrimoine dans une enveloppe économique abordable pour les propriétaires ?

La problématique majeure reste en effet la gestion du budget face à des exigences toujours plus fortes. Dans le cas d'une copropriété, l'économie est d'autant plus importante que tous les copropriétaires ne disposent pas des mêmes capacités d'investissement. Ajoutons qu'en absence d'inscription ou de classement au titre des monuments historiques, ces immeubles ne bénéficient pas d'avantages fiscaux. Plusieurs subventions du ministère de la Culture permettent cependant d'aider les copropriétaires, mais les aides plus importantes sont conditionnées par les performances thermiques. Avec une réduction de 35 % des consommations de chauffage et l'intervention sur divers postes (isolation des façades, des sous faces de planchers, des toitures, optimisation du système de chauffage), la Métropole de Lyon débloque par exemple la subvention 'Ecorénov' pour les propriétaires. L'ADEME et l'Anah subventionnent également les rénovations énergétiques à différents taux selon les performances à atteindre. Les aides financières aux copropriétaires sont majoritairement données pour l'amélioration des performances thermiques et énergétiques des bâtiments et non pour la préservation du patrimoine architectural. Le ton est donné, les propriétaires priorisent la performance à la qualité patrimoniale des édifices. Sans accompagnement par des professionnels, ceux-ci s'orientent naturellement vers les dispositifs les plus favorables économiquement, notamment l'isolation par l'extérieur. Fort heureusement le label « Architecture contemporaine remarquable » implique – théoriquement – un regard plus attentif de la part des services instructeurs lors de la dépose d'autorisations de travaux qui permettent, dans certains cas, d'éviter des interventions irréversibles. Pour garantir l'équilibre

83. De Jonge (Wessel), Doolaar (Arjan), *Curtain wall refurbishment : a challenge to manage*, Eindhoven, DoCoMoMo, 1997, 92 p.

entre patrimoine et performances énergétiques, il convient donc de réfléchir à l'intégration de la prise en compte de la valeur patrimoniale dans les projets de rénovation lors de l'attribution des subventions. Cela inciterait les propriétaires à y prêter attention et permettrait de préserver la qualité architecturale du patrimoine moderne.

Pour permettre des rénovations performantes et respectueuses du patrimoine, les concepteurs doivent réfléchir à des solutions adaptées et économiques. Pour cela, un diagnostic multicritères approfondi doit être mené avant tout projet sur un existant, permettant d'évaluer ses capacités propres et de faire des choix raisonnés⁸⁴. Le choix de l'isolant est également déterminant. Selon sa nature, l'épaisseur à mettre en œuvre peut être différente à performances égales. Tous les matériaux isolants n'ont pas le même comportement d'un point de vue acoustique ce qui peut avoir une incidence décisive dans le cas d'une approche mixte. Leur degré d'hygrométrie peut également différer et doit être pris en compte selon le contexte et le risque de condensation. Aussi, certains matériaux sont intrinsèquement plus respectueux de l'environnement, comme les matériaux biosourcés ; autant de critères garants d'une rénovation énergétique réussie. L'économie du projet doit également se calculer en coût global et non en coût d'investissement. Just Renckens, fondateur du *Renckens Consultancy for Facades Technology*, questionne l'économie d'une réhabilitation de murs rideaux en rapport avec la prolongation de sa durée de vie⁸⁵. Selon lui, un investissement est rentable si le propriétaire obtient un retour sur investissement avant l'obsolescence des travaux réalisés. Pour les façades légères qui nécessitent des entretiens réguliers, il estime cette obsolescence récurrente tous les vingt-cinq ans et ajoute également que les conditions d'une réhabilitation durable et économiquement viable ne sont remplies que lorsque les travaux permettent de répondre aux besoins de performances techniques et fonctionnelles nouvelles, mais également de prévoir les possibilités d'adaptation de la façade à de futurs changements et exigences. Ses théories reposent très largement la rénovation des bâtiments dotés de murs rideaux sur l'utilisation de systèmes d'air conditionné et de climatisation. Il semble pertinent, dans le contexte environnemental actuel, de s'orienter davantage vers des solutions plus « low-tech »⁸⁶ qui permettent de réduire

84. ANAH, Moya (Jean-Pierre), *Isolation thermique durable des bâtiments existants*, Antony, Editions le Moniteur, 2018, 296 p.

85. De Jonge (Wessel), Doolaar (Arjan), *Curtain wall refurbishment : a challenge to manage*, Eindhoven, DoCoMoMo, 1997, 92 p.

86. Anglicisme signifiant « basses technologies » ou « technologies simples ». Le terme low-tech est employé par le Low-Tech LAB pour qualifier des objets, des systèmes, des techniques, des services, des savoir-faire, des pratiques, des modes de vie et même des courants de pensée, qui intègrent la technologie de manière utile, accessible et durable.

les problèmes de confort sans augmenter les consommations d'énergie et sans contribuer au réchauffement de l'air extérieur. Le confort passif est un critère déterminant de cette recherche et constitue un objectif majeur pour la réhabilitation des façades de l'immeuble Les Cèdres même si allier préservation du patrimoine et construction bioclimatique se révèle complexe⁸⁷. Des solutions existent et des compromis peuvent être réalisés dans l'intérêt des occupants. Les travaux développés au sein du TSAM (Laboratoire des techniques et de la sauvegarde de l'architecture moderne) sous la direction du professeur Franz Graf, associé à Yvan Delemontey et Giulia Marino, démontrent qu'il est possible de concilier patrimoine, économie et énergie en une visée synthétique⁸⁸. On songe en particulier à la démarche innovante conduite à propos de la cité du Lignon à Genève⁸⁹. Sans qu'il y ait besoin de revenir en détail sur cette dernière opération, il faut souligner combien les études menées par le Laboratoire des techniques et de la sauvegarde de l'architecture moderne ont permis de valider toute une série de mesures conservatoires nécessaires à la mise aux normes énergétiques d'une enveloppe de 125 000 m² de façade rideau. L'objectif affiché de l'étude était de conserver un maximum de la substance de cette façade rideau et de son système constructif en élaborant quatre hypothèses d'intervention allant du remplacement complet des éléments à la dépose et au remplacement partiel. Cette dernière démarche associant de nombreuses compétences dans une visée globalisante a largement stimulé la dynamique développée autour du projet démonstrateur de l'immeuble Les Cèdres.

2 – Des pratiques diversifiées et des méthodologies à construire

a. L'acculturation des acteurs et du grand public

En matière de patrimonialisation comme dans de nombreux domaines, les questions d'acculturation se révèlent déterminantes qu'il s'agisse des usagers, des investisseurs, des services instructeurs, des responsables politiques comme grand public, et même de certains

87. Au sens donné dans l'ouvrage de Samuel Courgey et Jean-Pierre Oliva, véritable guide de la conception bioclimatique : Courgey (Samuel), Oliva (Jean-Pierre), *La conception bioclimatique : des maisons confortables et économes*, Mens, Terre Vivante, 2006, 240 p.

88. Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. *Patrimoine moderne, économie, énergie. Stratégies d'intervention pour les grands ensembles, 1945-1975*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2015, 94 p. ; Franz Graf et Yvan Delemontey (dir.), *Architecture industrialisée et préfabriquée : connaissance et sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012, 435 p.

89. Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. « La cité du Lignon 1963-1971, étude architecturale et stratégies d'intervention » in *Revue patrimoine et architecture, cahier hors-série*, Lausanne, Infolio, 1/2012 (réédition 9/2013), 160 p.

architectes. En matière de restauration, la culture des acteurs peut se révéler essentielle, comme l'illustre le sauvetage *in extremis* de la destruction de la Cité de Refuge de l'Armée du Salut en 1975 comme de la Maison du Peuple de Clichy en 1983 à la faveur d'arrêtés de protections qui traduisent non pas tant une reconnaissance de la valeur patrimoniale de ces édifices qu'une intervention d'urgence visant à les préserver de la destruction⁹⁰. Conçue par Le Corbusier et Pierre Jeanneret en 1933, rénovée par leurs soins après les destructions de la seconde guerre mondiale en 1952, la Cité de Refuge est laissée ensuite à l'abandon pendant une vingtaine d'années, sans véritable entretien ni considération. Elle souffre du désintérêt porté à l'architecture moderne et de l'échec du système de respiration exacte expérimenté par Le Corbusier. La Fondation Le Corbusier alerte très tôt le ministère de la Culture, s'inquiétant des projets de restructuration lancés par l'Armée du Salut. Ses façades, sa toiture, son hall d'entrée et son escalier principal sont alors inscrits sur la liste supplémentaire des monuments historiques le 15 janvier 1975, dans une visée de sauvegarde. L'Armée du Salut souhaite réorganiser les conditions d'accueil de la Cité de Refuge et missionne dans un premier temps l'architecte Philippe Verrey en 1974. Son projet de rénovation prévoit la restauration des parties hautes de l'immeuble, le remplacement des huisseries par des ouvrants à la française, une démolition-reconstruction des murs en pavés de verre, le changement des garde-corps des terrasses, le cloisonnement des espaces intérieurs, la rénovation des couleurs de la façade rue Cantagrel et la mise en couleur de la façade rue Chevaleret. Ces dispositions modifient considérablement le bâtiment et son enveloppe, sans que sa récente inscription au titre des monuments historiques n'ait visiblement eu une incidence sur le projet. En 1986, une seconde campagne de travaux est engagée pour mettre aux normes l'édifice mais ne prend pas plus en considération la dimension patrimoniale de la Cité de Refuge. Ce n'est que lors de l'appel à candidature lancé en 2001 pour sa rénovation complète, qu'apparaît pour la première fois une demande de prise en compte de la dimension patrimoniale de l'édifice. La concertation avec les architectes des bâtiments de France et la Fondation Le Corbusier est exigée en amont du projet. Faute de moyens, l'Armée du Salut repousse cet investissement à 2007 année où sont missionnés l'ACMH François Chatillon et l'architecte François Gruson de l'agence Opéra. La maîtrise d'ouvrage inclut délibérément la dimension patrimoniale comme une composante à part entière du projet et non plus comme une simple obligation réglementaire. Le programme

90. Graf (Franz), « La restauration de la Maison du Peuple à Clichy : un point de vue critique », in *Histoire matérielle du bâti et projet de sauvegarde : devenir de l'architecture moderne et contemporaine*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2014, p. 347-359

identifie des parties à préserver en plus des éléments inscrits. Malgré ces précautions, il ne sera pas possible de conserver les panneaux de façades de la Cité déjà très altérés par le manque d'entretien.

La réalisation d'un entretien régulier et adapté est essentielle à la préservation des façades légères, ce dont bénéficie la cité du Lignon grâce à la mise en place, dès sa construction, d'un comité responsable de la gestion de la cité, incluant des habitants. Les occupants sont ainsi déjà sensibilisés à ce patrimoine. La qualité de l'entretien a permis de conserver en grande partie l'authenticité de l'ensemble ce qui participe de sa valeur patrimoniale. En Suisse, la politique de patrimonialisation et de conservation de l'architecture de la seconde moitié du XX^e siècle débute dans les années 1990, notamment dans le canton de Genève qui lance un inventaire de ce patrimoine sur son territoire en partenariat avec l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Le parti urbain de la cité du Lignon, ses qualités paysagères, son échelle inédite et la rationalité de son architecture sont autant de facteurs qui ont permis de mettre en place des mesures pour sa protection. C'est ainsi que depuis 2009, la cité est protégée par un plan de site qui fixe des principes urbanistiques et architecturaux à respecter. Il exige également la réalisation d'études menées en coordination avec les services compétents et demande l'élaboration de prototypes soumis à approbation avant travaux. Ces dispositifs permettent de distinguer la cité du Lignon comme un élément patrimonial important aux yeux de ses habitants comme de l'ensemble des acteurs. La nécessité d'une amélioration notable des performances thermiques de l'enveloppe a immédiatement posé la question de sa sauvegarde matérielle. Les études et prototypes réalisés par le Laboratoire des techniques et de la sauvegarde de l'architecture moderne démontrent qu'une connaissance approfondie de ce patrimoine permet de conduire une sauvegarde active avec des mesures opérationnelles étudiées selon les spécificités de l'objet. Le cahier des charges élaboré par le TSAM à la fin de sa mission a été annexé au plan de site pour compléter le règlement.

En France, diverses protections peuvent être mises en œuvre pour sauvegarder le patrimoine du XX^e siècle qu'il s'agisse de la mise en place d'un secteur patrimonial remarquable, d'une identification de l'édifice comme ayant un intérêt particulier dans le règlement du PLU – plan local d'urbanisme – ou encore du label « Architecture contemporaine remarquable », bien que celui-ci n'ait aucune incidence réglementaire, sans parler de la protection au titre des monuments historiques. L'efficacité de ces protections dépend en grande partie de leur compréhension et de leur réception par les maîtres d'ouvrage. La Maison des Sciences de

l'Homme de Paris, chef d'œuvre de Marcel Lods, Paul Depondt et Henri Beauclair (1965-1969) bénéficie d'une protection au titre du PLU de la Ville de Paris. Sur ce dernier exemple, l'architecte des bâtiments de France, qui dispose d'un droit de regard sur tout projet touchant à l'édifice, est intervenu en amont du projet pour sensibiliser l'EPAURIF (Établissement public d'aménagement universitaire de la région Île-de-France), maître d'ouvrage, et attirer l'attention sur le rôle essentiel de l'enveloppe dans la composition architecturale du bâtiment. C'est ainsi que la maîtrise d'ouvrage a été orientée vers une méthode d'intervention comprenant l'élaboration d'études préalables et d'un chantier-test. L'architecte en chef des monuments historiques Pierre-Antoine Gatier est alors chargé de l'opération et reconnaît le rôle essentiel de sensibilisation de l'architecte des bâtiments de France⁹¹. Les études préalables, les recherches d'archives et l'expérimentation des solutions *in situ* ont permis de sensibiliser la maîtrise d'ouvrage à son patrimoine et de lui faire prendre conscience de l'importance de mener une rénovation respectueuse de ses qualités, se rapprochant, à raison, d'une restauration historique.

Les façades légères, enveloppes caractéristiques de la production du XX^e siècle sont d'autant moins considérées d'un point de vue patrimonial qu'elles induisent des problématiques techniques complexes ; leurs modules préfabriqués assemblés impliquant notamment la multiplication des joints dont la pérennité reste limitée. Alors que le patrimoine, tel qu'il est souvent considéré, est communément associé à la notion de longévité, certains des composants des façades légères nécessitent une maintenance régulière. Les façades légères s'apparentent plus à des objets mécaniques qu'à des éléments construits et font l'objet de réhabilitations controversées souvent provoquées par une véritable méconnaissance de leurs caractéristiques techniques ; raison pour laquelle cette recherche s'est très tôt orientée vers l'élaboration d'une méthodologie appliquée à destination des concepteurs, maîtres d'ouvrages et services instructeurs.

b. Le diagnostic exhaustif

Pour intervenir sur un immeuble existant, il semble essentiel d'en avoir une connaissance exhaustive pour trouver des solutions réellement adaptées, d'autant plus lorsque le projet doit répondre au quadruple objectif d'amélioration du confort des habitants, d'amélioration des performances énergétiques et environnementales du bâtiment, de conservation de la

91. Propos issus d'un entretien téléphonique avec Fanny Schmitt-Houmeau, architecte en charge du projet.

valeur patrimoniale de l'édifice et de respect d'une économie globale raisonnable. Les études préalables et diagnostics sont souvent perçus, à tort, comme des investissements inutiles. Les maîtres d'ouvrage pensent réaliser des économies en réduisant les temps dédiés aux études alors que la réalisation d'études approfondies peut permettre des économies bien plus conséquentes. Le programme initialement prévu par l'EPAURIF pour la Maison des Sciences de l'Homme prévoyait une première phase de désamiantage complet des enveloppes puis, dans un second temps un projet d'aménagement du bâtiment impliquant une amélioration thermique et acoustique des façades et une mise en sécurité du site. Alors que les différents diagnostics réalisés et les recherches archivistiques soulignent la complexité de démonter et de stocker les panneaux, les architectes conseillent à la maîtrise d'ouvrage de réaliser les deux opérations en une seule pour réduire les interventions. Ainsi, les panneaux ne seront démontés qu'une fois ce qui permet de préserver les pièces d'assemblages en les manipulant moins, mais également de réaliser des économies d'échelle. Ce dernier exemple pose la question des diagnostics dans les contrats de maîtrise d'œuvre classiques, phase trop souvent sous-estimée par la maîtrise d'ouvrage. Comment cibler les améliorations thermiques que nécessite une enveloppe sans connaître ses propriétés techniques ? Comment définir une intervention à mettre en œuvre sans évaluer avec certitude les potentialités de l'existant ? Afin de répondre précisément à ces questions, l'équipe de Pierre-Antoine Gatier a travaillé sur l'ensemble des archives relatives à la Maison des Sciences de l'Homme avant d'envisager toute intervention et s'est associée les compétences d'un bureau d'études spécialisé sur la question des enveloppes, le bureau TESS, et d'un cabinet de désamiantage. Le bureau TESS a réalisé une étude complète de la façade existante avant de définir des propositions d'interventions permettant d'atteindre les objectifs de la réglementation thermique et de répondre aux contraintes d'étanchéité et de résistance au vent identifiées lors du diagnostic. Les études, qui se sont poursuivies sur six mois, ont permis d'apporter des connaissances précieuses pour élaborer un projet adapté aux enveloppes existantes. L'intervention de François Chatillon et de François Gruson (2007-2015), qui ont succédé à Pierre-Antoine Gatier sur le chantier de la Maison des Sciences de l'Homme, s'est également enrichie des études préalables de Vanessa Fernandez, portant sur les parois vitrées de l'édifice, et de celles d'Emmanuelle Gallo sur le système de chauffage et de ventilation. Dans le cas présent, la modification du mode opératoire du projet et l'importance des diagnostics ont permis de conduire une restauration tout à fait exemplaire.

Ce dernier exemple de réhabilitation consacre l'importance des études préalables. En ce qui

concerne la Cité de Refuge de l'Armée du Salut, les investigations portant sur la polychromie de la façade ont été jugées insuffisantes par la Fondation Le Corbusier et la DRAC Île-de-France notamment en l'absence de relevés exhaustifs⁹². Au regard de la complexité à resituer les couleurs originelles, François Chatillon a engagé plusieurs études mais celles-ci n'ont pas apporté de résultats probants. Le débat sur la polychromie de la cité de refuge se poursuit cinq années durant. Aucun document n'atteste des nuances et aucun sondage ne permet de les identifier avec certitude. François Chatillon émet alors l'hypothèse de se baser sur des teintes en harmonie avec les teintes intérieures d'origine qui, elles, sont découvertes par sondages. Le comité de suivi privilégie quant à lui la conservation de l'image récente du bâtiment qui l'identifie facilement, bien que ces teintes plus vives ne se basent sur aucune source historique. Les architectes cherchent alors un compromis pour satisfaire les deux points de vue, les teintes choisies finalement n'ayant plus aucune assise scientifique. La proposition de François Chatillon, bien que n'assurant pas de retrouver les teintes d'origine, a pour mérite de définir des couleurs sur des analyses approfondies du bâti existant. Sans cette assise scientifique comment justifier les interventions menées sur le patrimoine bâti ?

Ces derniers exemples soulignent la complexité des débats notamment d'un point de vue déontologique relatifs à la restauration de l'architecture du XX^e siècle et l'importance de développer de nouvelles méthodologies dans des approches renouvelées à l'image des démarches initiées par le TSAM pour la cité du Lignon qui a fortement inspiré la démarche conduite sur l'immeuble Les Cèdres. C'est ainsi que durant sept mois, nous avons constitué une connaissance exhaustive de l'objet construit à partir d'investigations archivistiques et de relevés détaillés. Une série de sondages a également été réalisée pour vérifier l'état de conservation de l'immeuble et détecter la présence éventuelle de matières toxiques. Le diagnostic complet est présenté dans un tableau récapitulatif qui documente chaque partie constitutive des enveloppes : état de conservation, photographies, dessins, propriétés thermiques. Le diagnostic thermique conjugue simulation informatique, calculs et données réelles mesurées *in situ* afin de relater, au plus près, les caractéristiques du bâtiment. Aux études exemplaires menées par le TSAM, s'ajoute l'analyse acoustique du bâtiment et des entretiens auprès des habitants afin de connaître leurs ressentis et leurs besoins. Les temporalités des diagnostics revêtent une importance majeure. Le diagnostic acoustique doit permettre d'évaluer les nuisances

92. Ragot (Gilles), Chadoin (Olivier), *La cité de refuge, Le Corbusier et Pierre Jeanneret, L'usine à guérir*, Paris, Editions du patrimoine, Centre des Monuments Nationaux, 2016, 243 p.

extérieures aux heures de pointes de la circulation, mais également la nuit, et les nuisances intérieures sur les plus fortes périodes d'occupation des logements, les soirs et week-end. Les mesures thermiques doivent inclure pour leur part les deux saisons d'hiver et d'été afin d'analyser le comportement du bâtiment face aux températures les plus élevées comme face aux plus basses. Toutes ces données doivent être explorées afin d'analyser avec précision l'existant, d'en révéler toutes les qualités et les potentialités.

c. Conservation, restauration, rénovation, réhabilitation ?

Ce type d'études constituent de toute évidence un préalable obligé pour qui s'intéresse à la conservation du patrimoine moderne. Mais de quoi parlons-nous : de conservation, de restauration, de rénovation, de réhabilitation ? La restauration vise à conserver l'objet architectural dans sa substance initiale, garantit la pérennité de l'œuvre avec ses composants d'origine et vise à les revaloriser. La méthode de restauration est ensuite différente selon les types de bâtiments et les techniques constructives. Elle doit s'adapter au cas par cas. Deux politiques de restauration se distinguent : celle de Viollet-le-Duc, qui vise à rétablir l'édifice dans un état complet, réinterprété, fidèle au style architectural de l'édifice, et celle des historiens comme John Ruskin qui privilégient de maintenir l'édifice au plus proche de son état existant, en entretenant les parties conservées, sans chercher nécessairement à les compléter. Dans tous les cas, la restauration se base sur une analyse scientifique de l'existant, une évaluation de son authenticité et des modifications éventuelles. La Charte de Venise, rédigée en 1964 à l'issue du II^e Congrès international des architectes et des techniciens des monuments historiques⁹³, se fera précisément l'écho de ces discussions passionnées. La Charte de Venise définit une doctrine des pratiques de conservation et de restauration et exige que ces interventions soient étayées scientifiquement et techniquement pour garantir la sauvegarde du patrimoine. La restauration y est définie comme : « une opération qui doit garder un caractère exceptionnel. Elle a pour but de conserver et de révéler les valeurs esthétiques et historiques du monument et se fonde sur le respect de la substance ancienne et de documents authentiques. Elle s'arrête là où commence l'hypothèse, sur le plan des reconstitutions conjecturales, tout travail de complément reconnu indispensable pour raisons esthétiques ou techniques relève de la composition architecturale et portera la marque de notre temps. La restauration sera toujours

93. ICOMOS, *Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites (Charte de Venise 1964)*, Venise, II^e Congrès international des architectes et techniciens des monuments historiques, 1964, 4 p.

précédée et accompagnée d'une étude archéologique et historique du monument ». Toujours selon la Charte de Venise, la conservation consiste à sauvegarder le monument dans ses dispositions d'origine, mais également les modifications qu'il a pu subir au fil du temps lorsque celles-ci présentent un intérêt et sont justifiées par l'évolution du bâtiment. La conservation et la restauration s'opposent fermement à la rénovation qui consiste à remettre à neuf certains composants de l'édifice sans forcément tenir compte de leur valeur patrimoniale et en privilégiant les besoins des occupants, les matériaux disponibles sur le marché et le respect des normes en vigueur. La réhabilitation s'inscrit dans un autre registre, en favorisant des interventions respectueuses des caractéristiques patrimoniales de l'édifice mais qui proposent des adaptations pour répondre aux enjeux contemporains. La réhabilitation d'un édifice peut conduire au remplacement de certains de ses composants mais veiller également à conserver les éléments à plus forte valeur patrimoniale. Elle s'accompagne également d'une analyse fine de l'existant.

La Charte de Venise a pour objectif de définir une doctrine patrimoniale à suivre pour toute intervention sur les monuments historiques et favorise le recours à la conservation et à la restauration. Au regard de ce constat, on peut s'interroger sur les méthodes mises en œuvre par exemple par Hervé Baptiste sur la Maison du Peuple de Clichy entre 1995 et 2005. En effet, si certaines parties ont été conservées et restaurées, comme les panneaux en tôles pliées des façades, en revanche, l'intervention sur les grands murs rideaux vitrés de la Maison du Peuple interroge. Composés initialement d'un verre extérieur armé, d'un rhodoïd ondulé intérieur et d'un store intermédiaire en toile, tous ces éléments n'ont pas été restitués par l'architecte. Le rhodoïd, déposé lors de précédents travaux, n'a pas été réinstallé, le verre armé a été remplacé par des doubles vitrages plus miroitant et seul le store en toile a été reposé à l'identique par l'entreprise qui était intervenue lors de la construction de la Maison du Peuple. Une telle perte de matérialité remet complètement en question l'authenticité de l'édifice. Or, il est utile de rappeler la définition de monument historique donnée par l'article 1 de la Charte de Venise : « La notion de monument historique comprend la création architecturale isolée aussi bien que le site urbain ou rural qui porte témoignage d'une civilisation particulière, d'une évolution significative ou d'un événement historique. Elle s'étend non seulement aux grandes créations mais aussi aux œuvres modestes qui ont acquis avec le temps une signification culturelle⁹⁴ ». Le

94. ICOMOS, *Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites (Charte de Venise 1964)*, Venise, II^e Congrès international des architectes et techniciens des monuments historiques, 1964, 4 p.

remplacement de la matière du mur-rideau, témoin d'une évolution significative des systèmes constructifs, du développement des techniques de construction de Prouvé, constitue donc une entorse aux principes de restauration initialement appliqués sur les monuments historiques. Il semble au demeurant que l'architecte ait été également confronté à l'impossibilité de trouver une filière industrielle susceptible de restituer les murs-rideaux en verre armé.

On peut alors s'interroger sur la capacité des façades légères à être sauvegardées dans leurs dispositions initiales. Quelle doctrine adopter ? Si, sur un monument historique de l'importance de la Maison du Peuple de Clichy, les architectes en chef des monuments historiques eux-mêmes doivent avoir recours à des méthodes invasives pour restaurer ou réhabiliter l'existant, que faire sur le patrimoine plus ordinaire ? En ce domaine, les méthodologies d'interventions sont encore très variables. Les architectes chargés de la réhabilitation de la Cité de Refuge ont refusé de suivre toute doctrine patrimoniale préexistante et décident de suivre leur propre méthode. Selon François Chatillon « il n'y a qu'un temps : le présent [...], la seule chance du patrimoine étant d'avoir une actualité⁹⁵ » avant d'évaluer la valeur patrimoniale de l'édifice avec les deux notions complémentaires que sont l'état d'origine du bâtiment et l'état d'authenticité actuelle. Cette évaluation double est d'autant plus utile pour une œuvre qui évolue beaucoup au fil du temps. François Chatillon et François Gruson se sont néanmoins accordés sur la légitimité de deux états majeurs : l'œuvre livrée en 1933 et l'œuvre rénovée par Le Corbusier et Jeanneret en 1952. L'approche de Gruson et Chatillon mêle restructuration, avec des créations architecturales pour les mises aux normes, restitution à l'identique de certaines parties de 1933 et 1952 – y compris d'éléments détruits et redécouverts durant le chantier – et interprétation lorsque ni archives, ni sondages ne permettent de répondre clairement à une question, comme c'est le cas pour la polychromie. Une telle méthodologie conduit finalement à un état qui n'a jamais existé. Concernant la façade, les architectes ont décidé de se baser sur l'état de 1952. Intellectuellement envisagée, la remise en place du pan de verre n'a pu être réalisée. La façade, dans son état actuel a été démontée et remplacée par des panneaux proches de ceux de 1952. Les menuiseries en bois ont été restituées en épaississant les montants et traverses afin d'intégrer des doubles vitrages et des éléments coupe-feu. Les panneaux reprennent la matérialité et les proportions d'origine mais ont été légèrement modifiés pour répondre aux contraintes climatiques et normatives. La polychromie

95. Ragot (Gilles), Chadoin (Olivier), *La cité de refuge, Le Corbusier et Pierre Jeanneret, L'usine à guérir*, Paris, Editions du patrimoine, Centre des Monuments Nationaux, 2016, 243 p.

a été également réinterprétée. Les architectes restituent une façade dont l'aspect se rapproche de l'état de 1952, tout en étant différent. L'ensemble des composants étant remplacés, ils semblent juste de qualifier cette intervention de « rénovation ». Néanmoins, la recherche de l'aspect originel interroge et place le projet dans un entre-deux : cette façade n'a jamais existé mais reprend les principes architecturaux initiés par ses concepteurs.

L'équipe du TSAM élabore une méthodologie complètement différente pour la cité du Lignon et propose quatre variantes de solutions à la fin de ses études. Toutes suivent les préconisations du plan de site et sont hiérarchisées en fonction de leurs conséquences sur la matérialité de l'édifice et évaluées au regard des améliorations proposées. Hormis la variante D, qui prévoit le remplacement de la façade à l'identique, les variantes A, B et C conservent la matérialité d'origine. La variante A consiste à réaliser l'entretien des façades existantes, la variante B intègre une remise en état et une amélioration thermique de l'enveloppe en conservant l'ensemble des composants de la façade d'origine et en ajoutant un doublage intérieur. La variante C prévoit une intervention plus importante avec un curage de l'isolant d'origine pour le remplacer par un nouvel isolant plus performant. Elle comprend initialement le remplacement des menuiseries d'origine par des menuiseries plus performantes. Mais cette dernière hypothèse, qui modifiait trop la matérialité originelle des façades et l'aspect de l'enveloppe, a été abandonnée au profit de l'ajout d'un survitrage posé par parclose. La variante D fut également abandonnée, bien qu'elle remplaçait scrupuleusement la matérialité d'origine à l'identique, elle engendrait une perte de matière trop importante d'un point de vue patrimonial, économique et environnemental. Les variantes B et C sont donc privilégiées. Les vitrages émaillés teintés ont été nettoyés ainsi que les profils en aluminium. Un traitement anti-corrosion a également été prévu, permettant de prolonger la durée de vie des éléments de l'enveloppe. L'intégralité de la couche extérieure du mur-rideau a été ainsi conservée, les modifications s'effectuant dans l'épaisseur du mur ou à l'intérieur des logements. Il semble approprié de définir cette intervention comme une réhabilitation puisqu'elle consiste à restaurer certaines parties de l'enveloppe et à leur adjoindre de nouveaux éléments permettant d'améliorer leurs capacités. L'enveloppe s'en voit alors modifiée sans pour autant détruire la matérialité et les composants d'origine des murs-rideaux et en respectant les principes fondamentaux de la Charte de Venise : « Article 12 : Les éléments destinés à remplacer les parties manquantes doivent s'intégrer harmonieusement à l'ensemble, tout en se distinguant des parties originales, afin que la restauration ne falsifie pas le document d'art et d'histoire. Article 13 : Les adjonctions ne peuvent être tolérées que pour

autant qu'elles respectent toutes les parties intéressantes de l'édifice, son cadre traditionnel, l'équilibre de sa composition et ses relations avec le milieu environnant⁹⁶ ». L'approche mixte de réhabilitation/restauration des façades légères engagées par le TSAM semble être actuellement la plus pertinente et se révèle particulièrement adaptée aux façades légères. Autant dire que le choix de la doctrine d'intervention est capitale pour assurer l'équilibre entre préservation de la valeur patrimoniale de la façade légère et amélioration du confort global des occupants.

d. Le confort global

La notion de confort global est encore plus importante dans les logements que dans les bâtiments tertiaires ou publiques. Elle ne se résume pas au confort thermique mais intègre le confort acoustique, le confort d'usage, visuel et lumineux. Multisensoriel, le confort global relève d'une certaine subjectivité et demeure difficile à appréhender. Il s'agit néanmoins d'un critère essentiel pour la réhabilitation des immeubles de logements bien que la notion de confort thermique soit majoritairement abordée dans les projets de réhabilitations récents. Cette approche exclusive s'explique par l'importance que revêt l'amélioration thermique du parc de logements existants dans la démarche environnementale contemporaine. Il convient néanmoins de rappeler que le confort ne se résume pas à la thermique qui doit être croisée avec l'acoustique. Lier performances acoustiques et confort thermique n'est pas toujours chose aisée. Les entrées d'air de ventilation naturelle sont souvent sources de ponts phoniques. De même, les conduits Shunt, avec aspiration dans tous les appartements, non isolés, sont la source de transmission de bruits d'un appartement à un autre. À l'inverse, la surisolation thermique des façades peut rendre l'édifice parfaitement hermétique aux bruits extérieurs mais renforcer l'écoute des bruits intérieurs et ainsi déséquilibrer les ambiances. Il est donc nécessaire d'employer les méthodes permettant d'allier isolations thermique et acoustique tout en garantissant le confort des occupants. L'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) définit des cahiers des charges d'aide à la décision à destination des propriétaires pour la réalisation d'audits et de réhabilitations mixtes acoustique et thermique⁹⁷. Suivre ces préconisations peut permettre aux propriétaires d'obtenir des aides financières pour la réalisation de leurs diagnostics et projets mais aussi servir de base pour

96. ICOMOS, *Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites (Charte de Venise 1964)*, Venise, II^e Congrès international des architectes et techniciens des monuments historiques, 1964, 4 p.

97. Voir annexe 7, le guide qui a servi à la définition du cahier des charges des diagnostics pour l'immeuble Les Cèdres.

la définition de méthodologies d'interventions. Le CATED (Centre d'assistance technique de documentation du bâtiment) produit également des guides, cette fois-ci à destination des professionnels du bâtiment. Le premier, intitulé « Réhabilitation des façades : ravalements, menuiseries, isolation thermique et acoustique », s'intéresse particulièrement aux façades qui ne possèdent qu'une fonction d'étanchéité à l'air et à l'eau et possède une faible isolation thermique et acoustique⁹⁸. Ce dernier document permet d'identifier les moyens de réhabiliter ces façades en proposant des solutions de restauration des éventuels désordres, en changeant les menuiseries et en ajoutant de l'isolant, principalement par l'extérieur. En revanche, les méthodologies présentées ne sont pas adaptées à l'intervention sur un édifice à forte valeur patrimoniale.

Le confort global n'est que peu abordé dans les différents projets emblématiques de ces dernières années. Tous se réfèrent aux normes sans nécessairement prendre en compte les différents aspects du confort qui demeure intimement lié à celui qui le perçoit, c'est-à-dire l'occupant. Souvent oubliés, les habitants sont pourtant les premiers concernés par les ambiances de leur logement et les conditions de confort qui leur sont offertes. Les réhabilitations sur les façades légères sont souvent motivées par des questions énergétiques et environnementales de mises aux normes. Mais qu'en est-il du ressenti des occupants ? Est-il nécessaire d'atteindre la perfection normative lorsque l'on intervient sur un existant ? Est-il préférable de fixer des objectifs d'amélioration du confort des habitants selon leurs besoins réels ? L'équipe de Franz Graf interroge ce point dans ses travaux sur la cité du Lignon, reconnaissant qu'il est souvent difficile d'atteindre les normes exigées en Suisse lors d'une intervention sur l'existant et qu'il ne faut pas forcément en faire un but. Néanmoins, la question du niveau de performance à atteindre, ciblé sur le ressenti des habitants, demeure peu abordée.

Accompagnée par les chercheurs du laboratoire AAU-CRESSON, experts sur le sujet des ambiances, cette recherche vise précisément à reconsidérer la place de l'occupant dans les critères déterminant pour la réhabilitation et entend également intégrer la notion de confort global, et non plus uniquement thermique, dans les politiques d'intervention. Bien sûr, la notion de confort est abordée dans de nombreuses recherches comme dans l'ouvrage de référence de Reyner Banham sur la question du confort thermique⁹⁹. Franz Graf et Giulia Marino se sont

98. CATED, *Réhabilitation des façades : ravalements, menuiseries, isolation thermique et acoustique*, Elancourt, Editions Ginger, 2011, 151 p.

99. Banham (Reyner), *The Architecture of the well-tempered environment*, Londres, Architectural Press, 1969, 320 p.

également intéressés à la question appliquée à l'architecture moderne dans leur ouvrage *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XX^e siècle*¹⁰⁰ et même le CIMUR s'interroge sur les notions de confort thermique et acoustique dans les édifices dotés de façades légères dès 1965¹⁰¹. En revanche, le confort des habitants n'est jamais envisagé comme un moyen de définir les performances que doit atteindre une façade légère réhabilitée. C'est le parti choisi pour cette recherche sur les façades de l'immeuble Les Cèdres. Pour ce faire, les occupants ont été pleinement associés aux réflexions et ont été régulièrement interrogés quant à leurs ressentis et leurs besoins. Un diagnostic d'ambiances vécues a été réalisé permettant de synthétiser ces données. Il est essentiel de ne pas limiter les critères aux simples réglementations lors d'une réhabilitation pour améliorer le confort des logements, ces mêmes critères doivent être évalués à l'aune des besoins des habitants et des potentialités de l'existant.

e. Les normes, des dispositifs contraignants à intégrer

La transition énergétique et l'urgence climatique conduisent à la mise en place de normes toujours plus exigeantes. Le secteur du bâtiment représentant près de la moitié des consommations d'énergie françaises, construire durable devient une priorité. Les travaux de la Chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture « Habitat du Futur » s'orientent en ce sens. La réglementation thermique peut s'avérer complexe à mettre en œuvre dans le cas d'un immeuble existant puisque les normes fixent un seuil de consommation d'énergie maximum à ne pas dépasser. Le parc de logement existant consomme en moyenne entre 240 et 260 kWhep/m².an, les normes thermiques en rénovation exigent de les réduire environ de moitié. Malgré leur caractère contraignant, l'intervention du TSAM sur la cité du Lignon montre qu'il est possible de concilier conservation de la valeur patrimoniale d'un édifice et respect des normes thermiques, les normes suisses étant d'ailleurs plus contraignantes que les normes françaises. En raison de son échelle importante, la cité du Lignon représentait une forte potentialité d'amélioration des performances énergétiques et de réduction des émissions de gaz à effets de serre pour le canton de Genève, d'où sa politique volontariste. Face à ces normes draconiennes, les bâtiments existants souffrent de stratégies drastiques d'amélioration sans réelle évaluation de leurs performances originelles. Le patrimoine du XX^e siècle doit être considéré comme une ressource à améliorer par l'adjonction d'éléments et de

100. Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XX^e siècle : connaissance et stratégie de sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2016, 535 p.

101. CIMUR, *Techniques françaises des façades légères, Murs-rideaux et panneaux de façade*, Paris, Editions Eyrolles, 1965, 486 p.

matériaux permettant de respecter les normes et le patrimoine. L'une des problématiques courantes est l'ajout de double vitrage qui exige régulièrement l'épaississement des profils des menuiseries. Pour conserver les menuiseries d'origine de la cité de Lignon, le TSAM a mené des recherches sur les vitrages HPI – haute performance isolante – pouvant être installés grâce à l'ajout de simples parcloles. Pour conserver une épaisseur raisonnable, les chercheurs usent de matériaux isolants innovants comme les aérogels et isolants sous-vides. Leurs hypothèses leur permettent d'atteindre la norme SIA 380/1 rénovation. Cependant, ces matériaux ultra-performants sont souvent plus coûteux et peu respectueux de l'environnement avec un bilan énergétique peu satisfaisant. Or, l'amélioration environnementale du secteur de la construction ne se limite pas au seul respect des normes thermiques, mais doit également s'étendre à des conceptions écoresponsables. L'utilisation de matériaux recyclés ou biosourcés doit être désormais considérée comme une priorité à intégrer dès le début des études. La réhabilitation, au même titre que la construction neuve, doit s'inscrire dans une nouvelle culture de conception environnementale.

Les normes thermiques ne sont pas les seules réglementations à intégrer lors d'une remise à niveau d'un édifice existant. La première rénovation de la Maison du Peuple de Clichy illustre la difficulté de concilier conservation du patrimoine et mise aux normes incendies, obligeant l'architecte à recouvrir les structures métalliques d'une peinture ignifuge pâteuse, modifiant considérablement leur aspect. Lors de la restitution du grand balcon en façade de l'édifice, les normes sur les établissements recevant du public ont obligé le renfort et la modification des structures d'origine. À Clichy, Prouvé avait mis en œuvre un système de plafonds chauffants radiants couplé à des souffleries d'air chaud, particulièrement inventifs pour l'époque. Certains éléments ont été conservés pour des raisons « archéologiques », mais le système, pourtant performant, ne peut être remis en fonction. Un même constat s'impose à propos de la deuxième rénovation de la Cité de Refuge réalisée par Ljubomir Nikolic de 1986 à 1991 pour s'adapter aux nouveaux DTU (documents techniques unifiés) auxquels un décret de 1984 donne un statut normatif. Ces travaux ont eu d'importantes conséquences sur la valeur de l'œuvre : les menuiseries bois ont été remplacées par des menuiseries en aluminium, les ouvrants par des coulissants, les allèges maçonnées ont été capotées de tôles laquées sur la rue Cantagrel, la rampe d'accès a été reconstruite avec une nouvelle pente, les garde-corps ont été tous remplacés et rehaussés. Enfin les épaisseurs des menuiseries ont été multipliées par 1,5. Les lourdes transformations lors de la mise aux normes de certains édifices résultent souvent d'un

manque de considération de leur valeur patrimoniale. À la Cité de Refuge, les architectes ont recherché des compromis entre les normes et la préservation du patrimoine et des usages en demandant des dérogations pour trouver des solutions ayant le moins d'incidences. Les normes étant essentielles pour répondre aux enjeux contemporains, des compromis et un équilibre général doivent être trouvés.

f. Le prototype, garant d'un projet réussi ?

Trouver ce juste équilibre relève pour beaucoup de l'expérimentation, du test, du renouvellement de plusieurs tentatives dont les curseurs diffèrent entre des critères déterminants tels que l'économie, la valeur architecturale, la valeur patrimoniale, l'amélioration du confort, l'amélioration énergétique et environnementale du projet. Ces curseurs peuvent être placés selon des bases théoriques de calculs, de dessins ou autres représentations. Néanmoins, les théories se montrent parfois insuffisantes lorsque l'on fait face à un objet particulier comme les façades légères. Il reste difficile de valider la viabilité technique des solutions envisagées tant la connaissance de ces systèmes constructifs reste insuffisante. Sans l'assurance de la faisabilité technique des solutions, difficile d'envisager leur coût réel, et il est également complexe d'appréhender la méthode de mise en œuvre des solutions et l'organisation du chantier. C'est ce qu'a bien compris l'EPAURIF, maître d'ouvrage de la Maison des Sciences de l'Homme, dont le projet a fait l'objet d'un chantier-test à l'issue des études préalables de diagnostics et en amont de l'attribution de la mission de maîtrise d'œuvre. Le contexte amianté du bâtiment et la particularité de ses enveloppes ont incité le maître d'ouvrage à réaliser un chantier-test du démontage des panneaux, traitement et remontage de ceux-ci selon deux scénarii imaginés par l'équipe de Pierre-Antoine Gatier. Le premier prévoyait un démontage de la façade par bloc et le second un démontage élément par élément. Le test révèle une facilité supplémentaire à réaliser le démontage par bloc qui nécessite moins d'intervention sur le chantier et s'avère, de fait, moins destructif que le démontage par élément. La réalisation du chantier-test a également permis à l'équipe de définir l'organisation du chantier et la méthode de mise en œuvre, de minimiser l'intervention dans le but de conserver au maximum les panneaux d'origine et de fiabiliser le coût des travaux pour la maîtrise d'ouvrage. La réduction des interventions et la définition précise de la méthode ont permis de gagner en efficacité sur le chantier et d'en réduire les coûts. Sur ce type de façade systématique et répétitive, la tenue d'un chantier expérimental sur un ou deux panneaux permet de définir un process valable pour l'ensemble de l'enveloppe et d'avoir ainsi une définition plus précise des travaux à mener. Pour élaborer

une telle opération, hors du commun, le choix des entreprises et des bureaux d'études était capital. Sur la Maison des Sciences de l'Homme, le chantier-test, l'analyse des résultats obtenus et la rédaction du cahier des charges pour la mise en œuvre du projet ont demandé cinq mois. En ajoutant les six mois d'études préalables, l'opération se déroule en moins d'un an et permet de définir un projet véritablement adapté aux besoins de l'immeuble et du maître d'ouvrage.

Face à ces constats, pourquoi n'expérimente-t-on pas davantage ? Pour quelles raisons ces démarches restent-elles aussi isolées ? Il semble que le manque de temps alloué à l'élaboration des projets de réhabilitation constitue l'argument prépondérant, associé à la crainte d'un coût supplémentaire. Pourtant, comme le démontre l'opération de la Maison des Sciences de l'Homme et les travaux du TSAM, cet investissement et ce temps passé permettent de réduire en réalité le coût et le temps de chantier de l'opération et semblent être les seuls garants de la mise en œuvre d'une intervention réellement adaptée à l'édifice. Les propositions sont conçues sur mesure, les solutions constructives standards n'étant pas adaptées d'un point de vue patrimonial. Ces solutions sur mesure exigent cependant une expérimentation, sans cela, leur efficacité demeure difficile à évaluer. Au Lignon, deux prototypes ont été réalisés dans deux appartements de l'immeuble type, un de la variante B (doublage intérieur) et un de la variante C (remplacement de l'isolant). Cette dernière opération a permis de comparer leur mise en œuvre *in situ*, puis de tester leur comportement thermique en situation réelle. Les tests effectués indiquent des améliorations thermiques en conditions réelles supérieures à celles estimées par le calcul. La comparaison entre les mesures réalisées sur les prototypes et les simulations effectuées lors de la conception des variantes a également permis de confirmer ou d'affiner leurs performances. La comparaison entre les différents prototypes permet également de les classer selon les différents critères et de proposer un catalogue de solutions adaptées aux propriétaires. Celui-ci est élaboré sous forme de tableaux comparatifs montrant l'équilibre entre les performances réelles des variantes proposées et leur coût d'investissement. Ce catalogue laisse ensuite le choix aux habitants d'opter pour la solution qui répond le mieux à leurs attentes. L'ensemble des solutions proposées ne modifiant aucunement l'aspect extérieur de la façade, le projet peut être entièrement réalisé « à la carte ». L'élaboration des prototypes valide de fait l'efficacité des solutions face aux véritables contraintes climatiques, énergétiques, d'usages et d'occupations auxquelles est soumise la cité du Lignon. L'évaluation des performances des prototypes après leur installation est donc essentielle.

Il semble également que les prototypes puissent constituer de véritables outils de conception

permettant à tous les acteurs d'un projet de se l'approprier plus facilement en s'appuyant sur des éléments construits et concrets plutôt que sur des projections et simulations. L'acte de faire permet aux concepteurs de se rendre compte de nombreux aspects du projet et Prouvé lui-même partageait ce sentiment. Des prototypes installés sur site, à proximité des habitants, peuvent aussi leur permettre de se les approprier, de tester leur manipulation et de se rendre compte de l'incidence des transformations envisagées sur leur immeuble et leur logement. Lors du travail en site occupé, la réalisation de prototypes à l'échelle 1 : 1 permet d'expérimenter la manière de construire les solutions imaginées, de connaître avec exactitude la durée de l'intervention dans un logement et de valider ou non le process. C'est un atout considérable pour la conception qui permet de valider, d'écarter, ou d'optimiser certaines hypothèses, de valider le protocole de travaux et de connaître le coût de l'opération bien plus finement. La réalisation de telles expérimentations restant exceptionnelle, comment généraliser le procédé ? Comment démontrer aux investisseurs et aux concepteurs la pertinence de ces expérimentations ? Il semble qu'à l'heure actuelle, seule une contrainte réglementaire venant d'une institution qui rendrait obligatoire la mise en œuvre de prototypes et leur évaluation avant intervention, soit envisageable. L'obligation pourrait être portée par une loi concernant les interventions sur les monuments historiques ou édifices labellisés « Architecture contemporaine remarquable ». Dans l'attente, il semble pertinent de mener un travail de sensibilisation auprès des maîtres d'ouvrages, concepteurs, architectes, ingénieurs et autres acteurs du projet, pour que la mise en œuvre de prototypes puisse être une exigence intégrée dans les appels d'offres, contrats, CCTP (cahier des clauses techniques particulières) et autres documents officiels.

g. L'économie du projet de réhabilitation

Nous l'avons vu, le budget est l'un des principaux freins à la réhabilitation, ou tout du moins le critère fondamental qui conditionne les choix et la réalisation des travaux. Lors de la première rénovation de la Maison du Peuple de Clichy, Hervé Baptiste ne peut que réaliser une intervention partielle, ne disposant pas d'un budget suffisant pour remettre le plancher amovible en marche, ni pour le libérer de la chappe de ciment dans laquelle il est emprisonné, et moins encore pour mener à bien une restauration complète de l'édifice qui serait trop coûteuse pour respecter les normes actuelles. Le respect des normes est privilégié puisqu'obligatoire, bien que des dérogations auraient certainement pu être obtenues au regard de la valeur de l'objet architectural. Sur ce dernier chantier, l'architecte a souligné la nécessité de réaliser des compromis pour entrer dans l'enveloppe budgétaire financée par l'État et la Ville de

Clichy. L'ordre des priorités est donné, le budget est une condition à respecter, les normes des objectifs légaux à atteindre et la mise en valeur du patrimoine est reléguée au second plan. Le même ordre est donné dans l'attribution des subventions. Peu de financements sont attribués sur la base du respect du patrimoine, tandis que le respect des normes environnementales conditionne l'attribution de nombreuses aides provenant de divers organismes. Sur la Cité de Refuge, François Chatillon et François Gruson ont scrupuleusement respecté les normes concernant l'accueil des sans-abris au point de recloisonner les dortoirs de sorte à ne perdre aucun lit voire d'en augmenter le nombre, dont dépend le taux de subventions. Pour François Gruson, le projet social de la Cité de Refuge doit financer le projet patrimonial et il émet une hypothèse selon laquelle les interventions permettant d'obtenir des sources de financement doivent être réalisées en priorité pour permettre de financer la restauration du patrimoine moderne.

Au Lignon, la question économique est traitée par la mise en place de phasages dans le temps, autorisant plus de souplesse pour les copropriétaires. Chaque proposition de solution est évaluée selon sa durée de vie et la rentabilité de l'opération. La variante A (entretien et maintenance) a une durée de vie de six à dix ans et un coût de 331 000 francs suisses par allée. La variante B a une durée de vie de dix ou quinze ans, la variante C de vingt à vingt-cinq ans et leurs coûts oscillent entre 780 000 francs et 1 052 000 francs, selon les matériaux isolants employés. La variante D a une durée de vie de vingt-cinq à trente ans, mais un coût élevé de 1 645 000 francs par allée, auxquels s'ajoutent 120 000 francs d'installation de chantier. L'évaluation de ces coûts entraînent l'élimination de la variante D, jugée également peu satisfaisante d'un point de vue patrimonial. Pour les autres variantes, le choix des matériaux est déterminé par les différents propriétaires au regard du coût d'investissement, de la perte de surface intérieure due au doublage et des gains énergétiques. En effet, l'économie est un élément essentiel dans la prise de décision mais ne peut se résumer à un coût d'investissement. Celui-ci doit néanmoins rester raisonnable pour permettre aux propriétaires d'investir et d'avoir un retour rapide permettant de rentabiliser l'opération, d'autant plus dans le cas d'une copropriété où tous les habitants ne disposent pas des mêmes capacités d'investissement. En plus du coût d'investissement de départ, l'économie du projet comprend le retour sur cet investissement intégrant la plus-value sur le prix de vente de l'appartement une fois les travaux effectués, les économies sur les factures d'énergies, etc. La réhabilitation d'un immeuble de logements doté de façades légères s'inscrit dans un processus économique global et complexe.

L'ajout d'un doublage isolant induit nécessairement une réduction de la surface intérieure des logements. Bien que l'objectif soit de minimiser cette perte de surface, celle-ci doit être évaluée au regard des performances thermiques et acoustiques à atteindre. On peut alors s'interroger sur la potentielle revalorisation d'un bien grâce à sa réhabilitation et à ce doublage. Le confort est-il un vecteur d'attractivité déterminant pour la vente d'un bien ? L'amélioration thermique, acoustique et énergétique peut-elle permettre la revalorisation du logement et plus largement, du patrimoine moderne ? Pour tenir compte de cette complexité, les projets de réhabilitation doivent s'appuyer sur des études économiques menées conjointement par des agents immobiliers connaisseurs du marché et des économistes de la construction. Une approche économique globale est le seul moyen d'obtenir des projets réalisables pour les copropriétaires qui peuvent ainsi être convaincus d'investir dans des travaux de cette nature.

h. Vers une approche globale

Comme pour l'économie, la méthode de réhabilitation ne doit pas se limiter à un axe unique de développement, mais prendre en compte la globalité des enjeux, des critères, des objectifs et des interventions permettant de les atteindre. Les travaux de Pierre-Antoine Gatier sur la Maison des Sciences de l'Homme démontrent la pertinence de mener des interventions d'amélioration conjointes sur l'enveloppe pour répondre aux besoins de désamiantage et d'amélioration thermique et acoustique à moindre frais. Les travaux réalisés au coup par coup reviennent la plupart du temps plus chers que les mêmes interventions réalisées simultanément. De plus, les travaux globaux garantissent une cohérence d'ensemble *a contrario* des interventions ponctuelles et permettent d'obtenir des subventions supérieures. Durant une cinquantaine d'années, depuis la rénovation conduite par Le Corbusier et Pierre Jeanneret, jusqu'en 2001, tous les travaux sur la Cité de Refuge ont été réalisés en fonction d'opportunités afin d'adapter l'immeuble aux nouveaux besoins des usagers. Ce n'est qu'en 2001 que l'Armée de Salut lance un appel à candidature pour une mission de rénovation globale de la cité, incluant la mise aux normes, l'amélioration des conditions d'accueil des occupants et la prise en compte du caractère patrimonial de l'édifice. Le projet de Gruson et Chatillon définit une nouvelle méthode d'organisation du travail pour conjuguer projet social, architectural et patrimonial. Selon Gilles Ragot et Olivier Chadoin, les mots d'ordre d'une telle rénovation sont le compromis et la négociation, entre les différents partenaires, entre les différents enjeux (patrimoniaux,

architecturaux, sociaux, normatifs, économiques), et entre les différentes sensibilités¹⁰². D'après Franz Graf, « le patrimoine de la seconde moitié du XX^e siècle se révèle particulièrement fragile face aux nouvelles exigences des législations [...] en matière de performances énergétique. La cohabitation des aspects patrimoniaux, des contraintes économiques et des enjeux énergétiques demande donc une stratégie d'intervention globale¹⁰³ ». Une évaluation minutieuse doit être réalisée entre les différents enjeux à la faveur d'une étude analytique, systématique et multicritères au moyen de tableaux synthétiques à trois entrées : les interventions, l'évaluation des coûts et les besoins énergétiques. Cette analyse multicritères, conduite sur la cité du Lignon a permis de définir des solutions adaptées pour répondre aux normes thermiques et de définir de plusieurs modèles d'intervention dont la faisabilité technique est ensuite testée à travers la mise en œuvre de prototypes. L'étude du TSAM a duré trois ans, de 2008 à 2011, et a permis de définir les lignes guides d'une intervention respectueuse des qualités architecturales de l'ensemble et de proposer un cahier des charges, annexé au plan de site, véritable outil d'aide à la décision pour les propriétaires. Les propositions figurant dans ce cahier des charges ont été validées au préalable par le canton de Genève, permettant aux propriétaires qui souhaitent les mettre en œuvre de bénéficier de procédures administratives simplifiées. La vision synthétique de l'équipe du TSAM, entre patrimoine, économie, énergie, ne cherche pas à trouver un compromis, mais plutôt un équilibre entre ces notions. Plusieurs acteurs sont réunis, des chercheurs universitaires, des propriétaires, les services des administrations publiques cantonales et communales et des entreprises du bâtiment. Pour atteindre les objectifs normatifs, ils n'agissent pas uniquement sur les façades légères du Lignon, mais aussi sur les coursives, les sous-faces de plancher, la toiture, le système de chauffage, l'étanchéité dans l'objectif d'améliorer les performances globales des bâtiments. Les diagnostics démontrent une situation moins catastrophique qu'il n'y paraît et surtout facilement améliorabile. Après trois années de recherches, l'amélioration des consommations de chauffage possible est de 70 %. Les approches globales, pluridisciplinaires, multicritères, allant du diagnostic exhaustif au prototype expérimental, semblent être les seuls process permettant d'obtenir des résultats satisfaisants. Il n'en reste pas moins difficile de mettre en œuvre des approches globales dans le cas des copropriétés. La multiplication des décisionnaires et la répartition des tantièmes engendrent un système de prise de décisions

102. Ragot (Gilles), Chadoin (Olivier), *La cité de refuge, Le Corbusier et Pierre Jeanneret, L'usine à guérir*, Paris, Editions du patrimoine, Centre des Monuments Nationaux, 2016, 243 p.

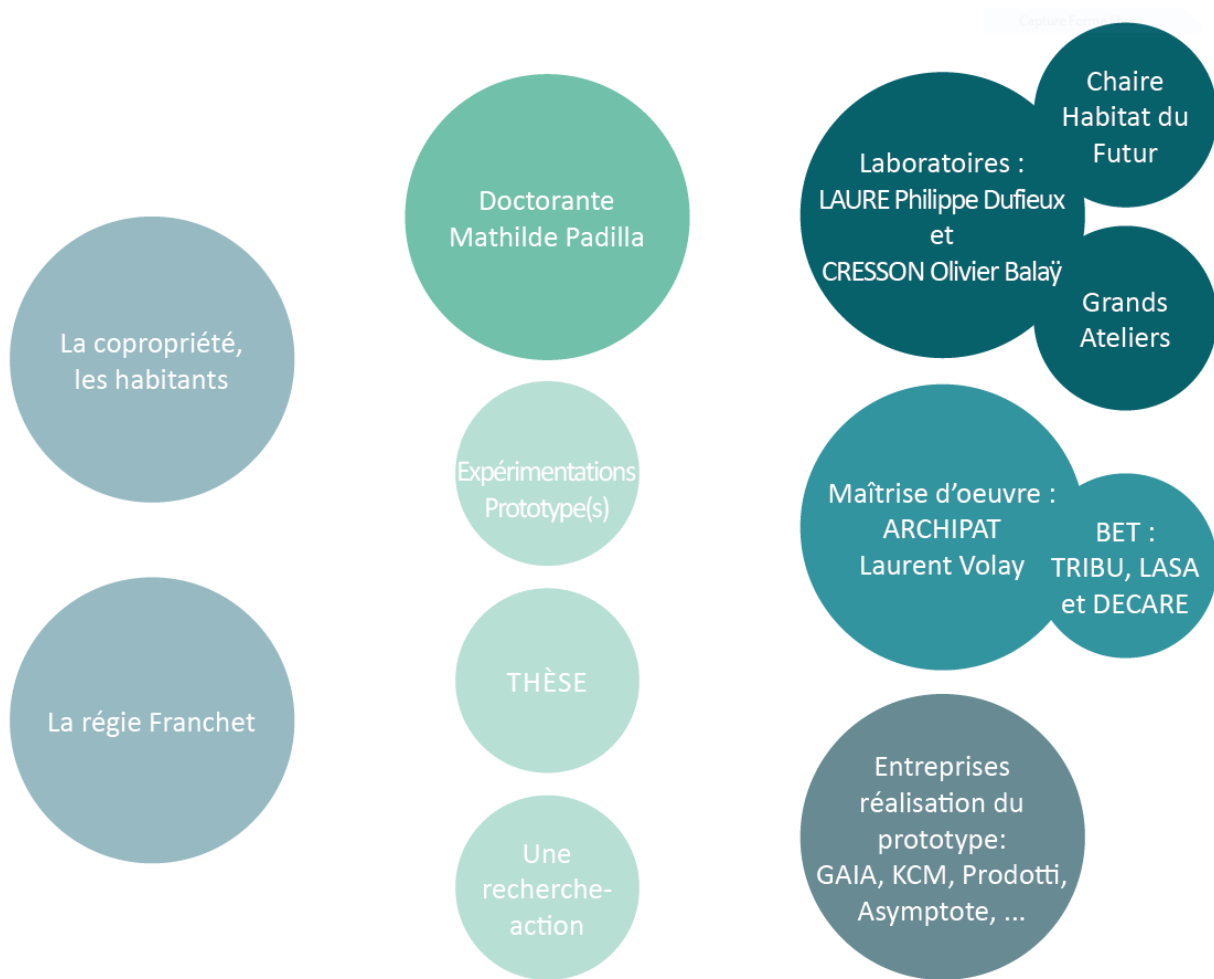
103. Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. « La cité du Lignon 1963-1971, étude architecturale et stratégies d'intervention », in *Revue patrimoine et architecture, cahier hors-série*, Lausanne, Infolio, 1/2012 (réédition 9/2013), 160 p.

complexe. Celles-ci doivent être votées en assemblée générale, conformément au règlement de la copropriété, lorsqu'elles concernent les parties communes, y compris les façades. Les assemblées générales n'étant réunies généralement qu'une fois l'an, les procédures sont lentes et laborieuses. Les interventions réalisées à l'intérieur d'un logement, qui n'affectent aucunement les parties communes, relèvent du seul propriétaire concerné. Il apparaît donc assez complexe de réaliser une réhabilitation thermique globale et uniforme d'un édifice à forte valeur patrimoniale nécessitant un doublage isolant par l'intérieur. À cela s'ajoutent les intérêts personnels qui sont fréquemment débattus lors des assemblées générales et les différences de revenus qui induisent des désaccords dans la définition des travaux à réaliser et mènent à des décisions partielles, déconnectées ou minimales. Ce contexte rend difficile l'approche globale d'une réhabilitation, mais pas insurmontable. Travailler à la réhabilitation d'un édifice en copropriété nécessite un lourd effort de communication, médiation et pédagogie.

Les copropriétaires doivent être intégrés dès le départ aux réflexions portées par le projet pour qu'ils puissent se l'approprier et mesurer l'ampleur des enjeux. Ces efforts sont au service de l'amélioration de leurs conditions de vie et de la valorisation de l'architecture et du patrimoine moderne. Comme l'écrit Franz Graf, ces édifices nécessitent une « innovation dans la sauvegarde [de leur] patrimoine pour sauvegarder [leur] innovation architecturale et technologique ». C'est ce que cette recherche tente de faire en proposant une démarche innovante, globale et expérimentale pour la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XX^e siècle.

Partie 2 : La formation d'une équipe pluridisciplinaire

Ces constats effectués, seule une équipe pluridisciplinaire mobilisant un ensemble d'acteurs du milieu de la construction et les usagers de l'immeuble semble pouvoir répondre au défi d'adaptation du patrimoine du XX^e siècle aux exigences contemporaines. L'immeuble Les Cèdres servira de support démonstrateur à cette recherche qui s'adosse ainsi à la pratique. Après une soixantaine d'années sans entretien adapté, les façades légères de l'immeuble lyonnais nécessitent une restauration pour garantir leur pérennité. De plus, les habitants font face à des problématiques de confort d'été grandissantes en partie causées par le réchauffement climatique et une exposition plein sud. En hiver, le système de distribution de chauffage, dans ses dispositions actuelles, ne permet pas de satisfaire les situations diverses entre des premiers niveaux ombragés par la végétation et des niveaux supérieurs bénéficiant



d'importants apports solaires. De plus, le manque d'isolation de la façade entraîne des consommations importantes de chauffage qui ne sont plus en phase avec les besoins évidents de réduction des consommations en énergies fossiles. Les copropriétaires de l'immeuble, aux moyens modestes, rencontrent des difficultés pour engager des travaux de réhabilitation.

Le premier objectif est de composer un « atelier » capable de répondre aux différentes problématiques soulevées, formé autour d'une équipe de recherche, qui s'est vue étoffée d'une équipe de maîtrise d'œuvre et d'entreprises. Ce travail ne pouvant être mené sans les usagers de l'immeuble, les habitants se sont réunis en association pour suivre le projet, guidés par leur syndic de copropriété. La recherche atteignant, au fur et à mesure de ses avancées, des niveaux de complexité toujours plus grands, un conseil scientifique accompagne l'équipe. Enfin, l'économie du projet étant l'un des enjeux majeurs de cette recherche, un économiste de la construction a été également intégré à l'équipe.

1 – L'équipe de recherche

Ce travail de thèse associe une architecte (Mathilde Padilla) au sein d'une agence d'architectes du patrimoine (archipat) dans le cadre d'un contrat CIFRE dont le tutorat est assuré par Laurent Volay¹⁰⁴. Ce travail s'inscrit dans une démarche pluridisciplinaire revendiquée, concrétisée par son intégration au sein de la Chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture « Habitat du Futur », l'un de ses objectifs est en effet de rapprocher le milieu de la recherche de celui de la pratique et de la réalisation. La convention, signée entre archipat, les laboratoires EVS-LAURE et AAU-CRESSON, l'ENSAL, l'ENSAG et la Chaire constitue une première dans le domaine de la recherche en architecture à l'échelle de la région Auvergne-Rhône-Alpes. L'équipe ainsi formée se charge du pilotage et du suivi de la thèse ainsi que du projet démonstrateur et assure la coordination de l'ensemble des intervenants. Mathilde Padilla est chargée de l'élaboration des recherches et du projet architectural. Pour chacune de ses missions, elle sollicite les membres de l'équipe selon les compétences nécessaires et assure la coordination des différents acteurs, les relations avec les copropriétaires, le syndic, les entreprises et partenaires. Son rôle s'étend à la diffusion des productions de la recherche

104. Laurent Volay, architecte du patrimoine et co-gérant de l'agence archipat, est tuteur de la thèse. L'intérêt mutuel porté sur les sujets de la réhabilitation des façades légères et de la recherche appliquée à un projet démonstrateur sur un immeuble à forte valeur patrimoniale, a permis de bâtir une belle collaboration. Celle-ci s'est concrétisée via le dispositif CIFRE – Convention Industrielle de Formation par la Recherche – créé et géré par l'ANRT – Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie – et permettant aux doctorants d'être accueillis et encadrés au sein d'une entreprise.

auprès d'un public élargi dans un objectif de sensibilisation à la conservation des façades légères et à leur potentiel d'adaptation. L'objectif majeur est de dégager des propositions adaptées aux problématiques soulevées et aux besoins de la copropriété. L'équipe de recherche constituée, de nombreuses compétences nécessaires au bon déroulement des phases d'études et d'expérimentations à venir doivent être rassemblées.

2 – L'équipe de maîtrise d'œuvre

L'appui de la recherche sur un projet démonstrateur nécessite la mobilisation d'une équipe de maîtrise d'œuvre. En tant qu'architecte de l'agence archipat, Mathilde Padilla a réalisé les diagnostics architecturaux, les relevés, la conception et le suivi de chantier, accompagnée par Laurent Volay. La complexité, quasi-mécanique, des panneaux de façades conçus par Prouvé a nécessité l'avis de techniciens et de spécialistes afin d'en comprendre toute l'intelligence constructive. Un ingénieur spécialisé en structure métallique, René Hugues, dirigeant du BET (bureau d'études techniques) DECARE intègre très tôt l'équipe pour apporter son expertise sur les panneaux en aluminium et structure acier de l'immeuble Les Cèdres. Il participe au relevé complet des panneaux ainsi qu'à différents démontages partiels pour observations et accompagne Mathilde Padilla dans l'élaboration du diagnostic sanitaire. Sa compétence permet d'engager des réflexions sur la conception, la fabrication et les techniques d'assemblage des panneaux, ainsi que d'en évaluer les forces et faiblesses. René Hugues est accompagné dans ses missions par Stéphane Coquille dirigeant de l'entreprise de métallerie et de serrurerie KCM, qui apporte des connaissances essentielles sur les panneaux et les menuiseries en aluminium grâce à son savoir-faire. Les problématiques d'inconfort ressenti par les habitants nécessitent la réalisation de nombreux diagnostics thermiques et acoustiques raison pour laquelle l'équipe s'agrandie et accueille les ingénieurs des bureaux d'études techniques TRIBU¹⁰⁵ et LASA¹⁰⁶ qui évaluent les performances des panneaux grâce à des mesures thermiques et acoustiques et élaborent des diagnostics qui servent de guides pour les phases de conception. Les deux bureaux d'études sont d'ailleurs également sollicités lors de la conception, en tant qu'experts, pour accompagner les architectes afin de proposer des solutions les plus adaptées. À cette fin, ils simulent, calculent et évaluent l'incidence des différentes solutions envisagées par les architectes sur le comportement du bâtiment et de son enveloppe. Enfin, ils mesurent les

105. Karine Lapray, gérante, et Héroïse Marie

106. Samuel Tochon-Danguy, gérant, et Sylvain Fenon

performances des prototypes pour valider leur efficacité et apporter des pistes d'amélioration. Les bureaux TRIBU et LASA disposent d'une politique de recherche et développement particulièrement importante au sein de leur structure respective. Cette sensibilité à la recherche, à l'innovation et à l'expérimentation était un critère déterminant pour le choix des différents partenaires. Dans le cas d'une mission de maîtrise d'œuvre sur une opération de réhabilitation classique, hors du contexte d'une thèse ou d'un travail de recherche, les compétences des membres du groupement de maîtrise d'œuvre et leur motivation à chercher des solutions adaptées, en étant prêts à remettre leurs techniques habituelles en question, constituent des critères essentiels.

3 – Des entreprises spécialisées

Pour compléter les apports de l'équipe de recherche et des bureaux d'études lors des phases de conception, l'atelier s'est appuyé sur les compétences de plusieurs entreprises du bâtiment. Celles-ci ont accompagné l'équipe notamment dans la recherche de produits disponibles sur le marché, en matière de techniques de fabrication et de matériau. Stéphane Coquille (KCM métallerie et serrurerie) a joué un rôle déterminant à propos des panneaux Prouvé qu'il s'agisse de leurs menuiseries et de leur entretien comme des joints. Présent depuis le début des études, son regard avisé sur ces éléments a permis de résoudre nombre de problématiques à la faveur de la conservation et de la restauration des panneaux existants. Par la suite, lors de réflexions portées sur l'intégration d'une protection solaire en façade sud de l'immeuble, les entreprises Serge Ferrari, Prodotti France et Asymptote ont apporté des conseils pertinents en participant à l'élaboration d'un système adapté tant aux particularités architecturales de la façade qu'aux besoins de confort des habitants. L'entreprise Ferrari a notamment conseillé l'équipe sur le choix d'une toile permettant de protéger du soleil tout en conservant la vue vers l'extérieur. Activant son réseau, elle oriente l'équipe vers une entreprise locale, Prodotti France, basée à Genas (Rhône), fabriquant des stores et pouvant réaliser des éléments sur mesures. En effet, l'installation d'un store extérieur sur un mur-rideau n'est pas chose aisée¹⁰⁷. La collaboration avec l'entreprise Prodotti et son gérant Cédric Dalard a permis d'aboutir à des solutions intelligentes et économiques permettant de répondre au besoin de réduction des apports solaires dans le respect le plus total des panneaux de la façade. Leur partenaire et poseur,

107. Voir le détail de la conception des stores dans le chapitre 4 et dans le dossiers de plans joint.

Asymptote, s'est chargé ensuite de l'installation et de la mise en service du prototype de store. La synergie générée autour de cette problématique de protection solaire a fait émerger des débats particulièrement stimulants pour la recherche, en écho aux débats doctrinaux sur la conservation et/ou l'adaptation du patrimoine.

Une même dynamique s'est observée à propos des menuiseries et des solutions de doublage isolant du panneau. De nombreuses entreprises ont participé aux réflexions sur le choix de l'isolant thermique, acoustique, de l'ossature et des finitions (Saint-Gobain, Steico, Fermacell, Knauf, Technal, Wicona, Sapa, Reynaers, K-Line). Leurs conseils ont permis d'identifier des solutions répondant aux exigences de l'équipe, tout en améliorant, par certains points, les propositions initiales. Certaines solutions peuvent conduire à des impasses mais permettent de dégager d'autres options grâce à des échanges nourris ou d'identifier des lacunes dans la production actuelle adaptée au patrimoine notamment concernant les menuiseries. Des partenariats plus concrets émergent de certaines de ces réunions, comme avec Steico, Fermacell et Knauf qui ont mis du matériel à disposition de l'équipe pour la fabrication des prototypes issus de la recherche. Les rencontres avec ces entreprises se sont concrétisées grâce au soutien des Grands Ateliers Innovation Architecture (GAIA) de l'Isle d'Abeau, partenaires de la chaire « Habitat du Futur » et particulièrement grâce à l'aide apportée par Maxime Bonnevie, leur directeur, et Pascal Gantet, responsable des partenariats. La collaboration des GAIA s'est avérée essentielle pour l'équipe en tant qu'interlocuteur privilégié des fabricants mais aussi pour leur soutien à la recherche. Rappelons brièvement que les GAIA regroupent plusieurs institutions et partenaires¹⁰⁸ autour de trois missions centrées sur l'innovation architecturale : l'enseignement en formations initiales comme professionnelles, la recherche, l'information et la diffusion. Les objectifs poursuivis par les GAIA sont de permettre la rencontre des différents acteurs de la construction, mais également de rapprocher pédagogie, recherche et pratique. Enfin, les GAIA cultivent une culture constructive par laquelle la pensée doit se confronter à la matière et disposent d'une plateforme dédiée à la construction de maquettes grandeur nature au sein de laquelle les prototypes sont ensuite préfabriqués. Grâce au soutien des GAIA, un partenariat essentiel avec les Compagnons du devoir de Villefontaine (Isère) s'est

108. Le Ministère de la Culture ; le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement ; la Région Auvergne-Rhône-Alpes ; la Ville de Lyon ; les ENSA de Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon, Saint-Etienne, Montpellier, Paris Malaquais, Paris Belleville, Versailles ; l'ENTPE ; le CSTB ; l'ADERA ; la CCI Nord-Isère ; la FFB Rhône-Alpes ; la CAPEB Rhône-Alpes ; le PIC ; la CAPI Porte de l'Isère ; le Grand Projet Rhône-Alpes Nord-Isère ; le Pôle Innovations Constructives ; les Compagnons du Devoir ; CIM Béton ; CNDB ; Descours & Cabaud ; Ecole Française du Béton ; Lafarge ; INES ; Moulin TP ; Serge Ferrari ; Vicat ; ECCA ; ReneSola etc.

instauré. Ceux-ci ont accompagné l'équipe pendant toute la conception des prototypes et ce jusqu'à leur installation *in situ*. Eddy Giroux, formateur, et ses élèves compagnons, ont dédié un semestre de leur formation à l'élaboration des prototypes et notamment à la conception des ossatures bois des prototypes. Les Compagnons ont fait preuve d'une grande clairvoyance et d'ingéniosité en prenant parfaitement en compte la contrainte de l'intervention sur l'existant en site occupé. Leur savoir-faire a apporté au projet la dimension constructive dès les premiers dessins et a permis d'éliminer des solutions alors jugées trop complexes soit parce que techniquement difficiles à réaliser soit parce qu'économiquement irrecevables. La collaboration entre architectes et professionnels du bâtiment, générée ici par l'intermédiaire des GAIA et de la chaire « Habitat du Futur », a permis indéniablement de mettre au point des solutions à la question posée dans les meilleurs délais. En travaillant ensemble, parallèlement, dès les phases d'études, un temps précieux a pu être gagné sur la réalisation et la qualité de l'ouvrage s'en ressent fortement.

4 – Un projet pédagogique

Il semble difficile d'envisager de réaliser des travaux et recherches sur un immeuble en site occupé sans associer pleinement les habitants aux réflexions. Quelles perceptions ont-ils de ces façades ? Quelles incidences ont ces panneaux dans leur état actuel sur leur confort de vie ? Quels sont les besoins des occupants en termes de confort et d'ambiances ? L'avis et le ressenti des usagers d'un édifice sont des données particulièrement importantes à prendre en compte dans l'élaboration d'un tel projet. L'équipe doit s'assurer que tous les copropriétaires soient en mesure de comprendre parfaitement les enjeux du travail de recherche mené. Partant de ces constats, divers moyens de communication pédagogiques ont été mis en œuvre à leur attention afin de leur expliquer la démarche et de les tenir informés des avancées du projet. Tout d'abord, l'accord des copropriétaires est nécessaire pour utiliser leur immeuble comme projet démonstrateur et réaliser des études et mesures sur celui-ci. Cette autorisation a été obtenue en amont du démarrage de la thèse grâce à l'appui du syndic de la copropriété Les Cèdres, la régie Franchet et C^{ie}. La Régie Franchet et C^{ie} est gestionnaire de l'immeuble Les Cèdres depuis sa construction en 1962 et connaît bien sa singularité. Sa capacité à retracer l'historique des travaux menés sur l'immeuble depuis son achèvement est une ressource indéniable pour l'équipe de recherche à laquelle Renaud Franchet est associé. Séduit par l'approche multidisciplinaire mêlant recherche et pratique, ce dernier a

particulièrement accompagné l'équipe dans les relations avec les copropriétaires ; organisant une présentation lors d'une assemblée générale de copropriété qui a permis d'engager concrètement la collaboration avec les copropriétaires et de vaincre les réticences. Conscients de la valeur patrimoniale de leurs façades grâce à la sensibilisation conduite par l'équipe de recherche et du potentiel d'amélioration amené par ce projet, les copropriétaires ont accepté de financer une partie des diagnostics à hauteur de 15 000 € répartis sur deux ans. Cette participation financière symbolique, relativement faible au regard du coût réel des diagnostics réalisés (environ 5 % du coût total), avait pour objectif principal d'associer les copropriétaires au process. L'équipe s'engage alors à fournir à la copropriété des diagnostics complets de leur immeuble ainsi que des propositions d'intervention pour la réhabilitation de celui-ci. Des points d'informations réguliers et des réunions sont mis en place pour faire part aux copropriétaires des avancées de l'équipe et pour qu'ils participent à leur tour à la définition du projet. Ces réunions surviennent généralement tous les six mois, soit dans les locaux de la régie lorsqu'il s'agit de point d'information, soit *in situ*, dans la loge du gardien¹⁰⁹, pour les réunions de travail. L'ensemble des copropriétaires y sont conviés. Généralement les points d'information permettent de réunir un peu plus de la moitié des copropriétaires, tandis que les réunions de travail ne motivent qu'une douzaine de copropriétaires particulièrement investis, notamment les membres élus du conseil syndical. Résidants pour la plupart dans l'immeuble depuis de nombreuses années, ceux-ci sont particulièrement attentifs aux travaux et propositions. Ils sont les premiers à accueillir l'équipe chez eux pour réaliser des mesures et diagnostics, non sans une certaine réserve au démarrage. Mais, au fil des mois et des échanges, celle-ci a fait place à une forme de curiosité et de confiance au point de louer largement la dynamique de la recherche comme l'illustre en particulier l'association d'habitants, CARGO JP 44, réunis autour de la question du patrimoine bâti de l'immeuble¹¹⁰.

Un système de notes d'informations régulières, distribuées dans les boîtes aux lettres et affichées sur les portes d'entrées des allées, a été mis en place¹¹¹. Par ce biais, l'équipe

109. La loge du gardien est un appartement vacant de l'immeuble Les Cèdres, situé au rez-de-chaussée, qui sert de local au conseil syndical.

110. Baptisée ainsi en raison de la ressemblance de l'immeuble avec un bateau de croisière, des initiales J et P pour Jean Prouvé, et du numéro 44 de la rue de la Favorite, adresse de l'immeuble, l'association est d'abord créée dans le but de suivre et de soutenir le projet de recherche en mobilisant des financements, subventions et mécénats pour la future réalisation des travaux. Néanmoins, l'association, à la demande des habitants fondateurs, étend rapidement ses missions vers la sensibilisation des copropriétaires au patrimoine moderne et à l'œuvre de Jean Prouvé.

111. La newsletter par mail n'a pas été envisagée compte tenu de l'âge avancé de certains copropriétaires et du fait que nombre d'entre eux n'aient pas accès à un ordinateur.

communiquent les informations importantes, évoquées en réunion et qui nécessitent d'être connues de tous, comme les dates d'intervention des BET dans l'immeuble, les dates de travaux pour les prototypes, les réservations de places de stationnement dans la résidence pour les entreprises etc. Ces notes « administratives » sont également l'occasion d'ajouter des informations illustrées sur le projet et de tenir ainsi informé l'ensemble des copropriétaires, même ceux n'assistant pas aux réunions. Globalement, la collaboration des copropriétaires a grandement facilité l'accès à la ressource pour les diagnostics, a permis de comprendre les besoins réels des usagers et de concevoir un projet le plus adapté à leur situation.

5 – Le conseil scientifique

Face à la complexité du projet, au foisonnement du jeu d'acteurs et à l'importance de la recherche, un conseil scientifique s'est réuni régulièrement pour veiller à la poursuite des travaux dans le respect des enjeux initiaux. Celui-ci se compose de l'équipe de recherche au complet, d'un représentant de chacun des partenaires de l'équipe, TRIBU, LASA, DECARE, KCM, régie Franchet et d'experts scientifiques choisis pour leur maîtrise du sujet et l'intérêt qu'ils lui portent. Le conseil s'est réuni régulièrement à l'agence archipat, à l'ENSAL ou *in situ* en fonction des questions soulevées par les hypothèses de travail. Ces conseils scientifiques ont été l'occasion de faire des bilans des travaux de recherche à des moments stratégiques. Le premier conseil scientifique s'est réuni en février 2019 dans les locaux d'archipat. Lors de celui-ci, les résultats de l'ensemble des diagnostics architecturaux, patrimoniaux, thermiques et acoustiques, ainsi que l'avancée des hypothèses de conception ont été présentés. Le conseil a validé alors certaines hypothèses, jugées les plus pertinentes, devant être développées dans le but d'être construites sous forme de prototypes à l'échelle 1 : 1. D'autres au contraire ont été éliminées, jugées trop complexes, ou trop prégnantes pour l'architecture de l'immeuble. Les hypothèses validées ont été développées selon les orientations prises lors du conseil scientifique de 2019, puis présentées lors du second conseil scientifique qui s'est tenu en février 2020, ainsi que la méthodologie de conception et de fabrication des prototypes. Ce conseil s'est poursuivi par l'observation des prototypes installés *in situ*, dernière visite qui suscita de nombreuses réactions. Des orientations de recherche ont été données concernant la teinte des protections solaires, les menuiseries et les finitions intérieures. De plus, le conseil scientifique a invité l'architecte des bâtiments de France à se rendre sur les lieux pour observer l'immeuble et les prototypes, afin qu'il donne son avis et prodigue ses conseils pour le développement

des hypothèses. Des discussions ont également été engagées avec le CAUE Rhône-Métropole afin d'assurer à cette démarche une large publicité. Les conseils scientifiques apportent une dimension supplémentaire au projet en enrichissant la recherche. Ce suivi régulier, que ce soit lors des conseils officiels ou lors des échanges intermédiaires avec les conseillers, a permis à l'équipe de prendre des décisions argumentées rapidement, afin de mener la recherche dans le temps imparti des trois années couvertes par la CIFRE.

6 – Un défi économique

Maîtriser la dimension économique de l'ensemble du projet constituait l'un des enjeux majeurs de cette recherche et ce pour de multiples raisons, la première étant de proposer aux copropriétaires de l'immeuble des solutions viables. La copropriété se compose d'habitants aux profils variés, mais majoritairement modestes et l'opération doit pouvoir être transposée à d'autres immeubles dotés de façades légères en copropriété. Seulement, la dimension économique d'un projet ne peut se résumer au coût d'investissement de la réhabilitation. Il s'agit d'une enveloppe globale complexe à définir, incluant le retour sur investissement, les économies d'énergies réalisées sans parler des déductions d'impôts. À cela, s'ajoute l'incidence de la réhabilitation sur le prix de revente d'un appartement. La potentielle réduction des coûts de chauffage est également un questionnement. La réhabilitation de l'immeuble va engendrer une baisse des consommations énergétiques pour les copropriétaires, mais le prix de l'énergie augmentant régulièrement, il n'est pas certain que le budget énergie du foyer soit réduit. Il sera néanmoins maîtrisé. Afin d'évaluer l'ensemble de ces éléments, les compétences de Stéphane Nardy, économiste de la construction du cabinet Denizou ont été sollicitées pour définir l'économie globale du projet, y compris le coût d'investissement nécessaire pour les copropriétaires en fonction des scénarii d'interventions. En plus de ces bilans économiques, l'équipe et ses partenaires se sont attelés au montage financier du projet afin de trouver des aides pour financer, d'abord les études, puis les prototypes et enfin les travaux. Les études et prototypes ont été financés par les copropriétaires, ainsi que par différents partenaires, mais également grâce au ministère de la Culture à travers un financement attribué lors du 3^e appel à projets du programme de recherche « Architecture du XX^e siècle, matière à projets pour la ville durable du XXI^e siècle ». Pour la réalisation des travaux, des subventions peuvent être obtenues pour la réhabilitation thermique, acoustique et énergétique d'un édifice labellisé et l'équipe a établi la liste des aides auxquelles l'opération est susceptible d'être

éligible¹¹². L'association CARGO JP 44 est encore à la recherche de mécénats afin de réduire la charge des copropriétaires et leur permettre de réaliser les travaux et par cela d'accéder à de meilleures conditions d'habitat. Ce travail démontre l'importance de l'économie dans un projet de réhabilitation et d'autant plus dans un projet en copropriété. Il permet également de se rendre compte que l'économie ne peut et ne doit pas être considérée uniquement comme la réduction du coût d'investissement mais aussi au regard de l'économie de matière et de la réduction de l'impact carbone qui ajoutent une « valeur verte » à l'édifice.

Partie 3 : Les diagnostics

1 – Le diagnostic technique des panneaux

Les diagnostics débutent par une importante collecte de données parmi les documents d'archives publiques et privées. Les investigations commencent aux Archives municipales de Lyon où sont consultés l'ensemble des documents relatifs au permis de construire de l'immeuble : descriptifs, plan de masse, plans des niveaux, plans des appartements, coupes et élévations. Les élévations présentées dans le permis de construire, qui ne correspondent pas aux élévations réalisées, apportent peu d'éléments concernant la composition des façades hormis cette phrase citée dans le descriptif :

« Les façades seront constituées par des panneaux de remplissage fixés par parclose sur une armature métallique elle-même scellée dans la dalle. Ces panneaux comprendront :

- des allèges à parement extérieur métallique (aluminium ou acier, traité ou peint) et à parement intérieur fibre de bois aggloméré comportant une isolation intérieure
- des châssis fixes ou ouvrant en menuiserie métallique
- des protections solaires par stores toile
- des garde-corps de même modèle que les façades sans isolation¹¹³ »

À la lecture de ces éléments, il semble que les façades de Prouvé ne soient pas encore

112. De nombreuses pistes sont explorées comme l'ADEME, l'ANAH, le dispositif Ecorenov', ou encore la Fondation du Patrimoine. Les échanges avec les représentants lyonnais de la Fondation du Patrimoine font émerger la question d'intégrer les bâtiments labellisés « Architecture du XX^e siècle » ou aujourd'hui « Architecture contemporaine remarquable » dans leur système de subvention.

113. PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16

détaillées par l'architecte au moment du dépôt du permis de construire en 1959, soit parce que la collaboration entre Cottin et Prouvé n'a pas encore débuté, soit parce que les façades sont toujours en cours de conception. Pour obtenir les détails de façades, les recherches se poursuivent vers d'autres sources parmi lesquelles les archives de l'agence de Cottin conservées à la Société académique d'architecture de Lyon. Malheureusement, le dossier concernant l'immeuble Les Cèdres, comprenant tous les plans et détails d'exécution, a disparu à la suite d'un prêt à une entreprise dans le cadre de travaux. La SAAL fournit néanmoins des photographies du bâtiment à sa réception.

La quête d'informations se poursuit dans les fonds Prouvé conservés aux Archives départementales de Meurthe-et-Moselle, fermées pour cause de travaux et déménagement. Fort heureusement, l'ensemble des archives Prouvé ont été numérisées par le Centre Georges Pompidou. La rencontre avec Olivier Cinqualbre, conservateur des fonds d'archives, permet d'accéder à la réserve d'architecture et d'y découvrir l'ensemble des plans et détails élaborés par Prouvé et son équipe de la CIMT pour le projet de l'immeuble Les Cèdres. Ces documents apportent des connaissances quant à la composition interne des panneaux, les détails de leurs joints et assemblages mais également des photographies de chantier. S'en est suivi un important récolement bibliographique et de nombreux entretiens avec les acteurs du projet (les gestionnaires de l'époque, la régie Franchet et C^{ie}, mais également Marcel Dallière, membre de l'équipe Cottin toujours en vie). La participation à des colloques dédiés à la production de Prouvé et la visite de nombreuses expositions, comme celle organisée à Arles intitulée « Jean Prouvé, l'architecte des Jours Meilleurs », permettent de reconstituer « l'environnement » du sujet et de se familiariser avec la production de l'« ingénieur » nancéen. Ces recherches permettent de comprendre en particulier les principes et les logiques développés par les concepteurs. Elles sont ensuite complétées par des relevés précis de l'existant ainsi que la réalisation de carottages et de sondages dans un panneau de la loge du gardien, appartement vacant de l'immeuble servant de local au conseil syndical, après autorisation des copropriétaires d'utiliser cet espace comme lieu d'expérimentation privilégié. Grâce au démontage partiel d'un des panneaux, les dispositions des éléments au droit des assemblages ont pu être observées, l'équipe pouvant vérifier l'état sanitaire du panneau et de ses composants et confirmer les informations données par les documents d'archives. En raison du caractère expérimental de ces constructions, des différences parfois notables peuvent exister entre les études, les plans de projet et la réalisation, d'où l'importance de vérifier avec des sondages les informations

données par les archives et plans d'exécution. L'analyse de ces différents éléments permet en particulier de resituer le chantier lyonnais dans l'œuvre de Prouvé, d'en apprécier les spécificités techniques, les filiations et les parentés tout autant que les innovations introduites dans ce dernier chantier.

2 – Les problématiques thermiques

a. La thermique d'été

Simultanément au diagnostic architectural, le bureau d'études TRIBU a conduit des diagnostics thermiques sur l'immeuble. La première campagne permet d'évaluer le confort d'été des occupants de l'immeuble, d'appréhender de manière fine le comportement thermique du bâtiment et notamment l'incidence des usages et éventuelles modifications apportées par les habitants à leur logement (isolation, stores, ouverture des fenêtres...). Dans un premier temps, TRIBU réalise des mesures de températures sur une quinzaine de jours, au moment d'un pic de chaleur, du 20 juin au 4 juillet 2018. Des capteurs sont placés dans les séjours de trois appartements et un à l'extérieur, au-dessus du détecteur de mouvement à l'entrée du hall de l'immeuble Les Cèdres. Le premier appartement étudié, le logement A, est un appartement ayant conservé ses dispositions d'origine. Le logement B possède de nouvelles menuiseries à double vitrage et le logement C possède des menuiseries double vitrage et un doublage isolant d'une dizaine de centimètres. Ces trois appartements sont particulièrement caractéristiques des différentes situations présentes sur l'immeuble. Il est important d'étudier des appartements pouvant rendre compte de la situation d'ensemble de l'immeuble afin de pouvoir généraliser les résultats. Il est aussi préférable d'analyser les situations les plus défavorables, qui vont représenter les objectifs les plus importants à atteindre. C'est pourquoi, les capteurs sont positionnés dans les séjours, côté sud, et les appartements étudiés sont majoritairement situés dans les étages élevés et non protégés par l'ombre des arbres du jardin. Les logements A et B, respectivement situés au 8^e et 7^e étages, sont particulièrement exposés au soleil. Le logement C, bien que situé en partie basse de l'immeuble, au 3^e étage, ne bénéficie pas des masques des arbres proches. En plus de ces facteurs environnementaux et architecturaux, l'occupation du logement peut faire varier les mesures, elle est donc recensée. Les habitants disposent d'un formulaire leur permettant d'indiquer le nombre de personnes occupants le logement de façon précise (par exemple : trois personnes le matin, une le midi,

zéro l'après-midi, et à nouveau trois le soir et la nuit). Ils notent également quand ils utilisent leurs stores intérieurs, leurs appareils de cuisson, et enfin quand ils ouvrent leurs fenêtres, côté nord, côté sud ou les deux en même temps, pour identifier les périodes de ventilation naturelle. Tout élément pouvant influencer sur la température intérieure du logement est précisé. *In fine*, le diagnostic et la comparaison de ces trois logements doivent permettre de rendre compte des défauts de l'enveloppe du bâtiment, de l'incidence des éventuelles modifications effectuées par les habitants sur les appartements et surtout d'évaluer les leviers d'amélioration du confort de l'immeuble.

Pour compléter ces premières données, des mesures de températures de surface sont réalisées le 4 septembre 2018 dans un logement situé au 5^e étage de l'allée B. L'objectif de ces mesures complémentaires est d'évaluer les qualités thermiques des panneaux Prouvé et en particulier des menuiseries en aluminium, lors d'une journée ensoleillée d'été. Ces mesures permettent d'appréhender précisément l'influence des menuiseries sur le confort d'été, les effets de paroi chaude en particulier. Pour représenter diverses situations existantes sur l'immeuble, trois panneaux sont étudiés, le panneau du salon, celui de la loggia et celui de la cuisine, afin de comparer leurs comportements. Le panneau de façade du salon est isolé par six ou sept centimètres de polystyrène et la menuiserie est en double vitrage, non d'origine. En période estivale, le vitrage est occulté par un store intérieur en tissu clair et un rideau transparent. Le panneau de la loggia n'est pas isolé, sa face intérieure est en aluminium contrairement aux autres panneaux dotés de contreplaqué, il dispose d'une menuiserie double vitrage rénovée protégée par un store intérieur en tissu clair. Le panneau de cuisine n'est pas non plus isolé mais il dispose d'une menuiserie double vitrage rénovée et d'un store vénitien intérieur métallique. Les températures de surface et le rayonnement des parois chaudes pouvant avoir une forte incidence sur le confort thermique, il semble important d'identifier clairement les situations afin de prévoir des solutions pour réduire ces effets.

Enfin, la qualité de l'air est un important facteur de confort, mais également un élément jouant un rôle décisif sur la santé des occupants. Le bon renouvellement de l'air doit être vérifié et le système de ventilation connu avant toute intervention. Pour évaluer la qualité de l'air, il faut relever le taux d'humidité et le taux de CO₂ de l'air, un défaut de ventilation pouvant conduire à leur augmentation. Ces mesures ont été également réalisées par TRIBU du 20 juin au 4 juillet.

b. La thermique d'hiver

Afin d'analyser et d'identifier les potentiels d'amélioration du système de chauffage, du confort d'hiver et de la ventilation, une campagne de mesure d'hiver est réalisée du 15 au 25 janvier 2019. La visite de la chaufferie et des gaines palières permet de compléter les études précédentes pour relever les dysfonctionnements potentiels en termes d'émission, de distribution et de régulation des réseaux de chauffage. Il est important d'identifier le système de chauffage utilisé, le type de chaudière, l'âge de l'installation, les températures de départ de chauffage, établies en fonction de la température extérieure, et les réseaux de distribution. Les capacités d'évolutions des installations sont également évaluées. Dans un premier temps, des capteurs de température et d'hygrométrie sont positionnés dans quatre logements entre le 15 et le 25 janvier 2019, ainsi qu'un capteur extérieur posé au-dessus du détecteur de mouvement à l'entrée du hall de l'immeuble. Il se trouve en hauteur à l'abri du rayonnement direct et des intempéries, et dans un espace ouvert, ventilé. Les logements A et C sont les mêmes que lors des relevés d'été. Le logement A, situé au 8^e, est dans les dispositions d'origine étage et le logement C est un appartement doté d'un double vitrage et d'un doublage isolant situé au 3^e étage. Comme pour la thermique d'été, il est plus intéressant d'étudier les situations les plus défavorables. C'est pourquoi un logement situé au 1er étage en mur pignon (non isolé), au-dessus des caves (non isolées) et à l'ombre des arbres du jardin a été substitué au logement B. Pour compléter les données, un appartement supplémentaire a été étudié, le logement D, situé au 5e étage, au centre de l'immeuble. Des mesures de températures de surfaces ont été également effectuées dans les logements A, B et D lors d'une journée d'hiver ensoleillée, sur des panneaux au nord et au sud afin d'identifier les éventuelles ponts thermiques, l'impact des apports solaires, du chauffage etc.

Afin d'identifier visuellement les ponts thermiques et lieu de déperditions, des relevés à la caméra thermique sont réalisés sur l'ensemble des façades. La caméra thermique (FLIR E5) permet de mesurer le rayonnement infrarouge des façades de la résidence. Il est important d'avoir à l'esprit qu'une thermographie infrarouge d'un bâtiment peut mettre en valeur le rayonnement lié aux déperditions par l'enveloppe du bâtiment mais aussi le rayonnement lié à la specularité de l'enveloppe, ce qui n'est pas négligeable dans ce cas doté de parement aluminium et de vitrages, favorables aux effets de réflexion. Enfin, la qualité de l'air et la bonne ventilation des logements doivent être contrôlées pour des questions sanitaires. Les débits de renouvellement d'air, en ventilation naturelle, sont plus facilement mesurables en hiver qu'en été du fait des translations entre air chaud et air froid. Ces relevés donnent donc plus

de réponses que les relevés effectués en été. L'analyse du système de ventilation utilisé, des entrées et sorties d'air est effectuée minutieusement. Les débits de ventilation sont relevés ainsi que le taux d'humidité des logements et le taux de CO₂.

3 – Les enjeux de l'acoustique

Parallèlement aux diagnostics thermiques, des diagnostics acoustiques sont également réalisés. Ceux-ci ont pour objectifs de quantifier le niveau de confort acoustique présent actuellement dans l'immeuble et d'étudier les effets d'une réhabilitation sur l'harmonie acoustique présente. En effet, dans certaines configurations – en raison même de l'effet de masquage sonore –, l'amélioration de l'isolement acoustique de l'enveloppe vis-à-vis de l'extérieur rend audible ou perceptible les différents bruits de voisinages. Ces bruits peuvent alors être encore plus désagréables ou gênants dans la vie quotidienne et rendre la réhabilitation responsable de nouvelles problématiques. L'objectif est de trouver un équilibre acoustique entre intérieur et extérieur. La campagne de mesures acoustiques *in situ* s'est déroulée le 30 mai 2018 avec trois étapes principales permettant d'avoir une bonne connaissance de l'état acoustique de l'immeuble : une étude acoustique environnementale du site ; une étude des isolements acoustiques des façades vis-à-vis des bruits extérieurs ; et une étude des isolements acoustiques des séparatifs intérieurs.

Afin d'évaluer la gêne sonore liée au trafic routier de la rue de la Favorite, trois points de mesures ont été installés en façade du bâtiment. Le premier point est positionné au pied de la façade sud à une hauteur d'environ deux mètres. Le second point est positionné dans une loggia au 4^e étage de l'immeuble et le dernier dans une loggia du 8^e étage. Ainsi répartis sur toute la hauteur de la façade, les points de mesures peuvent rendre compte de toutes les situations sonores de l'environnement de l'immeuble. S'en suivent les études d'isolement acoustique des façades. L'isolement acoustique indique la capacité d'isolation globale d'un local vis-à-vis du bruit extérieur, en prenant en compte l'intégralité des transmissions (parois opaques, menuiseries, etc.). Afin de caractériser la situation actuelle de l'immeuble et de disposer d'une vision globale des performances acoustiques, des mesures sont réalisées sur différentes configurations de logements. Pour chacune des mesures, une source de bruit directionnelle normalisée est placée à l'extérieur à une distance définie en fonction de l'étage du logement étudié. Le niveau de bruit est mesuré une première fois à l'extérieur à une distance de deux mètres de la façade, puis au centre du local de réception pour calculer les valeurs d'isolements acoustiques

standardisés pondérés. L'immeuble datant de 1962, il a déjà subi plusieurs modifications par certains propriétaires afin d'améliorer les performances thermiques ou acoustiques de la façade. Il existe donc diverses configurations avec leurs caractéristiques propres. Pour rendre compte de l'ensemble des situations, plusieurs logements sont testés, avec pour contrainte d'être situés dans les premiers niveaux de l'immeuble pour pouvoir positionner la source de bruit directionnelle normalisée à la bonne distance. Le logement 1 est le local du gardien, appartement vacant situé en rez-de-chaussée de l'immeuble et conservé dans ses dispositions d'origine. Le logement 2 est un appartement du premier niveau dont les menuiseries ont été changées pour des fenêtres à double vitrage. Enfin, l'appartement 3 possède une nouvelle fenêtre à double vitrage et un doublage isolant de dix centimètres serti d'une plaque de plâtre de treize millimètres. Comme pour les études thermiques, ces trois configurations sont assez représentatives de l'ensemble des appartements de l'immeuble et permettent de comparer l'incidence des interventions réalisées par les habitants sur le confort de leur logement. Dans le but d'approfondir l'analyse des résultats de mesures d'isolement « global », des mesures d'investigation en champ proche les complètent afin de hiérarchiser les différentes voies de transmissions et identifier les ponts phoniques. Elles permettent également de quantifier l'amélioration liée aux travaux de renforcement réalisés. Un maillage précis à faible distance de la paroi et des jonctions (environ deux centimètres) est réalisé. Le nombre de points varie en fonction de la configuration et des contraintes liées au site. La façade présente la particularité d'abriter des loggias pour chacun de ses appartements. En fonction des rénovations réalisées, ces dernières peuvent être ouvertes, fermées partiellement, ou fermées complètement. La question du bruit émis depuis ces loggias vers les loggias ou pièces voisines se pose afin de mieux caractériser l'ambiance sonore présente dans la résidence. Pour cela, des mesures sont réalisées depuis une loggia et dans différentes configurations d'ouvertures ou fermetures afin de simuler l'ensemble des possibilités et mesurer l'impact d'une éventuelle gêne. L'ensemble de ces mesures, avec sources directionnelles, en champ proche et enfin depuis les loggias, permettent d'identifier toutes les faiblesses acoustiques des façades et donc les possibilités d'amélioration.

Comme présenté précédemment, le but de cette campagne de mesures est de quantifier le niveau de confort acoustique présent actuellement dans l'immeuble et d'étudier les effets d'une réhabilitation de l'enveloppe extérieure sur l'harmonie acoustique présente. Pour cela, des mesures sont également réalisées à l'intérieur du bâtiment, entre les logements, afin de

caractériser les différents dispositifs constructifs. Ces mesures sont ensuite comparées à la réglementation acoustique applicable. L'agencement global est pratiquement similaire sur l'ensemble du bâtiment et conduit à deux configurations de séparatifs possibles. En effet, deux appartements mitoyens peuvent être séparés soit par un mur de refend en béton de vingt-cinq centimètres soit par une cloison sèche d'épaisseur inconnue (environ dix centimètres). Des mesures sont réalisées pour identifier les capacités d'isolement acoustique de ces éléments séparatifs. Des mesures de bruits de chocs sont également effectuées pour quantifier l'isolement acoustique des dalles en béton. Différentes gaines techniques traversent verticalement les différents étages de la résidence. Ces traversées peuvent être sources de ponts phoniques entre les différentes pièces reliées, des chambres ou des pièces d'eau dans ce cas précis. C'est pourquoi une mesure d'isolement acoustique est réalisée à proximité immédiate d'une gaine afin de déceler une éventuelle faiblesse. Toutes ces mesures, environnementales, d'isolement de façades et d'isolement intérieur, permettent de connaître avec exactitude les nuisances auxquelles l'immeuble est soumis, ainsi que ses capacités d'isolement. En capitalisant l'ensemble de ces données, l'équipe peut anticiper et simuler l'impact des différentes solutions de réhabilitation envisagées sur l'équilibre des ambiances sonores des logements.

4 – Les ambiances vécues

En complément de ces diagnostics, un travail d'enquête et de consultations est mené auprès des habitants afin d'identifier les problématiques de confort qu'ils rencontrent ainsi que leurs attentes. Les usages passés et présents sont analysés au moyen d'interviews et de pratiques participatives d'observation (CRESSON). Pour l'équipe, l'objectif de ces entretiens est de concevoir un cahier des charges pour la façade future à partir de performances sensibles et pas seulement normatives. Des grilles d'entretien sont établies au préalable afin de pouvoir comparer ou analyser objectivement les résultats des différents entretiens. Néanmoins, cette consultation ne devant pas être directive, afin de laisser aux habitants des possibilités d'expression, les grilles prévoient l'intégration de moments d'échanges libres. Ces échanges s'appuient sur des photographies de l'immeuble, notamment sur les questions d'ambiances lumineuses et de clair de vitrage avec des photographies de différentes menuiseries. Ils s'appuient également sur des bandes sonores enregistrées précédemment dans l'environnement de l'immeuble (bruits de trafic routier et bruits intérieurs), mais aussi sur la situation même du logement de l'habitant interrogé. Les questions posées aux habitants portent sur l'historique

de leur vécu dans l'immeuble, ce qui les a motivés à venir vivre dans cette copropriété, s'ils se voient rester au sein de l'immeuble et combien de temps. Les entretiens permettent également de recueillir leur sentiment sur l'aspect extérieur de l'immeuble, l'usage actuel et futur de leur loggia, la perception de leurs fenêtres, ouvertures et systèmes d'occultation, ainsi que sur leur confort nocturne. Des questions concernant les systèmes de chauffage et ventilation leur sont également posées. Ces entretiens permettent d'identifier les ressentis de confort thermique et acoustique des habitants¹¹⁴. Il semble important d'élaborer les hypothèses de conception autant sur les ressentis et besoins réels des habitants que sur les éléments quantifiés lors des diagnostics et les exigences normatives. De manière générale, afin d'intégrer le plus étroitement les habitants aux réflexions menées lors du projet, la communication avec les habitants est un élément essentiel pour réaliser un projet adapté à leurs besoins. Acquérir une connaissance exhaustive de l'édifice constitue une étape capitale avant de réaliser une intervention sur l'existant. Elle permet de fixer une synthèse des objectifs et des performances à atteindre permettant d'écrire le programme qui guide les propositions d'intervention.

Partie 4 : De la conception à l'expérimentation

1 – Une conception adaptée et partagée

La phase de conception s'appuie sur les résultats des diagnostics, le ressenti des habitants, la connaissance du bâtiment et s'adapte à ses besoins. Les études thermiques révèlent de nombreux inconforts selon la position des appartements dans l'immeuble. Si les appartements des étages inférieurs, à l'ombre des cèdres du jardin, ressentent moins la surchauffe due à l'ensoleillement en été, en revanche, en hiver, du fait du manque d'isolation avec les locaux non-chauffés du rez-de-chaussée et de l'ombre portée par la végétation, ceux-ci demandent davantage de chauffage. Les ressentis au sein de l'immeuble sont hétérogènes et difficiles à gérer pour la copropriété, des conflits entre habitants pouvant naître de ces différences de confort. Les occupants des étages supérieurs ne comprennent pas toujours la mise en route du chauffage dès la mi-octobre alors qu'ils atteignent encore chez eux des températures avoisinant les vingt-et-un degrés simplement avec les apports solaires. De leur côté, les habitants des premiers niveaux ne supportent plus le froid, et ce ressenti est encore plus intense pour des

114. Les questions posées en entretiens, les supports utilisés et les réponses des habitants sont disponibles en annexe 8.

personnes âgées sans activités restant au domicile toute la journée. Le système de chauffage collectif au gaz actuel diffuse la même température dans les étages supérieurs déjà en partie chauffés par les apports solaires que dans les étages inférieurs. Ces constats amènent à réfléchir à l'ajout de protections solaires, à l'isolation des façades, comme à la refonte, ou plutôt à l'adaptation, du système de distribution de chauffage afin d'offrir aux habitants un moyen de contrôler leur environnement et d'éviter les surconsommations inutiles. Considérant la refonte du système de chauffage comme pouvant avoir un effet bénéfique sur le confort des habitants, on s'aperçoit que la réhabilitation des façades de l'immeuble ne peut s'en tenir à la seule question de l'enveloppe. Dès qu'une intervention est programmée sur celle-ci, il faut aussi s'assurer que la globalité des éléments est prise en compte pour équilibrer les ambiances des logements. C'est ainsi qu'il est également nécessaire de s'assurer de la qualité de l'air et de la ventilation des logements qui peuvent causer des désordres sanitaires et techniques en influant sur la santé des occupants comme sur la pérennité de la façade en cas de forte condensation. Selon les résultats des diagnostics, si les débits se révèlent insuffisants, une réflexion doit être menée pour améliorer le système de ventilation de l'immeuble.

Les murs-rideaux à panneaux préfabriqués présentent, par nature, des faiblesses acoustiques au niveau de l'ensemble de leurs joints. L'isolation d'un appartement à un autre est également rendue difficile en raison des ponts phoniques existants au droit des refends et des dalles. La nature des façades-rideaux ne permet pas de répondre à ce besoin, bien que les ingénieurs du CIMUR¹¹⁵ aient préconisé dans leur ouvrage manifeste *Techniques françaises des façades légères, murs-rideaux et panneaux de façade*¹¹⁶, d'ajouter de l'isolant pour combler ces « vides », ce qui n'est pas le cas sur l'immeuble Les Cèdres. Concernant l'isolation acoustique face aux bruits aériens, les façades légères ont une faiblesse induite par leur nature : leur manque de masse. Pour augmenter la performance d'une façade, il faut donc en augmenter la masse et envisager sa subdivision en parois multiples désolidarisées, évitant ainsi la propagation des ondes sonores d'un matériau à un autre. Ceci permet également de créer des effets de ressort favorables à l'isolation contre les bruits de chocs, grâce au positionnement d'un matériau souple, absorbant, entre l'émetteur du bruit et la paroi susceptible d'être support de la vibration.

115. Comité d'Information pour le Développement des Panneaux de Façades et des Murs-Rideaux, basé à Neuilly-sur-Seine.

116. *Op. cit.*

Le caractère « lisse » de la façade rideau confère à l'immeuble sa physionomie si singulière. Lors de précédents travaux de ravalement de façades, des bavettes et couvre-joints ont été ajoutés et perturbent aujourd'hui la lecture des façades à l'origine dotées de joints creux. De nombreux habitants ont également remplacé leurs menuiseries, rompant la lecture homogène des façades et épaississant considérablement les profils de fenêtres. Ceux-ci confirment d'ailleurs leur préférence pour les menuiseries d'origine lors des diagnostics d'ambiances vécues. La condition d'*unicum* dans laquelle se trouve Les Cèdres tend à orienter les propositions vers la restitution d'un état originel. Les éventuels ajouts, comme les protections solaires évoquées pour l'amélioration du confort thermique, doivent être réversibles afin de pouvoir retrouver facilement l'état d'origine de l'immeuble. De plus, ces nouveaux éléments se doivent de respecter les trames de la façade si caractéristiques de l'architecture préfabriquée. Le diagnostic de l'existant conditionne en réalité l'ensemble de la conception.

2 – Des propositions sous forme de variantes

Le travail de conception doit trouver un point d'équilibre entre l'ensemble de ces données et déboucher sur des solutions adaptées. À cette fin, plusieurs variantes sont envisagées ; les hypothèses allant du simple entretien des panneaux avec réfection des joints creux et remplacement des menuiseries à l'ajout d'une double façade légère intérieure comprenant isolants thermique et acoustique. Ces variantes permettent de tester des épaisseurs et matérialités différentes, en privilégiant les matériaux biosourcés. Dans un premier temps, aucune variante n'est écartée, offrant la possibilité de les comparer, de les analyser de manière approfondie avant d'adopter un parti. Toutes les hypothèses font l'objet d'une étude spécifique et d'un développement graphique abouti, même celle envisageant le remplacement complet de la façade. Puis, rapidement, la connaissance de l'édifice se faisant plus précise, les premières hypothèses sont éliminées dont celle conduisant au remplacement complet de la façade en raison de la destruction de la valeur patrimoniale de l'existant et du statut de l'immeuble en copropriété sans parler du coût carbone d'une nouvelle façade. D'ailleurs, comment dépouiller un immeuble occupé de toute sa façade ?

Pour chacune des hypothèses étudiées, des analyses multicritères conjuguant patrimoine, confort, thermique, acoustique, consommation énergétique et économie, motivent le choix de l'une ou l'autre des solutions. Toutes les hypothèses sont simulées par informatique pour évaluer leur capacité d'isolation, leur coût et leur performance. Cette étape permet

d'éliminer les solutions les moins acceptables. Les solutions restantes sont débattues en conseil scientifique en présence de l'ensemble des acteurs du projet. Les échanges s'appuient sur les analyses multicritères mais aussi sur un « ressenti » architectural, bien que les choix soient toujours argumentés. À l'issue des débats, l'analyse critique des différentes hypothèses conduit à la réalisation de prototypes à l'échelle 1 : 1 de l'ensemble des solutions retenues. Ces prototypes peuvent alors mettre en lumière d'autres critères de choix à la faveur d'une ou plusieurs solutions répondant à la recherche en cours, le ou les choix final/aux parmi diverses propositions viables pour la réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres, revenant alors peut-être aux habitants eux-mêmes.

3 – Expérimentations et prototypes

Les solutions les plus adaptées, qui répondent le mieux aux besoins de l'immeuble, sont donc testées grâce à des prototypes réalisés à l'échelle 1 : 1¹¹⁷. D'abord préfabriqués en ateliers, ils sont ensuite montés *in situ* dans l'ancienne loge du gardien aujourd'hui inoccupée. La fabrication et le montage des prototypes sont gérés comme un véritable chantier, faisant intervenir plusieurs entreprises simultanément, nécessitant la mise à disposition d'une nacelle, de mettre en place une logistique avec les copropriétaires pour gérer les accès aux chantiers. Cette partie de coordination du chantier des prototypes est particulièrement formatrice. La construction d'éléments à l'échelle 1 : 1, permet d'évaluer les techniques de mise en œuvre des solutions en site occupé avec les élèves Compagnons du devoir qui réalisent une notice de montage des prototypes préfabriqués, intégrant les mesures des éléments à assembler, dimensionnés en fonction des rayons de braquages dans les circulations et les logements de l'immeuble Les Cèdres. Cette partie de l'expérimentation permet d'entrevoir les conditions de réalisation du chantier futur. En cela, l'expérimentation à l'échelle réelle permet aussi d'anticiper des problèmes susceptibles d'être rencontrés au moment du chantier. Outre les tests de mise en œuvre, les prototypes restent une année complète dans la loge du gardien afin que les habitants de l'immeuble puissent les tester à leur tour, permettant à l'équipe de recueillir leurs points de vue. Laisser les prototypes toute une année dans les locaux de l'immeuble permet également de réaliser des diagnostics pour évaluer leurs performances en hiver comme été. Ainsi, ces expérimentations offrent la possibilité de valider ou d'adapter

117. En partenariat avec les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, les Compagnons du Devoir de Villefontaine et de nombreux fabricants et entreprises.

les propositions avant le chantier définitif permettant de proposer une ou plusieurs solutions de réhabilitation définies le plus finement possible. Pour l'équipe et le conseil scientifique, l'expérimentation *in situ* offre également la possibilité de porter un regard critique sur les prototypes quant à leur difficulté de mise en œuvre, leur intégration à l'existant, ou encore leur aspect esthétique.

Ajoutons enfin que l'élaboration de prototypes a un coût non négligeable à l'échelle d'une opération de ravalement. Dans le cas présent, leur financement a été assuré, outre l'aide du ministère de la Culture, par l'investissement en temps des entreprises partenaires et des dons de matériaux. Même si l'investissement de ces prototypes semble élevé¹¹⁸, ils permettent de définir des solutions réellement adaptées à l'immeuble et des méthodes de mises en œuvre optimisées permettant de gagner du temps sur le chantier tout en évitant des erreurs.

La mise en œuvre finale dépend bien entendu de l'accord de la copropriété en ce qui concerne les menuiseries et la remise à l'état d'origine des panneaux et de chacun des propriétaires pour ce qui concerne l'ajout d'un doublage intérieur. Les habitants de la copropriété Les Cèdres ayant des moyens financiers hétérogènes, des solutions à différents budgets doivent être proposées ainsi que des phasages permettant aux habitants d'échelonner leurs dépenses. L'équipe définit le montage financier en prenant en compte les différences de revenus des habitants et en cherchant des subventions afin d'aider les copropriétaires à réhabiliter leurs façades et améliorer leurs conditions de vie. De plus, les solutions devant être mise en œuvre en site occupé, elles sont réalisées au moyen d'un chantier sec, propre et rapide tout en s'adaptant aux différents aménagements intérieurs des logements.

Il convient également de s'interroger sur le caractère transposable de la démarche initiée. La phase de conception dépendant en grande partie de l'existant, les solutions proposées peuvent être très différentes selon les cas étudiés. Au demeurant, la démarche globale peut s'adapter à des projets conduits soit par des copropriétaires soit par des bailleurs sociaux. Pour toute réhabilitation, il est primordial de travailler avec une équipe pluridisciplinaire alliant les compétences d'architectes, architectes du patrimoine, ingénieurs structure, thermiciens, acousticiens et d'entreprises spécialisées. Avant toute intervention, la phase la plus importante est celle du diagnostic. Le chapitre suivant présente les diagnostics menés par l'équipe de

118. La fabrication des trois prototypes (comprenant stores, doublages isolants, finitions, ossatures bois, rideaux acoustiques, pose, etc.) est revenue à près de 12 000 € à l'équipe en excluant le coût des menuiseries qui n'ont pu être réalisées. Ce montant n'inclut pas le coût des études pour élaborer les prototypes, mais uniquement celui des fournitures et de la pose.

recherche sur le cas d'étude de l'immeuble Les Cèdres. Les façades légères sont des enveloppes particulières, raison pour laquelle il semble préférable d'opter pour un équilibre des ambiances, une amélioration du confort des occupants, une réduction des consommations, tout en garantissant la conservation des éléments patrimoniaux et l'économie du projet. C'est cette ambition qui doit être tenue pour l'ensemble des projets de réhabilitation des façades légères. Cette recherche doit permettre, en outre, de définir un cahier des charges à destination des architectes et des professionnels de la construction, apportant des points de méthodologie et de vigilance sur ce type d'intervention en développant une attention spécifique aux questions d'acoustique et d'ambiances sensibles perçues par les habitants.

Chapitre 3 :

Les diagnostics, un préalable obligé pour l'analyse de l'existant

L'intervention sur un édifice existant exige d'en connaître les spécificités à travers une phase de diagnostics pluridisciplinaires. S'ajoutent ensuite, à ces premières données, un relevé précis et un carottage afin d'identifier la composition interne des panneaux. Ces relevés détaillés sont complétés par l'observation des caractéristiques techniques et mécaniques de l'édifice telles que son niveau d'isolation thermique et acoustique, son étanchéité à l'air, l'état de dégradation des menuiseries, des joints de dilatation et de sa ventilation naturelle. Ces diagnostics sont conduits par les bureaux d'études TRIBU et LASA. Après plusieurs campagnes de mesures, ils ont pu analyser les faiblesses des façades de l'immeuble Les Cèdres et prévoir l'incidence d'un éventuel ajout d'isolation sur l'équilibre des ambiances dans les logements. Un diagnostic amiante et matières toxiques des panneaux, réalisé à la demande de la Régie Franchet et C^{ie}, n'a révélé aucune pathologie particulière. Une étude des structures a également été réalisée afin de s'assurer de leur capacité à accueillir une nouvelle charge en cas de surisolation. L'étude des dalles et refends en béton a permis au bureau DECARE de valider leur capacité à accueillir les surcharges envisagées par l'équipe de recherche.

En complément de ces diagnostics techniques, un travail d'enquête et de consultation est mené auprès des habitants afin d'identifier leurs vécus ainsi que leurs attentes, au moyen d'interviews et de pratiques participatives d'observation dont les méthodes ont été initiées par les chercheurs du laboratoire AAU-CRESSON. Ces entretiens ont permis d'identifier les problématiques rencontrées par les habitants de l'immeuble, de définir les leviers d'intervention à étudier avec plus de précisions et finalement, de concevoir des solutions à partir de performances sensibles et plus seulement normatives. La partie suivante présente les modalités de mise en œuvre de ces diagnostics « habitants et ambiances vécues » ainsi que les enjeux qu'ils ont permis de soulever pour la réhabilitation des façades légères de l'immeuble Les Cèdres.

Partie 1 : Les ambiances vécues par les habitants¹¹⁹

1 – Qu'est-ce qu'un diagnostic « habitants et ambiances vécues » ?

a. Patrimoine et confort global

Ce projet de recherche a pour objectif d'améliorer les conditions de confort des habitants de l'immeuble Les Cèdres tout en préservant son caractère patrimonial. Pour cela, les conditions de confort actuelles des habitants doivent être analysées en détail. L'ambiance d'un lieu se définit par de nombreux facteurs, climatiques, d'ensoleillement, d'environnement sonore, d'occupation et d'usages. L'architecture d'un édifice peut faire varier les ambiances de celui-ci de manière considérable selon son degré d'ouverture sur l'extérieur, la composition de ses parois, les matériaux employés, les parements et finitions intérieurs, les occultations et autres équipements. Les diagnostics précédemment réalisés identifient l'influence des données factuelles que sont l'architecture, l'environnement, la thermique et l'acoustique sur les ambiances des logements de l'immeuble. Ces diagnostics caractérisent les ambiances et leurs disparités selon la situation des appartements dans l'immeuble. Une fois ces ambiances relevées, comment comprendre la perception qu'en ont les habitants ? Là réside toute la subtilité de la notion de confort qui se définit par la manière dont un usager perçoit des ambiances. La première motivation des français pour réaliser une rénovation ou réhabilitation de leur logement est précisément l'amélioration de leur confort¹²⁰. Dans ces conditions, il est du devoir des architectes et des maîtres d'œuvre de manière générale de veiller à répondre à cette demande fondamentale des usagers.

Dès les premières séances d'information avec les habitants, l'équipe de recherche a rapidement identifié une problématique majeure de confort thermique d'été. Les habitants souffrent des apports solaires importants en façade sud qui engendrent la surchauffe de leurs logements. L'équipe constate également d'importantes disparités entre les ressentis exprimés par les habitants des premiers niveaux de l'immeuble, qui se plaignent davantage du froid en hiver que leurs voisins des étages supérieurs. Lors de ces premiers échanges, les habitants sont en

119. Les questions posées en entretiens, les supports utilisés et les réponses des habitants sont disponibles en annexe 8.

120. Orso (Fabrice d'), *Rénovation, plus de 30 millions de logements*, Levallois-Perret, Editions PC, 2019, 111 p. ; Charlot-Valdieu (Catherine), Outrequin (Philippe), Peskine (Hélène), *Réhabilitation énergétique des logements*, Antony, Editions le Moniteur, 2018, 325 p.

revanche relativement unanimes sur la pénibilité des nuisances sonores liées à la circulation de la rue de la Favorite. Ces discussions informelles, qui peuvent avoir lieu lors de réunions ou à l'occasion de campagnes de relevés architecturaux, nourrissent les réflexions de l'équipe de recherche et servent à établir les cahiers des charges de la phase de diagnostics. Pour être tout à fait exhaustive, l'équipe souhaite également compléter ces échanges informels par des entretiens menés auprès de l'ensemble des copropriétaires, au moyen de grilles d'entretiens participatifs. Ces entretiens apportent des éléments d'appréciation qui viennent compléter les diagnostics scientifiques. Malheureusement, tous les habitants de l'immeuble n'ont pu participer aux entretiens. Un échantillon de sept habitants dont les situations socio-professionnelles sont représentatives de la mixité présente sur l'immeuble a été retenu. Il s'agit de six femmes et d'un homme. L'habitante A est une femme en activité qui vit seule avec ses enfants adolescents, elle est propriétaire d'un T5 au septième étage de l'allée C de l'immeuble depuis 2004. L'habitante B est retraitée et vit seule dans son appartement T4 au cinquième étage de l'allée B dont elle est propriétaire depuis 1989. Elle était auparavant locataire d'un appartement voisin depuis 1978. L'habitante C est également retraitée et locataire d'un appartement T3 au huitième étage de l'allée A dans lequel elle vit seule depuis 1993. L'habitante D est une femme en activité qui vit seule avec ses enfants adolescents dans un T4 du sixième étage de l'allée B dont elle est propriétaire depuis 2012. L'habitante E vit en famille, avec son mari et ses enfants, dans un T4 du troisième étage de l'allée B. En activité, elle est propriétaire dans cette résidence depuis 2013. L'habitante F vit depuis 2018, avec ses trois enfants dans un appartement T4 appartenant à son père et situé au quatrième étage de l'allée B. Enfin, l'habitant G est un homme vivant seul avec ses enfants. Architecte, il habite l'immeuble depuis 2015 d'abord en tant que locataire, puis il devient propriétaire d'un T3 au neuvième étage de l'allée A en 2017. L'objectif des diagnostics d'ambiances vécues est de recueillir les témoignages de ces habitants afin d'identifier les problématiques de confort qu'ils rencontrent dans le but de proposer des solutions pour les améliorer. L'idéal consiste à identifier tous les éléments permettant d'apporter des solutions adaptées aux différents ressentis des habitants, en proposant des solutions modulables, adaptables au cas par cas.

b. Diagnostics et entretiens

Les diagnostics d'ambiances vécues se traduisent par des entretiens semi-dirigés auprès des habitants de l'immeuble. Visant à recueillir leurs témoignages sur plusieurs aspects, les entretiens se décomposent en plusieurs questions réparties par thèmes. Les questions sont



Diagnostic ambiances vécues - Photographie 1
© Mathilde Padilla, 2018



Diagnostic ambiances vécues - Photographie 2
© Mathilde Padilla, 2018



Diagnostic ambiances vécues - Photographie 3
© SAAL



Diagnostic ambiances vécues - Photographie 4
© Mathilde Padilla, 2018



Diagnostic ambiances vécues - Photographie 5
© Mathilde Padilla, 2018



Diagnostic ambiances vécues - Photographie 6
© Mathilde Padilla, 2018



Diagnostic ambiances vécues - Photographie 7
© Mathilde Padilla, 2018

formulées pour permettre aux habitants de s'exprimer le plus librement possible sans être orientés dans leur propos. Pour faciliter ces échanges spontanés, les entretiens s'appuient sur des supports visuels et audios à commenter. Les entretiens ont été conduits par Mathilde Padilla. L'entretien commence par une question ouverte à l'habitant interrogé concernant une anecdote marquante de son vécu dans l'immeuble. Aucune réponse n'est attendue à l'avance, ces entretiens forment plutôt des partages d'expériences dans le but d'enrichir la connaissance de l'équipe sur l'immeuble et ses ambiances de vies. La première thématique couverte par le questionnaire d'entretien poursuit cette mise en abîme par l'historique du vécu de l'habitant dans l'immeuble. Cela permet à l'équipe de comprendre depuis quand l'habitant vit au sein de l'immeuble donc depuis quand il est confronté à ces ambiances. Ces premières questions permettent également de saisir les motifs qui a amené l'habitant à vivre dans cet immeuble, de recueillir ses premières impressions et de lui demander si celles-ci ont évolué dans le temps. Cela permet également d'aborder la question de l'avenir de l'habitant : se voit-il y rester ? Pour combien de temps ? Et pour quelles raisons ? Ces questions sont fondamentales pour évaluer le degré d'attachement des habitants à leur immeuble et pour en comprendre les raisons. Indirectement, cela permet de comprendre le rôle que jouent les ambiances dans le choix des habitants de rester vivre dans cet immeuble ou, au contraire, de le quitter. La seconde thématique porte sur l'aspect extérieur de l'immeuble Les Cèdres. Elle débute par l'observation de deux photographies (voir photographies 1 et 2 ci-contre). La première montre l'immeuble dans son contexte urbain direct, tandis que la seconde montre uniquement l'immeuble dans un champs rapproché.

Certains habitants réagissent immédiatement à l'observation des photographies et commencent à les commenter en traduisant leur ressenti sur cette architecture si singulière. D'autres réagissent davantage aux questions associées. Il est demandé aux habitants de formuler quelques mots clés pour décrire leur immeuble selon leur ressenti. Ensuite, les questions portent sur leur avis concernant son insertion urbaine dans le quartier. Puis, elles s'orientent davantage sur l'architecture insolite de la résidence en demandant aux habitants les réactions de leurs invités qui se rendent chez eux pour la première fois : ont-ils une réaction ? Sont-ils étonnés ? Qu'en pensent-ils ? Indirectement, les habitants en viennent à comparer ces points de vue extérieurs avec le leur, laissant se dessiner petit à petit leur sentiment envers l'immeuble. Enfin, il leur est demandé s'ils ont l'impression de vivre dans un immeuble offrant une véritable qualité architecturale. À l'issue de ces premiers échanges généraux sur l'aspect

extérieur de l'immeuble, l'équipe cherche à comprendre si les habitants sont conscients des modifications subies par les façades de l'immeuble lors du remplacement des fenêtres au coup par coup par les habitants, lors de l'ajout des bavettes et couvre-joints, etc. Deux photographies sont alors présentées, l'une datant des années 1970, peu de temps après la construction, et une datée de 2018 laissant apparaître l'ensemble de ces modifications (voir photographies 4 et 5 ci-avant).

Ensuite, un enregistrement d'un parcours allant de l'extérieur de l'immeuble jusqu'à un appartement est diffusé lors de l'entretien. Les habitants réagissent alors spontanément sur la moto qui circule, le bruit du portail, le moteur du bus qui redémarre, la cage d'escalier qui résonne, etc. Leurs réactions permettent de comprendre les gênes occasionnées par ces sons. La thématique suivante porte sur l'usage des loggias. Les loggias de l'immeuble sont aujourd'hui majoritairement fermées ; seules cinq d'entre elles restent encore ouvertes. Il semble pertinent d'identifier le besoin des habitants concernant ces loggias. Les questions portent alors sur les raisons qui poussent les habitants à modifier l'usage de ces espaces (augmenter la surface du logement, améliorer les conditions thermiques, etc.). L'équipe cherche également à connaître leurs projets pour leur loggia, pour anticiper d'éventuels travaux les concernant dans le cadre de la réhabilitation. Les questions s'orientent ensuite vers le sujet des fenêtres, des ouvertures et des occultations des appartements. La thématique débute par l'observation de trois photographies (photographies 5, 6 et 7 ci-avant) présentant trois modèles de menuiseries différents : une fenêtre d'origine, une fenêtre remplacée s'intégrant dans le dormant d'origine arrondi qui reste visible et une fenêtre remplacée dont le dormant d'origine est noyé dans l'épaisseur de la surisolation intérieure de l'appartement. L'objectif de l'équipe est de faire réagir les habitants sur le remplacement de ces fenêtres, l'augmentation de l'épaisseur des profils de menuiseries et la possible perte des angles arrondis depuis l'intérieur. En débattant sur les fenêtres, l'équipe interroge les habitants au sujet des vues, de la luminosité, de leur ressenti thermique à proximité des fenêtres : rayonnement, circulation d'air, etc. Concernant l'acoustique, des bandes sonores sont diffusées aux habitants, prises fenêtres fermées, fenêtres ouvertes ou fenêtres semi-ouvertes. L'objectif est de les faire réagir sur les nuisances auxquelles ils sont quotidiennement confrontés. Les questions suivantes portent sur les occultations, sachant que les panneaux d'origine n'intègrent pas de systèmes d'occultation, ni de protections solaires. Certains habitants optent pour des systèmes intérieurs leur permettant de se protéger du soleil au sud et d'occulter complètement les chambres au

nord. L'entretien s'appuie sur des photographies d'occultations mises en place par certains habitants. Ils sont ensuite interrogés au sujet du système qui leur semblerait le plus adéquat et il en va de même de la question du chauffage et de la ventilation de l'immeuble. La satisfaction des habitants est évaluée et ceux-ci sont interrogés sur les améliorations qu'ils aimeraient voir proposées pour ces équipements. Enfin, les dernières questions portent sur la vie nocturne de l'immeuble. Quels sont les besoins d'intimité des habitants la nuit ? Ont-ils besoin d'avoir le noir complet pour dormir ? Peuvent-ils ouvrir les fenêtres en été pour ventiler leur logement ou les nuisances sonores extérieures les en dissuadent ? L'ensemble des questions et supports doivent permettre à l'équipe de mieux comprendre les conditions de confort actuelles des habitants de l'immeuble Les Cèdres.

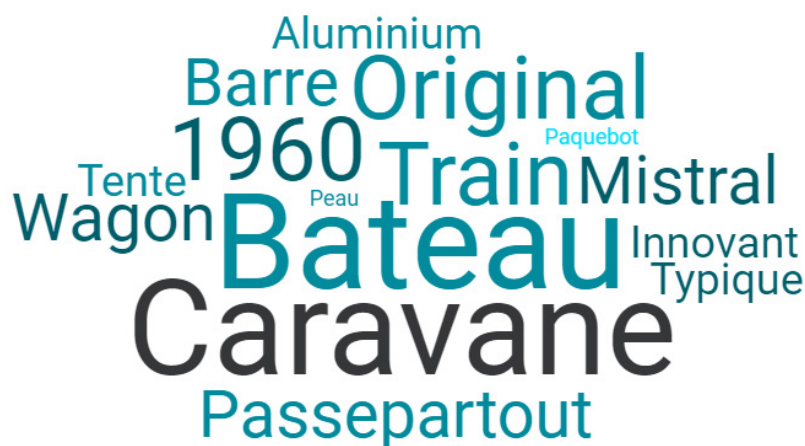
2 – Le ressenti des habitants

a. Quels regards sur leur immeuble ?

Les témoignages des habitants sur l'immeuble montrent que l'un des critères qui les attirent majoritairement pour y vivre est le quartier. C'est en tout cas ce dont témoigne l'habitante E qui visite d'abord l'appartement car il est situé dans un quartier plaisant. Puis, lors de la visite, elle est séduite par l'appartement et la possibilité d'y effectuer des travaux pour le personnaliser. C'est également un des arguments de l'habitante A qui, à la suite d'un changement de vie, est d'abord attirée par le quartier. Elle évoque avoir ensuite eu un réel coup de cœur pour l'appartement et sa facilité d'aménagement. Elle déplore en revanche les communs, trop petits et peu attrayants. Enfin, le rapport surface/prix de l'appartement est un argument qui achève de la convaincre d'investir. L'habitante D est également d'abord séduite par le quartier, puis a un coup de cœur pour l'appartement et la luminosité qu'il offre. Le budget est également un critère déterminant dans le choix de cette habitante. Pour les habitantes B et C, qui sont d'abord arrivées dans l'immeuble en tant que locataires, et qui rencontrent alors des difficultés pour trouver un logement, ce sont la disponibilité et le faible coût des appartements qui les ont incitées à s'installer dans l'immeuble. Il faut noter que l'habitante B, arrivée en 1978, s'est très vite plu au sein de l'immeuble et finit par devenir propriétaire en 1989. L'habitante C est quant à elle locataire depuis 1993 et compte rester au sein de son appartement. Ces deux cas montrent que les habitants s'attachent à leur logement dont ils évoquent le cachet. L'habitante F fait même part de sa fierté de vivre dans un immeuble moderniste à l'image de l'habitant

G qui est venu vivre dans cet immeuble parce qu'il s'agit d'un immeuble doté de panneaux Prouvé. Les critères portent donc sur le quartier, les qualités propres aux appartements, les questions de budget abordable et la signature Prouvé.

La première impression que les habitants ont de l'immeuble à leur arrivée est également très variable. Pour l'habitante B l'immeuble est « moche mais convivial ». Pour elle, son image est dure et peu esthétique. L'habitante E, quant à elle, assimile l'immeuble à une barre. En le nommant ainsi, l'habitante évoque les grands ensembles et tout l'imaginaire péjoratif qui leur est associé. Pour l'habitante A « les appartements sont supers mais les communs ne sont pas tops » ce qui lui permet de le qualifier d'immeuble « original mais pas de grand standing ». L'habitante C a en revanche une bonne impression de l'immeuble qu'elle qualifie de « grand immeuble moderne avec un appartement clair et traversant ». Selon l'habitante D l'immeuble est « lumineux et rigolo » et pour l'habitante F, il est « design et esthétique ». L'habitant G décrit l'immeuble comme suit : « Il est très beau. Sa matière et ses couleurs changent tout le temps, il se fond dans le ciel. D'ailleurs, les gens ne le voient pas ». Le nuage de mots cités par les habitants pour décrire l'immeuble Les Cèdres montrent son lien évident avec le design des moyens de transports du siècle dernier. L'architecture singulière de l'immeuble en aluminium, avec les fenêtres arrondies, évoque un environnement onirique, itinérant qui invite au voyage. L'architecture de l'immeuble crée une ambiance particulière qui séduit ses occupants qui ont tous témoigné de leur désir de rester dans l'immeuble. Tous en soulignent sa luminosité, ses plans bien conçus, son originalité et l'ambiance chaleureuse de la copropriété. Même les copropriétaires les plus réticents à l'esthétique de l'immeuble finissent par lui trouver un charme particulier.



b. Les usages de la loggia

Deux groupes se dégagent concernant l'usage de la loggia : les habitants ayant des loggias fermées, annexées au logement, dont ils sont satisfaits, et ceux ayant des loggias ouvertes sur l'extérieur qui leur conviennent également. Il semble que l'usage de la loggia soit une donnée propre à chaque habitant et à ses besoins. L'habitante A possède une loggia fermée, ouverte sur son salon. Au moment de son achat, elle se pose la question de sa réouverture vers l'extérieur, mais après des visites chez ses voisins, elle trouve l'environnement trop bruyant. Le bruit dérange l'habitante B et l'habitante C qui préfèrent toutes les deux avoir une loggia fermée pour s'en protéger. Celle-ci leur sert de jardin d'hiver, d'extension de leur salon et d'espace tampon pour réguler la température de leur logement, majoritairement en hiver et en intersaisons, la température de la loggia en été étant trop élevée. Certains habitants émettent néanmoins la possibilité de laisser la fenêtre de la loggia ouverte ainsi que la porte qui la sépare du salon pour faire circuler de l'air en été. Tous apprécient cette surface supplémentaire de leur logement dont ils peuvent adapter l'usage. L'habitant G emménage d'abord dans un logement de l'immeuble qui possède une loggia ouverte vers l'extérieur. Il l'utilise alors peu en hiver, mais la maintient constamment ouverte sur le salon en été. Il loge actuellement dans un nouvel appartement de l'immeuble dont il est devenu propriétaire et dont la loggia est fermée. Il apprécie cet espace de transition thermique aux usages variés. Il regrette seulement que le coulissant ne lui permette qu'une demi-ouverture et envisage d'équiper sa fenêtre de loggia d'une guillotine ou d'une menuiserie rabattable au plafond pour profiter d'une ouverture maximale. Les habitantes C et F préfèrent quant à elles conserver cet espace extérieur sur lequel elles font pousser des plantes, prennent le petit déjeuner, etc. L'habitante C, fumeuse, apprécie d'autant plus cet espace extérieur, mais souligne néanmoins l'utilité d'une fenêtre pour protéger sa loggia lors des intempéries.

c. Fenêtres, ouvertures et occultations

Dans un premier temps, les habitants sont amenés à échanger sur la question du remplacement progressif et généralisé des fenêtres d'origine par des nouveaux coulissants en aluminium à double vitrage et selon des modèles variés. À l'observation des photographies d'ensemble de la façade, les habitants remarquent l'effet mosaïque qui se dégage de ces remplacements et regrettent l'unité de la façade d'origine qui faisait la caractéristique de l'immeuble. Ils notent également que les nouvelles fenêtres paraissent plus petites, qu'elles « mangent » le vitrage et

la lumière. Pour l'habitant G, ces nouvelles fenêtres « ont fait du mal à la façade » et il déplore la diminution du rapport à l'extérieur induit par ces nouveaux modèles plus épais. En effet, les habitants décrivent les fenêtres d'origine comme moins massives, plus grandes, possédant plus de vitrage et offrant davantage de clair de vue. Elles leur donnent l'impression de ne pas avoir de fenêtres et d'être ouverts sur l'extérieur. En revanche, certains habitants trouvent qu'elles apparaissent plus fragiles, comme l'habitante C qui s'inquiète depuis le retrait des joints qui maintenaient les vitres de sa fenêtre. Elle craint que celles-ci ne se brisent sous l'effet des rafales de vent. Malgré cela, tous les habitants interrogés apprécient le dessin d'origine des fenêtres avec leurs angles arrondis et la finesse de leurs profils ; une forme plus plaisante qui donne beaucoup de charme à leur logement et fait paraître les fenêtres plus légères. Elles leur rappellent les fenêtres des trains. Les habitants font part de leur souhait de pouvoir conserver ces angles arrondis, même lors du remplacement des fenêtres et de l'isolation des panneaux. En effet, à l'observation des photographies présentées, nombre d'entre eux remarquent la perte de ces angles arrondis dans l'appartement sur-isolé par l'intérieur. Ils soulignent l'impression de ne plus être dans leur immeuble, mais dans un immeuble quelconque. L'idéal pour eux serait de retrouver le dessin des fenêtres d'origine avec les performances des nouveaux modèles. Ils évoquent également la sensation de vertige qu'ils peuvent ressentir à proximité de ces fenêtres aux dimensions importantes et dont les allèges descendent bas. Cette sensation est renforcée par l'extrême finesse des panneaux de façade. À l'usage, certains habitants font remarquer leurs difficultés pour nettoyer les fenêtres coulissantes, sur les anciens comme sur les nouveaux modèles. Leurs dimensions obligent à se pencher à l'extérieur pour nettoyer la surface vitrée. Certains font appel à des sociétés de nettoyage spécialisées et évoquent la possibilité d'avoir recours à ces sociétés de manière régulière à l'échelle de la copropriété. Les habitants les plus âgés font également part de leur difficulté à manipuler les coulissantes, neufs comme anciens, au vu de leur poids et du grippage qui peut se développer avec le temps. Enfin, une habitante révèle des nuisances sonores provoquées par la pluie sur les profilés, bavettes et couvre-joints rapportés sur la façade.

Concernant le confort thermique à proximité des fenêtres, tous les habitants évoquent une sensation de chaleur accrue en fonction de l'ensoleillement à proximité des fenêtres sud, pouvant devenir insupportable lors des épisodes caniculaires. Ils tentent tous de se protéger des rayonnements solaires à l'aide de stores intérieurs de modèles différents : voilages, stores toiles perforés, stores à lames en bois, stores à lames en aluminium, rideaux, etc. L'habitante B

confie avoir testé toutes les solutions possibles et même avoir cumulé plusieurs solutions sans y trouver réelle satisfaction. D'autres habitants trouvent satisfaisant l'usage de leurs stores à lames, mais précisent qu'en forte canicule, l'inconfort dû aux trop hautes températures est toujours bien présent. Tous privilégient, côté sud, des solutions d'occultations qui leur permettent de conserver la luminosité de leur logement à laquelle ils tiennent particulièrement. Lors des trop forts ensoleillements, ils se servent de leurs stores pour éviter l'éblouissement, mais souhaitent toujours laisser la lumière naturelle pénétrer l'appartement. L'habitant G évoque sa difficulté à trouver un modèle de store qui corresponde au style de la façade, tout comme l'habitante F. Il admet également avoir des difficultés à envisager l'ajout d'occultants sur la façade lisse de l'immeuble. Néanmoins, il avoue avoir besoin d'occulter ses fenêtres lors des périodes caniculaires. L'habitante C pense que des stores extérieurs pourraient solutionner le problème de confort, mais s'inquiète des nuisances sonores que ces stores pourraient causer par battement lors des journées venteuses. L'habitante B témoigne pour sa part de la difficulté, à son âge, de remonter ses stores manuellement et souhaiterait s'équiper de stores électriques.

Les habitants des étages inférieurs sont satisfaits de la proximité de la végétation du jardin, efficace pour réduire la sensation de chaleur et exercer un ombrage. Certains notent des courants d'air dans les fenêtres sud lorsqu'il y a du vent. Au nord, tous soulignent une sensation de froid à proximité des fenêtres et indiquent ressentir régulièrement un courant d'air. L'habitante E vit dans un appartement dont les menuiseries ont été remplacées par des fenêtres à double vitrage et dont les panneaux ont été isolés par l'intérieur. Elle ressent d'importants contrastes en été entre les fenêtres contre lesquelles la température est très élevée et les parties opaques de ses panneaux qui conservent une température raisonnable. Elle observe le phénomène inverse en hiver. Elle ajoute ressentir un courant d'air froid venant du bas du panneau en hiver, provenant probablement de l'appartement inférieur non isolé. Concernant les vues depuis leurs fenêtres, tous les habitants s'accordent sur la vue dégagée dont ils bénéficient côté nord. Au sud, les habitants des étages supérieurs sont également satisfaits de leur dégagement. Cet avis peut différer entre les habitants des étages inférieurs qui bénéficient d'une vue sur les arbres du jardin et ceux qui n'ont de vue que sur la route. Majoritairement, les habitants ne se plaignent pas du vis-à-vis. Côté nord, certains installent des rideaux ou stores opaques pour faire le noir complet la nuit, notamment dans les chambres des enfants. Certains ont pu être surpris de l'absence de volets sur cet immeuble, mais soulignent également l'absence

d'éclairage public nocturne côté nord pouvant causer des nuisances lumineuses. Ces stores opaques sont davantage utilisés pour empêcher le soleil du matin de réveiller les occupants. En revanche, certains habitants, qui ne possèdent pas de rideaux dans leur chambre, remarquent depuis peu une problématique de réglage au niveau de l'éclairage du parking et des garages de l'immeuble. Celui-ci s'allume de manière intempestive, son capteur pouvant être endommagé ou mal orienté. Il semble donc que les occultations soient utilisées côté sud pour le confort thermique d'été et l'éblouissement, et côté nord, pour améliorer le sommeil des occupants.

d. L'environnement sonore de l'immeuble

Lors des entretiens, les habitants sont unanimes sur les nuisances sonores qu'ils subissent. Certains y sont plus sensibles que d'autres, mais tous soulèvent cette problématique de bruit sourd et continu, même fenêtres fermées. La majorité d'entre eux indiquent une gêne plus élevée lors du passage d'une moto ou d'un bus, qui sont sources de nuisances plus importantes. Une habitante souligne sa difficulté à supporter cette vibration sonore constante, plus gênante que les bruits intérieurs momentanés. Les habitants remarquent des heures de pointes, le matin, puis le soir, avec plus de circulations de véhicules et les entrées et sorties de l'école voisine. Une habitante témoigne même de son besoin de monter le son de la télé en début de soirée, n'étant plus capable de l'entendre. Certains sont amenés à dormir côté sud pour laisser les chambres au nord à leurs enfants. Ils sont alors dérangés à plusieurs reprises dans leur sommeil. Les habitants font tous remarquer une accalmie entre minuit et cinq heures du matin, heures durant lesquelles les bus s'arrêtent de circuler. Il semble que les bus soient une source de nuisances supérieure aux autres véhicules. Le vent peut également être une cause de nuisances sonores qui est soulevée à plusieurs reprises. L'habitante B évoque sa déception concernant ses nouvelles fenêtres. Malgré les promesses du vendeur, elle entend toujours les bruits extérieurs. Ce phénomène peut s'expliquer par une transmission sonore au niveau des parties opaques des panneaux, mais aussi par la constitution du double vitrage, plus adapté au confort thermique qu'acoustique. Ces éléments devront être vérifiés lors des diagnostics acoustiques de l'immeuble. Tous les habitants s'accordent également sur le fait que les ambiances sont très différentes au nord et au sud. Le côté nord, où sont positionnées les chambres, est plus calme. Quelques habitants entendent cependant la circulation de l'avenue Barthélémy Buyer ou même de l'autoroute A6 et du tunnel de Fourvière. Concernant les transmissions sonores intérieures, les habitants de l'immeuble identifient deux points de faiblesses majoritaires : les gaines techniques, notamment celles des pièces d'eau, et les

portes palières. Plusieurs habitantes affirment entendre les conversations de leurs voisins depuis leurs salles de bains par exemple. Tous entendent les personnes qui discutent sur le palier ou montent les escaliers. Certains ont même changé leur porte d'entrée pour un modèle plus isolant afin de se protéger de ces nuisances. L'habitante B possède une seconde porte qui sépare son vestibule de son salon. Elle indique ne plus entendre les nuisances provenant des distributions verticales lorsque sa porte d'entrée et cette seconde porte sont bien fermées. Quelques-uns entendent les bruits de pas de leurs voisins, leur télévision, ou leurs conversations lorsqu'ils sont dans la loggia. Certains habitants remarquent qu'ils se sont habitués au bruit et que les nuisances leur deviennent de plus en plus supportables. C'est le cas notamment de deux habitants qui viennent d'immeubles situés dans des quartiers plus bruyants et qui trouvent cet environnement beaucoup plus calme. Il semble que les habitants développent une certaine résilience, si ce n'est une résistance, aux nuisances auxquelles ils font face. L'habitant G explique qu'il n'est pas forcément gêné d'entendre les bruits extérieurs. Il apprécie avoir l'impression de vivre dans une toile de tente, dans un logement ouvert sur l'extérieur.

Tous les habitants ne partagent pas cette envie d'ouverture sur l'extérieur et certains hésitent même à ouvrir leurs fenêtres la nuit en période caniculaire, les nuisances pouvant être trop importantes. Il est quasiment impossible de dormir fenêtres ouvertes au sud selon les habitants qui ont pu l'expérimenter. Néanmoins, tous avouent être contraints de procéder à cette ventilation nocturne en été pour leur confort thermique. Ils usent donc de différents stratagèmes. Les habitants qui supportent le mieux le bruit ouvrent leurs fenêtres au nord comme au sud, en bloquant les portes des chambres en position ouverte et exercent alors une parfaite ventilation nocturne. Ceux qui supportent moins le bruit venu du sud, n'ouvrent que la loggia côté sud et toutes les chambres côté nord. D'autres enfin n'ouvrent que côté nord réduisant considérablement la ventilation. Les habitants les plus sensibles aux bruits n'ouvrent que rarement la nuit et privilégient une ventilation en fin de soirée, puis tôt le matin. Globalement, tous soulèvent des problématiques de nuisances sonores, mais trouvent nécessaire la ventilation nocturne en été. Il est important de noter que tous les habitants profitent du caractère traversant de leur logement pour le rafraîchir la nuit et certains gardent même les fenêtres nord ouvertes plus longtemps dans la matinée pour réduire la température. L'habitante E, dont l'appartement est isolé par l'intérieur, indique une réduction considérable de leur inconfort thermique depuis leurs travaux. La chaleur intérieure n'est insupportable que

quelques jours dans l'année. En revanche, l'inconfort acoustique est toujours présent, bien qu'amoindri, et ce tous les jours. Cette habitante insiste pour que l'amélioration du confort acoustique soit impérativement prise en compte dans la réhabilitation, bien qu'il ne joue aucun rôle sur la baisse des consommations d'énergies.

e. Le chauffage et la ventilation

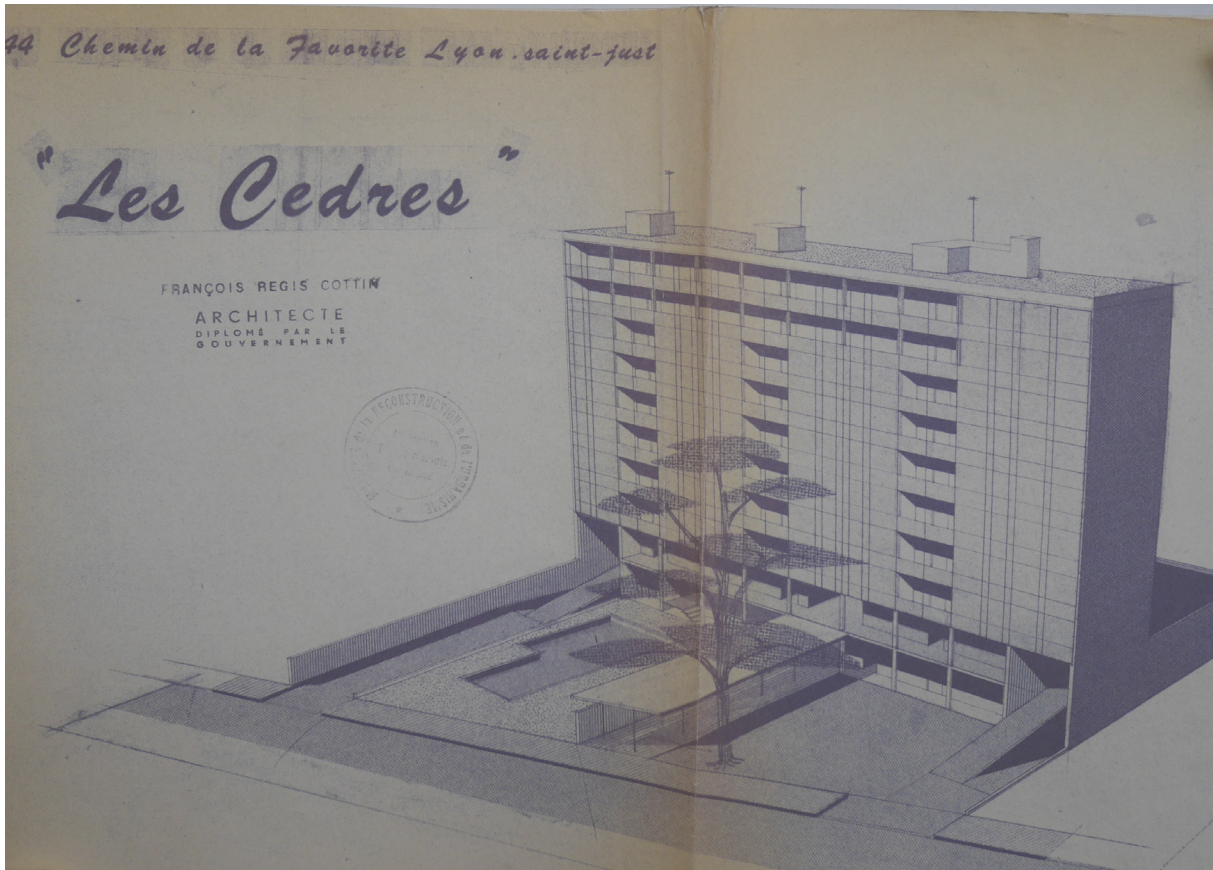
Concernant le système de chauffage de l'immeuble, tous les habitants notent qu'il fonctionne très bien, voire trop bien, puisqu'ils indiquent avoir trop chaud même en hiver. Seule l'habitante B, la plus âgée, dit trouver la température satisfaisante, la plupart du temps, et trop élevée uniquement les jours ensoleillés. Les températures trop élevées poussent les autres habitants à ouvrir leurs fenêtres même en hiver. Pour la plupart, cette surchauffe est irrationnelle et représente des consommations inutiles et aberrantes compte tenu du contexte climatique contemporain, et ce malgré des frais de chauffage qui restent peu élevés. Ils s'accordent sur la nécessité d'améliorer le réglage du chauffage de la résidence. Certains souhaiteraient pouvoir régler individuellement leur chauffage pièce par pièce, de manière adaptée selon les usages et horaires de la journée. Avec une gestion individuelle du chauffage et un compteur individuel, une majorité d'habitants pensent qu'ils feraient des économies en réduisant la température demandée la nuit et lorsqu'ils sont absents. Au contraire, les deux habitantes retraitées interrogées pensent qu'elles augmenteraient le chauffage certains jours, à certaines heures et dans certaines pièces comme la salle de bain, devenant de plus en plus frileuses. Les habitants sont conscients que la consommation globale de chauffage de l'immeuble pourrait être réduite avec un réglage plus adapté. Les ressentis étant assez différents d'un habitant à l'autre, un réglage individuel semble apporter une solution intéressante. Concernant la ventilation naturelle, elle semble convenir aux habitants qui la complètent par l'ouverture régulière de leurs fenêtres. Certains ajoutent des ventilateurs en été pour brasser l'air. Aucun d'entre eux ne constatent de condensation ni d'humidité à l'intérieur de leur logement. L'habitante F se dit rassurée de voir les entrées d'air en partie basse des panneaux de cuisine, étant persuadée que ses enfants n'ouvrent pas assez régulièrement les fenêtres. D'autres sont gênés par ces entrées basses qui soufflent de l'air froid au niveau des jambes, et préfèrent les obstruer. Certains réfléchissent à équiper les entrées et sorties d'air de filtres à poussières. L'habitante E indique avoir fait poser une VMC dans son logement au moment des travaux d'isolation intérieure qui rejette l'air directement dans les conduits existants. Il est évident que dans le cas d'un doublage intérieur amené à obstruer les entrées d'air, une réflexion doit être portée pour

l'amélioration du système de ventilation afin d'éviter tout risque pour la santé des occupants de l'immeuble. Cette donnée sera donc observée lors des diagnostics thermiques.

3 – Vers la définition d'un cahier des charges

Malgré la nécessité de relativiser les résultats obtenus (seuls sept habitants interrogés sur soixante logements habités), les entretiens permettent de prendre connaissance d'un certain nombre de données indispensables. Les habitants de l'immeuble Les Cèdres trouvent leurs appartements très fonctionnels et dans l'ensemble apprécient le caractère de cette architecture. Tous ne qualifient pas leur immeuble de beau, certains lui attribuent une image dure et datée, mais d'autres sont attirés par cette architecture rationnelle et métallique. Ils comparent leur immeuble à un moyen de transport, une caravane géante ou un paquebot dans la ville par son image et sa matérialité. Les habitants, même les plus réfractaires lors de leur première visite, finissent par apprécier cet immeuble unique en son genre. Ils vont même jusqu'à souligner la regrettable perte de 75 % des menuiseries d'origine de l'immeuble. L'unité d'ensemble des façades à leur construction les séduit, de même que la finesse et les angles arrondis des menuiseries Prouvé qui font, selon eux, le charme de leur immeuble. Ils notent la perte de clair de vitrage et de luminosité qu'induisent les nouveaux modèles de fenêtres aux profils plus épais. Ils ajoutent néanmoins que leurs problématiques de confort thermique et acoustique les obligent à améliorer leurs fenêtres. Tous font part de nuisances sonores provoquées par la circulation, majoritairement côté sud. Tous expriment également un besoin en protections solaires pour améliorer leur confort d'été et souhaitent néanmoins pouvoir conserver la luminosité qui leur est chère dans leurs appartements. Enfin, les habitants expriment le besoin de pouvoir régler le chauffage individuellement. Les personnes âgées sédentaires peuvent apprécier les températures élevées en hiver, mais les habitants actifs souffrent de cette trop forte chaleur, ce qui les pousse à ouvrir leurs fenêtres, même en plein hiver. Telles sont les principales données du diagnostic réalisé auprès des habitants qui permet d'identifier les points de vigilances à étudier lors des diagnostics thermiques et acoustiques à venir et de cibler les points prioritaires sur lesquels agir pour améliorer le confort des habitants. Leurs témoignages fixent le cahier des charges des diagnostics puis de la réhabilitation de l'immeuble.

Conjointement à ces diagnostics « habitants et ambiances vécues », l'équipe mène un diagnostic architectural et patrimonial de l'immeuble afin d'en connaître les caractéristiques physiques.



Vue générale de l'édifice, décembre 1956
 PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16

	Machinerie	Machinerie	Machinerie					
9	5.191 YB	3.290 III	4.190 IV	4.290 IV	5.192 YA	VI	6.290	25.33
8	5.181 YB	3.280 III	4.180 IV	4.280 IV	5.182 YA	VI	6.280	22.66
7	5.171 YB	3.270 III	4.170 IV	4.270 IV	5.172 YA	VI	6.270	19.99
6	5.161 YB	3.260 III	4.160 IV	4.260 IV	5.162 YA	I	5.260 YB	17.32
5	5.151 YB	3.250 III	4.150 IV	4.250 IV	5.152 YA	I	5.250 YB	14.65
4	5.141 YB	3.240 III	4.140 IV	4.240 IV	5.142 YA	I	5.240 YB	11.98
3	5.131 YB	3.230 III	4.130 IV	4.230 IV	5.132 YA	I	5.230 YB	9.31
2	5.121 YB	3.220 III	4.120 IV	4.220 IV	5.122 YA	I	5.220 YB	6.64
1	5.111 YB	3.210 III	4.110 IV	4.210 IV	5.112 YA	I	5.210 YB	3.97
R. de Ch.	Voitures d'enfants	Boxes. Boxes.	Entrée	Concierge Vélos	Chauffage	Passage		0.00
	Galerie technique							-2.7

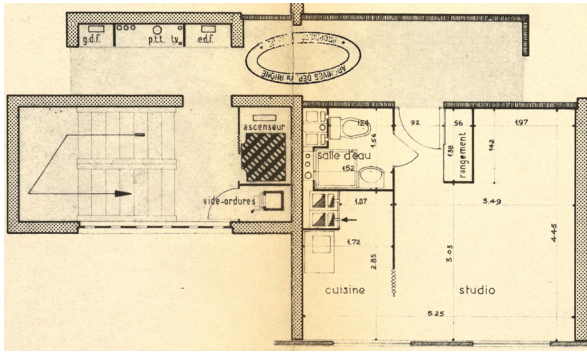
Assemblage par niveaux, D3, mars 1959
 PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16

Partie 2 : Le diagnostic architectural et patrimonial

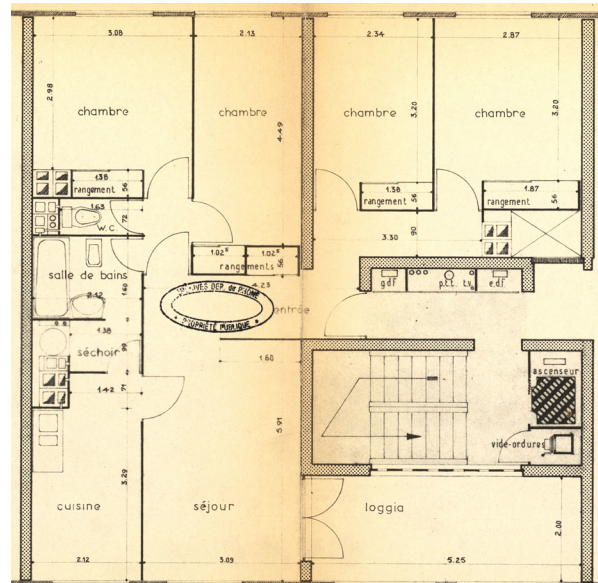
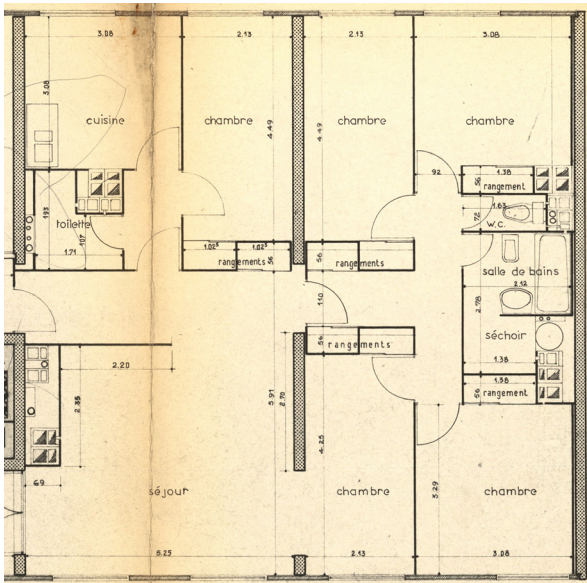
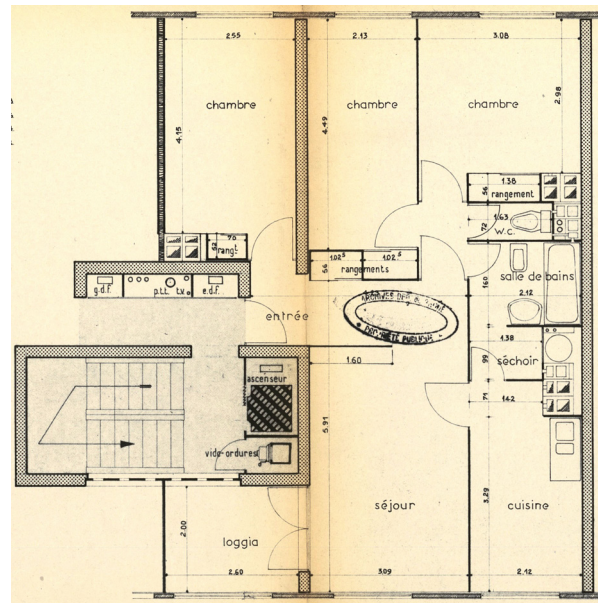
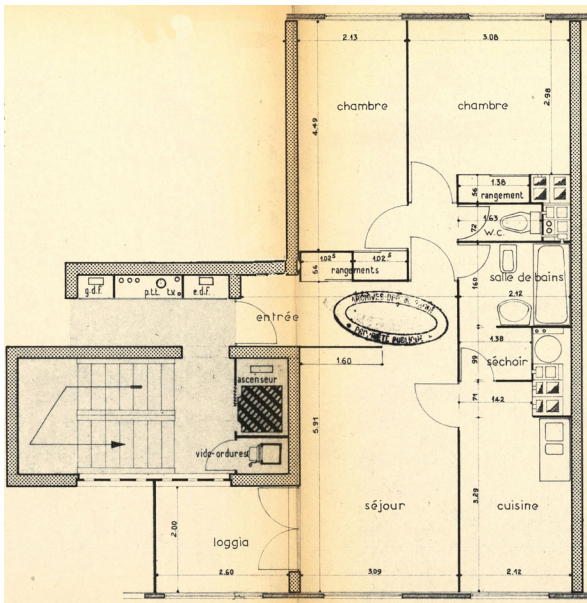
1 – Les investigations archivistiques

a. François-Régis Cottin

Le diagnostic architectural et patrimonial de l'immeuble Les Cèdres débute par la consultation des archives de François-Régis Cottin. La première consultation porte sur le permis de construire de l'immeuble disponible aux Archives municipales de Lyon. L'ensemble des plans, coupes et élévations nécessaires à la compréhension du projet y sont présentés, ainsi que deux versions différentes du projet. Les architectes Cottin, Chastel et Dallièrè font preuve d'une grande rationalité dans l'organisation spatiale de l'immeuble. Le rez-de-chaussée en double hauteur réunit tous les locaux communs (locaux poussettes, poubelles et vélos, chaufferie, caves, etc.) ainsi qu'un hall d'entrée commun traversant et le passage réservé aux voitures. L'immeuble est divisé en trois allées disposant chacune d'un hall de distribution verticale, dont la surface est réduite au minimum, comprenant escaliers, ascenseur et vide-ordure. La division en trois allées de l'immeuble est également valable pour les machineries et gaines techniques. Les allées déclinent également des typologies d'appartements différentes. La trame constructive régulière de 5,25 mètres entre refends structure l'ensemble. Le logement type qui constitue une trame complète est le T3. Pour les autres types, des chambres sont ajoutées dans la trame voisine au nord des distributions verticales. Les différents types sont alors combinés pour optimiser la trame. Les allées A et B sont constituées de trois trames structurelles. La trame centrale comprend, dans sa moitié sud, les loggias et distributions verticales. Dans l'allée A, les T3, sur une trame, sont couplés à des T5 sur deux trames. L'allée B se divise en deux T4 symétriques d'une trame et demie chacun. L'allée C, contrairement à ses voisines, comprend quatre trames structurelles. Dans les six premiers niveaux, les deux trames centrales de l'allée C contiennent, dans leur moitié sud, les distributions verticales, les loggias et un studio mono-orienté. Les deux trames latérales et les moitiés nord des deux trames centrales sont occupées par deux T5. Le premier dispose d'une double loggia, tandis que le second, en pignon, ne possède pas d'espace extérieur. Dans les trois derniers niveaux, le studio et le T5 en pignon fusionnent pour composer un T6. Cette combinatoire savante permet à l'immeuble de disposer d'une grande variété de typologies tout en conservant des standards permettant de rationaliser la construction. Les studios s'étendent sur vingt-trois mètres carrés. Dans les



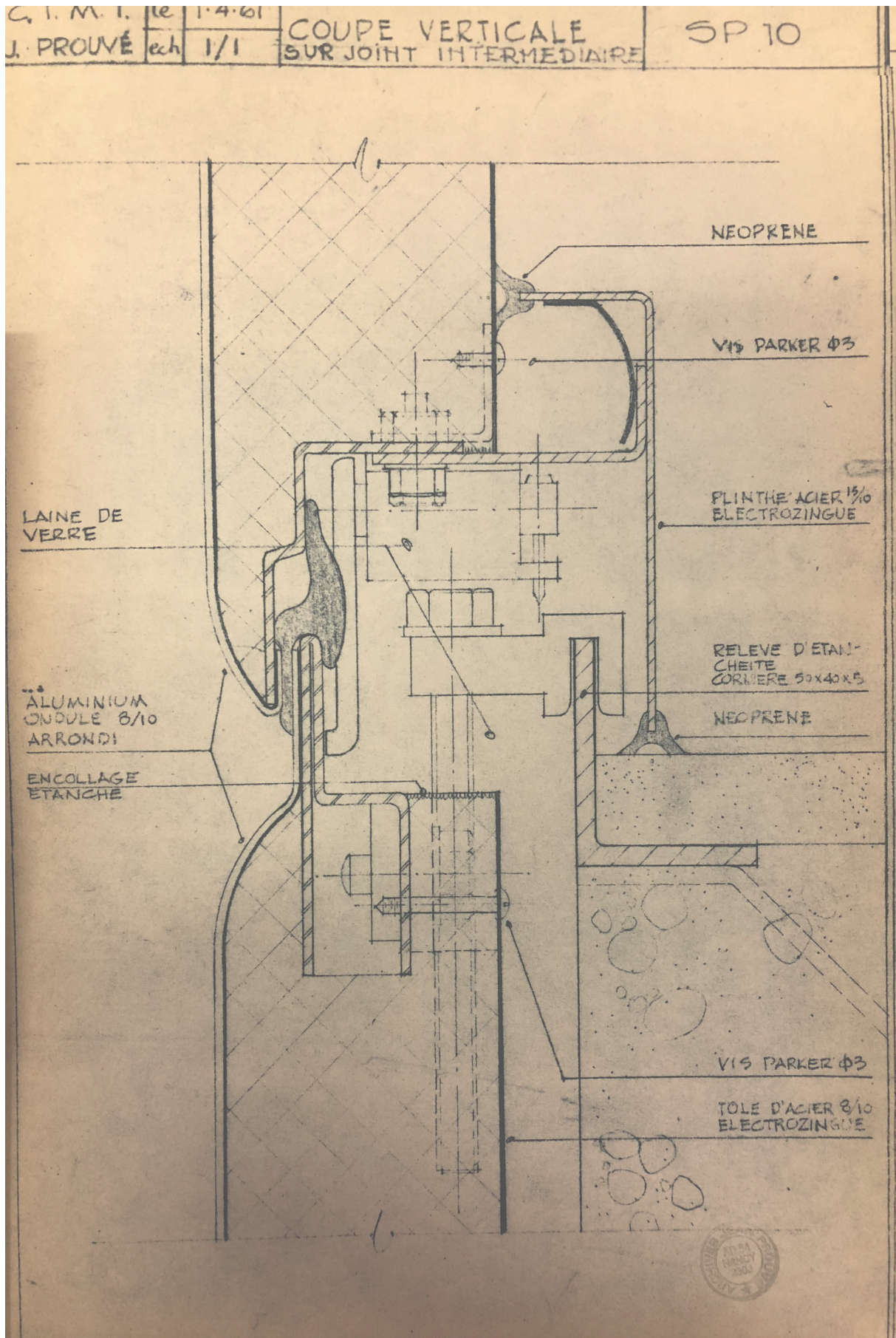
Plans des différentes typologies d'appartements



Plans des différentes typologies d'appartements
PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16

autres appartements, les séjours font dix-huit mètres carrés sauf dans les T6 où ils mesurent vingt-neuf mètres carrés. Les cuisines mesurent huit mètres carrés et neuf mètres carrés et demi dans les T6. En moyenne, les chambres font également neuf mètres carrés et demi. Les appartements de l'immeuble Les Cèdres sont très cloisonnés, mais l'architecte a fait le choix d'un système de cloisons démontables, déjà mis en œuvre à Bron-Parilly, qui permet de modifier le plan des appartements. Ces cloisons sont composées de deux contreplaqués bois entre lesquels se trouvent un remplissage en carton alvéolé. Les espaces de vies deviennent alors modulables. Certains habitants ont ouvert leur cuisine sur le séjour, d'autres ont supprimé une chambre pour rendre leur séjour traversant.

Dans le dossier de l'immeuble disponible aux Archives municipales de Lyon, des descriptifs sommaires des ouvrages et premiers estimatifs s'ajoutent aux documents graphiques. Ces documents rédigés permettent d'en apprendre davantage sur les techniques constructives, la matérialité des éléments qui composent l'immeuble et les systèmes techniques utilisés. On retrouve également une déclaration de travaux en date du 1^{er} avril 1999 concernant un ravalement de façade de l'immeuble par la société Champagne façades. Ce ravalement concerne la peinture des bétons des murs pignons, de l'acrotère et des murs apparents du rez-de-chaussée. L'immeuble étant situé dans un secteur sauvegardé, un avis de l'architecte des bâtiments de France est donné concernant la teinte, en consultation avec le coloriste de la Ville de Lyon. La teinte initialement prévue par l'entreprise est ainsi modifiée pour correspondre davantage au secteur. Néanmoins, la couleur ocre jaune choisie pose question quant à son rapport avec les parois en aluminium de l'immeuble. Quant aux façades en aluminium, celles-ci ne sont pas mentionnées, ni dessinées dans les documents du permis de construire. Il est précisé dans les descriptifs que les façades seront composées de panneaux avec allèges en aluminium et parties vitrées, mais il n'est fait aucune mention des panneaux sandwichs. Un document de 1983 se fait l'écho de travaux d'étanchéité réalisés sur l'immeuble notamment au niveau de la toiture terrasse, ainsi qu'un nettoyage des panneaux en aluminium et une reprise des joints verticaux de la façade. Ces travaux d'entretien ont été réalisés sous la direction de Cottin. La Société académique d'architecture possède également un fonds photographique de l'immeuble à sa livraison et dans la vingtaine d'années suivantes. Ces photographies permettent de prendre la mesure des premières modifications effectuées peu de temps après la livraison de l'immeuble, comme l'ajout de fenêtres coulissantes pour fermer les loggias.



Coupe verticale sur le détail d'assemblage entre deux panneaux superposés
© Centre Pompidou/MNAM-CCI/Réserve d'architecture/230J139

b. Jean Prouvé

Les fonds consultés au Centre Georges Pompidou ainsi qu'à la Bibliothèque Kandinsky ont apporté une documentation importante sur les panneaux sandwich de l'immeuble avec coupes horizontales et verticales, élévations, plans et notices de montage. On apprend en particulier que ce type de panneau a fait l'objet d'un brevet déposé par Prouvé au sein de la Compagnie industrielle du matériel de transport. Les panneaux sont constitués d'une tôle extérieure en aluminium ondulé, d'une paroi intérieure en tôle d'acier électrozingué ou en contreplaqué bois, entre lesquelles s'insère un isolant dont la nature n'est pas précisée. Les archives permettent de comprendre également la technique de montage de la façade : un premier panneau est monté en tableau et s'accroche sur une cornière en acier réservée dans la dalle de béton supérieure de la structure primaire de l'édifice. Il se verrouille ensuite en partie basse sur une autre cornière dans la dalle inférieure, grâce à une pièce dite « batteuse » qui se rabat sur celle-ci. Le panneau suivant est posé à l'étage au-dessus selon le même procédé, sa partie basse se verrouillant, grâce à la pièce batteuse, sur le panneau inférieur. Latéralement, les panneaux coulissent sur une cornière en acier encrée sur les refends grâce à une cheville. Il peut y avoir plusieurs panneaux par trame structurelle du bâtiment. Dans ce cas, seuls les panneaux situés aux extrémités sont attachés sur ces cornières, puis les panneaux sont assemblés entre eux par l'intérieur grâce à une barrette qui pivote dans leurs rails latéraux, les bloquant en position. Cette même pièce d'assemblage compresse un joint néoprène d'étanchéité depuis l'intérieur, grâce à un système de ressort. L'ensemble est masqué par un couvre-joint intérieur en aluminium avec fourrure en contreplaqué. Les panneaux sont raidis par des profils en U en acier positionnés dans leur épaisseur, formant un cadre périphérique aux panneaux ainsi qu'aux menuiseries. Les menuiseries sont également détaillées : le dormant en aluminium y est représenté ainsi que les profils des coulissants. Ces dessins, particulièrement précis, se révèlent extrêmement précieux pour la compréhension des éléments de façades et du système d'assemblage. Ces informations sont complétées par les archives photographiques du chantier de l'immeuble, mais également d'autres chantiers utilisant les mêmes panneaux. Pour autant, les principes de compositions et d'assemblages du panneau présentés dans le cadre du brevet restent génériques et ne permettent pas de connaître la composition exacte des panneaux de l'immeuble lyonnais.

2 – Les relevés et les observations sur site

a. Redessiner l'existant¹²¹

Les données archivistiques sont immédiatement vérifiées grâce à un relevé précis de l'existant ; les parties visibles des panneaux étant mesurées et redessinées. Les dimensions extérieures et intérieures sont mesurées, les profils des menuiseries sont relevés au peigne et redessinés sur place. Un coulissant en aluminium est même démonté, puis remonté, pour prendre la dimension des feuillures et vitrages. Cette opération permet également de mieux comprendre la technique de montage des menuiseries d'origine. Ces relevés permettent d'identifier pas moins de cinq types de panneaux présents sur l'immeuble et de les répertoriés par appartement. Certains appartements sont visités pour constater des modifications réalisées par les habitants, comme une surisolation intérieure, le changement des menuiseries par des menuiseries coulissantes en aluminium à double vitrage du commerce, l'installation de doubles fenêtres ou encore de protections solaires intérieures. Ces visites permettent également de constater que la paroi intérieure des panneaux de l'immeuble Les Cèdres est en contreplaqué bois pour les panneaux courants et en aluminium ondulé pour les panneaux de loggias. À première vue, les panneaux de l'immeuble Les Cèdres correspondent aux détails techniques observés sur les documents des archives du Centre Pompidou. Néanmoins, tous les éléments ne sont pas visibles, les assemblages entre deux panneaux horizontaux étant cachés par des couvre-joints et les assemblages verticaux étant masqués par une plinthe en bois cintré. Chez certains habitants, la plinthe est démontée ce qui permet d'observer ces assemblages de manière ponctuelle. Pour avoir une connaissance exacte des panneaux et de l'ensemble de leurs assemblages, des investigations supplémentaires ont été menées comme le démontage partiel ou complet d'un panneau pour l'étudier. De plus, les détails techniques semblent indiquer que les panneaux ne peuvent être démontés que du haut vers le bas : les panneaux supérieurs étant clipsés sur les panneaux inférieurs. Enfin, il semble nécessaire de démonter les panneaux d'une trame structurelle complète selon ces mêmes détails, le lien entre deux panneaux voisins semblant être le seul garant de la rigidité d'une trame de façade. Dans le cas de l'immeuble Les Cèdres, deux panneaux attenants composent une trame structurelle.

121. L'ensemble des relevés de l'existant sont présentés dans le volume de dessin joint au manuscrit.

Les relevés réalisés dans le cadre du diagnostic architectural et patrimonial ne se sont pas limités aux panneaux de façades. L'ensemble du bâtiment doit être analysé. Cette connaissance est d'autant plus nécessaire dans la perspective des diagnostics thermiques et acoustiques. Les surfaces des appartements et des différentes pièces sont ainsi relevées, ainsi que la composition et les épaisseurs de l'ensemble des éléments constituant l'enveloppe, y compris les parois en béton ou briques de mâchefer et les cloisonnements intérieurs. Le diagnostic architectural et patrimonial permet également d'établir un historique complet des travaux et des modifications réalisés sur l'immeuble depuis sa livraison. C'est ainsi que les relevés *in situ* ont permis de constater l'inefficacité des bavettes horizontales et des couvre-joints verticaux posés au début des années 2000. Ces éléments de profil plat ont nécessité la pose d'un mastic pour combler les vides avec les ondulations des panneaux en aluminium. Ces bavettes de finition matte, différente de l'aluminium d'origine, quadrillent l'immeuble et nuisent sensiblement à sa physionomie originelle. Il en va de même des modèles différents de menuiseries. Si toutes les modifications intérieures réalisées par les habitants n'ont pu être répertoriées, les visites effectuées permettent de constater de nombreuses modifications : dépôt d'une cloison entre la cuisine et le séjour, extension du salon sur la loggia elle-même isolée depuis l'intérieur, dépôt d'une cloison entre une chambre et le séjour pour rendre celui-ci traversant, aménagement de cuisines équipées, doublage isolant, installation de doubles fenêtres, etc. ; autant de transformations qui confirment la nécessité de proposer des solutions de réhabilitation pouvant s'adapter à des configurations différentes.

b. L'état sanitaire de l'immeuble

Les observations sur site réalisées dans le cadre du diagnostic architectural de l'immeuble Les Cèdres ont également vocation à vérifier son état de conservation. En premier lieu, les structures de l'immeuble sont observées. L'ajout d'un doublage isolant intérieur pouvant augmenter les charges au-devant des nez-de-dalle, il est important de s'assurer qu'elles peuvent le supporter. Au premier abord, les structures béton de l'immeuble semblent être en bon état général. Elles ne présentent pas de fissures ou de déformation. La finesse des dalles de 17 centimètres, reprises tous les 5,25 mètres par des refends, ne permet pas de leur ajouter une surcharge trop élevée notamment au niveau des nez-de-dalle ou en porte-à-faux. Un bureau d'étude structure a été consulté pour calculer la surcharge susceptible d'être engendrée par l'ajout d'un doublage avec ossature bois et isolant en fibre de bois de quatorze centimètres. Les parements extérieurs de l'immeuble possèdent des traces d'usures normales. Les bandeaux présentent



Altérations en façade
© Mathilde Padilla, 2018



Reprise maladroite de l'étanchéité des panneaux
© Mathilde Padilla, 2019



Infiltrations d'eau dues à l'absence d'étanchéité des loggias
© Mathilde Padilla, 2019

quelques épaufrures en partie basse. Des traces de saletés et de pollution sont observées sur les bétons des garages. Le revêtement des panneaux en aluminium est globalement en bon état, mais présente des coulures au droit des extrémités des bavettes, et quelques traces sous les menuiseries. Un nettoyage des panneaux permettrait de leur redonner un aspect uniforme. Quatre panneaux de la façade sud de l'allée C, au premier et deuxième étage, au niveau des loggias des T5 et cuisine des studios, présentent des ondulations. L'aluminium s'est dilaté sur ces panneaux sous l'effet de la chaleur due à un incendie ayant eu lieu sur l'un des arbres du jardin. Sur ces panneaux, l'étanchéité devra être particulièrement vérifiée. En dehors de ces quatre exceptions, les panneaux en aluminium des façades de l'immeuble ne se sont pas ou peu dégradés dans le temps.

En revanche, les joints néoprènes positionnés dans les joints creux entre les panneaux ont séché en raison des apports solaires côté sud et sont devenus friables. De plus, les parois lisses du mur-rideau favorisent le ruissellement des eaux de pluie qui affecte d'autant plus les joints. De ce fait, ils ne sont plus en pleine capacité d'assurer l'étanchéité de la paroi. Cette problématique de pérennité des joints souples se retrouve également sur les joints périphériques des châssis de fenêtres, pouvant aller jusqu'à créer des infiltrations d'eau chez certains habitants. Les couvre-joints et bavettes horizontales, mises en place pour répondre à cette problématique d'étanchéité, n'ont pas rempli pleinement leur mission et ont engendré des percements dans les panneaux en aluminium qui peuvent générer de nouvelles infiltrations. Mais leur dépose, pour retrouver l'image originelle de l'édifice, peut générer des changements d'aspects, les parties couvertes par ces profilés n'étant plus exposées au soleil et intempéries, et révéler les percements. Avant d'envisager une telle dépose, il convient de s'assurer de la capacité à réparer les percements et à retrouver un aspect uniforme de l'aluminium. De plus, le diagnostic révèle la nécessité d'envisager le remplacement de l'ensemble des joints néoprènes de la façade. Des solutions de joints souples respectant le dessin d'origine de la façade doivent être envisagées. Les joints n'étant plus accessibles depuis l'intérieur, masqués par les couvre-joints et assemblages entre panneaux, ainsi que par les ajouts d'isolant ou de parements de finition des occupants de l'immeuble, les solutions proposées doivent s'appliquer depuis l'extérieur. Les menuiseries d'origines conservées peuvent également présenter des traces d'usures. Certains de leurs joints se sont retirés n'assurant plus la bonne étanchéité du panneau. Dans certains cas, le vitrage, insuffisamment maintenu dans le profil en aluminium, est fissuré ou cassé. Une restauration de ces menuiseries est à envisager incluant le remplacement des

joints et des vitres abîmés. Ces menuiseries, garantes de la qualité architecturale de l'édifice et éléments à forte valeur patrimoniale, doivent être également conservés en toute priorité. Des problèmes d'infiltration d'eau sont également constatés au niveau des loggias. En effet, ces espaces, prévus pour être ouverts sur l'extérieur, ne possèdent pas de revêtement d'étanchéité. La dalle béton est apparente. Ces dispositions ne posent pas de problèmes à la construction du bâtiment puisque les loggias, superposées les unes aux autres, sont des espaces extérieurs au sein desquels la transmission d'eaux pluviales n'est que peu dérangeante. Aujourd'hui, certains habitants ont transformé leurs loggias en espaces habitables, les eaux de pluie ou d'arrosage des plantes de la loggia supérieure peuvent alors s'écouler dans leurs séjours et détériorer leurs intérieurs (peintures, mobiliers ...). Il semble préférable d'envisager d'étancher les sols des loggias encore ouvertes et d'inclure dans le règlement de copropriété l'obligation de réaliser cette étanchéité dans le cas de la réouverture d'une loggia. Malgré ces quelques constats, principalement dus à l'usure normale de l'édifice et à certains changements d'usages, la résidence a été régulièrement entretenue par la copropriété et se trouve aujourd'hui dans un état général satisfaisant.

3 – Les sondages

a. Le diagnostic amiante et matières toxiques

Dans le cadre du diagnostic architectural, des sondages sont réalisés dans un panneau pour effectuer le diagnostic des matières toxiques. Un bureau d'étude, missionné par la régie Franchet, réalise un percement dans un des panneaux de la loge du gardien. Cet appartement vacant de l'immeuble appartient à la copropriété et sert aujourd'hui de local au conseil syndical. Après divers échanges avec la copropriété, celle-ci propose de réaliser les diagnostics et expérimentations sur les panneaux de la loge conservés dans leur état d'origine, à condition d'une remise en état. Le diagnostic amiante et matières toxiques est réalisé en mai 2018 par l'entreprise Agenda diagnostics. Un carottage est effectué dans le panneau et permet d'identifier l'isolant en polystyrène. Une partie du panneau est prélevée, comprenant du contreplaqué, l'isolant polystyrène et les colles utilisées dans la composition du sandwich. Le prélèvement est ensuite envoyé en laboratoire. Les analyses concluent à l'absence de matières toxiques dans les panneaux sandwichs. Néanmoins, des diagnostics de matières toxiques plus approfondis sont à effectuer au niveau des joints et des menuiseries. Les archives mentionnent l'usage de joints

néoprènes qui ne contiennent pas d'amiante. Le carottage réalisé dans le cadre du diagnostic amiante permet de visualiser l'intérieur du panneau, de mesurer l'épaisseur du contreplaqué, de l'isolant et de la feuille d'aluminium ondulé et met en évidence la technique utilisée pour maintenir les éléments qui composent le sandwich. L'isolant en polystyrène est collé sur la paroi en aluminium, puis le contreplaqué est collé à son tour sur le polystyrène. La colle utilisée, non identifiée, offre un excellent maintien et rend difficile le retrait du polystyrène. Les éléments constitutifs du sandwich sont rendus solidaires sur toute leur surface grâce à l'emploi de cette même colle. Ce constat élimine l'hypothèse de réhabilitation qui consiste à démonter la paroi intérieure du panneau, curer l'isolant existant pour le remplacer par un isolant plus performant de même épaisseur et refermer le sandwich. Cette solution a pour avantage de ne pas augmenter l'épaisseur du panneau et de ne pas réduire la surface habitable intérieure. Elle ne peut être mise en œuvre dans ce cas de figure où le collage assure la liaison entre les éléments. Seuls les sondages garantissent la connaissance de la constitution réelle du panneau, c'est pourquoi, à l'instar du carottage réalisé dans le cadre du diagnostic amiante, d'autres percements ont été ensuite effectués dans les panneaux pour mettre à jour leurs assemblages et les raidisseurs intérieurs des sandwiches.

b. Carottages et démontage partiel

Avec l'autorisation de la copropriété, l'accompagnement du bureau DECARE et de l'entreprise KCM, une journée de chantier est organisée sur site pour réaliser des carottages et un démontage partiel sur les panneaux de la loge. Dans le but de détériorer le moins possible les panneaux, un détecteur de métaux est utilisé pour repérer l'emplacement des raidisseurs et des pièces d'assemblages des panneaux. Le détecteur est choisi pour capter les métaux situés à cinq centimètres de son capteur afin qu'il n'identifie pas de manière continue la présence de la paroi en aluminium extérieure. Les repérages sont ensuite dessinés à même le panneau avec un tracé de la découpe à effectuer (voir ci-après). Des percements sont prévus au croisement entre un raidisseur horizontal et un raidisseur vertical au droit des menuiseries (P1) ; entre un raidisseur horizontal de menuiserie et un raidisseur vertical périphérique du panneau (P2) ; au niveau des assemblages latéraux, avec la structure primaire en béton armé (P3) et entre panneaux (P4) ; au niveau des assemblages bas entre les panneaux et la dalle inférieure (P5). Les sondages P1 permettent de constater la position de raidisseurs horizontaux sous et sur la menuiserie du panneau, entre lesquels s'insèrent deux raidisseurs verticaux qui forment alors le cadre sur lequel s'appuie le dormant en aluminium de la menuiserie. Ces raidisseurs



Sondage amiante
© Mathilde Padilla, 2019



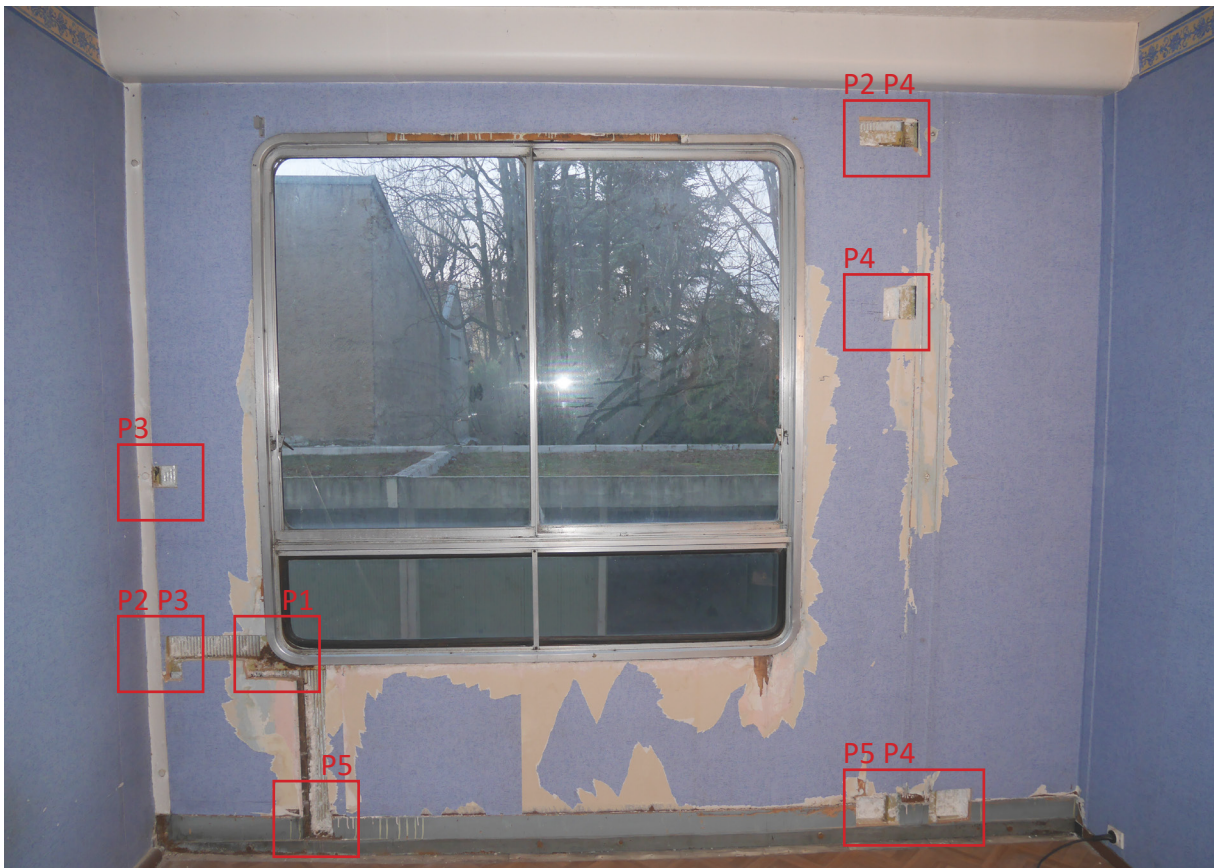
Raidisseurs des panneaux en acier
© Mathilde Padilla, 2019



Assemblage vertical entre deux panneaux juxtaposés
© Mathilde Padilla, 2019



Raidisseurs des panneaux en acier
© Mathilde Padilla, 2019



Ensemble des percements réalisés dans les panneaux
© Mathilde Padilla, 2019

sont des profils en U en acier de quarante millimètres. Les pièces en acier s'appuient contre l'aluminium, au nu extérieur du panneau. Les ailettes des U se tournent dans le sens opposé de la menuiserie pour que les parties pleines puissent servir d'appui au dormant. Le percement P2 permet de constater que les raidisseurs des menuiseries et les raidisseurs périphériques du panneau ne se situent pas au même nu dans l'épaisseur du panneau. Tandis que les raidisseurs des menuiseries sont au nu extérieur, les raidisseurs périphériques sont au centre du sandwich, les ailettes tournées vers l'extérieur du panneau pour servir de rails d'accueil aux cornières d'assemblages encrées dans le béton des dalles et refends, ainsi qu'aux barrettes d'assemblage entre deux panneaux, comme observé dans les percements P3, P4 et P5. Ces assemblages sont tous boulonnés depuis l'intérieur.

Les sondages confirment les techniques d'assemblages dessinées dans les documents d'archives et permettent de mieux comprendre le fonctionnement de l'assemblage central entre deux panneaux. Une pièce plate en acier comprime un joint néoprène souple vers l'extérieur. Cette pièce est elle-même comprimée sur le joint souple grâce à un « ressort » métallique en forme de point d'interrogation, maintenue contre la pièce par une barrette qui pivote pour s'insérer dans les rails des raidisseurs périphériques des panneaux et les bloquer ainsi en position. La barrette est montée sur un boulon qui est serré depuis l'intérieur et permet également d'assembler le couvre-joint sur les panneaux. Dans la conception de Prouvé, chaque pièce a plusieurs usages. L'emploi de chaque boulon ou chaque profil acier est optimisé. La mécanique des panneaux est complexe mais permet un montage d'une fascinante simplicité avec pour seule manipulation le serrage des boulons au niveau des assemblages.

La seconde partie de l'opération est dédiée au démontage partiel de la menuiserie d'origine du panneau. L'objectif est de comprendre comment sont montées les fenêtres sur les panneaux, de relever l'ensemble des profils de manière détaillée et d'observer chaque composant dans le but d'anticiper la restauration des menuiseries. Dans un premier temps, deux pièces en L situées en partie supérieure de la fenêtre sont démontées permettant de retirer la cornière en aluminium de finition qui couvre l'ensemble du dormant depuis l'intérieur. Une fois cette cornière retirée, le dormant est entièrement visible. Il est en deux parties quasi continues sur le pourtour de la fenêtre et constitué d'un profil en aluminium complexe intégrant des reliefs, formant des rails sur lesquels couissent les ouvrants, la goutte d'eau pour l'étanchéité de l'ensemble et l'évacuation de l'eau qui arriverait à s'infiltrer. Les coulissants sont eux-mêmes constitués de profils creux pour recevoir les rails du dormant d'un côté et le vitrage de l'autre. La

partie coulissante est composée de trois pièces en aluminium assemblées. Le vitrage coulisse dans les deux premières, puis l'ensemble est refermé par la dernière pièce, montant central de la fenêtre. La traverse horizontale de la fenêtre a un profil identique au dormant, elle est maintenue en son centre par un appui vertical qu'il est nécessaire de dévisser pour autoriser un jeu dans la fenêtre qui permet de démonter les parties coulissantes. Le vitrage en allège semble être seulement maintenu par un joint au nu extérieur du dormant. Les vitrages qui équipent la menuiserie d'origine ne font que trois millimètres d'épaisseur. Ils sont insuffisants tant sur le plan thermique, qu'acoustique, qu'en terme de sécurité pour les allèges. La partie fixe en allège semble pouvoir être facilement remplacée par un double vitrage sécurité plus épais. En revanche, les feuillures des profils des coulissants ne peuvent porter un vitrage plus épais. Il est donc nécessaire de remplacer l'ensemble du coulissant si l'intégration d'un double vitrage à ces menuiseries est envisagée. Les solutions imaginées doivent évidemment répondre aux enjeux des différents diagnostics, mais également respecter le dessin d'origine des profils. L'opération permet également d'identifier la méthode à adopter pour remplacer les joints retirés des fenêtres ou un vitrage cassé dans le cadre d'une restauration. Cette journée d'étude sur les panneaux a permis de confirmer avec certitude leur composition et méthodes d'assemblages. Cette connaissance technique exhaustive est essentielle pour définir des solutions et des process à adopter pour la restauration des panneaux et de leurs huisseries. Les diagnostics se poursuivent ensuite par la recherche des données techniques relatives aux ambiances thermiques et acoustiques de l'immeuble.

Malgré les modifications qu'ils ont subies et leur altération par le temps, les panneaux de l'immeuble Les Cèdres sont globalement dans un bon état de conservation qui ne fait qu'augmenter leur valeur patrimoniale. Leur restauration permettrait de pérenniser l'un des derniers témoignages du travail de Prouvé sur l'habitat moderne et les méthodes de construction préfabriquées. Attentive à la préservation de ce patrimoine, l'équipe envisage rapidement de conserver les panneaux de l'immeuble et cette dernière décision oriente la conduite des diagnostics thermiques et acoustiques qui ont pour principal objectif de caractériser les capacités actuelles des panneaux, tout autant que les systèmes de chauffage et de ventilation de l'immeuble, et ainsi envisager des interventions de préservation et de réhabilitation adaptées.

Partie 3 : Les diagnostics thermiques¹²²

1 – La thermique d'été

Les premiers constats issus des diagnostics « habitants et ambiances vécues » et du diagnostic architectural et patrimonial incitent l'équipe à s'intéresser prioritairement au confort thermique d'été. Ainsi, la première campagne de mesures a pour objectif de caractériser le comportement de l'immeuble face aux températures estivales et épisodes caniculaires de plus en plus fréquents. Dans un premier temps, les températures extérieures sont mesurées sur une période chaude durant une quinzaine de jours, du 20 juin au 4 juillet 2018. La période la plus significative, du 30 juin au 3 juillet 2018 est particulièrement étudiée. Les mesures extérieures sont complétées par des mesures intérieures dans trois appartements différents et des mesures de températures de surfaces qui permettent de mieux cerner l'inconfort pouvant être ressenti par les habitants. Ces trois appartements sont choisis comme représentatifs de l'ensemble des situations de l'immeuble. Ainsi, le logement A est un appartement conservé dans ses dispositions d'origine (pas de surisolation et des menuiseries d'origine équipées de simple vitrage), le logement B possède de nouvelles menuiseries à double vitrage et le logement C est entièrement rénové avec un léger doublage isolant intérieur et de nouvelles menuiseries à double vitrage. Les trois appartements sont également choisis en fonction de leur emplacement en façade sud, majoritairement dans les étages élevés les plus exposés aux apports solaires. Ces mesures permettent de connaître la valeur des apports de chaleur auxquels est soumis l'immeuble, d'identifier la réception de ces sollicitations par les différents appartements pour comprendre l'incidence de l'enveloppe en termes d'isolation et de caractériser les ambiances thermiques d'été du logement avec le plus de précision possible.

a. La mesure des températures

Les températures extérieures

Pour mesurer les températures extérieures, un capteur est posé dans le hall ouvert de l'immeuble, en hauteur sur le détecteur de mouvement de l'éclairage commun afin qu'il ne puisse être déplacé par les usagers. Ainsi positionné, il est à l'abri du rayonnement direct et

122. Les résultats des diagnostics thermiques, les graphiques, tableaux et données présentés, sont issus des études menées par le bureau d'études TRIBU-conception durable, avec le concours de Karine Lapray, gérante, d'Héloïse Marie, ingénieure-architecte, et de Clara Touzard, Laura Hubschwerlin et Sydney Collin, stagiaires. Voir dossier en annexe 9.

des intempéries, dans un espace ventilé donnant sur l'extérieur. Cette campagne de mesures est stratégiquement menée durant une période de forte chaleur. Dans le hall de l'immeuble, à l'ombre, la température maximale relevée sur les quinze jours est de 33,1°C, mesurée l'après-midi du 1^{er} juillet, et la température minimale est de 14,7°C, mesurée la nuit du 21 au 22 juin. La température moyenne de la période est de 24,1°C, quelques épisodes pluvieux entre le 22 et le 26 juin ayant permis de rafraîchir les températures. C'est pourquoi la période du 28 juin au 3 juillet est plus majoritairement étudiée, étant plus représentative du climat estival lyonnais. La température minimale sur cette période réduite étant de 19,7°C et la température moyenne de 25,9°C.

La température du logement A (T3 au huitième étage)

La deuxième mesure, réalisée simultanément pour rendre les données comparables, est réalisée dans un logement T3 du huitième étage de l'allée A. Cet appartement est choisi car il a conservé ses dispositions d'origine et est situé dans un étage élevé, particulièrement sujet aux apports solaires. L'appartement possède encore des panneaux d'origine avec leurs menuiseries ; ces derniers présentant des défauts d'étanchéité dus au retrait des joints et à des fissures dans le vitrage. L'occupante, locataire, espère une restauration de ses fenêtres ou un remplacement grâce aux travaux liés à ce projet de recherche. Pour son confort, elle dispose de stores vénitiens intérieurs à lames métalliques sur la fenêtre du séjour. Le capteur qui mesure la température, le taux d'humidité et le taux de CO₂ du logement, est positionné sur une étagère du séjour donnant au sud, à l'abri du rayonnement direct du soleil. Pour comprendre avec précisions les apports qui font fluctuer la température intérieure du logement, le comportement de l'habitante est pris en compte. En effet, l'occupation du logement, les apports internes notamment dus aux appareils de cuisson, la ventilation naturelle ou encore l'usage de protections solaires peuvent faire varier les températures. Durant les quinze jours de mesures, le logement A n'est occupé que par une personne qui n'utilise pas ses appareils de cuisson. Ceux-ci n'ajoutent donc pas d'apports internes. Les stores vénitiens métalliques du séjour sont baissés en permanence et l'habitante ouvre systématiquement sa fenêtre nord le matin comme le soir pour faire entrer la fraîcheur, et dans l'après-midi pour faire circuler l'air. Ces manipulations peuvent contribuer à une légère baisse des températures intérieures. La température maximale mesurée sur la période du 28 juin au 3 juillet 2018 est de 29,6°C, la minimale de 25,2°C et la température moyenne de 27,3°C.

Les mesures permettent de constater que la température intérieure suit l'évolution de la température extérieure. L'ambiance du logement est dépendante des conditions climatiques extérieures par manque d'isolation qui provoque également une pénétration rapide de la chaleur dans le logement au cours de la journée avec des pics de températures maximales entre 15h00 et 16h30. La nuit, la température intérieure diminue grâce à l'abaissement des températures extérieures et à la ventilation nocturne pratiquée par l'habitante systématiquement le matin comme le soir au niveau des fenêtres nord. L'habitante ne les maintient néanmoins pas ouvertes toute la nuit, gênée par le bruit et les potentielles intrusions d'insectes. La ventilation nocturne du logement pourrait donc être optimisée, d'autant que ses effets rafraichissants se dissipent dès les premières chaleurs en journée, par le manque d'isolation et d'inertie du logement, même si les fenêtres et les stores sont alors fermés. Les protections solaires intérieures installées par l'habitante semblent insuffisantes pour limiter les apports solaires, ce qui pourra être confirmé par la simulation thermique dynamique réalisée sur le bâtiment. Durant la période caniculaire du 30 juin au 3 juillet 2018 où les températures extérieures excèdent les 30°C, le logement dépasse systématiquement le seuil d'inconfort fixé à 28°C¹²³ les après-midis.

La température du logement B (T5 au septième étage)

Le second appartement testé est un T5 situé au septième étage de l'allée C. Dans ce logement, les menuiseries d'origine ont été remplacées par des fenêtres en aluminium coulissantes dotées de double vitrage et de rupteurs de ponts thermiques. Le plan du logement a été quelque peu modifié par l'abattement de la cloison entre la cuisine et le séjour tous deux en façade sud. Les fenêtres ne possèdent pas de stores dans le séjour, mais des rideaux tirés. Les habitants ventilent leur logement par la loggia qui est ouverte en permanence sur le salon. Relevons également que l'appartement est occupé par deux à trois personnes durant les mesures, ce qui reste une faible occupation pour un logement d'une centaine de mètres carrés. Les occupants utilisent rarement les appareils de cuissons qui produisent donc peu d'apports internes supplémentaires. Le capteur est positionné, comme précédemment, sur une étagère située dans le séjour et à l'abri du rayonnement direct.

Durant la période de mesure, le logement B ne dépasse le seuil d'inconfort fixé à 28°C que la journée du 1^{er} juillet. Le double vitrage installé dans ce logement semble efficace et permet

.....
123. Ce seuil est fixé par la réglementation thermique en vigueur.

de retarder, en journée, la fuite de la fraîcheur amenée par l'ouverture nocturne des fenêtres. Le logement peut rester relativement frais jusqu'à 10h30 alors que la température est déjà remontée à l'extérieur. D'après l'analyse des mesures réalisées, les occupants n'exploitent pas la ventilation nocturne à son maximum. En ventilant plus régulièrement leur logement la nuit, comme ils le font lors des épisodes de très fortes chaleurs, les habitants pourraient abaisser davantage la température intérieure de leur logement et sa remontée serait moins rapide en journée.

La température du logement C (T4 au troisième étage)

Le troisième et dernier logement étudié lors de cette campagne de mesures estivale est un T4 situé au troisième étage de l'allée B, dont les propriétaires ont remplacé les fenêtres d'origine par des fenêtres en aluminium coulissantes dotées de doubles vitrages, ont abattu la cloison entre la cuisine et le séjour, et ont isolé leurs façades avec une douzaine de centimètres d'isolant type polystyrène. De plus, les occupants ont ajouté des stores vénitiens intérieurs en bois sur les deux fenêtres du salon-cuisine. Bien que situé en partie basse de l'immeuble avec des apports solaires moindres, ce logement ne bénéficie pas des masques de la végétation et reste exposé. Le capteur est positionné sur une étagère du séjour, au sud et à l'abri du rayonnement solaire direct. Le logement est occupé par deux à trois personnes majoritairement le matin et le soir. Ils utilisent systématiquement les appareils de cuissons le matin et le soir, ajoutant aux apports de chaleurs extérieurs des apports internes. Les habitants du logement C laissent leurs fenêtres sud ouvertes pratiquement en permanence, même entre 11h00 et 20h00 en période chaude.

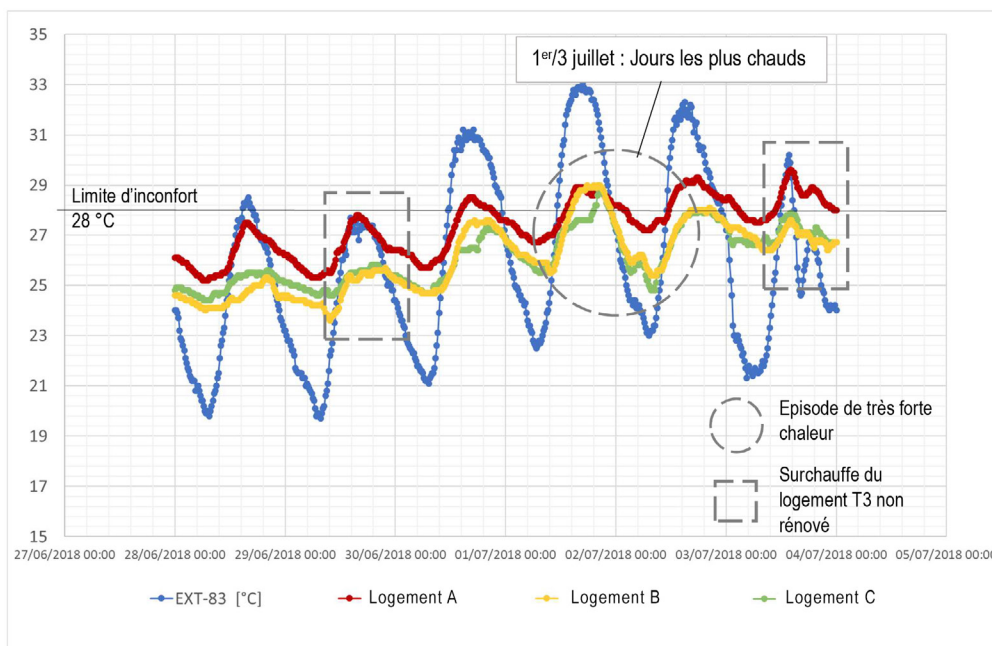
Comme le logement B, le logement C ne dépasse le seuil d'inconfort que lors de la journée du 1^{er} juillet 2018, journée la plus chaude de la période étudiée. Le seuil n'est dépassé que durant quelques heures l'après-midi, ce qui démontre que l'isolation intérieure des panneaux est efficace pour limiter l'incidence des apports solaires en journée et réduire la fuite de la fraîcheur accumulée par la ventilation nocturne. On observe également des décalages temporels entre les pics de chaleur intérieure et extérieure induits par une ventilation nocturne quasi-systématique. L'isolation des parois permet d'améliorer l'inertie du bâtiment, apportée par les planchers et dalles en béton non isolés. Le matin, le logement peut rester frais jusqu'à 10h00, et le pic de chaleur est repoussé en fin de journée (entre 17h et 21h). La ventilation nocturne, couplée à une isolation thermique permet donc de ralentir l'impact de la température extérieure. Néanmoins, la fermeture des fenêtres en journée pourrait améliorer la conservation de la fraîcheur intérieure de l'appartement.

L'analyse des résultats

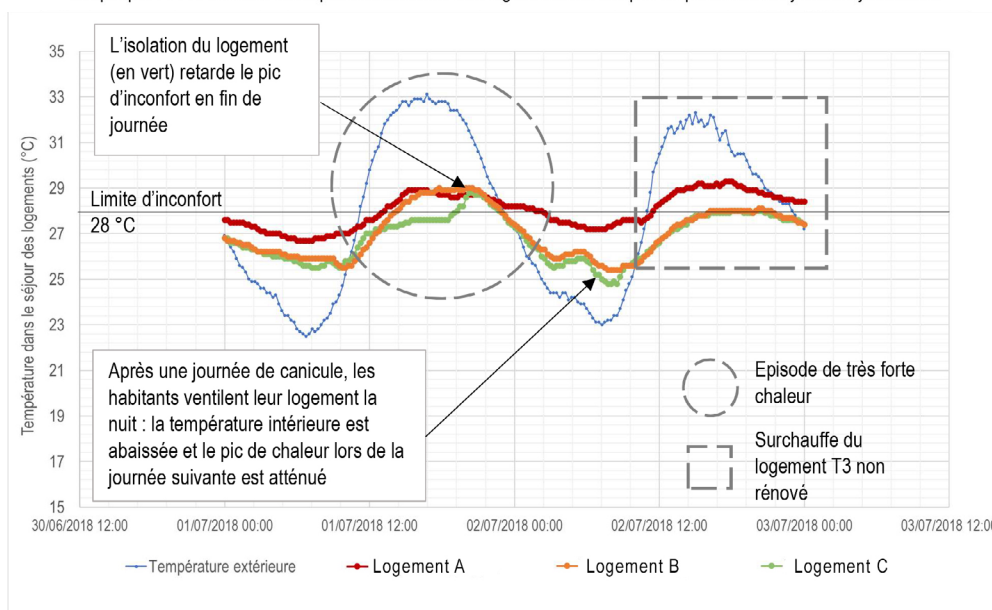
Les trois logements sont ensuite comparés sur la période la plus chaude, du 28 juin au 3 juillet. L'objectif de cette analyse est d'identifier l'incidence des modifications apportées par les habitants sur le confort d'été (remplacement des fenêtres, doublage isolant intérieur, ajout de stores intérieurs, etc.). Les courbes aplaties de températures intérieures des logements B et C permettent de constater que lorsque la température extérieure reste inférieure à 28°C, les habitants ne ressentent pas le besoin d'exploiter le potentiel de rafraîchissement de la ventilation nocturne. Il semble que les modifications apportées à l'enveloppe soient suffisamment efficaces pour leur assurer un confort. En revanche, lors des épisodes caniculaires, avec des températures extérieures supérieures à 30°C, comme le 1^{er} juillet, les courbes se creusent la nuit indiquant une ouverture des fenêtres pour abaisser la température intérieure. Grâce à ce rafraîchissement nocturne et à une meilleure isolation, les logements B et C parviennent à maintenir une température plus fraîche que celle du logement A dans la journée. C'est encore plus vrai pour le logement C qui possède des fenêtres performantes et une isolation supplémentaire qui lui permettent d'accéder à l'inertie des planchers et refends en béton qui stockent la fraîcheur. De fait, la température intérieure du logement C reste plus longtemps en dessous du seuil d'inconfort, avant de monter brutalement dans l'après-midi pour rejoindre la température du logement B. Cette remontée s'explique en partie par l'ouverture des fenêtres par les habitants, même durant les périodes chaudes de l'après-midi.

Concernant le logement A, les courbes du graphique 1 mettent en évidence deux épisodes de surchauffe. Le 29 juin et le 3 juillet, la température du logement A dépasse pratiquement la température extérieure à l'ombre alors que la température des logements B et C reste bien inférieure. Ces épisodes de surchauffe peuvent être liés au manque d'isolation des panneaux de façade qui rend le logement particulièrement sensible aux fortes températures. L'immeuble Les Cèdres présente un potentiel d'inertie important, grâce à ses planchers épais en béton, qui pourrait être exploité avec une meilleure isolation des parois opaques comme dans le logement C. Pour garantir le confort d'été des occupants, une surisolation semble donc nécessaire. Malgré les transformations réalisées dans certains logements, lors de la journée de canicule du 1^{er} juillet où les températures extérieures excèdent 33°C à l'ombre, le seuil d'inconfort a été dépassé dans l'ensemble des logements. Ceci montre qu'en l'absence de protections solaires efficaces, la réduction des apports de chaleur par l'isolation a ses limites. Il est important de noter que dans le logement C, sur-isolé, l'inertie permet de retarder le pic

Comparaison des logements sur une période chaude (28 juin – 3 juillet)



Graphique 1 : Evolution de la température dans les trois logements étudiés pour la période du 28 juin au 3 juillet 2018



Graphique 2 : Evolution de la température dans les trois logements étudiés sur les trois jours les plus chauds (1^{er} au 3 juillet 2018)

Valeurs remarquables de température (28 juin - 3 juillet)	Extérieur, hall à l'ombre	Logement A : T3, 8e étage	Logement B : T5, 7e étage	Logement C : T4, 3e étage
Température maximale	33,1°C	29,6°C	29,0°C	28,8°C
Température minimale	19,7°C	25,2°C	23,6°C	24,4°C
Température moyenne	25,9°C	27,3°C	26,1°C	26,1°C
Nombre d'heures d'inconfort supérieures à 28°C (sur 144 heures de mesures) sur la semaine du 28 juin au 3 juillet		46 heures	9 heures	3 heures
		32,1%	6,3%	2,3%

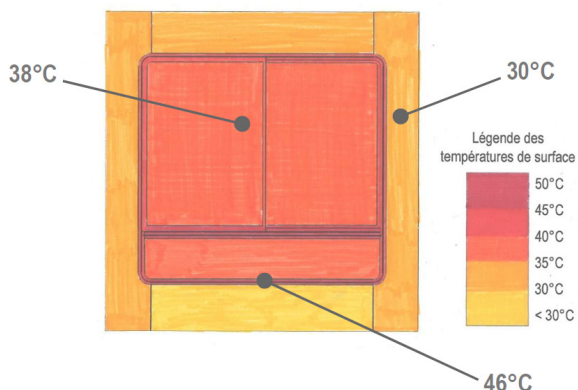
maximal de température et de ne dépasser le seuil d'inconfort que durant trois heures, contre six à huit heures dans les deux autres logements.

Dans le détail, le logement A dépasse le seuil d'inconfort fixé à 28°C durant quarante-six heures sur cent-quarante-quatre heures de mesures, soit presque un tiers du temps. Les apports solaires au huitième étage sont importants sur la façade exposée plein sud. La faible isolation des logements ne permet pas de protéger de ces rayonnements, malgré les apports internes, les stores intérieurs et la ventilation mis en place par l'habitante. Le remplacement de la menuiserie d'origine par une fenêtre en double vitrage possédant des rupteurs de ponts thermiques semble améliorer la situation. Le logement B, situé au septième étage fait valoir une température moyenne de 1,2°C plus faible que le logement A et ne dépasse le seuil d'inconfort que durant neuf heures. En plus du remplacement des fenêtres, la faible occupation du logement en comparaison de sa surface, l'ouverture nocturne des fenêtres et l'ouverture de la cuisine sur le salon favorisent la ventilation et le rafraîchissement du logement. Parmi les trois logements étudiés le logement C présente les meilleures conditions de confort. Il ne dépasse le seuil d'inconfort que durant trois heures et sa température intérieure ne dépasse jamais 28,8°C malgré des températures extérieures au-delà de 33°C. L'isolation intérieure des panneaux Prouvé semble efficace pour limiter les apports solaires et exploiter l'inertie des planchers en béton.

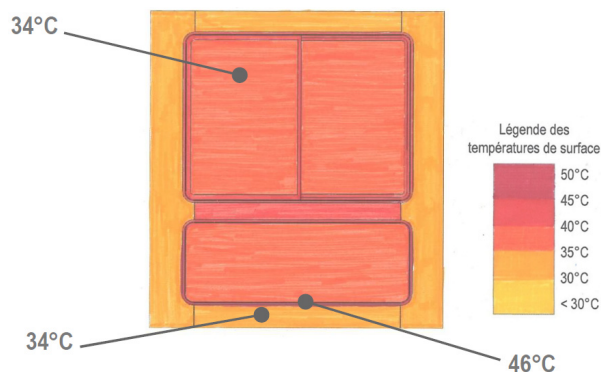
Conclusion sur les mesures de températures intérieures

Ces mesures permettent de conclure qu'en l'absence d'améliorations de l'enveloppe, comme dans le logement A d'origine, le confort d'été n'est pas satisfaisant. Le taux d'inconfort horaire est supérieur à 30 % sur la semaine la plus chaude d'observation. Améliorer l'isolation de l'enveloppe thermique de l'immeuble est donc nécessaire pour le confort des habitants. L'isolation des logements par l'intérieur et le changement des menuiseries d'origine pour du double vitrage permettraient de maintenir des conditions de confort acceptables notamment pour les logements B et C bien que ces deux logements offrent des conditions plus favorables : le logement B bénéficie en effet d'une grande surface peu occupée avec un salon-cuisine décroisé qui améliore l'effet de la ventilation nocturne et le logement C, situé au 3^e étage, présente également un séjour-cuisine décroisé et reçoit moins d'apports solaires que les logements en étages élevés. Malgré l'amélioration de l'enveloppe, les logements rénovés ne présentent qu'une faible résilience face aux épisodes de fortes chaleurs : le seuil d'inconfort est atteint même dans les logements B et C lorsque la température extérieure dépasse 33°C. Pour

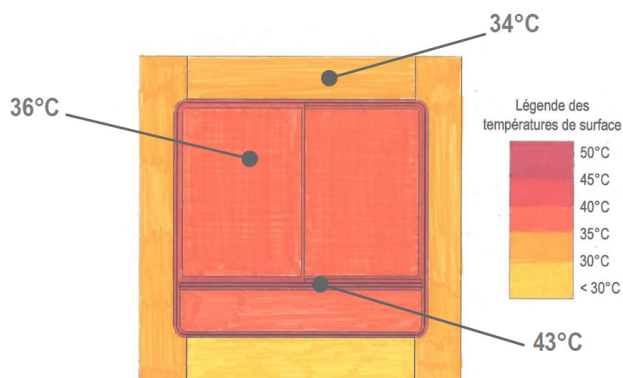
Panneau Salon



Panneau Loggia



Panneau Cuisine



Panneau extérieur

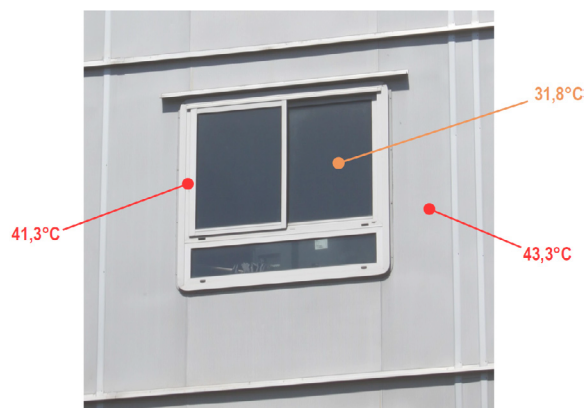


Tableau récapitulatif des températures de surface des menuiseries

Données	Salon	Loggia	Cuisine	Extérieur
Température d'air	27,4°C	29,3°C	28,3°C	26,9°C
Température opérative	27,4°C	31,0°C	28,2°C	28,6°C
Température maximale vitrage	38,0°C	34,0°C	36,3°C	31,8°C
Température maximale menuiserie	45,7°C	45,5°C	44,3°C	41,3°C
Température maximale panneau	30,3°C	34,5°C	36,4°C	43,3°C

Influence des protections solaires

	Salon		Loggia	
	Température d'air	Température opérative	Température d'air	Température opérative
Avec store	26,5°C	27,0°C	28,9°C	30°C
Sans store	27,4°C	27,4°C	29,3°C	31°C

garantir un confort d'été satisfaisant, l'amélioration de l'enveloppe thermique de l'immeuble doit être couplée avec l'ajout de protections solaires efficaces. L'incidence de l'ajout de protections solaires sur les vitrages de la façade sud est étudiée lors de la simulation thermique dynamique réalisée par TRIBU en octobre 2018¹²⁴. Une autre piste d'amélioration du confort semble s'esquisser à l'observation des courbes de températures intérieures. L'ouverture des fenêtres la nuit durant les périodes chaudes n'est pas systématique dans l'ensemble des logements étudiés. Sensibiliser les occupants aux bonnes pratiques de ventilation nocturne en période de canicule leur permettrait de rafraîchir davantage l'air intérieur de leur logement et de repousser la remontée des températures en journée. Pour améliorer le confort d'été des logements de l'immeuble Les Cèdres, quatre actions peuvent donc être cumulées : le remplacement des fenêtres d'origine par des fenêtres plus performantes dotées de rupteurs de ponts thermiques et de double vitrage, le doublage isolant des panneaux par l'intérieur, l'ajout de protections solaires efficaces (les protections solaires intérieures semblent insuffisantes), et le recours quotidien à la ventilation nocturne.

b. Les mesures de températures de surface sur les panneaux

Pour compléter les mesures de températures d'air intérieur des logements, des températures de surfaces sont réalisées sur des panneaux de l'immeuble le 4 septembre 2018. Ces mesures, dont les résultats sont compilés dans les graphiques ci-contre, ont pour objectif de caractériser la réponse du panneau à une journée fortement ensoleillée. Les températures de surfaces influent grandement sur la chaleur ressentie par les habitants. En effet, le phénomène de paroi chaude induit un rayonnement de chaleur à proximité des façades. Chaque composant du panneau, menuiserie, vitrage, partie opaque, est alors mesuré. Trois panneaux sont étudiés, tous dans le même logement situé au cinquième étage de l'allée B. Le premier est le panneau du salon, isolé par six à sept centimètres de polystyrène supplémentaires, doté d'une menuiserie rénovée en double vitrage. En période estivale, le vitrage est occulté par un store intérieur en tissu clair et un rideau en voilage. Les stores intérieurs permettent de conserver une température d'air intérieur acceptable dans le salon, mais la température ressentie devient vite insupportable lorsque celui-ci est relevé du fait du rayonnement direct. La température d'air dans le salon est de 26,5°C lorsque le store est abaissé et monte à 27,4°C lorsque celui-ci est relevé. Le store intérieur permet donc

.....
124. Voir page 218.

de réduire de 1°C la température intérieure du logement. Toutefois, même le store baissé, la température opérative du logement, seul indicateur de confort thermique valable, qui inclut les effets de la convection et du rayonnement, soit la température d'air et la température de surface, est de 27°C. Dans la cuisine, dont le panneau n'est pas isolé mais équipé de stores vénitiens intérieurs à lames métalliques claires, la température opérative est légèrement inférieure à la température d'air (28,2°C contre 28,3°C) et ce malgré le manque d'isolation du panneau. Cette mesure démontre l'efficacité plus importante des stores intérieurs vénitiens à lames par rapport aux stores toiles intérieurs pour maintenir le confort des occupants.

Dans la loggia, dont le panneau n'est pas isolé mais possède une menuiserie à double vitrage et un store intérieur en tissu similaire à celui du salon, la température opérative oscille entre 30 et 31°C, soit près de 3°C de plus que dans le salon. Cette température élevée peut s'expliquer par la plus petite surface de la loggia, qui permet un réchauffement plus rapide de la pièce, et par le manque d'isolation des panneaux. Ce manque d'isolation engendre également une température de surface des parties opaques du panneau de loggia de 4°C supérieure à celle du panneau de salon. Même constat dans la cuisine, où les panneaux d'origine ne disposent pas d'isolation supplémentaire, avec une température de surface des parties opaques de 6°C supérieure à celle du panneau de salon. La surisolation du panneau du salon lui permet donc de perdre 4 à 6°C en température de surface.

Ces mesures de températures de surface montrent que les menuiseries, même si elles sont récentes, sont la plus grande source d'inconfort avec des températures de surfaces sur leurs montants pouvant dépasser les 45°C alors que la température d'air extérieur est de 27°C. L'aluminium extérieur du panneau monte jusqu'à 43°C, mais les températures de surface des panneaux opaques à l'intérieur des logements sont situées entre 30 et 35°C ce qui peut suggérer que l'aluminium a un effet bénéfique en réfléchissant les rayonnements solaires. Le doublage isolant permet de maintenir une température de surface de 30°C contre 34,5°C sur les panneaux non isolés. Cette température reste importante, seule une protection solaire extérieure semble pouvoir être efficace pour réduire le rayonnement solaire sur les panneaux et leurs températures de surfaces intérieures.

c. La qualité de l'air et la ventilation

La qualité de l'air est un facteur de confort important d'autant plus qu'il peut avoir une incidence significative sur la santé des occupants. Le renouvellement de l'air dans les logements de

l'immeuble est assuré par un système de ventilation naturelle avec des grilles d'entrée d'air en partie basse des panneaux de cuisine et des extractions par conduits shunt dans les salles de bains et sanitaires. Les capteurs installés par TRIBU dans les logements A, B et C, ainsi qu'à l'extérieur de l'immeuble Les Cèdres lors des mesures de températures intègrent également une sonde de mesure du taux d'humidité. De plus, le capteur installé dans le logement A, le T3 du huitième étage dans ses dispositions d'origine, relève également le taux de CO₂ intérieur du 20 juin au 4 juillet 2018. Pour évaluer l'efficacité du système de renouvellement d'air de l'immeuble, il est nécessaire de prendre en compte les deux indicateurs que sont l'humidité et le taux de CO₂. Un défaut de ventilation peut conduire à l'augmentation de ces deux taux.

L'évolution du taux d'humidité dans les logements (du 28 juin au 3 juillet 2018)

L'humidité a peu d'influence sur la sensation de confort d'un individu dans un bâtiment lorsque son taux dans l'air est situé entre 40 et 60 %. L'inconfort n'apparaît que lorsque l'humidité relative est inférieure à 30 % ce qui peut provoquer une gêne et une irritation des yeux et voies respiratoires, une augmentation de la concentration en poussières dans l'air favorisant les maladies respiratoires et une augmentation de l'électricité statique. Un taux d'humidité supérieur à 70 % engendre également des inconforts et rend l'évaporation des transpirations difficiles et favorisant la formation de condensation sur les surfaces froides. Un air trop sec ou trop humide peut également favoriser le développement de micro-organismes comme les bactéries, acariens et champignons. D'après l'étude de Scofield et Sterling¹²⁵, la plage hygiénique optimale se situe entre 40 % et 60 % d'humidité relative. La norme européenne (NF-EN 15251, 2007) quant à elle, est moins exigeante et préconise une humidité relative entre 25 % et 60 % (catégorie II), voire entre 20 % et 70 % (catégorie III). Pour les trois logements étudiés, le taux d'humidité se situe dans la plage préconisée par la norme, mais aussi dans la plage hygiénique de Scofield et Sterling, comme le montre le tableau de mesures ci-dessous.

Tableau de valeurs remarquables du taux d'humidité dans les 3 logements étudiés

Valeurs remarquables d'humidité relative (28 juin – 3 juillet)	Extérieur	Logement A : T3, 8e étage	Logement B : T5, 7e étage	Logement C : T4, 3e étage
Humidité maximale	78,9%	50,0%	55,0%	54,9%
Humidité minimale	24,3%	39,5%	31,5%	36,5%
Humidité moyenne	47,1%	43,7%	44,8%	45,9%

125. Etude publiée en 1992 dans la revue scientifique américaine ASHRAE Journal (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).

Les mesures montrent que le taux d'humidité dans les logements semble suivre l'évolution de l'humidité extérieure avec une certaine atténuation des amplitudes et un léger décalage temporel. L'ambiance intérieure est asservie aux conditions extérieures ce qui confirme que le renouvellement de l'air se fait par ventilation naturelle. L'enveloppe du bâtiment joue un rôle de tampon en limitant les variations du taux d'humidité trop importantes comme c'est le cas le 1^{er} juillet où le taux d'humidité à l'extérieur passe en-dessous des 30 %, ou encore le 3 juillet lorsque le taux extérieur dépasse les 70 %. L'enveloppe du bâtiment permet de conserver un taux d'humidité confortable à l'intérieur des logements. En période estivale, la ventilation naturelle est majoritairement assurée par l'ouverture des fenêtres, ce qui explique que les trois logements étudiés aient des comportements sensiblement identiques. Pour évaluer l'efficacité des grilles d'entrée d'air et conduits shunt dans les logements, il est pertinent de renouveler les mesures sur les périodes hivernales où l'ouverture des fenêtres est plus limitée. L'objectif de ces mesures est d'anticiper une future imperméabilisation de la façade par un doublage isolant intérieur et l'impact de cette nouvelle isolation sur le bon renouvellement de l'air intérieur des logements.

L'évolution du taux de CO₂ dans le logement A (du 20 juin au 4 juillet 2018)

Seul le logement A, dans les dispositions d'origine dispose d'un capteur de CO₂ durant les mesures. Pour une meilleure qualité de l'air, le taux de CO₂ doit être le plus faible possible. Un taux de CO₂ inférieur à 400 ppm – partie par millions – indique une qualité de l'air excellente selon la norme NBN EN 13 779 de 2007, un taux compris entre 400 et 600 ppm correspond à un air de qualité moyenne, entre 600 et 1000 à une qualité de l'air modérée et supérieure à 1000 à une faible qualité mais qui, selon la norme, reste acceptable. On peut néanmoins considérer que pour la santé et le confort des occupants, il est préférable de maintenir un taux inférieur à 1000 ppm voire inférieur à 600 ppm en majorité. Les mesures réalisées dans le logement A indiquent un taux moyen sur la période de 494,9 ppm. L'air du logement est de qualité moyenne, entre 400 et 600 ppm, 90 % du temps, de qualité modérée seulement 8 % du temps et il ne dépasse jamais 951 ppm. Ces valeurs sont très acceptables et attestent de l'efficacité de la ventilation naturelle dans les logements de l'immeuble Les Cèdres en été, principalement grâce à l'ouverture régulière des fenêtres.

Au regard de ces résultats, le renouvellement de l'air des logements de l'immeuble Les Cèdres semble de qualité bien que les mesures soient incomplètes. Pour les rendre exhaustives et

viables, des mesures de taux de CO₂ doivent être effectuées dans plusieurs logements et à l'extérieur pour avoir une mesure de référence. Les mesures de CO₂ doivent également être réalisées dans les pièces humides pour évaluer l'extraction de l'air vicié dans les conduits shunt. De plus, le taux de CO₂ à lui seul n'est pas un indicateur suffisant pour évaluer la qualité de l'air intérieur. Des mesures de COV – composés organiques volatils – comme le benzène ou le toluène, ou d'aldéhydes comme le formaldéhyde permettent d'estimer la qualité de l'air de manière plus complète. En ce qui concerne le taux d'humidité intérieur, il est difficile à interpréter en période estivale, les habitants ouvrant fréquemment leurs fenêtres. Pour étudier le comportement intrinsèque du bâtiment, il est nécessaire de réaliser des mesures en hiver. De plus, pour évaluer complètement l'efficacité de la ventilation naturelle par rapport aux infiltrations liées à la perméabilité de l'enveloppe, les débits d'air au niveau des grilles de ventilation des logements doivent être mesurés avec précision. Dans le cadre d'une amélioration de l'enveloppe thermique, isoler les parois peut conduire à étanchéiser le bâtiment. Il est capital de s'assurer que ces modifications n'altèrent pas l'efficacité de la ventilation naturelle et la qualité de l'air. Dans le cas contraire, le système de ventilation peut être revu pour un système de ventilation hybride comme une ventilation naturelle assistée mécaniquement. Seul un diagnostic complet du système existant peut permettre de définir les modifications à venir pour l'amélioration du confort global des occupants.

2 – La thermique d'hiver

Pour compléter les mesures réalisées en été concernant le système de ventilation et l'évaluation du renouvellement d'air, des diagnostics thermiques d'hiver sont effectués en janvier 2019 permettant également d'identifier le potentiel d'amélioration de la performance du système de chauffage et de caractériser les conditions de confort d'hiver des occupants de l'immeuble.

a. Le diagnostic du système de chauffage¹²⁶

La chaudière de l'immeuble

Le chauffage de l'immeuble est assuré par deux chaudières avec brûleurs à gaz de 280 kW unitaire disposant d'un condensateur commun connecté sur le retour général avec une plage de puissance de 170 à 490 kW. Les deux chaudières fonctionnent alternativement, mais pas en

126. Ces informations, vérifiées par le bureau d'études TRIBU, sont issues d'un audit énergétique réalisé par Eremes en 2016 et 2017, fournit à l'équipe de recherche par la copropriété. Voir annexe 10.

cascade. Elles ont été installées dans la chaufferie de l'immeuble en 2002 lors de la rénovation de son système de chauffage. Le départ d'eau chaude depuis les chaudières est régulé par un circulateur jumelé à débit fixe et une vanne trois voies en mélange, pilotée par la courbe de chauffe de l'automate dirigé lui-même par une sonde. La régulation du chauffage est donc pilotée par un automate qui module la température de départ de chauffage en fonction de la température extérieure. L'eau chaude part à 25°C lorsque la température extérieure est à 15°C, et à 55°C lorsque la température extérieure est de -5°C, par exemple. La nuit, de 18h00 à 2h00, la température de départ est réduite de 2°C par rapport à la consigne. Les réseaux qui distribuent l'eau chaude du chauffage sont calorifugés dans le vide sanitaire, mais les réseaux apparents dans les gaines techniques ne le sont pas, provoquant des déperditions. Le chauffage est ensuite émis par des planchers et plafonds chauffants dont les conduits semblent être pris dans la dalle. Les logements ne disposent d'aucun organe de chauffage visible ni d'aucun moyen de régulation. Le système présente différents potentiels d'amélioration. Il est possible d'envisager l'application d'une température de consigne dans les logements à 19°C ou 17°C la nuit pour réduire les consommations et améliorer le confort des habitants qui, pour certains, sont forcés d'ouvrir leurs fenêtres la nuit, même en hiver. La régie recense des pannes et dysfonctionnements réguliers des chaudières actuelles. Un remplacement peut être envisagé à l'avenir, un devis étant déjà proposé à la copropriété par la société SEDICAM. Il est néanmoins pertinent d'effectuer ce remplacement après la rénovation thermique de l'enveloppe pour sélectionner des systèmes adaptés aux nouveaux besoins de chauffage. Des traces de souffre sont observées sur les conduits, ce qui indique une condensation des fumées à l'intérieur des conduits, conséquence d'un mauvais réglage des brûleurs. Celui-ci peut donc être affiné pour participer à l'amélioration des performances du système de chauffage.

Les gaines techniques

L'observation des gaines techniques permet de constater que chacune des trois allées de l'immeuble dispose d'une colonne accessible sur les paliers de tous les niveaux. Cette colonne possède une vanne entrée et une vanne sortie par étage, puis les conduits se divisent en deux tubes de plancher chauffant pour alimenter les deux logements du palier. Cette division visible permettrait d'installer des vannes de réglage et un comptage individualisé. Les inconforts étant très différents d'un niveau à l'autre, ces modifications permettraient aux habitants de maîtriser leurs ambiances intérieures. Les températures d'eau mesurées dans une colonne de l'allée A au premier niveau sont assez élevées avec 43°C à l'aller et 32,5°C au retour, ce qui

montre une déperdition relativement importante. Les réseaux ne sont pas calorifugés, mais les colonnes étant accessibles dans les gaines palières, leur isolation peut être envisagée.

L'eau chaude sanitaire

Le système de production d'eau chaude sanitaire est actuellement individualisé. Compte tenu de la dimension des gaines dans les salles de bain, il est possible d'envisager un bouclage d'eau chaude alimenté de façon centralisé, si les copropriétaires le désirent. Globalement, le système de chauffage de l'immeuble possède de forts potentiels d'amélioration qui pourront apporter un confort supplémentaire aux occupants et réduire leurs consommations de chauffage.

b. L'analyse du confort dans les logements

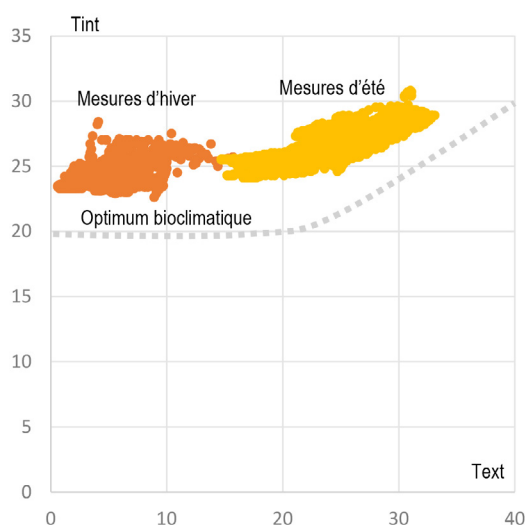
Les mesures des températures en hiver

Les mesures sont effectuées entre le 15 et le 25 janvier 2019 et sont réalisées dans quatre logements de la résidence qui sont comparés à une mesure de température extérieure. Comme pour les mesures d'été, ces logements sont choisis pour représenter la diversité des cas existants dans l'immeuble et ont également pour objectif de montrer les cas les plus défavorables en hiver. Le capteur extérieur est positionné dans le hall de l'immeuble Les Cèdres, sur le détecteur de mouvement, comme lors des mesures d'été. Il se trouve en hauteur, à l'abri du rayonnement solaire direct et des intempéries, dans un espace ouvert ventilé donnant sur l'extérieur. Le second capteur est installé dans le logement A, un T3 au huitième étage de l'immeuble dans l'allée A, comme lors des mesures d'été. Ce logement est conservé dans son état d'origine avec des menuiseries équipées de simple vitrage et aucune isolation supplémentaire. Il dispose d'importants apports solaires et présente des défauts d'étanchéité à proximité de la menuiserie. L'appartement est occupé par une personne seule. Le capteur mesure la température, le taux d'humidité et le taux de CO₂. Il est positionné sur une étagère du séjour donnant au sud, mais à l'abri du rayonnement direct. Le logement B est différent de celui étudié en été. Il est choisi pour sa position défavorable en hiver, à l'ombre des cèdres du jardin, au premier étage, au-dessus des caves non isolées, et sur un pignon également non isolé. Le logement B est un T5 de l'allée A dont les menuiseries sont remplacées par des fenêtres à double vitrage. L'appartement dispose de peu d'apports solaires et n'est occupé que par une personne. Le capteur mesure la température du logement et son hygrométrie. Le troisième appartement étudié, le logement C, est le même que lors des mesures thermiques d'été. Il s'agit d'un T4 au troisième étage de l'immeuble qui dispose de

fenêtres en double vitrage, d'un doublage isolant intérieur d'une douzaine de centimètres, d'une cuisine ouverte sur le séjour et d'apports solaires. Le logement est inoccupé pendant les mesures d'hiver. Enfin, pour la campagne de mesures d'hiver, un quatrième appartement est étudié, le logement D, un T4 situé au cinquième étage de l'allée B de l'immeuble. Il est occupé par une personne, dispose de fenêtres à double vitrage et d'un isolant supplémentaire de sept centimètres environ uniquement sur le panneau du salon. Ce logement est bien ensoleillé. Les températures mesurées sont données dans le tableau ci-dessous.

Données	Extérieur	Logement A	Logement B	Logement C	Logement D
Température maximale	15,7°C	27,5°C	24,6°C	25,7°C	26,5°C
Température minimale	0,6°C	23,0°C	21,9°C	22,8°C	22,8°C
Température moyenne	5,1°C	24,4°C	23,1°C	23,8°C	24,3°C

Globalement, les températures relevées dans les logements sont trop élevées pour des températures intérieures en hiver. Les températures ne sont jamais en dessous de 21,9°C et la température maximale mesurée du logement A avoisine même le seuil d'inconfort indiquant une surchauffe fixée à 28°C. Il y a donc un véritable problème de régulation des températures dans les logements. La température moyenne des logements oscille entre 23,1°C et 24,4°C. On fixe la température de confort en hiver entre 19°C et 21°C selon la population visée¹²⁷. Des populations actives, peu présentes dans leur logement en journée et d'une tranche d'âge intermédiaire préféreront des températures avoisinant les 19°C, tandis que les familles avec jeunes enfants ou les personnes âgées sédentaires préféreront une température intérieure de 21°C. Quoiqu'il en soit, au sein de l'immeuble, les températures sont au-dessus des standards de confort recommandés.



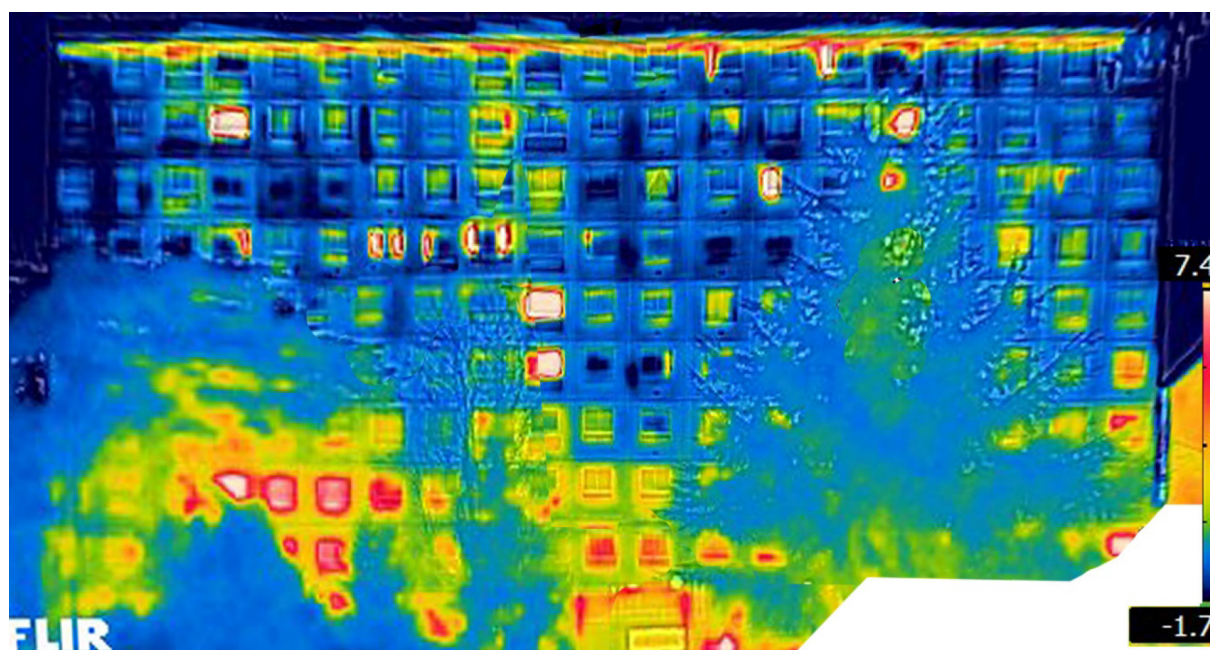
Le logement A, référence de l'état d'origine de l'édifice, est étudié en hiver comme en été, ce qui permet de réaliser sa signature climatique présentée dans le diagramme ci-contre. La signature climatique consiste à mesurer la température intérieure par rapport à la température extérieure et de générer une courbe à comparer avec l'optimum bioclimatique. L'optimum bioclimatique est la mesure des températures idéales à l'intérieur du logement par

127. Orso (Fabrice d'), *Rénovation, plus de 30 millions de logements*, Levallois-Perret, Editions PC, 2019, 111 p.

rapport à la température extérieure¹²⁸. En hiver, les températures mesurées sont élevées du fait de températures de consigne de chauffage trop importantes et d'apports solaires généreux. En été, le logement surchauffe par les apports solaires et l'impossibilité de conserver la fraîcheur nocturne. La comparaison de la signature climatique du logement A avec l'optimum bioclimatique indique qu'une baisse des températures de 3°C est nécessaire, en hiver comme en été.

La campagne de mesures à la thermographie infrarouge

La caméra thermique (FLIR E5) permet de mesurer le rayonnement infrarouge des façades de la résidence. Une thermographie infrarouge d'un bâtiment peut mettre en valeur le rayonnement lié aux déperditions par l'enveloppe du bâtiment, les ponts thermiques, mais aussi le rayonnement, ou la réflexion, lié à la spécularité de l'enveloppe, ce qui n'est pas négligeable sur une façade aluminium et sur des vitrages. L'interprétation des images doit s'effectuer finement. Le bureau TRIBU a ainsi pu constater des déperditions au niveau de la partie basse de l'acrotère, ce qui indique un pont thermique entre l'isolation de la façade et de la toiture terrasse. Le porche du hall d'entrée est également un point de déperditions important ainsi que le rez-de-chaussée et les menuiseries et vitrages d'origine.

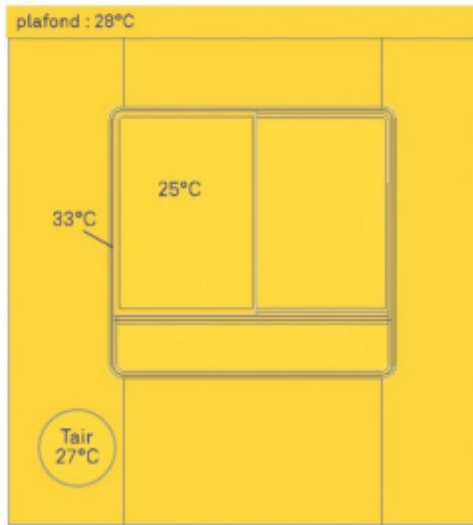


Relevés à la caméra thermique
© TRIBU, 2019

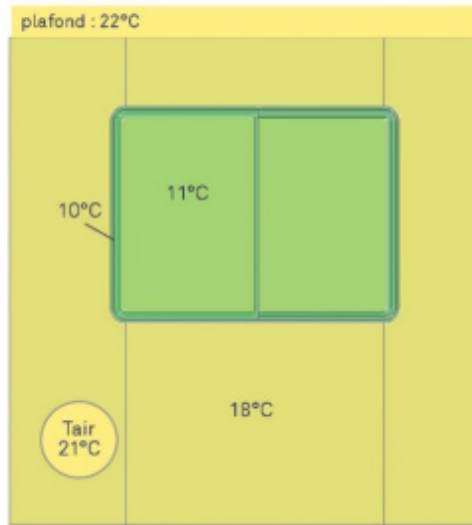
128. Source : TRIBU

Logement A, 8^e étage

Séjour (sud)

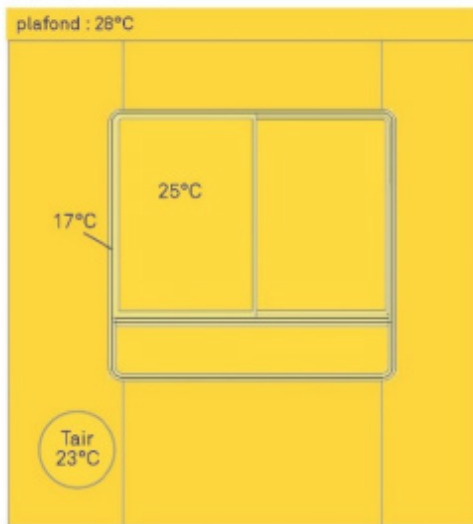


Chambre (nord)

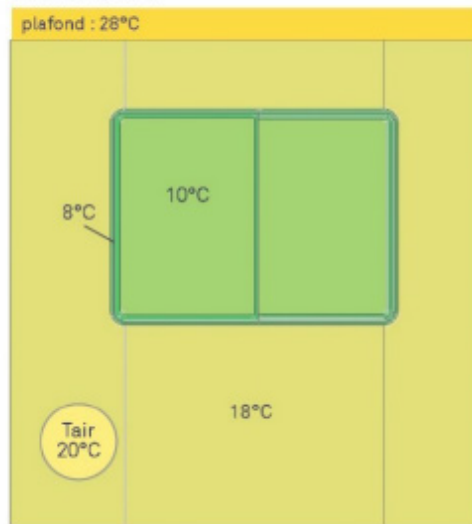


Logement B, 1^{er} étage

Séjour (sud)

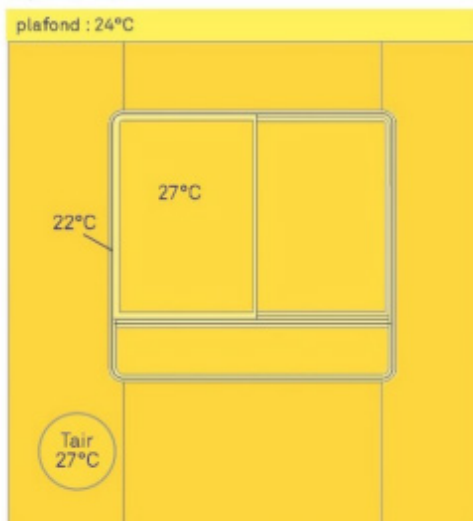


Chambre (nord)

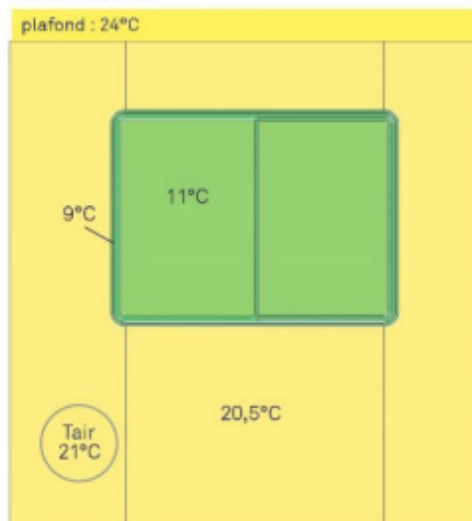


Logement D, 6^e étage

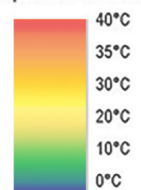
Séjour (sud)



Chambre (nord)



Légende des températures de surface



Les mesures de températures de surface sur les panneaux Prouvé

Pour compléter les mesures de températures d'air, des mesures de températures de surface sont effectuées le 11 janvier 2019 lors d'une journée ensoleillée. D'une manière générale, ces mesures permettent de constater une différence importante de confort entre le séjour au sud et les chambres au nord. Les chambres ont des températures d'air plus adaptées, mais des températures de surfaces relativement faibles qui peuvent engendrer une sensation de froid par rayonnement. Une isolation thermique permettrait de résoudre cette problématique. Les mesures mettent en évidence des ponts thermiques au niveau des menuiseries en aluminium, même sur les fenêtres remplacées. Sur la fenêtre Prouvé restante du séjour du logement A, on observe une température de surface de 33°C sur les montants de la menuiserie, illustrant l'importance des apports solaires sur la température de surface. Les mesures indiquent également des températures de plafonds et de sols trop élevées, produisant un inconfort et des risques en termes de santé pour les occupants. Celles-ci peuvent être réduites avec un meilleur réglage du système de chauffage et la réduction du besoin de chauffage par l'isolation.

*c. La qualité de l'air et l'efficacité de la ventilation**Les mesures des débits de ventilation au niveau des bouches d'aération*

Ces mesures hivernales complètent les mesures d'été pour rendre compte de l'efficacité de la ventilation. Des mesures de débits d'air sont effectuées au niveau des bouches d'extraction. Dans le logement A le débit est moyen à faible avec seulement 35 m³/h d'air extrait. La qualité de l'air risque d'être dégradée par ce renouvellement insuffisant. Dans le logement B le débit est correct, induisant une qualité de l'air acceptable avec 50 m³ d'air extrait par heure. Le logement C étant inoccupé durant la période d'étude, il est inaccessible et n'a pas fait l'objet de mesure. Dans le logement D, les entrées d'air et extractions sont bouchées par la tapisserie murale, mais la qualité de l'air est garantie par l'ouverture régulière des fenêtres. Néanmoins, sans cette ouverture, le débit est insuffisant et ne permet pas de garantir la qualité de l'air. Les entrées d'air étant situées en partie basse des panneaux, elles engendrent des courants d'air dans les jambes des occupants qui les bouchent fréquemment. L'ensemble des entrées d'air et extractions doivent être vérifiées et dégagées. Pour le confort des habitants, il peut être intéressant d'envisager de déplacer les entrées d'air en partie haute des panneaux, dans le respect de l'architecture originelle. Des entrées d'air supplémentaires peuvent également

être installées dans les séjours et les chambres pour améliorer la ventilation. Les conduits shunt semblent avoir des débits d'extractions faibles. Pour améliorer les débits, la mise en place de VMC hybride en toiture peut également être une piste à développer. La ventilation doit impérativement être améliorée, d'autant plus dans le cas d'une surisolation intérieure qui risque de provoquer des phénomènes de condensation.

Les mesures de l'humidité

L'humidité a relativement peu d'incidence sur la sensation de confort d'un individu dans un bâtiment. D'un point de vue sanitaire, un air trop sec ou trop humide peut favoriser le développement de micro-organismes tels que les bactéries, acariens et champignons. Comme mentionné précédemment, la plage hygiénique optimale se situe entre 40 % et 60 % d'humidité dans l'air. Le capteur extérieur mesure un taux d'humidité maximal de 83,7 % sur la période du 15 au 25 janvier 2019, un taux minimal de 37,4 % et un taux moyen de 66,5 %. Globalement l'air extérieur est humide durant la période de mesure. Le logement A possède une humidité maximale de 33,1 %, une humidité minimale de 22,7 % et une humidité moyenne de 27 %. Dans le logement B, le capteur relève un taux d'humidité maximal de 34,6 %, un taux minimal de 21,8 % et un taux moyen de 26,6 %. Enfin, dans le logement C, l'humidité maximale est de 37,8 %, l'humidité minimale de 22,3 % et l'humidité moyenne de 28 %. Dans les trois logements, l'air est trop sec et n'atteint jamais les 40 % d'humidité minimum pour garantir le confort des occupants. Ce phénomène peut s'expliquer par le manque de renouvellement d'air et des températures de chauffage trop importantes.

Les mesures de CO₂ du logement A

D'après les mesures de CO₂ réalisées, l'ambiance du logement correspond à une qualité d'air moyenne (entre 400 à 600 ppm), sur près de 87 % de la période, à modéré (600 à 1000 ppm), sur 13 % de la période. Les résultats sont légèrement moins bons qu'en période estivale, ce qui peut s'expliquer par la réduction du temps d'ouverture des fenêtres. La majorité du temps, le logement dispose d'une qualité d'air acceptable. Néanmoins, cette qualité d'air peut être améliorée par l'augmentation des débits de renouvellement.

d. Conclusion pour l'amélioration du confort thermique d'hiver

Ces mesures thermiques d'hiver mettent en relief des températures trop élevées dans les logements comme dans les boucles d'eau chaude qui révèlent un véritable problème de

réglage de la température de chauffage. La qualité de l'air est moyenne dans les logements, principalement liée à l'obstruction des entrées et sorties d'air. Le bureau d'études TRIBU propose sept pistes d'amélioration de la performance thermique et du confort en hiver, par ordre de priorité : la mise en place d'une température de consigne à 19 à 20°C le jour et 16 à 17°C la nuit ; l'équilibrage des réseaux, avec ou sans le remplacement des chaudières : réglages, installation de vannes, comptage individualisé ; le calorifugeage des réseaux dans les gaines verticales accessibles ; l'amélioration de l'enveloppe thermique en intervention par l'extérieur : en sous-face avec le vide sanitaire et le porche et sur les murs pignons¹²⁹ ; l'amélioration de l'enveloppe thermique des panneaux Prouvé : isolation par l'intérieur des parois opaques, changement des vitrages et réfection de la ventilation (entrée d'air en façade et mise en place d'une ventilation naturelle hybride assistée) ; le remplacement des chaudières collectives : installation gaz à condensation (ou granulés bois) avec une diminution de la puissance installée ; et enfin la mise en place d'une installation d'eau chaude sanitaire collective. Le tableau et le graphique ci-dessous récapitulent les réductions de chauffage et de consommation d'énergie par actions cumulées.

Analyse des gains en termes de consommations des différentes actions de rénovation thermique.

	Existant	Isolation du plancher bas vide sanitaire	Isolation des pignons	Isolation des panneaux x ITI	Isolation des fenêtres	Isolation du toit	Calorifugeage des colonnes	Changement des chaudières	Passage en eau chaude collective (ECS)
Besoins chauffage (perf enveloppe) en kWh/m ²	74	69	55	40	34	31	31	31	31
Consommation chauffage (perf systèmes) en kWh/m ²	133	123	99	71	60	55	47	38	38
Consommation EP (calcul réel) en kWh/m ²	235	225	198	168	156	150	140	133	95
CEP/SHON en kWh/m ² (type RTex)	171	162	140	115	106	101	93	87	62

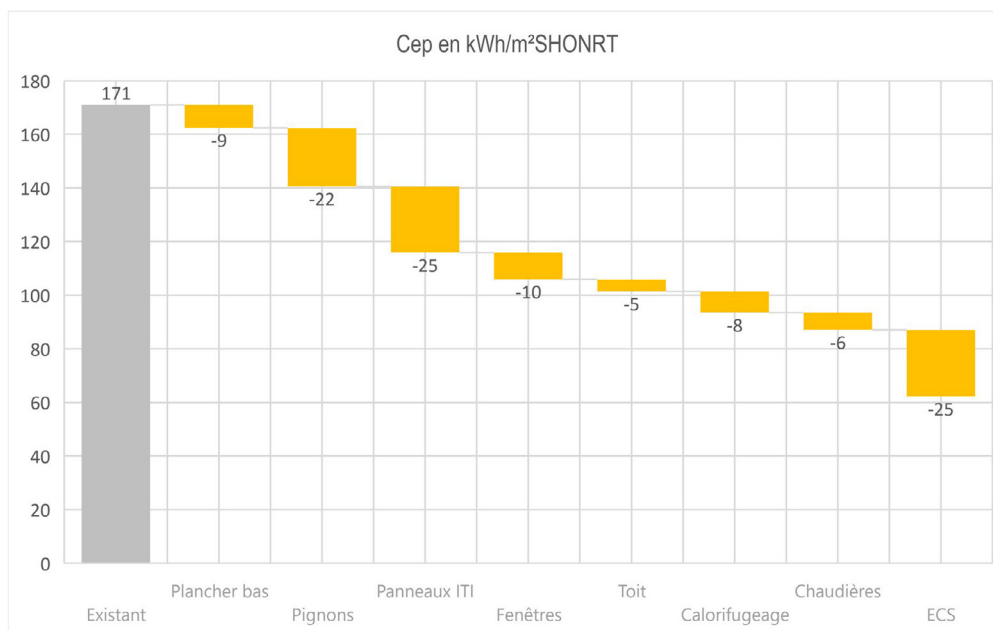
Pourcentage de réduction chauffage / existant

	-13%	-45%	-82%	-97%	-104%	-116%	-127%	-127%
--	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------

Pourcentage de réduction Cep par action

	-5%	-13%	-15%	-6%	-3%	-5%	-4%	-15%
--	-----	------	------	-----	-----	-----	-----	------

129. L'isolation par l'extérieur des murs pignons pose néanmoins question pour deux raisons. L'une patrimoniale, les murs pignons sont en béton matricé coulé en place. L'autre administrative, l'immeuble s'implante en limite parcellaire et le doublage isolant par l'extérieur implique un porte-à-faux sur les parcelles voisines donc la demande d'une servitude ou le rachat d'une portion de parcelle aux voisins.



3 – La simulation thermique dynamique

a. La modélisation de l'immeuble

Une simulation thermique dynamique – STD – a pour objectif de déterminer les besoins en chauffage d'un bâtiment et son niveau de confort d'été en s'appuyant sur une description rigoureuse de son enveloppe, de ses caractéristiques architecturales, de son environnement extérieur et des influences internes. L'étude porte d'abord sur le bâtiment existant, puis des améliorations de l'enveloppe sont proposées, et leur impact sur les besoins de chauffage et le confort d'été est évalué. Le bureau d'études TRIBU modélise le bâtiment sur le logiciel Pléiades¹³⁰ et effectue le calcul de simulation thermique dynamique avec le module STD Comfie de ce même logiciel. Cet outil de calcul reconstitue heure par heure le bilan thermique complet du bâtiment modélisé. Ces calculs très détaillés permettent de prendre en compte les scénarii d'occupation, d'apports internes et de ventilation ; les performances thermiques et l'inertie de l'enveloppe du bâtiment ; ainsi que l'incidence des masques solaires dus à l'architecture et à l'environnement. Les résultats des simulations ne sont pas considérés comme prévisionnels. Les calculs sont basés sur des hypothèses émises concernant le mode de vie des usagers, et les résultats peuvent changer selon les scénarii choisis. Les données climatiques utilisées comme base de calcul sont issues de la station météorologique de Lyon pour les années 2000 à 2009.

130. Version 4.18.6.0, IZUBA Energies.

Il s'agit d'une période particulièrement chaude avec une année de canicule en 2003, donc plus défavorable pour le confort d'été. Choisir des données climatiques défavorables permet de rendre compte de la réaction de l'immeuble lors des conditions climatiques les plus extrêmes et d'anticiper ainsi le réchauffement climatique à venir. La réhabilitation de l'immeuble doit permettre aux habitants de conserver un confort satisfaisant même lors de températures élevées.

En plus des données climatiques et météorologiques, les caractéristiques du bâtiment sont entrées dans le logiciel. Tout d'abord, ses caractéristiques générales. Il s'agit d'un immeuble de neuf étages, répartis en trois allées distinctes. L'immeuble a une surface hors d'œuvre nette de 5 190 m². La surface cumulée des soixante logements est de 4 490 m². Sa façade nord possède 41,6 % de surface vitrée contre 58,4 % en façade sud. La constitution des parois est ensuite détaillée, donnant la résistance thermique de chacune d'entre elles. Ces données servent de base à la simulation de l'édifice. Le même process est réalisé pour les menuiseries et les vitrages, en considérant les différentes typologies, originelles et remplacées, présentes sur la façade et qui sont recensées avec précision. Grâce à la précision des données entrées dans la modélisation de l'immeuble, la STD se rapproche de la réalité. Cela reste néanmoins une simulation basée sur des hypothèses.

b. Les hypothèses de modélisation

Les estimations de besoins de chauffage sont réalisées à partir des scénarii d'occupation et d'apports internes moyennés à l'échelle du logement. Le nombre de personnes maximal par zone est défini comme suit : une personne dans les T1, trois dans les T3, quatre dans les T4, cinq dans les T5 et six dans les T6. Pour étudier le confort d'été dans les logements, il est préférable de réaliser des scénarii à l'échelle de chaque pièce, selon les heures de la journée. Le tableau suivant récapitule les scénarii d'occupation des logements pour la STD.

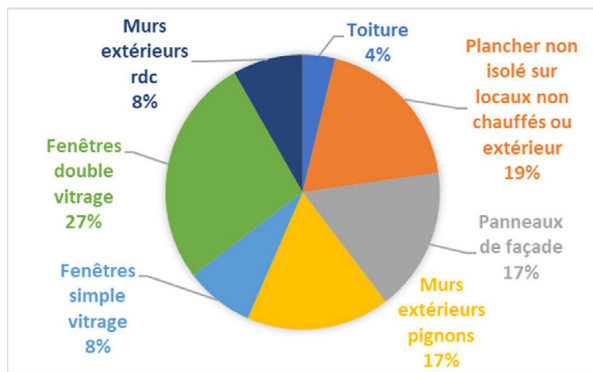
Heures	Pourcentage d'occupation			
	Séjour	Cuisine	Chambre	Logement entier
00h à 07h	0%	0%	100%	100%
07h à 08h	0%	100%	0%	100%
08h à 12h	0%	0%	0%	0%
12h à 13h	0%	100%	0%	100%
13h à 19h	0%	0%	0%	0%
19h à 20h	0%	100%	0%	100%
20h à 22h	100%	0%	0%	100%
22h à 24h	0%	0%	100%	100%

Des hypothèses sont également émises concernant la ventilation, les débits hygiéniques et les infiltrations. Les entrées d'air se font par des grilles placées en façade au niveau des cuisines. L'air est extrait dans les pièces humides par des conduits shunt qui débouchent en toiture. En hiver, un débit de 0,5 vol/h est imposé pour simuler cette ventilation naturelle et les infiltrations parasites. Dans l'étude du confort d'été, pour tenir compte de la ventilation nocturne par ouverture des fenêtres, ce débit de ventilation est augmenté la nuit de 21h à 7h à 1,6 vol/h pour les T1 qui ne sont pas traversants et à 2,5 vol/h pour les autres logements traversants. Concernant les consignes de chauffage, d'après l'audit énergétique réalisé par le bureau Erèmes en 2017, la température de consigne dans les logements dépasse les 21°C. Cependant, pour la simulation, la température de consigne du chauffage est fixée à 19°C dans tous les logements. En hiver, l'ensemble du bâtiment est chauffé à l'exception des cages d'escalier, des caves et des locaux communs. Il n'est pas prévu de réduire de température en période d'inoccupation.

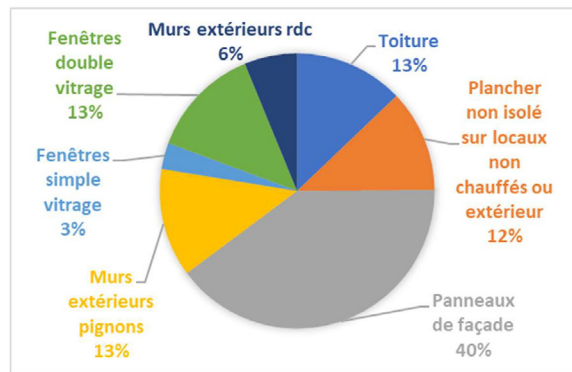
c. Le diagnostic de l'existant simulé

À partir de ces hypothèses, le bâtiment est modélisé et son comportement thermique est simulé. Un diagnostic de cet existant simulé est réalisé afin d'identifier la répartition des déperditions thermiques dans le bâtiment. Les fenêtres représentent le plus important poste de déperditions avec 35 % de celles-ci, dont 27 % dans les menuiseries double vitrage et 8 % dans les menuiseries simples vitrages. Ces chiffres s'expliquent par le nombre plus important de fenêtres en double vitrage sur l'immeuble. Ensuite, 19 % des déperditions se font par le plancher non isolé entre les locaux non chauffés du rez-de-chaussée (les caves, la chaufferie, les locaux poubelles ou vélos, et le hall d'entrée ouvert) et le premier niveau. Les murs pignons représentent 17 % des déperditions tout comme les parties opaques des panneaux de façades. Enfin les murs extérieurs du rez-de-chaussée comptabilisent 8 % des déperditions et la toiture 4 %. En mettant en relation ces pourcentages avec la répartition des surfaces déperditives, on peut mettre en évidence les points faibles de l'immeuble. Les fenêtres ne représentent que 16 % des surfaces mais cumulent le plus de déperditions, il s'agit d'un point d'amélioration prioritaire, ainsi que les planchers entre le rez-de-chaussée et le premier niveau, et les murs pignons. Les parties opaques des panneaux sont proportionnellement moins faibles, celles-ci représentant 40 % des surfaces déperditives, soit la part la plus importante et seulement 17 % des déperditions de l'enveloppe. Néanmoins, leur amélioration reste nécessaire pour le confort des occupants.

Répartition des déperditions dans l'existant :



Répartition des surfaces déperditives dans l'existant :



Pour évaluer le confort d'été, les séjours des logements ayant fait l'objet de la campagne de mesures d'été de TRIBU, orientés au sud, sont étudiés en particulier. Il s'agit du logement A, un T3 situé au huitième étage de l'allée A, laissé dans son état d'origine ; du logement B, un T5 situé au septième étage de l'allée C, dont les menuiseries sont remplacées par des fenêtres à double vitrage ; et du logement C, un T4 au troisième étage de l'allée B, dont les menuiseries sont changées en double vitrage et les parois isolées avec une dizaine de centimètres d'isolant supplémentaire. En revanche, dans la STD du bâtiment existant, les différences entre les simples et les doubles vitrages sont reproduites, mais l'ajout d'isolation par l'intérieur réalisé ponctuellement par les propriétaires des logements n'a pu être prise en compte. Les résultats suivants doivent donc être nuancés, l'isolation supplémentaire du logement C n'étant pas considérée.

Dans la STD, les trois logements ont un comportement similaire avec de faibles variations de température qui peuvent s'expliquer par la présence de double vitrage dans les logements B et C, ainsi que par la position des logements dans l'immeuble par rapport aux masques des arbres. Les logements en étages élevés sont soumis à des apports solaires plus importants. De plus, l'inertie apportée par les planchers en béton est peu exploitée dans cette simulation du fait de la faible isolation des panneaux Prouvé. L'occupation des logements a un impact non négligeable sur le confort. En effet, un pic de température à l'intérieur des logements en fin de journée est observé, probablement dû au retour des occupants dans leur logement (chaleur corporelle, éclairage, cuisson...). Ces apports internes conduisent à un dépassement de la limite d'inconfort en été sur plusieurs jours. L'objectif suivant est de confronter la réponse du bâtiment simulé à la réponse du bâtiment réel issue de la campagne de mesures de l'été 2018. Cependant, ces données ne sont pas comparables car la météo utilisée pour la simulation ne correspond pas à la météo réelle de l'été 2018. Cette comparaison vise davantage à souligner les différences d'hypothèses prises dans la simulation par rapport à la réalité du bâtiment.

Tableau de températures remarquables dans les logements *simulés sur Pléiades*

Valeurs remarquables de température (semaine la plus chaude de la simulation)	Extérieur	Logement A : T3, 8e étage	Logement B : T5, 7e étage	Logement C : T4, 3e étage
Température maximale	33,7°C	29,5°C	29,2°C	29,3°C
Température minimale	20,9°C	24,6°C	24,5°C	24,2°C
Température moyenne	26,4°C	27,4°C	27,2°C	27,1°C
Nombre d'heures d'inconfort supérieures à 28°C (sur 96 heures de simulation)		30 heures	19 heures	16 heures
		31%	20%	17%

Tableau de températures remarquables dans les logements instrumentés lors de la campagne de mesures

Valeurs remarquables de température (28 juin - 3 juillet)	Extérieur, hall à l'ombre	Logement A : T3, 8e étage	Logement B : T5, 7e étage	Logement C : T4, 3e étage
Température maximale	33,1°C	29,6°C	29,0°C	28,8°C
Température minimale	19,7°C	25,2°C	23,6°C	24,4°C
Température moyenne	25,9°C	27,3°C	26,1°C	26,1°C
Nombre d'heures d'inconfort supérieures à 28°C (sur 144 heures de mesures)		46 heures	9 heures	3 heures
		32,1%	6,3%	2,3%

La comparaison des mesures issues du modèle Pléiades et des mesures réelles permet de constater que les valeurs théoriques et réelles sont très proches dans le logement A, ainsi que le taux d'inconfort situé entre 31 et 32 %. Cette observation suggère que le modèle Pléiades réalisé est adapté pour simuler le comportement de l'immeuble. Par la suite, le logement A est conservé comme référence pour évaluer l'incidence des différentes améliorations proposées sur le confort d'été. Dans le logement B, l'inconfort semble surestimé par la simulation. Ce décalage s'explique par la faible occupation du logement. Alors que la simulation prend en compte cinq habitants maximum par appartement, dans la réalité seules trois personnes l'occupent au quotidien. Cette comparaison souligne l'importance des apports internes liés aux occupants sur le taux d'inconfort d'un logement. Le taux d'inconfort est également surestimé dans le logement C, le modèle Pléiades ne prenant pas en compte l'isolation des panneaux Prouvé réalisée par les propriétaires de ce logement. Cette observation montre l'intérêt de l'isolation des parois qui permet de réduire significativement l'inconfort dans les logements. Ces constats se rapprochent des conclusions du rapport de la campagne de mesures *in situ*.

d. La description des travaux d'amélioration envisagés

Compte tenu de ces résultats, diverses interventions sont proposées pour améliorer les performances de l'enveloppe du bâtiment. Le tableau ci-après récapitule les différentes interventions modélisées dans la STD. En ce qui concerne les matériaux employés pour atteindre les objectifs visés, les matériaux biosourcés sont à privilégier pour réduire l'empreinte énergétique des travaux et favoriser l'usage de ressources durables. Concernant l'amélioration du confort d'été dans les logements, il est nécessaire de réduire les apports solaires en diminuant le facteur solaire global des vitrages. Le facteur solaire d'un vitrage performant se situe entre 0,6 et 0,7. L'ajout de stores intérieurs très réfléchissants, d'aspect aluminium poli, toile ou vénitien permet d'abaisser le facteur solaire à 0,25. Il en va de même pour l'intégration d'un store quasi-opaque entre deux fenêtres ou entre deux vitrages dont la menuiserie doit également être claire et isolante (non métallique). Un store intermédiaire peut également permettre d'abaisser le facteur solaire à 0,15 si celui-ci est à faible transmission, positionné dans une double peau ventilée avec un vitrage faiblement émissif en face 3, coté intérieur. Un store toile extérieur parallèle au vitrage et possédant un coefficient de transmission énergétique inférieur à 0,10 permet également d'obtenir un facteur solaire de 0,15 tandis qu'un store toile extérieur clair et quasi-opaque possédant un coefficient de transmission énergétique inférieur à 0,05 permet d'abaisser le facteur solaire à 0,10, tout comme des stores vénitiens extérieurs clairs à lames rigides ou encore des jalousies. Il existe donc plusieurs solutions envisageables pour réduire les apports solaires dans les logements, les protections extérieures étant plus efficaces. Les solutions proposées doivent néanmoins respecter l'architecture de l'édifice. Pour cela, un travail collaboratif est à mener entre thermiciens, architectes et storistes.

Des améliorations sont également envisagées concernant les systèmes de chauffage, de ventilation, d'eau chaude sanitaire et d'éclairage. Concernant la ventilation, la mise en place d'un système hybride basse pression en toiture est envisagée pour améliorer l'extraction de l'air par les conduits shunt. De nouvelles entrées d'air sont alors mises en place sur les menuiseries des pièces de vie. La mise en œuvre de cette solution, si le dimensionnement des conduits existants l'autorise, permet de conserver la ventilation naturelle existante et de l'assister lorsque ses débits sont insuffisants. Pour améliorer le système de chauffage, l'installation d'une chaudière gaz à condensation et de thermostats dans les appartements pour réguler le chauffage peut être envisagée. Les réseaux peuvent être calorifugés et remplacés pour les plus altérés. Concernant l'eau chaude sanitaire, une solution centralisée connectée à la nouvelle

Poste d'action	Performance existant estimée	Objectif de performance	Exemples de solutions techniques
VE1 : Isolation de la toiture-terrasse	Up=0,58 W/m ² .K R=1,75m ² .K/W	Up=0,11 W/m ² .K R=9,0m ² .K/W	20 cm de polyuréthane (λ=0,022 W/m.K) ou polystyrène
VE2 : Isolation des panneaux Prouvé par l'intérieur	Up=0,74 W/m ² .K R=1,3 m ² .K/W	Up=0,17 W/m ² .K R=5,8 m ² .K/W	Isolant sous-vide de 25mm / isolant polystyrène de 10 cm / isolant fibre de bois 14,5 cm
VE3 : Isolation des murs pignons par l'extérieur	Up=3,0 W/m ² .K R=0,33 m ² .K/W	Up=0,15 W/m ² .K R=6,8 m ² .K/W	20 cm de polystyrène graphité
VE4 : Isolation sous-face de plancher entre rdc et 1er étage	Ueq=1,54 W/m ² .K R=0,45 m ² .K/W	Ueq=0,14 W/m ² .K R=4,9 m ² .K/W	Panneaux rigide en laine de bois de 15 cm ou en laine de bois
VE5 : changement des menuiseries	Uw=3 ou 4 W/m ² .K	Uw=1,4 W/m ² .K	Double vitrage ou double-fenêtre
VE6 : isolations des murs du rdc entre locaux chauffés et non chauffés	Up=3,52 W/m ² .K R=0,28 m ² .K/W	Up=0,24 W/m ² .K R=4,2 m ² .K/W	Laine de roche de 16 cm (λ=0,041 W/m.K) ou laine de chanvre de 24 cm (λ=0,06 W/m.K)

chaudière en semi-accumulation avec bouclage est imaginée pour réduire les consommations liées à ce poste. L'ensemble des actions imaginées est ensuite simulé dans la STD pour rendre compte de leur impact sur les performances de l'enveloppe et de l'immeuble.

e. Les résultats des simulations

L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment

Les ingénieurs du bureau d'études TRIBU simulent ensuite ces travaux d'amélioration sur la modélisation du bâtiment. Les scénarii d'évaluation des besoins de chauffage sont calculés en considérant une isolation équivalente dans l'ensemble des appartements. Cette hypothèse permet d'évaluer les besoins de chauffage à l'échelle de l'ensemble du bâtiment, mais ne reflète pas la situation réelle. En effet, les propriétaires de l'immeuble Les Cèdres peuvent choisir de réaliser ou non les travaux à l'intérieur de leur logement, selon le règlement intérieur de la copropriété et selon leurs moyens financiers. De plus, différents bouquets de travaux avec des performances et coûts variés peuvent leur être proposés. Les résultats donnés dans les tableaux et diagrammes suivants doivent donc être nuancés.


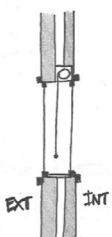

Variante enveloppe	Réduction des besoins annuels en chauffage /existant	Réduction estimée des consommations annuelles en énergie primaire	Etiquette énergétique projetée
Existant	-	-	Classe E
VE1 : Isolation du toit-terrasse	4%	3%	Classe E
VE2 : isolation des panneaux Prouvé	15%	10%	Classe D
VE3 : isolation des murs pignon	23%	16%	Classe D
VE4 : Isolation des planchers bas sur LNC	10%	7%	Classe D
VE5 : Changement des fenêtres	18%	13%	Classe D
VE6 : Isolation des murs au rez-de-chaussée	2%	1%	Classe E
VE7 : rénovation enveloppe performante (toutes les solutions enveloppe ci-dessus)	71%	49%	Classe C

Ces résultats démontrent le peu d'intérêt d'une réhabilitation partielle. Ne réaliser que l'isolation des panneaux sans changer les menuiseries n'apporte qu'une amélioration minimale. Pour obtenir des résultats satisfaisants, il est préférable d'agir sur plusieurs postes. De plus,

une isolation partielle peut conduire à une détérioration du confort des usagers avec des différences de températures entre les parois isolées et non isolées. Un bâtiment correctement isolé, dans lequel les infiltrations sont réduites, permet aux habitants de bénéficier d'un confort thermique satisfaisant avec une température de consigne plus faible que dans le bâtiment dans son état actuel. Dans le cas de la variante « VE7 enveloppe performante », la diminution de la température de consigne de 23°C à 19°C abaisse les besoins en chauffage de 35 %, ce qui est considérable.

L'amélioration du confort d'été

Pour évaluer l'incidence des solutions choisies sur le confort des habitants en été, le logement A (T3 au huitième étage de l'allée A) est choisi comme référence. Il s'agit du logement que le modèle simule le mieux au niveau du confort d'été, celui-ci étant le plus défavorable. Les variantes de confort (VC) simulées sont décrites dans le tableau ci-dessous :

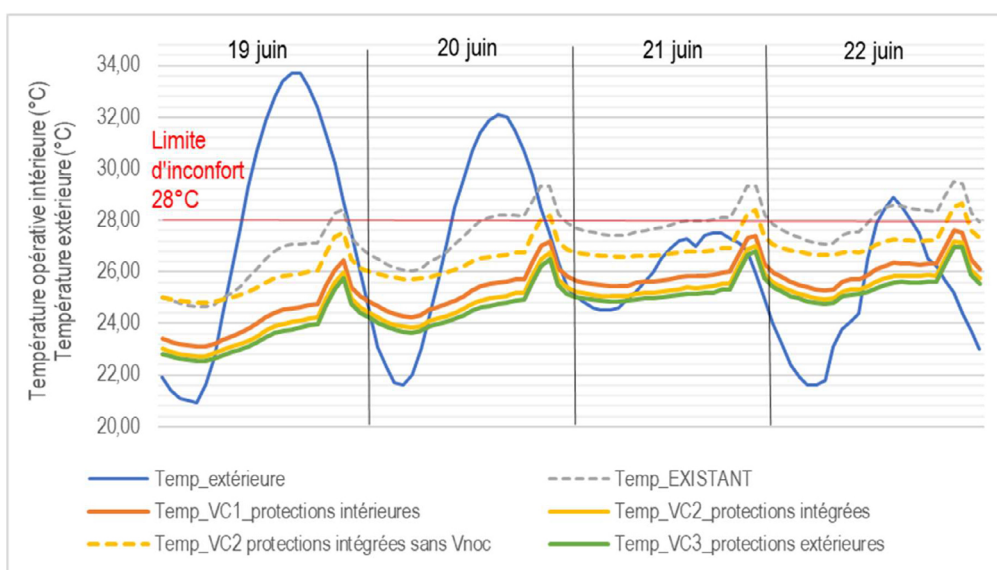
Variante confort	Enveloppe ?	Ventilation nocturne ?	Protections solaires ?
<p>VC1 : stores intérieurs très réfléchissants</p> 	<p>Variante isolation BBC : toit + panneaux Prouvé + pignons + planchers bas + changement fenêtres + murs escaliers rdc</p>	<p>Ouverture nocturne des fenêtres en été de 21h à 7h</p> <p>2,5 vol/h pour les appartements traversants</p> <p>1,6 vol/h pour les T1 non traversants</p>	<p>Stores intérieurs très réfléchissants (aspect aluminium) FS = 0,25</p> <p>Facteur solaire simulé = 0,30 (pour prendre en compte l'occultation partielle du vitrage en fonction des usages)</p>
<p>VC2 : stores intégrés dans une double fenêtre</p> 	<p>Variante isolation BBC : toit + panneaux Prouvé + pignons + planchers bas + changement fenêtres + murs escaliers rdc</p>	<p>Ouverture nocturne des fenêtres en été de 21h à 7h</p> <p>2,5 vol/h pour les appartements traversants</p> <p>1,6 vol/h pour les T1 non traversants</p>	<p>Stores vénitiens incorporés dans une double fenêtre FS = 0,15</p> <p>Facteur solaire simulé = 0,20</p>
<p>VC3 : stores extérieurs</p> 	<p>Variante isolation BBC : toit + panneaux Prouvé + pignons + planchers bas + changement fenêtres + murs escaliers rdc</p>	<p>Ouverture nocturne des fenêtres en été de 21h à 7h</p> <p>2,5 vol/h pour les appartements traversants</p> <p>1,6 vol/h pour les T1 non traversants</p>	<p>Stores vénitiens extérieurs ou stores toiles extérieurs FS = 0,10</p> <p>Facteur solaire simulé = 0,15</p>

Ces trois variantes sont intégrées au modèle Pléiade et sont analysées sur la semaine la plus chaude du modèle. La température extérieure oscille entre 20,9°C et 33,7°C avec une température moyenne de 26,4°C. La température moyenne d'un logement existant simulé, avec ventilation nocturne, est de 27,4°C. Le seuil d'inconfort fixé à 28°C est dépassé durant trente heures sur quatre-vingt-seize. L'installation de stores intérieurs réfléchissants permet d'abaisser la température intérieure de 2°C et de ne pas dépasser le seuil d'inconfort sur la période simulée. La température intérieure du logement dans son état actuel excède les 26°C¹³¹ durant vingt-neuf heures. Un store vénitien inséré entre deux fenêtres est encore plus efficace, avec une température intérieure moyenne de 24,9°C et une température intérieure n'excédant 26°C que durant onze heures. Cependant, sans ventilation nocturne, les 26°C sont constamment dépassés dans le logement et le seuil d'inconfort est dépassé durant six heures. Cette information permet d'affirmer la nécessité de réaliser une ventilation nocturne quotidienne durant les périodes de fortes chaleurs. Le store extérieur permet de gagner 0,2°C de température moyenne par rapport au store intermédiaire entre deux fenêtres. Cela semble peu, mais il permet également de ne jamais excéder les 27°C dans le logement et de ne dépasser les 26°C que durant sept heures. La solution la plus efficace pour le confort d'été est donc le store extérieur. Un store intermédiaire permet également d'atteindre un niveau de confort d'été satisfaisant. Les trois solutions permettent de faire passer la température moyenne intérieure en dessous de la température moyenne extérieure. On note en revanche que l'efficacité d'une protection solaire est corrélée à l'efficacité de la ventilation nocturne qui dépend de paramètres difficiles à prendre en compte comme les habitudes des occupants, la vitesse et l'orientation du vent, la typologie des logements, ou encore le phénomène de surchauffe urbaine et d'îlot de chaleur.

Variante	Température maximale	Température moyenne	Température minimale
Extérieur	33,7°C	26,4°C	20,9°C
Existant avec ventilation nocturne	29,5°C	27,4°C	24,6°C
VC1 : stores intérieurs réfléchissants avec ventilation nocturne	27,6°C	25,4°C	23,1°C
VC2 : stores vénitiens entre double fenêtre avec ventilation nocturne	27,2°C	24,9°C	22,7°C
VC2 : stores vénitiens entre double fenêtre sans ventilation nocturne	28,7°C	26,5°C	24,8°C
VC3 : stores vénitiens extérieurs avec ventilation nocturne	27,0°C	24,7°C	22,5°C

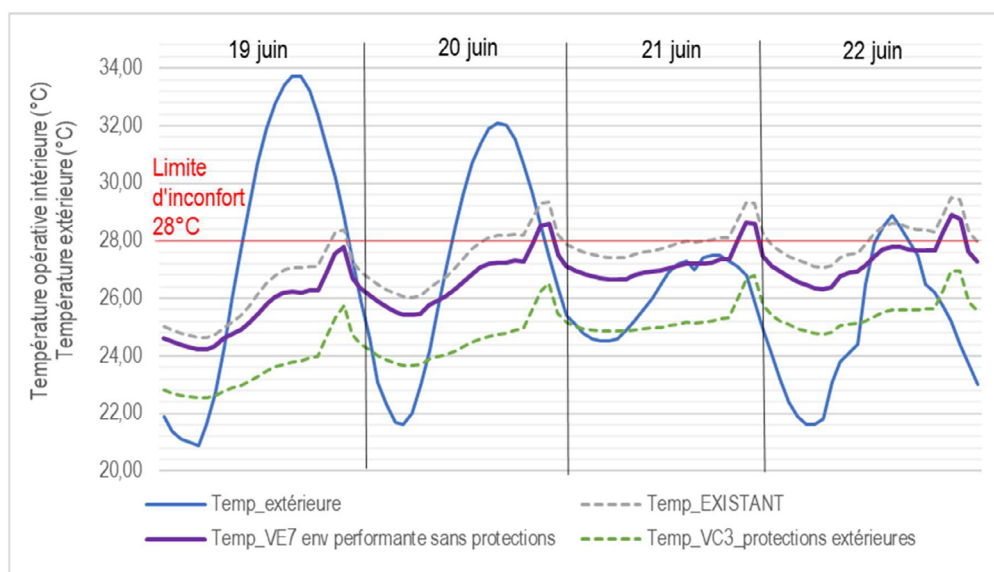
131. La RE 2020 considère la limite de 26°C comme un seuil de confort plus acceptable que le seuil d'inconfort maximal de 28°C.

En analysant l'évolution de la température sur la semaine la plus chaude pour les différentes variantes, on peut déduire que l'ajout de protections solaires apporte de la résilience au bâtiment en réduisant le pic de température dû aux apports solaires. Au moment où la température extérieure est maximale, les courbes de température des variantes de confort sont plus aplaties que la courbe dans l'existant représentée en pointillés gris. En revanche, le pic de fin de journée lié à l'occupation du logement n'est pas impacté. Quelle que soit la variante choisie, le confort estival dans le bâtiment est assuré à condition que les occupants utilisent de manière appropriée les protections solaires et ouvrent les fenêtres pour ventiler naturellement les logements pendant la nuit. Cependant, le type de protections solaires le plus performant reste les protections extérieures.







Evolution de la température intérieure du séjour du T3 (logement A) sur la semaine la plus chaude de la simulation

L'incidence de l'isolation de l'enveloppe sur le confort d'été



Evolution de la température intérieure du séjour du T3 (logement A) dans la variante enveloppe performante

Variante	Température maximale	Température moyenne	Température minimale	Nombre d'heures d'inconfort T > 26°C		Nombre d'heures d'inconfort T > 27°C		Nombre d'heures d'inconfort T > 28°C	
Extérieur	33,7°C	26,4°C	20,9°C						
Existant avec ventilation nocturne	29,5°C	27,4°C	24,6°C	85 heures	89 %	70 heures	73 %	30 heures	31 %
Variante VE7 enveloppe performante avec ventilation nocturne	28,6°C	26,2°C	24,2°C	35 heures	36 %	13 heures	14 %	2 heures	2%

Inconfort > 60%	
Inconfort < 30%	
Inconfort < 10%	
Inconfort = 0%	

D'après les résultats de la variante VE7 enveloppe performante, en violet sur le graphique ci-dessus, l'isolation du logement permet de réduire la température moyenne dans le séjour de plus de 1°C, et d'abaisser le nombre d'heures d'inconfort avec des températures intérieures supérieures à 28°C à deux heures sur la semaine la plus chaude de la simulation. Améliorer l'isolation de l'enveloppe permet de réduire les besoins en chauffage du bâtiment, mais aussi d'améliorer le confort d'été dans les logements. Ce résultat rejoint les conclusions de la campagne de mesures menée conjointement sur l'immeuble Les Cèdres du 20 juin au 4 juillet 2018. Cependant, seule l'isolation du logement combinée aux protections solaires et à la ventilation nocturne permet d'atteindre un confort satisfaisant, ce qui souligne l'importance de réaliser une intervention globale.

L'amélioration des systèmes énergétiques

La simulation thermique dynamique permet également de modéliser l'amélioration des systèmes énergétiques. La simulation intègre le remplacement de la chaudière actuelle pour une chaudière à gaz à condensation, l'ajout de thermostats dans les appartements, le changement et le calorifugeage des réseaux, selon l'état de l'existant. Le système de ventilation est amélioré avec l'installation de ventilateurs sur les extractions pour assister la ventilation naturelle existante. L'eau chaude sanitaire est produite de manière centralisée, avec un dispositif de comptage individualisé, et les luminaires sont remplacés par des éclairages LED basse consommation. À l'aide d'un outil développé par TRIBU, l'incidence de l'amélioration des systèmes sur les consommations du bâtiment est évaluée en prenant comme références les STD de l'état existant et de la variante VE7 enveloppe performante. L'amélioration des systèmes permet de réduire les consommations en énergie primaire liées au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire. De plus, le passage d'une production d'eau chaude sanitaire électrique à une production au gaz permet de diminuer les charges annuelles liées à ce poste. Combiner l'amélioration des systèmes à l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment permet de diviser presque par trois les consommations d'énergie de l'immeuble. Pour

atteindre le label Effinergie Ecorénovation sur l'immeuble Les Cèdres, la consommation doit se limiter à 96 kWhEP/m².an. Le tableau ci-contre récapitule les scénarios étudiés et leur capacité d'atteinte du niveau BBC défini. La rénovation complète de l'enveloppe du bâtiment s'approche de l'objectif basse consommation, mais seule la rénovation combinée de l'enveloppe et des systèmes garantit une performance énergétique suffisante.

f. Conclusions de l'étude

La simulation thermique dynamique montre plusieurs faiblesses dans l'enveloppe thermique du bâti, notamment au niveau des planchers non isolés du premier étage donnant sur l'extérieur et sur des locaux non chauffés ; des menuiseries extérieures en aluminium et des panneaux de façade peu ou pas isolés ; ainsi que des murs pignons non isolés. Ces postes de déperditions thermiques représentent un gisement non négligeable d'amélioration de l'enveloppe et de réduction des consommations d'énergie. Cette étude de simulation permet également d'évaluer l'incidence de travaux d'amélioration de l'enveloppe du bâtiment sur les besoins en chauffage de la copropriété. Conformément au diagnostic de l'existant, les améliorations qui permettent de réduire le plus les besoins en chauffage sont le remplacement des fenêtres, l'isolation des murs pignons par l'extérieur et l'isolation des panneaux par l'intérieur. Cependant, une réhabilitation partielle de l'enveloppe a peu d'intérêt car elle ne permet pas d'atteindre le niveau BBC – bâtiment basse consommation – Rénovation qui donne accès à des financements pour la copropriété. En termes de confort, réaliser des isolations partielles peut s'avérer contreproductif, les différences de températures entre les parois isolées et non isolées pouvant provoquer un déséquilibre des ambiances particulièrement inconfortable. Une rénovation complète de l'enveloppe du bâtiment comprenant l'isolation de la toiture, des murs pignons, des façades légères, des planchers bas et le changement des fenêtres, serait donc préférable. De plus, seule l'amélioration conjointe des systèmes énergétiques et de l'enveloppe thermique du bâtiment permet d'atteindre le niveau de performance basse consommation. L'amélioration de l'isolation, combinée à l'ajout de thermostats dans les logements permet de diminuer la température de consigne en hiver et de réduire les besoins de chauffage en conséquence. Le renforcement de l'isolation du bâtiment augmente l'étanchéité de l'enveloppe. Cette diminution de la perméabilité de la façade peut détériorer la ventilation naturelle des logements. Un système de ventilation performant, de préférence une ventilation naturelle hybride, doit donc être mis en place pour compenser ces pertes. Concernant le confort d'été, la simulation thermique dynamique de l'immeuble Les Cèdres

permet de confirmer les observations réalisées lors de la campagne de mesures menée dans trois logements du 20 juin au 4 juillet 2018. Dans les logements non rénovés, le taux d'inconfort en été est supérieur à 30 %. L'isolation des panneaux et le changement des fenêtres sont nécessaires pour améliorer le confort des habitants en été et exploiter l'inertie apportée par les planchers en béton non isolés, ce qui est confirmé par la simulation de l'immeuble. Cependant, l'amélioration du confort d'été passe inévitablement par l'ajout de protections solaires performantes sur les vitrages. L'étude démontre que l'ajout de protections solaires avec un facteur solaire global inférieur ou égal à 0,25, combiné à la ventilation nocturne permet de réduire le nombre d'heures d'inconfort de manière satisfaisante. L'enjeu consiste donc à mettre en place une solution technique assez performante pour garantir un facteur solaire global, comprenant le vitrage et le store, inférieur ou égal à 0,25. La pose de protections solaires extérieures permettrait d'atteindre ce facteur solaire le plus facilement. Lors du choix des systèmes techniques de protection solaire, il est conseillé de tenir compte de la capacité d'action de l'occupant sur son environnement qui est un paramètre fondamental du confort, avec par exemple une gestion manuelle des protections solaires. La simulation thermique du bâtiment démontre d'ailleurs que l'incidence des pratiques des habitants sur le confort dans leur logement est considérable (ventilation nocturne, apports internes liés à l'occupation, à la cuisson, etc.). La sensibilisation des occupants à travers la diffusion des résultats est donc une étape clé du projet.

Partie 4 : Les diagnostics acoustiques¹³²

1 – Les mesures environnementales

a. L'environnement sonore du site

La première étape des diagnostics acoustiques consiste à caractériser l'environnement sonore du site, principalement gêné par les bruits liés aux trafics routiers et à l'activité présente dans la résidence. Pour envisager des améliorations acoustiques de l'enveloppe de l'immeuble Les Cèdres, il est nécessaire de quantifier avec précision les nuisances sonores auxquelles il est soumis. Pour cela, trois points de mesures longues durées sont installés en façade de du

132. Les résultats des diagnostics acoustiques, diagrammes, graphiques et tableaux sont issus des études menées par le bureau d'études LASA, avec le concours de Samuel Tochon-Danguy, gérant, et de Sylvain Fenon, ingénieur acousticien. Voir dossier en annexe 11.

bâtiment à différentes hauteurs. Le point fixe n°1, ou PF1, est positionné en façade du projet, au rez-de-chaussée, à environ deux mètres du sol. PF2 est situé dans une loggia ouverte du quatrième étage de l'immeuble et PF3 dans une loggia ouverte du huitième étage.

Les conditions météorologiques doivent également être considérées lors des prises de mesures environnementales longues durées. En effet, selon la norme NFS 31-010, les conditions météorologiques peuvent influencer sur le résultat en perturbant la mesure avec des actions parasites sur le microphone comme la pluie. De plus, la météorologie influence sur les conditions de propagation du son, et d'autant plus lorsque la source de bruit est éloignée du point de mesure. Lors des diagnostics acoustiques environnementaux de l'immeuble, la vitesse du vent est inférieure à deux mètres par seconde et aucune précipitation n'est mesurée. Les conditions météorologiques sont conformes à la norme NFS 31-010 et n'ont pas d'effets notoires sur les résultats des mesures acoustiques.

b. Les analyses des mesures acoustiques environnementales

La comparaison des trois points de mesures montre des résultats sensiblement similaires, d'un point de mesure à l'autre, en période diurne comme en période nocturne. Les nuisances dues aux trafics routiers sont donc les mêmes sur l'ensemble de la façade. Un pic de circulation lié aux trajets domicile/travail est observé en début de matinée (6h-8h) et en fin de journée (17h-19h). Ce pic engendre des nuisances d'environ 65 dB(A). Le reste de la journée, l'environnement sonore est plutôt calme avec environ 58 dB(A), caractérisé par l'activité de la ville et de la résidence. En période nocturne, le niveau sonore diminue de façon importante pour atteindre 52 dB(A). Néanmoins, la circulation produit des fluctuations de niveaux sonores avec des pics lors du passage d'un véhicule sur la rue de la Favorite. Selon le type de véhicule et sa vitesse, le niveau sonore varie. Globalement, les mesures permettent de constater une forte circulation en période nocturne avec un véhicule toutes les deux minutes environ. À l'heure actuelle, la rue de la Favorite est classée en catégorie 3, c'est-à-dire comme une voirie soumise à des nuisances de 73 dB(A). Or, les nuisances mesurées sur place lors des mesures environnementales sont de 58 dB(A) en moyenne ce qui correspond davantage à une voirie de catégorie 5. Ces catégories réglementaires conditionnent les performances d'isolement acoustique que doivent atteindre les façades de l'immeuble. En catégorie 3, les façades doivent avoir un isolement acoustique d'au moins 38 dB(A) tandis qu'en catégorie 5, cet isolement est abaissé à 30 dB(A). La norme exigerait aujourd'hui un

isolement de 38 dB(A) pour un logement neuf, mais en considérant les nuisances réelles auxquelles est soumis l'édifice un isolement de 30 dB(A) permettrait d'atteindre un niveau de confort suffisant et demanderait moins d'effort à l'enveloppe. L'équipe choisit de se conformer à cet objectif dans le cadre de la rénovation de l'immeuble.

2 – L'isolement acoustique des façades

a. Description des mesures réalisées

Une fois l'environnement sonore de l'édifice caractérisé, il est nécessaire de connaître la capacité d'isolation globale des appartements vis-à-vis des bruits extérieurs, et donc de leurs enveloppes. Des mesures d'isolement acoustique sont donc réalisées en plaçant une source de bruit directionnelle normalisée à l'extérieur, à une distance définie, qui varie selon l'étage du logement étudié. Le niveau de bruit est ensuite mesuré depuis l'appartement, à une distance de deux mètres de la façade, au centre du local de réception. Ce protocole doit être respecté sur l'ensemble des mesures pour obtenir des valeurs d'isollements acoustiques standardisés pondérés. Pour rendre compte de la pluralité des situations présentes sur l'immeuble, du fait des transformations réalisées par les habitants, des mesures sont réalisées dans plusieurs appartements. Le premier, ou configuration 1 – C1 – est la loge du gardien, appartement vacant situé au rez-de-chaussée de l'immeuble, dans ses dispositions d'origine¹³³. Le second, ou configuration 2 – C2 – est un appartement T5 situé au premier étage de l'immeuble, dans l'allée A, dont les menuiseries sont remplacées par des châssis aluminium à double vantaux coulissants dotés d'un double vitrage de type G4/6/G8. Le dernier, ou configuration 3 – C3 – est un appartement T4 du troisième étage de l'allée B, dont les menuiseries sont changées par des châssis aluminium à double vantaux coulissants équipés d'un double vitrage de type G4/6/G8, et dont les panneaux sont doublés par l'intérieur avec une laine minérale de dix centimètres et une plaque de plâtre de type BA13. L'isolement le plus faible est mesuré logiquement sur la façade du logement C1 avec un isolement de 19 dB, loin des 30 dB nécessaires pour assurer le confort des habitants et des 38 dB à atteindre pour rentrer dans la norme attendue pour des logements neufs. Le panneau d'origine de façade possède donc une faible capacité d'isolement acoustique tant dans ses parties opaques qu'au niveau de sa menuiserie. Dans le salon du logement C2, l'isolement acoustique est de 24 dB ce

133. Panneaux sandwichs Prouvé en aluminium polystyrène et contreplaqué bois de soixante-deux millimètres, menuiserie coulissante en aluminium avec simple vitrage de trois millimètres.

qui indique que le remplacement des menuiseries permet d'améliorer l'isolement de la façade de 5 dB. Enfin, dans le salon du logement C3 l'isolement augmente de 7 dB pour atteindre 31 dB. Le doublage isolant et le changement de la fenêtre permettent d'atteindre un isolement acoustique de 30 dB, identifié comme nécessaire pour isoler les habitants de l'immeuble des nuisances sonores extérieures liées à la circulation et évaluées à 58 dB.

c. Les mesures acoustiques en champ proche

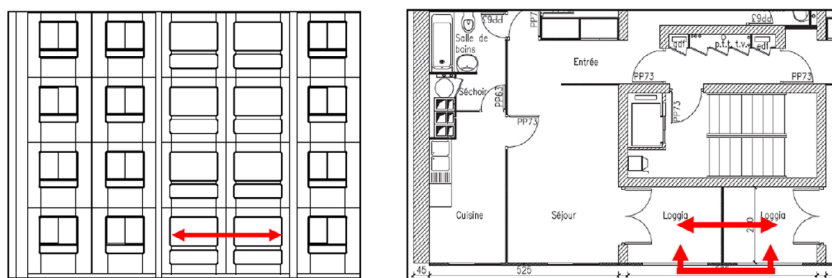
Dans le but d'approfondir l'analyse des résultats de mesures d'isolement « global », le bureau d'études LASA réalise des mesures d'investigation en champ proche. Celles-ci permettent d'identifier et de hiérarchiser les différentes voies de transmissions sonores au sein de l'enveloppe. Elles permettent également de quantifier l'amélioration liée aux travaux de renforcement réalisés par certains habitants. Un maillage précis à faible distance de la paroi et des jonctions, environ deux centimètres, est réalisé. Le nombre de points varie en fonction de la configuration et des contraintes liées au site.

Le logement C1 - Le local du gardien

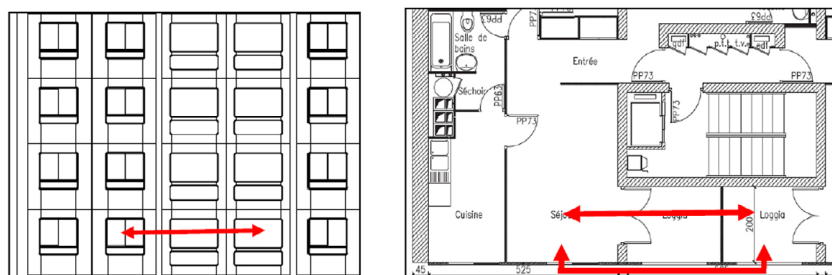
Dans la configuration d'origine, les niveaux mesurés sont sensiblement les mêmes sur l'ensemble des points de mesures. En effet, la constitution et la faible épaisseur du panneau d'origine ou du vitrage entraînent un rayonnement important de ces éléments. Des faiblesses d'isolement acoustique sont également présentes au niveau du joint de la menuiserie et du joint creux de la façade.

Le logement C2 - T5 au 1^{er} étage de l'allée A (salon, loggia et chambre)

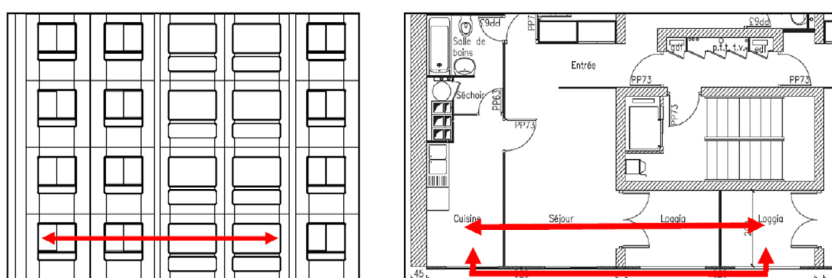
Comme précisé dans le paragraphe précédent, la mise en œuvre de doubles vitrages permet un gain d'environ 5 dB sur la valeur d'isolement global. Les vitrages sont moins faibles dans cette configuration. Le rayonnement important du panneau d'origine est quant à lui toujours bien présent dans l'ensemble des locaux testés. De plus dans la loggia, une faiblesse significative est observable au niveau de la surface vitrée basse de l'allège, élément d'origine de la façade d'une épaisseur de trois millimètres. Dans la chambre, le pont phonique prédominant se trouve au niveau du joint creux situé entre deux panneaux de façade. D'une manière générale, les joints et assemblages sont des points faibles d'isolement acoustique sur la façade de l'immeuble Les Cèdres. Etant constituées d'éléments préfabriqués assemblés, les façades de l'immeuble possèdent de nombreux joints.



Ouverture Loggia N°59	Ouverture Loggia N°60	Isolement acoustique $D_{nt,A}$ en dB Mesuré le 30/05/2018	N° Fiche
100% Ouverte	100% Ouverte	34	D13
100% Ouverte	100% Fermée	41	D14
20% Ouverte	20% Ouverte	37	D15
100% Fermée	100% Fermée	40	D12



Ouverture Loggia N°59	Ouverture Loggia N°60	Isolement acoustique $D_{nt,A}$ en dB Mesuré le 30/05/2018	N° Fiche
100% Ouverte	100% Ouverte	42	D17
100% Ouverte	100% Fermée	47	D18
20% Ouverte	20% Ouverte	46	D19
100% Fermée	100% Fermée	49	D16



Ouverture Loggia N°59	Ouverture Loggia N°60	Isolement acoustique $D_{nt,A}$ en dB Mesuré le 30/05/2018	N° Fiche
100% Ouverte	100% Ouverte	48	D21
100% Ouverte	100% Fermée	54	D22
20% Ouverte	20% Ouverte	52	D23
100% Fermée	100% Fermée	56	D20

Le logement C3 - T5 au 3^e étage de l'allée B (salon et loggia)

Dans le salon de cet appartement, la mise en œuvre d'un doublage intérieur semble permettre de diminuer fortement la contribution liée à la faiblesse du panneau de façade d'origine. En effet, en comparant avec les mesures précédentes, le gain apporté est d'environ 7 dB sur la valeur d'isolement global. Le doublage permet d'atténuer considérablement les ponts phoniques recensés au niveau des joints entre panneaux. Concernant la loggia, cette dernière n'est pas doublée. Cette configuration est donc identique à celle mesurée dans l'appartement C2. La faiblesse prédominante est également similaire et se situe au niveau de la surface vitrée basse.

3 – L'isolement acoustique latéral

La façade de l'immeuble présente également la particularité d'abriter des loggias pour chacun de ses appartements. En fonction des rénovations réalisées, ces dernières peuvent être ouvertes, fermées partiellement ou fermées complètement. Les diagnostics thermiques ayant permis de conclure à la nécessité pour les habitants d'ouvrir régulièrement leurs fenêtres, la question du bruit émis depuis ces loggias, vers les loggias ou pièces voisines se pose. En effet, les habitants doivent pouvoir profiter de la ventilation naturelle et nocturne en été, sans percevoir les bruits de leurs voisins profitant de leurs loggias en soirée. Des mesures acoustiques sont donc réalisées en émettant un son depuis une loggia et dans différentes configurations d'ouvertures ou fermetures afin de simuler l'ensemble des possibilités et mesurer l'impact d'une éventuelle gêne.

a. De loggia à loggia

Les premières mesures sont réalisées entre les loggias des appartements n° 59 et n° 60, situés tous les deux au premier étage de l'allée A. Leurs deux loggias sont complètement fermées et disposent de menuiseries à double vitrage correspondant à la configuration n° 2 avec, en allège, un hublot vitré en simple vitrage d'origine. Les résultats indiquent une capacité d'isolement moyenne de loggia à loggia avec un isolement de 34 dB lorsque les deux fenêtres sont ouvertes et de 40 dB lorsque les deux sont fermées. La réglementation exige un isolement acoustique de 53 dB entre deux appartements voisins à plus ou moins 3 dB. L'isolement entre deux loggias est donc insuffisant. La mesure avec une fenêtre ouverte et une fenêtre fermée donne un isolement de 41 dB légèrement supérieur à l'isolement mesuré lorsque les deux fenêtres sont fermées, ce qui peut indiquer une faiblesse d'isolement au niveau de la paroi séparative entre deux loggias, qui n'est pas structurelle et semble être en briques.

b. De la loggia au salon

Pour poursuivre les investigations concernant les nuisances potentielles depuis les loggias, des mesures sont ensuite réalisées entre la loggia de l'appartement n° 59 et le salon de l'appartement n° 60. Ces deux locaux sont complètement fermés et disposent de menuiseries à double vitrage correspondant à la configuration n° 2. Les deux locaux sont séparés par la loggia de l'appartement n° 60, en conséquence, les isolements mesurés sont supérieurs aux précédents. Lorsque les deux fenêtres sont complètement ouvertes, l'isolement acoustique mesuré est de 42 dB, soit un isolement encore trop faible selon la norme. En revanche, lorsque les deux fenêtres sont fermées, l'isolement atteint 49 dB et s'approche ainsi des valeurs exigées par la norme qui se situe entre 50 et 56 dB. La configuration avec une fenêtre ouverte et une fenêtre fermée donne un isolement de 47 dB. Ces mesures, bien qu'insuffisantes d'un point de vue normatif, semblent acceptables compte tenu de la faible activité recensée dans les loggias et de l'inexistence de plainte venant des copropriétaires à ce sujet.

c. De la loggia à la cuisine

Enfin, des mesures sont réalisées entre la loggia de l'appartement n° 59 et la cuisine de l'appartement n° 60. Ces deux locaux sont complètement fermés et disposent de menuiseries à double vitrage correspondant à la configuration n° 2. Ils sont séparés par le salon et la loggia de l'appartement n° 60. Lorsque les deux fenêtres sont ouvertes, l'isolement mesuré est de 48 dB et s'approche de la valeur normative attendue. Lorsque les deux fenêtres sont fermées, l'isolement est de 56 dB et lorsqu'une fenêtre est fermée et l'autre ouverte, l'isolement est de 54 dB. Ces deux configurations respectent la norme, ce qui indique une bonne capacité d'isolement acoustique dans ce cas précis.

Comme attendu, plus la pièce mesurée est éloignée de la pièce d'émission, plus l'isolement acoustique entre ces deux locaux est performant. Pour rappel, la réglementation acoustique dans les logements ordonne le respect d'un isolement de 53 dB entre deux pièces principales avec une tolérance de mesure de plus ou moins 3 dB. Dans le cas de l'immeuble Les Cèdres, l'objectif peut être considéré comme respecté dans les configurations loggia/salon et loggia/cuisine. La configuration menuiserie ouverte/ouverte présente la performance d'isolement la plus faible. La voie de transmission latérale via les fenêtres ouvertes est alors la plus influente. En effet, lorsqu'une d'entre elles est fermée, un gain d'environ 6 dB est mesuré. Par la suite, le gain a tendance à stagner puisque la fermeture de la deuxième menuiserie entraîne seulement un gain de 2 dB. Cette stagnation peut s'expliquer par l'importance de l'énergie acoustique directement transmise via la ou les parois séparatives. En somme, si une source potentielle de gêne sonore est mise en œuvre dans une loggia, cette dernière devrait

affecter uniquement ses locaux mitoyens. Il peut être envisagé de renforcer l'isolement entre ces pièces limitrophes pour éviter tout conflit de voisinage induit par ces nuisances. Néanmoins, à l'heure actuelle, les habitants n'ont pas fait part de cette problématique lors des entretiens de diagnostics d'ambiances vécues. On peut imaginer que ces nuisances sont acceptables pour les habitants.

4 – L'acoustique intérieure

Le doublage isolant de la façade d'origine se révélant nécessaire pour améliorer les conditions de confort thermique et réduire les consommations d'énergie de l'immeuble, il est tout aussi nécessaire d'anticiper l'incidence de ce doublage sur l'environnement acoustique de la résidence. En effet, en isolant l'édifice de son environnement sonore extérieur, il existe un risque de renforcer l'écoute des bruits intérieurs. Il est donc nécessaire de connaître l'environnement acoustique intérieur de l'immeuble pour vérifier que l'équilibre des ambiances sonores peut être garanti, même après doublage. Pour cela, des mesures sont réalisées à l'intérieur du bâtiment, entre logements, afin de caractériser les capacités d'isolement des différents dispositifs constructifs et des gaines techniques généralement vectrices de transmissions sonores. Ces mesures sont par la suite comparées à la réglementation acoustique applicable.

a. Les isolements acoustiques standardisés pondérés

L'agencement global est pratiquement similaire sur l'ensemble du bâtiment et conduit à deux configurations de séparatifs possibles. Deux appartements mitoyens peuvent être séparés soit par un mur de refend en béton de vingt-cinq centimètres d'épaisseur, soit par une cloison sèche d'épaisseur comprise entre sept et dix centimètres. Le tableau suivant présente les résultats des mesures d'isolements acoustiques standardisés, pondérés au bruit aérien intérieur pour un bruit rose à l'émission (DnT,A). Ces résultats sont comparés aux valeurs réglementaires recherchées entre logements. Les commentaires (Com.) donnés pour l'ensemble des résultats de mesures indiqués ci-dessous sont les suivants : S pour satisfaisant, ST pour satisfaisant avec la tolérance de plus ou moins 3 dB, et NS pour non satisfaisant. Dans ce dernier cas, l'ouvrage ne satisfait pas l'objectif visé et nécessite des travaux modificatifs pour atteindre un niveau de confort satisfaisant et conserver l'équilibre ambiant après intervention sur l'enveloppe extérieure.

Local d'émission	Local de réception	Sens	Isolement acoustique $D_{nT,A}$ en dB		Com.	Observations	N° Fiche
			Mesuré le 30/05/2018	Objectif			
App N°59 Chambre N°1	App N°60 Chambre N°4	H	46	53	NS	Refend béton de 25 cm	D11
App N°33 Chambre N°1	App N°34 Chambre N°1	H	37	53	NS	Cloison sèche d'épaisseur inconnue	D29
Séjour Local gardien	Chambre N°1 Local gardien	H	19	-	-	Cloison sèche entre chambres d'un même appartement	D31
App N°34 Chambre N°1	App N°35 Chambre N°1	V	51	53	ST	Dalle béton de 17 cm + Chape et plancher chauffant	D27

D'après les résultats de mesures obtenues, aucune des configurations testées ne permet de respecter les objectifs de la réglementation applicable aux logements neufs. Les propriétés acoustiques d'un mur de refend en béton de vingt-cinq centimètres devraient permettre de les atteindre. Cependant, la position de la façade rideau, au-devant de la structure, libère des ponts phoniques au niveau des nez-de-dalles et de refends en béton. Le son passe d'un appartement à un autre par ces ponts phoniques qui diminuent la performance globale du mur de refend. Un doublage isolant intérieur doit permettre de réduire ces ponts phoniques et redonner toutes leurs capacités d'isolement aux refends en béton. Dans l'allée B, les T4 ne sont séparés que par une cloison sèche entre deux chambres côté nord. L'isolement mesuré en ce point est très faible avec seulement 37 dB. Jusqu'ici, les habitants n'ont pas fait part de problèmes particuliers à ce sujet mais dans l'éventualité de la réhabilitation et de l'amélioration de l'isolement acoustique des façades, la cohésion de l'ensemble pourrait être perturbée. Au sein d'un même logement, aucun objectif acoustique n'est répertorié. Cependant, il est d'usage d'obtenir des niveaux d'isollements acoustiques standardisés minimum de l'ordre de 30 dB. Les cloisons fines mises en œuvre actuellement, et qui semblent être composées de deux contreplaqués fins entre lesquels s'insère une paroi en carton alvéolé, ne le permettent pas avec un isolement de seulement 19 dB. Cette fragilité pourrait entraîner des problèmes de confidentialité entre chambres. À tout prendre, ces cloisons sandwichs en bois sont particulièrement caractéristiques de l'architecture des grands ensembles lyonnais de l'époque¹³⁴ et participent de la valeur patrimoniale de l'édifice. L'amélioration de leur

134. Ce type de cloisons en bois, montées sur des rails ou sur ressorts pour être facilement déplacées ont été mises en œuvre sur les immeubles de Bron-Parilly. L'objectif des architectes était de permettre, du moins théoriquement, aux habitants d'adapter le plan de leur logement en déplaçant facilement ces cloisons légères.

performance se doit d'être couplée à une réflexion patrimoniale. Le séparatif vertical entre deux appartements, constitué d'une dalle en béton de dix-sept centimètres et d'une chappe permet d'atteindre un isolement acoustique standardisé de 51 dB. Au regard des autres performances présentes, l'isolement vertical entre appartements n'a pas besoin d'être renforcé.

b. Le niveau de bruits de chocs entre logements

Pour s'assurer du bon isolement acoustique entre deux appartements, la transmission des bruits de chocs doit également être analysée. Les bruits de chocs constituent des impacts similaires à une personne marchant en talons dans l'appartement supérieur par exemple. Pour les mesures, ils sont simulés grâce à une machine à chocs qui émet des impacts sur la dalle, la mesure verticale est ensuite prise dans l'appartement inférieur. Quant à la mesure horizontale, elle est effectuée dans la pièce voisine après émissions d'un coup de feu tiré à blanc. Le tableau suivant présente les niveaux de pression acoustique pondérés du bruit de choc standardisé ($L'_{nT,w}$) mesurés dans les locaux de réception. Les dénominations V et H désignent respectivement les configurations de mesures verticales et horizontales. Les commentaires (Com.) donnés pour l'ensemble des résultats de mesures sont C pour conforme et NC pour non conforme. Dans ce cas, l'ouvrage nécessite des travaux modificatifs pour répondre à l'objectif. Les valeurs rappelées dans la colonne « objectif » du tableau suivant correspondent aux objectifs définis par l'arrêté du 30 juin 1999 relatif à la limitation du bruit dans les bâtiments d'habitation. Les mesures révèlent que les niveaux de pression acoustiques pondérés aux bruits de chocs mesurés sont conformes aux exigences réglementaires. Compte tenu de l'épaisseur de dalle indiquée et des niveaux mesurés, il semble qu'une sous-couche acoustique sous le parquet ou un matériau de type isolant soit mis en place au niveau du plancher chauffant.

Local d'émission	Local de réception	Sens	Niveau de pression standardisé pondéré de bruits de chocs $L'_{nT,w}$ [dB]		Com	Revêtement de sol à l'émission	Observation	N° fiche
			Objectif	Mesuré				
App N°32 Salon	App N°34 Salon	V	≤ 58	52	C	Parquet	-	L1
App N°32 Chambre N°1	App N°34 Chambre N°1	V	≤ 58	54	C	Parquet	-	L2
App N°33 Chambre N°1	App N°34 Chambre N°1	H	≤ 58	51	C	Lino	-	L3

c. L'isolation acoustique des gaines techniques

Différentes gaines techniques traversent verticalement les neuf étages de la résidence et peuvent être sources de ponts phoniques entre les différentes pièces reliées qui, dans ce cas précis, sont des chambres ou des pièces d'eau. C'est pourquoi une mesure d'isolement acoustique est réalisée à proximité immédiate d'une gaine afin de déceler une éventuelle faiblesse. Le résultat obtenu est équivalent à proximité immédiate de la gaine que lors de la mesure au centre de la pièce, $D_nTA = 51$ dB. La gaine ne semble donc pas être source de ponts phoniques entre les deux chambres testées. Cependant, certains habitants ont fait part de problèmes de transmissions sonores par ces gaines. Il est possible que la gaine mesurée soit coupée ou isolée entre les deux appartements, ce qui n'est pas le cas sur l'ensemble de la résidence. Compte tenu des demandes des habitants, une vérification de l'isolement acoustique des différents passages de gaines doit être effectuée. L'isolement de l'ensemble des gaines pourrait permettre d'obtenir des résultats satisfaisants dans tous les appartements. Néanmoins, ces gaines restent utilisées pour la ventilation des logements et doivent donc permettre, même isolées acoustiquement, d'évacuer l'air vicié de l'immeuble.

5 – Un bilan acoustique à améliorer

Le diagnostic effectué sur site a permis de caractériser les qualités et problèmes acoustiques de l'immeuble. En effet, à partir des mesures réalisées et des échanges avec les résidents, l'ambiance acoustique présente dans la résidence est maintenant clairement identifiée. Concernant les ambiances sonores extérieures, l'impact de la route est sensiblement le même sur l'ensemble de la façade. L'environnement sonore est plutôt calme avec 58 dB(A) en période diurne et environ 52 dB(A) en période nocturne. Le trafic routier est la principale source de nuisances sonores pour l'immeuble Les Cèdres avec notamment une problématique de faiblesse d'isolement aux basses fréquences et une circulation de bus régulière qui en provoque. Le diagnostic permet de confirmer que les panneaux, dans leurs dispositions d'origine, ne possèdent pas un isolement acoustique suffisant, mais qu'un doublage isolant intérieur et le remplacement des fenêtres par des menuiseries récentes permettent d'atteindre un isolement de 31 dB. Les mesures environnementales identifient un seuil de confort satisfaisant avec un isolement de 30 dB que ces transformations semblent permettre d'atteindre. Les mesures intérieures identifient les points de faiblesses à améliorer concernant l'isolement acoustique entre appartements. Ces améliorations intérieures sont à effectuer avant ou en parallèle des transformations de l'enveloppe pour ne pas

provoquer une sur-écoute intérieure et engendrer des conflits de voisinage. Comme les diagnostics thermiques concluent qu'une intervention sur les façades légères de l'immeuble Les Cèdres doit être couplée à une amélioration des systèmes, toitures, pignons et sous-face de planchers de l'immeuble, le diagnostic acoustique conclut de son côté à la nécessité de réaliser des travaux intérieurs simultanément à l'amélioration des façades pour garantir un équilibre des ambiances.

Partie 5 : De la connaissance de l'existant au développement d'un projet de réhabilitation

L'ensemble de ces diagnostics et études préalables permet à l'équipe de recherche d'acquérir une connaissance exhaustive de l'édifice qui constitue une étape préalable obligée avant de réaliser une intervention sur l'existant. Elle permet de réaliser une synthèse des objectifs et des performances à atteindre dans la réhabilitation et de rédiger un cahier des charges, véritable guide pour les propositions d'intervention sur l'édifice, mais également un carnet d'entretien à destination de la régie et des copropriétaires. Ainsi, chacun des diagnostics réalisés soulève des enjeux et problématiques à résoudre lors de la réhabilitation de l'immeuble et de ses façades légères. Du diagnostic habitant, découle en particulier une approche nécessairement frugale, économe dans ses moyens et, par définition, innovante. La mixité présente au sein de l'immeuble et le statut de copropriété imposent la recherche de solutions économiques, capables de correspondre aux budgets des copropriétaires. Sans cela, il semble peu probable de résoudre les problématiques de confort des habitants. En effet, des solutions onéreuses peuvent être trouvées pour améliorer les performances des enveloppes de l'immeuble, de ses systèmes de chauffage et de ventilation, mais les copropriétaires ne pourront financer de telles interventions. En cela, l'équipe ne se limite pas à une réflexion sur le coût d'investissement des solutions proposées, mais s'intéresse plus largement aux questions d'économie globale. Celle-ci intègre le coût d'investissement, les subventions et aides que peuvent obtenir les copropriétaires en fonction des performances visées, le retour sur investissement, les coûts de maintenance et de gestion des différents éléments mis en œuvre, les économies réalisées sur les consommations énergétiques, l'influence des interventions sur la revente du bien, mais également les économies autres que financières, telles que les économies de matière, la réduction des consommations d'énergie grise pour la production des matériaux et systèmes mis en œuvre, etc. Les diagnostics habitants et ambiances vécues ont également mis en

exergue d'importantes problématiques de confort qui peuvent être résumées comme suit : une problématique de confort thermique d'été due à l'ensoleillement de la façade sud ; un réglage du chauffage inapproprié avec des surchauffes hivernales dans certains appartements ; des différences de ressenti entre les appartements, selon leur situation sur la façade, surtout en confort thermique d'hiver ; des nuisances sonores gênantes émanant de la circulation de la rue de la Favorite mais également du manque d'isolation des façades ; et des ponts phoniques au niveau des circulations verticales et des gaines techniques. Ces éléments ont pu être vérifiés lors des diagnostics thermiques et acoustiques mis en œuvre. Pour améliorer le confort des occupants, la réhabilitation des façades légères de l'immeuble doit se concentrer sur la résolution de ces problématiques.

Les diagnostics n'ont pu que confirmer l'importance patrimoniale de ces façades et de l'immeuble. Devant cette pluralité des enjeux, de recherche d'équilibre entre économie, confort, environnement, énergie et patrimoine, il apparaît aux habitants comme à l'équipe de recherche, que seul un projet co-construit puisse apporter des réponses satisfaisantes. Ensemble, dans les phases suivantes d'expérimentation, les acteurs du projet vont s'attacher à trouver un point d'équilibre entre les questions historiques et patrimoniales, techniques et environnementales, les problématiques d'habitabilité et de coûts, dans le but de proposer des solutions garantissant la valorisation de ce patrimoine moderne et l'amélioration des conditions de vie des occupants. Ce sont ces enjeux qui motivent la démarche initiée par l'équipe de recherche et qui seront moteurs des expérimentations à venir. La phase de diagnostic constitue donc une étape fondamentale pour la réhabilitation des façades légères, qui révèle des problématiques et enjeux pluriels, complexes à appréhender. En ce sens, l'équipe de recherche souhaite associer aux phases de conception des hypothèses de réhabilitation, la réalisation de prototypes à l'échelle 1 : 1. Ces démonstrateurs, fabriqués et installés *in situ* avant le chantier final, doivent permettre d'éviter les erreurs et d'évaluer l'efficacité des solutions envisagées au regard de cette complexité. Ils vont permettre également de vérifier la capacité des solutions proposées à répondre à l'ensemble des problématiques soulevées, leur facilité de mise en œuvre en site occupé et leur coût. Ce sont les résultats des diagnostics et des analyses multicritères qui en découlent qui vont servir de bases à la définition du dessin architectural des prototypes, fixer leurs performances et conditionner le choix de leurs matériaux. Cette démarche de conception-fabrication, née de l'analyse de l'existant, est plus amplement explicitée dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 :

Réhabiliter l'immeuble Les Cèdres : stratégies et expérimentations

Introduction : Des enjeux à intégrer dans une démarche globale : vers l'élaboration d'un guide

La réhabilitation de façades légères à forte valeur patrimoniale dans l'habitat du XX^e siècle, qui plus est en copropriété, soulève de nombreuses problématiques et des questions scientifiques : le confort des habitants, les performances environnementales et énergétiques, l'économie globale du projet, la préservation des valeurs architecturales et patrimoniales de l'édifice, dans un monde en perpétuelle évolution, dont l'avenir est conditionné par les choix écologiques que nous sommes amenés à porter, forment tant d'enjeux à relever notamment en raison de la complexité des questions à traiter simultanément. Dans cette perspective, nous avons estimé qu'il était nécessaire de déterminer une stratégie globale d'intervention afin de répondre aux nombreuses problématiques soulevées par la réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres et afin d'éviter une approche trop isolée des questions qui, le plus souvent, prédomine au sein des copropriétés. Le système des assemblées générales favorise en effet des interventions ponctuelles, souvent moins coûteuses, qui ne favorisent pas l'économie globale et peuvent générer des erreurs de stratégie. Alors que la copropriété Les Cèdres a fait réaliser l'isolation de la toiture de l'immeuble avec sept centimètres de polystyrène, nos calculs ont démontré qu'une vingtaine de centimètres d'isolant aurait permis d'atteindre des niveaux de performances globales bien supérieurs et de faciliter l'accès à des subventions. Difficile d'envisager dans ces conditions une nouvelle intervention engendrant un surcoût pour déposer l'étanchéité et ajouter un isolant supplémentaire. Ce dernier exemple démontre l'intérêt de posséder une vision à long terme afin d'évaluer précisément les besoins d'un immeuble et de ses occupants avant d'engager des travaux de réhabilitation.

Il nous est apparu que seule une démarche analytique, collaborative et expérimentale pouvait permettre d'établir cette stratégie globale d'intervention et prendre en compte l'ensemble des

facteurs soulevés par les problèmes de confort. En interrogeant les habitants, en consultant les archives du bâtiment, puis en analysant l'existant, grâce à des diagnostics pluridisciplinaires approfondis, à des études métrologiques et de perceptions, nous pouvons anticiper les interventions tout en évaluant les potentialités de l'édifice et cibler ainsi les améliorations à réaliser sur ses points de faiblesse, de « résistance » au confort de vie. En réunissant au sein d'une même équipe pluridisciplinaire des professionnels et experts de l'architecture, la thermique, l'acoustique, l'histoire, la préservation du patrimoine, la conception durable ainsi que des entreprises aux savoir-faire incontournables, nous créons les conditions favorables en vue de la définition de solutions innovantes répondant à l'ensemble des critères et enjeux de cette réhabilitation. Enfin, en élaborant des prototypes *in situ*, à l'échelle 1 : 1 pour expérimenter des hypothèses de travail, nous pouvons mettre à l'épreuve ces solutions, en conditions réelles, vérifier leur efficacité, leur adaptabilité à l'existant et optimiser leur mise en œuvre sur un chantier en site occupé. Ils permettent également d'offrir aux habitants la possibilité de tester les différentes propositions, de donner leur avis, de se projeter dans le futur de leur habitation et de ses nouvelles ambiances. Le passage par le prototypage permet également de fiabiliser le programme de travaux et son économie.

Ce dernier développement portera sur l'élaboration des hypothèses de conception, la réalisation ainsi que l'analyse des prototypes et conduit à l'élaboration d'un choix de solutions pour la réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres. C'est cette démarche expérimentale qu'il nous semble pertinent d'appliquer à tout sujet similaire. Cette démarche s'inscrit dans le sillage des travaux conduits par les chercheurs du TSAM – Laboratoire des Techniques de Sauvegarde de l'Architecture Moderne – de l'EPFL – Ecole polytechnique fédérale de Lausanne – sur la cité du Lignon, mais a cherché à s'en distinguer en développant tout particulièrement les questions de confort plus seulement normatif mais ressenti et vécu par les habitants, qu'il s'agisse du confort thermique comme acoustique. L'objectif de cette recherche était d'établir, sur cette base, un guide d'intervention pour la réhabilitation des façades légères patrimoniales dans l'habitat du XX^e siècle afin de préserver ce patrimoine tout en améliorant le confort de ses occupants et en réduisant ses consommations énergétiques. Ce chapitre, en relatant les expérimentations menées pour l'immeuble Les Cèdres, a vocation à démontrer l'intérêt et l'efficacité de la méthode que nous proposons. Elle se décline en trois séquences principales faisant appel :

- à la mémoire des habitants, de leurs vécus, ainsi qu'à celle des archives pour mettre en

évidence les caractéristiques originelles du bâti, son habitabilité et les résistances dont il fait preuve face au confort de vie actuel d'un logement dans le but de les améliorer ;

- à l'étude métrologique et à l'étude des perceptions, tant architecturales qu'ambientales, mettant en évidence ce qui se mesure (par des relevés, des mesures thermiques, acoustiques, des diagnostics sanitaires, l'état d'authenticité, etc.) et ce qui se vit (le confort, les ambiances vécues, la lumière, la sensation de chaud, de froid, par des entretiens avec les habitants) ;

- à l'expérimentation pour tester des hypothèses co-conçues en équipe pluridisciplinaire, tester leur mise en œuvre, leur incidence sur l'existant, leurs performances, mais aussi leur économie. Cette dernière étape est le point d'aboutissement de la démarche pour dresser le cahier des charges de la réhabilitation à partir des prototypes.

Partie 1 : L'élaboration des hypothèses de travail

1 – Des objectifs conditionnés par les caractéristiques de l'existant

Toute intervention doit reposer sur une connaissance exhaustive de l'existant, de ses caractéristiques, ses matériaux, ses systèmes techniques, ses défauts et potentialités. Ce sont véritablement les qualités spécifiques de l'édifice et le ressenti des habitants, mis en exergue lors des diagnostics, qui doivent définir les objectifs à atteindre, selon trois sujets complémentaires : le confort, le patrimoine et l'économie. En terme de confort, les principaux objectifs visent à protéger les habitants des apports solaires en façade sud tout en réglant la luminosité des appartements (éblouissements et éclairage naturel) ; imaginer l'enveloppe thermique du bâtiment pour le froid hivernal et la chaleur estivale, tout en tenant compte des phénomènes sonores extérieurs ; imaginer l'isolement acoustique en fonction de l'aggravation potentielle des nuisances sonores intérieures ; garantir le bon renouvellement de l'air ; réduire les ponts phoniques entre la structure primaire de l'édifice et la façade rideau ; faciliter la manipulation des ouvrants et des stores pour les personnes âgées ; organiser des travaux en site occupé occasionnant le moins de gêne possible pour les habitants. Les solutions envisagées doivent intégrer chacun de ces enjeux, dans l'intérêt des habitants. Du fait du réchauffement climatique en cours, nous porterons un intérêt particulier à développer une stratégie pour l'été qui rassemble toutes les problématiques précédentes : thermique, acoustique, ventilation de jour comme de nuit. Cette stratégie n'oubliera pas l'intérêt patrimonial dont on connaît la

teneur : conserver le caractère, la substance et la matérialité des façades d'origine ; restaurer les façades dans un état au plus proche de celui d'origine ; s'assurer de la pérennité des matériaux et des composants des panneaux de façades ; et valoriser l'objet architectural conçu par Cottin, Chastel, Dallière et Prouvé. Les objectifs environnementaux et énergétiques de cette réhabilitation touchent aussi la réduction des consommations de l'immeuble l'hiver, dans le dessein de se rapprocher des normes et réglementations thermiques de la rénovation ; l'emploi de matériaux biosourcés, la conservation de la matière existante et la réalisation de travaux avec une faible énergie grise pour réduire le bilan carbone de l'opération. Enfin, concernant l'économie du projet, la réflexion porte sur l'économie globale de la réhabilitation qui implique un coût d'investissement faible pouvant correspondre aux différents budgets des copropriétaires ; un retour sur investissement ; la valorisation de l'immeuble et des appartements ; la limitation de la perte de surface intérieure pour ne pas abaisser le prix de revente du bien ; le réemploi maximal des composants d'origine ; et le recours, tant que faire se peut, à des ressources locales tant pour les matériaux que pour les entreprises.

Chaque hypothèse développée devra répondre à d'ambitieux objectifs de confort d'été comme d'hiver, de valorisation du caractère patrimonial de l'immeuble, de performances de la façade, avec un coût global compétitif. L'objectif est d'expérimenter des dispositifs qui permettent d'atteindre un certain équilibre entre l'ensemble de ces données. Certains critères peuvent devenir prédominants. C'est ainsi que la préservation de la physionomie et de la matérialité des panneaux de Prouvé, qui forment l'essence même des façades de l'immeuble Les Cèdres, met particulièrement en exergue les problématiques patrimoniales mais celles-ci se révèlent en réalité insuffisantes pour appréhender un projet global en raison des questions de thermie d'été ; le confort venant ainsi interroger la question patrimoniale.

Tous les aspects de la réhabilitation sont à observer et à évaluer dans le dessein de définir les solutions les plus adaptées dans un savant équilibre entre les différents critères pris en compte. A l'issue des diagnostics, certaines solutions ont par exemple été immédiatement éliminées comme le remplacement de la façade « à l'identique », pour des raisons patrimoniales évidentes, mais également techniques et économiques. En effet, les panneaux sont montés depuis l'appartement le plus à gauche du premier étage de l'immeuble. Ils s'emboîtent ensuite latéralement, de gauche à droite, grâce à des assemblages à ressort. Ainsi, deux panneaux d'une même trame structurelle sont nécessairement démontés ensemble. Ils sont également montés niveau par niveau, le panneau supérieur s'emboîtant dans le panneau inférieur. De

fait, ils doivent être démontés de l'étage supérieur à l'étage inférieur, et il n'est pas possible de réinstaller l'étage supérieur avant d'avoir repositionné le précédent. En conséquence, la façade doit être entièrement déposée avant d'être entièrement remontée. Dans une opération en site occupé, en copropriété, sans capacité de relogement, il semblait inenvisageable de laisser un immeuble sans façade. De fait, les options incluant le démontage des panneaux de façade dans leur ensemble pour leur restauration en atelier ont également été exclues. De même, les diagnostics ont éliminé les solutions consistant à démonter la face intérieure du panneau sandwich pour en remplacer l'isolant comme cela a pu être fait sur l'opération du Lignon. En effet, tous les éléments constituant le panneau sandwich de Prouvé sont solidaires entre eux, comme l'ont révélé les opérations de démontage partiel d'un panneau de la loge du gardien réalisé lors des diagnostics. Cette connaissance de l'édifice, de la façade et de ses composants a donc permis de gagner du temps sur la phase d'élaboration des hypothèses en éliminant les solutions inadaptées et en ciblant des axes d'interventions.

2 – Une méthode de conception collaborative

Une fois les objectifs fixés, reste à relever le défi de faire travailler une équipe réunissant des professionnels de diverses disciplines, agence d'architecture, bureaux d'études techniques, entreprises privées, autour d'un projet commun qui implique également une soixantaine de copropriétaires, leur syndic, plusieurs institutions telles que des laboratoires de recherche, le bureau de la recherche en architecture et paysage du ministère de la culture, l'École nationale supérieure d'architecture de Lyon, une chaire de recherche, mais également la direction régionale des affaires culturelles, l'unité départementale d'architecture et du patrimoine du Rhône représentée par les architectes des bâtiments de France, pour ne citer que ces seuls acteurs. Nous avons alors imaginé une méthode de conception collaborative entre les différents membres de l'équipe.

L'objectif de cette collaboration était de prendre en compte l'ensemble des enjeux patrimoniaux, environnementaux, de confort thermique, acoustique et économique, guidant les phases de conception. La co-conception s'est organisée autour de la doctorante qui, à partir des préconisations élaborées lors des diagnostics, a proposé à l'ensemble de l'équipe plusieurs hypothèses de travail discutées lors de nombreuses réunions de travail avec les membres de l'équipe sur l'ensemble des sujets qui nécessitaient leurs expertises et de premiers arbitrages. On pense par exemple à la question de la ventilation des logements qui a posé d'épineuses

questions architecturales, thermiques, acoustiques et techniques. En effet, les appartements sont actuellement ventilés naturellement par des entrées d'air positionnées en partie basse des panneaux de cuisine et des extractions par conduits shunt dans une gaine technique positionnée entre les chambres, les WC et les salles de bain. Malgré la surface réduite des entrées d'air, la perméabilité générale de la façade légère de Prouvé permet de maintenir un état sanitaire acceptable au sein des appartements. En revanche, une fois la façade réhabilitée et les façades doublées par un isolant, les entrées d'air vont être bouchées et la perméabilité des façades sera considérablement réduite. De plus, dans l'état actuel des appartements, l'entrée et l'extraction de l'air se font toutes deux dans les pièces humides. Or, la norme prévoit des entrées d'air dans les pièces de vie et une extraction dans les pièces d'eau. Ainsi, l'air circule dans l'ensemble de l'appartement. Au cours de ces études, TRIBU a identifié les débits d'air nécessaires à une bonne ventilation, conditionnant le dimensionnement des entrées d'air à positionner sur les panneaux de façades des chambres et séjours. Le bureau d'études a également dimensionné le dispositif d'extraction à positionner en toiture pour assister l'évacuation de l'air vicié par les conduits shunt. Néanmoins, lors des diagnostics d'ambiances vécues, le LASA a pu identifier une problématique de transmission phonique par la gaine, entre appartements. Les deux bureaux d'étude ont travaillé ensemble pour envisager la meilleure isolation phonique possible des gaines de ventilation. D'un point de vue architectural, la doctorante et l'agence archipat ont identifié une problématique d'insertion des entrées d'air dans les panneaux. Pour conserver le dessin de Prouvé, les entrées d'air pourraient être positionnées en partie basse des panneaux de séjour et de chambre sur le modèle des panneaux de cuisine actuels. Cependant, lors des diagnostics d'ambiances vécues, les habitants ont indiqué ressentir un courant d'air froid généré par ces ouvertures au niveau de leurs jambes, particulièrement désagréable, les poussant à les obstruer. Il serait donc préférable de les positionner en partie haute des panneaux, mais le dessin des façades s'en verrait modifié. L'équipe a donc réfléchi à positionner les entrées d'air au niveau des menuiseries en travaillant à leur insertion discrète dans les profils en aluminium. Celle-ci dépendra du profil de menuiserie choisi par les copropriétaires.

Ce seul sujet illustre particulièrement le travail de collaboration entre les membres de l'équipe, du diagnostic jusqu'à l'expérimentation. Il s'est concrétisé par des réunions de travail thématiques (ventilation, protection solaire, isolation, menuiseries, etc.) ou générales sur l'ensemble du projet. Au-delà des rencontres et échanges entre l'équipe de maîtrise d'œuvre, le conseil scientifique a permis d'apporter une vision globale de la réhabilitation de l'immeuble

Les Cèdres et des façades légères. Il a également donné un caractère empirique au travail d'étude et de réhabilitation, accompagnant l'équipe de maîtrise d'œuvre pour répondre aux enjeux de la recherche et définir les hypothèses d'interventions à mener.

3 – Plusieurs niveaux d'interventions

La réhabilitation envisagée pour l'immeuble Les Cèdres comprend trois niveaux d'interventions dont le premier concerne les façades légères en elles-mêmes, le second touche à l'enveloppe dans sa globalité (sous-face de plancher, toiture, pignons) et le troisième se situe au niveau des systèmes de production et de distribution du chauffage et de la ventilation. En effet, une rénovation énergétique ne peut se limiter aux seules façades légères, une intervention globale est nécessaire pour garantir l'équilibre des ambiances et le confort des occupants, notamment pour éviter les ponts thermiques et effets de parois froides. Elle conditionne également l'atteinte des niveaux de performances réglementaires nécessaires à l'obtention de subventions. Bien que nous nous soyons davantage concentrés sur l'amélioration des façades légères, objets de cette recherche, nous avons intégré les autres interventions dans une visée opérationnelle globale, en y appliquant des solutions plus « classiques » mais adaptées au cas de l'immeuble Les Cèdres. Nous avons alors déterminé un socle d'interventions complémentaires à l'amélioration des façades légères permettant d'accroître considérablement les performances thermiques et environnementales de l'immeuble. Pour commencer, nous avons envisagé d'isoler la sous-face du plancher du premier niveau par rapport aux caves, porche et coursive. Cette isolation permet de réduire de 9 kWh/m² les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble pour un investissement de 63 000 € HT.

Nous avons associé cette intervention à l'isolation par l'extérieur des murs pignons permettant d'abaisser encore les consommations de l'immeuble de 22 kWh/m² pour un investissement des copropriétaires de 64 000 € HT. Néanmoins, cette dernière opération nécessitera l'accord des propriétaires voisins, les pignons de l'immeuble étant déjà en limite de propriété, et demandera potentiellement le rachat d'une servitude qui pourra engendrer des surcoûts selon les négociations. Cependant, vu le gain obtenu, l'isolation des murs pignons semble s'imposer pour le bien être des occupants comme pour l'obtention de subventions. A l'isolation de l'enveloppe, nous avons ajouté de potentielles interventions sur les systèmes de production et de distribution de chauffage et de ventilation. Dans un premier temps, nous avons envisagé l'installation d'une ventilation hybride ou naturelle assistée pour améliorer le

renouvellement de l'air dans les appartements et mettre l'immeuble aux normes sanitaires pour un investissement des copropriétaires de 102 000 € HT. Les diagnostics thermiques et d'ambiances vécues ont révélé des problématiques de réglages du chauffage, certains habitants se plaignant d'un chauffage trop élevé quand d'autres aimeraient pouvoir augmenter la température de leur logement en hiver. Nous avons alors réfléchi, avec TRIBU, à proposer aux copropriétaires l'ajout de thermostats individuels, couplés au calorifugeage des réseaux pour réduire les pertes lors de la distribution du chauffage, pour un gain de 8 kWh/m² et un investissement de 60 000 € HT. L'eau chaude sanitaire est actuellement produite par des ballons électriques individuels. En proposant de raccorder la production d'eau chaude sanitaire à la chaudière avec l'installation d'un bouclage, nous réduisons les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble de 25 kWh/m² pour un investissement de 93 500 € HT. Cette intervention peut donc être intéressante pour réduire les consommations de l'édifice mais ne permet pas d'engendrer un confort supplémentaire pour les habitants. En effet, s'il est assez aisé de comprendre comment l'isolation des sous- faces de planchers peut permettre d'améliorer le confort des habitants des premiers niveaux, il apparaît nettement que l'intervention sur la production d'eau chaude sanitaire n'aura pas d'incidence sur leur confort de vie. L'investissement qui y sera lié ne peut être apprécié qu'en fonction de la réduction des consommations annuelles en énergie primaire que cette intervention offre aux copropriétaires. Enfin, nous avons également envisagé de remplacer la chaudière actuelle¹³⁵ par une chaudière à condensation collective plus performante. Néanmoins, les copropriétaires ayant déjà remplacé leur chaudière en 2002, cette intervention, qui représente un investissement important de 150 000 € HT supplémentaires pour un gain mesuré de 6 kWh/m² sur les consommations annuelles en énergie primaire, ne semble pas prioritaire. De même, nous avons envisagé de réisoler la toiture terrasse ce qui aurait apporté un gain de 5 kWh/m² sur les consommations annuelles pour un investissement de 80 000 € HT. Cependant, les copropriétaires ayant récemment réalisé des travaux sur leurs toitures, il ne nous a pas semblé pertinent d'y réintervenir et de réinvestir pour un gain relativement limité. Nous envisageons donc un premier bouquet d'interventions comprenant dans le détail : l'isolation des sous-faces de plancher du premier niveau, l'isolation des murs pignons, l'installation d'une ventilation hybride, le calorifugeage des réseaux, l'ajout de thermostats individuels et le raccordement de l'eau chaude sanitaire à la chaudière, pour un investissement global de 532 500 € HT et

135. L'immeuble est doté de deux chaudières brûleurs à gaz de 280 kW chacune avec un condenseur commun connecté sur le retour général. Les deux chaudières fonctionnent alternativement et non en cascade.

une réduction des consommations annuelles de 64 kWh/m² par rapport aux consommations actuelles estimées par TRIBU à 171 kWh/m². Ces interventions représentent déjà une réduction de 37 % des consommations de l'immeuble, sans avoir encore pris en compte les interventions sur les façades principales.

Concernant les façades légères, nos réflexions se sont portées sur l'amélioration de chacun des éléments constituant des panneaux Prouvé. Ainsi, des solutions de double-peau intérieure ou extérieure, de doublage isolant, ainsi que divers systèmes de protections solaires extérieures – par stores toiles ou brise-soleil orientables – ou intérieures (pour l'intérêt patrimonial) ont été explorées. Pour chacune des solutions, diverses matérialités ont été envisagées, notamment pour les isolants. Le choix de la matérialité reposait également sur une évaluation multicritères considérant qu'un isolant biosourcé est mieux noté d'un point de vue de ses performances environnementales qu'un isolant polystyrène. En revanche, celui-ci sera plus performant d'un point de vue économique du fait de son plus faible coût et de sa plus mince épaisseur à performances thermiques égales, permettant de perdre moins de surface intérieure dans les logements. Il est cependant moins performant acoustiquement qu'un isolant constitué de fibre de bois. Selon un même critère, deux isolants peuvent également s'avérer avoir des capacités différentes. En effet, l'isolant sous- vide a par exemple l'avantage économique d'être très fin, garantissant ainsi la conservation de la surface actuelle des logements, mais son coût d'achat est bien plus élevé que celui des autres isolants. Dans une telle situation, la perte de mètres carrés par l'emploi d'un isolant plus épais doit être évaluée économiquement pour vérifier l'intérêt d'un investissement plus important à l'achat pour un isolant sous- vide. Cette complexité et la nécessité de considérer chaque élément avant toute décision, ont poussé l'équipe à n'exclure aucune hypothèse au démarrage de la phase de conception.

4 – Quelles hypothèses pour les façades légères ?

a. Les joints et assemblages : une maintenance nécessaire

Rappelons-le, les façades légères sont constituées d'un assemblage d'éléments préfabriqués engendrant un nombre important de jonctions pouvant représenter des points de faiblesses d'étanchéité. Dans le cas de l'immeuble Les Cèdres, l'observation du bâtiment, le diagnostic architectural et les relevés de l'existant ont permis d'identifier l'adjonction de couvre-joints sur les joints verticaux entre panneaux et de bavettes au-dessus des fenêtres et des joints

horizontaux. Le diagnostic a révélé des défauts d'étanchéité dus au retrait des joints ayant séché ou s'étant décomposés après soixante ans d'exposition aux rayonnements solaires et aux intempéries. Cependant, ces profils de couvre-joints et bavettes métalliques rigides, fixés sur la surface ondulée des tôles d'aluminium, ne résolvent pas le problème, ne pouvant obstruer les stries à la surface des panneaux. Pour empêcher l'infiltration des eaux de ruissellement entre ces éléments rapportés et l'ondulation des panneaux en aluminium de Prouvé, les copropriétaires ont fait poser des mastics grossiers dont la pérennité reste discutable. Les couvre-joints et bavettes ne représentent donc pas une solution adaptée au problème d'étanchéité des panneaux et peuvent même l'aggraver en créant des percements supplémentaires pour leur fixation, ainsi que des ruissellements à leurs extrémités laissant des traces de salissures à la surface des panneaux. De plus, ces profils rapportés altèrent l'aspect architectural de l'édifice. Nous envisageons donc de déposer ces bavettes et couvre-joints disgracieux pour restaurer les joints creux d'origine en y réappliquant un joint souple et étanche. Nous prévoyons également qu'une maintenance de ces joints soit réalisée de manière régulière pour garantir la pérennité de la façade.

b. Les menuiseries

Les menuiseries représentent une part importante de la composition des façades légères et d'autant plus dans le cas des murs rideaux. Elles participent à la qualité architecturale de ces façades par la finesse de leur dessin et de leurs profils. Au-delà de leur qualité architecturale, les menuiseries anciennes constituent des points de faiblesses thermiques et acoustiques sur les façades, les vitrages et profils des années 1960 n'étant pas aussi performants que ceux d'aujourd'hui. En règle générale, elles sont systématiquement remplacées. Nous avons donc souhaité développer des solutions économiques permettant de conserver le dessin et la matière d'origine des menuiseries aux angles arrondis de Prouvé tout en améliorant leurs performances thermiques et acoustiques.

Restauration ou restitution en double vitrage

Notre première hypothèse a portée sur la restauration et/ou la restitution des menuiseries d'origine avec un double vitrage. Son objectif était de retrouver l'homogénéité du dessin des façades Prouvé de l'immeuble Les Cèdres, tout en conservant le maximum de matière existante. En effet, les inconforts thermiques et acoustiques vécus par les habitants les ont poussés à opérer des modifications sur les façades de l'immeuble. Ainsi, environ 75 à 80 %

des menuiseries de l'immeuble ont déjà été remplacées. Ces remplacements n'ayant pas tous été réalisés à la même date, plusieurs modèles de fenêtres s'affichent désormais en façade dans l'hétérogénéité la plus complète, perturbant la lecture des façades lisses et tramées. De plus, ces fenêtres nouvelles – souvent d'origine industrielles – ne sont pas adaptées aux dormants arrondis des panneaux Prouvé et s'y insèrent souvent maladroitement, multipliant les épaisseurs de profils menuisés et alourdissant considérablement le dessin des façades. La majorité des nouvelles menuiseries ont été posées en rénovation, permettant de conserver les dormants d'origine des menuiseries Prouvé. Dans ce cas, l'hypothèse consiste à déposer les nouvelles fenêtres, à conserver les dormants d'origine des panneaux Prouvé et à y insérer des châssis coulissants en aluminium équipés de doubles vitrages fins, dont le dessin reprendrait celui imaginé à l'origine par Prouvé. Pour les personnes ayant conservé leurs menuiseries d'origine, l'objectif principal de cette hypothèse était de conserver les châssis Prouvé et de leur intégrer un double vitrage, probablement grâce à l'ajout d'une parclose augmentant l'épaisseur de la feuillure. Cette hypothèse pose néanmoins de nombreuses questions compte tenu de la finesse des profils Prouvé, mais également du surpoids qu'un double vitrage va engendrer sur les châssis en aluminium.

Le choix du vitrage est donc déterminant. En effet, pour affiner les profils, alléger le poids des coulissants sur le dormant existant et limiter le volume de la nouvelle fenêtre par rapport à celle d'origine, ce double vitrage doit être le plus fin possible. Néanmoins, ses performances thermiques et acoustiques doivent être suffisantes pour assurer le confort et la mise aux normes des logements. Plusieurs vitrages ont été étudiés et notre attention s'est portée particulièrement sur les produits des entreprises Monuverre et MP vitrage, spécialistes du verre pour les monuments historiques. L'épaisseur des doubles vitrages constitue un sujet récurrent dans la restauration des édifices patrimoniaux. Intégrer des doubles vitrages sur des menuiseries anciennes pose souvent problème pour des questions d'épaisseurs de feuillures existantes. Face à ce constat, des fabricants verriers se sont spécialisés dans la recherche de doubles vitrages dont la composition, souvent complexe, permet de réduire leur épaisseur tout en conservant des performances compétitives avec les doubles vitrages classiques. Deux vitrages fabriqués par l'entreprise Monuverre¹³⁶, installée au Pays-Bas, ainsi

136. Le vitrage M633A23 : performance thermique $U_g = 1,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; performance acoustique $R_w(C; C_{tr}) = 36$ (-1 ; -4) dB soit un $R_{Atr} = 32$ dB ; épaisseur de 15,8 mm ; poids de 23,5 kg/m ; coût 209 €/m² HT. Et le vitrage M6433A23 plus performant thermiquement : $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; performance acoustique $R_w(C; C_{tr}) = 36$ (-1 ; -4) dB soit un $R_{Atr} = 32$ dB ; épaisseur de 15,8 mm ; poids de 23,5 kg/m ; coût 253 €/m² HT.

Proposition 1 : restauration double vitrage

Montage d'un double vitrage sur le dormant existant + doublage isolant + store

Plusieurs variantes d'isolants :

Variante A : isolant bio-sourcé (14,5 cm)

Variante B : isolant polystyrène (10 cm)

Variante C : isolant sous vide (3 cm)

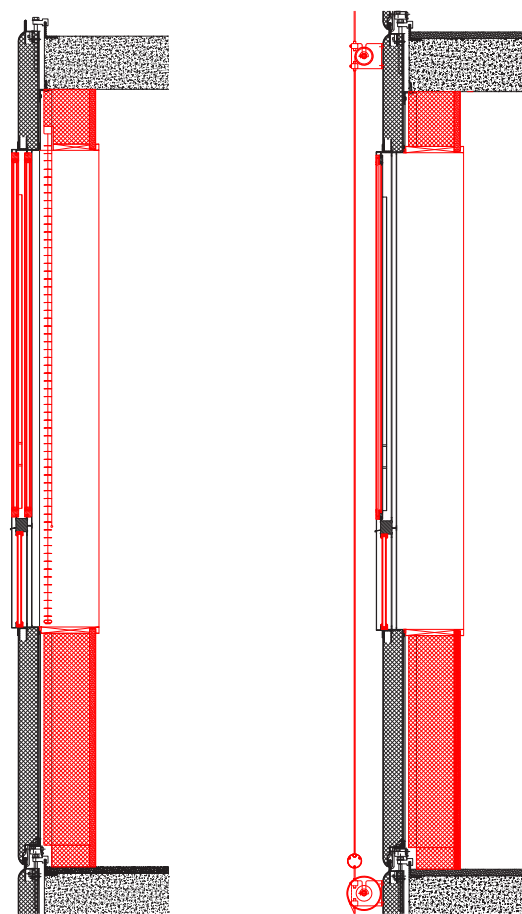
Variante D : Sans isolant

Plusieurs variantes de stores :

Stores intérieurs vénitiens

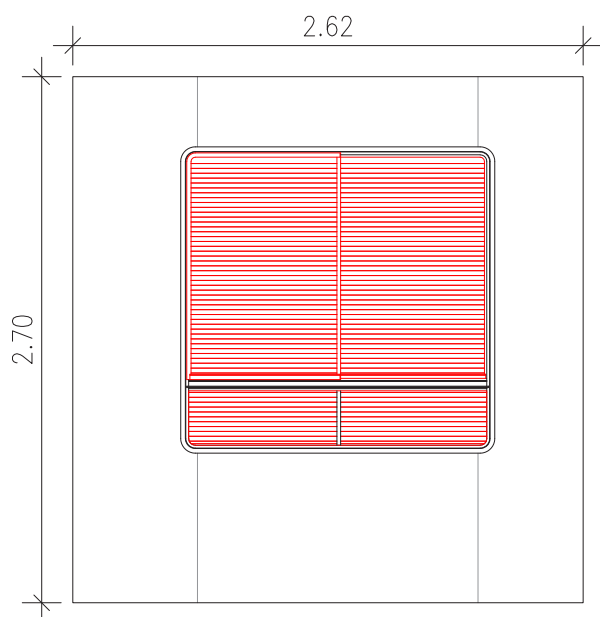
Stores intérieurs toiles

Stores extérieurs toiles

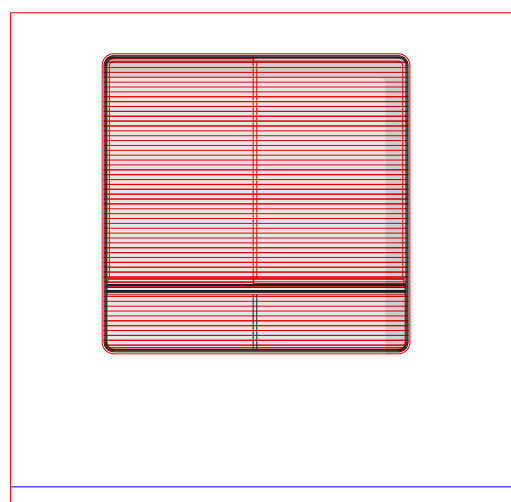


Isolant biosourcé avec store vénitien intérieur

Isolant biosourcé avec store toile extérieure



Vue extérieure



Vue intérieure

qu'un vitrage fabriqué par l'entreprise française MP Vitrage¹³⁷ ont été sélectionnés au regard des performances ciblées par les bureaux d'études TRIBU et LASA ; tous les vitrages étudiés répondent aux besoins estimés avec des épaisseurs comprises entre 13,5 mm et 15,8 mm contre 24 mm pour des vitrages classiques du commerce. Ces derniers ont des performances thermiques et acoustiques supérieures¹³⁸, mais leur épaisseur ne peut être envisagée sur un ouvrage comme celui de l'immeuble Les Cèdres. Les différents vitrages sont alors évalués et comparés selon leurs performances, leur épaisseur, leur poids et leur coût au m². L'option du fabricant MP Vitrage se distingue avec l'épaisseur et le poids le plus faible, tandis que le vitrage Monuverre M6433A23 est remarqué pour avoir la meilleure performance thermique. Ces deux options semblent alors intéressantes à tester sur le prototype.

Outre la question du vitrage, cette hypothèse interroge également la performance des profils de menuiserie eux-mêmes. Il est évident que les châssis en aluminium de Prouvé ne disposent pas de rupteurs de ponts thermiques. Les restaurer, même en les équipant d'un double vitrage, ne permettra pas d'atteindre les seuils de performances exigées par la norme et il faudra admettre des ponts thermiques sur la périphérie des châssis coulissants. Cela permettra néanmoins d'améliorer le confort des occupants (paroi froide du simple vitrage) et les consommations énergétiques. Dans le cas des menuiseries restituées, nous pouvons envisager de positionner des rupteurs de ponts thermiques dans les profils, mais ceux-ci s'en verront épaissis, même si nous chercherons à en limiter les effets. De plus, les échanges avec les fabricants ont souligné l'impossibilité de positionner des rupteurs de ponts thermiques dans les angles arrondis des menuiseries, les rayons de cintrage de ceux-ci étant trop faibles. Des ponts thermiques subsisteraient donc au niveau des angles de ces nouvelles menuiseries qui seraient cependant plus performantes que les menuiseries d'origine restaurées qui n'auraient aucun rupteur. Quoiqu'il en soit, ces nouvelles menuiseries auront des profils différents des menuiseries d'origine restaurées, ne permettant pas de redonner une homogénéité parfaite à la façade. Sur cette question, nous nous sommes alors interrogés avec le conseil scientifique sur une hypothèse qui consisterait à remplacer l'ensemble des menuiseries, rénovées ou d'origine, par ces nouvelles menuiseries au dessin proche de celles de Prouvé mais équipées

137. Le vitrage SVF13-6 : performance thermique $U_g = 1,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; performance acoustique $R_{\text{Atr}} = 32 \text{ dB}$; épaisseur de 13,5 mm ; poids de 17,5 kg/m² et dont le coût n'a pas été communiqué par l'entreprise mais est estimé à 260,00 €/m².

138. Un double vitrage classique 4/16/4, donc 24 mm, du commerce a en général un U_g compris entre 1,0 W/m².K et 1,3 w/m².K, et un $R_w(\text{C};\text{Ctr})$ de 30 (-1 ; -3) au moins, pouvant aller jusqu'à 44 (-3 ; -8) avec des vitrages feuilletés plus performants (sources : Saint-Gobain). Le prix d'un double vitrage 4/16/4, 24 mm, peut être compris entre 75€/m² et 280 €/m² HT selon ses performances.

Proposition 2 : Charte de Venise double façade

Conservation ou restitution du panneau et du vitrage à l'état d'origine + insertion d'une double façade + store intermédiaire

Plusieurs variantes d'isolants :

Variante A : isolant bio-sourcé (14,5 cm)

Variante B : isolant polystyrène (10 cm)

Plusieurs variantes de stores :

Stores intermédiaires vénitiens

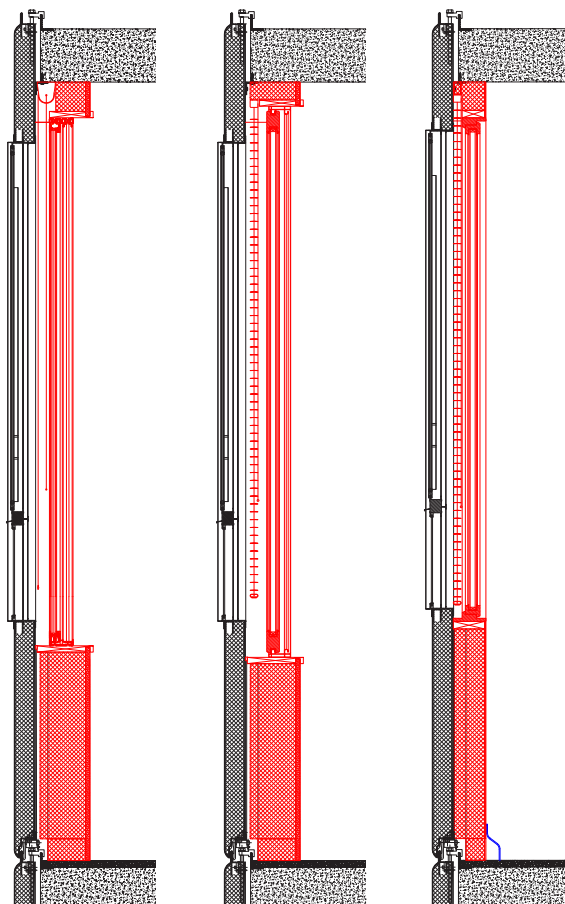
Stores intermédiaires toiles

Plusieurs variantes de menuiseries intérieures :

Ouvrants à la française

Coulissants bois

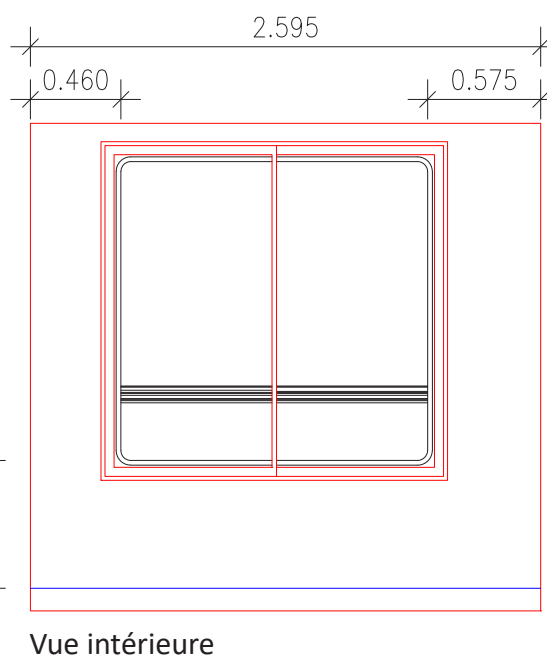
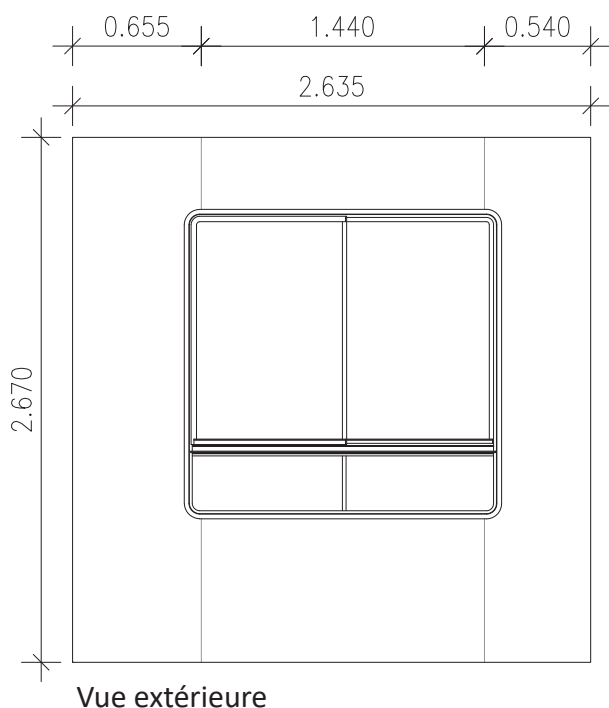
Coulissants aluminium



Isolant biosourcé,
store toile,
coulissant
aluminium

Isolant biosourcé,
store vénitien,
coulissant
bois

Isolant
polystyrène, store
vénitien, ouvrants
à la française



de doubles vitrages et de rupteurs de ponts thermiques. Ainsi, les performances thermiques et acoustiques des panneaux seraient améliorées grâce à ces nouvelles menuiseries identiques sur tous les panneaux, malgré des défauts dus aux ponts thermiques sur les angles arrondis des dormants qui ne seraient pas améliorés. Bien évidemment, ces menuiseries respecteraient les variations de typologies de panneaux entre les « classiques sud », « classiques nord », « loggias », « studios » et « variantes ». Bien que semblant idéale pour retrouver l'homogénéité de la façade, cette hypothèse pose une question patrimoniale importante en impliquant la perte définitive d'une partie de la matière des panneaux jusqu'ici conservée chez certains habitants en déposant les ouvrants originaux. Compte tenu de la complexité du sujet sur les menuiseries, il nous a semblé nécessaire de poursuivre le développement de ces hypothèses avec des fabricants de menuiseries en aluminium dans l'objectif de réaliser des prototypes.

Adjonction d'une double fenêtre

Les difficultés rencontrées dans le développement de l'hypothèse précédente pour concilier préservation du dessin d'origine et niveau de performances thermiques et acoustiques élevé nous ont amené à réfléchir à une autre solution. Cette option consisterait à conserver ou à restituer les menuiseries dans leurs dispositions d'origine¹³⁹, ce qui aurait pour conséquence de préserver le dessin d'origine des façades avec exactitude ainsi que le maximum de matière originelle, et de leur adjoindre une double fenêtre intérieure sur laquelle se rapporterait la recherche de performances. Cette double fenêtre aurait un profil rectangulaire plus classique et donc moins coûteux qu'une menuiserie avec angles arrondis. Pour conserver la vue des menuiseries d'origine depuis l'intérieur, ainsi que le clair de vitrage initial¹⁴⁰, la double fenêtre est imaginée plus large. Cela permettra également de cacher les montants périphériques depuis l'extérieur pour réduire l'incidence visuelle de cette nouvelle fenêtre sur la façade. Pour cela, son montant central devra également être le plus mince possible et s'approcher des 2,7 cm du montant central de la menuiserie d'origine.

De plus, l'espace entre les deux fenêtres doit être dimensionné avec précision. En effet, dans le cas d'un espace trop important, le recul rendra plus visible la fenêtre intérieure depuis l'extérieur. Au contraire, un espace insuffisant ne permettra pas d'intégrer un store intermédiaire et rendra la manipulation des deux ouvrants difficiles. La recherche architecturale devait également

139. Profils en aluminium identiques et simple vitrage de 3 mm.

140. Le clair de vitrage correspond à la surface vitrée de la fenêtre, qui a la capacité de laisser entrer la lumière naturelle et d'ouvrir des vues vers l'extérieur.

exploiter la capacité de ventilation de la paroi et la porosité acoustique des configurations fenêtres fermées et ouverture intégrale. Outre le positionnement et le dimensionnement de la nouvelle fenêtre, restait à déterminer sa typologie. Deux systèmes d'ouverture ont été envisagés, à la française ou coulissantes. Chacune des typologies a été analysée selon cinq critères : leur encombrement à l'intérieur des logements lors de leur ouverture, leur facilité de manipulation et d'entretien par les habitants, leurs capacités thermiques et acoustiques propres, mais aussi à l'usage lors des ouvertures complètes ou partielles.

L'ouverture à la française implique un important encombrement dans les logements du fait des dimensions des vantaux des fenêtres, les ouvrants mesurant chacun environ quatre-vingts centimètres. En revanche, les fenêtres à la française sont plus faciles à manipuler pour les habitants que les coulissantes qui, au regard des dimensions des fenêtres, présentent un certain poids à pousser ou à tirer sur les rails. De plus, les fenêtres à la française permettent une ouverture complète pour donner accès à la fenêtre d'origine et à la face extérieure de la nouvelle fenêtre, facilitant son nettoyage. Dans le cas d'une fenêtre coulissante, un seul vantail ne peut être ouvert à la fois, rendant complexe le nettoyage de la face extérieure de la double fenêtre et obligeant à multiplier les manipulations pour l'entretien de la fenêtre d'origine. Sur ce point, un compromis semble pouvoir être trouvé dans l'emploi de fenêtres coulissantes et battantes permettant les deux types d'ouvertures. En revanche, ce type de menuiseries impliquera un surcoût. Ensuite, les fenêtres à la française sont plus performantes au niveau de l'isolation thermique que les coulissantes, leur système de fermeture disposant de meilleurs rupteurs de ponts thermiques, notamment au niveau des jointures. Les fenêtres coulissantes sont quant à elles plus performantes d'un point de vue acoustiques et en matière de ventilation naturelle, offrant des possibilités d'ouvertures variées et permettant de réaliser des chicanes acoustiques. Les qualités et les inconvénients des deux types de fenêtres ont été étudiés et nous avons estimé, avec les habitants, que la fenêtre à la française possédait un encombrement trop important et générateur de trop nombreuses contraintes pour l'aménagement des logements.

Une fois ce choix arrêté, se pose la question de la matérialité des fenêtres. Là encore, deux options ont été envisagées : une fenêtre en bois, matériau biosourcé, plus lourde (mais supportable par la structure), disposant de bonnes qualités thermiques et permettant de différencier clairement la nouvelle façade de celle d'origine ; ou une fenêtre en aluminium, matérialité d'origine, permettant de créer des profils plus fins et des menuiseries plus légères.

Pour se rendre compte de l'incidence de ces différentes fenêtres sur les façades comme sur les ambiances intérieures, il semble nécessaire de réaliser un prototype qui permettrait de tester les différents modèles. Le prototype permettra également aux copropriétaires de pouvoir manipuler les doubles fenêtres pour en évaluer l'usage.

c. Les parties pleines

Les problématiques de confort identifiées lors des diagnostics ont révélé des faiblesses thermiques et acoustiques au niveau des joints et des parties pleines des panneaux, ce qui implique de ne pas limiter l'intervention au seul remplacement des fenêtres qui ne permettrait pas de garantir de bonnes conditions de confort. Les diagnostics ont également révélé la présence de ponts phoniques entre les façades rideaux et la structure de l'immeuble, engendrant des transmissions sonores d'un appartement à l'autre. La réalisation d'un doublage isolant intérieur permettra d'apporter une solution à ces problématiques, conjointement à l'amélioration des menuiseries, afin d'augmenter les performances de l'enveloppe dans sa globalité.

Dans un premier temps, nous nous sommes interrogés quant à la composition de l'ossature de ce doublage, en ossature métallique ou en ossature bois, les deux hypothèses étant valables tant dans du point de vue du poids que peut supporter la structure actuelle que dans leur capacité à supporter à leur tour le doublage. Sans contrainte structurelle particulière, l'équipe a privilégié le recours au bois, matériau biosourcé, dans le but de réduire l'empreinte carbone de la fabrication du doublage. De plus, le bois dispose de meilleures propriétés isolantes que le métal et permettra de réduire les ponts thermiques dans le doublage.

Nous avons ensuite étudié différents types d'isolants thermiques suivant un niveau de performance fixé à l'issue du diagnostic. Selon les calculs du bureau d'étude TRIBU, nous pourrions atteindre un niveau de confort suffisant, estimé avec un Uparoi de $0,17 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ soit une résistance thermique $R=5,80 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, avec 14,5 cm de fibre de bois, 10 cm de polystyrène, ou encore un isolant sous vide de 25 à 30 mm. L'isolant sous-vide est un matériau innovant, issu des technologies de la NASA, qui permet d'obtenir de hautes performances thermiques avec une épaisseur minimale. Il a notamment été utilisé par l'équipe de Franz Graf au Lignon à Genève pour être inséré dans les panneaux sandwichs existants à la place de l'isolant initial. Dans notre cas, positionné en doublage intérieur, il permettrait d'améliorer l'isolation thermique du panneau autant que les autres isolants mais en ayant un faible impact sur la surface intérieure des logements. En revanche, ce matériau demande la production d'une importante énergie

grise pour sa fabrication et n'est pas composé de matières durables. De plus, il est difficile à mettre en œuvre car son revêtement extérieur ne doit jamais être percé sous peine de voir son efficacité considérablement diminuer. Enfin, son coût est assez élevé. Le polystyrène est un isolant fréquemment utilisé en rénovation. Il est bon marché et permet d'atteindre de bons niveaux de performances thermiques avec une épaisseur raisonnable. En revanche, il est issu de l'industrie pétrochimique et possède un coût carbone très élevé. Il est également peu performant phoniquement. L'isolant fibre de bois nécessite une épaisseur supérieure pour avoir des propriétés isolantes équivalentes engendrant une perte de surface intérieure supérieure aux autres isolants. Bien que plus onéreux que le polystyrène, son coût reste raisonnable et il présente le meilleur bilan environnemental en employant des matériaux biosourcés. En comparant ces trois isolants selon des critères d'encombrement, de performances thermiques, de durabilité, de facilité de mise en œuvre et de coût, l'isolant en fibre de bois est retenu pour la réalisation du prototype dans le but d'évaluer son encombrement dans un appartement. La fibre de bois présente également l'avantage d'avoir de bonnes propriétés acoustiques si elle est couplée avec un isolant phonique apportant de la masse à la façade.

Pour cela, nous avons étudié trois isolants phoniques différents : les plaques de plâtre BA13 classiques, des panneaux Knauf contrapanel regula d'épaisseur 12,5 mm et des panneaux de Fermacell avec des épaisseurs de 12,5 à 18 mm. Les plaques de plâtre BA13 ont des propriétés phoniques moins importantes que les autres matériaux envisagés avec 33 à 42 dB d'affaiblissement acoustique selon les gammes. Elles apportent également moins de masse aux façades qui en ont besoin pour isoler les logements des basses fréquences auxquelles l'immeuble est particulièrement soumis. En revanche, elles présentent une solution courante, peu onéreuse et facile à mettre en œuvre. Les panneaux Knauf contrapanel regula sont issus de matériaux biosourcés avec un affaiblissement acoustique pouvant aller jusqu'à 50 dB. Ces panneaux présentent également une bonne capacité d'absorption acoustique intérieure. Sous forme de panneaux préfabriqués avec finition intégrée, ils permettent un montage à sec sans mise en peinture. Ils peuvent être prédécoupés en atelier puis posés *in situ*, bord à bord avec des joints à vis à têtes blanches. Fréquemment utilisé dans des programmes tertiaires, ce dispositif pose des questions esthétiques lorsqu'il est appliqué dans le logement et interroge la capacité d'appropriation des occupants qui ne pourront plus en changer l'aspect une fois installé. Les panneaux de Fermacell présentent un bon compromis en ayant une mise en œuvre proche de celle des plaques de plâtres, avec découpe *in situ*, bandes à joints, ratissage et mise

en peinture, tout en étant un matériau biosourcé avec des propriétés acoustiques similaires aux panneaux Knauf. Pour les prototypes, nous avons choisi de tester les panneaux Knauf et les panneaux Fermacell pour comparer leurs facilités de mise en œuvre en site occupé, leurs aspects et leurs performances.

d. Les équipements

En raison de l'exposition au midi de l'une des deux façades de l'immeuble Les Cèdres, les habitants souffrent d'importants apports solaires qui provoquent une surchauffe de leurs appartements lors des périodes estivales. Rappelons que la température intérieure des appartements dépasse encore fréquemment, et pour plusieurs heures par jour, le seuil d'inconfort fixé à 28°C. Les températures de surfaces des panneaux excèdent également les 40°C lors des périodes de canicules, générant des rayonnements de chaleurs et effets de parois chaudes. De plus, les habitants de l'immeuble ouvrent rarement leurs fenêtres la nuit pour ventiler, gênés par les bruits routiers environnants. Face à ce problème d'inconfort de plus en plus récurrent avec le réchauffement climatique, il devient capital d'améliorer les conditions de confort d'été des occupants en ajoutant des protections solaires et en favorisant le recours à la ventilation nocturne.

Protections solaires

Pour conserver l'aspect architectural des façades Prouvé, nos réflexions se sont orientées vers des systèmes de protection solaire intérieure. Nous avons alors envisagé d'étudier deux types de stores intérieurs : un store toile et un store vénitien à lames orientables. Beaucoup de copropriétaires ont déjà opté pour cette solution avec des modèles variés qui jurent avec l'uniformité des façades originelles. Nous avons alors souhaité proposer un modèle unique pour l'ensemble de la copropriété, avec une bonne capacité de renvoi des rayonnements solaires. Divers modèles de toiles ont été étudiés dans la gamme Soltis de Ferrari, partenaires des GAIA, plus ou moins opaques pour contrer les rayonnements solaires tout en laissant passer la lumière. La toile Soltis 92 a été retenue pour le store intérieur ayant une bonne capacité de protection contre la chaleur et l'éblouissement, tout en laissant passer un minimum de lumière. La toile étant positionnée à l'intérieur, elle est moins efficace qu'une toile extérieure et a besoin d'un niveau d'opacité supérieur pour être efficace. Pour le store vénitien, reste à déterminer sa matérialité. Les stores à lames métalliques sont a priori plus réfléchissants, notamment lorsqu'ils sont choisis dans des tons clairs. En revanche, au regard de la matérialité choisie pour l'intérieur des logements et du choix de matériaux biosourcés, les stores vénitiens à lames bois seraient plus intéressants.

Après échanges avec le bureau TRIBU, un modèle performant en bois clair est retenu pour le prototype afin de concilier matière durable et renvoi des rayonnements solaires. Les résultats des diagnostics thermiques et d'ambiances vécues étant assez alarmants sur la question de la chaleur due aux rayonnements solaires, nous nous sommes interrogés sur la capacité réelle de protection solaire de stores positionnés à l'intérieur des appartements et derrière la façade isolée. TRIBU n'a pu que confirmer nos doutes, rappelant que la protection solaire la plus efficace reste la protection solaire extérieure. Nous avons alors profité de l'opportunité offerte par la solution à double fenêtre pour positionner un store entre les deux fenêtres. Il serait ainsi positionné devant la double façade isolée, qui serait alors protégée de la chaleur, et derrière la façade Prouvé qui ne s'en verrait pas modifiée. Cette hypothèse exige néanmoins de prévoir la bonne ventilation de l'espace entre les deux fenêtres qui risque d'être soumis à la condensation. Là aussi, nous étudions simultanément deux systèmes différents : un store toile avec enrouleur, manuel ou électrique, et un store vénitien qui offrent des performances de protections solaires comparables mais un aspect et des qualités d'usage différentes.

Sur les conseils du bureau d'étude thermique TRIBU, et après de nombreux échanges et débats au sein du conseil scientifique, nous avons décidé de développer un système de protection solaire extérieure. Il s'agit de la protection la plus efficace bien qu'elle pose un certain nombre de questions concernant sa fixation sur une façade légère non structurelle, son incidence visuelle sur des panneaux à forte valeur patrimoniale, sa résistance au vent sur un immeuble de neuf étages implanté sur les collines de Saint-Just, etc. Les questions épineuses qu'elle soulève nécessite que cette hypothèse soit développée avec des entreprises spécialisées et fasse l'objet d'un prototype. Pour minimiser son incidence visuelle et concevoir la protection solaire la plus adaptée, à la fois aux besoins des habitants et à l'architecture de l'immeuble, plusieurs esquisses ont été réalisées. Nos échanges nous ont conduit à opter pour une solution réversible permettant de retrouver la façade d'origine en cas de dépose des protections solaires. Le store devait également être le plus discret possible une fois la toile relevée afin de retrouver la lisibilité de la façade d'origine. Les protections solaires ont donc été imaginées fixées à la façade dans les joints entre panneaux pour éviter de les percer. De plus, elles devaient reprendre le rythme et les caractéristiques de la façade d'origine : des toiles de mêmes dimensions que les panneaux originaux, assemblés, pour retrouver une finition de surface lisse, les cadres étant fixés sur la structure primaire du bâtiment en béton, au niveau des dalles. Au-delà de son intérêt architectural, ce choix permet de protéger la totalité du panneau des rayonnements solaires et peut assurer un meilleur confort d'été qu'un

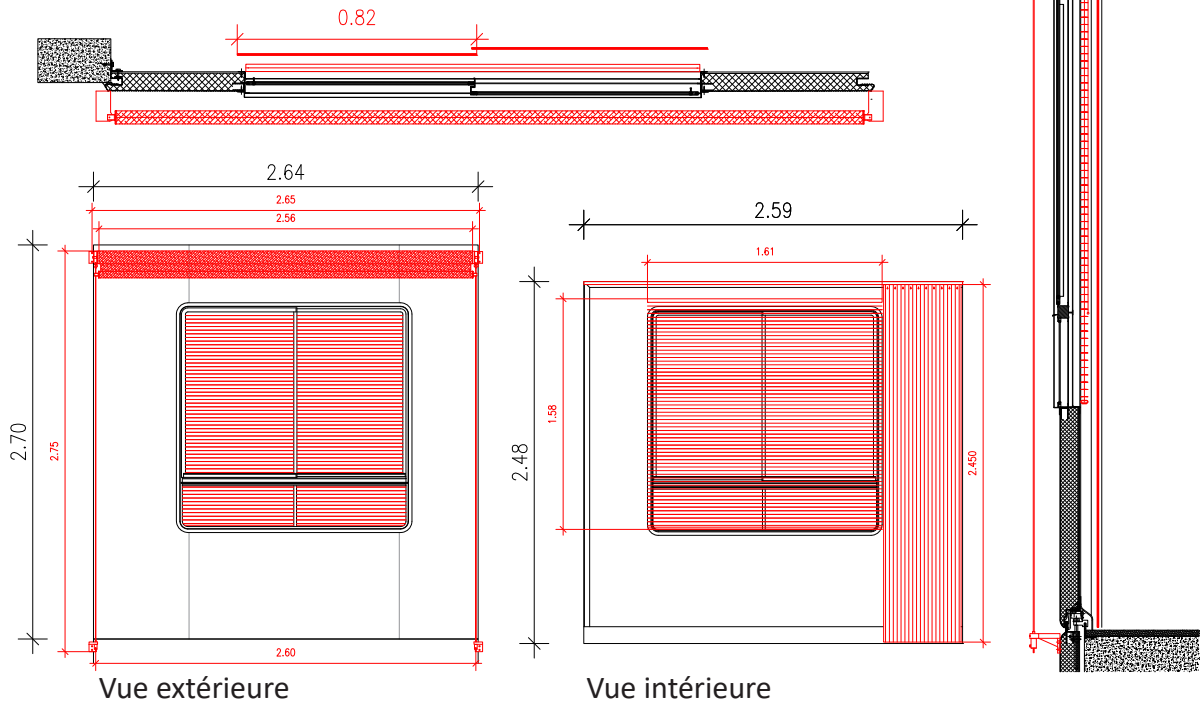
store qui se serait limité à la surface de la fenêtre. Bien que mis en œuvre par Jean Prouvé lui-même sur d'autres bâtiments postérieurs, les brises soleils orientables, piste explorée par les étudiants du master AA&CC lors de leur PFE, ont été abandonnés, jugés difficiles à manipuler et à entretenir, notamment lors des rafales de vent. De plus, les volumes qu'ils apportent sur la façade sont trop importants et n'entrent pas en cohérence avec l'aspect lisse de l'immeuble Les Cèdres. Une fois les principes de conception énoncés, nous avons cherché à développer les éléments du store de manière plus approfondie et nous sommes rapprochés de fabricants maîtrisant ces sujets, grâce au partenariat des GAIA. L'élaboration d'un prototype s'est rapidement révélée nécessaire pour tester la mise en œuvre inédite du store sur les façades Prouvé.

Rideaux acoustiques

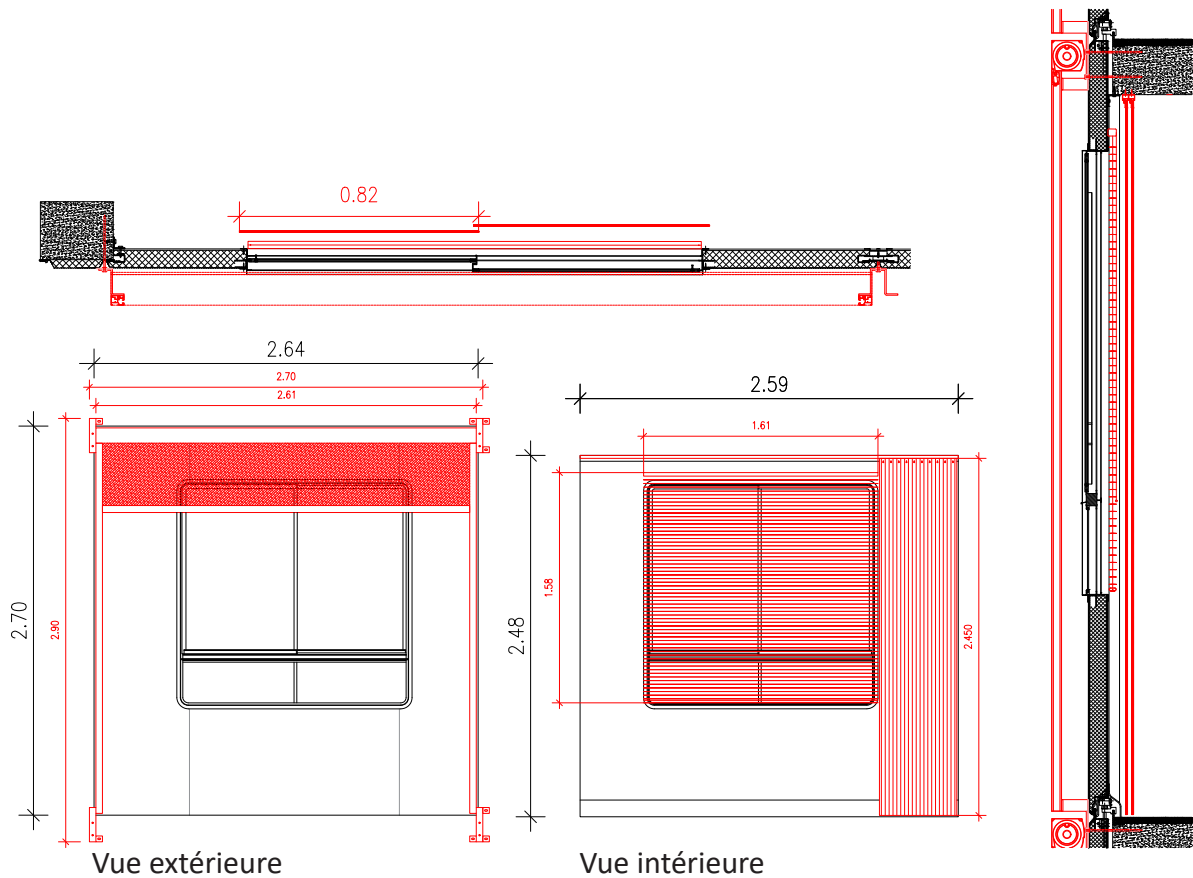
Les diagnostics ont mis en évidence des nuisances sonores importantes dans la rue de la Favorite avec un niveau sonore moyen de 58 dB(A) en journée contre 52dB(A) la nuit et jusqu'à 65 dB(A) lors des pics de circulation. Les entretiens avec les habitants ont également permis d'identifier des inconforts. Certains indiquent rencontrer des difficultés pour travailler dans leur salon côté rue, d'autres ont également du mal à dormir fenêtre ouverte côté nord, gênés par le voisinage et la circulation de l'autoroute A6. Les diagnostics thermiques d'été ont d'ailleurs fait apparaître le faible recours à la ventilation nocturne par les habitants, qui peut s'expliquer par ces nuisances. Pourtant la ventilation nocturne joue un rôle primordial dans le confort thermique d'été. Pour permettre aux habitants de profiter de ses bienfaits et d'améliorer leur confort phonique à moindre coût, nous avons pensé ajouter des rideaux acoustiques à l'intérieur des logements. Lorsqu'ils sont fermés, ces rideaux, souvent assez lourds et épais, permettent également d'apporter une sensation d'isolation thermique supplémentaire à la façade légère en réduisant l'effet de paroi froide, et d'améliorer l'acoustique intérieure de la pièce dans laquelle ils sont installés. Certains de ces rideaux vendus dans le commerce sont décrits comme des solutions « miracles » permettant de réduire les nuisances sonores de sept décibels. Outre les rideaux du commerce, nous nous intéressons également aux rideaux acoustiques utilisés dans le monde du spectacle et qui possèdent, a priori, des performances supérieures. L'installation de rideaux acoustiques sur les prototypes permettra de valider l'intérêt d'utiliser de tels rideaux dans l'habitat.

Ces rideaux permettent également de mettre en œuvre des chicanes acoustiques avec le châssis coulissant des panneaux. En ouvrant la fenêtre dans un sens et le rideau dans l'autre, une chicane est créée permettant de laisser passer l'air et donc de ventiler naturellement le logement, tout en atténuant les transmissions sonores comparativement à une fenêtre ouverte sans rideaux. Ils

Les équipements



Première esquisse de store «léger» : sans coffre, avec guidage câble
© Équipe RFL, 2019



Dessin d'exécution du prototype réalisé : guidage zip et coffre pour protéger le store des intempéries
© Équipe RFL, 2019

offrent ainsi la possibilité aux habitants de procéder à une ventilation naturelle de leur logement, particulièrement importante pour leur confort, en étant moins gênés par les nuisances sonores extérieures.

Dans un premier temps, l'équipe choisit de tester les rideaux phoniques, occultants et thermiques de la marque Moondream¹⁴¹. D'après leur fabricant, ces rideaux permettent d'atténuer les bruits de 7 dB, de réduire de 46 % les consommations de chauffage de son logement et d'occulter totalement une pièce : « Les tests réalisés par un laboratoire indépendant ont simulé une pièce équipée d'une fenêtre avec un vitrage standard. Ils ont démontré que le vitrage standard laissait passer un niveau sonore de 70 dB, contre 63 dB avec un vitrage standard équipé du rideau 3 en 1 MOONDREAM, soit une énergie sonore divisée par 4¹⁴². Une lampe simulant l'intensité de la lumière (en lux) a été placée devant la vitre. Les tests ont démontré qu'un vitrage seul laissait passer 85.000 lux et qu'un vitrage avec rideau standard laissait passer 19.000 lux, alors qu'un vitrage équipé du rideau 3 en 1 MOONDREAM ne laissait passer aucun lux. Enfin, les tests ont simulé une pièce totalement isolée thermiquement, et équipée d'une fenêtre avec un vitrage standard. La température à l'extérieur étant de 5°C, celle à l'intérieur étant maintenue à 22°C, les tests ont démontré une différence de consommation de chauffage de 46 % avec la fenêtre équipée du rideau 3 en 1 MOONDREAM, par rapport au vitrage seul. »¹⁴³ Le rideau Moondream est constitué de trois couches de tissus : une toile 100 % polyester, une toile de coton gratté, entre lesquelles s'insère un tissu isolant thermique avec 99,99 % de polyester et 0,01 % d'aluminium. Pour couvrir une fenêtre de l'immeuble Les Cèdres, deux rideaux sont nécessaires ainsi qu'une tringle incurvée permettant de réduire les fuites phoniques latérales¹⁴⁴.

Nous nous rapprochons dans un deuxième temps de l'entreprise Showtex spécialisée dans les textiles phoniques de scène et choisissons de tester deux types de rideaux, un rideau multicouche et un rideau de laine. Le rideau multicouche est composé de deux couches de velours (référence Helena), de 380 g/m² chacune, entre lesquels s'insèrent deux couches de doublure acoustique (72 % IFR PVC ; 16 % PES ; 9 % CO et 3 % PU), de 845 g/m² chacune. Leurs dimensions sont faites sur mesure ce qui permet de couvrir la totalité du panneau grâce à deux rideaux montés sur un rail, faisant la largeur de la pièce, installé au plafond. Latéralement, les rideaux peuvent être scratchés

141. Ceux-ci sont vendus chez Leroy Merlin à 99,00 € l'unité.

142. En effet, chaque fois qu'un niveau sonore diminue de 3 dB, cela signifie qu'il a été divisé par 2.

143. Source : descriptif fabricant Moondream.

144. Le coût total de ces équipements est de 227,90 € TTC.

sur le panneau, et au centre un système d'accroche particulier permet de superposer les deux rideaux, ainsi les fuites phoniques sont minimisées. Ces dispositions permettent de faire de ce rideau un vrai doublage, qui constitue presque une seconde façade légère textile intérieure¹⁴⁵. Les quatre couches de ces rideaux doivent leur permettre d'atteindre des performances supérieures aux rideaux Moondream. Enfin, le second rideau Showtex est le Kilosergé (80 % laine/20 % MNF) avec un poids de 1 000 g/m². Il dispose des mêmes dispositifs d'accroche que le rideau multicouche pour éviter les fuites phoniques. Ce rideau apporte de la masse à la façade, comme les précédents, mais n'est constitué que d'une couche. La laine est néanmoins un bon isolant et peut également améliorer l'environnement phonique intérieur¹⁴⁶. Chacun de ces trois rideaux dispose de caractéristiques et d'avantages différents c'est pourquoi nous choisissons de tester les trois types de rideaux dans la loge du gardien.

Notre méthodologie prévoit d'évaluer l'ensemble des hypothèses choisies avec le conseil scientifique au moyen de prototypes dont les capacités sont testées en situation réelle et non seulement par le calcul. Nous pourrions ainsi les modifier pour les adapter au contexte réel de l'immeuble. Ces prototypes offrent également l'occasion aux copropriétaires d'expérimenter les propositions de réhabilitation en amont de toute décision, l'enjeu étant d'obtenir l'adhésion de l'ensemble des copropriétaires, ou au moins d'une majorité, pour mener à bien les travaux. Il est important que les copropriétaires réalisent ces travaux de concert pour atteindre un niveau de performance global suffisant pour leur confort comme pour obtenir des subventions qui les aideront à financer l'opération. En copropriété, recueillir l'adhésion de l'ensemble des habitants est plus difficile, chacun possédant des ressources différentes. Cependant, plus le nombre de copropriétaires réalisant les travaux sera important plus l'opération aura un intérêt. Si seulement 30 à 50 % des copropriétaires réalisent les travaux, l'enveloppe globale aura des disparités trop importantes qui déséquilibreront les ambiances intérieures. De plus, sans réaliser le bouquet de travaux commun, l'intervention individuelle à l'intérieur des logements sera également insuffisante pour obtenir des financements. Travailler avec les copropriétaires très en amont, les inclure dans les réflexions et leur offrir un support concret pour se projeter dans les travaux, comme les prototypes, permet de générer une synergie autour du projet. Les prototypes sont donc des outils de conception, d'expérimentation et de médiation.

145. Le coût de ces rideaux est de 1 050 € HT auxquels s'ajoute 217,29 € HT de rail et 29,75 € HT de scratches, ce qui porte le coût total de cet équipement à 1 556,48 € TTC.

146. Le coût total de ces rideaux, avec le rail et les scratches, est de 556,02 € TTC pour un panneau de façade.

Partie 2 : Fabrication et installation des prototypes : le temps de l'expérimentation

Cette partie a pour objectif de présenter les hypothèses de réhabilitation des façades légères de l'immeuble Les Cèdres que nous avons choisi de développer jusqu'au stade de prototypes à l'échelle 1 : 1¹⁴⁷. Expérimenter en conditions réelles les hypothèses de travail constitue l'un des principaux enjeux de cette recherche. Pour ce faire, nous avons élaboré un processus de conception-fabrication dans le but d'éprouver les différentes propositions avec la plus grande interdisciplinarité possible. Les propositions ont été évaluées à travers de multiples critères : le confort (thermique, acoustique, hygrométrique, lumineux, d'usages, etc.), l'architecture, le patrimoine, l'environnement, l'énergie, les normes (performances thermiques et acoustiques, renouvellement d'air, systèmes de chauffages, etc.), et bien sûr l'économie. Cette phase a été l'occasion d'échanges et de débats extrêmement stimulants au sein de l'équipe lors des Conseils scientifiques, mais aussi lors de réunions de travail régulièrement organisées entre ARCHIPAT, le LAURE, le CRESSON, TRIBU et LASA. L'équipe s'est également adjoint les compétences de partenaires professionnels industriels et artisans. Ces collaborations ont permis de définir avec précision les solutions techniques les plus adaptées à chacune des hypothèses, conformément aux objectifs de la chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture écoresponsable « Habitat du Futur ». En l'absence de solution unique et considérant l'ampleur des enjeux à relever, la chaire tente de faire émerger des opérations associant constructeurs, praticiens, chercheurs, entrepreneurs et habitants dans des domaines allant de l'aménagement du territoire à la fabrication de composants pour la construction. Elle entend remettre en question l'ensemble de la chaîne de conception et de production de l'habitat ; cherchant des procédés innovants dans le but de donner un plus large accès à des logements abordables et soutenables. La question de l'économie de l'habitat du futur est prépondérante dans les recherches portées par la chaire. Sans expérimentation préalable, l'économie globale d'un projet de réhabilitation aux enjeux complexes demeure difficile à évaluer. Dans cette logique, l'expérimentation constitue une étape obligée, permettant à la fois de tester les propositions architecturales, mais également de les mettre à l'épreuve des habitants, des conditions de mise en œuvre réelles, ainsi que des conditions climatiques et environnementales d'un objet

147. L'ensemble des plans, coupes et détails techniques de ces hypothèses sont réunis dans le volume de plans A3 joint au document. Ce document peut être consulté pour compléter les dessins à échelle réduite présentés en iconographie.

ou d'un ensemble étudié. L'expérimentation permet ainsi de s'assurer de l'économie réelle du projet, qui ne se résume pas seulement à l'économie technique ou financière, mais également à l'économie de matériaux, d'interventions, de transformations tout en prenant en compte les dimensions sociale et culturelle dans une recherche de frugalité et d'équilibre entre ce qu'il est nécessaire de transformer et ce qui peut être conservé.

Dans ce contexte, l'équipe de recherche s'est très tôt rapprochée des GAIA – Grands Ateliers Innovation Architecture –, véritable plateforme d'expérimentation de la chaire pour élaborer les prototypes. Pour financer ces expérimentations, l'équipe a bénéficié d'un budget alloué par le BRAUP – Bureau de la recherche en architecture urbanisme et paysage – qui a permis l'achat de matériaux, la prise en charge de certaines prestations et le transport des prototypes *in situ*. Certains partenaires ont également proposé des dons de matériaux ou de temps de travail pour la réalisation. Cette partie entend souligner le caractère déterminant des expérimentations pour l'élaboration et l'évaluation de solutions de réhabilitation des façades légères de l'immeuble Les Cèdres.

COÛT DES PROTOTYPES	
BUREAUX D'ÉTUDES	
Diagnostics existant pour conception des prototypes + analyses des prototypes après installation (TRIBU, LASA, DECARE, KCM)	36 480,00 € TTC
MATÉRIAUX POUR LES PROTOTYPES	
2 stores vénitiens intérieurs en bois	209,80 € TTC
Store intérieur toile	588,60 € TTC
Store extérieur + 4 platines de fixation	1 500,00 € TTC
Rideaux phoniques MOONDREAM et leur tringle	227,90 € TTC
2 types de rideaux phoniques SHOWTEX	2 020,02 € TTC
Fermacell : don	0,00 € TTC
Steico isolant fibre de bois : don	0,00 € TTC
TOTAL	4 546,32 € TTC
PRÉFABRICATION DES PROTOTYPES EN ATELIER	
GAIA (plateforme logistique, matériel, bois, quincaillerie, manutention des prototypes et livraison jusqu'au chantier)	11 166,77 € TTC
Compagnons du devoir de Villefontaine : don	0,00 € TTC
TOTAL	11 166,77 € TTC
INSTALLATION DES PROTOTYPES <i>IN SITU</i>	
Main d'oeuvre (entreprise Asymptote, KCM) et nacelle	3 022,88 € TTC
Compagnons du devoir de Villefontaine : don	0,00 € TTC
Fermacell pose : don	0,00 € TTC
TOTAL	3 022,88 € TTC
TOTAL	55 215,97 € TTC

1 – Prototype de doublage 1 : restauration double-vitrage

a. Composition du prototype

Ce premier prototype met en œuvre la première hypothèse imaginée concernant les menuiseries, qui consiste à restaurer ou restituer la menuiserie d'origine avec un double vitrage. Un doublage isolant thermique et phonique le complète ainsi qu'un store intérieur.

La menuiserie

Pour ce prototype, la conception de la menuiserie représente un défi important. Pour cette étape cruciale, nous avons dessiné des esquisses soumises immédiatement à l'ensemble de l'équipe ainsi qu'au conseil scientifique. Une fois ces propositions validées, des industriels de menuiseries ont été sollicités pour fabriquer les ouvrants. Après discussion avec de nombreux interlocuteurs, tous admettent ne pouvoir fabriquer ces éléments sur mesure. Les DTU – documents techniques unifiés – imposent des rupteurs de ponts thermiques sur l'ensemble de la menuiserie. Or selon les différents fabricants consultés, les rupteurs sont impossibles à cintrer dans le rayon de 70 mm imaginé par Prouvé. Les DTU imposent également une feuillure d'au moins 20 mm des doubles vitrages dans les montants de la menuiserie, mais la dimension des profils Prouvé ne le permet pas. Ces premières contraintes obligerait à obtenir un Atex – Appréciation technique d'expérimentation – auprès de la commission prévention produit de l'Agence qualité construction pour le modèle de fenêtre créé, très complexe à obtenir sans les rupteurs de ponts thermiques. Face à ces impasses techniques, les industriels consultés reconnaissent que la création d'une filière spécifique pour les fenêtres de l'immeuble Les Cèdres leur est impossible, et la rentabilité de l'investissement engendré n'est que peu assurée. Ils conseillent alors à l'équipe de s'orienter vers des artisans métalliers et serruriers mais mettent en garde les concepteurs quant au coût de fabrication d'une fenêtre sur mesure avec de telles contraintes. L'entreprise de serrurerie et métallerie KCM qui accompagne l'équipe n'ayant pas les moyens de mettre en œuvre une filière, nous nous rapprochons d'autres fabricants, en vain. La fenêtre, élément essentiel de cette hypothèse, n'a donc pu être réalisée pour l'expérimentation. Stéphane Coquille, entreprise KCM et René Hugues, ingénieur du bureau DECARE, cherchent pour leur part une solution alternative permettant d'intégrer un double vitrage dans les ouvrants d'origine en les modifiant le moins possible. Cette fenêtre même améliorée, aura des performances thermiques limitées sans rupteurs de ponts thermique et ne respectera pas les normes ce qui peut poser question à la fois pour des

Prototypage de restauration double vitrage et doublage isolant intérieur

Ossature

En bois, réalisée par les compagnons du devoir de Villefontaine

Isolation thermique

14,5 cm de fibre de bois insérée entre les ossatures

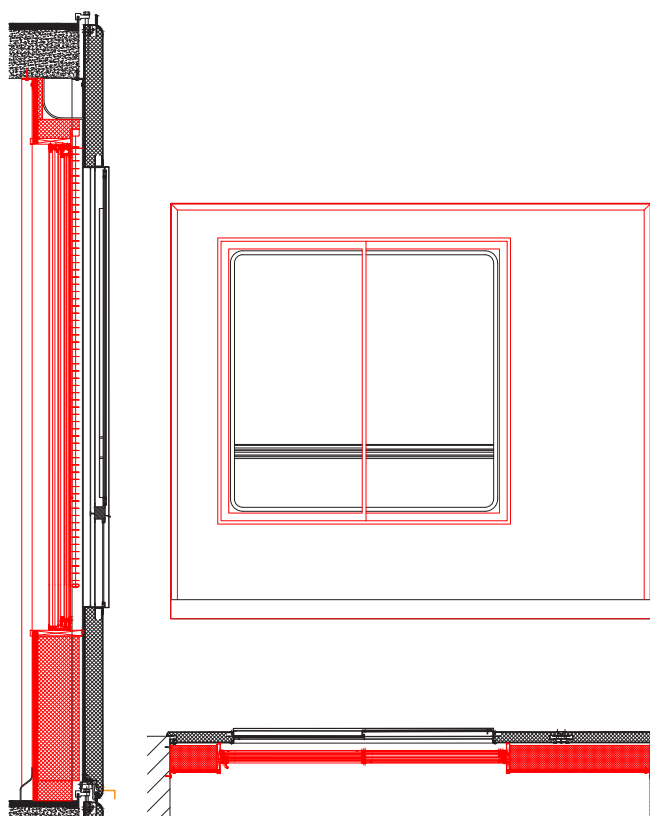
Isolation acoustique

Panneaux Knauf Contrapanel 13 mm

Menuiserie

Non réalisée : reste à trouver un serrurier capable de le faire

Vitrage : MP Vitrage 13,5 mm



Ossature du prototype
© Eddy Giroux, Compagnons du Devoir, novembre 2019



Ossature du prototype - Maquette numérique
© Mathilde Padilla, archipat, 2019

raisons réglementaires et de sécurité, mais aussi pour atteindre les performances nécessaires à l'obtention de subventions et permettre aux habitants d'améliorer leur confort.

L'hypothèse mériterait assurément d'être davantage développée, la difficulté de reproduire des menuiseries patrimoniales étant particulièrement récurrente. Cependant, face aux difficultés pour la mettre en œuvre et atteindre des performances qui permettent de garantir le confort des occupants, et face aux coûts que cette fenêtre sur mesure pourrait engendrer, nous faisons le choix d'abandonner cette hypothèse. Les autres composants de ce dernier développement seront quand même testés dans le but de valider leur efficacité en conditions réelles grâce à des diagnostics thermiques et acoustiques.

Les parties pleines

Nous concevons ensuite les parties pleines des panneaux à commencer par leur ossature. Pour cela, grâce au partenariat des GAIA, nous nous sommes rapprochés des compagnons du devoir charpentiers de Villefontaine. Accompagnés par leur instructeur, Eddy Giroux, les élèves compagnons ont été invités à concevoir plusieurs propositions d'ossatures qui devaient prendre en compte les charges à supporter, l'épaisseur de l'isolant à intégrer, la mise en œuvre en site occupé, l'optimisation de la préfabrication de l'ossature en atelier et le transport les éléments sur site jusque dans les appartements. Les compagnons conçoivent les ossatures mais encore leur nomenclature, l'emballage et la notice de montage sur site. Pour la conception de l'ossature, ils sont amenés à prendre en compte tous les autres éléments du prototype, tandis que nous nous chargeons de faire le lien avec les différents partenaires. En effet, pour le choix de l'isolant, nous avons rencontré de nombreux fabricants de matériaux biosourcés pour leur expliquer les contraintes inhérentes au projet et rechercher avec eux les produits les plus adaptés sur le marché. L'isolant fibre de bois de l'entreprise Steico est retenu après de nombreux échanges avec le technico-commercial de l'entreprise, Olivier Mognon. A la suite d'une réunion de travail, celui-ci suggère de procéder à deux méthodes de mise en œuvre de ces produits afin de comparer leur efficacité. Sur l'un des prototypes, il propose de concevoir une ossature bois d'épaisseur 14,5 cm entre laquelle s'insère directement des plaques de fibre de bois semi-rigide de même épaisseur. Sur le second prototype, il suggère de concevoir une ossature bois de 10 cm entre laquelle s'insère une couche de fibre de bois semi-rigide de même épaisseur, et d'y ajouter une surcouche d'isolant fibre de bois rigide de 4 cm, côté intérieur du logement. Il justifie ce test par ses doutes quant à la capacité de cette disposition à réduire les ponts thermiques inhérents aux profils de l'ossature bois, bien que ceux-ci soient assez faibles,



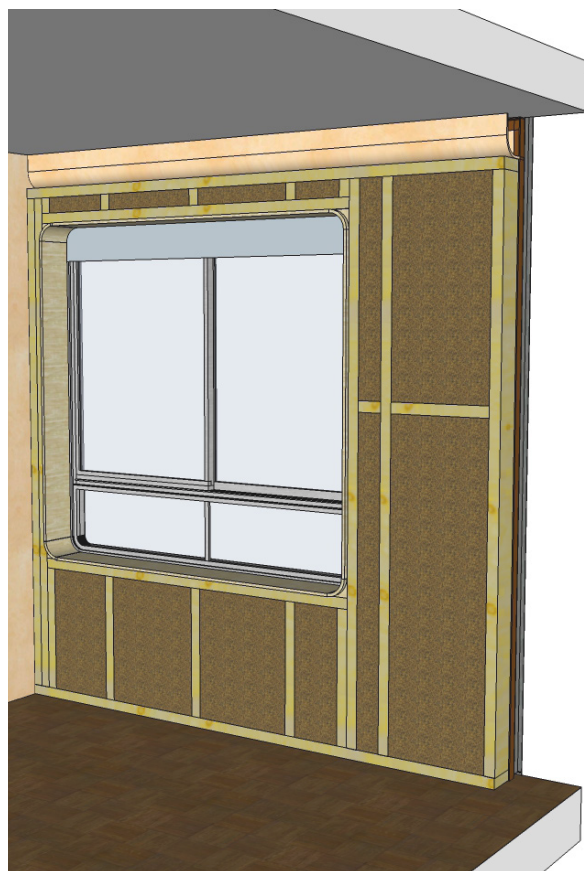
Montage du store toile intérieur du prototype
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Store et précadre aux angles arrondis du prototype - Maquette numérique
© Mathilde Padilla, archipat, 2019



Pose de l'isolant thermique fibre de bois et du frein vapeur
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Isolant thermique fibre de bois - Maquette numérique
© Mathilde Padilla, archipat, 2019

le bois demeurant un bon isolant thermique. Ses conseils seront suivis et nous mettrons en œuvre la première hypothèse sur ce prototype. Les compagnons installent ensuite ces éléments dans la loge du gardien. Ils ajoutent une membrane hygro-régulable, les panneaux Knauf Contrapanel, et un cadre de finition en bois qui encadre la menuiserie d'origine et dont les angles épousent strictement le profil arrondi de la menuiserie Prouvé. Privilégier le bois dans le doublage intérieur s'explique pour plusieurs raisons. La première est de distinguer ces éléments ajoutés des éléments Prouvé en aluminium. La seconde est de suivre les principes de Cottin qui, en opposition aux façades extérieures métalliques de l'immeuble, a conçu des espaces intérieurs chaleureux avec des cloisons et portes revêtues de contreplaqué bois.

L'occultation

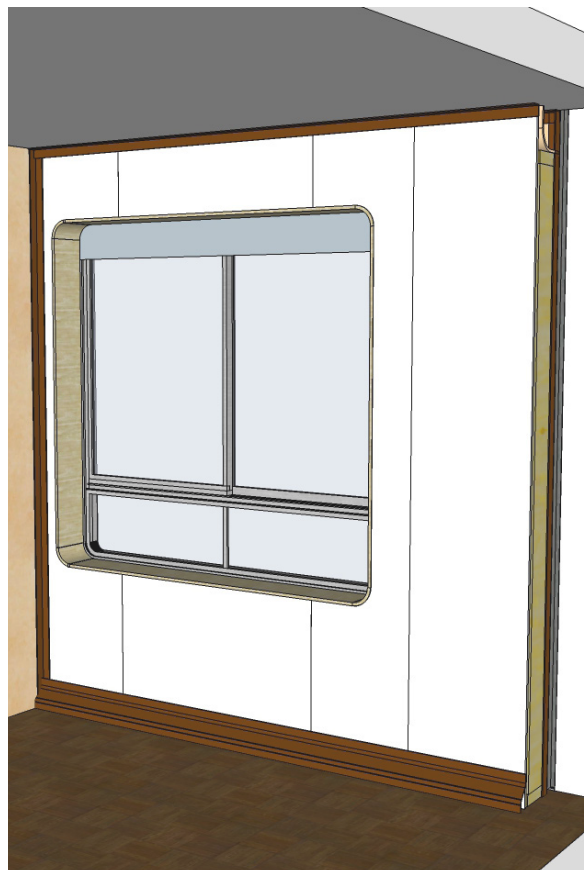
Sur ce prototype, nous avons choisi de mettre en œuvre un store toile intérieur, avec une toile Soltis 92 gris galet, sur un enrouleur de la même couleur, caché dans l'épaisseur du doublage pour le rendre invisible de l'intérieur de l'appartement comme de l'extérieur. Le store est manuel, commandé par chaînette, sans guidage. Il est plus large que la fenêtre afin de la couvrir en totalité. Ce store a été choisi pour son faible coût de 122,50 € HT qui en fait une solution intéressante et abordable pour les copropriétaires. Ces stores peuvent également être motorisés pour faciliter leur usage ce qui engendrera un surcoût de 483,50 € HT.

b. Mise en œuvre

La mise en œuvre des prototypes doit également être évaluée dans un contexte de futur chantier en site occupé. Pour les ossatures, l'isolant et le cadre de finition autour de menuiseries, nous avons préfabriqué les éléments aux Grands Ateliers avec les compagnons selon les plans de détails réalisés avec la doctorante. La notice de manutention et de montage réalisée par les compagnons a fait ses preuves lors de la pose dans la loge du gardien. L'installation du store a nécessité davantage de précautions pour le positionner dans le doublage et garantir le passage de la toile dans une rainure dédiée, située entre le cadre en bois de finition et le panneau d'origine. Le store restera accessible pour son remplacement ou sa maintenance. Concernant la finition intérieure du doublage, les panneaux Knauf contrapanel, bien que prédécoupés en atelier aux dimensions initialement prévues, ont dû être repris sur place pour s'adapter aux aspérités du sol de l'appartement, aux plinthes des cloisons intérieures, etc. Leur découpe a généré beaucoup de poussière difficilement supportable en milieu occupé. Si ce matériau venait à être choisi pour la réhabilitation, il serait nécessaire de prévoir du jeu



Pose des panneaux Knauf contrapanel
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Prototype installé - Maquette numérique
© Mathilde Padilla, archipat, 2019



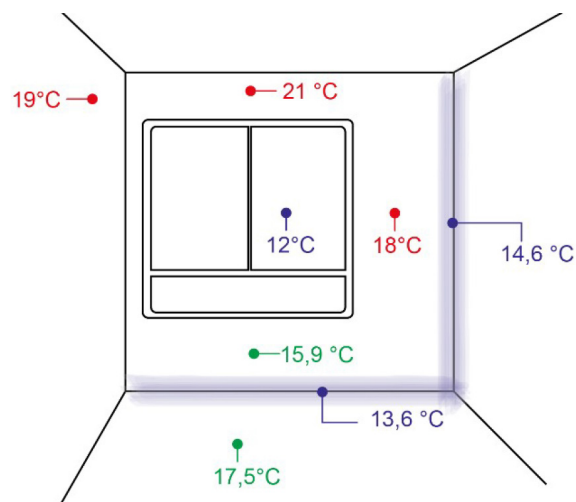
Le prototype de doublage achevé, sans la restauration de la fenêtre en double vitrage
© Sabine Serrad, 28 janvier 2020

entre les panneaux et des bandes résilientes pour réaliser des joints propres sur le pourtour du doublage, entre les panneaux et les cloisons latérales des appartements. Enfin, l'impossibilité de réaliser la restauration des menuiseries en double vitrage avec les fabricants rencontrés n'a pas permis d'achever le prototype dans son intégralité. Les autres composants ont cependant pu être testés pour en identifier les performances.

c. Performances : les tests *in situ*

Thermiques

Pour quantifier la capacité d'isolement des parois, vérifier le maintien d'une température confortable sur les parois intérieures de la façade et vérifier que les ponts thermiques ont pu être comblés, le bureau TRIBU a réalisé des mesures thermiques sur le prototype. Ces mesures doivent cependant être nuancées, le chauffage étant en fonctionnement à cette période, les températures extérieures relativement douces lors des deux journées de mesures (6 novembre et 22 décembre 2020) et les prototypes de menuiseries non installés. Les premières mesures ont été réalisées le 6 novembre 2020 entre 9h et 10h. Ce matin-là, la température d'air extérieure était assez douce, variant entre 10,3°C et 11,4°C, ce qui a rendu l'analyse des mesures délicates. La température de surface extérieure des panneaux la plus faible était de 5,4°C et pouvait aller jusqu'à 8,7°C. La caméra thermique a permis d'identifier des ponts thermiques



thermiques au niveau des nez-de-dalles des planchers haut et bas, et au niveau des refends en béton apparents sur la loge du gardien. La température d'air de la pièce dans laquelle s'intègre le prototype varie entre 16 et 18°C. Les températures de surface mesurées sur le prototype sont récapitulées dans le schéma ci-contre. On retrouve les ponts thermiques au niveau des dalles et refends. La température

de la paroi augmente à mesure que l'on monte vers le plafond. Ce gradient de température est dû au rayonnement du plancher chauffant de l'étage supérieur. La partie de la paroi la plus fraîche (entre 15°C et 16°C) se situe au niveau de l'allège de la fenêtre. On observe une différence de 10°C entre la température de paroi extérieure et intérieure des panneaux, ce qui montre l'impact positif du doublage isolant. La comparaison des mesures réalisées sur le prototype avec des mesures réalisées sur le panneau de cuisine non isolé montrent une

performance légèrement supérieure sur les prototypes, comme on peut le voir sur le tableau ci-dessous. Le climat doux et la discontinuité de l'enveloppe par le manque d'amélioration des fenêtres, ont sensiblement modifié les mesures qui ne permettent pas de conclure définitivement sur la performance thermique des prototypes. N'ayant pu reprocéder à des mesures avec les prototypes achevés et par un climat plus froid, nous nous sommes fiés aux résultats positifs mis en avant par la simulation thermique dynamique réalisée par le bureau TRIBU.

Murs / Températures	Temp. air intérieure	Temp. surf intérieure	Temp. surf extérieure	Temp. air extérieure	Différence de température intérieur / extérieur
Chambres (prototype)	16°C	15,5°C	8,2°C	10,3°C	7,3°C
Cuisines (Existant)		15°C	8,7°C		6,3°C

Acoustiques

La menuiserie n'ayant pas pu être réalisée, le bureau d'études LASA a tout de même modélisé le comportement de la menuiserie étudiée¹⁴⁸. Seules les parties pleines du panneau, composées d'une ossature bois et d'un isolant fibre de bois de 14,5 cm, puis d'un isolant phonique Knauff Contrapanel, ont pu être mises en œuvre. Selon les modélisations du bureau d'études LASA, ces parties pleines disposent d'un affaiblissement acoustique de 52 dB¹⁴⁹. Pour l'heure, le prototype avec la menuiserie d'origine dispose d'un isolement de 31 dB¹⁵⁰. Cet isolement permet de s'approcher du seuil d'isolement fixé à 32 dB par le LASA pour permettre le confort des occupants. Sans avoir installé la menuiserie, il est difficile d'appréhender la capacité d'affaiblissement acoustique globale du prototype avec la menuiserie réhabilitée, qui dépend des potentielles fuites d'air au niveau des joints et des ventilations naturelles. Cependant, une approche théorique reste possible. En négligeant les entrées d'air, le LASA estime que des menuiseries aluminium dotées du vitrage MP Vitrage ou Monuverre étudié pourraient atteindre un isolement acoustique excédant les 35 dB. En revanche, en prenant en compte de possibles fuites au niveau des joints, et les entrées d'air nécessaires à la ventilation, le LASA estime que cette solution pourrait plafonner entre 30 et 33 dB d'isolement. Pour atteindre les 32 dB, il faudra équiper les menuiseries de joints phoniques et leurs cadres devront justifier de performances phoniques suffisantes pour

148. Le rapport complet de modélisation du LASA est disponible en annexe 16.

149. L'affaiblissement est la valeur $Rw+C_{tr}$ modélisée.

150. Valeur d'isolement réelle *in situ* D_{ntr} .

ne pas dégrader les performances des vitrages. L'équipe devra être particulièrement attentive à tous les jointoiments entre le nouveau doublage, l'existant et les menuiseries. La solution du double vitrage sur châssis Prouvé permettrait de s'approcher du seuil d'isolement phonique mais ne laisse pas beaucoup de marge sur le résultat après chantier.

d. Appréciation

Sur ce prototype, les habitants estiment l'épaisseur du doublage et son impact trop important sur les surfaces des appartements. Ensuite, en comparant les stores des deux prototypes, ils constatent que les stores toiles offrent moins de configurations que les stores vénitiens pour réguler les apports solaires et la luminosité des logements. En revanche, ils apprécient la possibilité d'avoir des stores toiles électriques, plus faciles à manipuler. La couleur des stores toiles pourra être discutée mais devra rester neutre pour s'adapter à tous les intérieurs, discrète et identique sur tous les logements pour rester au plus proche de l'aspect extérieur d'origine. Concernant les menuiseries, les habitants regrettent que cette solution ne puisse aboutir, celle-ci aurait permis de retrouver l'aspect uniforme de la façade, proche de l'origine, tout en assurant un bon niveau de performances. Certains habitants déplorent qu'aucune solution technique ou dérogation facilitée ne puissent être trouvée pour réaliser des menuiseries permettant de redonner la valeur patrimoniale d'une œuvre telle que les façades de Jean Prouvé tout en étant vertueuses sur le plan environnemental. Sur ce prototype, les habitants apprécient particulièrement le cadre en bois du doublage, aux angles arrondis, qui souligne la menuiserie existante de Jean Prouvé. Ce sentiment est également partagé par le conseil scientifique et l'architecte des bâtiments de France lors de leur visite.

e. Économie

Pour pouvoir comparer les différents prototypes, il est également nécessaire d'en connaître le coût. Nous avons donc fait estimer les solutions proposées par le Cabinet Denizou, économiste de la construction et partenaire de la thèse. Le doublage isolant thermique en fibre de bois de 14,5 cm avec son ossature et sa membrane hygro-régulable a été estimé à 424 000 € HT pour les deux façades nord et sud de l'immeuble. A cela s'ajoute 32 000 € HT pour la fourniture et la pose des panneaux Knauf contrapanel. La restauration et la restitution des fenêtre « Prouvé » équipées de doubles vitrages avaient été estimées à 507 000 € HT pour l'ensemble de l'immeuble. Les échanges avec les fabricants n'ayant pu aboutir à une solution, cette estimation reste à nuancer. L'équipement de l'ensemble des fenêtres sud par un store toile manuel a été évalué à

Prototype de la double façade intérieure

Ossature

En bois, réalisée par les compagnons du devoir de Villefontaine

Isolation thermique

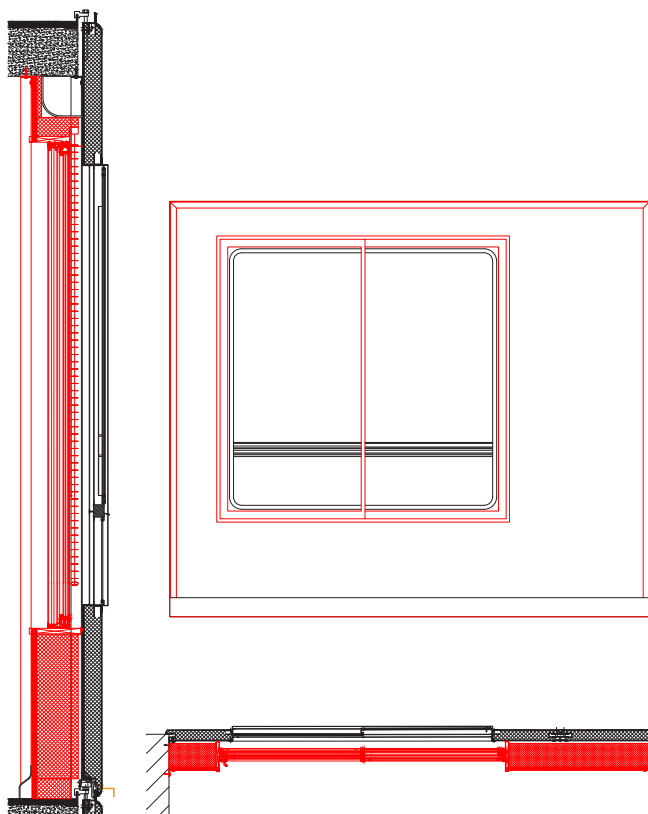
10 cm de fibre de bois insérée entre les ossatures + 4 cm de fibre de bois au devant des ossatures

Isolation acoustique

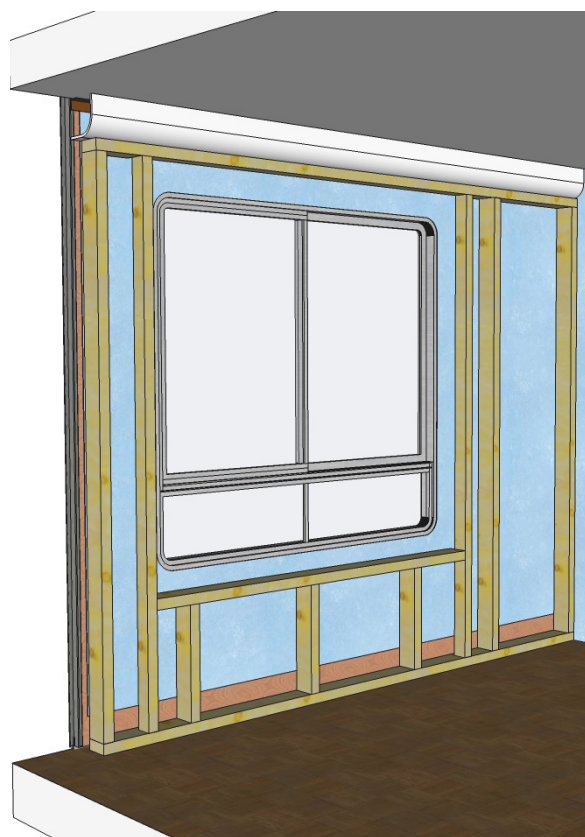
Panneaux Fermacell 12,5 mm

Menuiserie

Non réalisée : plusieurs modèles de menuiseries alu à choisir et affiner + une fenêtre bois à inventer avec les compagnons.



Ossature du prototype double façade
© Eddy Giroux, Compagnons du Devoir, novembre 2019



Ossature du prototype double façade - Maquette numérique
© Mathilde Padilla, archipat, 2019

53 000 € HT. Cette proposition représenterait donc un investissement de 1 016 000 € HT pour l'ensemble de la copropriété et un coût de 20 091 € HT pour un T4 de l'immeuble. A ce coût s'ajoutera le financement des travaux sur l'enveloppe globale de l'immeuble et sur les systèmes de chauffage et de ventilation¹⁵¹.

2 – Prototype de doublage 2 : « Charte de Venise » double façade

a. Composition du prototype

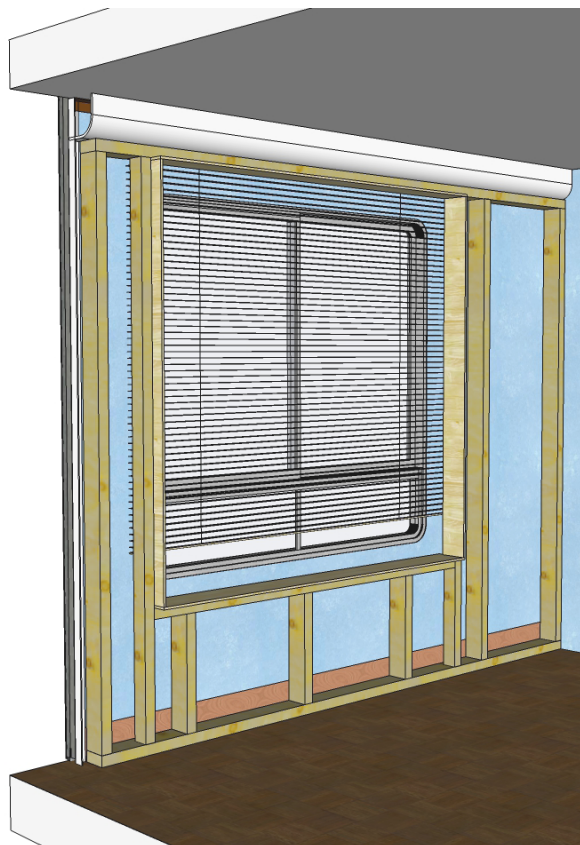
La menuiserie

Ce second prototype se caractérise par la mise en place de la double fenêtre. Il consiste à restaurer la menuiserie d'origine de la loge du gardien et à ajouter une double fenêtre intérieure. L'entreprise KCM et le bureau DECARE ont travaillé sur le sujet de la restauration de la fenêtre d'origine. Sur ce prototype, ils ont démonté la fenêtre pour remplacer les vitrages fendus par le vent, les vitres n'étant plus maintenues dans les feuillures en aluminium à la suite du retrait des joints. Ils ont d'ailleurs remplacé les joints et les patins positionnés au niveau des coulisses pour en faciliter la manipulation. La question de la double-fenêtre intérieure a fait l'objet de nombreux échanges avec les fabricants de menuiseries métalliques et bois, grâce notamment aux partenariats des Grands Ateliers. Les réunions de travail qui s'en sont suivies aboutissent à la définition d'un catalogue de menuiseries pouvant correspondre aux besoins de l'immeuble Les Cèdres. Elles seront quoiqu'il en soit plus grandes que les menuiseries d'origine pour conserver le clair de vitrage initial et la vue de la menuiserie originelle depuis les appartements. Les différentes matérialités, bois et aluminium, méritent d'être testées pour comparer leurs aspects et performances. Une fois les modèles sélectionnés selon leurs performances thermiques, acoustiques et la finesse de leur dessin, l'équipe souhaitait les faire fabriquer et monter sur site par des menuisiers professionnels. Malheureusement, au moment des premiers contacts avec les fabricants, le contexte sanitaire a brutalement interrompu le projet. Les partenariats n'ont donc pu aboutir dans les temps et les doubles fenêtres n'ont pu être posées sur les prototypes. Néanmoins, dans la poursuite des travaux avec la copropriété, nous souhaitons pouvoir achever ces prototypes de menuiseries pour valider les hypothèses. Entre-temps, dans le cadre de cette recherche, le bureau TRIBU a opté pour la simulation par le calcul de l'intégration de la menuiserie sur la double façade. De plus, un des appartements

151. Le détail complet des coûts est disponible dans les tableaux estimatifs pages 308 à 311.



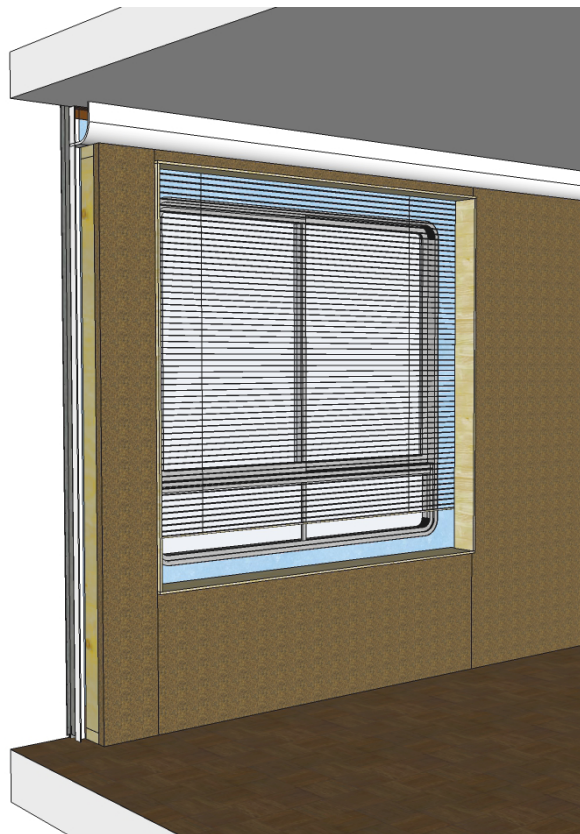
Montage du store et pré-cadre du prototype double façade
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Store et pré-cadre du prototype double façade - Maquette numérique
© Mathilde Padilla, archipat, 2019



Pose de l'isolant thermique, une couche de 10 cm + frein vapeur + 4 cm
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Isolant thermique fibre de bois - Maquette numérique
© Mathilde Padilla, archipat, 2019

de l'immeuble est déjà équipé d'une double fenêtre en aluminium avec un doublage en polystyrène d'environ sept centimètres qui permettra de tester l'hypothèse en conditions réelles. Cependant, ce doublage et cette menuiserie ont des performances inférieures aux équipements et matériaux que nous envisagions.

Les parties pleines

Pour l'élaboration, la fabrication et le montage *in situ* de l'ossature bois, nous collaborons à nouveau avec les compagnons du devoir charpentiers de Villefontaine. A l'expérience du prototype précédent, nous nous adjoignons une nouvelle fois les conseils d'Olivier Mognon de l'entreprise Steico et choisissons de mettre en œuvre, sur ce prototype, une première couche d'isolant de 10 cm semi-rigide entre les montants de l'ossature bois, à laquelle s'ajoute une seconde couche continue de fibre de bois rigide de 4 cm d'épaisseur. Nous avons ensuite travaillé avec les compagnons pour concevoir le précadre rectangulaire servant à accueillir la double fenêtre intérieure et la réservation pour intégrer le store intermédiaire. Une fois ces éléments dessinés et validés, les compagnons sont chargés de leur préfabrication aux Grands Ateliers puis de leur installation dans la loge du gardien. Ils posent alors l'ossature, l'isolant, la membrane hygro-régulable, le précadre de la menuiserie et le store. La finition en plaque de Fermacell est posée par l'entreprise Fermacell elle-même qui en profite pour former l'équipe de recherche à la pose de ce matériau innovant.

L'occultation

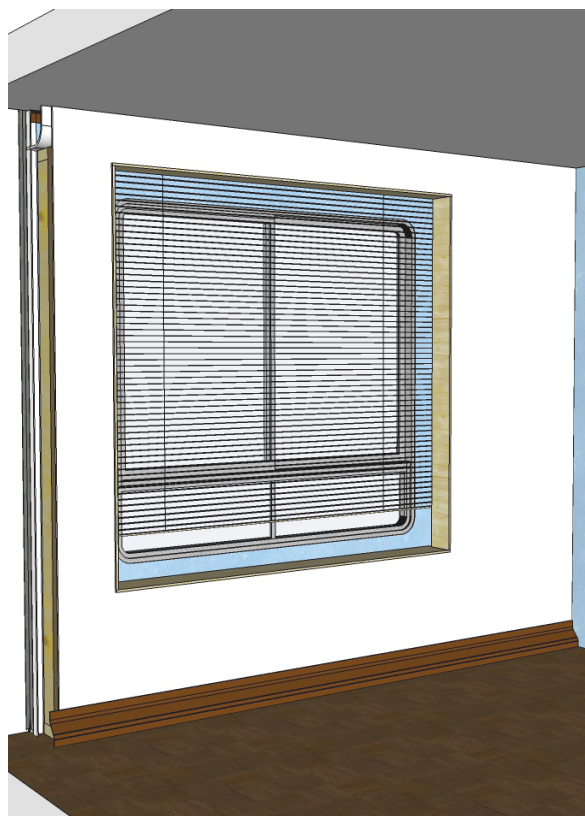
Sur ce prototype, nous avons installé un store vénitien à lames, en bois, positionné entre les deux fenêtres, permettant une meilleure protection qu'un store intérieur. Le store vénitien, avec ses lames orientables, offre également plus de possibilités de modulation des ambiances lumineuses. Il est de mêmes dimensions que la double fenêtre intérieure, permettant de la protéger en totalité. Nous avons testé ici un dispositif du commerce à cordelette, mais le store aura besoin d'être amélioré avec une commande sur la paroi intérieure de la façade pour permettre sa manipulation même lorsque la fenêtre intérieure sera fermée.

b. Mise en œuvre

Comme pour le prototype précédent, la notice réalisée par les compagnons a permis de faciliter la mise en œuvre *in situ*. Les ossatures bois et les panneaux de fibre de bois semi-rigides de 10 cm positionnés entre les montants d'ossature ont été prédécoupés aux bonnes dimensions aux Grands Ateliers. En revanche, la surcouche d'isolant de 4 cm a été découpée sur place pour



Pose de l'isolant phonique Fermacell
© Sabine Serrad, 28 janvier 2020



Isolant phonique Fermacell et finitions - Maquette numérique
© Mathilde Padilla, archipat, 2019



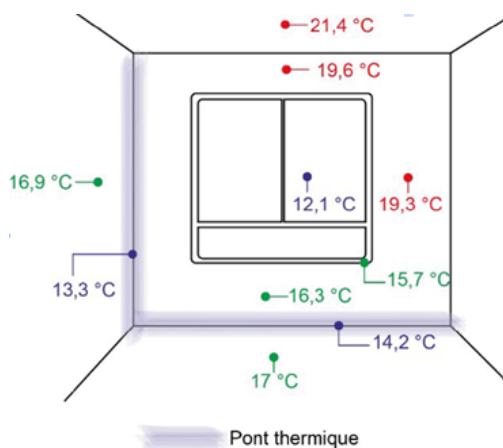
Pose de l'isolant phonique Fermacell
© Sabine Serrad, 28 janvier 2020

s'adapter parfaitement à l'appartement une fois l'ossature installée. La fibre de bois s'est avérée relativement simple à découper. L'isolation en deux couches rallonge légèrement le temps de pose du prototype par rapport à la configuration précédente. En revanche, la manutention des éléments d'ossature est plus aisée, ceux-ci étant plus légers que les montants de 14,5 cm. Le Fermacell, contrairement à ce que nous aurions pu penser, a permis une pose plus propre que les panneaux Knauf, avec moins de poussière lors des coupes. Sa pose est légèrement plus longue, nécessitant la protection des cloisons périphériques, des sols et plafonds, ainsi que la réalisation de bande à joints puis d'un ratissage. Elle permet cependant une finition lisse plus propre que les panneaux Knauf dont l'aspect évoque celui des immeubles tertiaires ou des cloisons de bungalows. Enfin, les partenariats avec les fabricants de menuiseries n'ayant pas abouti, nous n'avons pas pu les installer sur les doublages intérieurs, ce qui n'a pas empêché de tester le reste des composants du prototype.

c. Performances : les tests *in situ*

Thermiques

Dans un premier temps, le bureau TRIBU a effectué des mesures thermiques sur le prototype. Elles ont été réalisées le même jour et dans les mêmes conditions que sur le prototype précédent, et donnent des résultats très similaires. Ces mesures ont permis de vérifier le maintien d'une température confortable sur les parois intérieures de la façade et de vérifier si les ponts thermiques existants ont pu être comblés. La température d'air de la pièce dans laquelle s'intègre le prototype oscillait entre 16 et 18°C.



Les températures de surface mesurées sur le prototype sont détaillées dans le schéma ci-contre. On retrouve les ponts thermiques au niveau des dalles et refends, le gradient de température dû au rayonnement du plancher chauffant de l'étage supérieur, l'allège avec la température de surface la plus faible, et la différence de 10°C entre la température de paroi intérieure et celle mesurée à l'extérieur, signe de l'incidence positive du

doublage par l'intérieur. Pour le vérifier, le bureau TRIBU a décidé de comparer ces températures de surfaces avec celles du panneau de cuisine, côté sud de la loge, non équipé de prototype. Les ponts thermiques y sont plus présents, mais les températures de surface sont quasi équivalentes

(peut-être du fait de l'ensoleillement supérieur au sud également ...). Il est donc difficile d'affirmer l'intérêt réel du prototype sur la base de ces mesures réalisées avec des températures extérieures trop douces. L'équipe décide alors de reprogrammer des mesures le 22 décembre 2020 à 8h pour obtenir des températures extérieures plus fraîches. Malheureusement, malgré les prédictions météorologiques pessimistes la journée fut encore douce avec une température extérieure de 10,3°C. Même si les différences de températures mesurées mettent en avant une performance légèrement meilleure pour les prototypes, les mesures de températures de surface ne permettent pas de conclure définitivement sur la performance thermique d'hiver des prototypes.

Murs / Températures	Temp. air intérieure	Temp. surf intérieure	Temp. surf extérieure	Temp. air extérieure	Différence de température intérieur / extérieur
Chambres (prototype)	16°C	15,5°C	8,2°C	10,3°C	7,3°C
Cuisines (Existant)		15°C	8,7°C		6,3°C

Plusieurs éléments ont sensiblement modifié les mesures comme la faible différence entre la température intérieure du logement et la température extérieure, due à une saison particulièrement douce, et la discontinuité de l'enveloppe thermique causée par le manque d'amélioration au niveau des fenêtres. Dans ces conditions, nous aurions dû effectuer de nouvelles mesures une fois les prototypes de fenêtres installés, et lors d'une journée plus froide. Malheureusement, ces mesures n'ont pu être réalisées dans le temps imparti à cette thèse. Les simulations thermiques dynamiques réalisées par le bureau TRIBU permettent néanmoins de mettre en évidence la nécessité de doubler la façade.

Enfin, l'effet de paroi froide de la fenêtre est clairement mis en évidence par la caméra thermique : environ 12°C pour la température du vitrage (soit quasiment la température extérieure). Concernant la double-fenêtre, les mesures réalisées en été chez l'habitante qui dispose d'une double fenêtre intérieure et d'un doublage isolant en polystyrène d'environ 7 cm, permettent de constater l'efficacité de la double fenêtre en confort thermique d'été. En effet, les mesures soulignent une différence de températures de surface de 2,4°C à 10,1°C entre la fenêtre d'origine et la double fenêtre intérieure ce qui montre sa capacité à retenir la chaleur. On peut imaginer que cette fenêtre puisse permettre un isolement équivalent au froid en hiver.

Acoustique

Le prototype n'ayant pu être finalisé au niveau des menuiseries, le bureau d'études LASA a

réalisé une modélisation de son comportement acoustique¹⁵². Les parties pleines du panneau intérieur, composées d'une ossature bois, d'un isolant fibre de bois de 10 cm inséré entre les montants de l'ossature, d'une plaque supplémentaire de fibre de bois de 4 cm et d'une plaque de Fermacell, permettent d'atteindre un affaiblissement acoustique de 56 dB¹⁵³, supérieur de 4 dB par rapport au prototype précédent. Concernant la menuiserie, l'objectif d'isolement global de la paroi fixé par le LASA lors des diagnostics est de 32 dB¹⁵⁴. Il est donc important que les nouvelles menuiseries double vitrage atteignent au moins ces performances, ce qui permettra de garantir la performance globale du panneau ainsi modifié. Sans la double fenêtre, le prototype présente un isolement mesuré *in situ* de 25 dB¹⁵⁵, soit seulement 6 dB de plus que le panneau d'origine, et 6 dB de moins que l'hypothèse précédente. Cet écart s'explique par une meilleure isolation entre la paroi d'origine et la paroi pleine du premier prototype grâce à l'ouverture créée dans le panneau qui épouse parfaitement les limites de la fenêtre d'origine, réduisant ainsi les ponts phoniques. L'isolement du prototype dans son état actuel est insuffisant pour garantir le confort des usagers. Cette mesure permet de confirmer l'importance d'intervenir sur les menuiseries de l'immeuble Les Cèdres, véritables ponts thermiques et phoniques des façades. Sans avoir pu installer la double fenêtre, connaître la capacité d'isolement du prototype complet est relativement difficile. En effet, il demeure extrêmement délicat de modéliser les fuites d'air aux jonctions entre la menuiserie et les parties pleines du prototype, ainsi que les fuites au niveau des entrées d'air de ventilation naturelle. Néanmoins, il est possible de réaliser une approche théorique en négligeant ces entrées d'air. Le LASA estime alors qu'avec une menuiserie 4/16/4 du commerce justifiant d'une capacité d'affaiblissement acoustique de l'ordre de 28 dB, le doublage pourrait permettre d'atteindre un isolement acoustique au-delà de 40 dB¹⁵⁶. Dans ce cas, même en considérant les possibles fuites d'air évoquées précédemment, il semble que le niveau d'isolement acoustique de 32 dB fenêtres fermées soit facilement atteignable. Il sera néanmoins important de gérer les jonctions et entrées d'air de la façade pour réduire les fuites et atteindre le niveau de performance requis, et de veiller à conserver l'équilibre des ambiances intérieures entre les appartements.

152. Le rapport complet de modélisation du LASA est disponible en annexe 16.

153. L'affaiblissement est la valeur R_w+C_{tr} modélisée.

154. L'isolement est une valeur d'isolement réelle *in situ* $D_{nT,a,tr}$.

155. Valeur d'isolement réelle *in situ* $D_{nT,a,tr}$.

156. Valeur d'isolement réelle *in situ* $D_{nT,a,tr}$.

d. Appréciation

Après l'installation du prototype, quelques habitants, notamment les membres du conseil syndical et de l'association habitante, ont pu se rendre dans la loge pour l'observer et donner leurs premiers avis. Certains se sont étonnés de l'épaisseur du doublage demandant s'il pouvait être affiné, d'autres ont regretté le cadre rectangulaire et préfèrent une option avec les angles arrondis à l'intérieur. D'autres habitants encore ont apprécié le store à lames orientables permettant une occultation complète comme le passage total de la lumière et autorisant des modulations lumineuses intermédiaires plus nombreuses. D'autres enfin trouvent ces systèmes difficiles à manipuler, et souhaiteraient des stores intermédiaires motorisés. L'aspect des stores vénitiens depuis l'extérieur est également plus impactant que les stores toiles unis. Pour recueillir les avis de l'ensemble des habitants de manière plus objective, nous avons initialement prévu d'organiser des visites des prototypes par petits groupes d'habitants pour obtenir leurs témoignages spontanés. Malheureusement, les contraintes sanitaires n'ont pu rendre possible ces regroupements. Dans le cadre de la poursuite des travaux avec la copropriété, ces visites pourraient être organisées. Dans l'attente, les premières appréciations des habitants ont permis de valider la nécessité d'affiner la double façade et de prévoir un cadre intérieur aux angles arrondis comme celui développé dans le prototype « restauration double vitrage »¹⁵⁷. Pour réduire l'épaisseur du doublage, il y a deux solutions possibles. La première consiste à réduire la performance de celui-ci, qui est assez élevée au vu des résultats des tests, et passer de 14,5 cm de fibre de bois à 10 par exemple. Néanmoins, il est important de vérifier que la baisse de performance thermique n'engendre pas la perte d'une subvention qui pourrait aider les copropriétaires à financer leur projet, auquel cas cette perte de surface devrait être réévaluée. L'autre option consiste à remplacer l'isolant biosourcé par un isolant plus mince à performances égales tel que le polystyrène qui aura le même niveau de performances que la fibre de bois de 14,5 cm avec 10 cm d'épaisseur. Là encore, ce changement de matériau doit être précisément évalué au regard de l'importance d'utiliser des matières durables pour préserver l'environnement, ce qui constitue, de notre point de vue, une priorité. De plus, certaines subventions peuvent également dépendre de l'emploi de matériaux biosourcés. Tous ces éléments sont à prendre en compte avant toutes prises de décisions et doivent faire l'objet de discussions avec les copropriétaires et l'économiste du projet.

157. Voir photographie page 276.

Concernant la double fenêtre, celle-ci n'ayant pu être installée dans la loge du gardien, les habitants n'ont pu l'observer sur les prototypes. Cependant, l'habitante de l'appartement doté de doubles fenêtres sur l'ensemble de sa façade sud et sur une fenêtre de la façade nord a autorisé les copropriétaires à venir tester son dispositif. Il s'agit de doubles fenêtres en aluminium, de dimensions légèrement supérieures à la menuiserie d'origine, permettant d'en apercevoir les angles arrondis depuis l'intérieur. Ces doubles fenêtres sont installées sur un doublage isolant polystyrène d'environ 7 cm et d'une finition BA13 peinte portant l'ensemble du doublage à 10 cm d'épaisseur. La propriétaire de l'appartement se dit particulièrement satisfaite de ces doubles fenêtres qui lui permettent d'avoir un excellent isolement acoustique par rapport à la rue de la Favorite. Elle estime aussi que la double fenêtre lui permet une meilleure isolation thermique. Au nord, toutes ses chambres n'en étant pas équipées, elle note une différence de confort entre la chambre ayant la double fenêtre et les trois autres dotées de fenêtres à double vitrage classiques. La propriétaire juge cet équipement particulièrement nécessaire d'autant que la chambre équipée se situe au-dessus du passage d'accès des véhicules de la copropriété pour gagner les garages. Le seul point négatif soulevé par l'habitante concernant les doubles fenêtres est la difficulté pour nettoyer la face extérieure de l'ensemble des carreaux. Elle a néanmoins trouvé un système avec des aimants, lui permettant de nettoyer ces vitrages plus facilement. L'habitante relativise cette contrainte en comparaison du gain de confort apporté¹⁵⁸.

Nous avons également interrogé les habitants venus visiter cet appartement pour recueillir leurs impressions¹⁵⁹. Les avis sont mitigés. Dans un premier temps, les habitants ayant déjà remplacés leurs fenêtres d'origine par des fenêtres à double vitrage acceptent peu l'idée de devoir réinvestir dans deux nouvelles fenêtres. Ensuite, bien qu'ils comprennent et partagent l'intérêt architectural d'un tel système, qui permettrait de retrouver l'aspect de la façade d'origine, certains habitants ont du mal à envisager le doublage complet de la façade. En effet, certains propriétaires apprécient particulièrement la finesse des façades Prouvé et regrettent la création d'une coupure trop importante par rapport à l'extérieur, bien que celle-ci offre un isolement phonique plus que satisfaisant. Il est vrai que les façades légères permettent de conserver un rapport privilégié à l'extérieur qui peut être aussi appréciable qu'inconfortable selon les ressentis des habitants. Bien qu'ils reconnaissent la

158. Voir les réponses de l'entretien de l'habitante en annexe 14.

159. Voir la grille d'entretiens en annexe 15.

nécessité d'améliorer l'isolation thermique et phonique de leurs façades, certains habitants souhaiteraient trouver des solutions à même de conserver la finesse des parois. La solution de double façade engendre nécessairement des épaisseurs importantes pour servir d'appui à la nouvelle fenêtre et crée, de fait, un deuxième filtre par rapport à l'extérieur qui semble une solution particulièrement appréciable pour les uns et dommageable pour d'autres¹⁶⁰. De notre point de vue, cette solution constitue, pour le moment, la seule piste permettant de répondre à l'ensemble des enjeux. Compte tenu des avis divergents des copropriétaires, il semblerait pertinent de poursuivre le développement en réfléchissant à des solutions « à la carte ». Les habitants ont néanmoins tous conscience de l'intérêt de redonner une image homogène à leur immeuble, en retrouvant un aspect proche de l'origine tout en améliorant leur confort.

e. Économie

Nous avons également fait estimer le coût des composants de ce prototype par le cabinet Denizou. Le doublage isolant thermique en deux couches et son ossature a été estimé à un coût équivalent au doublage thermique précédent, soit 424 000 € HT pour l'ensemble de l'immeuble. L'installation des panneaux de Fermacell a été estimée à 20 000 € HT soit 12 000 € de moins que les panneaux Knauf contrapanel. Sur ce prototype, le travail sur les menuiseries est à réaliser en deux temps. Premièrement, la restauration ou la restitution des menuiseries d'origine, permettant de retrouver l'aspect initial des façades et estimée à 439 000 € HT. A cela s'ajoute le coût des doubles fenêtres de 269 000 € HT si elles sont en bois, contre 337 000 € HT en aluminium. A la demande des habitants et pour favoriser la conservation d'un aspect lisse sur les façades de l'immeuble, nous avons chiffré sur cette option un store en toile motorisé intermédiaire dont le coût rapporté à l'ensemble de l'immeuble est estimé à 89 000 € HT. Les stores vénitiens manuels présentaient un coût équivalent aux stores toiles manuels du prototype précédent. L'investissement global nécessaire à la mise en place de cette proposition est donc de 1 241 000 € HT pour des doubles fenêtres en bois et 1 309 000 € HT pour des doubles fenêtres en aluminium, soit un coût rapporté à un T4 de 20 682 € HT pour la première option et 21 816 € HT pour la seconde.

160. Voir les réponses aux entretiens de l'ensemble des habitants interrogés en annexe 15.

3 – Prototype de store extérieur et protection solaire

a. Composition du prototype

La spécificité de l'installation d'un store toile sur une façade légère et l'enjeu de son aspect extérieur vis-à-vis de la valeur architecturale et patrimoniale des façades Prouvé ont rendu évidente la réalisation d'un prototype. Dans un premier temps, afin d'assurer la meilleure protection solaire possible, différentes toiles ont été étudiées avec l'entreprise Serge Ferrari fabricant de toiles pour la construction et l'ameublement. L'équipe souhaitait une toile qui ait à la fois un bon indice de protection solaire et une capacité à filtrer l'éblouissement dans les appartements, sans dégrader la vue vers l'extérieur. En effet, en période estivale, les habitants de l'immeuble risquent de baisser leurs stores toute la journée. Il était dès lors important que leur appartement puisse malgré tout bénéficier de lumière naturelle et que les habitants puissent jouir de la vue sur ces longues périodes d'été. La toile Ferrari la plus couramment utilisée en stores extérieurs est la toile Soltis 92. Il s'agit d'une toile micro-perforée qui bloque jusqu'à 97 % de la chaleur. C'est la toile possédant la meilleure performance thermique de la gamme Serge Ferrari. Néanmoins, après l'avoir visualisée en showroom, nous l'avons jugée trop opaque. Les experts de l'entreprise Ferrari nous ont alors orienté vers la toile Soltis 86, bien plus transparente, qui préserve davantage la vue vers l'extérieur et conserve 28 % de transmission de lumière naturelle. En revanche, en observant ses caractéristiques solaires, le bureau TRIBU a averti l'équipe quant à ses performances, trop faibles pour le cas de l'immeuble Les Cèdres. L'entreprise Ferrari propose alors une solution intermédiaire à l'équipe avec la toile Soltis 88, qui permet à la fois de conserver une bonne visibilité vers l'extérieur tout en bloquant 88 % de la chaleur apportée par les rayonnements solaires. En observant la toile au showroom de l'entreprise, nous avons validé cette option.

Pour la teinte de la toile, nous nous sommes d'abord orientés vers un gris proche de celui des panneaux en aluminium pour intégrer le prototype le plus discrètement possible sur la façade. La teinte « gris galet » disponible dans la gamme a été sélectionnée. Néanmoins, nous nous sommes interrogés attentivement sur la couleur de la toile. Doit-elle se fondre dans la façade ? Doit-elle au contraire se distinguer par sa colorimétrie ? Sachant qu'une toile grise ne sera jamais exactement identique à la teinte de l'aluminium des panneaux qui changent de nuances selon la luminosité. Mais quelle autre couleur choisir ? Les couleurs vives pouvaient permettre de rompre avec l'harmonie de la façade, mais apportaient un langage peut être trop

différent de l'existant. Les stores doivent-ils être tous de la même couleur ou une polychromie peut-elle s'envisager ? A ce stade, nous avons décidé de laisser la question en suspens et de reprendre ces interrogations après avoir pu observer le prototype de store sur la façade. L'amélioration du confort thermique aurait pu cependant motiver le choix, les teintes claires permettant de renvoyer davantage les rayonnements solaires vers l'extérieur. En revanche, les teintes foncées favorisent la vue de l'intérieur vers l'extérieur. Il est également possible d'avoir une teinte différente sur chaque face de la toile : une teinte claire à l'extérieur et une teinte foncée sur la face intérieure.

Outre les questions de toiles, nous avons travaillé sur les autres composants du store : les rails ou câbles, l'enrouleur ou coffre, le système motorisé et les fixations à la façade ; autant d'éléments techniques qui ne pouvaient être appréhendés sans l'accompagnement de professionnels. C'est ainsi qu'avec l'appui de la chaire Habitat du Futur et des Grands Ateliers, nous nous sommes rapprochés de l'un des fabricants de stores partenaires de Ferrari, l'entreprise Prodotti France, avec qui une collaboration féconde s'est engagée pour élaborer un modèle de store adapté à l'immeuble Les Cèdres.

Dès nos premières esquisses, nous avons imaginé un store léger, guidé par câbles et sans coffre de protection autour de l'enrouleur pour alléger au maximum le dessin de cet élément rapporté en façade. Lors de notre premier rendez-vous avec l'entreprise Prodotti France et son gérant Cédric Dalard, nous leur avons présenté ces esquisses. Rapidement, Cédric Dalard nous a souligné le risque d'arrachement d'un tel système au regard des rafales de vent auxquelles l'immeuble peut être exposé. Il explique alors qu'un immeuble de neuf étages a besoin d'un système plus sécurisé sur lequel les toiles des stores doivent être absolument tendues pour éviter l'engouffrement du vent et l'arrachement. Cédric Dalard propose donc un modèle de stores électriques à rails « zip », dans lesquels la toile est pincée. Concernant l'enrouleur et le moteur, il préconise de les protéger d'un coffre pouvant assurer une meilleure résistance aux intempéries, aux agressions extérieures, notamment celles des oiseaux, et permettant de conserver la toile propre plus longtemps. La prise en compte de ces modifications alourdissant considérablement l'esquisse du store, nous avons réfléchi à intégrer ce nouveau modèle en repassant par une phase de dessin, et au fur et à mesure des échanges avec Cédric Dalard, l'hypothèse de store extérieur s'est affinée. Pour éviter la saillie du coffre sur la façade et conserver son caractère lisse, le store sera posé à l'envers, en porte à faux de la façade. Les rails, la barre de charge et le coffre composent un cadre à la toile, qui reprend les dimensions

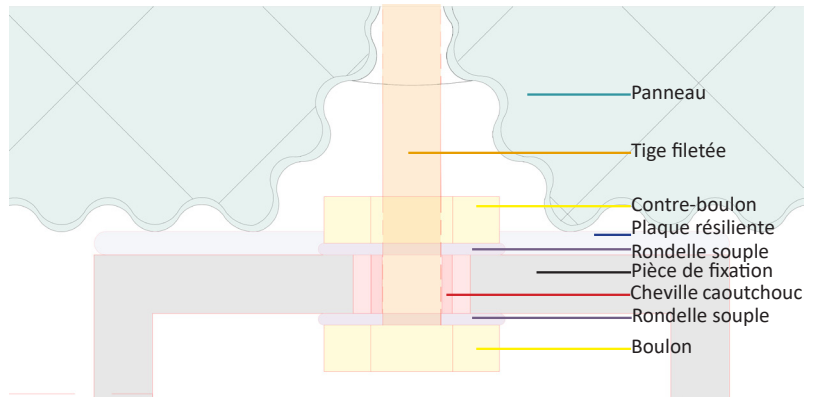
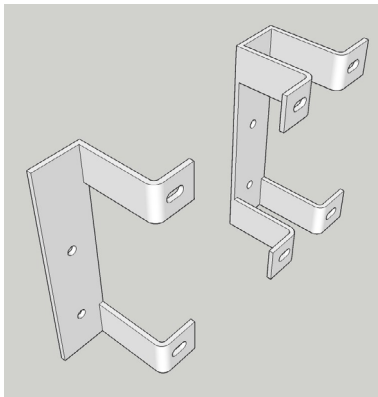
des panneaux d'origine. Pour fixer les stores, nous avons conçu des platines de fixation sur-mesure, avec l'aval de Cédric Dalard. Celles-ci s'accrochent à la façade au niveau des dalles, les vis passant dans les joints verticaux entre panneaux. Ensuite, les rails du store sont fixés à ces platines. Pour éviter les vibrations entre le store et la façade, mais aussi les transmissions des bruits de moteur du store à l'intérieur des logements, nous avons étudié, avec le bureau d'étude LASA, une solution de rondelles et plaques souples visant à isoler la platine du panneau Prouvé en aluminium et à amortir les vibrations.

b. Mise en œuvre

Une fois ces détails réglés, la mise en œuvre du prototype *in situ* a été étudiée. L'installation étant particulière et nécessitant la plus grande attention, Cédric Dalard recommande une de ses entreprises partenaires, spécialisée dans la pose de ce type de stores : l'entreprise Asymptote. Nous rencontrons alors son gérant, Jérémie Chazotte, dans les locaux de Prodotti France. Ensemble, nous avons revu le protocole de pose du store et la date de chantier est arrêtée au 27 novembre 2019. La pose du store nécessite l'utilisation d'une nacelle. Pour la pose des stores sur l'ensemble de la façade, une nacelle volante devra être installée en toiture, la nacelle à bras ne pouvant accéder à l'ensemble de la façade sud, et un échafaudage ne pouvant être accroché sur une façade légère. Nous profitons de la présence d'une nacelle pour faire déposer les bavettes et couvre-joints d'un panneau, et poser un nouveau joint souple dans les joints creux entre panneaux, par l'entreprise KCM. Asymptote et Prodotti installent ensuite le store sur la façade de l'immeuble au deuxième étage de l'allée C, sur le panneau d'une habitante de l'immeuble volontaire pour expérimenter le store. La pose inédite, en porte-à-faux et sur seulement quatre pattes de fixation au niveau des dalles, nécessite minutie et attention, mais reste assez rapide. Chaque pièce de fixation permet de fixer quatre panneaux, nécessitant un réglage parfait pour assembler correctement l'ensemble des stores. Le travail collaboratif mené pour l'élaboration du prototype de store nous a permis de concevoir une solution adaptée à la fois aux contraintes architecturales et patrimoniales de l'immeuble, mais également à ses contraintes techniques. De fait, seuls les échanges avec les professionnels peuvent permettre d'atteindre ces résultats.

c. Performances : les tests *in situ*

Une fois le prototype installé, nous avons demandé à l'habitante volontaire de tester l'utilisation du store. Dès les premières journées ensoleillées du printemps, celle-ci a noté une

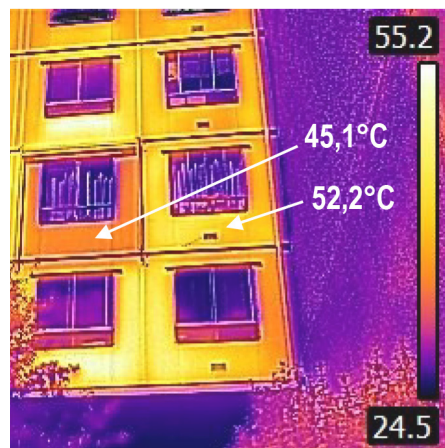
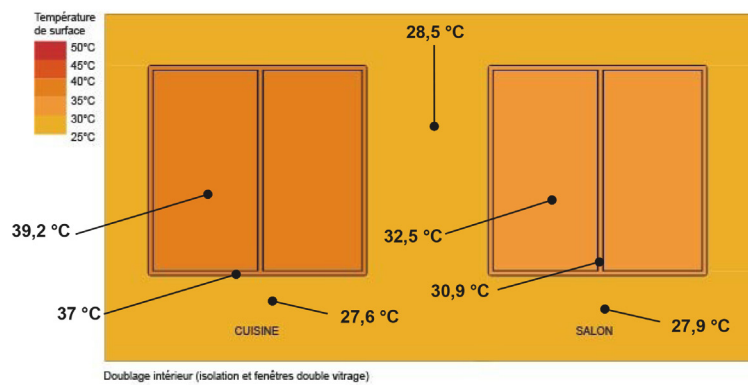
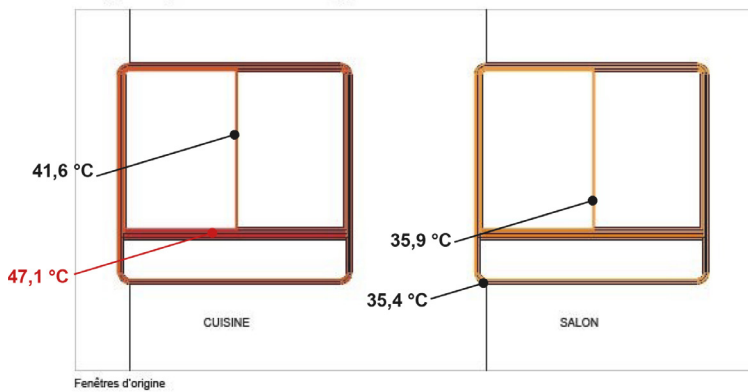


Dessins des pièces de fixation des stores
 © Equipe RFL, 2019



Pose du prototype de store
 © Mathilde Padilla, 2019

Prototype de store
 © Mathilde Padilla, 2019



Températures de surfaces - prototype de store extérieur
 © TRIBU, 27 août 2020

amélioration de son confort. Pour le vérifier, nous avons réalisé des mesures le bureau d'étude TRIBU en période estivale ; demandant à l'habitante de baisser le store dès le matin¹⁶¹. Si les mesures de températures intérieures effectuées sont à nuancer, puisqu'un seul des panneaux sud du logement a été équipé de stores, cette disposition a néanmoins permis au bureau d'études de réaliser des mesures de températures de surfaces sur chacun des panneaux et de les comparer. Ces mesures ont permis de vérifier le maintien d'une température confortable à l'intérieur du logement, de mesurer l'incidence de transmission de chaleur sur la paroi et le vitrage en mesurant les températures de surface en extérieur et intérieur du logement, en comparant les mesures réalisées sur le panneau équipé de store et sur le panneau voisin sans store. L'objectif de ces mesures était d'analyser le gain de confort apporté par les stores lors d'une journée ensoleillée. Il est important de noter que le logement de l'habitante volontaire a déjà fait l'objet de travaux de rénovation avec une isolation par l'intérieur (d'environ sept centimètres de polystyrène) et l'installation de doubles fenêtres intérieures à double vitrage à trois centimètres de la fenêtre d'origine Prouvé¹⁶².

Le bureau TRIBU a commencé par mesurer les températures de surface de la double fenêtre intérieure. La température de surface de la double fenêtre de la cuisine, non équipée de store, est de 39,2°C sur le vitrage et 37°C sur la menuiserie. Sur la double fenêtre protégée par le store extérieur, la température du vitrage est de 32,5°C tandis que la température de la menuiserie est de 30,9°C. Le store extérieur permet donc d'abaisser la température de surface de la double fenêtre de 6,1°C à 6,7°C. L'équipe mesure ensuite les températures de surface de la fenêtre d'origine qui oscille entre 41,6°C et 47,1°C sur la fenêtre de la cuisine, et entre 35,4°C et 35,9°C sur la fenêtre du salon protégée par le store. Le store permet donc de réduire la température de surface de la fenêtre d'origine de 5,7°C à 11,7°C. Ces mesures démontrent l'efficacité du store pour abaisser les températures de surface des fenêtres et réduire le rayonnement de la chaleur depuis la paroi vers l'appartement. En revanche, la mesure de température de surface des parties pleines des deux panneaux a donné des températures pratiquement identiques (27,6°C et 27,9°C). Le store ne semble pas modifier la température des parois opaques intérieures. Pour l'expliquer, on peut supposer que le niveau d'isolation de la paroi est suffisant pour le confort d'été, et que le doublage réalisé dans cet appartement permet d'éviter la transmission de chaleur entre la surface extérieure du

161. Le rapport complet d'analyse des prototypes de TRIBU est disponible en annexe 13.

162. Les mesures sont réalisées le 27 août 2020 entre 14h et 15h lors d'une journée particulièrement ensoleillée.

panneau et sa surface intérieure. La mesure de température de surface extérieure démontre cependant une différence de 6,1°C entre le panneau protégé par le store (45,1°C) et celui sans protection (52,2°C), ce qui montre que le store possède assurément une incidence positive sur la température de surface intérieure des parties pleines du panneau quand celles-ci ne sont pas isolées.

Enfin, le bureau TRIBU a mesuré la température « globe » à l'intérieur du logement, devant les deux panneaux. La température globe permet de prendre en compte, non seulement la température d'air du logement, mais aussi le taux d'humidité et le rayonnement solaire. La température globe et le seul indicateur de température à prendre en compte l'impact de l'ensoleillement. La température globe du panneau protégé par le store est de 28,6°C et la température globe du panneau de cuisine non protégé est de 37,4°C pour une température d'air intérieure de 27°C. Le store permet de réduire la température globe du logement de 8,8°C. En prenant en compte cette température globe, ainsi que la vitesse de circulation de l'air et d'autres indices de confort normalisés, le bureau TRIBU est parvenu à calculer la température effective du logement, qui est équivalente au ressenti humain. Celle-ci est de 30,1°C pour le panneau non protégé par le store, contre 25,9°C pour le panneau équipé du store extérieur. Le store extérieur permet donc de réduire de 4,2°C la température effective des logements et de leur offrir un confort thermique d'été suffisant en passant sous le seuil d'inconfort fixé à 28°C. L'ensemble de ces mesures consacrent l'inégalable efficacité du store extérieur.

d. Appréciation

Après plus d'un an d'utilisation, l'habitante volontaire pour expérimenter le store extérieur exprime sa satisfaction et confirme le gain de confort obtenu¹⁶³. Après une première année dans l'immeuble sans le store, elle avait noté une surchauffe de son logement dès le début du printemps. L'année suivante, lorsque le store a été installé, l'habitante dit avoir ressenti une amélioration de son confort même lors des forts ensoleillements. Le prototype n'a été posé que sur la fenêtre du salon et l'habitante témoigne d'une différence importante de ressenti lorsqu'elle se situe derrière la fenêtre protégée ou derrière celle de sa cuisine qui ne l'est pas. Outre l'amélioration du confort thermique, elle apprécie également la luminosité de l'appartement et les qualités de transparence de la toile du store. Elle note que son opacité diminue l'éblouissement, voire

.....
163. L'entretien complet de cette habitante est disponible en annexe 14.

le supprime, tout en conservant un éclairage naturel satisfaisant. L'habitante utilise le store systématiquement lors des journées ensoleillées du printemps jusqu'au début de l'automne. Elle ne le laisse levé que lors des journées froides pour profiter des apports du rayonnement solaire. En mi-saison, elle préfère l'utiliser fenêtre ouverte, pour ventiler son logement sans que le soleil ne pénètre l'appartement. Quant à l'aspect du store, l'habitante trouve son format adapté mais regrette la « tristesse » du gris et préférerait une face blanche côté intérieur de son appartement pour illuminer encore plus la pièce et serait en accord avec une proposition polychrome qui égayerait la façade. Les autres habitants ont exprimé des avis majoritairement positifs sur l'aspect du store, couvrant l'ensemble du panneau, bien conscients du besoin incontournable de protection solaire de leur immeuble¹⁶⁴, et ce malgré des finitions de prototype moins élaborées que celles du store final. Certains s'interrogent sur la teinte des toiles et expriment le souhait d'apporter de la couleur à leur immeuble et de se servir des stores pour lui donner une image plus contemporaine qui permettrait de le revaloriser. Ce sentiment est partagé par le conseil scientifique et l'ABF qui trouvent le choix du gris peu satisfaisant. En effet, la couleur actuelle du store est beaucoup plus terne que le gris de l'aluminium et selon eux, n'importe quelle couleur unie ne saurait refléter les variations de teintes de l'aluminium de la façade qui le rendent quasi immatériel et lui permettent de se fondre dans le ciel. Nous proposons alors une polychromie reprenant les teintes de l'environnement proche de l'immeuble, reflétées par les panneaux en aluminium. Plusieurs options ont été élaborées pour ouvrir la discussion avec les copropriétaires. A l'initiative de l'équipe de recherche et de l'habitante volontaire, plusieurs autres copropriétaires sont venus tester le prototype du store dans son logement. Lors de ces visites, les habitants concernés ont pu manipuler le store à l'aide de la commande électrique et observer ses caractéristiques – la toile (sa couleur, sa transparence), la motorisation, le système électrique – et son incidence sur le confort – la luminosité, l'ensoleillement, la chaleur. A l'issue de ces visites, les habitants ont ensuite été interrogés par l'équipe pour recueillir leurs observations, avis et ressentis. Globalement, les habitants sont satisfaits par le filtrage de la toile qui permet un juste milieu entre une protection solaire et une luminosité adéquate permettant d'éviter l'éblouissement et de conserver la vue vers l'extérieur. Tous trouvent la manipulation du store électrique facile et insonore, reconnaissant l'utilité d'un système de secours pour remonter les stores en cas de rafales de vent. Concernant l'utilisation qu'ils pourraient en faire, les habitants admettent penser avoir un besoin quotidien de protection solaire durant les périodes estivales.

164. Voir les réponses des habitants en annexe 15.



Façade équipée des stores gris galets
© Équipe RFL, 2019



Façade équipée des stores polychromes
© Équipe RFL, 2019

Cette fréquence d'utilisation est confirmée par l'habitante volontaire au cours de l'été 2020. Certains habitants estiment pouvoir également se servir des stores durant les intersaisons pour se protéger de l'éblouissement comme de la chaleur lors des soleils rasants. Malgré ces avis positifs sur l'aspect du store, son efficacité et son utilité¹⁶⁵, les copropriétaires expriment leur inquiétude quant au coût d'une telle installation.

e. Économie

Pour répondre à leurs interrogations, l'équipe demande à l'économiste du projet de chiffrer le coût de fourniture et de pose des cent quatre-vingts stores, ainsi que le budget annuel pour leur maintenance. Le coût d'un store toile extérieur motorisé, fourni et posé, est estimé à 1 520 € HT, soit 4 560 € HT pour équiper toute la façade sud d'un T4, et 273 000 € HT pour l'ensemble de la façade sud, auxquels s'ajoutent environ 2 000 € HT de maintenance annuelle et 35 000 € HT pour l'installation d'une nacelle en toiture servant à la fois pour l'installation des stores, le nettoyage et la réfection des joints de la façade et pour la maintenance régulière des stores une fois posés. Le coût d'investissement initial est donc de 308 000 € HT pour l'ensemble de l'immeuble avec la nacelle et de 5 133 € HT pour un T4.

Ces chiffres particulièrement raisonnables montrent qu'avec un budget limité, cette hypothèse permet d'apporter une réelle solution aux problématiques de confort thermique et lumineux d'été de l'immeuble et, plus généralement, des façades légères exposées aux rayonnements solaires.

4 – Prototype de rideaux acoustiques : protection phonique et ventilation nocturne

a. Composition du prototype

Une fois les tests des deux hypothèses de doublage isolant réalisés, les rideaux acoustiques sont installés sur les prototypes de la loge du gardien pour mesurer leur efficacité. Le rideau Moondream est fixé sur le prototype restauration double vitrage. La tringle incurvée est posée sur le doublage, vingt centimètres au-dessus de la fenêtre pour l'isoler. De même, la tringle est légèrement plus large que la fenêtre pour que les rideaux la couvrent en totalité, celle-ci étant le point phonique le plus faible du panneau. Le rail des rideaux Showtex est installé au plafond

165. Voir l'ensemble des réponses des habitants interrogés en annexes 14 et 15.



Pose du rideau Moondream
© Mathilde Padilla, 2020



Rideau Moondream
© Mathilde Padilla, 2020



Test du rideau Showtex Kilosergé
© Mathilde Padilla, 2020



Rideau Showtex multicouche
© Mathilde Padilla, 2020

de la pièce voisine, environ cinq centimètres devant le prototype de double façade. Il fait toute la largeur de la pièce ce qui permet aux deux rideaux de couvrir l'ensemble du panneau et non plus seulement la fenêtre. Les rideaux Showtex quatre couches et Kilosergé seront montés successivement sur ce rail pour être testés l'un après l'autre. Leur installation dans la loge du gardien permet également de les présenter aux habitants, ceux-ci pouvant ensuite librement choisir le coloris de leurs rideaux dans la gamme proposée par les fabricants. Un nuancier pourra être mis à leur disposition.

b. Mise en œuvre

L'installation du rideau Moondream est extrêmement simple et pourrait être réalisée par les copropriétaires eux-mêmes, à condition d'être deux, suivant une notice élaborée par nos soins afin de respecter les débords du rideau autour de la fenêtre. Pour les rideaux Showtex, l'installation est plus difficile. Elle nécessite également deux poseurs et les toiles, relativement lourdes, ne sont pas faciles à accrocher sur les rails. Toutes ces installations ne peuvent être réalisées par des personnes âgées, aussi il pourrait être prévu que les rideaux soient posés par des entreprises au moment de l'installation des doublages.

c. Performances : les tests *in situ*

Acoustique

Pour connaître la capacité d'isolement de chacun des rideaux, le bureau d'étude LASA teste l'ensemble des rideaux successivement en plaçant une source de bruit artificielle normalisée à l'extérieur de l'immeuble et en mesurant le niveau sonore à l'intérieur du logement en plaçant les rideaux dans différentes positions : fermés, ouverts, fermés à 50 %, 70 % ou 90 %. Pour le rideau Showtex KiloSergé (1000g/m², monocouche sans membrane), le gain obtenu est de l'ordre de 1 à 3 dB en fonction des configurations¹⁶⁶ sur l'indice $D_{nTA, tr}$ ¹⁶⁷. En basse fréquence, aucun gain n'est observable, le rideau n'apportant pas suffisamment de masse. C'est à partir de 1000 Hz que le rideau semble présenter un effet (les gains plafonnent néanmoins à 7 à 8 dB). Pour le rideau Showtex multicouches (2500g/m² 4 couches dont 2 membranes PVC) le gain obtenu est de l'ordre de 3 à 7 dB en fonction des configurations sur l'indice $D_{nTA, tr}$. En très

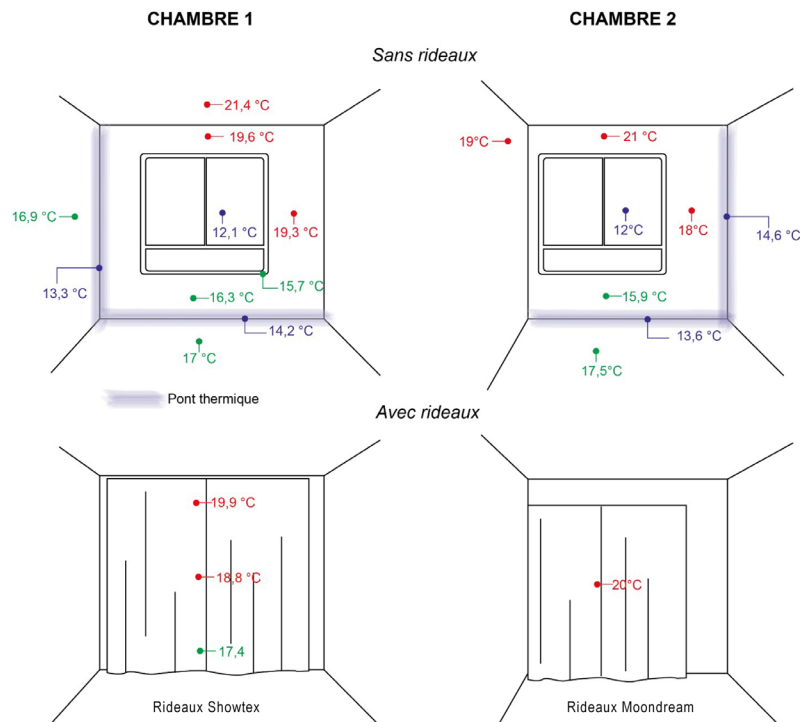
166. Douze configurations ont été testées. Elles sont détaillées dans le rapport du LASA disponible en annexe 16.

167. Mesure normalisée (Le D_{nTw} est calculé avec une courbe de référence définies dans les normes), qui intègre une correction due à la durée de réverbération présente dans le local de réception vis-à-vis d'une réverbération de référence. Un terme correctif C_{tr} est ajouté à valeur normalisée pour se rapprocher d'un spectre type de circulation routière. Il permet ainsi de mieux prendre en compte les basses fréquences dans le calcul de l'isolement. C'est l'indice de référence dans la réglementation française pour ce qui est des isollements de façade.

basse fréquence, aucun gain n'est observable. C'est à partir de 200 Hz que le rideau semble présenter un effet grâce à la membrane PVC. Le gain en médium et haute fréquence n'est pas négligeable (7 à 12 dB en médium et jusqu'à 20 dB pour les aigus selon les configurations) et permet d'obtenir un réel impact au niveau du ressenti lors de la mesure et des valeurs globales mesurées. Enfin pour le rideau Moondream (800g/m² bicouche + membrane alu), le gain obtenu est de l'ordre de 2 à 5 dB en fonction des configurations sur l'indice DnTA,tr. En basse fréquence, aucun gain n'est observable. C'est à partir de 250 Hz que ce rideau semble présenter des caractéristiques d'atténuation (3 à 7 dB en médium et jusqu'à 12 à 15 dB pour les aigus selon les configurations). En somme, la présence d'une membrane étanche permet d'augmenter sensiblement le gain apporté par le rideau dans les différentes configurations. Au regard de ces résultats, il semble préférable d'orienter le choix de rideaux vers le Showtex multicouches qui présente les meilleures performances. Le rideau Showtex Kilosergé ne semble pas pouvoir apporter un isolement satisfaisant, les gains obtenus étant relativement faibles et ne commençant à être efficace que sur les fréquences de plus de 1000Hz. En revanche, en comparant le rapport performances/prix du rideau Showtex multicouches et du rideau Moondream du commerce, ce dernier semble être un compromis intéressant avec un coût relativement faible. En revanche, l'aspect du rideau Showtex, avec le rail en plafond et la couverture de l'ensemble du panneau, est plus satisfaisant. Il n'empêche que le rideau Moondream reste six fois moins onéreux que le rideau Showtex pour des performances satisfaisantes bien que non équivalentes.

Thermique

Ces rideaux disposent de tissus isolants qui interrogent leurs performances thermiques que nous décidons de faire mesurer. Le bureau TRIBU réeffectue donc les mesures réalisées sur les deux prototypes de doublage une fois les rideaux installés pour constater d'une éventuelle amélioration. Les températures de surfaces mesurées sur les prototypes une fois les rideaux fermés sont quasi identiques d'un type de rideau à l'autre (variations de 1°C non significatives). Ils disposent tous de performances thermiques équivalentes. Les rideaux permettent d'harmoniser la température de surface de l'ensemble du panneau entre 19°C et 20°C, et d'annuler ainsi l'effet de paroi froide causé par la fenêtre qui avait une température de surface de 12°C. Ils permettent donc d'augmenter la température de surface du panneau, au niveau de la fenêtre, de 8°C et d'ainsi améliorer considérablement le confort ressenti par les occupants.



d. Appréciation

Plusieurs retours ont déjà pu être faits par les habitants concernant cette hypothèse. L'idée de « corriger » les performances du panneau par un simple rideau est assez bien reçue. Néanmoins, certains habitants trouvent dommage de devoir masquer leurs fenêtres par des éléments rapportés. Certains d'entre eux trouvent le rideau Moondream et sa tringle trop accessoires, tandis que les rideaux Showtex sur le rail constituent davantage de vrais éléments de façade. En revanche, plusieurs habitants ont fait part de leur inquiétude quant au poids de ces rideaux, qui une fois montés sur le rail sont faciles à manipuler, mais qui peuvent être complexes à démonter, notamment pour leur nettoyage. Enfin, tous ces rideaux étant totalement occultants, les habitants regrettent de devoir se priver de la lumière extérieure pour obtenir un confort acoustique satisfaisant. C'est pourquoi le LASA a souhaité mesurer les performances de ces rideaux lors de leur fermeture partielle, pour envisager des dispositions permettant à la fois d'isoler du bruit et de laisser entrer la lumière dans les logements. Compte tenu de la complexité des sujets abordés, des solutions mixtes peuvent être imaginées. Par exemple, il pourrait être envisagé d'équiper les panneaux sud d'origine de la solution double façade avec doublage isolant, double fenêtre intérieure et protections solaires extérieures ou intermédiaires ; et les panneaux nord pourraient conserver leur fenêtre d'origine tout en étant équipé d'un doublage isolant thermique et de rideaux acoustiques occultant qui permettraient d'améliorer le confort nocturne des occupants.

e. Économie

Compte tenu de ses faibles performances, le rideau Showtex Kilosergé n'est pas une solution adaptée. Le rideau Showtex Multicouches et son rail coûtent 1 556,48 € HT pour un panneau de façade. Équiper l'ensemble de la façade nord représenterait donc un investissement de 280 170 € HT, rapporté à 4 670 € HT pour un T4. Le rideau Moondream est bien moins onéreux avec un coût de 227,90 € HT pour un panneau, soit 41 022 € HT pour équiper toute la façade nord et 684 € HT pour un T4. Les rideaux Moondream présentent un investissement six à sept fois inférieur aux rideaux Showtex mais présentent des qualités esthétiques et acoustiques inférieures. Ces coûts seraient doublés dans le cas d'une installation des rideaux sur les deux façades. Cette option pourrait s'avérer intéressante dans le cas où la solution « double fenêtre » ne serait pas mise en œuvre en façade sud. Les rideaux permettraient alors d'améliorer le confort phonique des habitants et les autoriseraient à avoir davantage recours à la ventilation naturelle nocturne qui favorisera leur confort thermique d'été. En hiver, bien que ces rideaux ne possèdent pas de propriétés thermiques, les tests *in situ* ont permis de révéler leur capacité à améliorer les températures de surfaces des parois et donc à réduire les effets de parois froides. En définitive, ces rideaux ne permettent pas de réduire les consommations énergétiques de l'immeuble en hiver, mais ils permettent d'améliorer le confort thermique d'hiver lorsqu'ils sont tirés.

Partie 3 : Retour sur l'expérimentation, comparaison des solutions et des variantes

1 – Le prototype, un véritable outil de recherche et de conception

Durant ce travail, les démarches de conception-fabrication, offertes par le process de prototypage, ont permis de vérifier immédiatement les interventions imaginées en les confrontant à la réalité de la mise en œuvre et du terrain. Dans le cas d'un immeuble existant, avec des caractéristiques complexes et regroupant de tels enjeux, d'autant plus en site occupé, l'étape du prototype semble indispensable. L'expérimentation à l'échelle 1 : 1 lors des phases de conception a en effet démontré plusieurs intérêts. En premier lieu, elle permet de vérifier la faisabilité d'une hypothèse lorsque celle-ci nécessite des points de vigilance particuliers. L'objectif de réalisation d'un prototype selon cette hypothèse nous a obligé à nous rapprocher

rapidement de fabricants et d'entreprises de menuiseries en aluminium. Les échanges avec ceux-ci dans le cadre du développement du prototype ont permis d'identifier la principale impasse rencontrée par cette hypothèse : l'intégration des rupteurs dans des profils aussi minces avec une feuillure étroite pour les doubles vitrages, et le cintrage de ces mêmes rupteurs dans un rayon de sept centimètres. Les échanges avec les nombreux fabricants ayant tous menés à la même conclusion, cette solution n'a pu voir le jour dans ses dispositions initiales. Réaliser des prototypes permet donc d'envisager la construction, de passer par l'acte de faire très en amont des phases chantier, dès la conception, pour anticiper les problématiques à venir.

Nous l'avons vu, le prototype permet aussi de tester la méthode de mise en œuvre du chantier, qui plus est en site occupé, et d'éliminer des solutions trop invasives. D'une manière générale, pour réduire les interventions sur chantier, les prototypes ont mis en exergue le besoin de préfabriquer l'ensemble des éléments en atelier pour n'avoir plus qu'à être assemblés sur place. L'installation des prototypes dans la loge a démontré la nécessité d'intégrer, dans les dimensions et la fabrication des prototypes, des marges pouvant absorber les déformations et les aspérités de la structure et des cloisons afin de faciliter le montage.

Le prototype permet aussi de vérifier l'incidence d'une hypothèse sur l'existant, tant dans son aspect que dans ses performances. Prenons l'exemple du store extérieur. L'installation de celui-ci constituait un sujet délicat, d'un point de vue patrimonial et architectural, qui interrogeait la capacité d'insertion visuelle d'un store au-devant d'une façade labellisée, pour des raisons thermiques comme d'un point de vue technique. La réalisation du prototype a permis de proposer une solution adaptée et de convaincre les acteurs du projet, y compris les services de la DRAC et de l'UDAP, de sa pertinence. En venant sur place constater de la bonne intégration du store, de sa cohérence avec la trame architecturale de la façade, les différents acteurs ont été unanimement favorables. La réalisation des prototypes permet également, comme nous l'avons fait, de tester les performances thermiques et acoustiques des hypothèses en conditions réelles ce qui présente l'intérêt de démontrer leur véritable efficacité. Dans ce même objectif, le prototype offre aux habitants de l'immeuble un objet concret, palpable, manipulable et compréhensible de tous pour évaluer la qualité des ambiances proposées, l'incidence des propositions dans leur logement et leur permettre d'échanger facilement avec l'équipe de conception. Il s'agit là d'un outil de médiation formidable qui permet aux copropriétaires de s'investir concrètement dans le projet de réhabilitation en les projetant dans un potentiel état futur. L'objet construit à l'échelle 1 : 1 permet en outre de recueillir les

impressions des copropriétaires et donc de modifier le projet en conséquence. Le prototype est donc un outil de conception-fabrication, itératif, permettant d'adapter des solutions à leur contexte et aux besoins des occupants. L'une des perspectives de ce travail consiste à l'étude de l'incidence de l'installation de menuiseries selon le dessin et les profils Prouvé, en double vitrage, mais sans rupteurs de ponts thermiques, sur les performances de l'enveloppe. Cette solution, qui pourrait présenter un grand intérêt patrimonial, interroge quant à sa capacité d'isolation thermique comme phonique, celle-ci ne permettant aucune modulation sonore associée à la ventilation naturelle l'été. La paroi sera toujours améliorée en comparaison de l'état d'origine, mais cela sera-t-il suffisant ? Les fuites thermiques et acoustiques au niveau des profils sans rupteurs pourront-elles être compensées ? Autant de questions auxquelles il nous faudrait répondre par une expérimentation supplémentaire.

Outre ces questions de mise en œuvre et de performances, la réalisation de prototypes permet également de viabiliser le coût de construction et le budget global des travaux. Nous connaissons l'importance de cette donnée dans les décisions de copropriété, c'est pourquoi il nous était primordial de disposer d'une bonne estimation de chacune des hypothèses.

2 – L'économie, une préoccupation au cœur des réhabilitations en copropriété

a. Un montage financier délicat¹⁶⁸

Il est important de rappeler que l'un des objectifs premiers de cette recherche est de pouvoir proposer des solutions de réhabilitation de façades légères de logements à des coûts abordables pouvant être supportés par des copropriétaires aux revenus modestes. L'objectif des tableaux qui vont suivre est de donner une estimation du coût des solutions envisagées grâce aux chiffrages de Stéphane Nardy du cabinet Denizou, économiste de la construction associé au projet. Les estimations réalisées ne s'arrêtent pas aux seuls travaux à réaliser sur les façades de l'immeuble, mais incluent également les travaux annexes nécessaires à l'amélioration du confort des occupants et à la baisse des consommations d'énergie de l'immeuble. Ces bouquets de travaux ont fait l'objet d'une étude attentive dans le but d'atteindre des seuils de confort satisfaisants pour les habitants, mais également des seuils de performances

168. L'ensemble des résultats des estimations du Cabinet Denizou sont disponibles dans les tableaux présentés pages 308 à 311.

énergétiques nécessaires, tant pour entrer dans des normes que pour obtenir des subventions. En effet, nous verrons que bon nombre de subventions allouées pour les réhabilitations sont conditionnées par un seuil de réduction des consommations d'énergie. Aussi, la façade ayant une soixantaine d'année, elle nécessite une intervention de maintenance indispensable visant à lui redonner son étanchéité. Cette opération comprend la dépose des couvre-joints verticaux et bavettes horizontales rapportés, la réparation des percements inhérents à ces équipements, le nettoyage de la façade et la réfection de l'ensemble des joints horizontaux et verticaux entre panneaux. Ces travaux sont aujourd'hui essentiels, des défauts d'étanchéité conduisant à des fuites ayant pu être observés chez certains copropriétaires. Leur coût est estimé à 140 000 €¹⁶⁹. L'installation d'une nacelle volante en toiture, d'un coût de 35 000 €, est à prévoir pour réaliser ces travaux en toute sécurité, un échafaudage ne pouvant être installé sur la façade légère. Cette nacelle sera également utile dans le cas de la pose de stores extérieurs, pour leur installation comme pour leur maintenance régulière.

b. Bénéfices, subventions et aides possibles

Pour mesurer l'intérêt de chacune des interventions, il convient de s'intéresser aux bénéfices qu'elles impliquent en termes de réduction des consommations annuelles en énergie primaire – Cep¹⁷⁰ – de l'immeuble, les consommations actuelles étant de 171 kWh/m² par an. Les tableaux présentés pages 308 à 311 permettent de mettre en parallèle le coût d'investissement de chaque intervention envisagée avec la réduction de la consommation annuelle en énergie primaire engendrée. Ainsi, il est plus aisé de faire des hypothèses pour la définition de la stratégie globale d'intervention. De ces coûts d'investissement et réduction des consommations dépend tout l'économie du projet. En effet, il existe différentes aides financières pour accompagner les copropriétaires dans leur investissement, dont certaines sont conditionnées par le taux de réduction des consommations en énergies primaires, comme le programme « Habiter Mieux » de l'Anah accessible aux copropriétaires sur demande individuelle, au regard de critères de ressources et pour des travaux permettant une réduction d'au moins 35 % des consommations d'énergie. Dans notre cas, cela impliquerait un seuil de consommations annuelles en énergie primaire inférieur à 111 kWh/m². Cette aide peut aller jusqu'à 7 000 € par logement pour les ménages modestes et 10 000 € pour les ménages très modestes. Dans le cadre du programme

169. Tous les coûts sont donnés hors taxes et pour l'ensemble du bâtiment.

170. L'énergie primaire est la première forme d'énergie avant toute transformation. Parler d'énergie primaire permet de comparer toutes les sources d'énergie différentes en prenant en compte, pour chacune, les transformations qu'elles subissent avant leur livraison au consommateur.

Estimation de la solution 1 : restauration double-vitrage

Chiffrage et gains de la solution associée à l'isolation de l'enveloppe globale et à la réfection des systèmes de chauffage

Interventions	Réduction des besoins annuels en chauffage / existant	Réduction des consommations annuelles en énergie primaire [existant = 171 kWh/m ²](estimée par TRIBU)	Coûts HT estimés pour tout l'immeuble
DOUBLAGE ISOLANT Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	15 %	- 25 kWh/m ²	424 000 €
RESTAURATION Doublage isolant acoustique Knauff Contrapanel intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	0 %	- 0 kWh/m ²	32 000 €
RESTAURATION Refabrication de fenêtres «style Prouvé» en double vitrage, pour l'ensemble des panneaux	18 %	- 10 kWh/m ²	507 000 €
STORES Store intérieur manuel au sud - Option 1	0 %	- 0 kWh/m ²	53 000 €
STORES Store extérieur motorisé au sud - Option 2	0 % - mais confort d'été	- 0 kWh/m ²	273 000 € (+35 000 € nacelle)
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE Maintenance de la façade : dépose bavettes et couvre-joints, réfection de l'étanchéité, nettoyage	0 %	- 0 kWh/m ²	140 000 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE Isolation des sous-faces du plancher du 1er étage par rapport aux caves, porche et coursive	10 %	- 9 kWh/m ²	63 000 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE Isolation des murs pignons (/)\servitude voisins)	23 %	- 22 kWh/m ²	64 000 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE Isolation de la toiture terrasse	4 %	- 5 kWh/m ²	80 000 €
SYSTEMES Installation de ventilation hybride		- 0 kWh/m ²	102 000 €
SYSTEMES Calorifugeage des réseaux et thermostats individuels		- 8 kWh/m ²	60 000 €
SYSTEMES Raccordement eau chaude sanitaire à la chaudière et installation d'un bouclage	0 %	- 25 kWh/m ²	93 500 €
SYSTEMES Installation chaudière gaz à condensation collective		- 6 kWh/m ²	150 000 €
TOTAL DE L'ENSEMBLE DES INTERVENTIONS	70 %	61 kWh/m² [BBC Rénovation : Cep < 96 kWh/m ²]	Entre 1 768 500 € et 2 023 500 € selon options

Estimation de la solution 1 : restauration double-vitrage

Chiffrage par type d'appartement

(attention : les tantièmes de chaque type d'appartement diffèrent selon les propriétaires, s'il possède une cave ou un garage, les estimations sont réalisées en fonction du nombre de panneaux de façade de chaque appartement)

Interventions	Coûts HT estimés pour tout l'immeuble	T1	T3	T4	T5 0 loggia	T5 1 loggia	T5 2 loggia	T6
DOUBLAGE ISOLANT								
Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	424 000 €	3 556 €	8 890 €	10 668 €	10 668 €	12 446 €	14 224 €	16 002 €
DOUBLAGE ISOLANT								
Doublage isolant acoustique Knauff Contrapanel intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	32 000 €	178 €	445 €	534 €	534 €	623 €	712 €	801 €
RESTAURATION								
Refabrication de fenêtres «style Prouvé» en double vitrage, pour l'ensemble des panneaux	507 000 €	2 816 €	7 040 €	8 448 €	8 448 €	9 856 €	11 264 €	12 672 €
STORES								
Store intérieur manuel au sud - Option 1	53 000 €	294 €	441 €	441 €	294 €	441 €	588 €	735 €
STORES								
Store extérieur motorisé au sud - Option 2	273 000 € (+35 000 € nacelle)	3 422 €	5 133 €	5 133 €	3 422 €	5 133 €	6 844 €	8 555 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Maintenance de la façade : dépose bavettes et couvre-joints, réfection de l'étanchéité, nettoyage	140 000 €	778 €	1 945 €	2 334 €	2 334 €	2 723 €	3 112 €	3 501 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Isolation des sous-faces du plancher du 1er étage par rattachement aux caves, porche et coursive	63 000 €	350 €	875 €	1 050 €	1 050 €	1 225 €	1 400 €	1 575 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Isolation des murs pignons (/!\servitude voisins)	64 000 €	356 €	890 €	1 068 €	1 068 €	1 246 €	1 424 €	1 602 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Isolation de la toiture terrasse	80 000 €	444 €	1 110 €	1 332 €	1 332 €	1 554 €	1 776 €	1 998 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Installation de ventilation hybride	102 000 €	566 €	1 415 €	1 698 €	1 698 €	1 981 €	2 264 €	2 547 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Calorifugeage des réseaux et thermostats individuels	60 000 €	334 €	835 €	1 002 €	1 002 €	1 169 €	1 336 €	1 503 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Raccordement eau chaude sanitaire à la chaudière et installation d'un bouclage	93 500 €	520 €	1 300 €	1 560 €	1 560 €	1 820 €	2 080 €	2 340 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Installation chaudière gaz à condensation collective	150 000 €	834 €	2 085 €	2 502 €	2 502 €	2 919 €	3 336 €	3 753 €
TOTAL DE L'ENSEMBLE DES INTERVENTIONS	Entre 1 768 500 € et 2 023 500 € selon options	Entre 11 026 € et 14 154 € selon options	Entre 27 271 € et 31 963 € selon options	Entre 32 637 € et 37 329 € selon options	Entre 32 490 € et 35 618 € selon options	Entre 38 003 € et 42 695 € selon options	Entre 43 516 € et 49 772 € selon options	Entre 49 029 € et 56 849 € selon options

Estimation de la solution 2 : installation d'une double-façade Chiffrage et gains de la solution associée à l'isolation de l'enveloppe globale et à la réfection des systèmes de chauffage

	Interventions	Réduction des besoins annuels en chauffage / existant	Réduction des consommations annuelles en énergie primaire [existant = 171 kWh/m ²](estimée par TRIBU)	Coûts HT estimés pour tout l'immeuble
DOUBLE FAÇADE	Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	15 %	- 25 kWh/m ²	424 000 €
	Doublage isolant acoustique (Fermacell) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	0 %	- 0 kWh/m ²	20 000 €
	Double fenêtre coulissante intérieure bois ou	18 %	- 10 kWh/m ²	269 000 € ou 337 000 €
	Double fenêtre coulissante intérieure alu			
RESTAURATION	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	0 %	- 0 kWh/m ²	439 000 €
	Store intermédiaire motorisé au sud - Option 1	0 %	- 0 kWh/m ²	89 000 €
STORES	Store extérieur motorisé au sud - Option 2	0 % - mais confort d'été	- 0 kWh/m ²	273 000 € (+35 000 € hachelle)
	Maintenance de la façade : dépose bavettes et couvre-joints, réfection de l'étanchéité, nettoyage	0 %	- 0 kWh/m ²	140 000 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE	Isolation des sous-faces du plancher du 1er étage par rapport aux caves, porche et courseive	10 %	- 9 kWh/m ²	63 000 €
	Isolation des murs pignons (/!\servitude voisins)	23 %	- 22 kWh/m ²	64 000 €
	Isolation de la toiture terrasse	4 %	- 5 kWh/m ²	80 000 €
	Installation de ventilation hybride		- 0 kWh/m ²	102 000 €
	Calorifugeage des réseaux et thermostats individuels		- 8 kWh/m ²	60 000 €
	Raccordement eau chaude sanitaire à la chaudière et installation d'un bouclage	0 %	- 25 kWh/m ²	93 500 €
	Installation chaudière gaz à condensation collective		- 6 kWh/m ²	150 000 €
	TOTAL DE L'ENSEMBLE DES INTERVENTIONS	70 %	61 kWh/m² [BBC Rénovation : Cep < 96 kWh/m ²]	Entre 1 993 500 € et 2 280 500 € selon options

Estimation de la solution 2 : installation d'une double-façade

Chiffrage par type d'appartement

(attention : les tantièmes de chaque type d'appartement différant selon les propriétaires, s'il possède une cave ou un garage, les estimations sont réalisées en fonction du nombre de panneaux de façade de chaque appartement)

Interventions	Coûts HT estimés pour tout l'immeuble	T1	T3	T4	T5 0 loggia	T5 1 loggia	T5 2 loggia	T6
DOUBLE FAÇADE								
Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	424 000 €	2 356 €	5 890 €	7 068 €	7 068 €	8 246 €	9 424 €	10 602 €
Doublage isolant acoustique (Fermacell) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	20 000 €	112 €	280 €	336 €	336 €	392 €	448 €	504 €
Double fenêtre coulissante intérieure bois	269 000 € OU	1 494 € OU	3 735 € OU	4 482 € OU	4 482 € OU	5 229 € OU	5 976 € OU	6 723 € OU
Double fenêtre coulissante intérieure alu	337 000 €	1 872 €	4 680 €	5 616 €	5 616 €	6 552 €	7 488 €	8 424 €
Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	439 000 €	2 438 €	6 095 €	7 314 €	7 314 €	8 533 €	9 752 €	10 971 €
STORES								
Store intermédiaire motorisé au sud - Option 1	89 000 €	988 €	1 482 €	1 482 €	988 €	1 482 €	1 976 €	2 470 €
Store extérieur motorisé au sud - Option 2	273 000 € (+35 000 € nacelle)	3 422 €	5 133 €	5 133 €	3 422 €	5 133 €	6 844 €	8 555 €
ENVELOPPE GLOBALE PERFORMANTE								
Maintenance de la façade : dépose bavettes et couvre-joints, réfection de l'étanchéité, nettoyage	140 000 €	778 €	1 945 €	2 334 €	2 334 €	2 723 €	3 112 €	3 501 €
Isolation des sous-faces du plancher du 1er étage par rapport aux caves, porche et coursive	63 000 €	350 €	875 €	1 050 €	1 050 €	1 225 €	1 400 €	1 575 €
Isolation des murs pignons (/!\servitude voisins)	64 000 €	356 €	890 €	1 068 €	1 068 €	1 246 €	1 424 €	1 602 €
Isolation de la toiture terrasse	80 000 €	444 €	1 110 €	1 332 €	1 332 €	1 554 €	1 776 €	1 998 €
SYSTEMES								
Installation de ventilation hybride	102 000 €	566 €	1 415 €	1 698 €	1 698 €	1 981 €	2 264 €	2 547 €
Calorifugeage des réseaux et thermostats individuels	60 000 €	334 €	835 €	1 002 €	1 002 €	1 169 €	1 336 €	1 503 €
Raccordement eau chaude sanitaire à la chaudière et installation d'un bouclage	93 500 €	520 €	1 300 €	1 560 €	1 560 €	1 820 €	2 080 €	2 340 €
Installation chaudière gaz à condensation collective	150 000 €	834 €	2 085 €	2 502 €	2 502 €	2 919 €	3 336 €	3 753 €
TOTAL DE L'ENSEMBLE DES INTERVENTIONS	Entre 1 993 500 € et 2 280 500 € selon options	Entre 11 570 € et 14 382 € selon options	Entre 27 937 € et 32 533 € selon options	Entre 33 228 € et 38 013 € selon options	Entre 32 734 € et 36 302 € selon options	Entre 38 519 € et 43 493 € selon options	Entre 44 004 € et 50 684 € selon options	Entre 50 089 € et 57 875 € selon options

« Habiter Mieux », une prime de 1 000€ de la Métropole de Lyon s'ajoute aux aides de l'Anah. Ces aides peuvent être cumulées avec les aides nationales (crédit d'impôt, éco-prêt taux zéro, TVA réduite) et locales (communes, programme Ecoréno'v). Cependant, le cumul des aides de l'Anah et du prêt à taux zéro n'est possible que si le logement est situé dans le périmètre d'une opération d'amélioration de l'habitat (Opah) ce qui n'est pas le cas de l'immeuble Les Cèdres. A titre indicatif, une estimation des plafonds de ressources en province permettant d'avoir accès au programme « Habiter Mieux » est donnée ci-dessous¹⁷¹.

Les plafonds de ressources en province (source : quelleenergie.fr)		
Nombre de personnes composant le ménage	Ménages aux ressources très modestes	Ménages aux ressources modestes
1	14 508 €	18 598 €
2	21 217 €	27 200 €
3	25 517 €	32 710 €
4	29 809 €	38 215 €
5	34 121 €	43 742 €
Par personne supplémentaire	+ 4 301 €	+ 5 510 €

Les copropriétaires de l'immeuble Les Cèdres peuvent également bénéficier du programme Ecoréno'v de la Métropole de Lyon qui attribue une aide de 3 500 € par appartement si le projet de rénovation permet d'atteindre le niveau BBC Rénovation et de 2 000 € par appartement pour une réduction des consommations d'énergie de 35 %, sans conditions de revenus. Ils peuvent également avoir recours au crédit d'impôt pour la transition énergétique. Il permet de déduire de l'impôt sur le revenu une partie des dépenses éligibles pour certains travaux d'amélioration de la performance énergétique des logements. Si le crédit d'impôt est supérieur au montant de l'impôt dû, ou si le ménage est non-imposable, l'excédent est remboursé. Les dépenses éligibles au crédit d'impôt peuvent porter aussi bien sur le logement lui-même que sur les équipements et les parties communes de l'immeuble. Les dépenses ouvrent droit au crédit d'impôt pour chaque copropriétaire, à hauteur de sa quote-part. Le taux du CITE est de 15 % ou 30 % du montant des dépenses en fonction de la nature des travaux. Le montant des dépenses éligibles est calculé sur le montant TTC des travaux, déduction faite des aides et des subventions reçues par ailleurs.

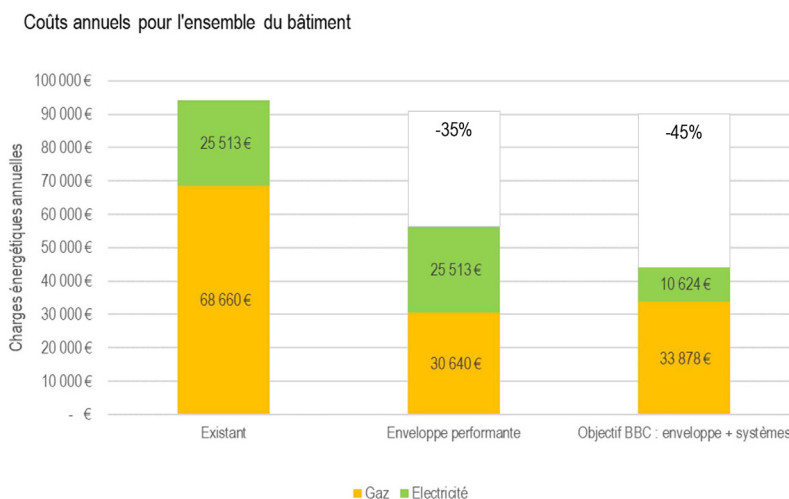
Les copropriétaires qui n'auraient pu bénéficier du programme « Habiter Mieux » de l'Anah peuvent prétendre à l'éco-prêt à taux zéro. Il s'agit d'un prêt à taux d'intérêt nul et accessible

171. Le plafond de ressources applicable en 2018 doit être comparé au revenu fiscal de référence (RFR) figurant sur l'avis d'imposition de 2017 (RFR 2016) du copropriétaire ou l'avis d'imposition de 2018 s'il est déjà disponible (RFR 2017).

sans condition de ressources, pour financer un ensemble cohérent de travaux d'amélioration de la performance énergétique. Le logement doit être déclaré comme résidence principale et le montant du prêt est plafonné à 30 000€ pour un bouquet de travaux. La durée de remboursement peut être portée à quinze ans pour les travaux les plus importants.

Enfin, le taux de TVA pour les travaux d'amélioration de la performance énergétique est réduit à 5,5 % permettant aux investisseurs de réaliser des économies. Enfin, l'Etat oblige également les fournisseurs d'énergie à promouvoir des actions efficaces d'économies d'énergie auprès des consommateurs. S'ils ne respectent pas leurs obligations, l'État leur impose de fortes pénalités financières. Dans ce contexte, les entreprises qui vendent de l'énergie (électricité, gaz ou GPL, chaleur, froid, fioul domestique et carburants pour automobiles) mettent en place des « certificats d'économies d'énergie (CEE) ». Ces entreprises peuvent alors proposer des primes, des prêts bonifiés ou financer des diagnostics aux propriétaires qui réalisent des travaux d'économies d'énergie.

La réduction des consommations énergétiques permet donc d'accéder à un certain nombre d'aides pouvant permettre aux copropriétaires de réduire leur coût d'investissement pour la réalisation de leurs travaux. Ces réductions leur permettent également de réaliser des économies sur leurs charges annuelles en énergie. Grâce à l'ensemble des interventions mentionnées, le bureau TRIBU estime que les charges énergétiques annuelles des copropriétaires peuvent être réduites de 45 %, et de 35 % si les copropriétaires ne réalisent pas les travaux sur les systèmes de chauffage et de ventilation. Cependant, le coût de l'énergie ne cessant d'augmenter, ces économies risquent d'être rapidement rattrapées par l'inflation. Il n'en reste pas moins intéressant de réduire les consommations d'énergie pour alléger l'impact de l'augmentation des tarifs sur le niveau de vie des propriétaires.



Tableaux des performances acoustiques, des consommations actuelles en énergie primaire et des coûts par actions

Estimation des coûts hors taxes (€)	A	B1	B2a	B2b	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3	F4	Consommations en énergie primaire/an (kWh/m²)	Isolément acoustique (DnTα,Tt)
2.000.000 €	171 kWh/m² 19 dB	136 kWh/m² 33 dB	40 dB	171 kWh/m²	171 kWh/m²	171 kWh/m²	171 kWh/m²	171 kWh/m²	171 kWh/m²	166 kWh/m²	162 kWh/m²	149 kWh/m²	166 kWh/m²	171 kWh/m²	163 kWh/m²	165 kWh/m²	165 kWh/m²	170 kWh/m²	41 dB
1.500.000 €		951 000 € 1 220 000 € 1 152 000 €			308 000 € 89 000 € 53 000 €			41 022 € 100 084 € 280 170 €			63 000 € 207 000 € 80 000 €							160 kWh/m²	40 dB
1.000.000 €																		150 kWh/m²	38 dB
500.000 €																		140 kWh/m²	37 dB
100.000 €																		130 kWh/m²	36 dB
																		120 kWh/m²	35 dB
																		110 kWh/m²	34 dB
																		90 kWh/m²	33 dB
																		80 kWh/m²	32 dB
																		70 kWh/m²	31 dB
																		60 kWh/m²	29 dB
																			28 dB
																			27 dB
																			26 dB
																			25 dB
																			24 dB
																			23 dB
																			22 dB
																			21 dB
																			20 dB
																			19 dB
Interventions	A-Maintenance et étanchéité	B-Façades légères		C-Protection solaire	D-Rideaux acoustiques	E-Enveloppe globale	F-Systèmes												
Nature des travaux	Dépense des bavettes et couvre-joints rapportés sur les panneaux ; réfection de l'étanchéité ; remplacement des joints ; nettoyage des panneaux	Isolation par l'intérieur avec 14,5 cm d'isolant fibre de bois des façades sud et nord + doublage acoustique avec des plaques de Fermacell de 18 mm + interventions sur les menuiseries (variantes)		Ajout d'une protection solaire (stores toiles ou vénitiens)	Ajout de rideaux acoustiques à l'intérieur des appartements pour favoriser la ventilation naturelle nocturne tout en ayant une isolation phonique (estimation pour les 180 panneaux de la façade nord, dans les chambres, à doubler si intégration de cette solution en façade sud également)	Isolation par l'extérieur des autres parties de l'enveloppe, outre les façades légères	Amélioration des systèmes de production et de distribution de la ventilation et du chauffage												
Variantes		B1 - Restauration des menuiseries en double vitrage	B2 - Double-fenêtre B2a - en aluminium B2b - en bois	C1 - store extérieur motorisé C2 - store intermédiaire motorisé C3 - store intérieur manuel	D1 - Moon-dream D2 - Showtex Kiloisergé D3 - Showtex Multi-couches	E1 - Sous-face de plancher E2 - Murs-pignons E3 - Toiture	F1 - Installation de ventilations hybrides F2 - Calorifugeage des réseaux de chauffage et thermostats individuels F3 - Passage en eau chaude sanitaire collective F4 - Remplacement de la chaudière par une chaudière à condensation												

Objectifs :

- Baisser les consommations annuelles en énergie primaire, la consommation actuelle étant de 171 kWh/m²
- Augmenter la capacité d'isolement acoustique des parois, celle des façades d'origine étant de 19dB DnTαTr
- Proposer des solutions à des coûts abordables.

Une fois ces données connues de tous, il convient de trouver l'équilibre entre l'investissement qui permettra d'atteindre des seuils avantageux de subventions, et le gain obtenu grâce aux subventions pour approcher une enveloppe de travaux en cohérence avec les capacités d'investissement des copropriétaires. Lors de ces équations économiques, il ne faudra pas oublier l'importance de chacun des postes de dépense sur le gain en confort des occupants, et faire les choix les plus avantageux pour garantir le juste équilibre entre économie, performances, confort et qualité architecturale.

3 – Le tableau synoptique comme outil de comparaison

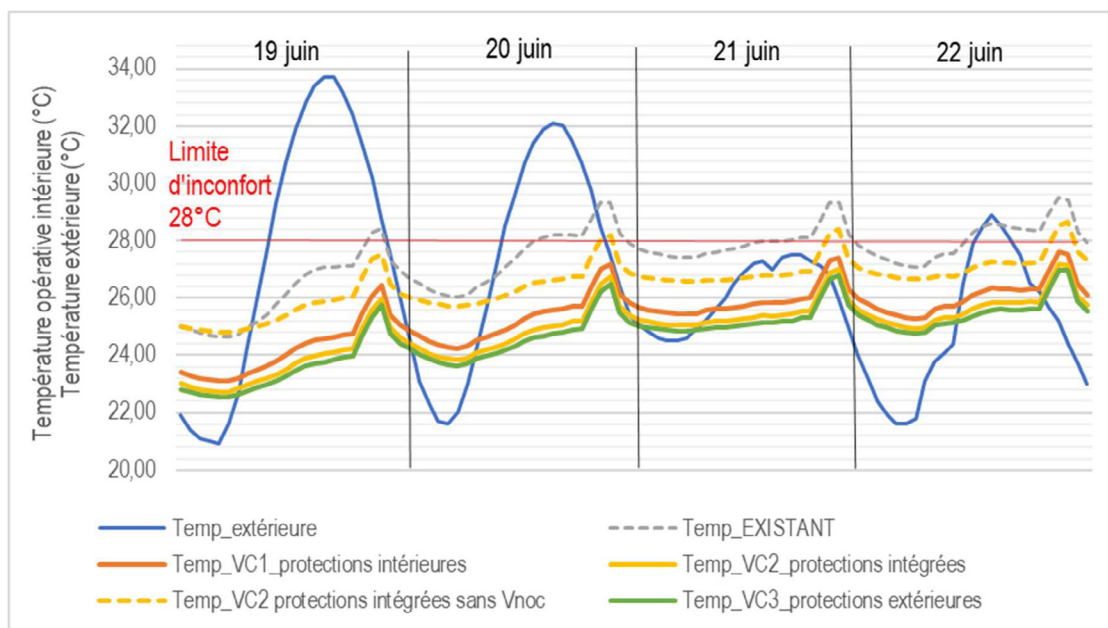
A l'issue de l'expérimentation, nous possédons un ensemble de données important sur chacune des hypothèses : leurs performances thermiques d'hiver comme d'été, leur capacité d'isolement acoustique, leurs performances énergétiques, leurs capacités de ventilation, le ressenti des habitants sur les ambiances qu'elles proposent et leur aspect visuel. Afin de pouvoir comparer les différentes hypothèses entre elles et constater qu'elles étaient celles proposant le meilleur rapport entre amélioration du confort, performances et économie, nous avons imaginé une grille d'évaluation multicritère, sous forme de tableaux synoptiques. Le premier tableau, présenté ci-après, met en parallèle les performances énergétiques et acoustiques de chacune des actions expérimentées, ainsi que toutes leurs options, avec l'investissement qu'elles nécessitent à l'échelle de l'immeuble entier. Évaluer la performance énergétique de chaque option permet de comprendre leur incidence sur les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble et donc leur capacité d'ouverture à des financements. La comparaison de l'isolement acoustique permet de constater le gain en confort obtenu par chacune des hypothèses. Le confort thermique n'est pas intégrée à la grille compte tenu de la difficulté à l'évaluer de manière linéaire. En effet, le store extérieur peut réduire de 8,8°C la température intérieure ressentie du logement pour une journée avec une température extérieure de 33°C, mais la réduira peut être de 6° C pour une température extérieure de 29°C sans que cela soit proportionnel. Néanmoins, les expérimentations menées ont permis de constater l'efficacité du store extérieur et son caractère indispensable pour assurer le confort d'été des occupants. Le graphique ci-dessous, établi par TRIBU dans sa simulation thermique dynamique, permet d'évaluer son gain en confort par rapport à un store intérieur et un store intégré entre deux fenêtres. Les calculs estiment qu'un store intérieur permet d'abaisser de 2°C la température d'air intérieur d'un logement existant de l'immeuble Les Cèdres, contre 2,5°C pour un store

Tableaux de synthèse des solutions envisageables aujourd'hui

Estimation des coûts (€)	0	1	2	3	4	5	6	7	Consommations en énergie primaire/an (kWh/m ²)	Isolément acoustique (DnT _a ,tr)
	40 dB								170 kWh/m ²	41 dB
2 000 000 €	1 600 000 €	1 807 000 €	1 727 000 €	2 212 500 €	1 982 500 €	1 899 000 €	1 341 000 €	1 621 000 €	160 kWh/m ²	40 dB
1 500 000 €	136 kWh/m ²								150 kWh/m ²	39 dB
1 000 000 €		100 kWh/m ²	105 kWh/m ²						140 kWh/m ²	38 dB
500 000 €					72 kWh/m ²				130 kWh/m ²	37 dB
100 000 €									120 kWh/m ²	36 dB
									110 kWh/m ²	35 dB
									100 kWh/m ²	33 dB
									96 kWh/m ²	32 dB
									96 kWh/m ²	31 dB
									96 kWh/m ²	30 dB
									96 kWh/m ²	29 dB
									96 kWh/m ²	28 dB
									96 kWh/m ²	27 dB
									96 kWh/m ²	26 dB
									90 kWh/m ²	25 dB
									80 kWh/m ²	24 dB
									80 kWh/m ²	23 dB
									70 kWh/m ²	22 dB
									60 kWh/m ²	21 dB
									60 kWh/m ²	20 dB
									60 kWh/m ²	19 dB

Interventions	Réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres	
Nature des travaux	A+B2b+C1 Dépose des bavettes et couvre-joints rapportés sur les panneaux ; réfection de l'étanchéité ; remplacement des joints ; nettoyage des panneaux + Isolation par l'intérieur avec 14,5 cm d'isolant fibre de bois des façades sud et nord + doublage acoustique avec des plaques de Fermacell de 18 mm + double fenêtre en bois + Store extérieur	
Options	+ Enveloppe globale sans toiture, E1+E2 Isolation de la sous-face de plancher du premier niveau ; isolation des murs pignons et isolation des murs de la toiture	+ Enveloppe globale sans toiture, E1+E2 + Systèmes sans remplacement de la chaudière et sans ECS collective, F1+F2 Isolation de la sous-face de plancher du premier niveau et installation de ventilations hybrides ; calorifugeage des réseaux de chauffage et thermostats individuels ; passage en eau chaude sanitaire collective et remplacement de la chaudière par une chaudière à condensation
	+ Enveloppe globale sans toiture, E1+E2 + Systèmes sans remplacement de la chaudière et sans ECS collective, F1+F2+F3 Isolation de la sous-face de plancher du premier niveau ; isolation de la toiture + Installation de ventilations hybrides ; calorifugeage des réseaux de chauffage et thermostats individuels ; passage en eau chaude sanitaire collective et remplacement de la chaudière par une chaudière à condensation	+ Enveloppe globale sans toiture, E1+E2 + Systèmes sans remplacement de la chaudière et sans ECS collective, F1+F2 Isolation de la sous-face de plancher du premier niveau et installation de ventilations hybrides et calorifugeage des réseaux de chauffage et thermostats individuels
	+ Enveloppe globale sans toiture, E1+E2 + Systèmes sans remplacement de la chaudière et sans ECS collective, F1+F2 Isolation de la sous-face de plancher du premier niveau et installation de ventilations hybrides et calorifugeage des réseaux de chauffage et thermostats individuels	+ D3NS Installation de rideaux acoustiques Showtex multicouches dans toutes les pièces en façades nord et sud

intermédiaire et 2,7 °C pour un store extérieur. Le test du prototype a démontré que le store extérieur était encore plus efficace en situation réelle sur les températures ressenties.



Le premier tableau a permis d'identifier clairement les avantages et inconvénients de chacune des actions potentielles. On constate par exemple que l'intervention sur la façade légère comprenant le doublage isolant et l'amélioration de la menuiserie permet d'abaisser les consommations annuelles en énergie primaire de 35 kWh/m² et d'augmenter la capacité d'isolement acoustique des façades à 33 ou 40 dB selon les options, pour un investissement compris entre 951 000 et 1 220 000 € HT pour la copropriété. Il permet également de constater que le cumul des interventions sur l'enveloppe globale et les systèmes permet d'atteindre le seuil de consommations annuelles en énergie primaire du niveau BBC Rénovation, à 96 kWh/m² pour un investissement relativement raisonnable de 612 500 € HT.

L'analyse des données du premier tableau a permis d'élaborer le second, présenté ci-contre. Ici, l'objectif est d'associer les actions évaluées dans le tableau précédent pour établir une stratégie d'intervention pour la réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres. Ainsi, plusieurs options sont envisagées. L'option 0 consiste à réaliser la maintenance et l'étanchéité des façades, l'isolation par l'intérieur des appartements, l'ajout d'une double fenêtre en bois et d'un store extérieur. Le tableau souligne que cette intervention ne permet pas de réduire suffisamment les consommations annuelles en énergie primaire pour obtenir des financements. Il est donc indispensable de cumuler l'intervention sur les façades légères à des améliorations de l'enveloppe globale et des systèmes de production et de distribution de chauffage. Ainsi,

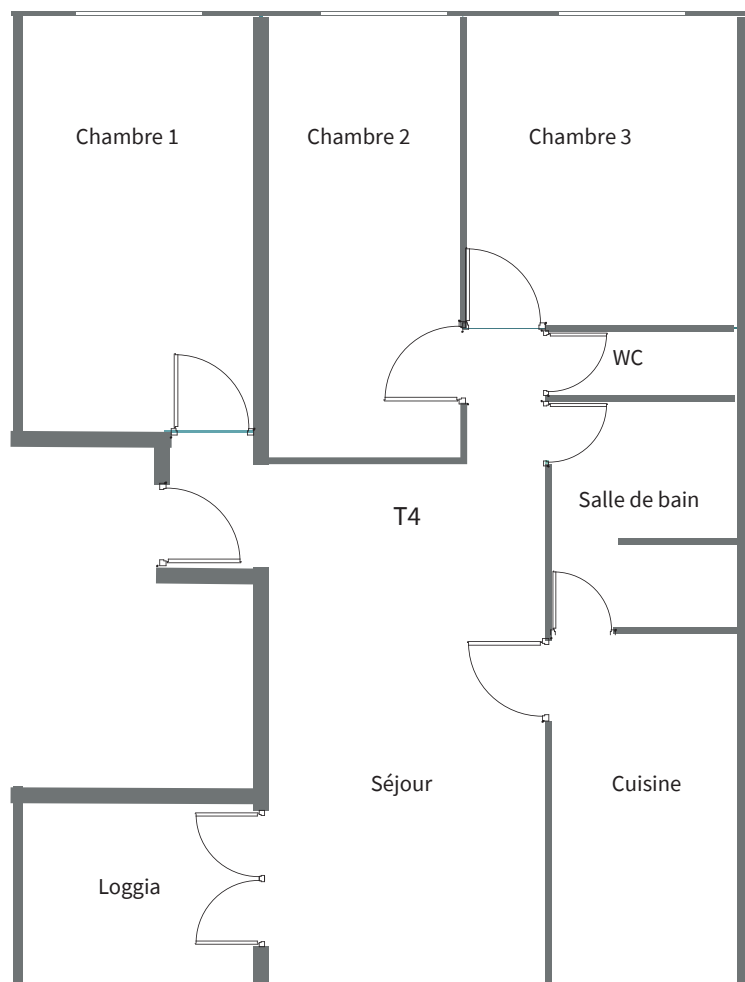
L'option 1 propose de réaliser en plus des dispositions de l'option 0, l'isolation de la sous-face des planchers, des murs pignons et de la toiture. L'option 2 se base sur l'option 1 en retirant l'isolation de la toiture réalisée récemment. Ces deux options permettent d'atteindre une réduction de 35% des consommations annuelles en énergie primaire, la seconde présente l'avantage d'être plus économique de 80 000 € HT. L'option 3 prévoit la réalisation de l'option 1 à laquelle s'ajoute l'ensemble des interventions sur les systèmes : ventilation hybride, calorifugeage des réseaux, thermostats individuels, eau chaude sanitaire collective et remplacement de la chaudière. Il s'agit de l'intervention la plus complète, la plus performante mais aussi la plus onéreuse. L'option 4 prévoit la réalisation de l'option 2 à laquelle s'ajoute les interventions sur les systèmes moins le remplacement de la chaudière qui a été effectué récemment et qui ne génère pas de confort pour les habitants. L'option 5, dans le même esprit, se base sur l'option 4 et retire encore le passage en eau chaude sanitaire collective. L'option 4 réduit considérablement les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble en les abaissant à 72 kWh/m². L'option 5 s'approche du label BBC Rénovation avec seulement 1 kWh/m² supplémentaire. En améliorant légèrement cette option, le niveau du label pourra être atteint. Enfin, les deux dernières propositions reposent sur les résultats du tableau précédent qui démontrait que la réalisation de l'ensemble des interventions sur l'enveloppe globale et les systèmes permettait d'atteindre le label BBC Rénovation sans intervenir sur les façades légères en elles-mêmes. Ces deux options prévoient néanmoins l'ajout des stores extérieurs pour améliorer le confort thermique d'été et l'ajout de rideaux acoustiques intérieurs pour améliorer également le confort phonique des occupants et réduire les effets de parois froides provenant des panneaux non isolés. L'option 6 prévoit les rideaux uniquement au nord, côté chambre, où les nuisances sonores sont les plus gênantes lors de la ventilation naturelle nocturne. L'option 7 prévoit enfin leur installation au nord comme au sud, pour profiter d'une ventilation traversante, mais également pour dissiper l'effet de paroi froide sur les deux façades en hiver, aucune isolation supplémentaire n'étant prévue dans ces deux dernières options. En cela, ces propositions ne sont pas tout à fait satisfaisantes, ne permettant pas d'améliorer réellement le confort thermique d'hiver des occupants. Elles ne sont pas non plus idéales d'un point de vue patrimonial, ne permettant pas de revenir à l'état originel des façades, ni de retrouver son homogénéité, sans intervention sur les menuiseries. Néanmoins, elles répondent à la principale demande des copropriétaires qui consistait à améliorer leur confort thermique d'été et à réduire leurs consommations en énergie. Ces hypothèses leur assurent

une protection solaire et de pouvoir avoir recours à la ventilation nocturne. Les réductions de consommations d'énergie qu'elles engendrent permettent également d'atteindre le niveau maximal de subventions.

L'expérimentation et les tableaux synoptiques ont donc permis de dégager un important panel de solutions pour la réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres. A partir de ces tableaux, nous avons réalisé une estimation de chaque stratégie possible à l'échelle d'un T4. Cette estimation permet de donner un ordre d'idées de l'investissement nécessaire pour un foyer, permettant aux copropriétaires de se projeter dans les futurs travaux potentiels. L'expérimentation a également permis de poursuivre le développement de la méthodologie d'intervention sur ce type de bâti et ce type de façades, nous conduisant à l'élaboration d'un guide pour la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XX^e siècle. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation synthétique de ce guide.

Simulation pour un T4

Plan d'un T4 de l'immeuble Les Cèdres



Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option 0 (à partir d'une évaluation, les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
A	Maintenance, étanchéité, nettoyage de la façade	2 334 €
B	Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	7 068 €
	Doublage isolant acoustique (Fermacell) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	336 €
	Doubles fenêtres coulissantes intérieures bois	4 482 €
B2b	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
C1	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	26 667 €
SUVENTIONS	Ecorenov' : non atteint	0 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	0 €
	Reste à charge HT	26 667 €

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option 1 (à partir d'une évaluation, les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
A	Maintenance, étanchéité, nettoyage de la façade	2 334 €
B	Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	7 068 €
	Doublage isolant acoustique (Fermacell) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	336 €
	Doubles fenêtres coulissantes intérieures bois	4 482 €
B2b	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
C1	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E	E1 : Isolation de la sous-face de plancher	1 050 €
	E2 : Isolation des murs pignons	1 068 €
	E3 : Isolation de la toiture	1 332 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	30 177 €
SUVVENTIONS	Ecorenov' - 35 % des Cep	2 000 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	20 177 €

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option 2 (à partir d'une évaluation, les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
A	Maintenance, étanchéité, nettoyage de la façade	2 334 €
B	Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	7 068 €
	Doublage isolant acoustique (Fermacell) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	336 €
	Doubles fenêtres coulissantes intérieures bois	4 482 €
B2b	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
C1	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E	E1 : Isolation de la sous-face de plancher	1 050 €
	E2 : Isolation des murs pignons	1 068 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	28 785 €
SUVENTIONS	Ecorenov' - 35 % des Cep	2 000 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	18 785 €

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option 3, la plus complète (à partir d'une évaluation, les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
A	Maintenance, étanchéité, nettoyage de la façade	2 334 €
B	Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	7 068 €
	Doublage isolant acoustique (Fermacell) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	336 €
	Doubles fenêtres coulissantes intérieures bois	4 482 €
B2b	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
C1	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E	E1 : Isolation de la sous-face de plancher	1 050 €
	E2 : Isolation des murs pignons	1 068 €
	E3 : Isolation de la toiture	1 332 €
F	F1 : Installation de ventilation hybride	1 698 €
	F2 : Calorifugeage réseaux +thermostats	1 002 €
	F3 : Passage en ECS collective	1 560 €
	F4 : Remplacement de la chaudière	2 502 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	36 879 €
SUVENTIONS	Ecorenov' niveau BBC	3 500 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	25 379 €

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option 4 (à partir d'une évaluation, les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
A	Maintenance, étanchéité, nettoyage de la façade	2 334 €
B	Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	7 068 €
	Doublage isolant acoustique (Fermacell) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	336 €
	Doubles fenêtres coulissantes intérieures bois	4 482 €
B2b	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
C1	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E	E1 : Isolation de la sous-face de plancher	1 050 €
	E2 : Isolation des murs pignons	1 068 €
F	F1 : Installation de ventilation hybride	1 698 €
	F2 : Calorifugeage réseaux +thermostats	1 002 €
	F3 : Passage en ECS collective	1 560 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	33 045 €
SUVENTIONS	Ecorenov' niveau BBC	3 500 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	21 545 €

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option 5 (à partir d'une évaluation, les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
A	Maintenance, étanchéité, nettoyage de la façade	2 334 €
B	Doublage isolant thermique (fibre de bois 14,5 cm) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud	7 068 €
	Doublage isolant acoustique (Fermacell) intérieur des panneaux Prouvé, nord et sud + finitions	336 €
	Doubles fenêtres coulissantes intérieures bois	4 482 €
B2b	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
C1	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E	E1 : Isolation de la sous-face de plancher	1 050 €
	E2 : Isolation des murs pignons	1 068 €
F	F1 : Installation de ventilation hybride	1 698 €
	F2 : Calorifugeage réseaux +thermostats	1 002 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	31 485 €
SUVENTIONS	Ecorenov' niveau BBC	3 500 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	19 985 €

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option 6 (à partir d'une évaluation, les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
A	Maintenance, étanchéité, nettoyage de la façade	2 334 €
C1	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E	E1 : Isolation de la sous-face de plancher	1 050 €
	E2 : Isolation des murs pignons	1 068 €
	E3 : Isolation de la toiture	1 332 €
F	F1 : Installation de ventilation hybride	1 698 €
	F2 : Calorifugeage réseaux +thermostats	1 002 €
	F3 : Passage en ECS collective	1 560 €
	F4 : Remplacement de la chaudière	2 502 €
D3N	Installation de rideaux Showtex multicouches en façade nord	4 670 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	22 349 €
SUVENTIONS	Ecorenov' niveau BBC	3 500 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	10 849 €

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option 7 (à partir d'une évaluation, les tantièmes n'étant pas connus)

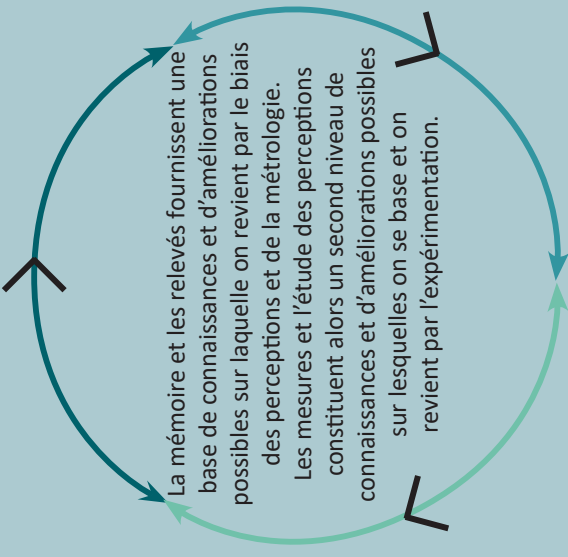
	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
A	Maintenance, étanchéité, nettoyage de la façade	2 334 €
C1	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E	E1 : Isolation de la sous-face de plancher	1 050 €
	E2 : Isolation des murs pignons	1 068 €
	E3 : Isolation de la toiture	1 332 €
F	F1 : Installation de ventilation hybride	1 698 €
	F2 : Calorifugeage réseaux +thermostats	1 002 €
	F3 : Passage en ECS collective	1 560 €
	F4 : Remplacement de la chaudière	2 502 €
D3NS	Installation de rideaux Showtex multicouches en façades nord et sud	9 340 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	27 019 €
SUVENTIONS	Ecorenov' niveau BBC	3 500 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	15 519 €

Partie 4 : Un guide pour la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XX^e siècle

L'un des objectifs de la thèse était de démontrer que la méthode de conception par l'expérimentation était adaptée pour répondre aux multiples enjeux de la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XX^e siècle. Après avoir éprouvé notre méthode sur les façades labellisées de l'immeuble Les Cèdres, il en ressort de nombreuses solutions possibles pour conduire sa réhabilitation en répondant aux demandes initiales : amélioration du confort thermique d'été comme d'hiver ainsi que du confort acoustique, réduction des consommations d'énergie, valorisation architecturale de l'édifice et préservation de la valeur patrimoniale des façades, le tout dans une enveloppe économique maîtrisée. Nous pouvons donc affirmer que la méthode utilisée a fait preuve d'une certaine efficacité et nous pourrions envisager de la transposer à d'autres opérations de réhabilitation similaires. L'exposé qui précède est cependant exhaustif et fastidieux. Nous proposons donc d'en faire une synthèse, illustrée par l'exemple de l'expérimentation menée sur l'immeuble Les Cèdres. Pour cela, nous avons établi un guide, en trois étapes itératives, fondé sur les processus et les résultats développés dans cette thèse, que nous avons synthétisé dans le tableau ci-contre.

La première étape fait appel à la mémoire des habitants et aux archives. Nous avons vu qu'avant toute intervention sur l'édifice, il était important de connaître ses caractéristiques architecturales, l'état initial, l'état actuel, et le vécu des habitants de l'immeuble. Cela passe par la consultation des sources primaires et par des échanges avec les habitants. Cette étape réalisée, il est possible d'établir le cahier des charges des diagnostics sur la base des connaissances déjà acquises. Les diagnostics techniques, architecturaux, patrimoniaux, thermiques et acoustiques, sont l'occasion de réaliser des mesures, des relevés sur l'édifice et ses façades, en fonction des points forts et faiblesses identifiés dans la première étape. Les résultats des mesures sont ensuite à confronter avec les perceptions des habitants sur leur immeuble et leurs façades. Celles-ci sont recueillies au moyen d'entretiens d'ambiances vécues avec des supports faisant appel à la mémoire des habitants, récoltés dans la première étape. Ensuite, la troisième étape consiste à expérimenter des hypothèses de solutions pouvant répondre aux enjeux soulevés par les deux étapes précédentes. Les résultats des expérimentations peuvent conduire à repositionner une hypothèse dans les premières étapes pour l'affiner. Ainsi, le processus est itératif et récurrent, jusqu'à apporter la meilleure solution

TABLEAUX GUIDES

Démarche proposée		Détails par étape	Principe de fonctionnement
É T A P E 1	Faire appel à la mémoire des habitants et des archives pour comprendre les problématiques rencontrées et les résistances du bâtiment au confort de vie (comparer le confort actuel de l'immeuble à ce qu'on peut attendre d'un logement aujourd'hui)	<ul style="list-style-type: none"> La mémoire des habitants, c'est celle des vécus. Elle fait état de l'habitabilité de l'édifice La mémoire des archives, c'est celle de l'architecture. Elle donne l'état initial du bâti, ses caractéristiques, et permet d'établir l'état d'authenticité de l'édifice 	<p>Le principe c'est l'itération et la récurrence entre les trois étapes. Chaque étape est l'occasion de ressaisir les résultats de l'étape précédente.</p>  <p>La mémoire et les relevés fournissent une base de connaissances et d'améliorations possibles sur laquelle on revient par le biais des perceptions et de la métrologie. Les mesures et l'étude des perceptions constituent alors un second niveau de connaissances et d'améliorations possibles sur lesquelles on se base et on revient par l'expérimentation.</p> <p>Le cheminement vers le projet et le chantier final n'est pas linéaire. Il est itératif et s'accroît à mesure que l'on assure de sa récurrence.</p>
É T A P E 2	Faire appel à l'étude métrologique et aux perceptions, architecturales comme ambiantales : ce qui se mesure et ce qui se vit	<p>L'étude métrologique c'est :</p> <ul style="list-style-type: none"> Le relevé et le diagnostic architectural et patrimonial, sur plans et en détails pour compléter l'état d'authenticité et établir l'état sanitaire Les diagnostics thermiques et acoustiques menés de concert, avec des outils et des protocoles fondés sur les ambiances vécues révélées dans l'étape 1 en faisant appel à la mémoire des habitants <p>L'analyse des perceptions passe par la réalisation d'entretiens auprès des habitants pour approfondir les échanges de l'étape 1. Les données recueillies sont ensuite comparées avec les résultats mesurés pour établir le diagnostic complet de l'édifice.</p>	
É T A P E 3	Faire appel à l'expérimentation pour tester les hypothèses (leur aspect visuel, leurs performances pour les cinq sens, leur habitabilité <i>in situ</i> , pour le chantier) et à l'économie	<p>L'expérimentation c'est le point d'aboutissement de la recherche grâce à la réalisation de prototypes qui sont testés afin de dresser le cahier des charges de la réhabilitation. Il est destiné aux gestionnaires, aux concepteurs, aux habitants.</p>	

TABLEAUX GUIDES

Exemple d'application du guide, par étape, dans cette recherche

Faire appel à la mémoire des habitants, à celle des vécus, pour faire état de l'habitabilité de l'édifice. Il n'est pas question de pratiquer une longue enquête qualitative ou quantitative auprès d'un échantillon représentatif, mais de recueillir, à peu de frais, un premier ensemble de commentaires et de sélectionner un certain nombre de situations exemplaires de ce qui est bien ou mal vécu par les habitants (par exemple les éléments soulignés ci-contre).
La technique est d'une grande efficacité pour une sélection rapide des situations confortables et inconfortables. On apprend rapidement quelques informations inédites sur l'usage et les représentations collectives du site donné.

Partant du constat que les occupants d'un logement sont ceux qui en connaissent le mieux les ambiances et en révèlent le plus les problèmes, nous avons associé les habitants à nos recherches dès les premières investigations afin de parfaire nos connaissances sur le bâtiment. Nous avons pu identifier ainsi les problématiques rencontrées par ce type de bâti et de façades et préciser les futures interventions en fonction des ressentis des habitants, et non plus seulement des normes, pour garantir leur confort.
Ce travail de communication avec les habitants a débuté avant le lancement de la thèse, en engageant de premiers échanges avec la Régie Franchet et C^{ie}, syndic de copropriété, à l'occasion d'une assemblée générale pour présenter la recherche. Nous nous sommes ensuite rendus fréquemment sur place et avons échangé régulièrement avec les copropriétaires. Les premiers commentaires recueillis ont permis d'identifier : un problème de confort d'été avec une façade sud très exposée au soleil qui génère la surchauffe des logements, et des habitants qui utilisent rarement la ventilation nocturne, gênés par l'environnement sonore ; un problème de confort d'hiver dû à des effets de parois froides et à des appartements en premier niveau non isolés par rapport aux caves, coursive et porche, et des appartements des derniers niveaux en surchauffe par le cumul des apports solaires et du chauffage ; enfin, un enjeu économique avec des profils variés de copropriétaires et majoritairement des faibles budgets ; Ces échanges informels nous ont également permis de préparer les entretiens des diagnostics d'ambiances vécues pour la deuxième étape, dans le but d'analyser les perceptions des habitants.

Faire appel à la mémoire des archives, à celle de l'architecture, pour évaluer l'état initial du bâti, ses caractéristiques, et établir l'état d'authenticité de l'édifice

L'analyse historique et la consultation des archives ont permis de replacer les façades légères de l'immeuble Les Cèdres dans leur contexte, de restituer l'histoire de l'édifice, de comprendre la conception des architectes et la méthode de construction mise en œuvre lors du chantier. Mettre en parallèle les façades de l'immeuble Les Cèdres avec des constructions contemporaines a également permis de comparer des programmes de réhabilitation de ce type de bâti et de façades. Ces éléments de mise en contexte ont alimenté les premiers chapitres de cette thèse et ont permis d'identifier des points de vigilances à observer lors des diagnostics.
En consultant les fonds d'archives de Jean Prouvé nous avons pu observer les détails techniques des panneaux et comprendre leur principe de montage sur chantier. Les panneaux sont montés depuis l'appartement le plus à gauche du premier étage de l'immeuble. Ils s'emboîtent ensuite latéralement, de gauche à droite et deux panneaux d'une même trame structurelle sont nécessairement démontés ensemble. Ils sont également montés niveau par niveau, le panneau supérieur s'emboîtant dans le panneau inférieur. De fait, ils doivent être démontés de l'étage supérieur à l'étage inférieur. En conséquence, la façade doit être entièrement déposée avant d'être entièrement remontée. Cette information, à vérifier sur place par des relevés, élimine de fait, les solutions nécessitant le démontage des panneaux.
Les détails ont également révélé la présence de nombreuses pièces d'assemblage dans les panneaux dont l'état sanitaire est à vérifier lors des diagnostics architecturaux.

É T A P E 1

TABLEAUX GUIDES

Exemple d'application du guide, par étape, dans cette recherche

<p>Faire appel à l'étude métrologique et aux perceptions, architecturales comme ambiantales par le relevé et le diagnostic patrimonial, sur plans et en détails pour compléter l'état d'authenticité et établir l'état sanitaire</p>	<p>Pour compléter et vérifier les données réunies sur l'édifice et ses façades lors de la consultation des archives, nous avons poursuivi nos investigations par d'importants relevés architecturaux sur site et notamment par des sondages réalisés dans un panneau de la loge du gardien, appartement de l'immeuble Les Cèdres, avec DECARE et l'entreprise KCM. Après avoir ciblé des points de sondages au niveau des assemblages visibles sur les détails d'archives, nous avons percé les panneaux depuis l'intérieur, relevé l'ensemble des composants et pu constater leur bon état de conservation, hormis les joints qui pour la plupart, étaient très altérés.</p>
<p>Faire appel à l'étude métrologique et aux perceptions, architecturales comme ambiantales par les diagnostics thermiques et acoustiques menés de concert, avec des outils et des protocoles fondés sur les ambiances vécues révélées dans l'étape 1.</p> <p>Cette étape permet de mélanger les points de vue des experts et des habitants, elle permet de valider une liste de travaux, de déterminer les raisons qui orienteront les choix, de fixer une limite quantitative en fonction des moyens dont on dispose, de distribuer de manière équitable le point de vue des experts, des habitants, du gestionnaire.</p>	<p>Afin d'apprécier très exactement les performances actuelles de l'immeuble Les Cèdres et de ses façades légères, ARCHIPAT, TRIBU, LASA et DECARE se sont attachés à dépasser les méthodes traditionnelles en les confrontant à une importante campagne de relevés sur site, sur un temps long. Il s'agissait en l'occurrence de confronter les modélisations théoriques à des prises de données concrètes sur site. Ainsi, la méthode même de diagnostic a fait l'objet d'innovations.</p> <p>Pour en définir le cahier des charges (disponible en Annexe 7), les bureaux d'études ont travaillé avec la doctorante architecte du projet, et l'ont appuyé sur les données révélées dans l'étape 1. <u>En engageant une démarche pluridisciplinaire dès la prise de connaissance de l'existant, nous avions pour objectif de cumuler différents regards afin d'anticiper la résolution des problématiques et d'éviter les choix contreproductifs comme prévoir une isolation thermique importante au détriment des ambiances acoustiques intérieures, rapporter un store extérieur très opaque pour protéger des rayonnements solaires au détriment de la luminosité des appartements, ou encore remplacer les menuiseries par des fenêtres standards efficaces thermiquement comme acoustiquement mais au détriment de la valeur patrimonial des façades.</u></p> <p>Nous avons donc choisi de réaliser un diagnostic mixte, thermique et acoustique, portant sur les configurations spatiales et l'exemplarité des ambiances qui s'y rattachent. L'architecture, les formes intérieures, les effets de la propagation sensible des usages et les habitudes des occupants ont alors été étudiées par TRIBU, LASA et la doctorante au sein d'ARCHIPAT, lors de visites, de prises de mesures et de relevés communs. L'appartement est décrit comme objet de perception, en considérant non seulement les effets des façades, mais aussi les processus de marquage (ouverture/fermeture des fenêtres, usages des loggias, ...) qui prennent une part capitale dans l'appropriation des lieux par les habitants. Des enregistrements sonores, des photos, des schémas aérialiques et climatiques sont réalisés pour accompagner cette représentation et l'enquête d'ambiances vécues auprès des habitants. L'intérêt de ce diagnostic mixte réside sur les phénomènes qualitatifs observés par les habitants et peu étudiés jusqu'alors (l'évaluation de la distance de conversation à voix normale dans les séjours fenêtres ouvertes, le confort bioclimatique de l'usager, ...). Il prend en compte la dimension patrimoniale de l'édifice, mais également l'impact de l'amélioration de l'enveloppe sur le confort, dans une recherche d'équilibre.</p> <p>La méthode de diagnostic est détaillée dans le chapitre 2 et les résultats sont exposés dans le chapitre 3.</p>

É T A P E 2

TABLEAUX GUIDES

Exemple d'application du guide, par étape, dans cette recherche

Faire appel à l'expérimentation, pour tester les hypothèses *in situ* (leur aspect visuel, leurs performances, leur habitabilité), et à l'économie

On choisit d'abord une ou plusieurs situations très représentatives, et connues de tous, d'une amélioration à faire.

Exemple 1 : le prototype pour le confort d'été : le store extérieur et les rideaux acoustiques intérieurs.

Couplée à l'isolation des pignons, sous-face de plancher et toiture, ainsi qu'à l'installation d'une ventilation hybride, au caloridageage des réseaux, à la mise en place de thermostats individuels, au raccordement de la production d'eau chaude sanitaire à la chaudière avec installation d'un bouclage et au remplacement des chaudières actuelles par des chaudières à condensation collective récentes, cette solution permettrait :

- d'atteindre le niveau BBC Rénovation avec de consommations annuelles en énergie primaire de 96 kWh/m²
- d'assurer la ventilation et le confort acoustique l'été.

En revanche, en hiver, il sera nécessaire de tirer les rideaux la nuit et le plus possible durant les périodes inoccupées la journée pour garantir le confort thermique des occupants, les rideaux permettant de dissiper les effets de parois froides lorsqu'ils sont fermés. Ils permettront ainsi de réduire encore les Cep. Mais pour des personnes sédentaires, cette solution ne permettra pas de renforcer durablement l'isolation des panneaux.

La question du confort d'été illustre parfaitement les principes d'expérimentations qui ont guidé cette recherche et servira ici d'exemple.

La surchauffe des logements par les rayonnements solaires et le faible recours à la ventilation nocturne par les habitants, empêchant de rafraîchir leur logement, nécessitent une intervention. Ainsi, un prototype de store extérieur a été réalisé, complété par des tests sur des rideaux acoustiques intérieurs permettant de moduler les flux lumineux, sonores et de ventilation.

- Le store extérieur :
Intégrer un store extérieur sur une façade légère de Jean Prouvé n'est pas chose aisée pour plusieurs raisons : garantir la préservation de la valeur architecturale et patrimoniale de l'édifice, réunir les conditions techniques nécessaires, assurer la protection solaire des logements tout en préservant la vue et la luminosité. Pour répondre à ces enjeux nous avons opté pour un store toile de mêmes dimensions que les panneaux, fixé à la structure du bâtiment par des platines positionnées dans les joints entre panneaux, rendant ainsi le store réversible sans altérer la façade. La toile a été choisie avec minutie et le modèle de store développé avec des fabricants (Serge Ferrari, Prodotti France) et des installateurs (Asymptote). Il a été installé sur la façade d'un logement habité de l'immeuble permettant à son occupant de le tester et de témoigner de son usage. Le prototype a ensuite été soumis à une batterie de tests permettant de consacrer son efficacité (-8,8°C sur la température globe ressentie d'un appartement, vue et luminosité préservées). Son installation sur place a permis de constater que la couleur prévue pour le prototype (gris galet) n'était pas satisfaisante, trop terne en comparaison des reflets immatériels de l'aluminium. L'équipe a donc poursuivi le développement de cette solution par des recherches de polychromie. Les caractéristiques et le détail des tests du prototype de store sont détaillés pages 291 à 299.
- Les rideaux acoustiques intérieurs :
Trois types de rideaux acoustiques (un rideau multicouches du commerce, un rideau en laine Showtix issu du monde du spectacle et un rideau multicouches Showtix également) ont été testés dans plusieurs configurations et avec plusieurs degrés d'ouvertures. L'objectif de l'utilisation de ces rideaux est de créer des chicanes entre les rideaux et la menuiserie coulissante, dans le but de faire circuler l'air pour la ventilation en bloquant au maximum les transmissions sonores de l'extérieur vers l'intérieur. Les tests acoustiques ont permis de constater que seuls les rideaux multicouches permettaient d'atteindre des niveaux d'isolement phonique suffisant. Le rideau en laine a donc été éliminé. Parmi les deux rideaux restants, le rideau Showtix présente de meilleures capacités d'isolement et a également l'avantage de couvrir la totalité du panneau à l'intérieur, créant une seconde façade textile, plus esthétique que le rideau du commerce. En revanche son coût est bien plus élevé. Les tests, détaillés pages 301 à 304 montrent que cette solution peut être efficace pour la ventilation nocturne.

É T A P E 3

TABLEAUX GUIDES

Exemple d'application du guide, par étape, dans cette recherche

On choisit ensuite une (ou plusieurs) situation expressive, au sens qu'elle exprime un vécu, une certaine façon de vivre le bâtiment. Certes, le rapport au bâtiment varie selon les habitants, mais dans les faits ils partagent un certain nombre de demande, par exemple celle de ventiler l'été, notamment la nuit, en gérant le bruit. Ainsi, la double façade est une réponse possible, qui représente cependant un investissement conséquent.

Exemple 2 : le prototype double façade, confort d'hiver et modulation des ambiances

Cette hypothèse a émergé de notre volonté de pouvoir conserver ou restituer l'intégralité des panneaux Prouvé dans leurs dispositions originelles et de reporter les performances sur une double façade intérieure, dessinée et calibrée pour :

- isoler thermiquement les appartements l'hiver et augmenter l'inertie des appartements grâce à un doublage en fibre de bois et à l'installation d'une deuxième fenêtre performante, en bois ou en aluminium, plus large que la fenêtre initiale pour préserver sa visibilité depuis les appartements. Nous avons favorisé les matériaux biosourcés pour réduire l'empreinte carbone du chantier. De plus, la fibre de bois possède de bonnes propriétés phoniques rejoignant le point suivant.
- isoler acoustiquement la façade, y compris les ponts phoniques aujourd'hui présents entre la structure du bâtiment et le mur rideau, grâce au complexe fibre de bois + Fermacell et à l'ajout d'une double fenêtre équipée d'un double vitrage 4/16/4. Le Fermacell apporte également de la masse aux façades pour contrer la transmission des basses fréquences sonores (moteurs de véhicules). L'ajout de doubles vitrages asymétriques et feuilletés pourra permettre d'augmenter encore les performances de cette double façade. Cependant, les calculs du bureau LASA démontrent que cette hypothèse, avec un double vitrage classique, peut avoir une capacité d'isolation acoustique d'au moins 40 dB (Dnta,tr).
- moduler les flux de ventilation afin de garantir le confort thermique d'été, grâce à des chicanes générées entre la fenêtre d'origine et la nouvelle fenêtre, laissant circuler l'air tout en limitant les transmissions sonores.

Les tests et mesures *in situ*, ainsi que les calculs de simulation, ont consacré l'efficacité de cette solution. Seule, elle permet de réduire les consommations annuelles en énergie primaire de 35 kWh/m², les faisant passer de 171 kWh/m² à 136 kWh/m². En la combinant avec l'isolation des pignons, de la sous-face de plancher et de la toiture, ainsi qu'à l'installation d'une ventilation hybride, au calorifugeage des réseaux, à la mise en place de thermostats individuels, au passage à une production d'eau chaude sanitaire collective dotée d'un bouclage et enfin au remplacement des chaudières actuelles par des chaudières à condensation collective récentes, elle atteint le meilleur niveau de performances énergétiques avec des consommations annuelles en énergie primaire de 61 kWh/m².

Associée à l'installation d'un store extérieur, il s'agit actuellement, de la seule solution qui permet de répondre à l'ensemble des enjeux fixés pour la réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres : retour à un état d'origine et homogène des façades, performances thermiques d'hiver, confort acoustique y compris lors de la ventilation naturelle en été, confort thermique d'été grâce aux protections solaires et au recours à la ventilation naturelle, modulation des ambiances par et pour les habitants, réduction des consommations énergétiques de l'immeuble. L'installation des prototypes a cependant fait émerger un certain nombre de questions de la part des copropriétaires qui demandaient des développements supplémentaires : épaisseur du doublage, praticité de la manipulation de doubles fenêtres, investissement dans deux fenêtres dont une à l'intérieur en partie privative.

É T A P E 3

TABLEAUX GUIDES

Exemple d'application du guide, par étape, dans cette recherche

On choisit enfin une situation « sensible », au sens où elle correspond à l'identité du bâtiment, où elle en exprime le « sentiment », la « perception » (qui évoque les wagons d'un train...). C'est une situation qui exprime la place du bâtiment dans l'histoire et dans le quartier, dont « l'urbanité » est difficile à expliquer. Par exemple, la façade en aluminium est lisse et réfléchit la lumière et le ciel. Comment intégrer ces spécificités dans la réhabilitation ?

Exemple 3 : aspect architectural du store extérieur

L'intégration du store extérieur a demandé une attention particulière tant d'un point de vue technique qu'architectural. Partant du constat que la façade Prouvé initiale est constituée de panneaux assemblés de mêmes dimensions, en aluminium, dont la trame est marquée uniquement par de minces joints creux, lui conférant un aspect lisse, il nous a semblé important de préserver ces principes malgré l'ajout de stores au-devant des panneaux.

- Aspect lisse :

Pour préserver cet aspect lisse, nous avons privilégié l'installation de stores toiles, formant un écran devant les façades, plutôt que des brises-soleil orientables ou à lames fixes qui auraient apportés des volumes supplémentaires qui nous semblaient inadaptés.

L'exposition aux intempéries et la garantie des stores par le fabricant exigeaient leur mise en œuvre avec un coffre protégeant l'enrouleur et la toile. Pour éviter toute saillie en façade et conserver son aspect lisse, nous avons posé le store à l'envers, en porte à faux de la façade pour ne rendre visible que le capotage lisse du coffre. Pour cela, nous avons dessinée, conçue et fabriqué avec l'entreprise Prodotti des platines permettant de fixer le store à la structure au niveau des joints entre panneaux en le tenant à distance de la façade d'origine. Ces platines permettent également de conserver des joints creux entre les stores.

- Trame/dimensions:

Ainsi, nous avons choisi d'équiper la façade sud de stores de mêmes dimensions que les panneaux Prouvé et non de stores couvrant uniquement les menuiseries. Cela présente le double avantage de pouvoir protéger également les parties pleines des panneaux des rayonnements solaires et d'abaisser ainsi leur température de surface, ce qui a une incidence sur le confort d'été des occupants.

Compte tenu des grandes dimensions des toiles et de leur installation sur un immeuble de neuf étages exposé à des vents dominants, celles-ci devaient être maintenues dans des coulisses et équipées d'une barre de charge suffisamment importante pour assurer leur tension permanente. Afin d'harmoniser le dessin d'ensemble, nous avons demandé à l'entreprise que la barre de charge et les coulisses possèdent les mêmes dimensions, composant ainsi un cadre uniforme à la toile une fois le store baissé.

Après observation et utilisation du prototype, il nous semble pertinent d'ajouter une barre horizontale en partie basse pour relier les coulisses, les rigidifier et conserver le cadre du panneau même lorsque la toile est relevée.

- Couleur/matérialité :

Enfin, les panneaux de Prouvé sont couverts d'une feuille d'aluminium ondulée qui leur donne un aspect quasi immatériel, aux multiples reflets évoluant selon les lumières, l'environnement et la teinte du ciel. Pour le prototype, pensant proposer une solution homogène, nous avons opté pour un store uni gris galeat. En observant le prototype sur la façade, cette couleur apparaît relativement terne par rapport à l'aluminium, attristant l'aspect des façades. Nous avons alors porté nos réflexions vers une polychromie de teintes inspirées des reflets pris par l'aluminium au fil de la journée. La polychromie facilite également le remplacement d'un store dont l'aspect neuf pourrait jurer avec les teintes déjà usées de ces voisins.

É T A P E 3

possible. Des exemples de développements de chacune des étapes sont présentés dans les tableaux suivants, illustrés par des cas pratiques observés lors de la recherche.

Nous pensons que ce guide pourra s'appliquer à d'autres édifices dotés de façades légères, mais également à tout édifice disposant d'une valeur architecturale et patrimoniale qui nécessite une réhabilitation comprenant des enjeux de confort des occupants et environnementaux. En effet, cette méthode a démontré la capacité de concilier conservation du patrimoine et amélioration des conditions de vie. Plus qu'une réhabilitation nous avons conduit une opération d'amélioration d'un édifice existant en conservant sa substance, son identité et sa matérialité dans une recherche d'interventions économiques en deniers comme en matière. Au-delà des solutions, qui sont propres au cas de l'immeuble Les Cèdres, c'est donc la méthode qui, en définitive, constitue le principal résultat de cette recherche ; définie selon un principe d'itération.

Conclusion

Partie 1 : Rappel des questions et des objectifs de la recherche

L'intervention sur l'architecture du XX^e siècle constitue un défi majeur pour les professionnels qui œuvrent aux réhabilitations architecturales en intégrant une démarche de transition écologique. Au moment même où la démarche environnementale affiche toute sa pertinence pour viser une gestion plus éco-responsable de la planète, la réhabilitation de l'existant exige plus que jamais un partage disciplinaire entre professionnels, ne serait-ce que pour arrêter des choix sur des questions aussi essentielles que celle de la matérialité des structures, des états des revêtements et des finitions, ainsi que sur des techniques constructives et de chantier tout en tenant compte des ambiances vécues par les habitants. Quels enjeux recouvrent aujourd'hui les démarches d'expérimentation considérant qu'il est essentiel de préserver les qualités historiques et patrimoniales de l'existant tout en tenant compte des conditions économiques des occupants comme des exigences normatives notamment en termes de confort ? Quelles hypothèses de travail soulève une telle démarche de projet appliquée à une copropriété dont les qualités historiques et patrimoniales ont été confirmées par les différents diagnostics ?

Ce projet de recherche poursuivait l'ambition de définir une démarche exemplaire susceptible de trouver des développements contemporains pour réhabiliter des logements possédant des façades légères labellisées, en ayant un impact de chantier réduit sur l'intervention et le coût, en améliorant les ambiances de vie des occupants à partir de cette idée simple que les citoyens – qui historiquement ont de tout temps cherché à moduler leurs perceptions sensibles du logement, du voisinage, de l'environnement – vont avoir à gérer un changement climatique déjà opérant.

L'hypothèse privilégiée était de renforcer l'enveloppe légère initiale par une seconde enveloppe économique constituée de matériaux biosourcés, en travaillant sur les filières de la région Auvergne-Rhône-Alpes, considérant que les logements construits dans cette région lors de la seconde moitié du XX^e siècle font l'objet de stratégies drastiques d'amélioration thermique sans évaluation des dégradations du confort lumineux, sonore et du flux ventilant

qui en résultent¹⁷². De ce qui précède découle la finalité de cette démarche expérimentale : définir un guide de diagnostic et d'intervention pouvant s'adapter au secteur économique qui s'illustre aujourd'hui sur ce type de bâti tout en privilégiant une approche éco-responsable et coconstruite de la réhabilitation.

Partie 2 : Améliorer l'existant par des pratiques expérimentales

Le guide, qui offre une méthodologie d'analyse de la qualité architecturale, constructive et ambiante d'un bâtiment, ne se limite pas à une évaluation des corrélations possibles entre l'architecture existante et le niveau de confort à atteindre en fonction de la gêne ou des normes environnementales à respecter. Il invite les acteurs du projet à prendre en compte d'autres dimensions, comme celles du vécu des habitants, qu'il s'agisse de l'habitabilité – appréhendée ici en un sens étendu –, des moyens économiques des copropriétaires comme de l'écoresponsabilité dans la mise en œuvre, autant d'aspects habituellement négligés, voire ignorés, dans les logiques de réhabilitation relatives aux logements construits après la Seconde Guerre mondiale. Le détail de la mise en œuvre des trois outils proposés que sont le diagnostic architectural, le diagnostic ambiantal et la pratique expérimentale « critique » à échelle 1 – qui vise à expérimenter des dispositifs permettant de dépasser la « résistance » du bâtiment initial à l'amélioration du confort de vie des habitants – entend poser les fondements d'une méthode de référence pour toute étude portant sur les questions de transformation des existants. Le guide ambitionne ainsi de renouveler les pratiques habituellement mises en œuvre au sein des agences d'architecture et de faire évoluer la culture des différents acteurs qui interviennent dans le cadre d'un projet de réhabilitation – au-delà du seul dialogue de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage – pour sensibiliser les habitants et les gestionnaires ainsi que l'ensemble des entreprises prestataires. Là où généralement, le projet de rénovation ou de réhabilitation s'en tient à des points environnementaux et patrimoniaux obligés, la méthode consiste à identifier également des points d'expérimentation critiques dans une analyse multiscalaire destinée à appréhender l'existant dans une visée s'intéressant tout particulièrement aux problématiques liées aux questions d'habitabilité. Qu'il s'agisse de constructions sérielles ou de bâtiments de logements de natures constructives différentes, l'outil méthodologique mis au point peut également servir de point de départ à une démarche

172. Franz Graf et Giulia Marino (dir.), *Les Dispositifs du confort dans l'architecture du XX^e siècle : connaissance et stratégie de sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2016, 535 p.

comparative à l'échelle européenne. C'est ainsi que, tout en revendiquant sa filiation avec les expérimentations du laboratoire TSAM de l'EPFL, la méthodologie proposée s'en distingue sensiblement en appréhendant en particulier la question des ambiances et du confort dans une stratégie globalisante.

Le guide propose une démarche de conception/expérimentation synergique. Dans ce cas du projet de réhabilitation de l'immeuble lyonnais, cette démarche entend dépasser les seules questions posées par la restauration de la façade de 1961 et la mise aux normes thermiques du bâtiment pour proposer des expérimentations et des expériences réactualisables et opératoires. En ce domaine, la restitution d'un « état » historique pose de fait la question de la prise en compte des multiples transformations (isolation par l'intérieur, ajout de stores, remplacement des menuiseries, dispositifs d'étanchéité, etc.) qui, quelques années seulement après la livraison de l'immeuble, ont cherché à corriger les imperfections des façades originelles, mais encore de l'évolution des besoins des habitants, des inconforts générés par la façade et de ses altérations au fil des décennies. De la même manière, la seule prise en compte du confort des habitants pourrait privilégier des scénarios conduisant au remplacement complet des façades originelles au risque de faire perdre à l'immeuble tout caractère historique et patrimonial. Dès lors, il convient de réfléchir à des dynamiques de projet susceptibles de concilier la préservation du patrimoine, la mise aux normes de l'immeuble et l'amélioration des conditions d'habitabilité considérant que la demande des habitants portait prioritairement sur l'amélioration du confort thermique d'été. Dans ces conditions, c'est un exercice collectif qui a été engagé dans le cadre de ce doctorat CIFRE au sein de l'agence d'architectes du patrimoine archipat (Lyon) et de la chaire « Habitat du Futur », dans l'idée de développer une véritable synergie entre les acteurs.

Partie 3 : L'isolation des façades, une condition préalable ?

Dès lors, comment transformer une façade qui « résiste » à la demande de confort pour fabriquer une façade qui permet de piloter les ambiances ? L'étude a certes mis en évidence le caractère patrimonial de la résidence Les Cèdres, mais elle a aussi permis de révéler des problématiques majeures, communes à de nombreux immeubles dotés de façades légères, à commencer par le confort d'été. La surchauffe des logements, dont les séjours sont orientés plein sud, devient insupportable pour l'ensemble des copropriétaires surtout en période

estivale. En protégeant la façade des rayonnements solaires, les températures de surfaces de celle-ci s'en voient réduites ainsi que la température d'air du logement, le rendant plus confortable. C'est ainsi que plusieurs solutions de protections solaires ont été envisagées. Néanmoins, face aux températures relevées dans les logements en été, à la difficulté de certains copropriétaires à supporter ces fortes chaleurs, souvent les plus âgés ou les jeunes enfants, à l'augmentation des températures et de la fréquence des épisodes caniculaires, nous estimons que seule une protection solaire extérieure apposée sur la surface totale du panneau – et pas uniquement sur la fenêtre – peut apporter une solution durable. De plus, la solution de store extérieur imaginée possède une incidence réduite sur la physionomie architecturale de l'immeuble en respectant sa valeur patrimoniale¹⁷³. La qualité de la ventilation joue également un rôle majeur dans le confort d'été et demeure fortement dépendante des comportements des habitants, raison pour laquelle les hypothèses se sont orientées très tôt vers la pose de rideaux acoustiques intérieurs, conçus pour isoler phoniquement et absorber les sons en laissant circuler l'air l'été (-7 dB(A) environ)¹⁷⁴ tout en diminuant fortement l'effet de paroi froide l'hiver¹⁷⁵. On le sait, les façades légères manquent singulièrement de capacité d'isolation – dans notre cas 19 dB(A) pour un niveau moyen de 58 dB(A) le jour et 52 dB(A) la nuit. Bien qu'elles soient dotées d'une faible épaisseur d'isolant (environ cinq centimètres), celle-ci est insuffisante pour assurer la bonne inertie de l'édifice, garante de la conservation de la fraîcheur dans les logements en été, de l'isolation au froid extérieur et de la réduction des déperditions de chauffage en hiver. Les panneaux sandwichs de l'immeuble lyonnais, de six centimètres d'épaisseur, n'échappent pas à ce constat. Dès lors, comment isoler les parties pleines des panneaux Prouvé ? Une multitude de types d'isolants existe, mais le choix s'est très tôt porté, en concertation avec les bureaux d'études, fabricants et compagnons, sur la fibre de bois en raison de ses propriétés acoustiques isolantes, sa résistance thermique et sa densité ; autant

173. Cette solution, raisonnable d'un point de vue financier (5 100 € HT pour les trois panneaux façade sud d'un T4), revient 273 000 € HT pour la réhabilitation totale de l'immeuble dont les estimations oscillent entre 2 212 500 € HT et 2 280 500 € HT selon les options, mais ne permet pas, si elle est utilisée seule, d'obtenir des subventions de l'État. Tout au plus, cette hypothèse permet d'améliorer de 8,8°C la température globe (ressentie) des logements l'été, ce qui constitue un bénéfice non négligeable.

174. Pour un coût de 14 500 € HT environ pour un T4, on diminue de 8,8°C la température globe ressentie l'été et on diminue de 7dB(A) le niveau sonore des bruits extérieurs en assurant le rafraîchissement de l'appartement la nuit.

175. Ce gain en isolement de 5 à 7 dB(A), fenêtre sud entièrement ouverte, devient 24 à 26 dB(A) quand la fenêtre est réglée à 10 % d'ouverture pour la ventilation, soit un niveau sonore nocturne moyen dans le logement voisinant les 28 à 26 dB(A), un niveau tout à fait compatible pour le sommeil et la ventilation naturelle du logement – le niveau moyen nocturne extérieur relevé à 52 dB(A) contient cependant des pointes à 70 dB(A). Le jour, ce rideau améliore les conditions de discussion des personnes à table ou installées dans le salon, ainsi que la luminosité parfois éblouissante dans la pièce, ceci pour un investissement modique de 650 € HT pour les trois panneaux façade sud y compris loggia d'un T4 (3 500 € HT pour un tissu plus performant).

de qualités qui influent également sur le comportement acoustique des façades. Les questions soulevées conjointement par l'isolation thermique et acoustique conduit nécessairement à développer des stratégies pour améliorer les menuiseries et les vitrages. Or, en ce domaine, le prototypage destiné à recréer une menuiserie double-vitrage sur le modèle de celles conçues par Prouvé a été un échec principalement en l'absence de filière industrielle susceptible de refabriquer ce type de fenêtres. Anticipant une telle contrainte, nous avons orienté les recherches vers des doubles fenêtres intérieures associées à la restauration des menuiseries d'origine encore en place sachant que seul 20 % des fenêtres d'origine sont conservées et que la généralisation de cette solution à l'ensemble des façades, dans le but de retrouver leur homogénéité, implique de refabriquer à l'identique les fenêtres Prouvé disparues. L'opération consisterait alors à fabriquer une menuiserie simple vitrage, pour restituer aux façades leur harmonie et à reporter les performances ambiantales – thermique, phonique et flux ventilant – sur la double fenêtre intérieure¹⁷⁶.

La réhabilitation d'un immeuble comme celui faisant l'objet de l'expérimentation ne pouvait se limiter à la seule intervention sur les façades légères. L'amélioration du confort des occupants et des performances de l'immeuble nécessite d'intervenir sur d'autres postes, notamment sur l'isolation de la globalité de l'enveloppe. C'est ainsi que les scénarios se sont orientés successivement vers l'isolation de la sous-face du plancher du premier étage pour réduire de 10 % les besoins de chauffage, pour un budget global de 63 000 € HT, et celle des murs-pignons pour un coût estimé à 64 000 € HT, cette dernière intervention permettant de réduire les besoins de chauffage de l'ordre de 23 %. Ces interventions représentent des investissements importants pour les copropriétaires, mais sont absolument nécessaires pour réduire suffisamment les consommations en énergie primaire de l'immeuble afin d'obtenir des aides au financement des travaux¹⁷⁷. La toiture terrasse ayant fait l'objet de travaux d'isolation ces dernières années, ce poste a été retiré de l'estimation globale¹⁷⁸.

176. Le budget, hors doublage thermique et acoustique de la façade, est de 269 000 € HT pour la pose d'une double fenêtre en bois sur l'ensemble des menuiseries de l'immeuble, 337 000 € HT pour une double fenêtre en aluminium. Pour un T4, cela représenterait un investissement situé entre 11 800 € HT et 12 900 € HT y compris le doublage intérieur isolant thermique et phonique des deux façades. La restauration et la refabrication des menuiseries Prouvé d'origine sont estimées à 439 000 € HT, soit une enveloppe budgétaire avec les doubles fenêtres et l'isolant intérieur atteignant 708 000 € HT (19 200 € HT pour un T4 avec double fenêtre bois).

177. Les deux actions cumulées permettent de réduire de 31 kWh/m² les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble qui sont actuellement de 171 kWh/m².

178. De fait, nous envisageons de nous en affranchir et de réduire ainsi de 80 000 € HT le coût global des travaux. Cela permettrait de réduire de 1 332 € HT le coût rapporté à un T4 pour l'isolation de l'enveloppe globale, qui s'élèverait alors à 4 452 € HT.

Par nature, les façades légères possèdent une masse faible. Pourtant, celle-ci est nécessaire à l'isolement acoustique d'une paroi face aux basses fréquences, majoritairement générées par la circulation des véhicules motorisés qui constitue la principale nuisance à laquelle l'immeuble est soumis. Sur les conseils du bureau d'étude LASA, deux types de matériaux capables d'apporter une masse suffisante à la paroi avec une faible épaisseur ont été testés : des panneaux de Fermacell ou Knauf contrapanel. L'ajout de ces éléments sur l'ensemble de la surface intérieure des panneaux de façades permet d'isoler les ponts phoniques aujourd'hui très présents au niveau des joints entre panneaux et des nez-de-structure, permettant aux sons de circuler du dehors vers le dedans, comme d'un appartement à l'autre. Après l'expérimentation de ces matériaux sur les prototypes, les panneaux de façade avec des plaques de Fermacell, moins coûteux et plus faciles à mettre en œuvre, ont été retenus. La performance énergétique d'un immeuble ne dépend pas uniquement de son enveloppe, elle peut aussi être améliorée grâce à l'optimisation des systèmes de chauffage et de ventilation sachant qu'il est toujours préférable de prévoir une amélioration conjointe des systèmes et de l'enveloppe, les besoins en chauffage et ventilation dépendant des caractéristiques des façades. Sur les conseils du bureau d'étude TRIBU, nous avons ciblé des interventions nécessaires au bon fonctionnement de l'immeuble : l'installation d'une chaudière gaz à condensation collective, le raccordement de l'eau chaude sanitaire à la chaudière, le calorifugeage réseaux, l'installation de thermostats individuels permettant à chacun de réguler son chauffage, et l'installation de ventilation hybride avec des assistances mécaniques pour l'extraction de la ventilation naturelle¹⁷⁹. Ces interventions sont rendues nécessaires pour l'obtention du label BBC rénovation en réduisant de 39 kWh/m² les consommations annuelles en énergie primaire de l'édifice, anticipant ainsi d'éventuelles futures obligations réglementaires et ouvrant l'accès à des subventions supérieures¹⁸⁰. Malgré l'investissement important que ce dernier poste représente, il semble essentiel de l'envisager de manière globale afin d'obtenir les subventions nécessaires à la réalisation des travaux de réhabilitation.

179. Ces assistances motorisées peuvent générer des nuisances sonores qui nécessiteront d'isoler acoustiquement les gaines d'extractions pour ne pas créer de nouveaux inconforts phoniques aux habitants.

180. Ces travaux représentent un investissement important de 405 500 € HT soit 6 762 € HT sur le coût rapporté à un T4.

Partie 4 : Une solution idéale et des hybridations possibles

La solution idéale consisterait alors à réaliser un doublage intérieur en fibre de bois de 14,5 cm, avec un isolant phonique Fermacell et une double fenêtre ; à équiper les panneaux de stores extérieurs pour l'été ; à restaurer ou refabriquer les menuiseries d'origine Prouvé ; à réaliser l'isolation globale de l'enveloppe, comprenant sous-face de plancher, murs-pignons et toiture ; et enfin à réaliser l'ensemble des interventions sur les systèmes de chauffage et de ventilation. Cette intervention permettrait de réduire de 110 kWh/m² les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble – garantissant l'obtention des subventions liées au label BBC Rénovation – et d'atteindre l'ensemble des seuils de confort fixés lors des diagnostics tout en conservant la matérialité des façades et en restituant en particulier les menuiseries Prouvé disparues. Mais en raison des contraintes financière inhérentes à un tel chantier, des solutions hybrides ont été étudiées consistant par exemple à installer la ventilation naturelle assistée et le réglage individuel du chauffage et à s'affranchir de la surisolation de la toiture pour les travaux portant sur l'enveloppe globale. Cette solution permettrait certes de répondre aux principaux besoins des copropriétaires mais ne permet pas d'atteindre le label BBC Rénovation, qui exige des consommations annuelles en énergie primaire inférieure à 96 kWh/m². Cependant, nombre de subventions sont conditionnées par une réduction de 35 % des Cep, largement atteinte avec ce bouquet de travaux. Il est également possible d'envisager des combinaisons entre les différentes solutions consistant par exemple à ne pas modifier les façades actuelles, à installer des doubles fenêtres et à restaurer celles d'origine uniquement sur la façade sud, la plus visible ; dernière solution qui pourrait être privilégiée d'un point de vue architectural et patrimonial ou encore, pour la façade nord, installer des doubles fenêtres uniquement sur les panneaux ayant conservé leurs fenêtres d'origine, et pour les autres, garder leurs fenêtres double vitrage actuelles et installer un rideau acoustique.

Cette solution hybride présente bien sûr un compromis qui n'est pas totalement satisfaisant d'un point de vue patrimonial et architectural, et il ne constitue qu'un exemple parmi d'autres variations qui pourraient être discutées avec les copropriétaires dans le but de réaliser un maximum d'améliorations, tout en respectant leur budget et avis. Le temps de l'expérimentation étant achevé, les copropriétaires et la régie Franchet envisagent de missionner l'équipe pour la poursuite des études et la réalisation d'une faisabilité en vue de la mise en œuvre des travaux. L'expérimentation aura permis une collaboration étroite avec les copropriétaires, motivant ceux-ci à réaliser cette réhabilitation pour valoriser le patrimoine de leur immeuble.

Partie 5 : Poursuite du développement des solutions avec les copropriétaires

La poursuite des échanges avec les copropriétaires nous a d'ailleurs amené à réfléchir à une autre solution. Considérant les difficultés liées à l'installation de la double fenêtre et du doublage isolant par l'intérieur (perte de surfaces dans les appartements, pertes de la sensation de l'ouverture vers l'extérieur, difficultés d'usages liées à la manipulation et à l'entretien des deux fenêtres, réticences des copropriétaires à investir dans deux fenêtres neuves), nous avons réfléchi à une solution qui impliquerait une intervention minimale sur les panneaux de façades en eux-mêmes. Cette option consisterait à réaliser les travaux de maintenance et d'étanchéité de la façade¹⁸¹ ; l'isolation par l'extérieur de la sous-face de plancher du premier niveau, des murs pignons et de la toiture ; et l'ensemble des interventions sur les systèmes de production et de distribution individualisée du chauffage et de la ventilation¹⁸². Sans intervenir sur les façades légères, ces travaux permettraient de réduire les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble de 75 kWh/m², atteignant ainsi le seuil du label BBC Rénovation. A ces interventions s'ajouteraient la pose des stores extérieurs et l'installation des rideaux acoustiques, a minima en façade nord, pour améliorer le confort d'été des appartements, principale problématique des copropriétaires, en les protégeant des rayonnements solaires et en favorisant leur recours à la ventilation nocturne. Ces travaux représenteraient un investissement de 1 341 000 € HT pour l'ensemble de l'immeuble soit 22 350 € HT pour un T4 et 10 850 € HT après subventions Ecorenov' et programme « Habiter Mieux » de l'Anah. Les rideaux acoustiques pourraient également être installés sur les deux façades, rendant possible la ventilation nocturne traversante tout en garantissant le confort acoustique des copropriétaires. Les rideaux sur les deux façades permettraient également de réduire les effets de parois froides en hiver, ce qui serait opportun sans le doublage isolant. Dans ce cas, le coût d'investissement serait de 1 621 000 € HT pour l'ensemble de l'immeuble soit 27 017 € HT pour un T4 et 15 517 € HT après subventions. Cette solution, qui permettrait d'améliorer considérablement le confort thermique d'été de l'immeuble tout en réduisant ses consommations d'énergie, n'est cependant pas tout à fait satisfaisante d'un point de vue

181. Dépose des bavettes et couvre-joints rapportés sur les panneaux ; réfection de l'étanchéité ; remplacement des joints ; nettoyage des panneaux.

182. L'installation de ventilations hybrides, le calorifugeage des réseaux, l'installation de thermostats individuels, le passage à une production d'eau chaude sanitaire collective et le remplacement de la chaudière par une chaudière à condensation.

patrimonial, puisqu'elle ne permet pas de retrouver l'homogénéité de la façade et le dessin d'origine des menuiseries. En effet, dans cette hypothèse, il n'a pour le moment pas été question d'intervenir sur les menuiseries. Les façades conserveraient donc leur état actuel avec environ 25% de menuiseries d'origine et 75% de menuiseries remplacées selon des modèles variés. Nous pourrions cependant envisager de retravailler l'hypothèse de restauration et restitution des menuiseries d'origine en double vitrage. La principale difficulté que soulevait cette hypothèse portait sur l'intégration des rupteurs de ponts thermiques qui auraient épaissis les profils de menuiseries et n'auraient pu être cintrés dans le rayon initial pour former les angles arrondis. Nous pourrions alors nous interroger sur les conséquences de la mise en place de menuiseries reprenant le dessin de Prouvé, équipées de double vitrage, mais sans rupteurs de ponts thermiques. D'après les estimations réalisées par le cabinet Denizou, cette intervention de restauration et restitution aurait un coût supplémentaire de 507 000 € HT, portant le budget global de cette nouvelle hypothèse à 2 128 000 € HT, soit 35 500 € HT pour un T4. Ces coûts restent certes inférieurs à ceux de la solution « complète » incluant le doublage isolant intérieur, la double fenêtre, l'isolation de l'enveloppe globale et l'ensemble des interventions sur les systèmes. En revanche, ces menuiseries, avec leurs ponts thermiques, pourraient dégrader le bilan énergétique de l'opération. En effet, le seuil BBC Rénovation de 96 kWh/m² de consommation en énergie primaire par an était atteint avec les menuiseries dans leur état actuel, donc avec 75% d'entre elles dotées de double vitrage, de rupteurs de ponts thermiques et de profils remplissant les conditions d'isolation thermique normatives. En réinstallant des menuiseries en aluminium sans rupteurs, même en double vitrage, leurs performances seront inférieures aux menuiseries actuelles du commerce. Il restera à les évaluer d'un point de vue du confort des habitants. Concernant les subventions, nombre d'entre elles sont conditionnées par une réduction de 35% des consommations annuelles en énergie primaire, ce qui correspond à 111 kWh/m² pour l'immeuble Les Cèdres. Si cette solution permet d'atteindre ce niveau, les copropriétaires pourront être subventionnés à hauteur de 10 000 € par logement via le dispositif Ecorenov' et le programme « Habiter Mieux » de l'Anah, contre 11 500 € lorsque le seuil BBC Rénovation est atteint. Ces subventions porteraient le coût d'investissement pour un T4 à 25 500 € HT. Ce budget est quasi-équivalent à celui énoncé pour la solution « complète » tout en ayant l'avantage de ne pas réduire la surface intérieure des logements et de faciliter les manipulations des fenêtres par les habitants. Il faut néanmoins être conscient qu'opter pour cette solution revient à se priver d'un doublage isolant sur les principales façades de

l'immeuble et à admettre des fuites thermiques au niveau des châssis. Ces choix demandent d'être évalués en termes d'ambiances vécues et non plus seulement par des évaluations techniques. La poursuite des travaux avec les copropriétaires pourra mener à la réalisation d'un ultime prototype qui permettrait de conserver les façades légères dans leur plus grande intégrité, jusque dans leur finesse, et de les améliorer par l'adjonction d'éléments réversibles.

Partie 6 : Une méthode transposable ?

Notre travail de recherche apporte des résultats notamment sur la connaissance des façades légères de Jean Prouvé et plus largement sur cette technique de construction particulière. La réalisation de prototypes et leur mise en place *in situ* ont permis de répondre à l'ensemble de nos questionnements et d'orienter la conception afin d'adapter les solutions aux vécus des habitants tout en maintenant l'équilibre entre amélioration du confort, conservation du patrimoine, réduction des consommations d'énergie, et recherche de solutions économiques. Cette méthodologie est susceptible d'être transposée à d'autres immeubles dotés de façades légères, ou non, afin d'amorcer la réhabilitation de ce parc de logements spécifique tout en conjuguant transition écologique et conservation de leur valeur patrimoniale dans un équilibre subtil entre le confort global des habitants et l'amélioration des performances de l'enveloppe des immeubles.

Si le guide permet de bien représenter « l'identité » du bâtiment, au travers de sa pensée constructive et de son vécu, s'il permet aussi de proposer aux habitants des dispositifs de modulation des ambiances intérieures au grès de leurs perceptions, il n'en reste pas moins que chaque projet est unique, chaque édifice possède ses propres caractéristiques, ses propres besoins qui dépendent de la nature de son architecture, de son environnement comme de son orientation, la composition de ses parois, son état sanitaire et de nombreux autres facteurs. À bien des égards, la dynamique mise en œuvre sur ce projet démonstrateur se fait l'écho de l'importance décisive de l'innovation technique et de l'expérimentation dans la culture des figures œuvrant au cours des décennies de l'après Seconde Guerre mondiale. Toutefois, la transposition des hypothèses développées sur d'autres immeubles reste sujette à discussions. En réalité, il ne peut exister de solution unique, chaque bâtiment doit faire l'objet d'une étude circonstanciée afin de trouver une solution adaptée. En revanche, les grands principes énoncés et les solutions explorées lors de la recherche sont susceptibles de constituer le véritable

fil conducteur d'entreprises à venir au regard d'un équilibre entre les enjeux patrimoniaux, thermiques, acoustiques, énergétiques, environnementaux et de confort : état sanitaire, maintenance et étanchéité de la façade ; protections solaires, occultations ; doublage, isolation thermique, isolation acoustique ; conservation des menuiseries d'origine, ou installation de menuiseries à double vitrage, ou installation de doubles fenêtres ; optimisation des systèmes de chauffage et de ventilation ; comportement des occupants (ventilation nocturne par exemple), etc.

Nous l'avons vu, une telle démarche implique des études longues, comme celles qui peuvent se faire sur des monuments historiques, en plus d'un temps dédié à l'élaboration et l'analyse des prototypes, auxquels s'ajoutent les délais des autres phases de maîtrise d'œuvre. Rares sont les opérations qui offrent de tels délais. Mais, comme pour la Maison des Sciences de l'Homme, il est possible de travailler sur un temps long en repensant la manière d'envisager la maîtrise d'œuvre et en scindant les opérations en deux phases distinctes permettant de dissocier les études et l'expérimentation par prototypes de la mise en œuvre, la première phase fournissant un cahier des charges à la seconde. Autant le reconnaître, à l'heure actuelle, les budgets et les temps alloués aux phases d'études dans les marchés de maîtrise d'œuvre demeurent insuffisants pour atteindre le niveau de qualité requis pour l'élaboration de solutions répondant aux multiples enjeux soulevés par la réhabilitation des façades légères. Dans ces conditions, nous pouvons alors nous interroger non pas tant sur les capacités des professionnels de la construction à répondre à de tels enjeux, mais plutôt sur les moyens qui leur sont alloués dans une économie de la construction tendue et des marchés de plus en plus exigeants. À tout prendre, un tel projet interroge les capacités des architectes et des concepteurs, à élaborer des réponses adaptées aux édifices existants dans les conditions actuelles d'exercice professionnel et dans un environnement réglementaire toujours plus complexe. La fragilisation croissante du patrimoine moderne et des façades légères au profit d'opérations d'isolations par l'extérieur plus largement subventionnées, ne serait-elle pas la conséquence d'une réduction des investissements scientifiques et théoriques plus que d'une simple recherche d'économie globale et durable, l'investissement scientifique conduisant, comme nous l'avons vu, à des économies de chantier et à l'amélioration de la perception ambiante, un vrai bonus pour les copropriétaires.

Sources

Le classement est effectué par ordre thématique et chronologique.

FONDS D'ARCHIVES À PARIS

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

. <https://bases-brevets.inpi.fr>

Jean Prouvé

Panneaux de façades

- . Prouvé (Jean), *Brevet d'invention n°921.344*, Paris, Ministère de l'Industrie, 1947, 7 p.
- . Prouvé (Jean), *Brevet d'invention n°922.364*, Paris, Ministère de l'Industrie, 1947, 8 p.
- . Prouvé (Jean), *Brevet d'invention n°1.384.745*, Paris, Ministère de l'Industrie, 1964, 5 p.
- . Prouvé (Jean), *Brevet d'invention n°1.389.474*, Paris, Ministère de l'Industrie, 1965, 3 p.
- . Prouvé (Jean), *Brevet d'invention n°1.411.235*, Paris, Ministère de l'Industrie, 1965, 5 p.
- . Prouvé (Jean), *Brevet d'invention n°1.411.236*, Paris, Ministère de l'Industrie, 1965, 3 p.
- . Prouvé (Jean), *Brevet d'invention n°1.459.302*, Paris, Ministère de l'Industrie, 1966, 4 p.
- . Prouvé (Jean), *Brevet d'invention n°1.459.303*, Paris, Ministère de l'Industrie, 1966, 3 p.

CENTRE GEORGES POMPIDOU / MNAM - CCI

Réserve d'architecture

Fonds Jean Prouvé - 230 J

- . 230 J 132 - Façades de bâtiments. - Détails de joints pour panneaux et vitres. CCAFRP-Lopez, Reby-archi, 13 p. (1954)
- . 230 J 137 - Montage standard C. I. M. T. (Compagnie industrielle de matériel de transport). Schémas de montage sur les pincements brise-soleil et sur les grilles en aluminium, 77 p. (1955-1965)
- . 230 J 139 - Mur-rideau. - Brochure de la C. I. M. T. Lorraine (Compagnie industrielle de matériel de transport). Plans descriptifs de murs-rideaux. Catalogue, 2 ex. (1965)

Bibliothèque Kandinsky

Fonds Jean Prouvé - 230 J

- . 230 J 18 - Description technique de panneau industrialisé de la CIMT (photocopies). (1965-1966).
- . 230 J 30 - Croquis de façades et détails techniques sur calque, signés de Jean Prouvé, 11p. (1973-1974).
- . 230 J 129 - Joints de panneaux de façade. Schémas de montage, 31 p. (1948).
- . 230 J 131 - Techniques de fabrications et détails. - Descriptifs, schémas de montage concernant les détails de façades en aluminium (1953)
- . 230 J 132 - Façades de bâtiments. - Détails de joints pour panneaux et vitres. CCAFRP-Lopez, Reby-archi, 13 p. (1954)
- . 230 J 137 - Montage standard C. I. M. T. (Compagnie industrielle de matériel de transport). Schémas de montage sur les pincements brise-soleil et sur les grilles en aluminium, 77 p. (1955-1965)
- . 230 J 139 - Mur-rideau. - Brochure de la C. I. M. T. Lorraine (Compagnie industrielle de matériel de transport). Plans descriptifs de murs-rideaux. Catalogue, 2 ex. (1965)
- . 230 J 148 - Bron-Parilly (Rhône) : unité de voisinage H. L. M. - Plans de façades, présentés en avant-projet, notice descriptive, 43 p. (1952)
- . 230 J 154 - Idem. Ecoles en éléments sandwich. - Bâtiments préfabriqués avec éléments standardisés (C. I. M. T.), 37 p., 1 plan calque. (1956)

- . 230 J 462 - Façades. - Détails d'assemblage des panneaux. Buc (Yvelines) et Clichy (Seine-Saint-Denis), tirages, 4 p. (1938-1939)
- . 230 J 464 - Façades préfabriquées. - Plans sur papier, 4 p. (1950)
- . 230 J 465 - Fixations de panneaux. -Esquisses en couleur de Jean Prouvé, calque, 3 p. (1950)
- . 230 J 466 - Panneaux de façades. - Coupe sur joints, 1p. (1950)
- . 230 J 467 - Idem. - Etude. Vues sur coupes de panneaux et joints, calque, 3p. (1950-1955)
- . 230 J 468 - Idem. - Façades légères métalliques : montages des panneaux. Etudes de principe, tirages de plans, 7 p. (1950-1955)
- . 230 J 470 - Panneaux pour murs-rideaux. - Possibilités de raccords spécifiques. Calques, 3 p. (1959)
- . 230 J 471 - Grille-panneaux. - Panneaux pleins et vides, poteaux, charpente. Tirages papier, 2 pièces. Maquette C. I. M. T. Photographie, 1p. Un album «mur rideau standard». Croquis, plans, tirages, originaux, 21 pages. 24p. (1955-1960)
- . 230 J 477 - Joints de panneaux de façades (non identifiés), 7 p. (1973)
- . 230 J 478 - Panneaux de façades et techniques d'assemblage (non identifiés). 4 plans sur calque, 11 croquis sur calque de Jean Prouvé. (1980)
- . 230 J 763 - Fédération française du bâtiment, n°41 à 58, 1949.
- . 230 J 767 - Blanc-Mesnil, n°2 à 12, s.d.. CIMT Neuilly, n°24, s.d.. Tour du fer à cheval Roubaix, n°25 à 41, 1959. Immeuble Baticoop Dijon, n°42 à 43, 1959. Résidence Universitaire de Lyon, n°65, s.d.. Immeuble «les Cèdres» de Lyon, n°66, s.d.
- . 230 J 768 - Fédération française du bâtiment, n°49 à 56, s.d.. École Vantoux, n°61 à 72, s.d.. Façade pour Bron-Parilly, n°109 à 110, s.d.
- . 230 J 769 - Immeuble square Mozart Paris, n°7 à 9, s.d.. Usine SFR de Saint-Egrève, n°10 à 23, s.d.. Détails de mur-rideau, n°48, s.d.. Immeuble Baticoop Dijon, n°49, s.d.. Ecole industrialisée « GEEP » Chaville, n°62 à 65, 67 à 68, s.d.. INSA de Lyon, n°69 à 80, 1961. Immeuble « Les Cèdres » Lyon, n°81, 1961-1962.
- . 230 J 798 - Grenoble, n°1 à 69, s.d.. Nanterre, n°87 à 107, s.d.. Etude de façade, n°878 à 918, s.d.
- . 230 J 872 - Grenoble, n°1 à 110, s.d.
- . 230 J 971 - Cité Emmaüs Pierre Montillet, Le Blanc-Mesnil, n°1 à 6, 1957-1958.
- . 230 J 972 - Immeuble HLM Les Paquerettes à Nanterre, n°1 à 29, s.d.
- . 230 J 976 - Immeuble HLM Les Paquerettes à Nanterre, n°1 à 29, s.d.

FONDS D'ARCHIVES À LYON

ARCHIVES MUNICIPALES DE LYON - ARCHIVES PUBLIQUES

Les Cèdres

Permis de construire

- . PC 1957, 165/1957 : 44 chemin de la Favorite 69005 (1957-1958). AML, 345 W 16
- . PC 1959, 165/1959 : 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16

Interventions sur logements sociaux

- . Urbanisme opérationnel, Opérations de logements sociaux, Participation de la Ville, Dossiers soldés : 44 rue de la Favorite 69005 (1993-1998). AML, 1904 W 43

Déclaration de travaux

- . DT 1999, 75/1999 : 44 rue de la Favorite 69005 (1999). AML, 2162 W 12

SOCIÉTÉ ACADÉMIQUE D'ARCHITECTURE DE LYON

Les Cèdres

- . Fonds François-Régis Cottin, 14B

FONDS PHOTOGRAPHIQUES

AGENCE D'URBANISME

. <http://phototheque.urbalyon.org/>

BIBLIOTHÈQUE MUNICIPALE DE LYON - PHOTOGRAPHES EN RHÔNE-ALPES

. <http://numelyo.bm-lyon.fr> (voir les notices en ligne pour les légendes et les dates précises)

Bibliographie

Architecture des trente glorieuses à Lyon (1945-1975)

Delfante (Charles), Dally-Martin (Agnès), *Cent ans d'urbanisme à Lyon*, Lyon, LUGD, 1994, p.

Dufieux (Philippe), *René Gagès (1921-2008), la permanence de la modernité*, Annecy, CAUE de Haute-Savoie, coll. portrait, 2017, 180 p.

Dufieux (Philippe), Stuccilli (Jean-Christophe), *L'Art de Lyon*, Paris, Éditions Mengès-Place des Victoires, 2017, 420 p.

Gagès (Patrice), *L'Avenir, entreprise coopérative. 70 ans de l'histoire d'une métropole, 70 ans d'architecture*, Bruxelles-Liège, Mardaga, 1989, 184 p.

Gagès (René) (dir.), *Lyon-Europe. 100 ans d'architecture moderne*, Bruxelles-Liège, Mardaga, 1988, 251 p.

Marrey (Bernard), *Guide Rhône-Alpes de l'architecture du XX^e siècle*, Paris, Picard, Lyon, CAUE du Rhône, 2004, 341 p.

Piessat (Louis), *Tony Garnier 1869-1948*, Lyon, Presses universitaires de Lyon, 1988, 195 p.

Provost (René), *Jean Zumbrunnen architecte*, Lyon, Atelier Part-Dieu, École d'architecture de Lyon, 1993, 29 p.

Ragot (Gilles), *Le Corbusier à Firminy-Vert, manifeste pour un urbanisme moderne*, Paris, Éditions du patrimoine, 2011, 354 p.

Jean Prouvé

Abram (Joseph), *Claude Prouvé, Le Tri Postal de Nancy, Œuvre majeure des années 1970*, Paris, Jean-Michel Place éditions, 2006.

André (Grégoire), « La restauration et la reconversion de l'école primaire de Vantoux en bureaux. Une œuvre des frères Prouvé », in *Monumental*, Paris, Éditions du patrimoine, 2019-2, p. 108-111.

Archieri (Jean-François), Levasseur (Jean Pierre), *Prouvé - cours du CNAM 1957-1970, essai de reconstitution du cours à partir des archives Jean Prouvé*, Bruxelles, Mardaga, 2002, 310 p.

Bertaud du Chazaud (Vincent), *Jean Prouvé : Royan et sa région*, La Crèche, Geste Editions, 2017, 245 p.

Cinqualbre (Olivier), *Jean Prouvé : bâtisseur*, Paris, Éditions du patrimoine, 2016, 192 p.

Coley (Catherine), *Jean Prouvé. Jalons. Collections du Musée National d'Art Moderne - Centre de Création Industrielle*, Paris, Éditions du Centre Pompidou, 1993, 69 p.

Coley (Catherine), Guidot (Raymond), Prodhon (Françoise-Claire), *Jean Prouvé*, vol. 2, Paris, Galerie Patrick Seguin, 2007, 612 p.

Fruitet (Louis), Marrey (Bernard), *Jean Prouvé dans les Alpes*, Annecy, CAUE de Haute-Savoie, 2012, 112 p.

Graf (Franz), « Confort et contexture des maisons africaines de Jean Prouvé », in *Cahiers du LHAC* n°3, Nancy, LHAC, 2014, p. 117-130.

Hoffmann (Maja), Humery (Matthieu), Trétiak (Philippe), Wigley (Mark), *Jean Prouvé, architecte des jours meilleurs*, Paris, Phaidon, 2017, 175 p.

Piano (Renzo), Rossinot (André), *Jean Prouvé*, Paris, Somogy Éditions d'art, 2012, 407 p.

Prodhon (Françoise-Claire), *Jean Prouvé*, vol 1., Paris, Galerie Patrick Seguin, 2007, 216 p.

Prouvé (Jean), *Jean Prouvé par lui-même*, Paris, Éditions du Linteau, 2001, 139 p.

Sulzer (Peter), *Jean prouvé, Œuvre Complète, vol. 1 : 1917-1933*, Basel, Birkhäuser, 1999, 240 p.

Sulzer (Peter), *Jean prouvé, Œuvre Complète, vol. 2 : 1934-1944*, Basel, Birkhäuser, 2000, 352 p.

Sulzer (Peter), *Jean prouvé, Œuvre Complète, vol. 3 : 1944-1954*, Basel, Birkhäuser, 2005, 384 p.

Sulzer (Peter), *Jean prouvé, Œuvre Complète, vol. 4 : 1954-1984*, Basel, Birkhäuser, 2008, 334 p.

Von Vegesack (Alexander), Dumont d'Ayot (Catherine), Reichlin (Bruno), *Jean Prouvé : the Poetics of the Technical Object*, Weil am Rein, Vitra Design Museum, 2007, 392 p.

L'architecture du XX^e siècle, connaissance et sauvegarde

Baptiste (Hervé), « La Maison du Peuple à Clichy, Hauts-de-Seine », in *Monumental*, n° 2, mars 1993, p. 68-77.

Baptiste (Hervé), Enjolras (Christian), « La maison du Peuple de Clichy, le chantier, le programme et la fonction », in *Monumental*, 2000, p. 180-191.

Conservation régionale des monuments historiques, *Architecture du XX^e siècle - Grand Est*, Lyon, Éditions Lieux Dits, 2018, 288 p.

Courbebaisse (Audrey), *Toulouse : le sens caché des grands ensembles*, Toulouse, Presses Universitaires du Midi, 2018, 304 p.

DRAC Île-de-France, dir. 1945-1975, *Une histoire de l'habitat, 40 ensembles de logements « Patrimoine du XX^e siècle »*, Issy-les-Moulineaux, Beaux-Arts éditions, 2010, 96 p.

Dufieux (Philippe), *Habiter un immeuble dans la région lyonnaise, du logement pour tous aux nouveaux modes d'habiter, 1945-2015*, Lyon, CAUE du Rhône, 2014, 176 p.

Furrer (Bernhard), « Faut-il protéger les monuments historiques des architectes en chef ? », in *SPPEF*, 8 mai 2019

Graf (Franz), Delemontey (Yvan), dir. *Architecture industrialisée et préfabriquée : connaissance et sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012, 435 p.

Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. « La cité du Lignon 1963-1971, étude architecturale et stratégies d'intervention », in *Revue patrimoine et architecture, cahier hors-série*, Lausanne, Infolio, 1/2012 (réédition 9/2013), 160 p.

Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. *Patrimoine moderne, économie, énergie. Stratégies d'intervention pour les grands ensembles, 1945-1975*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2015, 94 p.

Graf (Franz), Marino (Giulia), « Mirabilia ou ressource durable ? Le patrimoine récent à l'épreuve des enjeux énergétiques », in *Kunst + Architektur in der Schweiz*, n° 2, 6/2015, pp. 58-65

Graf (Franz), *Histoire matérielle du bâti et projet de sauvegarde : devenir de l'architecture moderne et contemporaine*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2014, 479 p.

Hugron (Jean-Philippe), « Le patrimoine du XX^e siècle de nouveau la cible d'Inventons la métropole du Grand Paris », in *Le Courrier de l'architecte*, Paris, Le Courrier de l'architecte, 4/4/2018

Klein (Richard), « Le pavillon du centenaire de l'aluminium, un patrimoine en pièces », in *Architecture industrialisée et préfabriquée : connaissance et sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012, p.121-138

Larrochelle (Jean-Jacques), « Menaces sur le patrimoine architectural du XX^e siècle », in *Le Monde*, 24-25/6/2018.

Laski (Gary), *Le design : Théorie esthétique de l'histoire industrielle*, Paris, Philosophie, Université Paris-Est, 2011, 355 p.

Le Corbusier, *La Charte d'Athènes*, Paris, Éditions Points, 1971 (première publication : 1941), 185 p.

Le Corbusier, *Vers une architecture*, Paris, Éditions Crès, 1923, 254 p.

Lemoine (Bertrand), *100 monuments du XX^e siècle : patrimoine et architecture de la France*, Paris, France Loisirs, 2000, 239 p.

Lucan (Jacques), *Architecture en France (1940-2000), Histoire et théories*, Paris, Le Moniteur Editions, 2001, 375 p.

Marino (Giulia), *Un Monument Historique controversé – La Caisse d'allocations familiales à Paris 1953-2008*, Paris, Picard, 2009, 270 p.

Ministère de la Culture, Riester (Franck), *Label patrimoine du XX^e siècle : 15 ans de valorisation de l'architecture du XX^e siècle*, Paris, Ministère de la Culture, 2019, 255 p.

Monnier (Gérard), *L'architecture du XX^e siècle, un patrimoine*, Paris, Canopé-CRDP de Créteil, 2004, 234 p.

Paurd (Bernard), « Pour une véritable restauration de la Maison du Peuple de Clichy », in *SPPEF*, La préservation de l'architecture du XX^e siècle, 4 juin 2019

Pousse (Jean-François), « Le défi de la transformation du patrimoine XX^e », in *Archiscopie n°13*, Paris, Cité de l'architecture et du patrimoine, 1/2018, p.72-81

Ragot (Gilles), Chadoin (Olivier), *La Cité de refuge, Le Corbusier et Pierre Jeanneret, L'usine à guérir*, Paris, Éditions du patrimoine, Centre des monuments nationaux, 2016, 243 p.

Rey (Jacques), *Lyon, cité radieuse, une aventure du Mouvement moderne international*, Lyon, Libel, la Maison de l'architecture Rhône-Alpes, 2010, 141 p.

Roz (Michel), Charre (Alain), Bohigas (Oriol), Geist (Jonas), Rice (Peter), Crotti (Sergio), *Lyon-Europe, 100 ans d'architecture moderne : Milano, Barcelona, Birmingham, Frankfurt, Liège*, Pierre Mardaga éditeur, 1988, 251 p.

Russel (Barry), *Building Systems, Industrialization and Architecture*, Londres, John Wiley & Sons, 1981, 770 p.

Toulier (Bernard), « La Maison du Peuple à Clichy : premier exemple de mur-rideau en panneaux préfabriqués. Restituer une machine architecturale aux multiples usages », in *Architecture et patrimoine du XX^e siècle en France*, Paris, Éditions du Patrimoine, 1999, p. 284-287.

Toulier (Bernard), Klein (Richard), Peyceré (David), Châtelet (Anne-Marie), Graf (Franz), Marino (Giulia), Cohen (Jean-Louis), Lagae (Johan), Tostoes (Ana), Texier (Simon), Ragot (Giles), Picon (Antoine), « Architecture du XX^e siècle », in *Revue de l'art*, n°186, Paris, Ophrys, 4/2014, 101 p.

Uyttenhove (Peter), *Beaudouin et Lods*, Paris, Éditions du Patrimoine, 2012, 192 p.

Veschambre (Vincent), « En quels termes fait-on disparaître le logement social des Trente Glorieuses ? Le champ lexical de la rénovation urbaine des années 2000 », in Blain (Catherine) et De Araujo (Ana Bela) (dir.), *L'Architecture et la disparition*, Cahiers Thématiques, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris, ENSAPL- LACTH, n° 16, 2017, p. 199-208.

Le confort et la rénovation énergétique

ANAH, Moya (Jean-Pierre), *Isolation thermique durable des bâtiments existants*, Antony, Editions le Moniteur, 2018, 296 p.

Banham (Reyner), « The background of environmental control », in *Mechanical Services*, Milton Keynes, The Open University Press, 1975, p. 4.

Banham (Reyner), *The Architecture of the well-tempered environment*, Londres, Architectural Press, 1969, 320 p.

CATED, *Exigences réglementaires et confort acoustique*, Elancourt, Éditions Ginger, 2014, 384 p.

CATED, *Réhabilitation des façades : ravalements, menuiseries, isolation thermique et acoustique*, Elancourt, Éditions Ginger, 2011, 151 p.

Charlot-Valdieu (Catherine), Outrequin (Philippe), Peskine (Hélène), *Réhabilitation énergétique des logements*, Antony, Éditions le Moniteur, 2018, 325 p.

Courgey (Samuel), Oliva (Jean-Pierre), *La conception bioclimatique : des maisons confortables et économes*, Mens, Terre Vivante, 2006, 240 p.

Déribéré (Maurice), Chauvel (Pierrette), *Traité du bâtiment : l'éclairage naturel et artificiel dans le bâtiment*, Paris, Eyrolles, 1968

Gauzin-Müller (Dominique), « Confort d'été passif : quelques solutions éprouvées », in *Ecologik*, n°38, Paris, Éditions À Vivre, 4-5/2014, p. 54-57.

Giedion (Siegfried), *Mechanization Takes Command*, Minneapolis, University of Minnesota Press, 1948 (réédition 2014), 608 p.

Graf (Franz), Marino (Giulia), dir. *Les Dispositifs du confort dans l'architecture du XX^e siècle : connaissance et stratégie de sauvegarde*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2016, 535 p.

Hawkes (Dean), *The Environment Imagination : Technics and Poetics of the Architectural Environment*, Londres et New-York, Routledge, 2008, 272 p.

Herbert (Gilbert), *The Dream of the Factory-made House : Walter Gropius and Konrad Wachsmann*, Cambridge, MIT Press, 1984, 407 p.

Jedidi (Malek), Benjeddou (Omrane), *La thermique du bâtiment. Du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation*, Malakoff, Éditions Dunod, 2016, 208 p.

Lavoye (Frédéry), Bœuf (Frédéric), Thellier (Françoise), *Qualité des ambiances dans le bâtiment, Le confort thermique de l'habitant*, Paris, Presses des Mines, 11/2015, 146 p.

Le Corbusier, 1933, *La Ville radieuse. Soleil-Espace-Verdure*, Paris, Vincent Fréal, 1964, 345 p.

Mallet-Stevens (Robert), « L'éclairage et l'architecture moderne », in *Lux, la revue de l'éclairage*, n°1, 1/1928, p. 6-9.

Maugard (Alain), Pouget (André), *Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974 : le guide ABC*, Paris, EDIPA, 2011, 344 p.

Olgay (Victor), *Design with climate*, Princeton, Princeton University Press, 1963, 224 p.

Orso (Fabrice d'), *Rénovation, plus de 30 millions de logements*, Levallois-Perret, Éditions PC, 2019, 111 p.

Façades légères et matériaux

Benevolo (Leonardo), *Façades légères : fabrication, performances, mise en œuvre, produits*, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, Centre d'assistance technique et de documentation, 2003, 68 p.

CIMUR, *Techniques françaises des façades légères, Murs-rideaux et panneaux de façade*, Paris, Éditions Eyrolles, 1965, 486 p.

De Jonge (Wessel), Doolaar (Arjan), *Curtain wall refurbishment : a challenge to manage*, Eindhoven, DoCoMoMo, 1997, 92 p.

Marino (Giulia), *Un Monument Historique controversé – La caisse d'allocations familiales à Paris 1953-2008*, Paris, Picard, 2009, 270 p.

Martin (Pierre), *Façades légères en détail*, Antony, Éditions du Moniteur, 2017, 386 p.

Ménard (Jean-Pierre), « Façades légères », in *Le Moniteur architecture*, n°41, Antony, Éditions du Moniteur, 5/1993, p. 56-62

Traisnel (Jean-Pierre), *Le métal et le verre dans l'architecture en France, du mur à la façade légère*, thèse de doctorat, Université Paris 8, 1997, 471 p.

Ambiances et perception sensible de l'espace

Balaÿ (Olivier), Lapray (Karine), Leroy (Marie), Marie (Héloïse), Rémy (Nicolas) (dir.), Tixier (Nicolas) (dir.), « Demain l'architecte, l'intervalle et la densité » in *Ambiances demain*, vol. 1, Actes du troisième congrès international sur les ambiances, 2016, p. 425.

Balaÿ (Olivier), Lapray (Karine), Leroy (Marie), Marie (Héloïse), « Ménager des oasis urbaines : des représentations à la fabrication », in *Territoires durables, de la recherche à la conception*, Paris, Parenthèses/ADEME, 2018, p. 51-63.

Balaÿ (Olivier), « Oasis urbaine ou l'ambiance diastématique de la ville », in *Silences ! Rencontres – Architecture Musique Ecologie*, Paris, Les Cahiers de l'Institut Musique Écologie, Lucie éditions, 2018, p. 63-76.

Canetti (Elias), *La Conscience des mots* (1975), traduit de l'allemand par Roger Lewinter, Paris, Albin Michel, 1984, 336 p.

Dorflès (Gillo), *L'intervalle perdu* (1980), traduit de l'italien par Marie-Thérèse Ketterer, Paris, Librairie des Méridiens, 1984, 206 p.

Ingold (Tim), *Une brève histoire des lignes* (2007), traduit de l'anglais par Sophie Renaut, Bruxelles, Zones Sensibles, 2011, 256p.

Picon (Antoine), *La Ville, territoire des cyborgs*, Besançon, Les Éditions de l'Imprimeur, 1998, 112 p.

Sloterdijk (Peter), « Ecumes : sphérologie plurielle », in *Sphères III* (1998-2004), traduit de l'allemand par Olivier Mannoni, Paris, Hachette, 2006, 790 p.