



HAL
open science

La réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XXe siècle, de l'étude à l'expérimentation

Philippe Dufieux, Olivier Balaÿ, Mathilde Padilla, Laurent Volay

► To cite this version:

Philippe Dufieux, Olivier Balaÿ, Mathilde Padilla, Laurent Volay. La réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XXe siècle, de l'étude à l'expérimentation. [Rapport de recherche] ARCHIXX-2021-DUF, BRAUP; UMR 5600 EVS CNRS; Les Grands Ateliers Innovation Architecture (GAIA / L'Isle d'Abeau); Les Compagnons du Devoir de Villefontaine; La chaire partenariale d'enseignement et de recherche "Habitat du Futur"; UMR 1563 AAU; ENSA Lyon; ENSA Grenoble; Conseil syndical de la copropriété Les Cèdres; Régie Franchet; Association CARGO JP 44. 2021. hal-03760946

HAL Id: hal-03760946

<https://hal.science/hal-03760946v1>

Submitted on 31 Aug 2022

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

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

RFL

« RFL : la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XX^e » : projet démonstrateur pour l'immeuble 44 rue de la Favorite

PROGRAMME INTERMINISTÉRIEL DE RECHERCHE ARCHITECTURE DU XX^E SIÈCLE, MATIÈRE À PROJET POUR LA VILLE DURABLE DU XXI^E SIÈCLE

Outils conceptuels et techniques pour l'adaptation, la transformation, la restauration et la valorisation des architectures récentes

3^E SESSION

La réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XX^e siècle, de l'étude à l'expérimentation

RAPPORT FINAL

15 SEPTEMBRE 2021

archipat

LYON
ARCHITECTURE
URBANISME
RECHERCHE
LAURE
ENSA LYON - UMR EVS 5600

AAU cresson
ambiances
architectures
urbanités



Les Grands
Ateliers

Charpente Métallique
KCM
Serrurerie - Métallerie

F&C 1899
FRANCHET & Cie

ÉCOLE
NATIONALE SUPÉRIEURE
D'ARCHITECTURE
LYON

RE
CHAIRE
PARTENARIALE
D'ENSEIGNEMENT
ET DE RECHERCHE
EN ARCHITECTURE



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 Culture des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales, en lien avec 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.

TRIBU

DE CA RE

LASA

Responsables scientifiques

Philippe Dufieux, historien de l'architecture des XIXe et XXe siècles, HDR, professeur d'histoire de l'architecture HCA (Histoire et Cultures Architecturales) à l'École nationale supérieure d'architecture de Lyon, directeur d'EVS-LAURE (Lyon Architecture Urbanisme Recherche) (UMR 5600) philippe.dufieux@lyon.archi.fr

Olivier Balay, architecte DPLG, professeur TPCAU (Théories et Pratiques de la Conception Architecturale et Urbaine) à l'École nationale supérieure d'architecture de Lyon, membre de l'unité de recherche AAU-CRESSON (UMR 1563) de l'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, directeur de CASA architecture olivier.balay@lyon.archi.fr

ENSA mandataire

École nationale supérieure d'architecture de Lyon
3 rue Maurice Audin 69 120 Vaulx en Velin
Tel. 04 78 79 50 50 www.lyon.archi.fr

Unités de recherche

UMR 5600 Environnement Ville et Société
UMR 1563 Ambiances Architectures et Urbanités
La Chaire partenariale d'enseignement et de recherche
« Habitat du Futur »

Membres de l'équipe

Mathilde Padilla-Quintana, architecte DE, doctorante ENSA de Lyon, UMR EVS-LAURE et AAU-CRESSON, en CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) chez Archipat

Laurent Volay, architecte du Patrimoine, co-gérant agence Archipat

Partenaires

Ingénieurs, bureaux d'études

DECARE, structure métallique, René Hugues
LASA, acoustique, Samuel Tochon et Sylvain Fenon
TRIBU, thermique et conception durable, Karine Lapray et Héloïse Marie

Entreprises

KCM, serrurerie et métallerie, Stéphane Coquille
Prodotti France, Cédric Dalard
Asymptote, Jérémie Chazotte
Steico, Olivier Mognon
Fermacell, René Ferré
Knauf

Autres

Conseil Syndical de la copropriété « Les Cèdres »
Régie Franchet
Association CARGO JP 44
Les Grands Ateliers Innovation Architecture (GAIA / l'Isle d'Abeau), avec Maxime Bonnevie et Pascal Gantet pour les prototypes
Les Compagnons du Devoir de Villefontaine, Eddy Giroux

Conseillers Scientifiques

Franz Graf, architecte, chercheur au laboratoire TSAM (Techniques et Sauvegarde de l'Architecture Moderne) de l'EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne)

Florence Delomier-Rollin, architecte urbaniste en chef de l'état, conseillère pour l'architecture à la DRAC (Direction Régionale des Affaires Culturelles) Auvergne-Rhône-Alpes

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	7
I. Un programme de recherche au cœur de l'actualité ...9	
II. Façades légères et murs-rideaux10	
III. Un patrimoine fragilisé, des méthodologies à construire 11	
IV. De l'étude à l'expérimentation 12	
V. Objectifs de la recherche 12	
PARTIE 1 : CADRE DE LA RECHERCHE	13
I. Contexte historique 15	
II. Etat de l'art 17	
III. Corpus18	
PARTIE 2 : MÉTHODOLOGIE.....	25
I. Un projet démonstrateur 27	
II. Une démarche de projet innovante28	
III. Une équipe pluridisciplinaire . 28	
IV. Études et diagnostics 30	
V. Conception et expérimentations 37	
VI. Réalisation 38	
VII. Transmission et diffusion38	
PARTIE 3 : DIAGNOSTICS ET CONCEPTION	41
I. Diagnostics 43	
II. Hypothèses envisagées . 58	
III. Solutions retenues pour les prototypes63	
PARTIE 4 : EXPÉRIMENTATION PAR PROTOTYPES.....	65
I. Prototype de store extérieur66	
II. Prototype de la solution 1 : restauration double vitrage.... 71	
III. Prototype de la solution 2 : Charte de Venise, Double façade 76	
IV. Prototype de rideaux acoustiques..... 80	
CONCLUSION	83
I. Rappel des questions et des objectifs de la recherche84	
II. Les solutions choisies pour la réhabilitation de l'immeuble les Cèdres .85	
III. Montage financier, transposabilité et mise en œuvre 90	
TABLEAUX DE MONTAGE FINANCIER	91
BIBLIOGRAPHIE	101



INTRODUCTION

I. UN PROGRAMME DE RECHERCHE AU CŒUR DE L'ACTUALITÉ

Le patrimoine bâti du XXe siècle et surtout les édifices construits après la seconde Guerre Mondiale représentent une grande partie du tissu urbain des villes contemporaines. Ces bâtiments sont particulièrement concernés par les enjeux actuels de transition énergétique. Ils représentent une ressource foncière et économique importante et doivent s'adapter aux mutations des modes de vie actuels. Ils sont l'objet de différentes stratégies de transformation, de rénovation, de restauration, de recyclage mais aussi de démolitions. Face à l'ampleur de ce patrimoine et au regard des enjeux multiples auxquels il doit répondre, le ministère de la Culture a lancé en 2016 un programme pluriannuel de recherche « Architecture du XXe siècle, matière à projet pour la ville durable du XXIe siècle ». Ce programme est également porté par le ministère de la Transition écologique et solidaire et le ministère de la Cohésion des territoires en lien avec la Caisse des dépôts et consignations, l'Union sociale pour l'habitat, l'Agence nationale pour la rénovation urbaine et le Plan urbanisme construction architecture (PUCA – programme REHA).

Ce programme fait écho aux politiques de l'Etat en faveur du développement durable, du développement de la rénovation architecturale et interroge la capacité de l'architecture du XXe à s'adapter aux enjeux du XXIe siècle en matière d'environnement. Le programme a fait l'objet de trois appels à projet lancés auprès des enseignants-chercheurs des ENSA(P) en 2016, 2017 et 2018. Notre projet de recherche s'est inscrit dans le 3e et dernier appel. Il traite de la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XXe siècle et s'appuie sur un projet démonstrateur sur un immeuble lyonnais labellisé « Patrimoine du XXe siècle » (aujourd'hui devenu « Architecture contemporaine remarquable ») signé François-Régis Cottin et Jean Prouvé. Adossé à un travail réalisé par des étudiants du Master ATEC/AA&CC de l'ENSAL – école nationale supérieure d'architecture de Lyon – dans le cadre de leur projet de fin d'étude soutenu en 2018, et à un travail de thèse en cours sur le sujet, ce projet de recherche tente d'apporter des solutions et une méthodologie pour la réhabilitation de ce type de façades appliquées à des programmes de logements et en particulier sur une copropriété.



Façade sud de l'immeuble les Cèdres, peu de temps après sa construction
© Centre Pompidou, MNAM-CCI, non datée

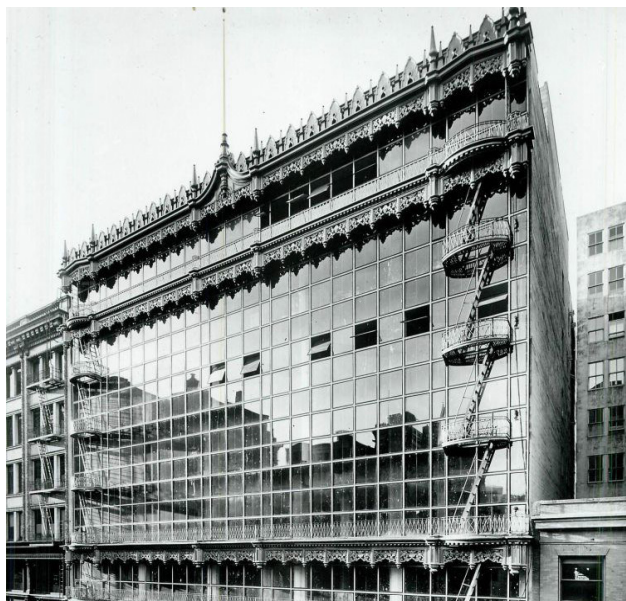
II. FAÇADES LÉGÈRES ET MURS-RIDEAUX

Rappelons brièvement qu'une façade légère se définit par une paroi extérieure caractérisée par une masse inférieure à 100 kg/m^2 , dotée de produits manufacturés et de parements finis¹. Les façades légères ne sont pas structurelles. Elles se fixent où s'accrochent à la structure du bâtiment, appelée ossature primaire et sont rigidifiées par leur propre ossature, l'ossature secondaire. Les façades légères peuvent être mises en œuvre de plusieurs façons selon leur position par rapport à l'ossature primaire. Les murs-rideaux sont fixés devant les nez de dalles, assurant leur isolation. Les murs-panneaux sont, quant à eux, fixés entre les planchers de l'ossature primaire. 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, ceux-ci se composent de panneaux préfabriqués – qui intègrent les menuiseries, l'isolant, le parement extérieur et intérieur – qui sont acheminés sur le chantier comme produits finis et sont assemblés in situ.

Le développement des façades légères demeure indissociablement lié aux évolutions de l'architecture contemporaine. En ce domaine, les États-Unis s'imposent comme le premier théâtre de cette technique inédite, qu'il s'agisse du Reliance Building de Chicago, conçu par les architectes Charles B. Atwood et John Wellborn

Root entre 1890 et 1895, comme du Hallidie Building de San Francisco construit en 1918 par Willis Jefferson Polk dont les façades préfigurent les futurs murs-rideaux. Dans l'entre-deux-guerres, les expérimentations se multiplient : Walter Gropius esquisse un mur semi-rideau pour l'usine Fagus en Allemagne (1911-1913) tandis que la première façade légère française est signée par Le Corbusier en 1929 pour le refuge de l'armée du Salut à Paris. 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.

¹ Selon la norme NF P 28-001



Hallidie Building, Willis Polk, San Francisco, 1918
Source inconnue



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

III. UN PATRIMOINE FRAGILISÉ, DES MÉTHODOLOGIES À CONSTRUIRE

Construites dans les années de l'après-guerre, avec des éléments relevant souvent de la carrosserie, ces façades possèdent un cycle de vie qui arrive à terme quelques trente ans plus tard, c'est-à-dire au cours des décennies 1980-1990, si l'on tient compte que la plupart des composants originels ont perdu, au fil des années, l'essentiel de leur efficacité. Théoriquement, l'autonomie du mur-rideau permet son démontage et son remplacement avec la même précision et rapidité que son montage. Une fois complètement déshabillée, la façade laisse apparaître la structure porteuse du bâtiment qui peut alors être reconstruite au moyen de nouveaux éléments de vêture dont le dessin, le profil des profilés tout autant que la nature des matériaux modifient trop souvent la physionomie originelle des constructions. En ce domaine, tout réside dans le détail et la finesse des éléments, la qualité des verres et le dessin des huisseries. 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 CAF 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 (2016).

Autant le reconnaître, le remplacement des éléments originaux est systématiquement présenté comme une obligation, voire même 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 a eu le mérite de souligner combien les problématiques d'authenticité demeuraient 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. Cette dernière solution a été privilégiée lors de la récente rénovation du siège de Nestlé à Vevey (Suisse). **Les niveaux de performance 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 essentielle de la valeur historique des constructions. Encore s'agit-il ici uniquement d'immeubles tertiaires, qu'en est-il dès lors des immeubles de logements habillés de murs-rideaux ?**



Paris, Caisse centrale des allocations familiales, avant intervention
Cl. Jacques Mossot, 2005, © Structurae



La Caisse d'Allocation Familiale rénovée par Arte Charpentier architectes
Cl. Fabio Gargano, sans date

IV. DE L'ÉTUDE À L'EXPÉRIMENTATION

L'intervention sur l'architecture du XXe siècle constitue 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 copropriété² ?

2 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.

V. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

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'équipe émet l'hypothèse 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 région lors de la seconde moitié du XXe siècle souffrent de stratégies drastiques d'amélioration thermique sans évaluation des dégradations du confort lumineux, sonore et du flux ventilant qui en résultent³. Or, historiquement, les citoyens ont de tout temps cherché à moduler les perceptions sensibles associées à leur logement. De ce qui précède découle la principale problématique de la recherche : quelles sont les valeurs constructives, sociales, économiques et sensibles associées à la double façade légère dans la réhabilitation des logements collectifs du XXe 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 méthode 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.

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



Façade d'un immeuble du Campus de la Doua en cours de chantier. Façade-rideau d'origine / Nouvelle façade-rideau
Cl. Mathilde Padilla, 2018



PARTIE 1 : CADRE DE LA RECHERCHE

I. CONTEXTE HISTORIQUE

La révolution industrielle et le développement technologique contemporains ont engendré de profondes mutations dans de multiples domaines et tout particulièrement dans le champ de la construction. Les évolutions techniques de la seconde moitié du XIXe siècle vont amener de multiples expérimentations en posant les fondements d'une industrialisation de la construction. Les objectifs visés par cette nouvelle manière de construire sont de réduire les temps de chantier, de construire à plus grande échelle, de réduire les coûts, notamment liés à la main d'œuvre et de rationaliser la production architecturale par la normalisation et la production en série d'éléments de second œuvre.

C'est aux États-Unis qu'apparaissent les premiers éléments construits préfabriqués comme nous avons pu le souligner précédemment. Le Mouvement moderne international ne cessera de développer ces techniques par la suite. Les chantiers se font désormais « en gants blancs » ou la main d'œuvre sur site n'a plus qu'à assembler des éléments finis. Les structures métalliques se généralisent. Lorsqu'elles sont en béton coulé, des systèmes sont inventés pour les construire rapidement et à moindre coût, comme le coffrage tunnel qui permet la réalisation des voiles et des dalles en simultanée. Dès les années 1920 les architectes français Eugène Beaudouin et Marcel Lods s'intéressent à l'industrialisation de la construction et commence à y associer la préfabrication d'éléments en usine afin de réduire considérablement les temps de travaux sur chantier. Ils mettront en œuvre ces procédés pour la première fois à grande échelle sur la cité

du Champs des Oiseaux à Bagneux (1927-1928) et la cité de la Muette à Drancy (1929-1932).

Ces avant-gardes de l'entre-deux guerres tentent également de répondre à une problématique qui touche de nombreuses villes françaises : l'insalubrité des logements. De nombreux foyers vivent dans des conditions de logement déplorables, dans des bidonvilles en périphérie des grandes villes telles que Paris et Lyon. Des architectes se penchent alors sur la question de la production de logements à grande échelle. Aux travaux de Beaudouin et Lods cités précédemment qui combinent politique sociale et industrialisation, on peut ajouter le projet de la cité des États-Unis par Tony Garnier à Lyon, inaugurée en 1934 et le quartier des Gratte-Ciel à Villeurbanne, édifié par Môrce Leroux et également inauguré en 1934. Dans ces deux projets lyonnais, la notion d'industrialisation de la construction est moins présente, mais ils soulèvent d'autres enjeux de production de logements de masse associés à des équipements, des commerces, des services pour les habitants. Il s'agit des prémices des futurs Grands Ensembles. Les travaux amorcés par les CIAM et Le Corbusier dès les années 1930 permettent d'asseoir les principes du Mouvement Moderne au sein de la Charte d'Athènes. Mais à l'exception de quelques projets, ceux-ci restent essentiellement théoriques.

Les destructions de la seconde Guerre Mondiale et la nécessité de reconstruire l'Europe à son lendemain vont permettre de généraliser ces procédés nouveaux, mettant l'État face à ses responsabilités en matière de



Cité du Champ des Oiseaux, Beaudouin et Lods, Bagneux, 1927-28
© Delcampe, s.d.



Cité de la Muette, Beaudouin et Lods, Drancy, 1929-32
© Delcampe, s.d.

production de logements. Jusqu'alors peu répandue, la construction industrielle et préfabriquée s'impose comme le moyen privilégié de répondre aux enjeux contemporains en matière de construction de logements. Se met alors en place une politique de chantiers expérimentaux sous l'égide du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme, fondé en 1944, dans le dessein de répondre à la crise contemporaine. L'État entend 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. 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 de façades dites « légères », composées d'éléments fabriqués en série. En marge des programmes lancés par l'État, Jean Prouvé se rapproche de l'Abbé Pierre et propose une solution de maison préfabriquée : « La maison des Jours Meilleurs ». Elle sera montée sur les quais de la Seine en seulement sept heures. Malheureusement, les normes auront raison de ce prototype qui ne sera pas homologué, ses pièces d'eau n'ayant pas d'ouverture vers l'extérieur.

Jean Prouvé était un concepteur particulièrement sensible à ces questions de construction économique et rapide pour solutionner un problème social à grande échelle. Durant les différents conflits armés antérieurs,

il avait déjà été sollicité par l'État pour construire des baraquements préfabriqués pour les soldats. La préfabrication en atelier est pour lui la seule solution aux problématiques rencontrées dans le milieu de la construction. Il cherche à produire des éléments de qualité, à bas prix, dans un souci d'économie de matière et d'efficacité. C'est tout naturellement qu'il s'est alors orienté vers la production de façades légères préfabriquées. Il en réalisa un certain nombre pour des opérations Emmaüs comme la Cité Pierre Montillet au Blanc-Mesnil en 1957 des architectes Candilis, Josic et Woods ; mais également en lien avec Baticoop, comme un immeuble à Dijon de Blanc, Pivot et Junillon en 1958 ; ou encore avec les Offices HLM comme pour la Cité des Pâquerettes à Nanterre des architectes Sebillotte, Darras et Kopp construite en 1959.

Par la suite, une fois la reconstruction largement engagée, le principe de copropriété qui trouvera bientôt une large diffusion, et séduit les promoteurs privés qui voient l'occasion de construire des immeubles résidentiels en périphérie des villes, pour des populations plus aisées. C'est dans ce cadre que l'immeuble Les Cèdres a été construit sur un terrain acheté par le Groupement des promoteurs lyonnais alors dirigé par Raymond Walch. Les principes initiés par la production du logement social se voit alors déclinés sur ces immeubles en copropriété et c'est ainsi que Prouvé fut sollicité pour la confection des panneaux de façades de l'immeuble les Cèdres, mais également d'autres opérations similaires sur l'ensemble du territoire.



Cité Emmaüs Pierre Montillet
Cl. ESK, 1984



Photographie de la Cité des Pâquerettes
«L'amour existe», film de Maurice Pialat, 1960

II. ETAT DE L'ART

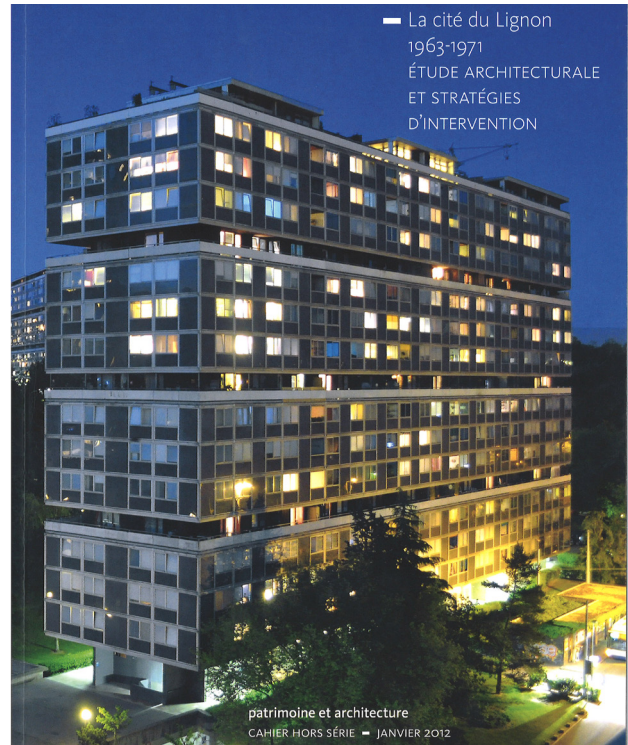
Les travaux développés au sein du Laboratoire des techniques et de la sauvegarde de l'architecture moderne sous la direction du professeur Franz Graf, associé à Yvan Delemontey et Giulia Marino, ont montré qu'il était possible de concilier patrimoine, économie et énergie en une visée synthétique¹. On songe en particulier à la démarche innovante conduite à propos de la Cité du Lignon à Genève². Sans qu'il soit 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 cent vingt-cinq mille mètres carrés 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 à Lyon.

Des écrits plus anciens font également références sur le sujet. On pense ici aux travaux effectués par le CIMUR – Comité d'Information pour le Développement des Panneaux de Façade et des Murs-rideaux – groupement d'ingénieurs et de techniciens contemporains de la technique qui ont produit un certain nombre d'études visant à promouvoir ces nouvelles techniques. Ces études ont abouti à un ouvrage, *Techniques françaises des façades légères, murs-rideaux et panneaux de façade*³ édité en 1965, qui présente sous la forme d'un catalogue, les différentes techniques de façades légères, les matériaux, les isolants, les assemblages, les étanchéités, et tous les éléments qui composent ces façades de la façon la plus exhaustive possible. Cet ouvrage a servi de socle technique à notre travail de recherche et a également permis d'enrichir le corpus d'immeubles concernés.

1 Franz Graf et Giulia Marino (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.

2 Franz Graf et Giulia Marino (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.

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



Couverture de l'ouvrage de Franz Graf et Giulia Marino
© Patrimoine et architecture, cahier hors-série, 2012



La cité du Lignon, Genève
Cl. Claudio Merlini, sans date © Le Moniteur

III. CORPUS

A/ DU CORPUS AU PROJET DÉMONSTRATEUR

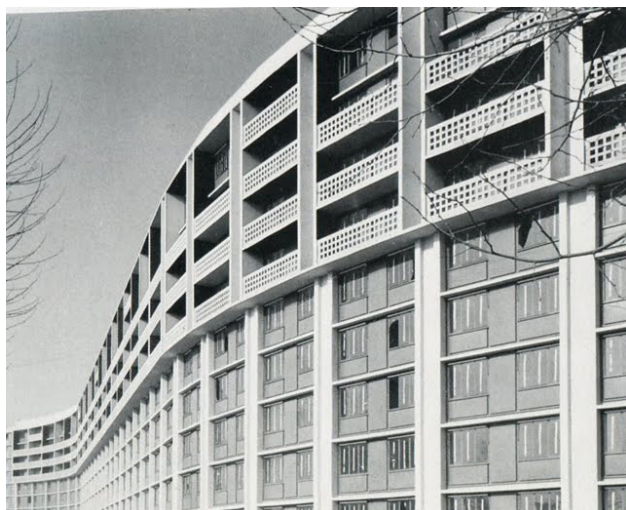
Les premières investigations ont porté sur la constitution d'un corpus d'immeubles de logements dotés de façades légères, centré sur la région lyonnaise, particulièrement concernée par ce type de production. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, Lyon s'impose comme l'un des théâtres privilégiés des opérations expérimentales du MRU avec la création en 1945 de l'Atelier régional d'urbanisme dirigé par les architectes Franck Grimal (1912-2003) et René Gagès (1921-2008). Le premier chantier d'envergure est celui de Bron-Parilly (1951-1960) avec la construction de 2 607 logements. La mission est confiée à Pierre Bourdeix (1906-1987) associé à Grimal et Gagès, entourés de nombreux collaborateurs, dont François-Régis Cottin (1920-2013), d'ingénieurs, d'artistes et de paysagistes⁴. Cette pluridisciplinarité permet d'imaginer de nouvelles techniques d'exécutions selon trois principes : la standardisation, la préfabrication et l'indépendance des corps d'état. Doté d'un plan libre, le projet a pour uniques contraintes les structures, les gaines techniques et les pièces humides. Les refends sont tous perpendiculaires à la façade, les cloisons intérieures sont mobiles et les façades légères sont composées de panneaux de métal et de verre⁵.

L'opération de Bron-Parilly aura une influence décisive

4 Delemontey (Yvan), « L'unité de voisinage de Bron-Parilly », AMC, avril 2008, n° 178, p. 112-118.

5 Dufieux (Philippe), *René Gagès ou la permanence de la modernité*, Annecy, Conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement de Haute-Savoie, 2017, 178 p.

sur la production de logements de la région. Son exemple est reconduit sur d'autres opérations matérialisant le renversement des traditions constructives lyonnaises habituées aux façades porteuses en béton de mâchefer. Au reste, on ne sera pas surpris que l'essentiel des réalisations composant le corpus d'étude soit postérieur à Bron-Parilly. Les façades légères employées sont fréquemment appliquées en murs-panneaux, insérés entre les nez-de-dalle. C'est le cas des barres de la Duchère, de l'immeuble Le Montgolfier de René Gagès dans le 6^e arrondissement de Lyon (1959), de l'immeuble Le Parc de Saint-Didier-au-Mont-d'Or de Gagès et Gabriel Roche (1965), de l'immeuble La Mésangerie à Tassin-la-Demi-Lune de Franck Grimal (1965), du Rhodanien de Batton et Roustit (1961) et du Constellation d'Auguste Murat dans le 3^e arrondissement de Lyon (1964). Il semble au demeurant que le seul immeuble de logements construit à Lyon dans les années de l'après-guerre développant la technique du mur-rideau soit celui des Cèdres de Cottin, Chastel, Dallièrre et Prouvé (1959-1962). Le seul autre bâtiment de logements utilisant des panneaux aluminium passant devant les nez-de-dalle est la résidence Beau-Site 4 de Pierre Tourret construite en 1961, mais il s'agit ici d'un semi-rideau. Cette singularité a retenu l'attention de l'équipe sur l'immeuble Les Cèdres pour en faire un projet démonstrateur des recherches sur la réhabilitation des façades légères à forte valeur patrimoniale.



Unité de voisinage Bron-Parilly
© SAAL



Résidence Beau-Site 4
Cl. Georges Fessy, s.d.

B/ L'IMMEUBLE LES CÈDRES

L'immeuble « Les Cèdres » est un immeuble de logements situé au 44 rue de la Favorite dans le 5^e arrondissement de Lyon. Il tient 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 60 logements en copropriété. Il est l'œuvre de l'architecte François-Régis Cottin⁶ et du constructeur Jean Prouvé pour la conception des façades légères.

Un architecte moderniste

François-Régis Cottin est un architecte, urbaniste et historien, né en 1920 à Lyon. Bachelier à dix-sept ans, il rentre en classe préparatoire de l'école des Beaux-Arts en 1937 aux côtés de René Gagès. En 1939, il est reçu premier à l'école régionale d'architecture de Lyon. Il intègre alors, avec René Gagès, l'Atelier Tony Garnier dirigé par Pierre Bourdeix. Très tôt, son goût le porte vers les expériences les plus modernistes du moment ce qui l'amène à se rapprocher de Gagès. Il est rapidement reconnu comme un élève brillant pour son talent en dessin et en rendu. Son directeur lui suggère de présenter le Grand Prix de Rome mais Cottin refuse. L'architecte est diplômé en 1949 pour un centre paroissial dans lequel il conjugue le pisé et le béton armé. Beaucoup plus tardivement (1973), il s'inscrit à l'École de Chaillot où il sera diplômé d'études supérieures pour la connaissance et la conservation des monuments anciens.

Sa première réalisation est la chapelle de la Giraudière à Brussieu en 1950. Puis, il place le logement au cœur de ses préoccupations. Il réalise des maisons individuelles groupées autour de placettes le long du boulevard de ceinture à Vénissieux pour le compte de l'office HLM, pour lesquelles il revisite le rapport entre espace privé et espace public. Il participe également à l'opération Bron-Parilly au côté de René Gagès, comme de nombreux architectes modernes lyonnais. A cette occasion, il rencontre Jean Prouvé. L'ingénieur avait été consulté pour réaliser les façades des immeubles de Bron-Parilly pour lesquelles il avait conçu des panneaux aux profils aériens ; mais ces derniers éléments furent jugés trop expérimentaux et surtout trop coûteux.

François-Régis Cottin s'illustre particulièrement dans l'élaboration du plan masse du quartier de la Duchère en 1959 avec Franck Grimal qui demeure sa réalisation

majeure. La même année, il conçoit les plans de l'immeuble les Cèdres dans le quartier Saint-Just. Il est également l'auteur de la tour Panoramique (1967-1972), de l'église du Plateau (1968) ainsi que du Château d'Eau de La Duchère (1967). Nombre de ses réalisations ont reçu le label « Patrimoine du XX^e siècle ». Au cours de sa carrière, Cottin se distingue également en matière d'enseignement. En 1951, Cottin rejoint Gagès au sein de l'atelier libre fondé en 1949, à la demande d'anciens élèves de l'École régionale d'architecture de Lyon et enseigne jusqu'à sa dissolution en 1964.

Pour le projet de l'immeuble les Cèdres, Cottin s'associe à Alain Chastel, autre architecte de la région lyonnaise. Ensemble, ils réalisent les plans d'aménagements de l'immeuble, des logements et des abords. Alain Chastel est lui aussi diplômé de l'École régionale d'architecture de Lyon.

L'équipe est complétée par le chef d'agence de François-Régis Cottin, Marcel Dallièrre. Il termine à peine ses études lors de la conception de l'immeuble Les Cèdres qui est l'un de ses premiers projets. Marcel Dallièrre a lui-même habité l'immeuble, dans un logement situé au 6^e étage de l'allée B. François-Régis Cottin, Alain Chastel et Marcel Dallièrre se chargent de la conception d'ensemble de l'immeuble, des plans et des cloisonnements. La conception des façades est déléguée au constructeur Jean Prouvé, expert en façades légères préfabriquées.



Cité de la Duchère, Lyon, Cottin, 1959-1974
© Delcampe, s.d.

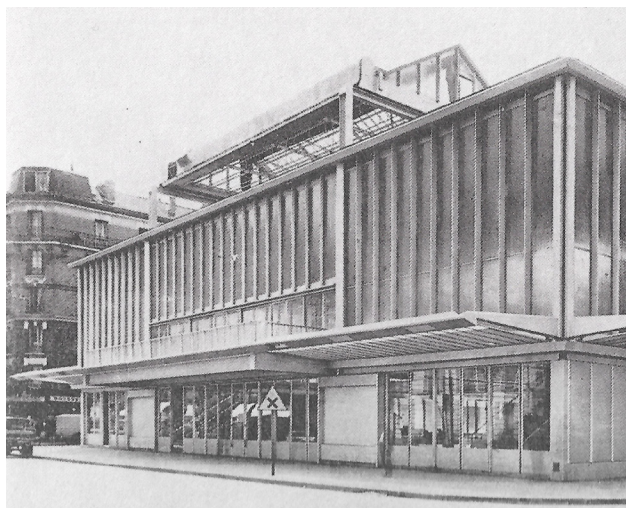
⁶ Philippe Dufieux, « Le compas et la plume » (préface à), *François-Régis Cottin (1920-2013). L'architecte-historien*, Lyon, Société d'histoire de Lyon, 2013, (recueil d'articles publiés entre 1972 et 2011), p. 7-16/470 p.

Un ingénieur de renom

Jean Prouvé est né à Paris en 1901 d'un père peintre, membre influent de l'École de Nancy et d'une mère musicienne. Le foyer retourne rapidement vivre à Nancy, sa ville d'origine. La scolarité de Jean Prouvé reste inachevée. Un problème de santé l'empêche de passer son certificat d'études et il ne peut entrer dans l'école d'ingénieur dont il rêvait. Il est alors envoyé en apprentissage à Paris chez un ferronnier. Doué, il réalise des ferronneries d'art pour son propre compte dès 1918. En 1923, à son retour de l'armée et grâce au soutien financier d'un ami de son père, il ouvre son premier atelier rue du Général Custine à Nancy. Cette entreprise porte alors le nom « Jean Prouvé, ferronnier d'art - serrurerie ». Il s'équipe d'outils de travail à la pointe de la technologie. Il travaille d'abord avec une forge, puis une presse plieuse et enfin il acquiert un poste de soudure électrique. En 1929, Jean Prouvé dépose son premier brevet pour une cloison mobile. Les commandes affluent et son local devient trop exigü. En 1931, il crée « Les Ateliers Jean Prouvé » qui emménagent rue des Jardiniers. Ces locaux, plus grands, permettent d'accueillir une trentaine de compagnons et de faire l'acquisition d'une presse-plieuse de quatre mètres de largeur, autorisant des réalisations plus ambitieuses. En 1936, la rencontre de Jean Prouvé avec les architectes Eugène Beaudouin et Marcel Lods, adeptes de l'industrialisation de la construction et de la préfabrication, engage un tournant dans sa carrière. Ils réalisent ensemble le club d'aviation de Buc (Yvelines), un prototype de maison de vacances démontable, et la

Maison du Peuple de Clichy (1939) qui s'impose très tôt comme une œuvre fondatrice. Ces projets lui ouvrent les portes de l'échelle industrielle dont il rêvait pour ses Ateliers. Pendant la Seconde Guerre mondiale, Jean Prouvé, en tant que père de famille nombreuse, n'est pas appelé. Il fait survivre ses ateliers comme il le peut malgré la pénurie de métal. En 1944, il suit l'appel du Général de Gaulle et, en raison de son activité dans la Résistance, il est élu maire de Nancy. Pour lui, il ne s'agit que d'un poste provisoire, trop loin de sa passion et de ses ateliers. Il ne se représente pas l'année d'après. Il s'investit en revanche dans l'effort de reconstruction et imagine des maisons d'urgence pour les sinistrés.

N'oubliant pas son souhait d'atteindre une dimension industrielle, Jean Prouvé déménage ses ateliers dans des usines à Maxéville (Meurthe-et-Moselle). Avec la pénurie d'acier qui suit la guerre, il commence à s'intéresser à l'aluminium et à en exploiter les capacités. L'Aluminium Français achète des parts dans les Ateliers. L'usine fait 25 000 m² et accueille 200 ouvriers. Jean Prouvé atteint enfin l'échelle industrielle qu'il ambitionnait. L'usine produit de nombreuses maisons individuelles entièrement préfabriquées dont un grand nombre est envoyé en Afrique en avion ou par bateau. Pour la production de mobilier, Jean Prouvé signe une collaboration avec Charlotte Perriand en 1952. Les affaires se développent et réclament de nouveaux capitaux. Jean Prouvé perd alors la majorité financière de son entreprise. Ne s'entendant plus avec ses actionnaires, notamment Studal, et refusant d'être une tête pensante loin des ateliers et de la fabrication,



Maison du Peuple de Clichy
© L'architecture d'Aujourd'hui, n°5, 1939



L'intérieur de la Buvette d'Evian aujourd'hui
Cl. Claudio Merlini, sans date © EPFL-TSAM

il se retire en 1953. L'Aluminium Français le rappelle comme administrateur. En 1956, les ateliers changent de nom pour devenir « les Ateliers de constructions préfabriquées de Maxéville ». Jean Prouvé récupère alors la dénomination sociale de l'entreprise, ses études et ses techniques. Après sa démission, il réalise de nombreux projets avec une petite équipe : le pavillon du centenaire de l'aluminium (1954), sa maison à Nancy (1954), la buvette d'Évian-les-Bains (1956-58), les écoles de Villejuif (1956-57), la maison des Jours Meilleurs pour l'Abbé Pierre (1956) etc.

Après cette période particulièrement féconde Jean Prouvé intègre la Compagnie Industrielle du Matériel de Transport en 1956. Il y est responsable du département Bâtiment. Il est loin de l'outil de fabrication qu'il affectionne tant. La conception est assurée à Paris tandis que la fabrication se fait à Bordeaux. L'échelle industrielle l'amène à renoncer à la production de prototypes. En revanche, il participe à des projets d'envergures avec la C.I.M.T, notamment sur des murs-rideaux (tour Nobel, faculté de médecine de Rotterdam, extension du siège de l'UNESCO, écoles, aérogare d'Orly etc.) et acquiert une véritable notoriété. C'est au sein de la C.I.M.T qu'il crée les panneaux préfabriqués de la façade des Cèdres. Il y reste jusqu'en 1968. Parallèlement, il enseigne au Conservatoire national des Arts et Métiers de 1957 à 1966. Après avoir quitté la C.I.M.T, il ouvre un cabinet d'architecte conseil rue des Blancs-Manteaux à Paris. Il y suivra le projet du Centre Georges Pompidou dont il est le président du jury. Il exercera dans ce cabinet jusqu'à sa mort en 1984.

Un unicum dans la production française contemporaine ?

L'immeuble les Cèdres s'élève au cœur de sa parcelle, sur les collines du 5^e arrondissement de Lyon. Il s'agit d'une barre de neufs niveaux de logements, orientée nord/sud et basée sur un rez-de-chaussée en double-hauteur dédié aux espaces communs. Un jardin est aménagé au sud du bâtiment, le mettant à distance par rapport à la rue. Au nord, masqué derrière le bâtiment, les architectes ont intégré un espace dédié à la voiture avec des garages, des stationnements et initialement une station de nettoyage des véhicules aujourd'hui inexistante. Les neuf étages de l'immeuble sont occupés par 60 logements en copropriété, allant du T1 au T6, répartis en trois allées. Tous les appartements sont traversants du nord au sud, sauf les studios. Les distributions verticales sont positionnées au centre de l'immeuble, les séjours sont orientés au sud et les chambres au nord. Les pièces humides sont regroupées au centre des appartements. Des loggias complètent l'ensemble en façade sud. Comme à Bron-Parilly, les cloisons sont pensées pour être amovibles et permettre une certaine forme de modularité. La structure de l'immeuble est assurée par une succession de murs de refend de vingt-cinq centimètres d'épaisseur en béton armé, selon une trame de 5,25 mètres. Ils sont coulés sur la hauteur totale d'un étage. Au niveau de la galerie du rez-de-chaussée, 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 quant à elle de dalles pleines



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



Façade sud de l'immeuble, photographie extraite du catalogue CIMT
© Centre Pompidou/MNAM-CCI/Bibliothèque Kandinsky

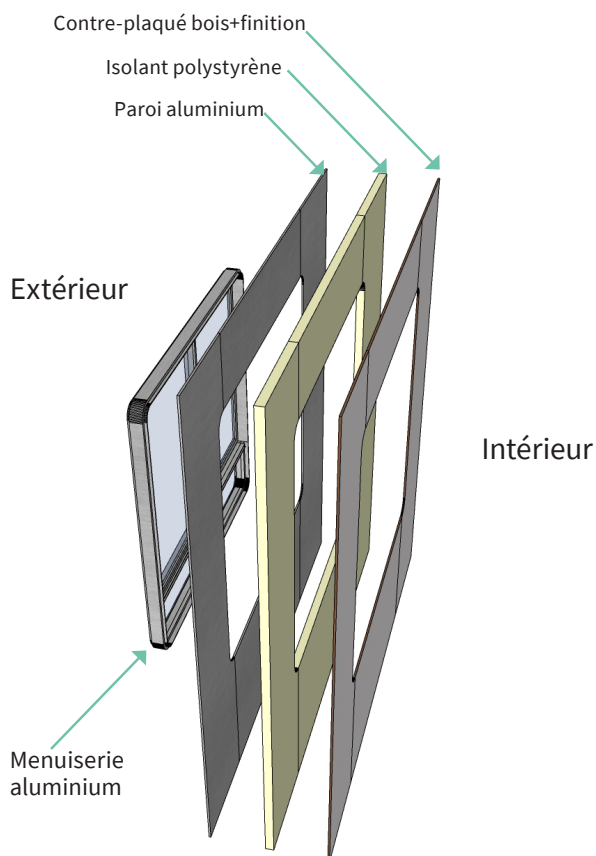
en béton armé de dix-sept centimètres d'épaisseur. Un joint de dilatation coupe la structure en deux entités indépendantes entre l'allée B et l'allée C.

Les façades principales de l'immeuble les Cèdres sont constituées de murs-rideaux à panneaux préfabriqués qui lui confèrent une esthétique singulière, parfaitement lisse et homogène, ainsi qu'une finesse et une légèreté étonnantes sur un bâtiment aussi imposant. La construction des Cèdres se situe à un moment décisif dans les réflexions contemporaines de Prouvé portant sur les panneaux de façades dont il expérimente les premiers brevets dès 1947, relatifs à des panneaux à double parois en tôle d'aluminium. Ceux-ci sont constitués de deux parois indépendantes tendues par des ressorts et garnis de laine de roche. Cette solution, encore rudimentaire, annonce les expérimentations et les réalisations futures. Quand Prouvé intègre la C.I.M.T. en 1956, il dispose alors d'outils industriels éprouvés qui lui permettent de développer une nouvelle technique de panneaux « sandwichs » qu'il décrit de la manière 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. 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. [...] 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 type⁷. »

Les panneaux mis en œuvre sur l'immeuble lyonnais mesurent 262 cm de large pour 269 cm de haut et appartiennent à cinq types différents : classique sud, classique nord, loggia, variante et studio. Ils sont composés d'une plaque d'aluminium ondulé côté extérieur, d'une plaque de bois contreplaqué côté intérieur, d'un remplissage en mousse de polystyrène expansé et d'une menuiserie en aluminium dotée de simple vitrage de 3mm. Les panneaux des loggias possèdent deux faces en aluminium strié.

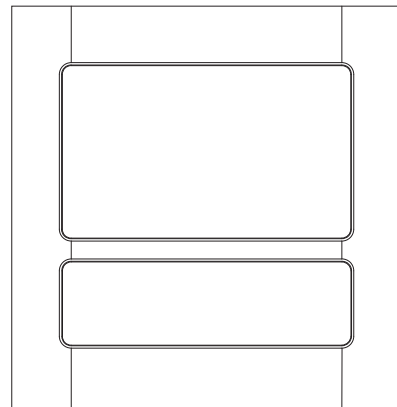
Les panneaux dits « classiques sud » composent la quasi-totalité de la façade sud. Ils s'agit d'une fenêtre constituée d'une allège vitrée fixe surmontée d'un coulissant. Ce type est utilisé sur les pièces de séjour et les cuisines. Quelques occurrences se retrouvent en façade nord, dans les T6 des derniers niveaux de l'allée C dont les séjours sont traversants. 110 panneaux sont de type « classiques sud », mais les panneaux les plus fréquents sont les « classiques nord » avec 174 occurrences. Ils composent les façades des chambres, côté nord. Sur ce type, Jean Prouvé a retiré l'allège fixe vitrée pour donner plus d'intimité aux habitants dans ces espaces de nuit. La fenêtre des panneaux « classiques nord » est donc moins haute que celle des « classiques sud ». La troisième grande famille de panneaux concerne les loggias et représente 54 unités. De toute évidence, Jean Prouvé souhaitait faire bénéficier les habitants de la plus large ouverture possible vers l'extérieur, la partie pleine du panneau est alors 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



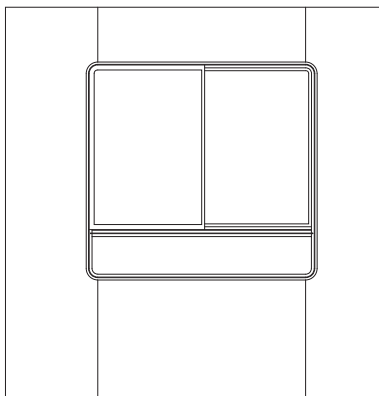
Composition d'un panneau sandwich de l'immeuble
© Mathilde Padilla, 2018

⁷ Peter Sulzer, *Jean Prouvé, Œuvre complète, vol. 4 1954-1984*, Birkhäuser, 2008, 334 p.

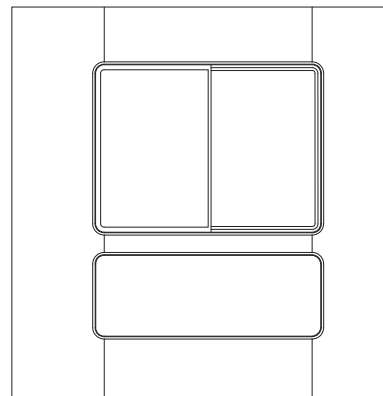
appelé « variante ». Le panneau est ensuite complété par une menuiserie identique à celles utilisées dans le type « classique nord ». Ce type « variante » est utilisé dans les séjours des appartements T6 situés dans les derniers niveaux de l'allée C, côté sud. L'objectif de Jean Prouvé dans la conception de ce type fut d'apporter davantage de lumière naturelle dans les séjours des T6, plus profonds que ceux des autres appartements. Cette variante ne concerne que 16 panneaux. On retrouve également quelques panneaux de ce type dans un appartement de l'allée B. Étonnés par leur positionnement, nous avons effectué quelques recherches et l'appartement concerné n'est autre que celui acheté par Marcel Dalrière. Enfin, le dernier type de panneaux est le type « studios » que l'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 a été 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 poursuit ses réflexions sur la question des usages des espaces concernés et de leurs besoins en luminosité et intimité.



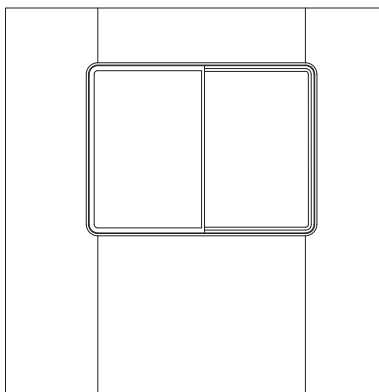
Panneau loggia
© Mathilde Padilla, 2018



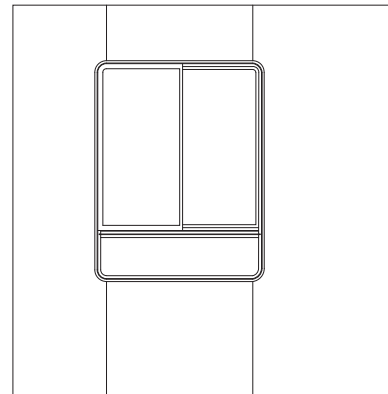
Panneau classique sud
© Mathilde Padilla, 2018



Panneau variante
© Mathilde Padilla, 2018



Panneau classique nord
© Mathilde Padilla, 2018



Panneau studio
© Mathilde Padilla, 2018

Un immeuble-manifeste

Après avoir expérimenté ces panneaux sur plusieurs projets, Prouvé prend la mesure des problèmes de pose leur adaptation aux multiples trames structurales. L'ingénieur dépose alors un nouveau brevet en 1964 pour des panneaux constitués de deux montants latéraux invariants et d'un montant central adaptable. La largeur des panneaux peut varier entre 120 et 330 cm selon des multiples de 30 cm. La hauteur du panneau est fixe : 241 cm pour des murs-panneaux et 269 cm pour des murs-rideaux. Les montants et panneaux intermédiaires sont constitués de deux tôles reliées par des entretoises permettant une isolation intermédiaire thermique et phonique. Il semble au demeurant que l'ingénieur ait développé cette technique à la faveur du projet Les Cèdres qui, antérieur à ce brevet, a pu servir de prototype. En tout état de cause, l'immeuble lyonnais semble être le dernier, ou du moins l'un des derniers, à avoir conservé des panneaux de ce modèle. En effet, si Prouvé a développé d'autres panneaux de ce type pour des programmes de logements contemporains comme la Cité HLM Pierre Montillet au Blanc-Mesnil avec Josic, Candilis et Woods (1957-58) ; l'immeuble Baticoop

à Dijon avec les architectes Blanc, Pivot et Junillon (1958) ; la tour du Fer à Cheval à Roubaix de Guillaume Gillet (1958) ; un ensemble d'immeubles à Nanterre avec Darras, Kopp et Sebillotte (1959), aucune de ces opérations n'a conservé ses panneaux d'origine. Après Les Cèdres, Prouvé utilise majoritairement des panneaux de ce modèle pour les équipements. La production de ce type de façades pour les logements était totalement expérimentale et relevait presque du prototypage. Il est vrai que les offices HLM avaient besoin de construire rapidement et les façades légères apportaient une solution idéale à cette problématique. Ce caractère expérimental a bien souvent conduit à les considérer comme éphémères, répondant à une urgence, et elles ont souvent été remplacées lors de rénovations dans les années 1980-90. Les Cèdres demeurent 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.



L'immeuble les Cèdres depuis la rue de la Favorite
© Mathilde Padilla, 2018



PARTIE 2 : MÉTHODOLOGIE

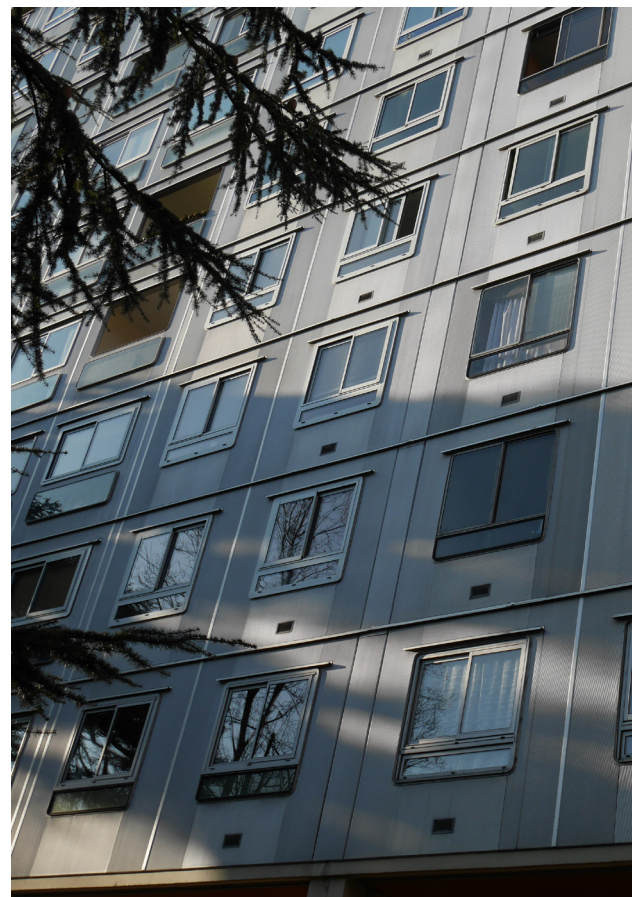
I. UN PROJET DÉMONSTRATEUR

Dans ces conditions, il nous a semblé essentiel de conduire une étude scientifique de l'immeuble pour nourrir notre démarche de recherche d'autant qu'à bien des égards ce cas d'étude se révèle archétypique. Si la transposition de l'esthétique industrielle dans le domaine du logement constitue l'une des problématiques majeures de l'histoire de la modernité, la perception des façades industrielles par les habitants demeure des plus équivoques. Prouvé, lui-même, reconnaissait que ses façades provoquaient : « [...] une impression d'insécurité, résultant de la minceur apparente inhabituelle des parois¹ » ; dans un sentiment décuplé par la matérialité et la forme des ouvertures. Outre la perception visuelle, la finesse de ces façades permet difficilement d'assurer l'isolation thermique et acoustique des logements ; obligeant à une surconsommation énergétique en hiver. Comment dès lors prolonger la durée de vie de ces façades tout en respectant leurs qualités propres, en tenant compte des conditions économiques des occupants, des exigences normatives pour le confort et des demandes sensibles d'aujourd'hui ? Quelles solutions sommes-nous en mesure de proposer pour préserver et adapter ces façades aux besoins actuels en leur redonnant un rôle d'interface entre intérieur et extérieur ? C'est à l'ensemble de ces questions que ce projet de recherche ambitionne de répondre.

Dès janvier 2017, l'équipe a pris contact avec le gestionnaire historique de l'immeuble : la régie Franchet et Cie à Lyon qui gère l'immeuble depuis sa construction et qui possède une véritable traçabilité de la vie de l'édifice. Renaud Franchet, l'un de ses dirigeants, fit état des difficultés qui pourraient survenir pour réhabiliter cet immeuble si particulier et fut très vite convaincu de la pertinence d'élaborer un programme de recherche pour stimuler les habitants. L'équipe de recherche a été invitée à présenter le sujet de la thèse aux copropriétaires, seuls décisionnaires pour autoriser ou non les interventions. Lors de l'assemblée générale d'avril 2018, l'équipe a souligné les spécificités de l'immeuble Les Cèdres et l'importance d'effectuer une réhabilitation adaptée à sa valeur patrimoniale. Les copropriétaires, conscients des enjeux, ont autorisé l'équipe à appuyer ses recherches sur leur immeuble, à engager les diagnostics le mois suivant et à construire un prototype-test dans les deux ans, démonstrateur du chantier à venir. Les habitants ont également fait part de leur envie de participer à l'élaboration de ce projet

via la création d'une association d'habitants. Enfin, les copropriétaires ont débloqué un budget de 15 000 € à cet effet. À ce jour, la réhabilitation n'a pas encore été décidée et dépendra des propositions de l'équipe. Une fois ces conditions réunies, la dynamique de recherche a pu s'engager.

Ajoutons enfin que l'immeuble les Cèdres est une copropriété qui regroupe des profils variés, des personnes âgées, des familles, des jeunes couples ou des personnes seules. Tous les 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 des nouveaux propriétaires. L'immeuble se distingue ainsi par une grande mixité.



La façade sud de l'immeuble les Cèdres
© Mathilde Padilla, 2018

¹ Peter Sulzer, Jean Prouvé, *Œuvre complète*, vol. 4 1954-1984, Birkhäuser, 2008, 334 p.

II. UNE DÉMARCHE DE PROJET INNOVANTE

Ces dernières décennies, de nombreuses façades légères ont été déposées pour être remplacées par des enveloppes aux performances environnementales plus conformes aux exigences d'une normalisation nationale qui, de plus, règle les subventions financières. La physionomie extérieure est alors irrémédiablement transformée et l'isolation thermique, souvent moins performante après chantier qu'au moment des simulations par calcul, modifie les questions acoustiques tout autant que la luminosité intérieure des logements sans parler de la perception du voisinage au sein de la sphère domestique. La démarche étudiée pour cette recherche tente plutôt de conserver les éléments visibles du bâtiment en proposant d'adapter les performances normatives au profit des ressentis des habitants. Le label « Patrimoine du XXe siècle » n'ayant aucune incidence juridique particulière, la façade initiale pourrait être restaurée et doublée à l'intérieur pour proposer aux habitants des modulations thermiques, lumineuses et acoustiques adaptées. 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 obligation de bien être global – qui mérite à nos yeux un appui financier peut-être encore plus légitime que la précédente – et à développer des méthodologies innovantes dans le sillage des expérimentations qui, depuis une dizaine d'années, s'emploient à construire des démarches alternatives avec succès. On songe en particulier aux investigations de Franz Graf et de l'équipe du laboratoire TSAM de l'EPFL qui se sont révélées décisives dans la définition de la méthodologie qui suit. Outre les problématiques patrimoniales et de rénovation énergétique, nous avons souhaité développer une démarche reposant sur l'analyse des performances environnementales fondées sur l'ambiance vécue par les habitants, et ceci dans le cadre d'un immeuble appartenant à des copropriétaires peu fortunés.

III. UNE ÉQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE

Ce défi d'adaptation du patrimoine du XXe siècle aux exigences du XXIe siècle ne peut être relevé que par une recherche pluridisciplinaire mobilisant un ensemble d'acteurs du milieu de la construction ainsi que les usagers eux-mêmes. Elle rassemble une doctorante en architecture de l'ENSA de Lyon, Mathilde Padilla,

dirigée par Olivier Balaj, architecte, directeur de CASA architecture, professeur d'architecture à l'ENSA de Lyon et chercheur de l'unité UMR 1563 AAU / laboratoire CRESSON de l'ENSA de Grenoble, et par Philippe Dufieux, historien de l'architecture des XIXe et XXe siècles, chercheur au laboratoire EVS-LAURE et professeur d'histoire de l'architecture à l'ENSA de Lyon. La thèse est réalisée en Convention industrielle de formation par la recherche au sein de l'agence d'architecture Archipat (Lyon), où elle est suivie par Laurent Volay, architecte du patrimoine.

L'équipe de recherche réunit également les ingénieurs thermiciens et acousticiens des bureaux d'études TRIBU (Karine Lapray, Héloïse Marie) et LASA (Samuel Tochon, Sylvain Fenon). Elle fait appel à l'expertise d'un ingénieur spécialisé en structure métallique du bureau d'études DECARE (René Hugues) ainsi qu'à l'entreprise KCM Métallerie et Serrurerie (Stéphane Coquille). Les expérimentations réalisées au cours du projet sont élaborées avec le soutien et la participation des Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau à Villefontaine, dirigés par Maxime Bonnevie, partenaires privilégiés des Écoles nationales supérieures d'architecture de la région Auvergne-Rhône-Alpes ; et des Compagnons du Devoir de Villefontaine.

Cette recherche s'inscrit dans le cadre du programme de recherche de la Chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture « Habitat du Futur »² ; chaire à laquelle les deux directeurs de la thèse sont attachés, le premier comme suppléant à la direction scientifique (Philippe Dufieux), le second comme représentant du champ au sein de la gouvernance (Olivier Balaj). La Chaire « Habitat du Futur » réunit les quatre Écoles nationales supérieures d'architecture de la région Auvergne-Rhône-Alpes³, les trois sites universitaires de la région⁴ ainsi que les partenaires du Pôle d'innovation constructive (PIC) à Villefontaine (Isère), des constructeurs, des bailleurs sociaux proactifs dans le champ de l'habitat social, des collectivités territoriales⁵, soucieuses de l'aménagement de leurs espaces habités et des Établissements publics d'aménagement en relation avec des centres et agences techniques de l'État⁶. La Chaire « Habitat du Futur »

2 Sous la direction scientifique de Pascal Rollet, architecte, Intégral Lipsky-Rollet, chercheur dans l'équipe Culture Constructive, unité de recherche AE&CC labélisée labex. La chaire est actuellement en cours d'habilitation par le ministère de la Culture.

3 L'ENSA de Clermont-Ferrand, l'ENSA de Lyon, l'ENSA de Saint-Étienne et l'ENSA de Grenoble.

4 L'Université de Clermont-Auvergne et associés (UCAA), la COMUE Université de Lyon (UdL) et la COMUE Grenoble Alpes (UGA).

5 Dans le détail : la Communauté d'agglomération Porte de l'Isère (CAPI), La Métropole de Lyon, Grenoble-Alpes Métropole, Saint-Étienne Métropole et Clermont Auvergne Métropole.

6 CSTB, ADEME, INES, ANAH, CRHH.

a pour objectif de créer un lieu d'enseignement et de recherche par l'expérimentation qui suscite une mise en situation de pratique opérationnelle d'étudiants et de doctorants. Cette recherche s'inscrit plus précisément dans son quatrième axe de développement : Penser la mutation de l'existant⁷.

De plus, l'équipe de recherche a fait le choix de développer cette thèse dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche déposée en juillet 2017 et approuvée en décembre de la même année. A travers cette convention, l'objectif de l'équipe est de lier le milieu professionnel de l'architecture, et plus spécifiquement de l'architecture du patrimoine compte tenu du sujet de la thèse, le milieu de la recherche et le milieu de l'enseignement. Elle espère ainsi fournir un support pour d'autres expériences pédagogiques. La convention entre archipat, le LAURE, le 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.

Modalités d'intégration des compétences mobilisées

Mathilde Padilla, Olivier Balaÿ, Philippe Dufieux et Laurent Volay sont chargés du pilotage et du suivi de la thèse et du projet démonstrateur sur l'immeuble Les Cèdres. En tant que responsables des projets ils assurent la coordination de l'ensemble des intervenants.

Mathilde Padilla est chargée plus spécifiquement de la rédaction de la thèse, des relevés, de l'analyse architecturale et patrimoniale de l'immeuble Les Cèdres, de l'élaboration des différentes propositions de conception, de l'élaboration et de la fabrication du prototype. Philippe Dufieux, Olivier Balaÿ et Laurent Volay sont chargés de son encadrement.

Olivier Balaÿ et Philippe Dufieux, en tant que directeurs de la thèse, s'occupent plus spécifiquement du suivi scientifique de l'opération. Laurent Volay, en tant qu'architecte du patrimoine, assure le suivi des diagnostics architecturaux et patrimoniaux de l'édifice, mais également le suivi du projet architectural. Ensemble, ils s'assurent de proposer des propositions adaptées aux problématiques soulevées et aux besoins de la copropriété.

Les bureaux d'études TRIBU et LASA ont été sollicités durant les phases de diagnostics afin d'effectuer des mesures thermiques et acoustiques des performances

des panneaux. Ils sont également chargés d'élaborer les rapports de diagnostics qui servent de guides pour les phases de conception. Les deux bureaux d'études participent également à la conception en tant qu'experts pour accompagner les architectes afin de proposer des solutions les plus adaptées possibles. Ils ont alors la charge de simuler par informatique les différentes solutions envisagées pour les évaluer. Enfin, ils effectueront des mesures sur les prototypes pour valider leur efficacité et leurs performances et apporter des pistes d'amélioration. Ce projet a été l'occasion pour TRIBU et LASA d'investir du temps de recherche méthodologique adaptée au patrimoine du XXe siècle, d'expérimenter leviers, méthodes et techniques sur le croisement des approches environnementales (énergie et carbone), ambiantales (confort thermique, acoustique et santé), architecturales et patrimoniales. La méthode proposée ici doit continuer d'être éprouvée et développée. Elle doit également faire l'objet d'autres lieux d'expérimentations.

Stéphane Coquille (entreprise KCM) et René Hugues (Bureau DECARE), sont également sollicités durant les phases de diagnostics pour expertiser les panneaux et aider l'équipe de recherche à comprendre leur composition. Ils seront également sollicités pour la réalisation du prototype ainsi que Maxime Bonnevie, directeur des GAIA et Pascal Gantet, responsable des partenariats (matériel, outillage, ateliers, matériaux, connaissances techniques etc.).

La régie Franchet et Cie est consultée tout au long du travail de recherche pour apporter sa connaissance de l'historique de l'immeuble les Cèdres. Les habitants et les élus au conseil syndical sont sollicités pour faciliter notamment l'accès aux locaux à l'équipe de recherche et pour réaliser des entretiens concernant leurs besoins et les problématiques de confort.

Chaque fois que nécessaire, pour des besoins ponctuels spécifiques, l'équipe de recherche a pu s'appuyer sur les partenaires de la Chaire « Habitat du Futur ».

Un conseil scientifique, associant l'ensemble des acteurs du projet de recherche, se réunit une fois par an, à l'agence Archipat, à l'ENSAL ou in situ en fonction des questions soulevées par les hypothèses de travail. Ce conseil a souhaité associer les compétences de spécialistes reconnus : Franz Graf, directeur du Laboratoire des techniques et de la sauvegarde de l'architecture moderne et professeur à l'EPFL, dont l'importance des travaux n'est plus à souligner, ainsi que Florence Delomier-Rollin, conseillère pour l'architecture à la DRAC Auvergne-Rhône-Alpes.

⁷ Les autres axes de développement sont les suivants : Repenser l'économie du bâtiment ; Concevoir des logements éco-responsables économiques et adaptables ; Développer des matériaux de construction et les systèmes constructifs à faible impact carbone favorisant l'économie circulaire pour la production du cadre bâti ; Intégration des technologies numériques pour la production du logement en masse.

IV. ÉTUDES ET DIAGNOSTICS

Cette partie vise à présenter les protocoles d'études mis en place, pouvant être transposés à d'autres immeubles dotés de façades légères. Les résultats concernant l'immeuble Les Cèdres seront communiqués dans la partie 3.

A/ ARCHITECTURAL ET PATRIMONIAL

Un travail de diagnostics architecturaux et patrimoniaux a été conduit durant les six premiers mois du projet. L'objectif fut de réunir une connaissance exhaustive et scientifique de l'édifice et de ses besoins. Ces études ont donc débuté par une importante collecte de données parmi les documents d'archives publiques et privées. Dans un premier temps, il a fallu cibler les potentiels sources d'archives intéressantes. Les investigations ont débuté aux archives municipales de Lyon où ont pu être consulté 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 ne correspondent pas aux élévations réalisées et le permis contient peu d'éléments concernant la composition des façades hormis cette phrase citée dans le descriptif :

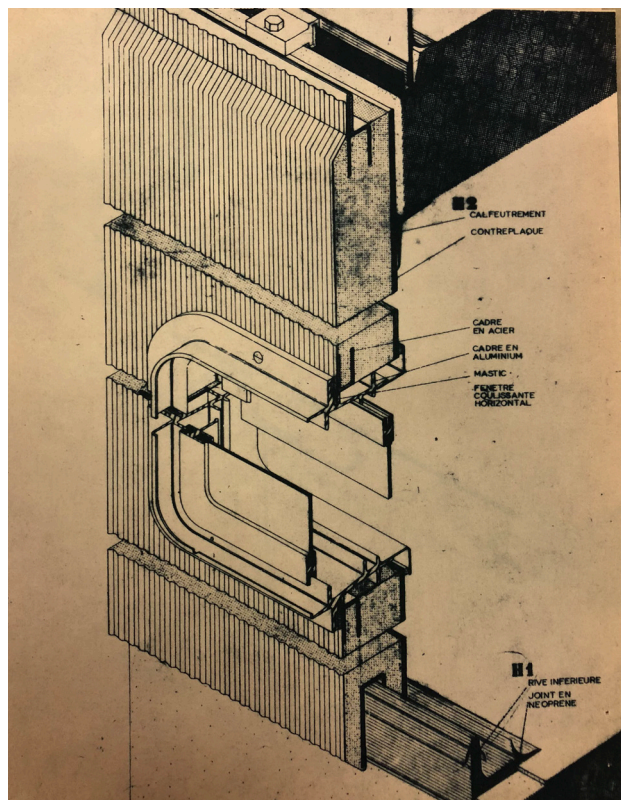
« Les façades seront constituées par des panneaux de remplissage fixés par parclose sur une armature métallique elle-même scellée dans la dalle. Ces panneaux comprendront :

- 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 isolation »⁸

Il apparaît donc que les façades de Jean Prouvé n'avaient pas encore été détaillées à l'architecte en 1959 au moment du dépôt du permis de construire, soit parce que leur collaboration n'avait pas encore débuté, soit parce qu'elles étaient en cours de conception. Pour obtenir les détails de façades, il a fallu poursuivre les recherches vers d'autres sources. Nos investigations nous ont conduit à la Société Académique d'Architecture de Lyon qui conserve les archives de Cottin mais le dossier concernant l'immeuble Les Cèdres, comprenant les plans et les détails d'exécution, a été perdu lors d'un



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



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

⁸ PC 1959, 165/1959, 44 rue de la Favorite, AML, 354 W 16

prêt à une entreprise dans le cadre de travaux. La SAAL ne put nous fournir que des photographies du bâtiment à sa réception et nous redirigea vers un de ses anciens conservateurs, l'architecte Régis Zeller, ami de Cottin qui possédait lui-même un album de photographies de l'immeuble au lendemain de son achèvement. Une part essentielle des archives de Prouvé sont conservées aux Archives départementales de Meurthe-et-Moselle, mais celles-ci sont actuellement fermées pour cause de travaux et déménagement. Fort heureusement, ce fonds documentaire de première importance avait été copié et archivé au Centre Georges Pompidou. La rencontre avec Olivier Cinqualbre, conservateur, nous a permis d'accéder à l'ensemble des plans et détails élaborés par Prouvé et son équipe de la CIMT pour le projet des Cèdres. Nous avons alors pu prendre connaissance de la composition interne des panneaux, des détails de leurs joints et des assemblages, mais également des photographies de chantier consultables dans les archives numérisées de la Bibliothèque Kandinsky.

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 Cie, mais également Marcel Dallièrè). La participation à des colloques consacrés au sujet des façades légères, à la production de Jean Prouvé et la visite de nombreuses expositions dédiées, comme celle organisée à Arles intitulée « Jean Prouvé, l'architecte des Jours Meilleurs », ont été particulièrement éclairantes. Ces recherches ont permis de comprendre les principes et les logiques développés par les concepteurs. Elles furent alors complétées par des relevés précis de l'existant ainsi que la réalisation de carottages dans un panneau de la loge du gardien, appartement vacant de l'immeuble servant de local au conseil syndical, les copropriétaires ayant donné leur autorisation pour que nous réalisions l'ensemble des expérimentations nécessaires dans cet appartement. Ce démontage partiel d'un des panneaux a permis de comprendre, en particulier, les dispositions des éléments au droit des assemblages, de vérifier l'état sanitaire du panneau et de ses composants et de confronter les informations données par les documents d'archives.

Il semble important de conclure que les sources archivistiques et d'informations doivent être confrontées afin d'avoir une connaissance pour ainsi dire exhaustive d'un bâtiment avant d'envisager toute intervention visant à le modifier. Plus largement, il convient de souligner l'importance de la phase diagnostic dans tout projet architectural et d'autant plus lors d'une

intervention sur l'existant. Les délais et coût dédiés aux projets architecturaux, aujourd'hui, ont tendance à négliger l'importance de cette phase d'études qui pourtant, lorsqu'elle peut être conduite, permet de gagner un temps précieux sur les phases de conception et d'éviter les erreurs d'interprétation et donc, parfois, la perte d'un élément patrimonial important.

Il est également important de rappeler l'importance de réaliser un diagnostic amiante et matière toxique ainsi qu'un diagnostic structure afin d'éviter la mise en danger des ouvriers de chantier mais plus largement des habitants et du bâtiment. Le diagnostic amiante et matières toxiques des panneaux de l'immeuble Les Cèdres 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. L'expertise de René Hugues, ingénieur spécialisé en structure métallique, et de Stéphane Coquille gérant de la société KCM Métallerie et Serrurerie, a été sollicitée afin d'approfondir l'étude des panneaux.



Ensemble des percements réalisés sur le panneau lors des travaux d'observation

© Mathilde Padilla, archipat, 2019



Raidisseurs des panneaux

© Mathilde Padilla, archipat, 2019

B/ THERMIQUE D'ÉTÉ

Simultanément aux diagnostics architecturaux, le bureau d'études TRIBU a mené des diagnostics thermiques sur l'immeuble, ainsi que des études par simulation thermique dynamique pour simuler le comportement actuel et futur de l'immeuble si on lui applique des modifications. Ces simulations thermiques dynamiques sont rarement réalisées dans les diagnostics de réhabilitation. Ils permettent pourtant d'évaluer les besoins d'un édifice et l'impact des modifications qui lui seront apportées.

Concernant les mesures, une méthodologie innovante a été mise en œuvre afin d'évaluer le confort d'été des occupants de l'immeuble, d'appréhender de manière fine le comportement thermique du bâtiment, et notamment l'impact des usages et éventuelles modifications apportées par les habitants à leur logement (isolation, stores, ouverture des fenêtres...).

Mesure des températures

Dans un premier temps, des mesures de températures ont été réalisées sur une quinzaine de jours, au moment d'un pic de chaleur, du 20 juin au 4 juillet 2018. Des capteurs ont été placés dans les séjours de trois appartements et un à l'extérieur, au-dessus du détecteur de mouvement à l'entrée du hall des Cèdres. Le premier appartement étudié, le logement A, est un appartement ayant conservé les dispositions d'origine, le logement B possède de nouvelles menuiseries 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 d'un 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, nous avons positionné les capteurs dans les séjours, côté sud, et sélectionné majoritairement des appartements situés dans les étages élevés et non protégés par l'ombre des arbres du jardin. Les logements A et B, respectivement situés au 8e et 7e étages, sont particulièrement exposés au soleil. Le logement C, bien que situé en partie basse de l'immeuble, au 3e étage, ne bénéficie pas de l'écran formé par les arbres proches.

En plus de ces facteurs environnementaux et architecturaux, l'occupation du logement peut faire varier les mesures. Il est important de bien la recenser. Nous avons par exemple demandé aux habitants combien de personnes occupaient 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), quand ils utilisaient leurs stores intérieurs, leurs appareils de cuisson, et enfin quand ils ouvraient leurs fenêtres, côté nord, côté sud ou les deux en même temps pour identifier les périodes de ventilation naturelle.

In fine, le diagnostic et ces premiers essais en comparant ces trois logements ont permis de révéler les défauts de l'enveloppe du bâtiment et l'impact des éventuelles modifications effectuées par les habitants. Le recueil des vécus et des mesures, complétés par des calculs de simulation thermodynamique, constituent des retours complémentaires pour proposer des solutions.



Repérage des capteurs du diagnostic thermique d'été

© Mathilde Padilla et TRIBU, 2018

Mesure des températures de surfaces

Pour compléter les mesures de températures effectuées dans les logements, des mesures de températures de surface ont été réalisées le 4 septembre 2018 dans un logement situé au 5e étage de l'allée B. Ces mesures complémentaires permettent d'évaluer la température opérative, ou de ressenti, des habitants, complémentaire aux mesures de température d'air pour évaluer leur confort. Ces mesures permettent également d'évaluer précisément l'influence des menuiseries sur le confort d'été, les effets de paroi chaude en particulier, pour qu'une éventuelle rénovation des fenêtres puisse se faire en connaissance de cause. Pour représenter diverses situations présentes sur l'immeuble, trois panneaux ont été 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 a été isolé par la propriétaire (environ 6-7 cm). La menuiserie a été rénovée avec du double vitrage. 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, qui est protégée par un store intérieur en tissu clair. Le panneau de cuisine n'est pas isolé, 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.

Qualité de l'air et ventilation

Enfin, la qualité de l'air est un important facteur de confort, mais également un élément jouant un rôle important sur la santé des occupants. Le bon renouvellement de l'air doit être vérifié et le système de ventilation connu avant toute intervention sur un existant. Par exemple, le renouvellement de l'air dans les logements de l'immeuble Les Cèdres est assuré par un système de ventilation naturelle (grilles d'entrée d'air dans les cuisines et extraction par conduits shunt dans les salles de bain/WC). Pour évaluer la qualité de l'air, l'humidité et le taux de CO₂ sont de premiers indicateurs faciles à mesurer. En effet, un défaut de ventilation peut conduire à l'augmentation du taux d'humidité et de CO₂ de l'air. Des capteurs ont donc été posés par TRIBU dans les logements et à l'extérieur des Cèdres pour mesurer ces données avec précision du 20 juin au 4 juillet. .

C/ THERMIQUE D'HIVER

Afin d'analyser et d'identifier les potentiels d'amélioration de la performance du système de chauffage, du confort d'hiver et de la qualité de l'air ventilation, une campagne de mesure d'hiver a été réalisée du 15 au 25 janvier 2019.

Étude des systèmes de chauffage

La visite de la chaufferie et des gaines palières a permis 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 établie en fonction de la température extérieure et les réseaux de distribution. Il est également décisif de repérer les capacités d'évolutions des installations.

Mesures des températures et d'hygrométrie

Dans un premier temps, des capteurs ont été positionnés dans quatre logements entre le 15 et le 25 janvier 2019 ainsi qu'un capteur extérieur afin de relever les températures d'hiver et l'hygrométrie des logements. Le capteur extérieur a été posé au-dessus du détecteur de mouvement à l'entrée du hall des Cèdres. Il se trouvait 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 est l'appartement dans les dispositions d'origine situé au 8e étage et le logement C est l'appartement doté d'un double-vitrage et d'un doublage isolant situé au 3e étage. Comme pour la thermique d'été, il est plus intéressant d'étudier les



Position du capteur extérieur et capteur intérieur
Cl. TRIBU, 2018

situations les plus défavorables. C'est pourquoi au logement B a été finalement préféré 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. Pour compléter les données, un appartement supplémentaire a été étudié, le logement D, situé au 5e étage, au centre de l'immeuble. Son occupante nous a souvent fait part des trop hautes températures de son logement en été comme en mi-saisons. Il semblait intéressant d'étudier ce cas supplémentaire.

Mesures des températures de surface

Des mesures de températures de surface ont également été 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.

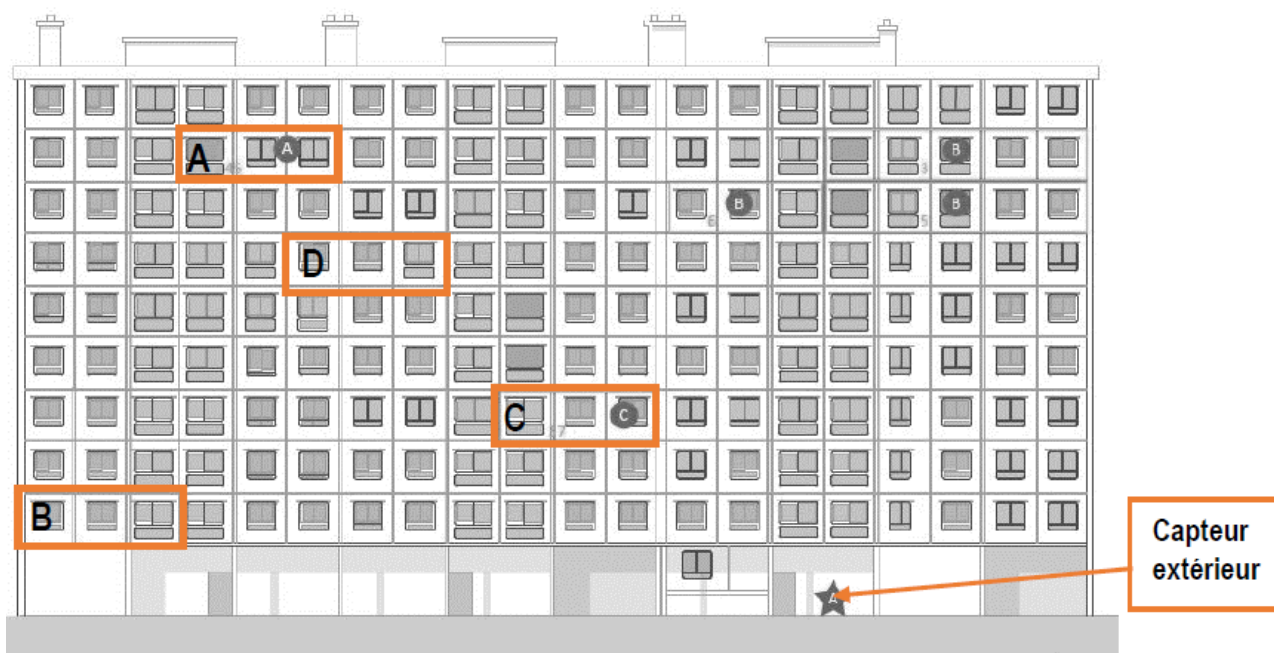
Campagne de mesures à la thermographie infrarouge

Afin d'identifier visuellement les ponts thermiques et lieu de déperditions, des relevés à la caméra thermique ont été réalisés sur l'ensemble des façades. La caméra thermique (FLIRE5) a permis 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 le cas de la façade aluminium et les vitrages (effet de réflexion). Ce rayonnement a surtout un impact sur le confort des occupants et sa mesure permet de déterminer la température ressentie par les habitants, meilleur indicateur de confort.

Qualité de l'air et efficacité de la ventilation

Enfin, la qualité de l'air, 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 a été effectuée minutieusement. Les débits de ventilation ont été relevés ainsi que le taux d'humidité des logements et le taux de CO₂.



Repérage des capteurs du diagnostic thermique d'hiver
© Mathilde Padilla et TRIBU, 2018

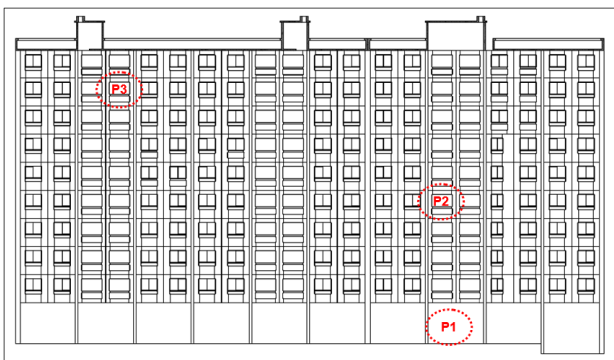
D/ ACOUSTIQUE

Dans un second temps, le bureau d'étude LASA a mis en place un protocole pour les diagnostics acoustiques de la résidence. 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 extérieure sur l'harmonie acoustique présente. En effet, du fait de la baisse de l'écoute des bruits extérieurs liée à l'amélioration de l'isolement thermique d'une façade, les différents bruits intérieurs entre les appartements, autrefois masqués, deviennent audibles, ce qui peut engendrer des problèmes de voisinage. Il faut donc veiller à ne pas créer des inconforts et considérer avec attention la diminution de l'effet de masque sonore résultant de la mise en œuvre de la réhabilitation de la façade.

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.

Mesures environnementales

Afin de quantifier 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 a été positionné au pied de la façade sud à une hauteur d'environ deux mètres, le second 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 l'immeuble, les points de mesures peuvent rendre compte de l'ensemble des situations sonores ressenties au sein de l'immeuble.



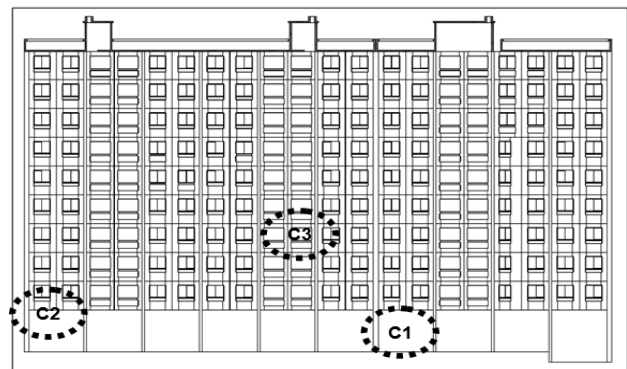
Repérage des points de mesures environnementales
© LASA, 2018

Mesures 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 ont été réalisées sur différentes configurations de logements.

Pour chacune des mesures réalisées, 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 2 mètres de la façade, puis au centre du local de réception pour calculer les valeurs d'isollements acoustiques standardisés pondérés.

L'immeuble datant de 1962, plusieurs modifications ont été réalisées par certains propriétaires afin d'améliorer les performances thermiques ou acoustiques de la façade. Il existe donc plusieurs configurations avec leurs caractéristiques propres. Pour rendre compte de l'ensemble des situations, différents logements ont été testés, avec pour contrainte d'être 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 double-vitrage. Enfin, l'appartement 3 possède une nouvelle fenêtre double-vitrage et un doublage isolant de 10 cm serti d'une plaque de plâtre de 13 mm. Comme pour les études thermiques, ces trois configurations



Repérage des mesures d'isolement de façades
© LASA, 2018

sont assez représentatives de l'ensemble 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 ont été réalisées dans le but de hiérarchiser les différentes voies de transmissions (identifier les ponts acoustiques). 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 2 cm) a été réalisé. Le nombre de points varie en fonction de la configuration et des contraintes liées au site.

En plus de son caractère historique, 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 autres loggias ou pièces voisines se pose afin de mieux caractériser l'ambiance sonore présente dans la résidence. Pour cela, des mesures ont été 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, ont permis d'identifier toutes les faiblesses acoustiques des façades et donc les possibilités d'amélioration.

Mesures acoustiques intérieures

L'objectif 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 extérieure sur l'harmonie acoustique présente. Pour cela, des mesures ont également été réalisées à l'intérieur du bâtiment, entre logements, afin de caractériser les différents dispositifs constructifs. Ces mesures ont par la suite été 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 a priori soit par un mur refend béton de 25 cm soit par une cloison sèche d'épaisseur inconnue (environ 10 cm). Des mesures ont été réalisées pour identifier les capacités d'isolement acoustique de ces séparatifs. Des mesures de bruits de chocs ont également été réalisées pour quantifier

l'isolement acoustique des dalles en béton.

Différentes gaines techniques traversent verticalement les étages de la résidence. Ces traversées peuvent être sources de ponts phoniques entre les différentes pièces reliées. C'est pourquoi une mesure d'isolement acoustique a été 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 est soumis l'immeuble, ses capacités d'isolement et donc d'anticiper l'impact que pourrait avoir une réhabilitation sur l'équilibre des ambiances sonores des logements. Elles doivent donc être réalisées consciencieusement avant toute intervention.

E/ AMBIANCES VÉCUES

En complément de ces diagnostics, un travail d'enquête et de consultations a été mené auprès des habitants afin d'identifier les vécus des ambiances extérieures, dans les escaliers, dans les appartements, ainsi que leurs attentes. Les usages passés et présents ont été analysés au moyen d'interviews et de pratiques participatives d'observation (CRESSON). Pour l'équipe, l'objectif de ces entretiens était de fabriquer un cahier des charges pour la façade future à partir de performances sensibles et pas seulement normatives.

Des grilles d'entretien ont été établies au préalable afin de pouvoir comparer, ou analyser sur un pied d'égalité, les résultats des différents entretiens. Néanmoins, cette consultation ne devant pas être directive afin de laisser aux habitants des possibilités d'expression, les grilles ont également été prévues pour intégrer des moments d'échanges libres. Ces échanges se sont appuyés sur des photographies de l'immeuble, notamment sur les questions d'ambiances lumineuses, de clair de vitrage, avec des photographies de différentes menuiseries. Ils se sont également appuyés 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 ont porté sur l'historique de leur vécu dans l'immeuble, ce qui a pu les motiver à venir vivre dans cette copropriété, s'ils se voient rester au sein de l'immeuble et combien de temps. Nous avons également cherché à connaître leur avis sur l'aspect extérieur de l'immeuble, l'usage actuel et futur de leur loggia, la perception de leurs fenêtres, ouvertures et système d'occultations, ainsi que sur

leur confort nocturne. Des questions concernant les systèmes de chauffage et ventilation leur ont aussi été posées. Ces entretiens ont permis d'identifier les ressentis de confort thermique et acoustique des habitants. Il nous semble important de baser nos hypothèses de conception autant sur les ressentis et besoins réels des habitants, que sur les éléments quantifiés lors des diagnostics et que sur les exigences normatives.

De manière générale, afin d'intégrer le plus possible les habitants aux réflexions menées lors du projet, nous avons produit des supports de communication réguliers : notes d'informations distribuées dans les boîtes aux lettres, affichages dans les allées de l'immeuble, réunions d'informations in situ ou même dans les locaux de la régie etc. 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 essentielle avant de réaliser une intervention sur l'existant. Elle permet de réaliser une synthèse des objectifs et des performances à atteindre permettant d'écrire le programme qui guidera les propositions d'intervention.



Photographie avant/après de la façade sud présentée lors des entretiens
© SAAL / Cl. Mathilde Padilla, 2018

V. CONCEPTION ET EXPÉRIMENTATIONS

A/ UNE CONCEPTION ADAPTÉE

La phase de conception s'appuie sur les résultats des diagnostics, la connaissance du bâtiment et s'adapte à ses besoins. Les solutions proposées doivent répondre à de multiples enjeux allant de la conservation du patrimoine, à l'amélioration du confort des habitants, à la réduction des consommations énergétiques du bâtiment comme à l'économie du projet. 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, 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, ceux-ci demandent davantage de chauffage considérant que le chauffage collectif au gaz diffuse la même température dans les étages supérieurs déjà en partie chauffés par les apports solaires. Ce constat amène 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. Les diagnostics ont enfin permis d'identifier la faible performance acoustique des panneaux notamment aux niveaux de l'ensemble des joints. Dans ces conditions, le simple remplacement des menuiseries par du double-vitrage se révèle insuffisant ; les hypothèses de recherche s'orientant plutôt vers un doublage intérieur.

L'étude patrimoniale et architecturale a souligné l'importance du caractère « lisse » de la façade-rideau qui confère à l'immeuble sa physionomie si singulière. Lors de précédents travaux de ravalement de façades, des bavettes et couvre-joint ont été ajoutés et perturbent 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. La condition d'*unicum* dans laquelle se trouve Les Cèdres tendrait à orienter les propositions vers la restitution d'un état originel.

B/ DES PROPOSITIONS SOUS FORME DE VARIANTES

Le travail de conception doit trouver un point d'équilibre entre l'ensemble de ces données et préconiser des solutions adaptées. À cette fin, plusieurs variantes doivent être envisagées. Elles peuvent aller du simple entretien des panneaux avec réfection des joints creux et remplacement des menuiseries à l'ajout d'une double façade légère intérieure. Ces variantes permettent de tester des épaisseurs et matérialités différentes, en privilégiant les matériaux biosourcés.

Le choix de l'une ou l'autre des solutions dépend ensuite d'une analyse multicritères entre patrimoine, confort, thermique, acoustique, consommation énergétique et économie. Toutes les hypothèses font l'objet de simulations thermiques dynamiques et d'études énergétiques pour évaluer leur capacité d'isolation, leur coût et leur performance. Cette étape permet d'éliminer les solutions les moins acceptables. Elles feront ensuite l'objet d'une réflexion avec l'ensemble des acteurs du projet et notamment les habitants.

C/ EXPÉRIMENTATIONS ET PROTOTYPES

A partir de ces hypothèses, les solutions les plus adaptées, qui répondent le mieux aux besoins de l'immeuble, sont testées grâce à des prototypes réalisés à l'échelle 1 : 1 en partenariat avec les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, les Compagnons du Devoir de Villefontaine et de nombreux fabricants et entreprises. Ces prototypes ont été montés in situ, dans l'ancienne loge du gardien aujourd'hui inoccupée avec l'accord de la copropriété. Les habitants peuvent dès lors venir les évaluer ce qui va permettre à l'équipe de recueillir leurs points de vue. Leurs performances seront également mesurées. Ainsi, ces expérimentations vont permettre de valider ou d'adapter les propositions afin de définir une ou plusieurs solutions de réhabilitation.

D/ MONTAGE FINANCIER ET OPÉRATIONNEL

L'élaboration de prototypes à un coût. Leur utilité dans ce projet de recherche étant indéniable, l'équipe cherche des financements pour les réaliser, en complément des 15 000 € apportés par la copropriété pour les études d'ambiance et les relevés architecturaux. L'équipe recherche des partenaires parmi les entreprises privées de fabrication de façades préfabriquées, de l'industrie de l'aluminium, de menuiseries etc. Ces partenaires peuvent également, outre l'apport d'une aide financière, offrir une expertise et des outils afin de réaliser les prototypes. L'équipe s'est ainsi rapprochée

de la Métallerie Lenoir qui fabrique des panneaux de façades préfabriquées. Cette entreprise accompagnera l'équipe dans l'élaboration des prototypes et lors du chantier.

VI. RÉALISATION

La mise en œuvre finale dépendra 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 qui ne sera pas sans incidence sur la surface des logements. Les habitants de la copropriété Les Cèdres ayant des moyens différents, il est nécessaire de pouvoir s'adapter aux plus petits budgets dans l'objectif de permettre à tous de réaliser les travaux. Des solutions à différents budgets seront proposées ainsi que des phasages permettant aux habitants d'étaler leurs dépenses. L'équipe établit le montage financier en prenant en compte ces différences de moyens financiers et en cherchant des subventions afin d'aider les copropriétaires à réhabiliter leurs façades et améliorer leurs conditions de vie. De plus, les solutions devront être mise en œuvre en site occupé et donc réalisées au moyen d'un chantier sec, propre et rapide tout en s'adaptant aux différents aménagements intérieurs des logements.

VII. TRANSMISSION ET DIFFUSION

A/ UNE PASSERELLE ENTRE ENSEIGNEMENT, RECHERCHE ET PRATIQUE

La thèse s'inscrit dans une démarche pédagogique novatrice en ce sens qu'elle poursuit l'ambition d'établir une passerelle entre l'enseignement, la recherche et les milieux professionnels notamment en raison de son inscription au sein de la Chaire partenariale d'enseignement et de recherche en architecture « Habitat du Futur ». La réussite de la transition écologique dans le domaine de l'habitat repose sur la formation de générations d'architectes-urbanistes, d'ingénieurs, de constructeurs et de managers de projet tout au long de la vie des bâtiments et de leurs équipements pour constituer les nouvelles entreprises d'architecture capables de penser et construire ensemble l'habitat de demain⁹. Ces changements de

⁹ Le mot « habitat » est ici entendu dans son sens écologique : « Espace qui offre des conditions qui conviennent à la vie et au développement d'une espèce animale ou végétale », et géographique : « Ensemble des conditions d'organisation et de peuplement par l'homme du milieu où il vit ». (www.cnrtl.fr/définition/HABITAT).

pratique impliquent un changement radical dans la formation de ces entrepreneurs et dans les modalités de soutien au développement intellectuel et économique de ces nouvelles structures. Pour l'ensemble des partenaires de la Chaire « Habitat du Futur », l'objectif est la création d'un lieu d'enseignement et de recherche par l'expérimentation qui permette la recherche et le développement à travers la mise en situation de pratique opérationnelle d'étudiants et de doctorants des écoles d'architecture, des écoles et départements universitaires d'ingénierie civile et de physique du bâtiment, des écoles de management de projet d'aménagement du territoire et de montage d'opérations de construction de logements, des professionnels de la construction en formation initiale et continue, ou en apprentissage, dans le dessein de les faire travailler ensemble, en équipe projet pluridisciplinaire, à la conception-réalisation de projets réels.

B/ UNE MÉTHODE TRANSPOSABLE ?

Il conviendra 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 pourront être très différentes selon les cas étudiés. En revanche, il semble au demeurant que la démarche globale doit pouvoir s'adapter à des projets conduits par des copropriétaires et aussi des bailleurs sociaux.

Cette recherche permettra en outre de définir un cahier des charges pour la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XXe siècle 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.

C/ DIFFUSION ET VALORISATION DES PRODUITS DE LA RECHERCHE

Les différents services de la DRAC Auvergne-Rhône-Alpes (Service des monuments historiques, Service de l'Inventaire et conseiller à l'architecture) ont été associés à cette démarche dès sa phase de démarrage, conscients de l'importance historique et patrimoniale de l'immeuble Les Cèdres. Un projet d'édition permettra de capitaliser les connaissances acquises au cours de ces investigations, conjuguant approche historique et patrimoniale, technique et constructive, thermique, acoustique et ambiante auxquels s'ajoute un important volet relevant de l'accompagnement à considérer notamment l'importance que revêtent les questions

de pédagogie auprès des habitants ; la production d'un matériel spécifique (note explicative et de synthèse) constituant l'un des aspects les plus innovants de cette recherche.

Outre un projet d'édition, cette démarche sera valorisée au sein du Réseau scientifique, pédagogique et thématique, Architecture, Patrimoine et Création, habilité par le Ministère de la Culture et coordonné par Philippe Dufieux, à travers notamment la forme d'une journée d'études en lien avec les nombreux partenaires nationaux et internationaux réunis au sein de ce réseau.

Des perspectives d'expositions au sein de l'École nationale supérieure d'architecture de Lyon sont également à l'étude à la faveur de la mise au point d'un support itinérant.

D/ VALORISATION DES PRODUCTIONS PÉDAGOGIQUES AU SEIN DES ÉTABLISSEMENTS

Il convient de souligner au préalable que les problématiques relatives à la transformation de l'architecture du XXe siècle ne font pas l'objet d'enseignements spécifiques à l'ENSAL. Depuis cinq ans, un séminaire de master dirigé par Philippe Dufieux (Le Devenir de l'architecture du XXe siècle) sensibilise les étudiants au patrimoine contemporain ainsi qu'aux modalités de mutation et de transformation de l'architecture contemporaine au sein du domaine d'études de master Architecture, Héritage et Durabilité (codirigé par Philippe Dufieux et François Tran). Parallèlement, une approche prospective et expérimentale des questions spécifiques soulevées par la mutation de l'existant à l'échelle architecturale et urbaine se développe au sein de l'atelier AA&CC post-carbone, à l'impulsion d'Olivier Balaj. C'est dans ce contexte pédagogique que le projet d'étude de l'immeuble Les Cèdres et la définition d'un sujet de thèse portant sur la question des façades légères ont vu le jour ; attentifs à promouvoir une véritable complémentarité.

En ce qui concerne l'immeuble Les Cèdres, un travail d'investigation préalable a été conduit au cours de l'année 2017-2018 au sein du domaine d'études de master Architecture et transitions éco-constructives dans l'atelier AA&CC post-carbone (Architecture, Ambiances et Cultures Constructives) dirigé par Olivier Balaj, par deux étudiants de l'ENSAL (Igor Bougnot et Simon Robin) qui ont réalisé leur projet de fin d'études sur l'immeuble Les Cèdres. Leur projet de réhabilitation mettait principalement l'accent sur les problématiques

de confort et de rénovation énergétique en s'émancipant des enjeux de conservation du patrimoine. Ce projet de fin d'études a notamment permis de mener les premières enquêtes sur les besoins des habitants à travers la mise en place de questionnaires détaillés dont l'analyse attentive les a amenés à revisiter les systèmes de protection solaire conçus par Prouvé pour des panneaux d'un type différents mais pouvant s'appliquer à l'immeuble. Leurs investigations ont permis l'élaboration et la fabrication d'un prototype de protection solaire réalisé au sein des Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau avec la complicité de Maxime Bonnevie, directeur d'exploitation des GAIA.

Un projet d'exposition autour des panneaux de façades légères conçus par Prouvé est à l'étude à l'ENSAL. En effet, les laboratoires de l'INSA à Villeurbanne font actuellement l'objet d'une vaste campagne de rénovation qui, systématiquement, vise à déposer les panneaux sandwichs conçus dans les années 1950 sur un modèle proche de ceux utilisés à l'immeuble les Cèdres. En accord avec les services techniques de l'INSA, un panneau complet a été déposé à l'ENSAL en vue d'une valorisation pédagogique auprès des étudiants. Cette exposition permettra de faire connaître le travail du célèbre ingénieur et de détailler – au moyen de coupes et de sondages – le mode de fabrication de ces éléments de second œuvre. De la même manière, il s'agira de présenter les enjeux et les hypothèses que pose la rénovation de l'immeuble Les Cèdres.

E/ HYPOTHÈSES DE DIFFUSION DANS LES MILIEUX PROFESSIONNELS

Le Conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement du Rhône s'est montré très intéressé par cette démarche qui, à bien des égards, s'inscrit dans les problématiques de sensibilisation et de formation autour de l'architecture et du patrimoine du XXe siècle. Des actions de médiation pourront être organisées en partenariat avec le CAUE du Rhône. Le CAUE de Haute-Savoie, département particulièrement concerné par ce type de patrimoine a sollicité l'équipe archipat pour venir donner une formation aux professionnels de la construction chaque année depuis le 19 septembre 2019 dont l'intitulé était « Analyser, comprendre et continuer l'architecture du XXe siècle ». A cette occasion, le projet de recherche sur l'immeuble Les Cèdres a servi de cas d'étude illustrant la démarche à mettre en œuvre pour une réhabilitation du patrimoine du XXe siècle.

Si le rôle des gestionnaires de copropriétés n'est plus à démontrer dans les dynamiques de travaux, il semble

au demeurant que leur sensibilisation aux questions soulevées par la transformation et la modernisation de l'architecture du XXe siècle soit encore largement à penser. En ce domaine, il convient de souligner que le régisseur de l'immeuble Les Cèdres (Régie Franchet et Cie à Lyon) a souhaité s'impliquer complètement dans cette démarche de recherche, conscient que certains immeubles, en raison de leurs qualités propres, devaient faire l'objet d'une approche personnalisée, loin des solutions trop couramment mises en œuvre notamment en matière d'isolation thermique par l'extérieur. La Régie Franchet joue ainsi un rôle majeur en matière de médiation auprès des habitants et demeure associée à toutes les réunions du comité de suivi. Cette expérience acquise lors de ce projet démonstrateur permettra à ces gestionnaires d'appréhender d'autres projets de rénovation sur un parc de copropriétés étendu sur la région lyonnaise.

Le réseau Ville et Aménagement Durable a également sollicité l'équipe pour participer à des ateliers autour des questions de réhabilitation énergétique du patrimoine du XXe siècle.

La sensibilisation des professionnels des métiers du bâtiment constitue l'autre versant de ce projet de recherche, mobilisant des entreprises attentives à s'impliquer dans des projets innovants. Lors de l'élaboration des partenariats pour la réalisation des prototypes, de nombreuses entreprises se sont révélées intéressées pour participer à une journée d'étude dédiée au sujet de la réhabilitation des façades légères dans l'habitat du XXe siècle. Avec l'appui des Grands Ateliers, de la Chaire « Habitat du Futur », et de ces partenaires, un projet d'événement est en cours d'élaboration sous la forme de conférences et de table-rondes doublées d'une exposition des travaux réalisés dans le cadre de la thèse, notamment sur les prototypes. La Région Auvergne-Rhône-Alpes et d'autres institutions comme le CAUE, les services de la DRAC, l'ENSAL seront également sollicités aux côtés de l'ensemble des acteurs concernés par ces sujets : architectes, ingénieurs, chercheurs, régisseurs, menuisiers, métalliers, vitriers, serruriers, storistes, fabricants de matériaux isolants, étudiants en architecture etc.



PARTIE 3 : DIAGNOSTICS ET CONCEPTION

I. DIAGNOSTICS

A/ THERMIQUE D'ÉTÉ

L'inconfort d'été est la problématique majeure rencontrée par les habitants de l'immeuble, qui les a motivé à entrer en relation avec notre équipe de recherche. La thermique d'été a donc été étudiée avec attention.

Comme exposé dans la méthodologie, trois appartements ont été diagnostiqués durant l'été 2018. Nous allons à présent présenter les résultats des mesures réalisées. Nous devons l'essentiel de ces informations aux investigations conduites par le bureau d'études TRIBU qui a réalisé les campagnes de mesures ainsi que les analyses des résultats. Sur la période étudiée, les températures extérieures mesurées, à l'ombre du hall, ont oscillé entre 19,7°C et 33,1°C avec une température moyenne de 25,9°C.

Commençons par le **logement A**, conservé dans les dispositions d'origine, avec pour seule isolation le remplissage du panneau sandwich (6 cm de polystyrène), et doté de menuiseries coulissantes en aluminium serties d'un simple vitrage de 3 mm. Des défauts d'étanchéité ont été relevés sur les pourtours de la menuiserie. L'occupante a rajouté un store vénitien intérieur métallique sur la fenêtre du séjour. L'appartement, situé au 8e étage, bénéficie de forts apports solaires.

Le capteur (mesure de la température, de l'humidité et du CO₂) a été placé sur une étagère dans le séjour donnant au sud, à l'abri du rayonnement direct. Dans le cadre de l'étude, les habitudes de l'occupante ont été suivies pendant 15 jours. L'appartement n'a été occupé que par une personne durant les 15 jours. Les appareils de cuisson n'ont été que peu utilisés, ne provoquant pas d'apports de chaleurs internes. Le store vénitien métallique du salon a été baissé en permanence. Enfin, l'habitante a systématiquement ouvert la fenêtre au nord de l'appartement les matins et soirs et quelque fois l'après-midi.

Valeurs remarquables de température (28 juin - 3 juillet)	Extérieur, hall à l'ombre	Logement A : T3, 8e étage
Température maximale	33,1°C	29,6°C
Température minimale	19,7°C	25,2°C
Température moyenne	25,9°C	27,3°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
		32,1%

Les températures relevées dans le logement sur la période du 28 juin au 3 juillet 2018, oscillent entre 25,2°C et 29,6°C avec une température moyenne de 27,3°C. Ces températures sont particulièrement élevées et la comparaison avec les températures extérieures montre que la température moyenne du logement a été supérieure à la température moyenne extérieure. Il est important de noter que le seuil d'inconfort est fixé à 28°C et que sur les 144 heures de mesures, le logement A s'est trouvé au-dessus du seuil d'inconfort durant 46 heures soit 32,1%.

Nous pouvons retenir que l'habitante du logement A a pris de bonnes habitudes en ouvrant systématiquement ses fenêtres la nuit en été. Malheureusement, malgré ces bonnes habitudes, la chaleur de la journée pénètre rapidement dans le logement. Cela s'explique par le manque d'isolation des murs donnant sur l'extérieur, et par l'usage de protections solaires intérieures peu performantes. Ces difficultés à limiter les apports de chaleur venant de l'extérieur conduisent à un niveau d'inconfort élevé.

Intéressons-nous à présent au **logement B**. Ce T5 situé au 7e étage de l'immeuble a été partiellement rénové. En effet, il dispose de menuiseries récentes équipées de double-vitrage. Situé en étage élevé, l'appartement est soumis à d'importants apports solaires. Néanmoins, il ne dispose pas de protection solaire, hormis des rideaux décoratifs que les occupants n'ont pas utilisé durant l'expérience. La cuisine et la loggia de cet appartement ont été ouvertes sur le salon pour créer une grande pièce à vivre. La loggia a donc été équipée d'une fenêtre, au sud, qui est restée ouverte en permanence pendant toute la durée des mesures, permettant d'assurer une ventilation. Le logement de 98 m² a été occupé par 2 à 3 personnes sur la période mesurée et les appareils de cuisson ont été peu utilisés.

Le capteur (mesure de la température, de l'humidité et du CO₂) a été placé sur une étagère dans le séjour donnant au sud, à l'abri du rayonnement direct.

Les températures mesurées dans le logement sur la période du 28 juin au 3 juillet 2018 fluctuent entre 23,6°C et 29°C avec une température moyenne de 26,1°C. Ces températures sont élevées et s'expliquent par le manque d'isolation de l'appartement.

Contrairement au logement précédent, la température moyenne à l'intérieur du logement est quasi identique

à la température extérieure relevée à l'ombre du hall d'entrée. De plus, sur le logement B, le seuil d'inconfort n'a été dépassé que durant 9 heures sur les 144 heures mesurées soit 6,3 % du temps contre 32,1% pour le logement A.

Valeurs remarquables de température (28 juin - 3 juillet)	Extérieur, hall à l'ombre	Logement B : T5, 7e étage
Température maximale	33,1°C	29,0°C
Température minimale	19,7°C	23,6°C
Température moyenne	25,9°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		9 heures
		6,3%

Nous pouvons noter que les habitants du logement ont pris de bonnes habitudes en ouvrant leur loggia la nuit lors des fortes chaleurs d'été. Mais, la ventilation nocturne pourrait être davantage exploitée en ouvrant plus de fenêtres. De plus, il ne faut pas oublier de fermer la fenêtre de la loggia en journée en cas de canicule. Le double vitrage améliore l'isolation du logement et retarde légèrement la montée de la température en journée. Cependant, en l'absence de protections solaires (stores) sur les vitrages, la chaleur pénètre dans le logement par rayonnement. Le niveau d'inconfort est acceptable, mais pourrait augmenter si le logement venait à être occupé par 5 personnes au lieu de 3.

Le dernier appartement étudié, **le logement C**, a été récemment rénové par ses propriétaires. La cuisine a été ouverte sur le salon, les menuiseries ont été changées par des fenêtres coulissantes en aluminium double-vitrage et une isolation intérieure de 10 cm a été ajoutée. Les habitants ont également équipé leurs ouvertures de stores vénitiens intérieurs en bois. Bien que ce T4 soit situé au 3e étage de l'immeuble, donc en partie basse, il ne bénéficie pas des masques des arbres proches et est donc exposé au soleil. Durant l'expérience, le logement a été occupé par deux à trois personnes essentiellement les matins et soirs. Des apports internes dus aux appareils de cuisson ont été relevés également les matins et surtout les soirs. Les fenêtres du séjour, au sud, ont été ouvertes quasi en permanence, même durant les heures les plus chaudes, de 11h à 20h.

Le capteur (mesure de la température et du taux d'humidité) a été placé sur une étagère du séjour donnant au sud, à l'abri du rayonnement direct.

Les températures relevées sur la période du 28 juin au 3 juillet dans le logement C varient entre 24,4°C et 28,8°C, avec une température moyenne de 26,1°C, identique à celle du logement B. Il est important de noter que la température du logement n'a excédé le seuil d'inconfort que durant 3 heures soit 2,3% du temps et trois fois moins que dans le logement C. De plus, la température n'a dépassé ce seuil que de 0,8°C au maximum.

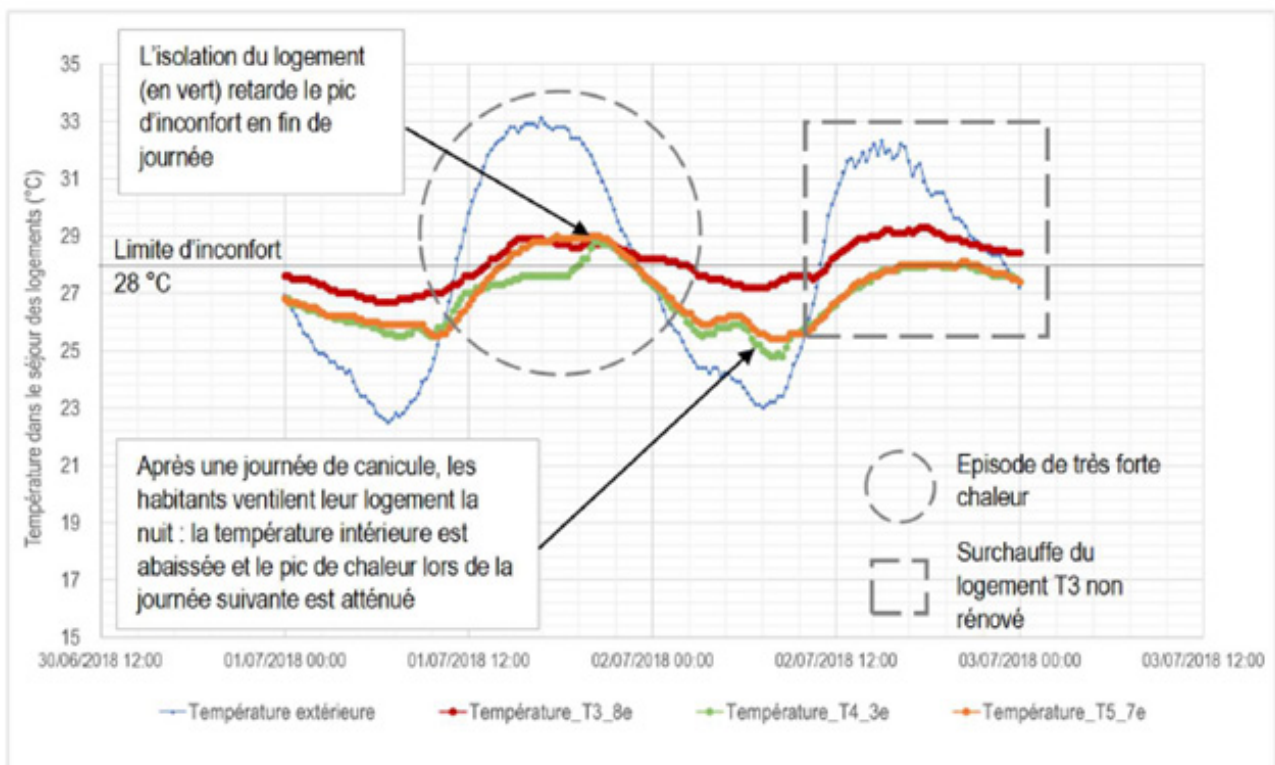
Les habitants du logement C ont pris de bonnes habitudes en ouvrant systématiquement leurs fenêtres la nuit en été. L'isolation intérieure des panneaux Prouvé et le double vitrage semblent efficaces pour limiter les apports solaires en journée et réduire la fuite de la fraîcheur accumulée par la ventilation nocturne. Le niveau d'inconfort est très acceptable mais pourrait éventuellement être amélioré avec des protections solaires plus performantes.

Valeurs remarquables de température (28 juin - 3 juillet)	Extérieur, hall à l'ombre	Logement C : T4, 3e étage
Température maximale	33,1°C	28,8°C
Température minimale	19,7°C	24,4°C
Température moyenne	25,9°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		3 heures
		2,3%

La **comparaison des 3 logements** permet de constater que dans les logements non rénovés, le confort d'été n'est pas satisfaisant. En effet, le seuil d'inconfort fixé à 28°C a été dépassé 32,1% du temps dans le logement A, contre 6,3% dans le logement B (5 fois moins) et 2,3% dans le logement C (14 fois moins). L'isolation des logements par l'intérieur et le changement des menuiseries d'origine permettent donc de maintenir des conditions de confort acceptables. Améliorer l'isolation de l'immeuble (parois opaques et fenêtres) dans tous les logements est donc nécessaire pour améliorer le confort des habitants. D'autant plus que l'immeuble présente un potentiel de rafraîchissement qui est mal exploité en l'absence d'isolation des logements : en été, si tous les appartements étaient isolés, la fraîcheur de la nuit pourrait être stockée dans les planchers en béton et

restituée ensuite en journée dans les logements. Malgré l'isolation, les logements rénovés présentent une faible résilience face aux épisodes de forte chaleur (le seuil d'inconfort est quand même atteint dans ces logements), ce qui est inquiétant au regard du nombre de canicules qui risque d'augmenter dans les prochaines années. Pour garantir le confort des habitants, l'amélioration de l'isolation devra aller de pair avec l'ajout de protections solaires efficaces (stores, brise-soleil...).

Pour garder un logement confortable en été, il faut adopter quelques bons réflexes. Le jour, il est nécessaire de fermer les stores et les fenêtres pour éviter de faire rentrer l'air chaud et les rayons du soleil. On peut choisir des stores permettant de faire pénétrer la lumière naturelle à l'intérieur du logement même en position fermée (stores à lames orientables, toiles microperforées ...). Afin d'améliorer les conditions de confort du logement, il est important de garantir une ventilation nocturne efficace en cas de forte chaleur. Pour cela, il faut ouvrir les fenêtres au maximum au sud et au nord pour créer un courant d'air traversant le logement.



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

B/ THERMIQUE D'HIVER

Les diagnostics thermiques se sont poursuivis en hiver, du 15 au 25 janvier 2019. A cette occasion, le système de chauffage, les gaines techniques, les réseaux, la température des logements, la qualité de l'air et le système de ventilation ont été observés.

Étude du système de chauffage

Le système de chauffage actuel est assuré par deux chaudières brûleurs gaz de 280 kW unitaire couplées d'un condenseur commun, connecté sur le retour général (plage de puissance de 170 à 490 kW). Les deux chaudières fonctionnent alternativement mais pas en cascade. Le système a été rénové en 2002.

Le départ d'eau de chauffage 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. Les réseaux cheminant en vide sanitaire sont calorifugés, mais pas les réseaux apparents dans les gaines techniques. L'émission est ensuite réalisée par planchers et plafonds chauffants et de façon collective. Les logements ne disposent d'aucun organe de réglage. La régulation est effectuée par un automate qui module la température de départ du chauffage en fonction de la température extérieure. Ainsi, la température de départ est de 25°C pour une température extérieure de 15°C, et de 55°C pour une température extérieure de -5°C. La nuit, de 18h à 2h, la température de départ du chauffage est réduite de 2°C par rapport à la consigne.¹

1 Source : audit énergétique Eremes réalisé en 2017

L'observation du système de chauffage a permis de soulever des évolutions potentielles. La nuit, la température de consigne dans les logements pourrait être abaissée à 19 ou 17°C afin d'améliorer le confort des habitants. Il paraît intéressant de remplacer la chaudière dans un avenir proche, car les systèmes existants sont anciens et les pannes sont régulières (devis demandé par la copropriété à la société SEDICAM). Mais, cette réfection devra être effectuée après la rénovation thermique de l'enveloppe pour que le dimensionnement soit effectué au plus juste.

Étude des gaines techniques et réseaux d'eau de chauffage

L'immeuble dispose d'une colonne de gaines accessible par allée, d'une vanne d'entrée et d'une vanne de sortie par étage, qui se divise ensuite en deux tubes de plancher chauffant pour alimenter les deux logements par palier. Ces dispositions permettent d'envisager de rééquilibrer les réseaux grâce à des réglages plus fins voire même individualisés grâce à l'installation de vannes. Cette régulation semble nécessaire car les températures de l'eau relevées dans les gaines sont plutôt élevées, par exemple, 43°C à l'aller et 32,5°C au retour au 1er étage de l'allée A. Le calorifugeage des réseaux dans les gaines permettrait également de réduire les déperditions et pourrait être mis en place compte-tenu de l'accessibilité des gaines.

Actuellement le système d'eau chaude sanitaire est individualisé. Mais, 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.



Une des chaudières et le condenseur de l'immeuble
Cl. TRIBU, 2019



Les gaines paliers de l'immeuble
Cl. TRIBU, 2019

Diagnostic et analyse du confort d'hiver dans les logements

Les mesures de température d'hiver ont été effectuées entre le 15 et le 25 janvier 2019. Le capteur extérieur, positionné à l'abri sous le porche du hall de l'immeuble, a relevé des températures allant de 0,6°C à 15,7°C avec une température moyenne de 5,1°C.

Les températures de quatre logements ont été prises simultanément : le logement A, dans les dispositions d'origine (même logement que lors des mesures d'été) ; le logement B, partiellement rénové, identifié comme défavorable en hiver ; le logement C, rénové (même logement que lors des mesures d'été) ; et le logement D, au 5e étage, partiellement rénové.

Le logement A a été conservé en l'état d'origine. Il dispose de menuiseries simple vitrage et ne possède pas d'isolation supplémentaire. Le panneau Prouvé du salon présente des défauts d'étanchéité à proximité de la menuiserie. Cet appartement situé au 8e étage bénéficie de forts apports solaires. Il a été occupé par une seule personne sur les dix jours de mesures. Les températures mesurées oscillent entre 23 et 27,5°C avec une température moyenne de 24,4°C.

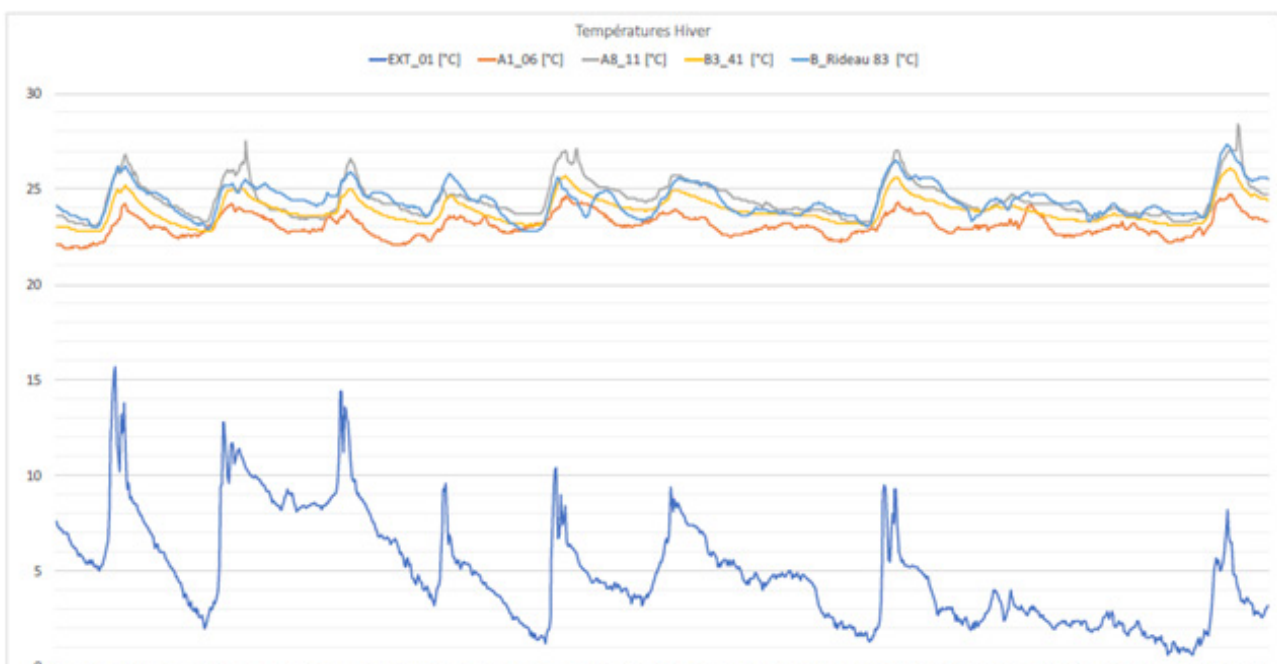
Dans le logement B, les fenêtres d'origine ont été remplacées par des menuiseries à double-vitrage. Ce logement est moyennement ensoleillé du fait des cèdres qui constituent des masques solaires. De plus, il est situé au 1er étage, non isolé par rapport aux caves, et sur un pignon non isolé. Il est considéré comme défavorable,

du point de vue du confort d'hiver. Un seul occupant a été recensé durant l'expérience. Les températures relevées dans ce logement sont situées entre 21,9°C et 24,6°C avec une température moyenne de 23,1°C.

Le logement C a été modifié par ses occupants, la cuisine a été ouverte sur le salon, une isolation intérieure de 10cm a été ajoutée dans le séjour, et les menuiseries d'origine ont été remplacées pour du double-vitrage. Bien que situé au 3e étage, le logement ne bénéficie pas des masques des arbres proches et profite donc de l'ensoleillement. Durant les mesures d'hiver, l'appartement était inoccupé. Les températures relevées fluctuent entre 22,8°C et 25,7°C avec une température moyenne de 23,8°C.

Dans le logement D, les fenêtres ont été changées pour du double-vitrage. Le panneau du salon a été légèrement isolé, mais pas celui de la cuisine. Situé au 5e étage, le logement est bien ensoleillé. Il est occupé par une personne seule. Les températures relevées varient entre 22,8°C et 26,5°C avec une température moyenne de 24,3°C.

Le diagramme ci-dessous présente le relevé des températures du 15 au 25 janvier 2018 dans les 4 logements observés et à l'extérieur. On constate que les températures sont globalement trop élevées et ne sont jamais en dessous de 21,9°C. Il y a donc un véritable problème de régulation des températures dans les logements.



Le logement A ayant été étudié en hiver comme en été et se trouvant dans les dispositions d'origine de l'immeuble, il est intéressant d'observer sa signature climatique, c'est-à-dire sa température intérieure mesurée par rapport à la température extérieure.

En hiver, ont été mesurées des températures élevées en lien avec une température de consigne de chauffage trop importante et les généreux apports solaires dont le logement bénéficie.

En été, on constate une surchauffe du logement, même si les températures intérieures restent globalement inférieures à la température extérieure.

L'optimum bioclimatique est la mesure des températures idéales en intérieur du logement. On remarque qu'il faut baisser de 3°C les températures en hiver comme en été pour l'atteindre.

En complément des mesures réalisées par les capteurs, des mesures de températures de surface ont été réalisées sur les 4 logements le 11 janvier 2019, jour ensoleillé. Ces mesures ont mis en avant une différence de températures et de confort entre le séjour et les chambres, la présence de ponts thermiques au niveau des menuiseries aluminium et des températures de plafonds et sols trop élevées produisant un inconfort et des risques en termes de santé pour les occupants.

Enfin, la caméra thermique (FLIRE5) a permis de mesurer le rayonnement infrarouge des façades de la résidence. Ce relevé a permis d'identifier des ponts thermiques

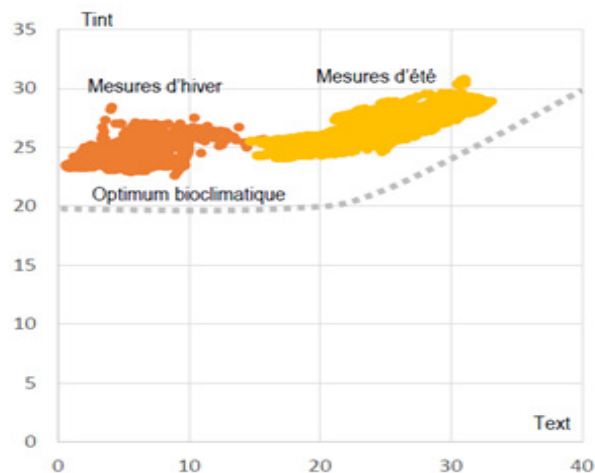


Diagramme de l'optimum bioclimatique © TRIBU

au niveau de la corniche, des ponts au niveau des menuiseries, et d'importantes pertes thermiques au niveau du porche.

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

Comme l'indique le tableau suivant, l'ensemble des actions réalisées conjointement peut permettre de réduire considérablement les consommations d'énergie de la résidence.

	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/m²	74	69	55	40	34	31	31	31	31
Consommation chauffage (perf systèmes) en kWh/m²	133	123	99	71	60	55	47	38	38
Consommation EP (calcul réel) en kWh/m²	235	225	198	168	156	150	140	133	95
CEP/SHON en kWh/m² (type BTex)	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%
--	-----	------	------	-----	-----	-----	-----	------

Qualité de l'air et efficacité de la ventilation

Le principe de renouvellement de l'air dans les logements de la rue de la Favorite est assuré par un système de ventilation naturelle (grilles d'entrée d'air dans les cuisines et extraction par conduits shunt dans les salles de bain/WC). Des mesures de débit ont été réalisées au niveau des bouches d'aération. Dans le logement A, on mesure un débit de 35 m³/h, soit un débit moyen à faible avec un risque de dégradation de la qualité de l'air. Dans le logement B, le débit est de 50m³/h ce qui représente un débit correct. Il n'y a pas eu de mesures dans le logement C. Dans le logement D, les extractions ont été bouchées mais l'habitante ventile son logement régulièrement en ouvrant les fenêtres. Néanmoins, le renouvellement d'air sera insuffisant si les fenêtres restent fermées.

A la suite de ces mesures de débit de renouvellement d'air, des mesures d'humidité ont été réalisées dans le logement. L'humidité a relativement peu d'impact sur la sensation de confort d'un individu dans un bâtiment. D'un point de vue de l'hygiène, un air trop sec ou trop humide peut favoriser le développement de micro-organismes (bactéries, acariens, champignons). D'après l'étude de Scofield et Sterling, la plage hygiénique optimale se situerait entre 40% et 60% d'humidité. Le taux d'humidité mesuré dans les logements varie entre 21,8% et 37,8% d'humidité donc en dessous de la plage recommandée. Des mesures de CO₂ ont également révélé une qualité d'air moyenne à modérée selon la norme européenne NBN EN 13 779 (2007) en vigueur sur la qualité de l'air.

Pour résumer, les débits mesurés dans les logements sont moyens à très faibles, les renouvellements d'air se faisant aussi par la perméabilité à l'air de la façade, et certaines entrées et extractions ayant été bouchées. De plus, la qualité de l'air n'est pas optimale. Il serait utile de vérifier les entrées d'air et extractions dans tous les logements, de les dégager et d'informer et sensibiliser les habitants à cette question. Les entrées d'air se faisant dans les pièces humides, comme les extractions, certaines pièces ne disposent pas de renouvellement d'air. L'installation d'entrées d'air dans les séjours et les chambres permettrait de résoudre ce point. Pour améliorer les débits de renouvellement d'air, on peut également envisager la mise en place de VMC hybride en toiture.

Conclusion pour l'amélioration du confort thermique d'hiver

La campagne de mesures d'hiver a permis de mettre en évidence la température trop élevée des logements due à des températures d'eau trop importantes dans les boucles. La résidence présente un problème de régulation du chauffage dans les logements. La qualité de l'air relevée est également moyenne, liée principalement à l'obturation des entrées et sorties d'air.

Afin d'améliorer la performance thermique et le confort d'hiver de la résidence, notre équipe propose les sept actions suivantes, par ordre de priorité :

1. Mettre en place une température de consigne à 19/20°C le jour et 16/17°C la nuit (la température d'eau dans les planchers est trop élevée)
2. Equilibrer les réseaux, avec ou sans le changement des chaudières : réglages, installation de vannes, comptage individualisé
3. Calorifuger les réseaux dans les gaines verticales (escaliers)
4. Améliorer l'enveloppe thermique en intervention par l'extérieur :
 - en sous-face avec le vide sanitaire et le porche
 - les murs pignons (attention, cette action ne sera pas facile à mettre en place, les pignons de l'immeuble étant déjà en limite de propriété ...)
5. Améliorer 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 VMC naturelle hybride)
6. Remplacer les chaudières collectives : installation gaz à condensation (ou granulés bois) avec une diminution de la puissance installée
7. Mettre en place une installation d'eau chaude sanitaire collective

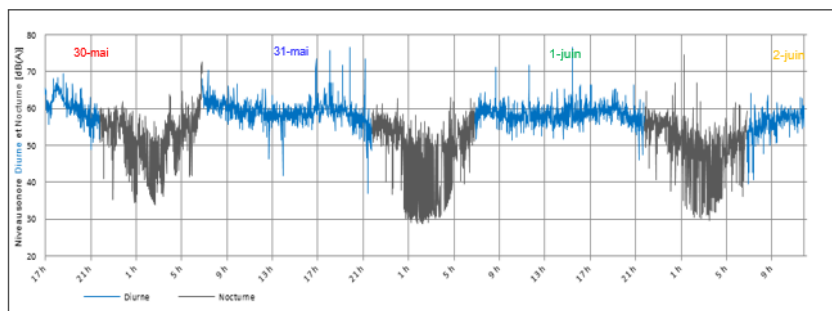
C/ ACOUSTIQUE

Les diagnostics acoustiques ont été réalisés par le bureau LASA à partir du 30 mai 2018. Des mesures environnementales, d'isollements acoustiques des façades et d'isollements acoustiques intérieurs (dalles, refends, cloisons intérieurs ...) ont été effectuées, puis analysées par l'équipe du LASA. Ces différentes mesures permettent de connaître les nuisances auxquelles l'immeuble est soumis, son comportement acoustique et d'étudier les effets d'une réhabilitation extérieure sur l'harmonie acoustique présente. En effet, en isolant la façade vis-à-vis des nuisances extérieures, on peut renforcer l'écoute des bruits intérieurs. Il faut donc s'assurer que les séparatifs intérieurs pourront maintenir le bon isolement acoustique entre les appartements.

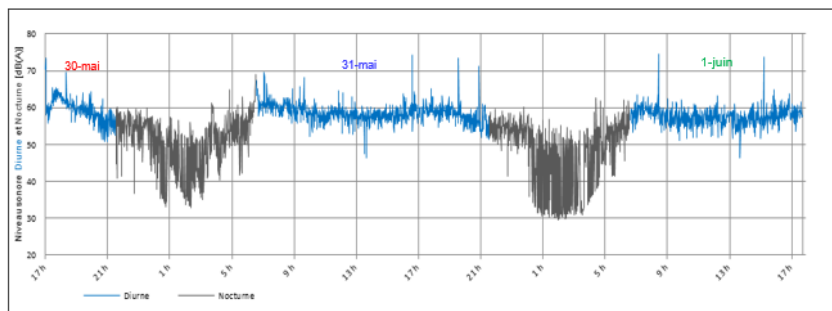
Mesures environnementales

Dans un premier temps, intéressons-nous aux résultats des mesures environnementales. Trois points de mesures ont été posés sur la résidence durant trois à quatre jours. Le point PF1 était placé en façade du projet, à une hauteur d'environ 2 m par rapport au sol, PF2 dans une loggia au 4e étage du bâtiment, et PF3 dans une loggia au 8e étage du bâtiment. Les résultats des différents points de mesures acoustiques environnementaux réalisés sont présentés sur les diagrammes ci-dessous :

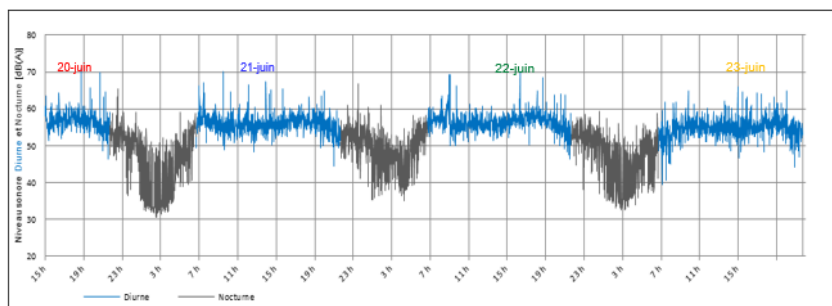
Point Fixe N°1 – PF1



Point Fixe N°2 – PF2

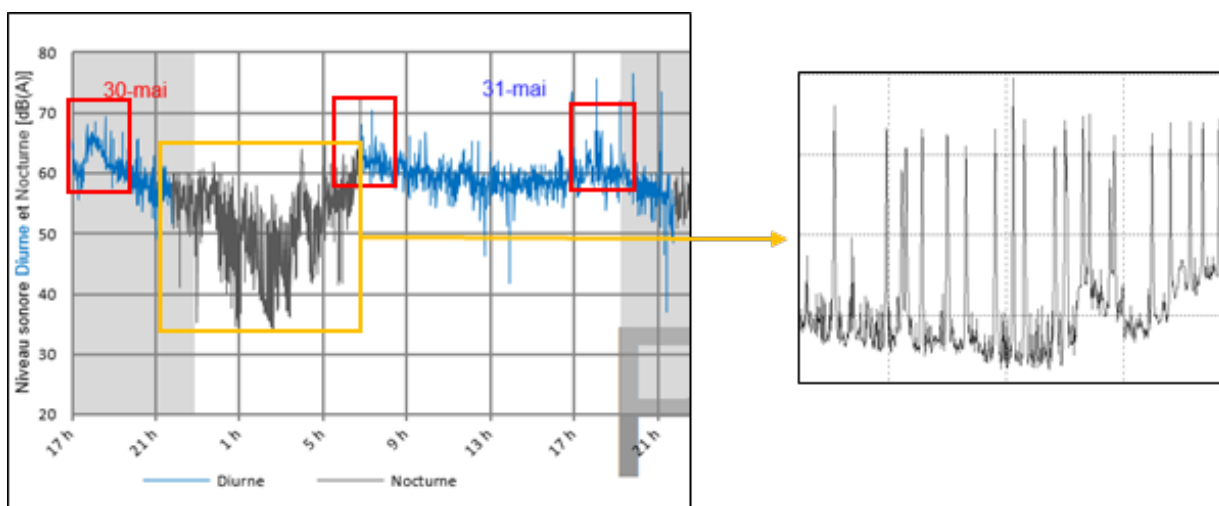


Point Fixe N°3 – PF3



Les résultats aux différents points sont sensiblement similaires, aussi bien en période diurne que nocturne. L'impact de la route est donc le même sur l'ensemble de la façade, peu importe l'étage. Le niveau sonore est d'environ 58 dB(A) en journée et d'environ 52 dB(A) pour la nuit. Lorsque le trafic est calme, l'ambiance sonore est caractérisée par l'activité de la ville et de la résidence. Le comportement journalier est semblable sur l'ensemble des points. Comme on peut le voir sur le diagramme suivant, un pic de circulation lié aux trajets habitation/travail est observable en début de matinée (6h-8h) et en fin de journée (17h-19h) d'environ 65 dB(A). Le reste de la journée, l'environnement sonore est plutôt

calme, autour de 58 dB(A). De plus, le niveau sonore diminue de façon importante en période nocturne. Néanmoins, en période nocturne, la fluctuation du niveau sonore est principalement liée au trafic de la rue de la Favorite. Chacun des pics visibles représentent le passage d'un véhicule, le niveau fluctuant en fonction du type et de la vitesse de ce dernier. On note un passage de véhicule toutes les deux minutes, ce qui représente une circulation, et donc des nuisances, importantes.



Diagrammes des mesures environnementales
© LASA, 2018

Mesures des isolements acoustiques standardisés

Il convient de réaliser ensuite des mesures d'isolement de façades pour apprécier les capacités d'isolement des panneaux Prouvé face à ces nuisances. Trois configurations de logement ont été testées. La configuration 1 ou C1, est un appartement dans son état d'origine avec les menuiseries coulissantes en aluminium de Jean Prouvé et un simple vitrage de 3mm. L'appartement C2 possède un modèle de fenêtres coulissantes en aluminium plus récent avec des double-vitrages de type G4/6/G8. L'appartement C3 a été rénové récemment avec un doublage intérieur composé d'un isolant thermique de 100 mm de laine minérale et une plaque de plâtre BA13. Ses menuiseries ont été remplacées par des châssis en aluminium et double vantaux coulissants vitrés de type G4/6/G8.

Intéressons-nous aux mesures prises sur les panneaux des séjours de ces trois logements. Pour C1, le panneau dans les dispositions d'origine a un isolement de seulement 19 dB(A), ce qui est relativement faible. Dans l'appartement C2, il y a en effet une amélioration au niveau de la partie vitrée, les fenêtres ayant été changées, mais le panneau conserve d'importantes faiblesses sur ses parties pleines et ne dispose que d'un isolement global de 24dB. On note quand même que le remplacement de la menuiserie permet de gagner 5 dB sur la valeur d'isolement globale. Dans le dernier logement, C3, rénové, on mesure un isolement de 31 dB qui permet de dépasser le seuil souhaitable pour bénéficier d'un confort acoustique agréable dans l'appartement fenêtre fermées. Mais l'ouverture des fenêtres l'été, c'est-à-dire, pour les habitants qui s'en

plaignent, le fait de supporter un niveau moyen de 65 dB(A) au moment des repas, avec des nombreux pics de bruit voisinant les 68 à 70 dB(A) devra être l'objet d'un traitement spécifique (Cf. plus loin). L'ajout d'un doublage isolant intérieur sur les panneaux permettra donc de gagner encore 7 dB(A) d'isolement supplémentaires l'hiver, mais aucune amélioration pour l'été.

Mesures acoustiques en champ proche

Une fois ces mesures d'isolement globale réalisées, des mesures en champ proche les ont complétées afin d'identifier plus finement les points de faiblesses des panneaux. 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, et du vitrage, entraînent un rayonnement important de ces éléments. Des faiblesses sont également présentes au niveau du joint de la menuiserie et du joint creux de la façade.

Dans la configuration 2, la mise en œuvre de double vitrage permet un gain d'environ 5 dB sur la valeur d'isolement globale. 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, élément d'origine de la façade. Dans la chambre, le pont phonique prédominant se trouve au niveau du joint creux de la façade.

Dans la configuration 3, la mise en œuvre d'un doublage intérieur dans le salon semble permettre de diminuer fortement la contribution liée à la faiblesse du panneau de façade d'origine. En effet, dans cette configuration, les ponts phoniques sont moins présents et moins importants.

Mesure des isollements acoustiques latéraux

En plus de son caractère historique, la façade présente la particularité d'abriter des loggias pour chacun de ses appartements. 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 ont été réalisées depuis une loggia et dans différentes configurations d'ouvertures ou fermetures des fenêtres afin de simuler l'ensemble des possibilités et mesurer l'impact d'une éventuelle gêne.

Des mesures ont été réalisées entre les loggias de l'appartement N°59 et N°60. Ces deux loggias sont complètement fermées et disposent de menuiseries doubles vitrages, avec une partie basse vitrée d'origine.

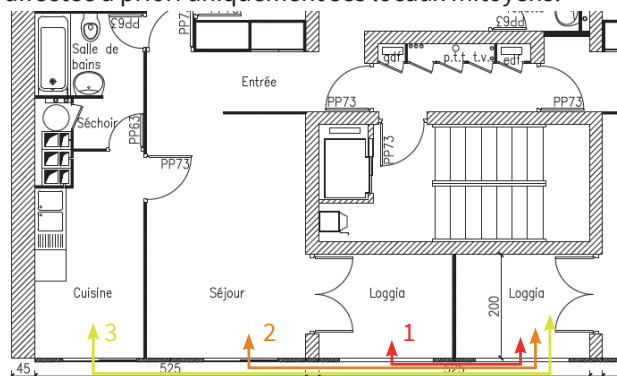
La première mesure a été faite avec les deux fenêtres des loggias complètement ouvertes. Dans ce cas, l'isolement acoustique était de 34 dB. Puis, 37 dB d'isolement ont été mesurés avec les deux fenêtres ouvertes à 20%. Ensuite, avec une fenêtre complètement ouverte et une fenêtre complètement fermée, l'isolement mesuré est de 41 dB. Et enfin, avec les deux fenêtres complètement fermées l'isolement mesuré est de 40 dB.

Pour mesurer les nuisances éventuelles exercées depuis une loggia sur le séjour de l'appartement voisin, nous avons réalisés des mesures 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 doubles vitrages. Les résultats des mesures sont : 42 dB lorsque les deux fenêtres sont complètement ouvertes ; 46 dB quand les deux fenêtres sont ouvertes à 20% ; 47 dB avec une fenêtre ouverte et une fenêtre fermée ; et 49 dB lorsque les deux fenêtres sont fermées à 100 %.

Nous avons fait de même entre la loggia de l'appartement N°59 et la cuisine de l'appartement N°60 et nous avons obtenus des résultats plus importants : 48 dB avec les deux fenêtres complètement ouvertes ; 52 dB avec les fenêtres ouvertes à 20 % ; 54 dB avec une fenêtre ouverte et une fermée ; et 56 dB avec les deux fenêtres fermées.

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 ± 3 dB. Dans le cas de la rue de la Favorite, l'objectif peut être considéré comme respecté dans les configurations Loggia/Salon et Loggia/Cuisine.

En somme, si une source potentielle de gêne sonore est mise en œuvre dans une loggia, cette dernière devrait affectée à priori uniquement ses locaux mitoyens.



Repérage des mesures latérales
© LASA, 2018

Acoustiques intérieures

Les isolements vis-à-vis de l'espace extérieur ont été analysés, voyons à présent les isolements acoustiques intérieurs. 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 25 cm, soit par une cloison sèche d'épaisseur inconnue.

Le tableau suivant présente les résultats des mesures d'isollements acoustiques standardisés pondérés au bruit aérien intérieur pour un bruit rose à l'émission ($D_{nT,A}$). Ces résultats sont comparés aux valeurs réglementaires recherchées entre logement.

Les commentaires (Com.) donnés pour l'ensemble des résultats de mesures indiqués ci-dessous sont les suivants : S pour satisfaisant ; ST pour Satisfaisant avec tolérance ± 3 dB ; NS pour Non Satisfaisant.

Aucune des configurations testées ne permet le respect des objectifs de la réglementation applicable aux logements neufs. Les propriétés acoustiques d'un mur de refend en béton de 25 cm devraient à priori permettre de les atteindre, cependant les transmissions s'effectuent via la façade rideau ce qui diminue la performance globale.

L'isolement mesuré dans la configuration cloison sèche est particulièrement faible entre deux chambres d'appartements mitoyens. Dans l'éventualité de la réhabilitation et de l'amélioration de l'isolement acoustique des façades, la cohésion de l'ensemble pourrait être perturbée et une problématique pourrait voir le jour.

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 dispositifs constructifs mise en œuvre actuellement ne le permettent pas et pourraient entraîner des problématiques de confidentialité entre chambres.

Le séparatif vertical constitué d'une dalle béton de 17 cm et d'une chape permet d'atteindre un isolement acoustique standardisé de 51 dB. Au regard des autres performances présentes, l'isolement vertical entre appartements n'aura pas besoin d'être renforcé.

Pour compléter ces mesures sur les séparatifs entre logements, nous avons souhaité vérifier la résistance aux bruits de choc des dalles. D'après nos mesures, les niveaux de pression acoustique pondérés aux bruits de chocs sont conformes aux exigences réglementaires.

Différentes gaines techniques traversent verticalement les étages de la résidence. Ces conduits peuvent être sources de ponts phoniques entre les différentes pièces reliées, des chambres dans le cas précis de la mesure effectuée. Le résultat obtenu est de 51 dB. Cette dernière n'est donc pas source de pont phonique entre les deux chambres testées. Néanmoins, de nombreux habitants nous ont rapporté des nuisances venant des gaines. Il semblerait que nous ayons à faire des mesures complémentaires sur d'autres gaines pour quantifier ces nuisances et en identifier la source.

En conclusion, le diagnostic réalisé sur site a permis de caractériser les différents comportements acoustiques du bâtiment situé au 44 rue de la Favorite à Lyon. Certains points sont à revoir pour atteindre un niveau de confort optimal.

Local d'émission	Local de réception	Sens	Isolement acoustique $D_{nT,A}$ en dB		Com.	Observations
			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
App N°33 Chambre N°1	App N°34 Chambre N°1	H	37	53	NS	Cloison sèche d'épaisseur inconnue
Séjour Local gardien	Chambre N°1 Local gardien	H	19	-	-	Cloison sèche entre chambres d'un même appartement
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

D/ AMBIANCES VÉCUES

Pour compléter les diagnostics déjà réalisés, il a été décidé de mettre en place un diagnostic des ambiances vécues par les habitants. En effet, la notion de confort peut certes découler de questions normatives, quantifiables, mais dépend également de la perception de chacun. La perception inclut l'ensemble des sens et permet de capter d'autres données : la luminosité, le vent, la chaleur, le froid, les sons ... Chaque individu, selon sa sensibilité, aura sa perception des ambiances. Il convient donc de recenser les perceptions individuelles et collectives des habitants de l'immeuble Les Cèdres durant ce diagnostic.

Dans un premier temps, ce diagnostic a porté sur les configurations spatiales et l'exemplarité des ambiances qui s'y rattachent. On étudie l'architecture, les formes intérieures, les effets de la propagation sensible des usages et les habitudes des occupants. Ce diagnostic s'intéresse à la description et l'organisation de l'appartement comme objet de perception, en considérant non seulement les effets des façades mais aussi les processus de marquage (ouverture/fermeture des fenêtres, usages des balcons...) qui prennent une part capitale dans l'appropriation des lieux par les habitants. Des enregistrements sonores, des photos, des schémas ont été réalisés pour accompagner cette représentation et l'enquête auprès des habitants. Ils constituent une mémoire des ambiances depuis l'appartement et permettent d'effectuer des comparaisons.

L'objectif principal de ce diagnostic est de permettre à l'équipe de recherche de proposer des solutions techniques, à tester par des simulations et la réalisation de prototypes, dans le but d'agir sur les façades pour améliorer le confort des habitants de l'immeuble « Les Cèdres ». Ces améliorations de l'enveloppe doivent être associées à des réflexions sur les perceptions qu'ont les habitants de leur logement, de leurs façades, des communs etc. Le diagnostic doit dégager les besoins des habitants en fonction de leur confort actuel et de leur confort souhaité. Quels sont les éléments confortables dans leur logement et ceux qui auraient besoin d'être nettement améliorés ?

Le diagnostic doit aussi tenir compte des diagnostics précédemment réalisés en thermique et acoustique, ces notions étant intimement liées au confort. Les actions menées résultantes de ces diagnostics sont en corrélation avec les résultats des diagnostics sensibles. Le diagnostic s'attache donc à trouver un équilibre entre confort vécu et confort normé.

Pour réaliser ce diagnostic particulier, nous avons mis en place une méthodologie en plusieurs étapes, avec les habitants. Pour commencer, avant de réaliser les entretiens avec les habitants, l'équipe de recherche a passé du temps sur place, dans l'immeuble, pour visiter plusieurs logements ainsi que les communs. L'objectif de ces visites était de s'imprégner des lieux, en ressentir les ambiances pour sélectionner les éléments les plus pertinents sur lesquels discuter avec les habitants.

La seconde étape pré-entretiens a consisté à rassembler des éléments évoquant les ambiances de l'immeuble et pouvant alimenter les entretiens. En effet, les questions posées permettent d'obtenir des informations sur les ambiances vécues des habitants, mais des images et bandes sonores à écouter ne peuvent que raviver des souvenirs vécus au sein de l'immeuble et relancer les conversations (exemple de l'étude « Au tribunal des sens » réalisée en 2004 par Daniel Siret, Olivier Balaÿ et Éric Monin).

Une fois ces données collectées l'équipe de recherche a organisé des entretiens avec des habitants disponibles pour les interroger. L'équipe a interrogé sept habitants et a passé une heure et demie avec chacun d'entre eux. Ces entretiens ont permis de mettre en évidence certaines caractéristiques du logement qui ne sont pas observables, ou difficilement, concernant leurs vécus quotidiens au sein du logement. Les habitants ont pu renseigner l'équipe sur leurs besoins et les ambiances sensibles de leur appartement.

Ces entretiens se sont divisés en deux temps : une première partie évoquant le confort des communs de l'immeuble (parc, jardin, parking, paliers, escaliers, caves ...) et l'aspect extérieur de celui-ci et une seconde partie concentrée sur le confort vécu par l'habitant au sein de son logement. Pour les travaux d'isolation acoustique, ces entretiens permettent d'ajuster éventuellement les objectifs d'isolement, de prendre en compte les conditions de vie des occupants et les contraintes de travaux. Pour les travaux d'isolation thermique, ces discussions permettent d'identifier les dysfonctionnements éventuels ou les désordres (exemple : remontées capillaires). Les propriétaires ont pu faire part à l'équipe de leurs contraintes (travaux effectués récemment qui limiteraient l'épaisseur de l'isolation intérieure par exemple), des aménagements déjà effectués et de ceux en projet. Pour les travaux concernant l'aspect architectural de l'immeuble, les entretiens ont permis de connaître la perception qu'ont les habitants de l'édifice. En mettant en comparaison

l'aspect initial de l'immeuble et son aspect actuel, nous avons cherché à comprendre comment les habitants ont perçu l'évolution de l'immeuble dans le temps depuis sa création.

L'équipe a veillé à rester totalement neutre afin de dégager les propos sincères des habitants et non-orientés.

Voici les questions que nous avons posé aux habitants :

Historique du vécu dans l'immeuble

- [1] Depuis combien de temps vivez-vous dans l'immeuble ?
- [2] Pourquoi avez-vous choisi de vivre dans cet immeuble ?
- [3] Quelle a été votre première impression, votre premier sentiment ?
- [4] Qu'en est-il aujourd'hui ?
- [5] Souhaitez-vous rester dans l'immeuble ou avez-vous pour projet de déménager ?
- [6] Pour quelles raisons ?



Photo 1 - Série « Aspect extérieur »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 2 - Série « Aspect extérieur »
Cl. Mathilde Padilla, 2018

Aspect extérieur de l'immeuble

(Observation des photos 1 et 2 de la série « Aspect extérieur »)

- [1] Quels mots mettez-vous sur votre immeuble, comment le décrivez-vous ?
- [2] Que pensez-vous de son insertion dans l'environnement de la rue de la Favorite ?
- [3] Comment vos invités perçoivent-ils votre immeuble ? Ressentent-ils de l'étonnement quant à son aspect extérieur ?
- [4] Avez-vous le sentiment de vivre dans un immeuble qui possède une qualité architecturale importante ?
- [5] *(Observation des photos 3 et 4 de la série « Aspect extérieur »)* En comparant ces deux photographies que pouvez-vous me dire ? Voyez-vous une différence ? Qu'en pensez-vous ?
- [6] *(Écoute des bandes sonores « Parcours »)* Que pouvez-vous me dire sur l'environnement sonore de la rue de la Favorite ? Que ressentez-vous à l'écoute de cette bande son ? Entendez-vous les bruits de la cage d'escalier dans votre appartement ? Est-ce gênant ?



Photo 3 - Série « Aspect extérieur »
Cl. SAAL



Photo 4 - Série « Aspect extérieur »
Cl. Mathilde Padilla, 2018

Loggia

(Observation des photos de la série « Loggia »)

[1] Quel est l'usage de votre loggia ? A quoi vous sert-elle ?

[2] Pourquoi avez-vous conservé (a)/annexé (b) la loggia ?

[3] (a) Pour vous, est-il encore pertinent de la conserver comme un espace extérieur, ou envisagez-vous de l'annexer à votre logement ? Si oui, pour quel usage (agrandir la pièce de vie, en faire une pièce en plus ...) ?

(b) Quand avez-vous annexé votre loggia ? Etes-vous satisfait de son usage ou envisagez-vous d'en refaire un espace extérieur ? Si oui, pour quelle raison ?

(Observer le type de cloison qui sépare la loggia des pièces de vie : isolée, non isolée, ouverte ...)

Fenêtre/Ouverture

[1] *(Observation des photos 1 et 2 de la série « Fenêtre-Ouverture »)* Que pouvez-vous me dire de ces deux typologies d'ouverture ? Quelles différences voyez-vous ? Qu'en pensez-vous ? Qu'est ce que ces ouvertures vous évoquent ?

[2] Actuellement, que voyez-vous par la fenêtre quand vous êtes assis dans votre séjour ?

[3] A proximité des fenêtres de votre logement quelle sensation de chaleur ressentez-vous, en été et en hiver ?

[4] *(Écoute des bandes sonores de la série « Fenêtre/Ouverture »)* Que ressentez-vous à l'écoute de ces bandes sonores ? Voyez-vous les fenêtres comme un système de protection par rapport à l'environnement extérieur ou de régulation ? Les bruits de la rue sont-ils une nuisance pour vous au quotidien, notamment lors du maintien des fenêtres ouvertes pour la ventilation ? Gardez-vous souvent vos fenêtres ouvertes ? Pour quelles raisons ?



Photo 1 - Série « Fenêtres-Ouvertures »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 1 - Série « Loggia »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 2 - Série « Fenêtres-Ouvertures »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 2 - Série « Loggia »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 3 - Série « Fenêtres-Ouvertures »
Cl. Mathilde Padilla, 2018

Occultations

(Observation des photos de la série « Occultations »)

- |1] Quels sont vos besoins en matière d'occultations dans le séjour et dans les chambres ? Réduire les apports thermiques dus au soleil ? Réduire l'éblouissement ? Réduire les vis-à-vis ? Obtenir le noir complet notamment la nuit ?
- |2] Quels types d'occultations utilisez-vous dans les différentes pièces de l'appartement ?
- |3] Sont-elles satisfaisantes ?
- |4] Si vous deviez les changer, que feriez-vous ?

Chauffage/Ventilation

- |1] Etes-vous satisfaits de votre système de chauffage actuel ? Répond-il à vos besoins ?
- |2] Même question pour la ventilation.
- |3] Si vous disposiez d'un compteur de chauffage individuel, changeriez-vous votre comportement sur votre manière de chauffer le logement ? Que changeriez-vous ? Et pour quelles raisons ?

Nuit

(Observation des photos de la série « Nuit »)

- |1] La nuit, souhaitez-vous faire le noir complet dans votre logement et surtout dans les chambres ?
- |2] Ressentez-vous le besoin vous protéger des vis-à-vis ?
- |3] Avez-vous l'habitude de dormir fenêtres ouvertes en été ? Pour quelles raisons ?
- |4] Profitez-vous du caractère traversant de votre logement pour réaliser une ventilation naturelle en été en conservant les portes des chambres ouvertes et l'ensemble des fenêtres ouvertes ? Pour quelles raisons ?



Photo 1 - Série « Occultations »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 2 - Série « Occultations »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 3 - Série « Occultations »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 1 - Série « Nuit »
Cl. Mathilde Padilla, 2018



Photo 2 - Série « Nuit »
Cl. Mathilde Padilla, 2018

Ces entretiens nous ont permis d'identifier plusieurs points à prendre en compte dans les phases de conception. Les habitants de la résidence ont des profils variés (personne en activité, retraités, jeunes couples avec ou sans enfants, famille monoparentale, etc.) et disposent globalement de peu de moyens pour investir dans des travaux. Plusieurs raisons les ont motivé à acheter un appartement dans cette résidence, comme le nombre de chambres, le prix particulièrement accessible, la luminosité des appartements, le quartier etc. Tous les résidents ont été plus réservés quant à la qualité des espaces communs qui sont souvent jugés trop exigus. Nous avons également pu noter que les avis sur l'esthétique de l'immeuble sont très variables. Certains habitants sont attachés au design moderne et à la signature Jean Prouvé, tandis que d'autres y sont insensibles, n'y accordent pas d'importance ou même ont une image négative de l'immeuble. En revanche, les fenêtres d'origine sont très appréciées pour leur charme, leur finesse et leurs grandes surfaces vitrées. Tous les habitants nous ont fait part d'importants inconforts ressentis. Selon eux, l'environnement est trop bruyant, surtout côté sud, et l'immeuble est mal isolé acoustiquement. Le trafic oblige certains habitants à monter le son de la télévision, certains sont réveillés la nuit etc. Globalement, les habitants se plaignent d'inconforts thermiques en été, avec des logements en surchauffe, surtout dans les étages élevés. En effet, les entretiens ont permis d'identifier les différences de ressentis entre les étages ; les appartements situés au-dessus des caves, non isolées ; les appartements à l'ombre des arbres du jardin et ceux très exposés au soleil dans les étages etc. Il en est de même en hiver. Les habitants des premiers niveaux attestent une sensation de froid venant du sol tandis que dans les étages élevés, les habitants ont fait part d'une sensation de surchauffe du fait d'une accumulation entre le chauffage et les apports solaires.

Ces échanges nous ont permis de mieux identifier les besoins des habitants. Sur ces diagnostics, un travail de restitution des entretiens a été réalisé afin de pouvoir en communiquer les résultats.

II. HYPOTHÈSES ENVISAGÉES

Une fois les diagnostics réalisés, les objectifs à atteindre en termes de confort fixés, et la bonne connaissance du bâtiment et des panneaux Prouvé acquise, l'équipe a commencé à explorer toutes les hypothèses envisageables pour la réhabilitation des façades légères de l'immeuble Les Cèdres.

Les pistes furent nombreuses, mais nous avons rapidement décidé de les regrouper en quatre grandes familles de solutions avec chacune des variantes concernant les matériaux. Au démarrage, nous avons souhaité n'exclure aucune solution et aucun matériau. Néanmoins, pour des questions patrimoniales et architecturales, l'isolation thermique par l'extérieur a été immédiatement exclue, de même que la solution consistant à remplacer la totalité des panneaux. Dans ce contexte de copropriété et des travaux en site occupé, toutes les hypothèses nécessitant la dépose des panneaux de façades sont également immédiatement exclues, la régie ne disposant pas de possibilité de relogement.

Aussi, même si notre souhait est, depuis le début de cette recherche, d'utiliser des matériaux biosourcés, nous avons préféré explorer également d'autres pistes avec des matériaux innovants, plus légers. En effet, les solutions proposées doivent trouver un équilibre entre les différents enjeux que sont le confort, le patrimoine, l'environnement, l'énergie et l'économie. De fait, à performances égales, l'épaisseur d'isolant nécessaire en utilisant un matériau biosourcé est par exemple plus importante qu'en utilisant du polystyrène ou encore un isolant sous vide. Dans notre cas, nous avons besoin de 14,5 cm de fibre de bois pour isoler, par l'intérieur, les panneaux Prouvé en atteignant le niveau de confort souhaité et identifié par l'équipe TRIBU au regard des diagnostics. La performance visée est également celle qui nous permettrait d'obtenir des subventions pour aider les copropriétaires à financer leurs travaux. Pour cette même performance, avec du polystyrène, l'épaisseur serait réduite à 10 cm. Enfin, avec un isolant sous-vide, matériaux nouveau venu de l'industrie aéronautique, l'épaisseur serait réduite à 3 cm. En revanche, le coût de l'isolant sous-vide est élevé, et sa mise en œuvre est relativement technique et contraignante, l'enveloppe de l'isolant ne devant pas être percée faute d'en réduire considérablement l'efficacité.

Compte-tenu de tous ces éléments, pour atteindre un équilibre économique entre ces différents matériaux

isolants, il faudrait calculer le coût des matériaux au m², mais également la perte de surface intérieure du logement induite par le choix d'un matériau plutôt qu'un autre, et en conséquence la perte financière au moment de la vente induite par cette perte de surface. Outre les questions d'isolants, les quatre familles de solutions se sont distinguées par le parti pris au niveau des menuiseries et protections solaires. Concernant les menuiseries, il est important de noter que les fenêtres d'origine de l'immeuble n'ont été conservées qu'à 25 % par les habitants. Pour le reste, elles ont été remplacées au fil des décennies et donc présentent des modèles différents générant un effet patchwork sur les façades de l'immeuble. Dans l'ensemble des hypothèses envisagées, nous préconisons de retrouver l'homogénéité des façades d'origine en agissant sur les menuiseries en premier lieu. Nous avons pu noter

d'autres modifications des façades lors du diagnostic architectural, notamment l'ajout de bavettes au niveau des joints horizontaux entre les panneaux, et au-dessus des fenêtres, et l'ajout de couvre-joint verticaux entre les panneaux. Ces éléments ont été rapportés sur les conseils d'une entreprise lors d'un ravalement de façade au début des années 2000. L'entreprise s'était alors inquiétée de l'état des joints creux entre panneaux dont les néoprènes semblent avoir séchés au soleil et être devenus friables. Dans l'hypothèse d'une remise à l'état d'origine et donc de la suppression de ces profils rapportés, la restauration des joints devra être réalisée ainsi que la réparation des percements effectués lors de la fixation des profils afin de garantir l'étanchéité de l'enveloppe.



Éléments rapportés sur la façade sud
Cl. Mathilde Padilla, 2018

Ces dispositions générales évoquées, intéressons-nous aux familles de solutions envisagées. **La première a été nommée « Restauration double-vitrage ».** Cette hypothèse consiste à conserver les menuiseries d'origine encore présentes sur l'immeuble et à les restaurer pour leur intégrer un double-vitrage à la fois fin et performant. Dans le cas d'une fenêtre remplacée, nous envisageons alors de refabriquer une menuiserie, à l'identique du dessin de Prouvé, mais intégrant un double-vitrage. Dans de nombreux cas, le dormant de la menuiserie d'origine a été conservé même si la fenêtre a été changée ce qui facilitera l'opération.

Le diagnostic de la fenêtre d'origine, effectué avec le bureau DECARE et l'entreprise KCM, a permis de réaliser la difficulté d'intégrer un double-vitrage dans la menuiserie d'origine, les profils en aluminium étant en U et prévus pour accueillir un verre de 3mm. Nous avons néanmoins choisi de poursuivre le développement de cette hypothèse en essayant d'insérer un verre dans le profil U et en créant une parclose intérieure pour soutenir le second verre. L'intercalaire entre les vitrages

serait alors rehaussé au-dessus du profil. L'autre solution consiste à refabriquer les ouvrants avec des profils plus larges permettant d'accueillir le double-vitrage fin de 13,5mm repéré chez MP Vitrages. On pourrait alors conserver les dormants et les traverses d'origine.

Cette première solution se décline ensuite avec deux variantes de protections solaires intérieures : un store vénitien à lames orientables et un store toile.

La deuxième famille de propositions est appelée « Charte de Venise double-façade ». L'objectif de cette famille est de conserver l'entière matérialité des panneaux d'origine, y compris les menuiseries, telle qu'elle. On vient alors améliorer les performances de ce panneau par une double-façade intérieure, qui comme la première, comporte des parties pleines isolantes et une fenêtre. Pour les personnes ayant remplacés leurs menuiseries, afin de retrouver l'homogénéité et l'état d'origine de la façade, on refabrique des fenêtres Prouvé à l'identique. La deuxième fenêtre intérieure peut alors être de plusieurs natures : ouvrant

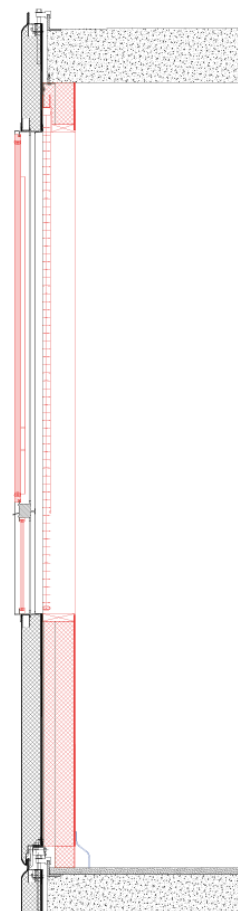


**PROPOSITION 1 :
RESTAURATION DOUBLE-VITRAGE**

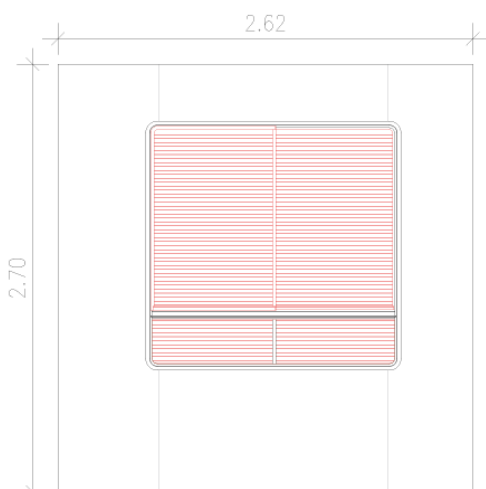
Montage d'un double-vitrage sur le châssis et le dormant existant +
Doublage isolant + Store intérieur

- VARIANTE A : ISOLANT BIO-SOURCÉ (16,5 À 18CM)
- VARIANTE B : ISOLANT POLYSTYRÈNE (10 À 12,5CM)
- VARIANTE C : ISOLANT SOUS VIDE (3 CM)
- VARIANTE D : SANS ISOLANT

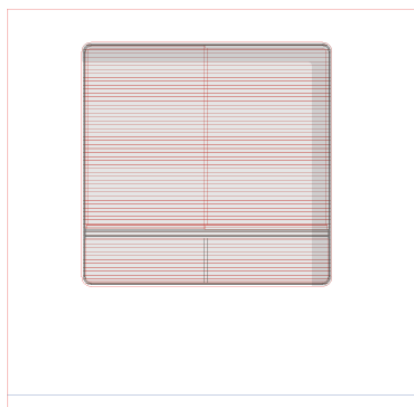
Coupe verticale panneau classique
sud 1:10



Élévation extérieure panneau classique sud 1:20



Élévation intérieure panneau classique sud 1:20



à la française, coulissants, en aluminium, en acier ou en bois. L'interstice entre les deux fenêtres permet d'intégrer une protection solaire intermédiaire, plus performante que lorsqu'elle est positionnée à l'intérieur. Celle-ci peut être réalisée au moyen de stores vénitiens à lames orientables, ou de stores toiles. La double-fenêtre a l'avantage de pouvoir réaliser une ventilation naturelle du logement, en ouvrant les fenêtres, tout en étant protégé des nuisances sonores. En effet, en ouvrant un vantail de la fenêtre extérieure, et le vantail opposé de la fenêtre intérieure, on réalise une chicane acoustique qui permet de rompre la transmission des ondes sonores. Cette situation fonctionne mieux avec un double-coulissant. Le coulissant à l'autre avantage, par rapport à l'ouvrant à la française, de ne générer aucun encombrement. En revanche, le nettoyage de la face extérieure de la fenêtre intérieure peut être rendu difficile.

D'un point de vue économique, la deuxième famille de solutions peut s'avérer coûteuse pour les habitants ayant déjà changé leurs menuiseries, car elle les oblige

à réinvestir dans deux nouvelles fenêtres. En revanche, pour les habitants ayant conservé la menuiserie d'origine la solution 2 sera moins coûteuse et, de manière générale, cette solution permettra d'atteindre de meilleures performances acoustiques et thermiques. En effet, la protection thermique sera plus efficace car la deuxième fenêtre sera sans doute plus performante qu'une fenêtre restaurée en double-vitrage (rupteurs de ponts thermiques), et les nuisances sonores seront atténuées lors de la ventilation naturelle. Sur ce point, nous avons exploré une option à intégrer à la solution 1, consistant à installer un rideau acoustique multicouches au-devant de la fenêtre, côté intérieur, qui permettra de réaliser des chicanes lors de son ouverture. Nous avons également envisagé que les habitants ayant remplacés leurs menuiseries optent pour la solution 1 et que ceux qui les ont conservées optent pour la solution 2. Le risque de cette hybridation est de créer des hétérogénéités dans les reflets des vitrages en façade et dans la perception d'ensemble. Il sera intéressant de vérifier cet aspect sur les prototypes.

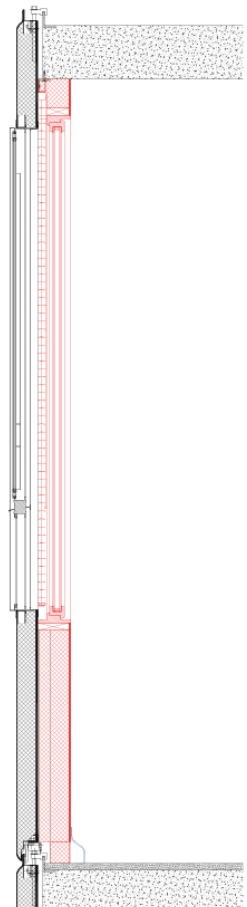


PROPOSITION 2 : CHARTRE DE VENISE DOUBLE-FAÇADE

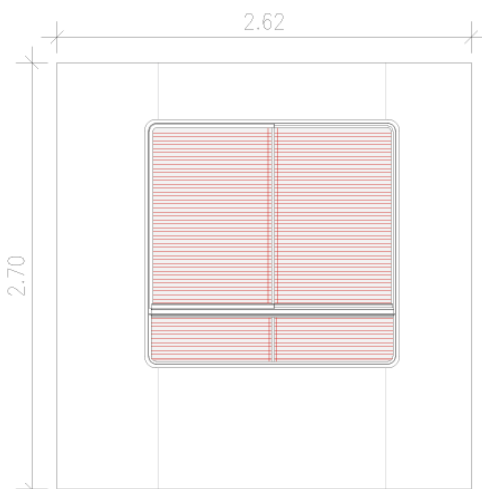
Remise du panneau à l'état d'origine + Insertion d'une double façade composée d'un doublage isolant et d'une fenêtre menuiserie bois à la française + Store intermédiaire

VARIANTE A : ISOLANT BIO-SOURCÉ (16,5 À 18CM)
VARIANTE B : ISOLANT POLYSTYRÈNE (10 À 12,5CM)

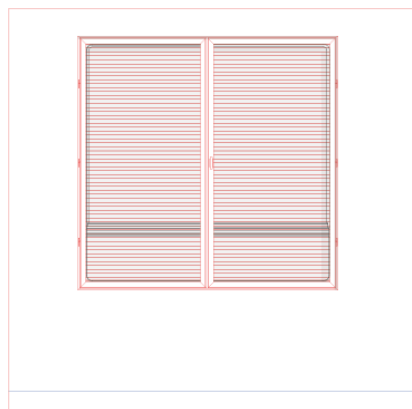
Coupe verticale panneau classique
sud 1:10



Élévation extérieure panneau classique sud 1:20



Élévation intérieure panneau classique sud 1:20



La troisième solution envisagée consiste à réaliser la restauration de la menuiserie comme dans la proposition 1, mais en déplaçant la fenêtre à l'intérieur du logement, sur le doublage isolant intérieur. Ainsi, en façade extérieure on retrouve uniquement le cadre de la menuiserie, aux angles arrondis, et le reste de la fenêtre est déporté. Cette solution permet d'intégrer un store extérieur vénitien ou toile, dont le coffre est masqué dans le doublage isolant ce qui permet de camoufler totalement le store en position ouverte. Néanmoins, cette solution pose beaucoup de questions techniques, notamment d'étanchéité, et provoque la dénaturation du panneau d'origine Prouvé. Pour ces deux raisons, elle a été éliminée lors des débats du premier Conseil Scientifique de l'équipe en février 2019.

Enfin la quatrième et dernière solution envisagée consiste à l'intégration d'un store extérieur réversible en façade. En effet, les conditions de confort thermique en été étant principalement remises en question par les importants apports solaires en façade sud de l'immeuble, il a semblé important de se saisir de ce

problème et d'envisager une solution pour intégrer des protections solaires extérieures, les plus efficaces. Conscients que l'ajout de ce store va modifier l'aspect de la façade, nous avons réfléchi à la meilleure intégration de celui-ci, ainsi qu'à un système réversible qui n'aurait pas d'impact sur l'état des panneaux. Pour ce faire, nous avons dessiné un store de mêmes dimensions que les panneaux, ce qui présente deux avantages : protéger l'ensemble de la paroi des apports solaires, les menuiseries tant que les parties en aluminium, pour réduire le réchauffement de l'appartement ; et s'adapter à la trame régulière de la façade en venant recréer une grille de panneaux lisses et pleins, alternés de joints creux. Le store ne pouvant se fixer dans le panneau pour des questions structurelles, mais aussi d'étanchéité, nous avons créé des pattes de fixation sur mesure permettant de fixer le store aux dalles de l'immeuble en passant par les joints entre panneaux. Ainsi, le store est totalement indépendant du panneau Prouvé, garantissant la bonne conservation de celui-ci.

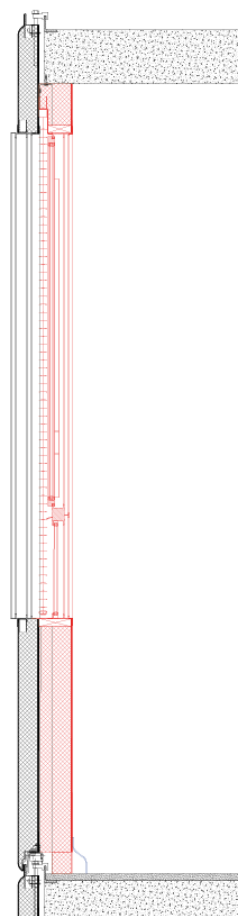


**PROPOSITION 3 : TECHNIQUE
DOUBLE-VITRAGE ET STORE EXTÉRIEUR MASQUÉ**

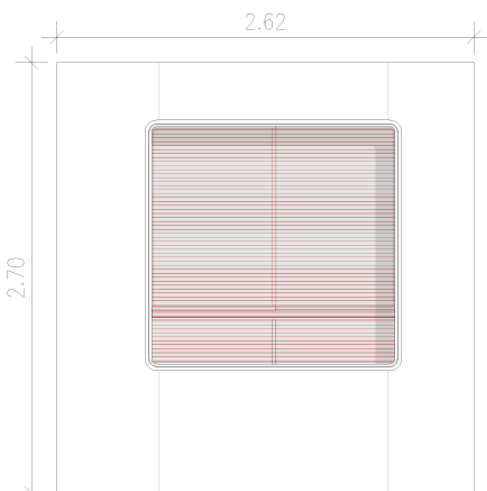
Conservation du dormant existant + Doublage isolant intérieur + Montage d'une menuiserie type Prouvé double vitrage coulissant sur le doublage isolant intérieur + Insertion d'un store extérieur masqué

VARIANTE A : ISOLANT BIO-SOURCÉ (16,5 À 18CM)
VARIANTE B : ISOLANT POLYSTYRÈNE (10 À 12,5CM)

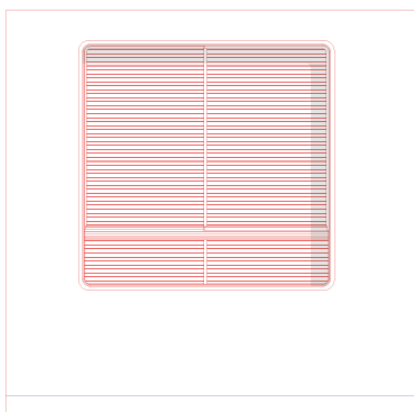
Coupe verticale panneau classique sud 1:10



Élévation extérieure panneau classique sud 1:20



Élévation intérieure panneau classique sud 1:20



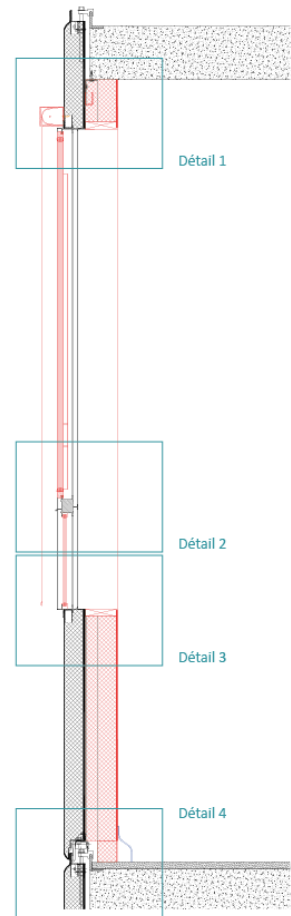


PROPOSITION 4 : RÉVERSIBLE STORE EXTÉRIEUR VISIBLE

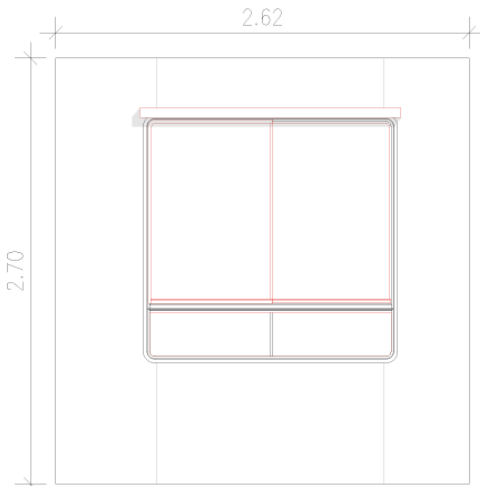
Ajout d'un store extérieur visible, à l'ancien emplacement des bavettes
Doit être réversible
Peut se décliner sur les deux première solutions

VARIANTE A : DOUBLE FAÇADE
VARIANTE B : DOUBLE-VITRAGE SUR CHÂSSIS EXISTANT

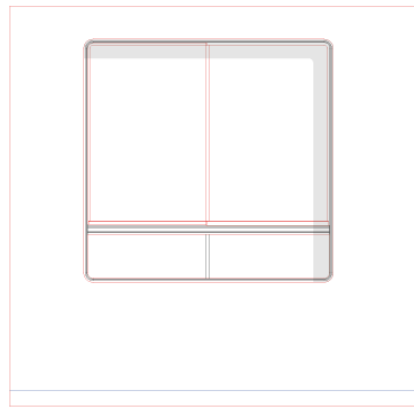
Coupe verticale panneau classique
sud 1:10



Élévation extérieure panneau classique sud 1:20

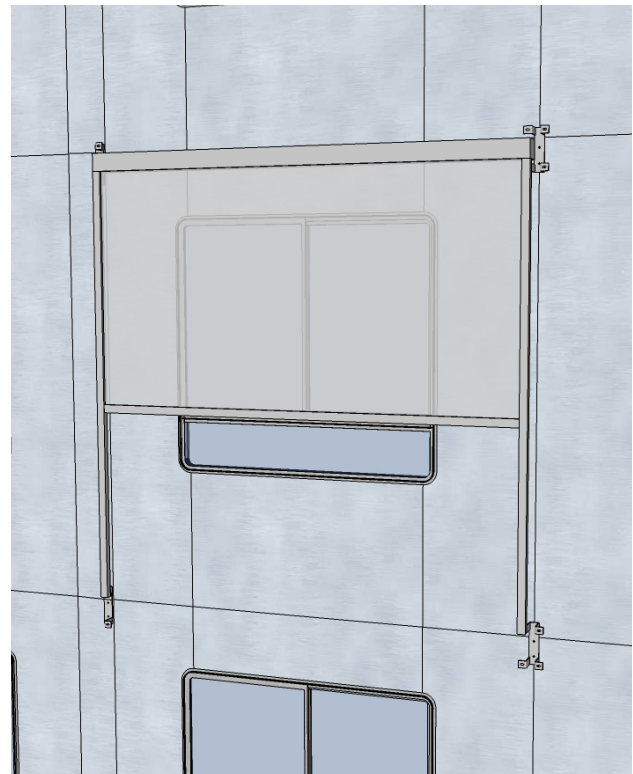


Élévation intérieure panneau classique sud 1:20



III. SOLUTIONS RETENUES POUR LES PROTOTYPES

A l'issu du conseil scientifique de février 2019, et d'une réunion avec les copropriétaires au printemps de la même année, l'ensemble de l'équipe a choisi de réaliser des prototypes pour les solutions 1 « Restauration double-vitrage », 2 « Charte de Venise double-façade » et 4 « Store extérieur réversible ». Ce sont donc les trois solutions que nous avons développées durant l'année 2019. Pour affiner les différentes solutions, l'ensemble des bureaux d'études a été sollicité. Afin de compléter ces expertises, nous souhaitons nous rapprocher d'entreprises, de fabricants et industriels pouvant nous conseiller sur les matériaux et techniques de mise en œuvre. Pour ce faire, nous nous sommes associés aux Grands Ateliers, partenaires de la Chaire « Habitat du Futur », qui nous ont partagé le répertoire de leurs partenaires et qui ont également mis à disposition leurs locaux pour nos expérimentations. Maxime Bonnevie, directeur des Grands Ateliers, et Pascal Gantet, responsable des partenariats nous ont été d'un grand secours et nous ont accompagné pour rencontrer différents industriels capables de nous suivre sur le projet.



Modélisation du prototype de store réalisé
Mathilde Padilla, 2019



PARTIE 4 : EXPÉRIMENTATION PAR PROTOTYPES

I. PROTOTYPE DE STORE EXTÉRIEUR

A/ MISE EN ŒUVRE

Le premier prototype réalisé fut celui du store extérieur réversible. Initialement, nous avons envisagé la pose d'un store toile à guidage par câbles, sans coffre, très fin et discret. Nous avons alors rencontré l'entreprise Serge Ferrari qui nous a présenté les différents types de toiles possibles : matières, perforations, degré de protection solaire, de transparence, et teintes. Soucieux de permettre aux habitants de conserver la vue vers le dehors, même lorsque leur store est baissé pour les protéger du soleil, nous avons opté pour une toile Soltis 88, qui protège des apports solaires tout en proposant une certaine transparence. Pour le guidage et la mécanique du store, l'entreprise Serge Ferrari nous a orienté vers un fabricant partenaire et local, l'entreprise Prodotti France située à Genas. La rencontre avec Cédric Dalard, gérant, et ses techniciens, a réorienté le choix du système de guidage et de protection du store. En effet, lorsque nous leur avons présenté le projet, ils nous ont immédiatement alerté sur les risques d'arrachement et de nuisances sonores liés au vent. L'immeuble faisant neuf étages et ne bénéficiant d'aucun masque de protection contre le vent, celui-ci peut être soumis à des rafales allant à plus

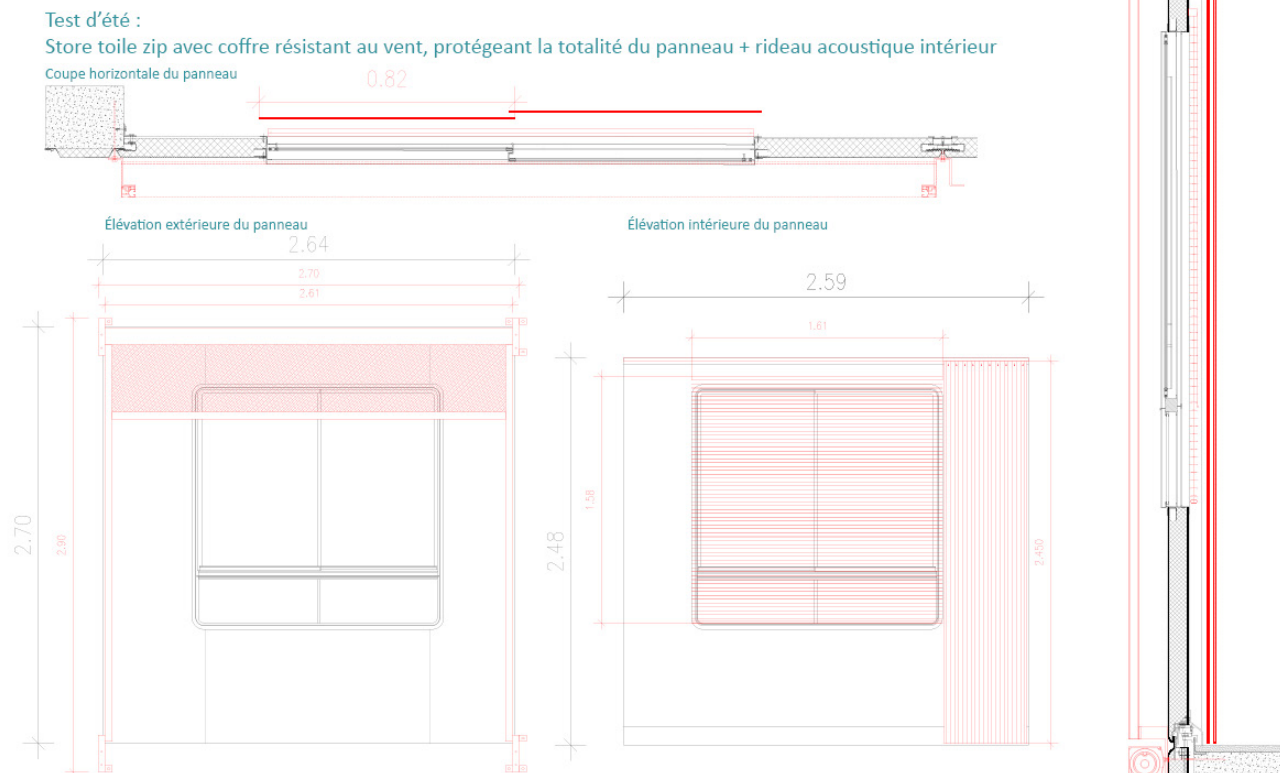
de 100 km/h. Dans ces conditions, et vue la surface de toile attendue (environ 7 m²), le guidage par câbles est insuffisant pour maintenir la toile en tension et éviter les arrachements. L'entreprise nous a donc orienté sur un modèle de store Zip, et nous avons travaillé ensemble à son intégration à la façade. Nous avons par exemple décidé de retourner le store pour ne pas rendre la saillie du coffre visible, et donc de le poser de façon inédite, en porte à faux, fixé par quatre points à des platines créées spécialement pour ce projet. Les platines sont fixées dans les dalles de l'ossature primaire grâce à des tiges filetées qui passent dans les joints entre panneaux pour préserver ceux-ci.

Le store ainsi conçu a ensuite été posé in situ, le 27 novembre 2019, au 2e étage, par l'entreprise Asymptote, basée dans le 9e arrondissement de Lyon. Nous remercions la propriétaire de l'appartement qui s'est portée volontaire pour recevoir notre prototype et le tester durant une année.

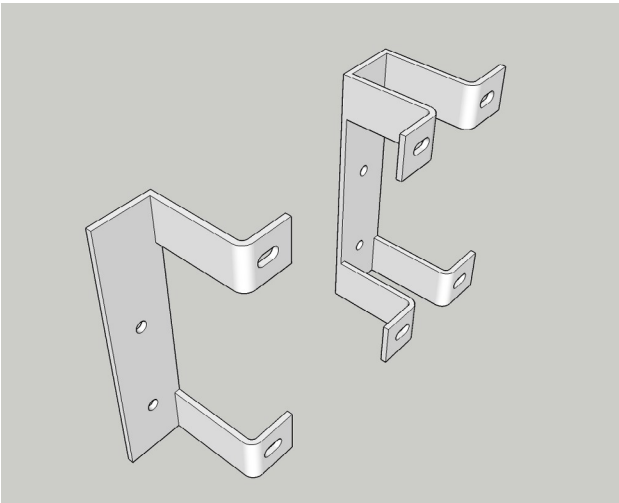
Profitant de la nacelle mise à disposition, et de la nécessité de déposer les couvre-joints verticaux de ce panneau pour poser le store, l'entreprise KCM a installé ce même jour de nouveaux joints verticaux en test.

PROTOTYPE STORE EXTÉRIEUR RÉVERSIBLE

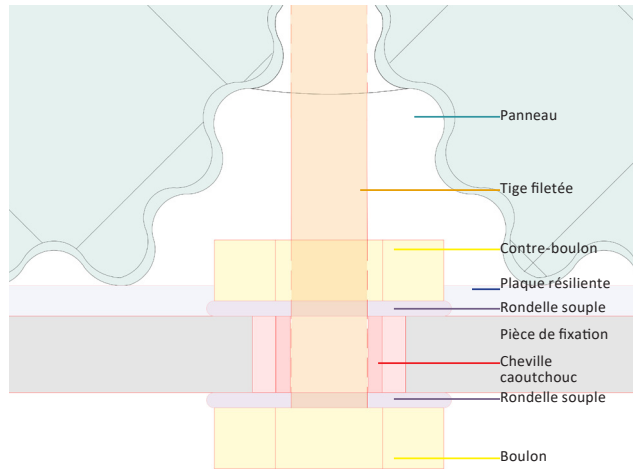
Coupe verticale du panneau



Plan, coupe et élévations du prototype de store réalisé
Mathilde Padilla, 2019



Modélisation des pattes de fixation sur mesure
Mathilde Padilla, 2019



Détail de l'assemblage
Mathilde Padilla, 2019



Dépose des couvre-joints rapportés
Mathilde Padilla, 2019



Pose des pattes de fixation dans les joints entre panneaux
Mathilde Padilla, 2019



Pose du store
Mathilde Padilla, 2019



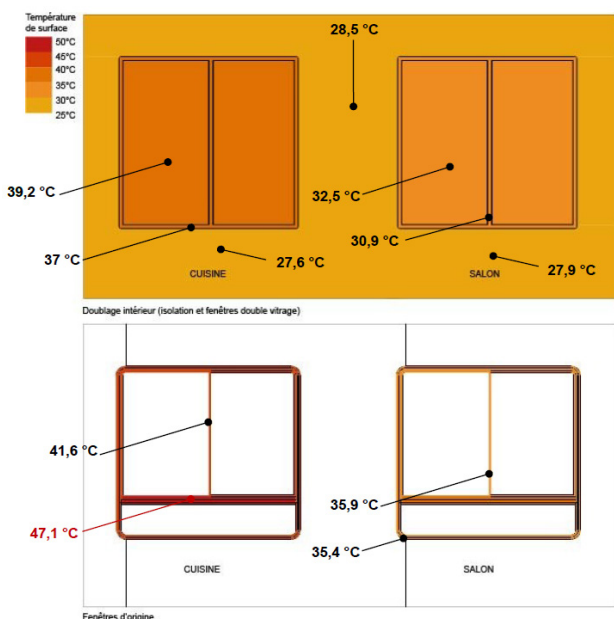
Le store une fois posé
Mathilde Padilla, 2019

B/ TESTS THERMIQUES

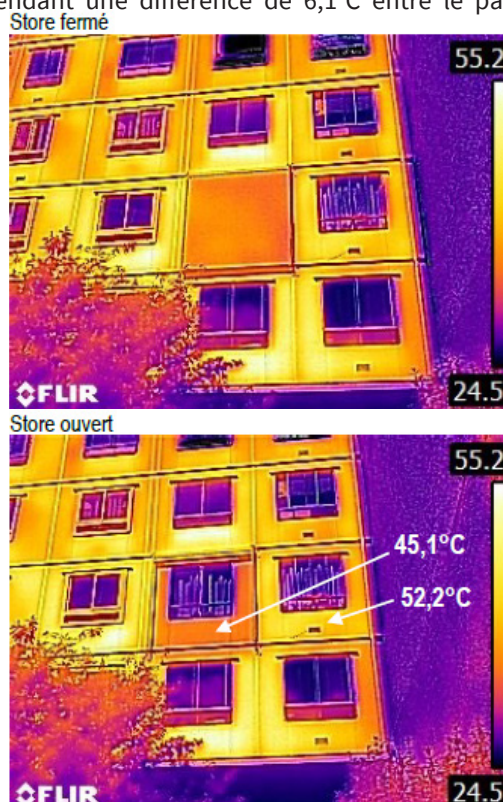
Une fois le prototype installé, l'équipe a demandé à l'habitante volontaire de tester l'utilisation du store. Dès les premières journées ensoleillées du printemps, celle-ci a noté une amélioration de son confort. Pour le vérifier, l'équipe et le bureau d'étude TRIBU ont réalisé des mesures en période estivale ; l'équipe demandant à l'habitante de baisser le store dès le matin. 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'étude 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 stores. 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 (de six ou sept centimètres) et l'installation de doubles fenêtres en double vitrage.

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.

Le store permet donc d'abaisser les températures de surface des fenêtres. 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 influencer la température des parois opaques intérieures, on peut alors supposer que le niveau d'isolation de la paroi est suffisant pour le confort d'été, certainement grâce au doublage réalisé dans cet appartement. La mesure de température de surface extérieur démontre cependant une différence de 6,1°C entre le panneau



Températures de surfaces intérieures
TRIBU, 2020



Températures de surfaces extérieures
TRIBU, 2020

C/ RETOURS DES HABITANTS, DU CONSEIL SCIENTIFIQUE ET DE L'ABF SUR LE PROTOTYPE

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 des parties pleines du panneau.

Enfin, l'équipe a mesuré la température globe, réel indicateur de confort, qui prend en compte la température d'air, et le rayonnement des températures de surface à l'intérieur du logement, devant les deux panneaux. La température globe du panneau protégé par le store est de 28,6°C et la température globe du panneau de cuisine 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 le pourcentage d'humidité du logement et la vitesse de l'air, 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 25,90°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 correct en passant sous le seuil d'inconfort fixé à 28°C. L'ensemble de ces mesures consacrent l'efficacité du store extérieur.

Après plus d'un an d'utilisation, l'habitante volontaire pour expérimenter le store extérieur exprime sa satisfaction et confirme le gain de confort obtenu. Elle apprécie avoir conservé la luminosité de son appartement et la vue vers l'extérieur. Les habitants ont exprimé des avis majoritairement positifs sur l'aspect du store. Certains s'interrogent sur la teinte et expriment le souhait d'apporter de la couleur à leur immeuble 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 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. Le conseil scientifique suggère alors de travailler sur une polychromie qui reprendrait ce principe. Dans la mesure où les stores sont des éléments rapportés et réversibles, l'ABF donne son accord pour faire des essais polychromes, ce que l'équipe s'empresse de faire. Plusieurs options sont alors élaborées pour ouvrir la discussion avec les copropriétaires. Elles reprennent les teintes de l'environnement proche de l'immeuble, reflétées par les panneaux en aluminium.



Exemple d'une polychromie étudiée à 10 nuances
Mathilde Padilla, **archipat**, 2020

D/ DIMENSION ÉCONOMIQUE

Malgré ces avis positifs sur l'aspect du store et son efficacité, les copropriétaires expriment leur inquiétude quant au coût d'une telle installation. 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 cabinet Denizou estime le coût de fourniture et de pose des stores à 273 000 € hors taxes pour l'ensemble de l'immeuble soit environ 1 516 € HT par store. Les appartements disposent majoritairement de trois panneaux au sud, quelques rares en possèdent deux ou quatre. Les stores appartenant à la façade, il s'agit d'une dépense de copropriété dont le coût sera réparti au tantième des propriétaires.

Ces chiffres raisonnables montrent qu'avec un budget limité, cette hypothèse permet d'apporter une réelle solution aux problématiques de confort thermique d'été de l'immeuble et, plus généralement, des façades légères exposées aux rayonnements solaires.

L'installation de ces stores extérieurs exige la mise en place d'une nacelle en toiture pour leur pose, puis leur maintenance. Le coût de cet équipement est estimé à 35 000 € HT. A cela s'ajoute un forfait annuel

de maintenance estimé à 1 850 € HT. Il s'agit donc d'un investissement supplémentaire, mais qui permettrait aux copropriétaires de retrouver un confort thermique d'été satisfaisant.

L'équipe envisage d'associer à ces travaux une remise en état de la façade : dépose des éléments rapportés (couvre joints verticaux et bavettes horizontales), nettoyage des panneaux et réfection de l'étanchéité des façades nord et sud dont le coût est estimé à 140 000 € HT. Par ces travaux, l'équipe souhaite redonner à la façade son aspect d'origine. Les stores étant réversibles, si une autre solution moins visible permet un jour de maintenir un confort d'été agréable dans les logements sans engendrer de consommations d'énergie supplémentaire, ils pourront être déposés et la façade retrouvera un état proche de l'origine.



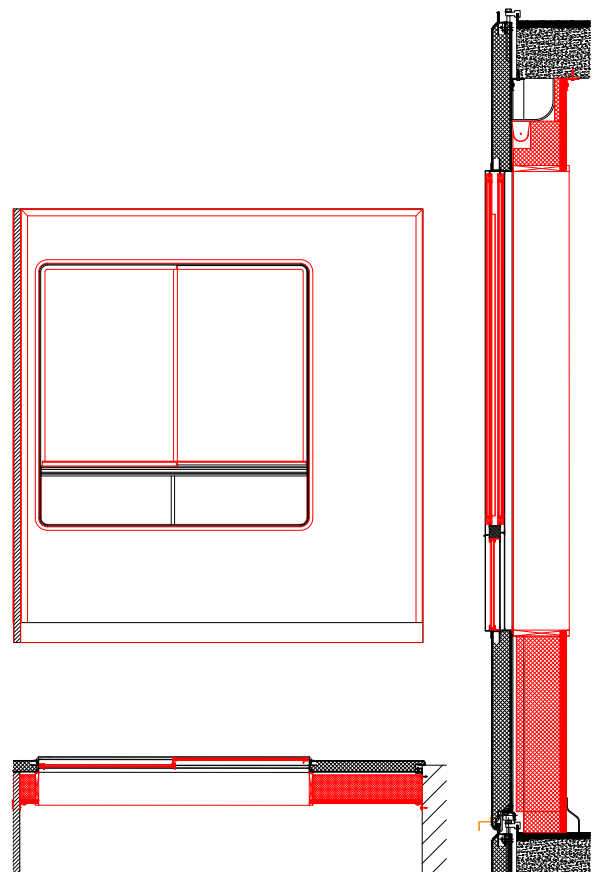
Exemple d'une polychromie étudiée à 5 nuances
Mathilde Padilla, **archipat**, 2020

II. PROTOTYPE DE LA SOLUTION 1 : RESTAURATION DOUBLE VITRAGE

A/ MISE EN OEUVRE

Les prototypes des solutions 1 et 2 se sont développés simultanément. Suite à l'accord des copropriétaires, ils ont été conçus pour être installés dans la loge du gardien servant de local au conseil syndical de l'immeuble. Souhaitant initier une prise de conscience de la part des habitants sur les questions de construction durable, nous avons fait le choix de réaliser les prototypes avec le maximum de matériaux biosourcés. De fait, nous nous sommes orientés vers des doublages intérieurs en ossature bois. Pour les concevoir et les fabriquer, les Grands Ateliers nous ont mis en relation de leurs partenaires et voisins, les Compagnons du Devoir de Villefontaine. Nous avons alors monté, avec Eddy Giroux, enseignant, un projet pédagogique à destination des élèves Compagnons. Dans un premier temps, nous leur avons présenté le projet, puis, nous leur avons demandé de concevoir les ossatures des deux prototypes, tout en tenant compte des contraintes d'intervention en site occupé, de livraison des éléments d'ossature dans des espaces existants exigus etc. Les ossatures conçues ont ensuite été préfabriquées aux Grands Ateliers par les élèves Compagnons eux-mêmes le 18 novembre 2019. Ils ont ensuite monté les deux prototypes dans la loge du gardien le samedi 25 janvier 2020.

Le prototype de la solution 1 est composé d'une ossature bois de sections 14,5*4,5 cm entre laquelle s'insère des panneaux d'isolant fibre de bois de 14,5 cm, le tout recouvert d'une membrane hygro-régulable. Il est complété par des panneaux de finition Contrapanel Knauf de 13 mm d'épaisseur, possédant des propriétés acoustiques, sélectionnés par le LASA. Un store intérieur toile fournit par Prodotti a été ajouté au prototype. Son coffre est camouflé dans l'épaisseur du doublage. Concernant les fenêtres, deux éléments sont à étudier : les parties menuisées et les parties vitrées. Pour les parties menuisées, l'équipe a fait appel à plusieurs entreprises, industriels ou artisans, dans le but de trouver le profil le plus proche de celui d'origine tout en répondant aux exigences de confort des habitants et aux exigences normatives d'aujourd'hui. Ce profil n'étant pas existant sur le marché, cette hypothèse implique la création d'un profil spécifique et d'une filière aluminium dédiée. Pour parvenir à un résultat satisfaisant, l'équipe est consciente que les principales difficultés vont résider dans le cintrage des profils pour obtenir les angles arrondis caractéristiques des fenêtres de l'immeuble Les Cèdres, et dans l'obtention de profils d'épaisseurs similaires aux fenêtres existantes tout en intégrant un double-vitrage. A l'heure actuelle, aucun fabricant n'a été en mesure de proposer des profils satisfaisants du fait des rupteurs de ponts thermiques qui engendrent des cintrages d'un rayon de 200 mm contre les



Plan, coupe et élévation du prototype 1
Mathilde Padilla, 2019



Ossature du prototype 1
© Eddy Giroux, Compagnons du Devoir, novembre 2019



Montage du store du prototype 1
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020

Partie 4 : Expérimentation par prototypes



Pose de l'isolant et du frein vapeur du prototype 1
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Pose des panneaux Knauf Contrapanel du prototype 1
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Photo de la loge avant pose du prototype 1
Cl. Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Photo de la loge après pose du prototype 1
Cl. Sabine Serrad, 25 janvier 2020



Les Compagnons du Devoir en action sur le prototype 1
Cl. Sabine Serrad, 25 janvier 2020

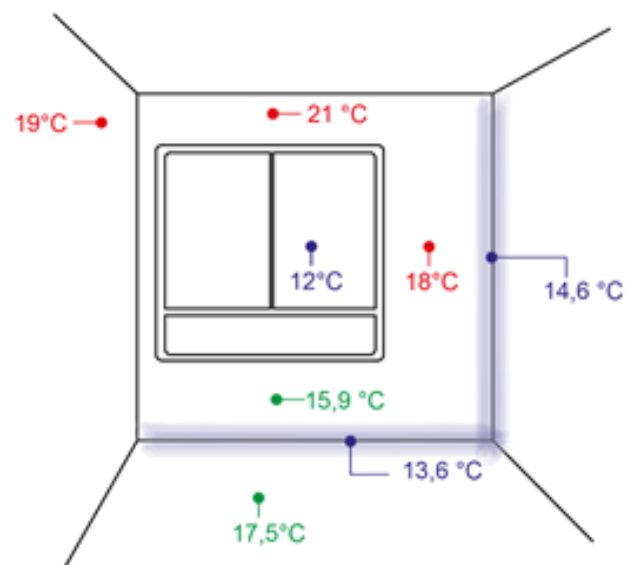
70 mm de la fenêtre Prouvé. Ces rupteurs de ponts sont néanmoins exigés dans les DTU - documents techniques unifiés - pour répondre aux normes. Pour s'en affranchir il serait donc nécessaire d'obtenir une accréditation pour le modèle créé qui doit alors répondre aux mêmes exigences que les modèles certifiés.

Enfin, pour obtenir des profils fins, le choix du vitrage est à étudier avec attention. 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 des habitants. L'équipe se lance alors dans l'étude de plusieurs vitrages et s'intéresse particulièrement aux 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. Monuverre propose un double vitrage de 15,8 mm et MP vitrage de 13,5 mm qui répondent aux performances visées par TRIBU et LASA. Compte tenu des obstacles rencontrés, aucune menuiserie n'a pu être conçue pour le prototype et cette solution mène à une impasse.

B/ TESTS THERMIQUES

Le bureau TRIBU réalise des mesures thermiques sur le prototype. Un capteur de température est placé à l'intérieur du logement et un à l'extérieur, en période d'hiver, pour mesurer la capacité d'isolation des parois. Ces mesures sont à nuancer avec l'usage du chauffage à cette période et les prototypes de menuiseries non installés. Le bureau les complète par des mesures de températures de surfaces réalisées à plusieurs endroits du panneau. Ces mesures permettent 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. De premières mesures sont réalisées le 6 novembre 2020 entre 9h et 10h. Ce matin-là, la température d'air extérieure est assez douce avec 11,4°C, ce qui rend difficile l'analyse des mesures réalisées. La température de surface extérieure des panneaux est de 5,4°C et la caméra thermique permet d'identifier des ponts 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 est d'environ 18°C. Les températures de surface mesurées sur le prototype sont récapitulées dans le schéma ci-dessous. 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 remarque cependant une différence de 10°C entre la température de paroi intérieure et celle mesurée à l'extérieur, signe de l'impact positif du doublage



Températures de surfaces du prototype de la solution 1
TRIBU, 2020

Murs / Températures	Tp. 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

Tableau comparatif des températures de surfaces
TRIBU, 2020

par l'intérieur. Les températures extérieures étant trop douces lors de la prise de mesure, il est difficile d'affirmer l'efficacité du prototype. L'équipe décide de reprogrammer des mesures le 22 décembre 2020 à 8h pour obtenir des températures extérieures plus fraîches. Malheureusement, malgré les prédictions météorologiques la journée fut encore douce avec une température extérieure de 10,3°C. L'équipe réalise quand même les mesures sur le prototype et les compare avec des mesures réalisées sur le panneau de cuisine qui ne dispose pas de prototype. 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.

Plusieurs éléments ont modifié les mesures comme la faible différence entre la température intérieur du logement et la température extérieur, du à un climat doux, et la discontinuité de l'enveloppe thermique causée par le manque d'amélioration au niveau des fenêtres. L'équipe devra effectuer ces mesures à nouveau 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 l'utilité du doublage de la façade et de l'amélioration des performances de la fenêtre.

C/ TESTS ACOUSTIQUES

Comme énoncé précédemment, la menuiserie n'a pas pu être réalisée. L'hypothèse pourra d'ailleurs difficilement aboutir compte tenu des contraintes techniques évoquées précédemment. Néanmoins, le bureau d'études LASA a tout de même modélisé le comportement de la menuiserie étudiée. Seules les parties pleines du panneau, composées d'une ossature bois et d'un isolant fibre de bois de 10 cm, couverts d'une deuxième couche de fibre de bois de 4,5 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 dB¹, légèrement inférieure à la solution dotée de Fermacell. Pour l'heure, le prototype avec la menuiserie d'origine dispose d'un isolement de 31 dB² soit 6 dB de plus que l'hypothèse précédente. Cet écart s'explique par une meilleure isolation entre la paroi d'origine et la paroi pleine du prototype grâce à l'ouverture créée dans le panneau qui épouse parfaitement les limites de la fenêtre d'origine, réduisant ainsi les ponts phoniques. Cet isolement permet de s'approcher du seuil d'isolement fixé à 32 dB par le LASA pour permettre le confort des occupants. Comme pour le prototype précédent, sans avoir installé la menuiserie, il est difficile d'appréhender la capacité d'affaiblissement acoustique globale avec la menuiserie réhabilitée, qui est fonction des 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 nécessaires entrées d'air de 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 ne pas dégrader les performances des vitrages. L'équipe devra être particulièrement attentive à tous les jointoiements entre le nouveau doublage, l'existant et les menuiseries.

1. L'affaiblissement est la valeur R_w+C_{tr} modélisée.
2. Valeur d'isolement réelle *in situ* $D_{nta,tr}$.

D/ RETOURS DES HABITANTS, DU CONSEIL SCIENTIFIQUE ET DE L'ABF SUR LE PROTOTYPE

Sur ce prototype, les habitants estiment l'épaisseur du doublage trop importante. Ils évaluent l'emprise de ce doublage sur la surface intérieure de leur logement et estiment qu'elle est trop importante. Il convient de réfléchir à réduire cette épaisseur, soit en abaissant la performance recherchée au regard des bonnes performances atteintes, soit en optant pour un isolant plus fin, au risque d'avoir recours à des matériaux moins respectueux de l'environnement.

Ensuite, en comparant les stores toiles avec ceux du prototype de la solution 2, ils constatent qu'ils offrent moins de configurations différentes 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 avec les habitants, mais doit 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. Sur ce prototype, les habitants apprécient particulièrement le cadre en bois du doublage, aux angles arrondis, qui souligne la menuiserie existante de Jean Prouvé. Ils aimeraient retrouver ce cadre dans l'hypothèse 2, double-façade. Ce sentiment est également partagé par le conseil scientifique et l'Architecte des Bâtiments de France lors de leur visite des prototypes. L'équipe travaille donc à adapter l'hypothèse double façade en insérant les angles droits et les montants périphériques de la double fenêtre dans le doublage pour ne rendre visible que le cadre bois aux angles arrondis depuis l'intérieur. Cette nouvelle disposition n'aurait pu émerger sans l'observation des prototypes dans un appartement de l'immeuble.

E/ DIMENSION ÉCONOMIQUE

Cette option a été chiffrée par le cabinet Denizou qui estime un budget de 507 000 € HT pour la restauration de l'ensemble des fenêtres nord et sud en double-vitrage. Ce montant reste à nuancer, les fabricants ne pouvant réaliser les cintrages demandés, les contraintes techniques peuvent amener à des coûts supérieurs qui n'ont pu être évalués. Il est nécessaire d'ajouter 424 000 € HT pour l'isolation thermique en fibre de bois de 14,5 cm pour l'ensemble des panneaux nord et sud, 32 000€ HT d'isolant phonique Knauf Contrapanel et 53 000 € HT de store toile intérieur manuel installés uniquement au sud. Pour motoriser les stores il faut ajouter une plus value de 36 000 € HT. Ce qui fait un budget global de 1 016 000 € HT avec des stores manuel et 1 052 000 € HT pour des stores à commande électrique. Pour donner un ordre d'idée plus appréciable, le coût des travaux pour un appartement T4 avec des stores manuels serait de 16 935 € HT ; 14 260 € HT pour un T3 ; 19 610 € HT pour un T5 avec une loggia ; 22 580 € HT pour un T5 avec une double loggia ; 16 640 € HT pour un T5 sans loggia ; 25 550 € HT pour un T6 et 5 940 € HT pour un studio.

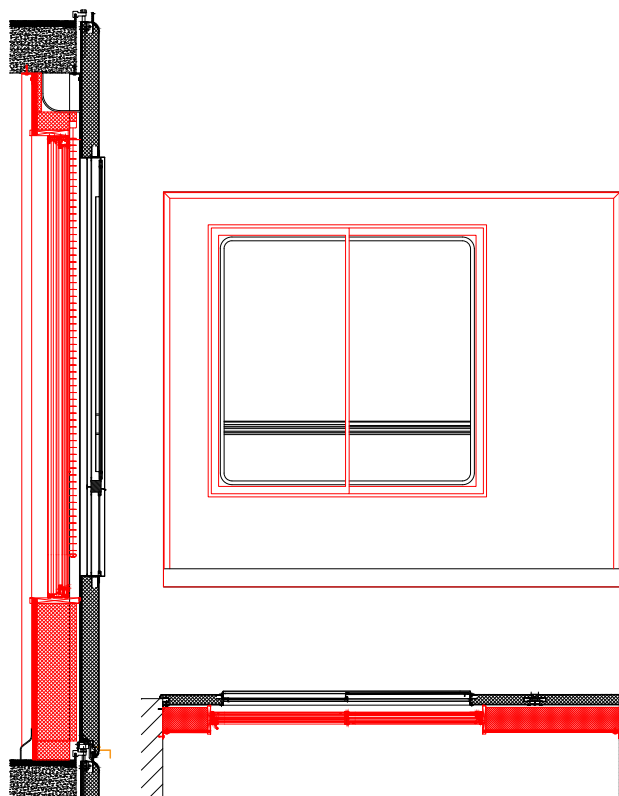
Comme pour l'hypothèse précédente, l'équipe envisage la dépose des couvre-joints verticaux et bavettes horizontales pour retrouver l'aspect d'origine de la façade, ainsi que le nettoyage des panneaux et la réfection de l'étanchéité de la façade. Ces travaux de remise en état sont estimés à 140 000 € HT à répartir au tantième sur le budget de la copropriété.

III. PROTOTYPE DE LA SOLUTION 2 : CHARTRE DE VENISE, DOUBLE FAÇADE

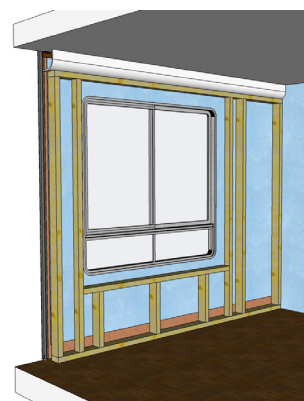
A/ MISE EN OEUVRE

Sur le prototype de la solution 2, nous avons souhaité tester une autre méthode de mise en œuvre. L'ossature bois est composée de montants de sections 10*4,5 cm entre lesquels s'insère un isolant fibre de bois de 10 cm. Au-devant de ceux-ci, une membrane hygro-régulable est mise en place, puis une deuxième couche d'isolant fibre de bois de 4 cm rigide est appliquée. Ainsi, on pense réduire les ponts thermiques dus aux ossatures et protéger la membrane hygro-régulable des percements éventuels exercés par les habitants en cas de fixation d'éléments au mur. La seconde couche d'isolant est rigide afin que la fixation des panneaux de Fermacell aux ossatures bois ne l'écrase pas. En effet, sur ce prototype nous avons choisi de réaliser une isolation acoustique et une finition différente en optant pour des panneaux de Fermacell de 12,5 mm qui sont ensuite ratissés et peints. René Ferré de l'entreprise Fermacell nous a fait le plaisir de venir poser lui-même les plaques le mardi 28 janvier 2020 en nous expliquant la mise en œuvre du produit.

Un store vénitien intermédiaire, prévu pour s'insérer entre la fenêtre d'origine et la nouvelle menuiserie de la double façade est ajouté au prototype. il est en bois pour privilégier les matériaux biosourcés. Ses lames sont claires pour renvoyer le plus possible les rayonnements solaires. Concernant la menuiserie, nous avons pris le temps de chercher un modèle dont les profils seraient les plus fins possibles et n'impacteraient pas la vision des panneaux. Nous avons trouvé des modèles intéressants en aluminium et acier mais les fabricants n'ont pas encore pu nous mettre un prototype à disposition. Nous souhaitons également explorer une piste avec une double-fenêtre en bois réalisée en partenariat avec les Compagnons menuisiers de Villefontaine. Les périodes de confinement ont retardé les partenariats en cours concernant les menuiseries et celles-ci n'ont pas pu être posées sur les prototypes.



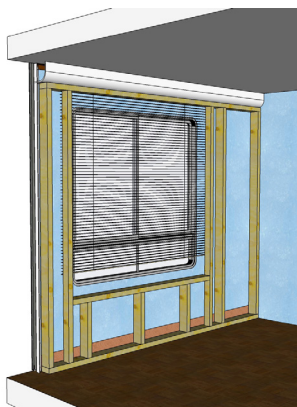
Plan, coupe et élévation du prototype 2
Mathilde Padilla, 2019



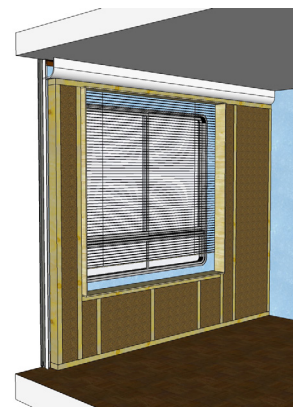
Ossature du prototype 2
© Eddy Giroux, Compagnons du Devoir, novembre 2019



Montage du store du prototype 2
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Pose de la première couche d'isolant et du frein vapeur
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020





Pose de la deuxième couche d'isolant fibre de bois
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



Pose du Fermacell sur le prototype 2
© Mathilde Padilla, 25 janvier 2020

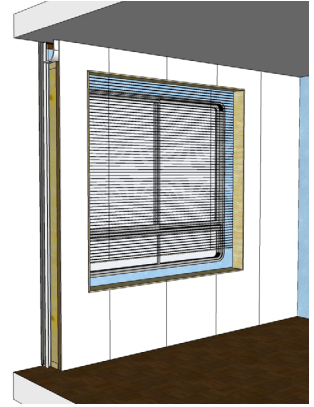


Photo de la loge avant pose du prototype 2
Cl. Mathilde Padilla, 25 janvier 2020



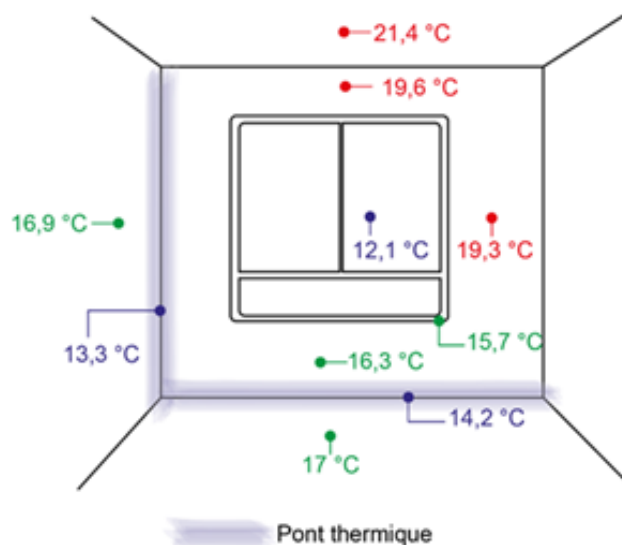
Photo de la loge après pose du prototype 2 (avant pose du Fermacell)
Cl. Sabine Serrad, 25 janvier 2020



L'entreprise Fermacell en action sur le prototype 2
Cl. Sabine Serrad, 28 janvier 2020

B/ TESTS THERMIQUES

Les mesures réalisées par le bureau TRIBU sont effectuées dans le même contexte que celles du prototype précédent, avec des capteurs identiques. Les résultats obtenus sont relativement similaires à ceux du prototype précédent ce qui montre le peu d'incidence de diviser l'isolant en deux couches distinctes. En revanche, comme pour le prototype précédent, les mesures ont été réalisées par des températures extérieures trop douces ce qui ne permet pas de révéler la réelle efficacité du prototype. D'autant plus que les menuiseries n'ont pu être installées. On note tout de même une amélioration par rapport à une paroi non isolée et les simulations thermiques dynamiques réalisées par le bureau TRIBU montrent l'efficacité d'une double façade pour la thermique d'hiver.



Températures de surfaces du prototype de la solution 2
TRIBU, 2020

Murs / Températures	Tp. 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

Tableau comparatif des températures de surfaces
TRIBU, 2020

C/ TESTS ACOUSTIQUES

Le prototype n'ayant pu être finalisé au niveau des menuiseries, le bureau d'études LASA a réalisé une modélisation de son comportement acoustique. Les parties pleines du panneau intérieur, composées d'une ossature bois, d'un isolant fibre de bois de 14,5 cm et d'une plaque de Fermacell, permettent d'atteindre un affaiblissement acoustique de 56 dB³. Concernant la menuiserie, l'objectif d'isolement global de la paroi fixé par le LASA lors des diagnostics est de 32 dB⁴. 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 dB⁵, soit seulement 6 dB de plus que le panneau d'origine. Cet isolement 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 dB⁶. Dans ce cas, même en considérant les possibles fuites d'air évoquées précédemment, il semble que le niveau d'isolement acoustique de 32 dB fenêtre 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. Ces hypothèses ont pu être vérifiées par des tests sur la double fenêtre d'une habitante de l'immeuble.

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

4. L'isolement est une valeur d'isolement réelle *in situ* $D_{nta,tr}$.

5. Valeur d'isolement réelle *in situ* $D_{nta,tr}$.

6. Valeur d'isolement réelle *in situ* $D_{nta,tr}$.

D/ RETOURS DES HABITANTS, DU CONSEIL SCIENTIFIQUE ET DE L'ABF SUR LE PROTOTYPE

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. Des habitants ont apprécié le store à lames orientables permettant une occultation complète comme le passage total de la lumière. D'autres enfin trouvent ces systèmes difficiles à manipuler. Pour recueillir les avis de l'ensemble des habitants de manière plus objective, l'équipe avait 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 premiers commentaires des habitants ont permis au conseil scientifique 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 ». Pour réduire l'épaisseur du doublage, deux possibilités s'offrent à l'équipe. La première consiste à réduire la performance de celui-ci qui est assez élevé 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 cette baisse de performance n'engendre pas la perte d'une subvention qui pourrait aider les copropriétaires à financer leur projet, auquel cas la perte de surface doit être évaluée face à la perte de cette subvention. L'autre option consiste à remplacer l'isolant biosourcé par un autre isolant plus mince à performances égales tel que le polystyrène qui aura le même niveau de performance 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 mais aussi économiquement. En effet, certaines subventions peuvent également dépendre de l'emploi de matériau biosourcé. Ces éléments sont à considérer avant toutes prises de décisions et doivent faire l'objet de discussions avec les copropriétaires et l'économiste du projet.

E/ DIMENSION ÉCONOMIQUE

Concernant cette solution, le cabinet Denizou a réalisé le chiffrage de deux variantes : l'une d'elle consiste à ajouter une double façade et double fenêtre intérieure en conservant la façade existante dans son état actuel, la seconde consiste à ajouter la double façade et la double fenêtre tout en restaurant la façade existante dans son état d'origine, en refabriquant les menuiseries Prouvé simple vitrage ayant été remplacées par les habitants. La première variante sera nommée A et la seconde B pour la suite du développement.

Le coût total de la variante A pour les façades nord et sud s'élève à 870 000 € HT comprenant : l'isolation intérieure des façades nord et sud avec 14,5 cm de fibre de bois (424 000 € HT), la pose d'une double fenêtre intérieure coulissante en aluminium sur tous les panneaux (337 000 € HT), la pose de stores motorisés entre les deux fenêtres en façade sud (89 000 € HT), et la pose d'une finition intérieure Fermacell permettant de renforcer l'isolation acoustique (20 000 €). La pose de doubles fenêtres bois, plutôt qu'aluminium, impliquerait une moins value de 68 000 € HT à ne pas négliger. Cette variante est environ 200 000 € HT à 250 000 € HT moins onéreuse que la solution 1.

Pour la variante B, une plus value de 439 000 € HT est estimée afin de refabriquer les menuiseries Prouvé disparue et redonner à l'immeuble toute sa superbe d'origine, ce qui porterait le coût total des travaux à 1 309 000 € HT pour des doubles fenêtres en aluminium et 1 241 000 € HT pour des doubles fenêtres en bois, soit environ 200 000 à 250 000 € HT de plus que l'estimation de la solution 1. Ces 439 000 € HT serait répartis au tantième sur le budget de la copropriété.

Le coût par typologie d'appartement de la variante A avec double fenêtre en bois s'élève à 13 367 € HT pour un T4 (+1 133,40 € HT pour des fenêtres aluminium) ; 11 387 € HT pour un T3 (+944,50 € HT pour des fenêtres aluminium) ; 15 347,50 € HT pour un T5 avec une loggia (+1 322,30 € HT pour des fenêtres aluminium) ; 17 823 € HT pour un T5 avec une double loggia (+1 511 € HT pour des fenêtres aluminium) ; 12 872,50 € HT pour un T5 sans loggia (+1 133,40 € HT pour des fenêtres aluminium) ; 20 298 € HT pour un T6 (+ 1 700 € HT pour des fenêtres aluminium) et 4 950 € HT pour un studio (+377,80 € HT pour des fenêtres aluminium).

Comme pour les hypothèses précédentes, l'équipe envisage la dépose des couvre-joints verticaux et bavettes horizontales pour retrouver l'aspect d'origine de la façade, ainsi que le nettoyage des panneaux et la réfection de l'étanchéité de la façade. Ces travaux de remise en état sont estimés à 140 000 € HT à répartir au tantième sur le budget de la copropriété.

IV. PROTOTYPE DE RIDEAUX ACOUSTIQUES

A/ MISE EN OEUVRE

Sur le prototype de rideaux acoustiques, nous avons pour objectif de tester les performances des rideaux et de voir quel confort acoustique ils étaient en mesure d'apporter aux habitants à moindre coût et avec une intervention minimale. Ces rideaux, souvent assez lourds et épais, permettent à la fois d'apporter une capacité d'isolation supplémentaire à la façade légère, 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, l'équipe s'intéresse également aux rideaux acoustiques issus du 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. Ils présentent l'avantage d'être de simples équipements à ajouter à l'intérieur des logements sans avoir à modifier les panneaux. Comme les interventions sur les menuiseries semblent complexes, bien que nécessaires, ces rideaux acoustiques pourraient constituer des solutions plus immédiates pour améliorer le confort des occupants.

Dans un premier temps, l'équipe choisit de tester les rideaux phoniques, occultants et thermiques de la marque Moondream. 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. 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 latérales.

L'équipe se rapproche ensuite de l'entreprise Showtex spécialisée dans les textiles phoniques de scène et choisit de tester deux types de rideaux, un rideau multicouches 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'insère 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 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 intérieure. Les quatre couches de ces rideaux doivent leur permettre d'atteindre des performances supérieures aux rideaux Moondream.

Enfin, le second rideau Showtex est le Kiloserge (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 intérieur.



Prototype du rideau Moondream
© Mathilde Padilla, 2020



Prototype du rideau multicouches Showtex
© Mathilde Padilla, 2020



Prototype du rideau Kiloserge Showtex
© Mathilde Padilla, 2020

B/ TESTS THERMIQUES

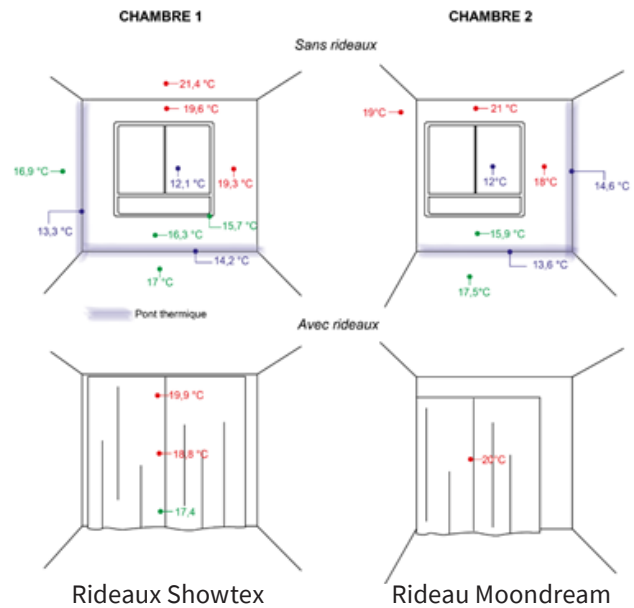
Ces rideaux disposent de tissus isolants. L'équipe s'interroge alors des performances thermiques de ces textiles spéciaux et décide de les mesurer. Le bureau TRIBU réeffectue donc les mesures réalisées sur les deux prototypes de doublage une fois les rideaux installés pour constater d'une éventuelle 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.

C/ TESTS ACOUSTIQUES

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 configurations⁷ sur l'indice DnTA, tr⁸. 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 DnTA, tr. En très 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

7. Douze configurations ont été testées. Elles sont détaillées dans le rapport du LASA disponible en annexe 16.

8. Mesure normalisée (Le DnTw 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 Ctr 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 isolements de façade.



Températures de surfaces du prototype de rideaux
TRIBU, 2020

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.

D/ RETOURS DES HABITANTS SUR LE PROTOTYPE

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 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 envisagées. 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 occultants qui permettraient d'améliorer le confort nocturne des occupants.

E/ DIMENSION ÉCONOMIQUE

Les stores Moondream et leur tringle sont les moins onéreux. Le coût par panneau ou fenêtre à équiper est de 223 € HT contre 1 245 € HT pour les rideaux multicouches Showtex et 445 € HT pour le rideau Kiloserge Showtex. Le rideau multicouches Showtex représente un coût relativement élevé en comparaison du coût d'une double fenêtre bois de la solution 2. En revanche, les deux autres solutions restent très abordables.



CONCLUSION

I. RAPPEL DES QUESTIONS ET DES OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

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 copropriété⁹ ?

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'équipe émettait l'hypothèse 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 région lors de la seconde moitié du XXe siècle souffrent aussi de stratégies drastiques d'amélioration thermique sans évaluation des dégradations du confort lumineux, sonore et du flux ventilant qui en résultent¹⁰. De ce qui précède découle notre objectif : fabriquer un guide de diagnostic et d'intervention 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.

Que dit ce guide ?

A/ QU'IL EST POSSIBLE D'AMÉLIORER UN BÂTIMENT PAR DES PRATIQUES EXPÉRIMENTALES CRITIQUES DE L'EXISTANT

Le guide présenté offre une méthode d'analyse de la qualité architecturale, constructive et ambiante d'un bâtiment qui prétend répondre à cet objectif. On soulignera qu'il 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 réglementations à respecter, mais qu'il oblige à prendre en compte d'autres dimensions, comme celles du vécu des habitants, du potentiel économique des copropriétaires et de l'écoresponsabilité dans la mise en œuvre, des aspects qui sont habituellement ignorés au moment de la réhabilitation des logements construits après la seconde guerre mondiale.

Il met également en avant la plus-value d'un travail de collaboration pluridisciplinaire, essentiel pour développer un projet de cette complexité. Cette collaboration pluridisciplinaire a permis la réinterrogation nécessaire de l'ingénierie énergétique, acoustique et environnementale, de la démarche patrimoniale, comme du développement architectural, dans les méthodes de travail. Elle a également permis d'échanger sur les solutions architecturales à mettre en œuvre pour répondre aux enjeux soulevés par chacune des disciplines ainsi qu'aux besoins des habitants. Le détail de la mise en œuvre des trois outils proposés que sont le diagnostic architectural, le diagnostic ambiantal et la pratique expérimentale « critique » constitue à ce titre une méthode de référence :

Pour toute étude locale portant sur les questions de transformation des existants :

Le guide proposé apparaît en effet comme un précédent important aux pratiques classiques dans les agences (commande, analyse, conception, concertation des entreprises, évaluation économique, chantier sur l'ensemble du bâtiment). Là où cette pratique repère, par exemple, des points environnementaux et patrimoniaux « obligés » à traiter généralement « à grands frais », la méthode proposée ici consiste à ce que les concepteurs repèrent des points d'expérimentation « critiques » capables de traiter des formes de résistance à ce que le bâtiment construit impose aux habitants, depuis longtemps ou récemment, entraînant des coûts de chantier à venir moindre (le changement climatique qui s'annonce, déjà présent dans l'existence, peut être anticipée aujourd'hui pour demain).

9. 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 privative. 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.

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

Pour toute analyse comparative entre des bâtiments de logements de natures constructives différentes :

Les résultats obtenus à ce jour montrent en effet à la fois la fiabilité de la méthode, sa souplesse, ainsi que son applicabilité à une transformation co-construite. Ceci en fait un outil méthodologique qui peut servir de point de départ à une démarche comparative européenne. La méthode proposée ici permet de dégager une image différentielle de l'approche Suisse du laboratoire TSAM (EPFL), par exemple.

B/ QU'IL EST POSSIBLE DE PROMOUVOIR OU RENFORCER LE POTENTIEL D'UNE FAÇADE LÉGÈRE EN LUI AJOUTANT DES USAGES PLUTÔT QUE DES FONCTIONS

Suivant cette idée, le guide propose une démarche de conception/expérimentation synergique appliquée à l'architecture existante, rendant les concepteurs plus performants. Il n'aboutit pas seulement à la restauration de la façade pour retrouver celle de 1961, ou seulement à une mise aux normes thermiques du bâtiment. Il propose des expérimentations et des expériences, toujours réactualisables, complémentaires à ces deux attitudes, et opératoires.

Car on ne peut pas avoir seulement une attitude architecturale « défensive » qui consiste à protéger la façade originale des diverses « pollutions » qu'elle a pu subir. Ces transformations (isolation par l'intérieur, ajout de stores, remplacement des menuiseries, dispositifs d'étanchéité, etc.) sont le reflet des imperfections de la façade originelle, de l'évolution des besoins des habitants, des inconforts générés par la façade et de ses altérations au fil du temps¹¹. On ne peut non plus adopter une attitude sociologique « offensive » destinée à conforter un cadre de vie théorique dans le logement, car c'est à l'habitant ordinaire qu'il s'agit de redonner les moyens de se « réapproprier » son milieu de vie. Ainsi, la sensibilisation des habitants ne doit pas se faire sur la normalisation de la construction, mais sur la difficile gestion des voisinages, le réchauffement climatique, la valorisation du patrimoine bâti, la préservation des ressources, l'usage des matériaux biosourcés, etc.

11. La façade Prouvé a, par exemple, été rapidement modifiée par les architectes du projet eux-mêmes. En effet, Marcel Dallièr, chef d'agence de François-Régis Cottin qui a participé à la conception de l'immeuble nous a fait part de son expérience. Il achète un appartement au quatrième étage de la résidence et s'y installe avec sa famille. Dès le premier hiver, il décide d'isoler ses panneaux de façade côté nord par l'intérieur, le froid étant insoutenable dans les chambres. En 1978, c'est Cottin qui installe son agence dans un appartement de l'immeuble, qu'il partage avec Paul Bouteille, autre architecte lyonnais. Sans que cette information ait pu être vérifiée, une habitante de l'immeuble nous a indiqué qu'il avait également isolé les panneaux de façades.

Et concernant les concepteurs, écoutons cette réflexion de Bruno Reichlin¹² : Prouvé était « [...] convaincu comme Taine (qui l'avait théorisé) que l'architecture est surtout un art collectif, et comme Julien Guadet que c'est « l'expression d'un état social, parce qu'au-delà des programmes particuliers il y a le programme des programmes, la civilisation de chaque siècle »... » Cette pensée sur la conception synergique appliquée à l'architecture trouve un de ses socles sur le sujet de la façade légère, sur la double, triple, quadruple fonction que la façade du 44 rue de la Favorite pourra remplir en anticipant 2050.

Les expérimentations *in situ* à l'échelle 1 : 1, qui ont permis de calculer les performances à atteindre et leur coût, seront présentées comme suit aux habitants.

II. LES SOLUTIONS CHOISIES POUR LA RÉHABILITATION DE L'IMMEUBLE LES CÈDRES

L'analyse des prototypes d'un point de vue technique et économique permet de rendre compte des possibilités qui s'offrent aux copropriétaires de l'immeuble Les Cèdres pour le réhabiliter. A priori nombreuses, les solutions ont vite été restreintes par les contraintes techniques, patrimoniales, environnementales et réglementaires. Le statut de l'immeuble en copropriété n'a pas non plus facilité les prises de décisions, les propositions de projet devant à la fois répondre aux besoins de chacun et correspondre aux différents budgets. C'est d'ailleurs la particularité de cette étude que de s'intéresser à la réhabilitation d'un édifice labellisé patrimoine du XXe siècle, en copropriété avec des moyens modestes. Nous pouvons constater dans les estimatifs transmis¹³ que toutes les interventions nécessaires pour la réhabilitation de l'immeuble peuvent impliquer, au final, des budgets relativement conséquents. Il est donc primordial de prioriser les interventions au regard des besoins et caractéristiques de l'immeuble, mais également des critères d'obtention de subventions qui peuvent profiter aux copropriétaires. Cette partie va exposer l'équilibre architectural, patrimonial, ambiantal, technique et financier que nous envisageons présenter au syndicat de copropriété et aux habitants.

12. Introduction du catalogue réalisé par le Vitra Design Muséum, 1ère édition 2006, p.20-21 : Jean Prouvé, la poétique de l'objet technique

13. Voir les tableaux du montage financier pages 92 à 100.

A/ LE CONFORT D'ÉTÉ, UNE PRIORITÉ ACTUELLE

L'étude a mis en évidence le caractère patrimonial de la résidence Les Cèdres, mais elle a également 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 de l'immeuble, dont les séjours sont, rappelons-le, orientés plein sud, devient insupportable pour la quasi-totalité des copropriétaires, comme ils ont pu nous en faire part lors des entretiens de diagnostic. En prenant en compte le réchauffement climatique actuel qui, s'il n'est pas freiné, amènera les températures estivales de Lyon en 2050 non loin des quarante degrés, voire quarante-deux en épisode caniculaire¹⁴, résoudre les problématiques de confort d'été devient une priorité et un investissement nécessaire sur le long terme.

La protection solaire

La première intervention à envisager pour améliorer le confort d'été est la protection solaire. En protégeant la façade des rayonnements solaires, les températures de surfaces de celles-ci s'en voient réduites ainsi que la température d'air du logement, le rendant plus confortable. Nous avons envisagé plusieurs solutions de protections solaires, 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 jeunes enfants, à l'augmentation des températures et de la fréquence des épisodes caniculaires, nous estimons que seule une protection solaire extérieure peut apporter une solution durable. En effet, les stores intérieurs ont déjà prouvé leur insuffisance chez de nombreux copropriétaires déjà équipés de ces dispositifs. Le store intermédiaire peut être acceptable, sur la solution double fenêtre, puisqu'il permet de protéger le vitrage isolé. En revanche, il ne protège aucunement les parties pleines des panneaux, ne diminuant pas leur rayonnement de chaleur particulièrement désagréable pour l'usager qui s'appuie ou se penche à sa fenêtre ouverte. Il ne protège pas non plus la fenêtre extérieure, offrant la possibilité au soleil de chauffer l'espace entre les deux-fenêtres, pouvant engendrer une surchauffe importante. Pour une utilisation optimale, il serait nécessaire d'ouvrir la fenêtre extérieure pour ventiler l'interstice et éviter ce phénomène. Même si cette solution peut sembler acceptable aujourd'hui, elle deviendra insuffisante sur le long terme compte tenu du réchauffement climatique attendu. Pour ces raisons, nous conseillons aux

copropriétaires de l'immeuble Les Cèdres, d'investir dès à présent dans la solution de store extérieur. Par cet investissement, les copropriétaires assurent leur confort estival pour l'avenir. De plus, la solution de store extérieur imaginée a un impact limité sur la qualité architecturale de l'immeuble en respectant sa valeur patrimoniale. Cette solution, qui coûte 5 133 € HT pour un T4¹⁵ et 273 000 € HT sur la réhabilitation totale de l'immeuble, dont le prix est compris entre 2 212 500 € HT et 2 280 500 € HT selon les options, ne permet pas, si elle est utilisée seule, d'obtenir des subventions de l'état, mais elle permet d'améliorer de 8,8°C la température globe (ressentie) des logements.

Les rideaux acoustiques, une hypothèse de solution à moindre coût pour assurer la ventilation naturelle et nocturne

La ventilation joue un rôle important dans le confort d'été et celle-ci est associée aux comportements des habitants. Pour rafraîchir les logements, la ventilation nocturne est indispensable. Elle permet d'évacuer l'air chaud accumulé dans le logement au cours de la journée et de faire entrer l'air frais extérieur nocturne dans le logement. En ouvrant les fenêtres au coucher du soleil, et en les refermant le matin au réveil tout en abaissant ces stores, les habitants assurent une ventilation nocturne idéale. Nous avons vu lors des diagnostics que bon nombre de résidents ne pratiquent pas de ventilation nocturne, trop gênés par les bruits extérieurs. Nous avons donc cherché à résoudre ce problème pour garantir le confort d'été des occupants. La première solution que nous avons envisagée consiste à équiper les fenêtres de l'immeuble de rideaux acoustiques intérieurs. Ces rideaux conçus pour isoler phoniquement et absorber les sons agiraient comme des barrières qui permettraient, en les positionnant en chicane selon l'ouverture de la fenêtre, ou en les fermant entièrement, de laisser passer l'air et de réduire les nuisances sonores. Ces rideaux permettent d'obscurcir les chambres la nuit, les façades ne disposant pas de volets. Lors de leur éventuelle utilisation en journée, ces rideaux permettent de gérer les bruits générés par la circulation automobile avec une réduction de 3 à 7 dB sur l'indice DnTA, tr selon leur degré d'ouverture. Opaques, ils permettent également de réguler la luminosité parfois éblouissante en façade sud. En revanche, ils nécessitent une certaine fermeture pour leur utilisation optimale qui a pu être jugée trop importante pour certains habitants qui souhaitent conserver l'intégralité des apports de lumière naturelle¹⁶.

14. Températures établies sur la base du rapport de Serge Planton, Météo-France, CNRM, « Le changement climatique : de la planète à la France » en date du 23 juin 2016.

15. Valeur estimée selon la répartition au nombre de fenêtres, elle pourra varier selon la répartition des tantièmes entre les copropriétaires.

16. Propos recueillis lors des enquêtes sur les prototypes installés dans la loge du gardien.

B/ L'AMÉLIORATION DE L'ISOLATION DES FAÇADES, UNE CONDITION POUR UN CONFORT THERMIQUE D'HIVER COMME D'ÉTÉ

Les façades légères manquent cruellement de capacité d'isolation. Bien qu'elles soient dotées d'une faible épaisseur d'isolant (environ 5 cm), 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 face au froid extérieur et de la réduction des déperditions de chauffage en hiver. L'immeuble Les Cèdres et ses panneaux sandwichs de 6 cm n'échappe pas à ce constat.

Isoler thermiquement les panneaux Prouvé par l'intérieur

Pour commencer, il est nécessaire d'isoler les parties pleines des panneaux Prouvé. Une multitude de types d'isolant existe, mais nous avons souhaité privilégier les isolants biosourcés, plus respectueux de l'environnement. En concertation avec les bureaux d'études, fabricants et compagnons, nous avons choisi la fibre de bois pour ses propriétés isolantes, sa résistance thermique et sa densité, ces critères pouvant également influencer sur le comportement acoustique des façades. L'épaisseur de 14,5 cm a été déterminée pour atteindre des performances globales satisfaisantes qui permettront de débloquer des subventions. Les habitants, après observation des prototypes, ont fait part de leurs inquiétudes quant à cette importante épaisseur qui va réduire la surface intérieure de leur logement. Ce point reste en discussion à l'heure actuelle, mais les propriétaires, qui pour certains ont déjà effectué des travaux en ce sens, semblent accepter une sur-paroi d'une dizaine de centimètres d'épaisseur au maximum. Il conviendrait de réduire l'épaisseur de la fibre de bois à 10 cm. Cela implique de s'assurer que la diminution de cette épaisseur ne risque pas de rendre la performance de la façade insuffisante pour le confort des habitants, mais aussi pour l'obtention des subventions. Auquel cas, cette réduction impliquerait donc de trouver un matériau qui permettrait de garantir des performances équivalentes aux 14,5 cm de fibre de bois, avec une épaisseur maximum de 10 cm. Nous savons que l'isolant polystyrène le permet, mais nous connaissons également l'impact carbone de ce matériau. Nous préférons opter pour l'isolant fibre de bois, plus responsable, même à une épaisseur moindre, et plus efficace acoustiquement. Nous pensons ainsi convaincre des copropriétaires qui pourraient se décider en faveur du polystyrène.

Améliorer les menuiseries et les vitrages

L'impasse de la fabrication d'une menuiserie « style Prouvé » en double vitrage

Concernant l'amélioration des menuiseries et des vitrages, le passage par le prototype a démontré l'impossibilité technique et financière actuelle de fabriquer des fenêtres double vitrage sur le modèle des fenêtres Prouvé originelles. Les contraintes techniques des fabricants ne permettent pas, à l'heure actuelle, de réaliser ce type de menuiseries, les DTU et normes obligeant des feuillures de vitrage plus importantes que l'épaisseur des profils Prouvé, et les rupteurs de ponts thermiques, nécessaires sur tout le pourtour des menuiseries, ne peuvent être cintrés dans le rayon des angles arrondis dessinés par Prouvé.

La double fenêtre

Face à cette contrainte technique et ne souhaitant pas dénaturer les façades en y apposant des fenêtres aux profils inadaptés, nous avons choisi de privilégier la solution de double fenêtre intérieure associée à la restauration des menuiseries d'origine encore en place. En revanche, certains habitants ayant déjà remplacé leurs menuiseries (seul 20% des fenêtres d'origine sont conservées à ce jour), la généralisation de cette solution pour l'ensemble des façades, dans le but de retrouver leur homogénéité d'origine, leur aspect « lisse », implique de refabriquer à l'identique les fenêtres Prouvé disparues. L'opération consisterait alors à fabriquer une menuiserie simple vitrage, pour retrouver le dessin initial de l'édifice, et à reporter les performances ambiantales sur la double-fenêtre intérieure.

Lors des enquêtes sur les prototypes, les habitants ont fait part de leur scepticisme à l'égard de cette solution qui leur donne l'impression de payer deux fenêtres pour tenir le rôle d'une seule. Néanmoins, en choisissant la solution double fenêtre, nous répondrons à la restauration patrimoniale de la façade, pour des gains thermiques similaires à une fenêtre double vitrage classique, et un avantage acoustique.

Cette solution implique cependant d'importants investissements (presque 80% des menuiseries Prouvé d'origine ayant disparues et devraient être refabriquées). Cela représente un budget sur l'ensemble de l'immeuble de 269 000 € HT pour une double fenêtre en bois, ou 337 000 € HT pour une double fenêtre en aluminium, auxquels s'ajoutent 439 000 € HT pour la restauration et la refabrication des menuiseries Prouvé d'origine, soit un total entre 708 000 € HT et 776 000 € HT. Pour un T4, cela représenterait un investissement entre 11 800 € HT et 12 900 € HT. Cet investissement est difficile à justifier auprès des copropriétaires, même s'il s'agit de la seule solution qui puisse permettre, à l'heure

actuelle, de retrouver l'aspect de la façade Jean Prouvé – sauf à imaginer que ce retour à l'image originelle de la façade puisse justifier d'éventuelles subventions du ministère de la culture comme il en existe pour les monuments historiques.

Isoler les pignons et la sous-face du 1er étage, un acte nécessaire pour éviter les ponts thermiques et obtenir des subventions

Bien que ce soit spécifiquement le sujet de notre étude, la réhabilitation de l'immeuble Les Cèdres ne peut se limiter à une intervention sur ces seules façades légères. L'amélioration du confort des occupants et des performances de l'immeuble nécessite d'intervenir à d'autres endroits.

Dans un premier temps l'isolation de la sous-face du plancher du premier étage doit être améliorée pour garantir le confort des occupants et réduire de 10% les besoins de chauffage, pour un budget global de 63 000 € HT. Ensuite, les pignons peuvent être isolés pour compléter l'isolation de l'enveloppe et éviter les ponts thermiques pour un coût de 64 000 € HT et une réduction des besoins de chauffage non négligeable de 23%. Ces interventions représentent des investissements importants pour les copropriétaires, mais sont absolument nécessaires pour réduire suffisamment les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble (-31 kWh/m²) afin d'obtenir des subventions¹⁷ et aider les propriétaires à réaliser leurs travaux. Concernant la toiture, les copropriétaires ayant récemment engagé des travaux pour refaire l'étanchéité et installer une faible isolation, il semble difficile de leur faire engager de nouvelles dépenses sur ce poste qui ne réduirait que de 5 kWh/m² les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble. Cette faible réduction rend sa réalisation non nécessaire pour obtenir le niveau BBC rénovation et les subventions qui y sont associées. 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 ces deux travaux d'isolation s'élèverait alors à 4 452 € HT.

C/ LES FAÇADES LÉGÈRES MANQUENT DE MASSE, AU DÉTRIMENT DE L'ISOLATION PHONIQUE

Par définition, les façades légères ont une masse faible. Pourtant, la masse est nécessaire à l'isolement

17. L'immeuble possède une consommation annuelle en énergie primaire de 171 kWh/m² dans son état actuel. Pour obtenir le label BBC Rénovation, qui déclenche un seuil de subvention important, ces consommations annuelles en énergie primaire doivent être inférieures à 96 kWh/m². Un seuil moins important de subvention est également déclenché lors d'une réduction de 35 % des consommations annuelles en énergie primaire (soit 111 kWh/m²).

acoustique d'une paroi face aux basses fréquences, majoritairement générées par la circulation des véhicules motorisés et principale nuisance à laquelle l'immeuble est soumis. Sur les conseils du bureau d'étude LASA, nous avons testé deux types de matériaux capables d'apporter une masse suffisante à la paroi avec une faible épaisseur : des panneaux de Fermacell ou Knauf contrapanel. Tous deux permettent de protéger les habitants des nuisances extérieures liées notamment à la circulation des véhicules. L'ajout de ces éléments sur l'intégralité de la surface intérieure des panneaux de façades permet également d'isoler les ponts phoniques aujourd'hui très présents au niveau des joints entre panneaux et des nez-de-structure, autorisant les sons à circuler du dehors vers le dedans, comme d'un appartement à l'autre. Il est en effet important de trouver un équilibre lors de l'isolation vers l'extérieur qui peut renforcer l'écoute des bruits intérieurs. En ajoutant un isolant phonique aux façades, nous avons vérifié les capacités d'isolement des séparatifs entre appartements superposés et juxtaposés. Ceux-ci permettent de conserver un isolement suffisant. En revanche, les gaines et conduits shunt peuvent présenter des potentiels de transmissions sonores à isoler pour garantir le confort des occupants. Après l'expérimentation des prototypes, nous avons choisi d'isoler les panneaux de façade avec des plaques de Fermacell, moins coûteux et plus facile à mettre en œuvre.

D/ METTRE À NIVEAU LES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE ET VENTILATION POUR UN PROJET GLOBAL

La performance énergétique d'un immeuble ne dépend pas uniquement de son enveloppe, elle peut aussi être améliorée grâce à l'optimisation de ces systèmes de chauffage et de ventilation. Il est d'ailleurs préférable de prévoir une amélioration conjointe des systèmes et de l'enveloppe, les besoins en chauffage et ventilation dépendant des caractéristiques et capacité des façades. Avec les conseils du bureau d'étude TRIBU, nous avons ciblé des interventions nécessaires au bon fonctionnement de l'immeuble : l'installation de ventilation hybride avec des assistances mécaniques pour l'extraction de la ventilation naturelle¹⁸, l'installation de thermostats individuels permettant à chacun de réguler son chauffage, le calorifugeage réseaux, le raccordement de l'eau chaude sanitaire à la chaudière et l'installation d'une chaudière gaz à condensation collective. Ces interventions sont

18. 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.

nécessaires pour le confort des occupants, comme pour l'obtention du label BBC rénovation en réduisant de 39 kWh/m² les consommations annuelles en énergie primaire de l'édifice, anticipant d'éventuelles futures obligations réglementaires, et ouvrant l'accès à des subventions supérieures. En revanche, ces travaux représentent un investissement important de 405 500 € HT soit 6 762 € HT sur le coût rapporté à un T4. Nous pouvons imaginer nous soustraire de ces travaux, hormis l'assistance à l'extraction de l'air vicié et la réfection des réseaux de ventilation naturelle, la ventilation étant nécessaire pour la santé des occupants comme du bâtiment et étant soumise à des obligations réglementaires. Cela réduirait de 5 000 € HT l'investissement d'un propriétaire de T4 par exemple, mais réduirait également la subvention de 1 500 € HT. La réduction du coût d'investissement obtenue en ne réalisant pas ces travaux est finalement de 3 500 € HT. Il revient aux propriétaires d'évaluer cette réduction des coûts au regard des consommations d'énergie supplémentaires (10 %) engendrées par ce choix. De plus, renoncer au réglage individuel du chauffage semble inadapté compte-tenu des différences de ressenti des occupants. L'équilibre reste à trouver sur ce point et dépend des copropriétaires. La répartition de l'investissement des copropriétaires pourrait se résoudre par un phasage, mais, dans ce cas, la subvention de départ sera minimale, celle-ci étant donnée en fonction de l'enveloppe globale de travaux. Nous préconisons aux copropriétaires de réaliser ces travaux de mise à niveau de manière globale, malgré l'investissement important que cela représente, afin d'obtenir les subventions nécessaires à la réalisation de leurs travaux de réhabilitation.

E/ LES SOLUTIONS POSSIBLES ET LEURS HYBRIDATIONS

Une solution « idéale » difficile à atteindre

La solution « idéale » consisterait à réaliser un doublage intérieur en fibre de bois de 14,5 cm, avec un isolant phonique Fermacell et une double fenêtre ; à restaurer ou refabriquer les menuiseries d'origine Prouvé ; à équiper les panneaux de stores extérieurs ; à réaliser l'isolation globale de l'enveloppe, comprenant sous-face de plancher, murs pignons et toiture ; et à réaliser l'ensemble des interventions sur les systèmes. Cette intervention permet de réduire de 67 % les consommations annuelles en énergie primaire de l'immeuble qui passent de 171 à 61 kWh/m², garantissant l'obtention des subventions liées au label BBC Rénovation ; d'atteindre l'ensemble des seuils de confort que nous avons fixé lors des diagnostics ; de conserver la matérialité des façades et de retrouver les

menuiseries Prouvé disparues. Son coût rapporté à un T4 est d'environ 36 900 € HT et 25 400 € HT après subvention Ecorenov' et programme « Habiter Mieux » de l'Anah.¹⁹

Une solution « équilibrée »

Partant de cette solution idéale, et après discussion avec les copropriétaires, une solution équilibrée peut être envisagée en s'affranchissant du remplacement de la chaudière, qui ne semble pas immédiatement nécessaire ; du raccord de la production d'eau chaude sanitaire à la chaudière collective, qui n'apporte pas de gain en confort ; et de l'isolation de la toiture, qui réduit peu les consommations d'énergie et a fait l'objet de travaux récents. Cette solution permet à la fois de répondre aux principaux besoins des copropriétaires (protection solaire extérieure et isolation thermique et phonique des panneaux Prouvé) et d'atteindre le label BBC Rénovation avec des consommations annuelles en énergie primaire de 92 kWh/m². Le coût pour un T4 est estimé à 31 500 € HT et 20 000 € HT après subventions Ecorenov' et programme « Habiter Mieux » de l'Anah.

Des solutions « hybrides », multi-usages

Il est également possible d'envisager des combinaisons entre les différentes solutions, comme installer des doubles fenêtres et restaurer celles d'origine uniquement sur la façade sud, la plus visible, qui pourrait donc être privilégiée d'un point de vue architectural et patrimonial ; et, pour la façade nord, installer des doubles fenêtres, uniquement sur les panneaux ayant des fenêtres d'origine conservées, et pour les autres, garder leurs fenêtres double vitrage actuelles pour le moment et installer un rideau acoustique. Cet hybride présente bien sûr un compromis qui n'est pas totalement satisfaisant d'un point de vue patrimonial et architectural, et il n'est 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.

19. Cette solution pourrait également être envisagée en s'affranchissant de l'isolation de la toiture qui a récemment fait l'objet de travaux à l'initiative des copropriétaires. Sa sur-isolation entraîne une réduction des consommations annuelles en énergie primaire de seulement 5 kWh/m², et s'en affranchir ne supprime donc pas la subvention générée par le label BBC Rénovation. Ainsi le coût pour un T4 est réduit à 35 500 € HT et 24 000 € HT après subventions Ecorenov' et programme « Habiter Mieux » de l'Anah.

III. MONTAGE FINANCIER, TRANSPOSABILITÉ ET MISE EN ŒUVRE

Notre travail de recherche donne de premiers résultats notamment sur la connaissance des façades légères de Jean Prouvé et plus largement sur cette technique de construction particulière. La méthodologie de diagnostics mise en place a 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. Nous pensons que cette méthodologie peut être transposée à d'autres immeubles dotés de façades légères afin d'amorcer la réhabilitation de ce parc de logement, dans le but de préparer la transition écologique de ces édifices, tout en conservant leur valeur patrimoniale.

Concernant nos expérimentations, celles-ci donnent également des résultats intéressants et les coûts des diverses solutions sont pour la plupart abordables. Certaines variantes et options entraînent des surcoûts qui doivent être évalués au regard de la valeur patrimoniale de l'immeuble, du gain de confort et de l'amélioration des performances de l'enveloppe.

Pour élaborer le projet le plus adapté à l'immeuble, nous poursuivons alors nos échanges avec les copropriétaires. Nous établissons, avec eux, un montage financier de l'opération. En partenariat avec la régie, le conseil syndical et l'association des habitants, nous cherchons des subventions permettant aux habitants de réaliser, in fine, la réhabilitation de leur immeuble. Dans cette dynamique, nous avons pris contact avec la commission Ecorenov' de la métropole du Grand Lyon afin d'inscrire la résidence comme candidate à de futurs travaux. Suite à un premier rendez-vous, les membres de la commission et l'architecte des bâtiments de France se sont rendus à l'immeuble pour observer les prototypes et commencer à appréhender le projet en vue de futurs financements. A cette occasion, les services de la DRAC et l'architecte des bâtiments de France ont validé la solution de stores extérieures proposée.

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 réalisation 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.



Prototype 1
Cl. Sabine Serrad, 28 janvier 2020



TABLEAUX DE MONTAGE FINANCIER

Estimation de la solution 1 : 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	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 €
STORES			
Store intermédiaire motorisé au sud - Option 1	0 %	- 0 kWh/m ²	89 000 €
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 €
Isolation des sous-faces du plancher du 1er étage par rapport aux caves, porche et coursive	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 €
SYSTÈMES			
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 1 : installation d'une double-façade

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
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 €	1 12 €	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 courseive	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

Estimation de la solution 2 : 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 €
	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 €
	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 €
	Isolation des sous-faces du plancher du 1er étage par rapport aux caves, porche et coursive	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 €
SYSTEMES	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 1 768 500 € et 2 023 500 € selon options

Estimation de la solution 2 : 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 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 €
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 €
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 1 768 500 € 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

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option jugée la meilleure («à la louche» les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
DOUBLE FAÇADE	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 €
RESTAURATION	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
STORES	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E G P	Enveloppe globale performante (étanchéité, iso sous face, iso pignons, iso toiture)	5 784 €
SYSTÈMES	Installation ventilation hybride + thermostats individuels + calorifugeage réseaux + chaudière gaz à condensation collective + raccord ECS à la chaudière	6 762 €
	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 €

+ 1 245 € HT / fenêtre pour rideau acoustique et ventilation chambre

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option sans l'isolation de la toiture («à la louche» les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
DOUBLE FAÇADE	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 €
RESTAURATION	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
STORES	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E G P	Enveloppe globale performante (étanchéité, iso sous face, iso pignons)	4 452 €
SYSTÈMES	Installation ventilation hybride + thermostats individuels + calorifugeage réseaux + chaudière gaz à condensation collective + raccord ECS à la chaudière	6 762 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	35 547 €
SUVENTIONS	Ecorenov' niveau BBC	3 500 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	24 047 €

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option sans l'isolation de la toiture, et sans le remplacement des chaudières et le raccord de la production d'ECS à la chaudière collective («à la louche» les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
DOUBLE FAÇADE	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 €
RESTAURATION	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
STORES	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E G P	Enveloppe globale performante (étanchéité, iso sous face, iso pignons)	4 452 €
SYSTEMES	Installation d'une ventilation hybride + calorifugeage réseaux + thermostats individuels	2 700 €
	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 sans l'isolation de la toiture, le remplacement des chaudières et le raccord de la production d'ECS à la chaudière collective et avec store intermédiaire plutôt qu'extérieur («à la louche» les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
DOUBLE FAÇADE	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 €
RESTAURATION	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
STORES	Stores intermédiaires entre fenêtres motorisés au sud	1 482 €
E G P	Enveloppe globale performante (étanchéité, iso sous face, iso pignons)	4 452 €
SYSTÈMES	Installation d'une ventilation hybride + calorifugeage réseaux + thermostats individuels	2 700 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	27 834 €
SUVENTIONS	Ecorenov' niveau BBC	3 500 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	16 334 €

Confort thermique d'été non idéal sans le store extérieur

Simulation pour un T4

Estimation globale de l'option avec store extérieur, sans l'isolation de la toiture, et sans les systèmes sauf la ventilation («à la louche» les tantièmes n'étant pas connus)

	Interventions	Coûts HT estimés pour un T4
DOUBLE FAÇADE	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 €
RESTAURATION	Restauration des fenêtres d'origine Prouvé + remplacement des fenêtres d'origine Prouvé disparues	7 314 €
STORES	Stores extérieurs motorisés au sud	5 133 €
E G P	Enveloppe globale performante (étanchéité, iso sous face, iso pignons)	4 452 €
SYSTEMES	Installation ventilation hybride	1 698 €
	Total de l'ensemble des interventions HT	30 483 €
SUVENTIONS	Ecorenov' réduction de plus de 35 % des Cep	2 000 €
	Programme «Habiter Mieux» de l'Anah ménage modeste + prime métropole	8 000 €
	Reste à charge HT	20 483 €

! Attention : le niveau BBC Rénovation ne sera peut être pas atteint avec cette option (Cep estimée à 100 kWh/m²) engendrant une réduction des subventions de 1 500 €.

Confort non idéal : pas de réglage individuel du chauffage



ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE

Jean Prouvé

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.

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, Volume 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.

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 Editions d'Art, 2012, 407 p.

Prodhon (Françoise-Claire), *Jean Prouvé, Volume 1*, Paris, Galerie Patrick Seguin, 2007, 216 p.

Prouvé (Jean), *Jean Prouvé par lui-même*, Paris, Editions 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.

Architecture du XXe siècle, connaissance et sauvegarde

CIMUR, *Techniques françaises des façades légères, Murs-rideaux et panneaux de façade*, Paris, Editions Eyrolles, 1965, 486 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 XXe siècle »*, Issy-les-Moulineaux, Beaux-Arts éditions, 2010, 96p.

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.

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

Le Corbusier, *La Charte d'Athènes*, Paris, Editions Points, 1971 (première publication : 1941)

Lemoine (Bertrand), *100 monuments du XXe siècle : patrimoine et architecture de la France*, Paris, France Loisirs, 2000

Lucan (Jacques), *Architecture en France (1940-2000), Histoire et théories*, Paris, Le Moniteur Editions, 2001, 375 p.

Monnier (Gérard), *L'architecture du XXe siècle, un patrimoine*, Paris, Canopé-CRDP de Créteil, 2004, 234 p.

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

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

Uyttenhove (Peter), *Beaudouin et Lods*, Paris, Editions du Patrimoine, 2012, 192 p.

Confort et ambiances en architecture

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

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.

Canetti (Elias), *La conscience des mots (1975)*, traduit de l'allemand par Roger Lewinter, Paris, Albin Michel, 1984, 336p.

Déribéré (Maurice), Chauvel (Pierrette), *Traité du bâtiment : l'éclairage naturel et artificiel dans le bâtiment*, Paris, Eyrolles, 1968

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 XXe 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.

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

Mallet-Stevens (Robert), « L'éclairage et l'architecture moderne », in *Lux, la revue de l'éclairage*, n°1, 1/1928, pp. 6-9

Olgay (Victor), *Design with climate*, Princeton, Princeton University Press, 1963

Picon (Antoine), *La ville, territoire des cyborgs*, Besançon, Les Editions 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.