



Bien rénover l'habitat en mâchefer

Guide pour la réhabilitation

Éléments de caractérisation
du pisé de mâchefer
en région lyonnaise
& stratégies d'intervention
sur le bâti

Bien rénover l'habitat en mâchefer

Guide pour la réhabilitation

Éléments de caractérisation
du pisé de mâchefer
en région lyonnaise
& stratégies d'intervention
sur le bâti



Détail de la façade bossagée
sur structure en maçonnerie
de mâchefer banché de l'Hôtel Balay,
9 place Puvis-de-Chavannes, Lyon 6,
Gaspard André architecte, 1892

La Direction Régionale des Affaires Culturelles est particulièrement heureuse de l'aboutissement de ce travail complet, partagé entre les acteurs de la filière. Elle souhaite remercier le Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement du Rhône et de la Métropole de Lyon qui a piloté cette démarche exceptionnelle avec nos soutiens technique et financier et grâce aux compétences de chacun des acteurs engagés.

L'architecture est une expression de la culture, la réhabilitation de l'existant est l'enjeu majeur afin de pouvoir répondre à nos préoccupations environnementales. Le mâchefer, matériau très répandu et mal connu est une composante essentielle des architectures de 1900 à 1945 de notre région (mais aussi des régions autrefois industrialisées). Cette étude nous permet de mieux comprendre sa place dans l'histoire culturelle, constructive et sociale de nos territoires. Elle renforce notre approche sensible au bâti existant indispensable à toute démarche sur le déjà-là.

À la reconnaissance des qualités intrinsèques de ce matériau et des architectures produites est liée absolument l'urgence de se doter de stratégies d'intervention efficaces. Sa diffusion apportera un éclairage nouveau et autorisera à construire ces démarches vertueuses en partenariat. Enfin, le mâchefer, de matériau mal aimé, devient matière à projets innovants !

Marc Drouet

Directeur régional des affaires culturelles
Auvergne-Rhône-Alpes (DRAC)

OBJECTIFS DU RAPPORT D'ÉTUDE

Le **CAUE Rhône Métropole** et le **Cerema** ont réuni leurs compétences pour livrer le présent rapport d'étude, avec un triple objectif :

- tout d'abord, à l'attention des maîtres d'ouvrage privés et publics, **aider au repérage et à la reconnaissance du bâti en mâchefer** ;
- à l'attention des professionnels ensuite, **livrer une caractérisation aussi complète que possible du matériau** (mécanique, hygrothermique, acoustique et physico-chimique) et **dresser un état de la connaissance de ses propriétés** afin d'objectiver le comportement des maçonneries en mâchefer ;
- pour tous, enfin : **proposer des stratégies d'intervention sur le parc de logements en mâchefer**, tant sur le plan architectural que thermique.

Ce travail capitalise les échanges menés au sein du groupe de travail sur le mâchefer mis en place par le CAUE Rhône Métropole en 2018. Il s'appuie également sur les résultats des mesures réalisées par les laboratoires du Cerema sur des échantillons de matériau. Sur cette base, il propose de guider la pratique de terrain, en éclairant les stratégies de réhabilitation. Enfin, il présente en annexe plusieurs retours d'expériences représentatifs de projets sur du logement collectif et de l'habitat individuel.

À noter qu'un document synthétique est édité en parallèle par le CAUE Rhône Métropole, à l'attention du grand public, dans sa collection "Guide technique – Outil de conseil".

LES AUTEURS

LE CAUE RHÔNE MÉTROPOLE

Constitué sous une forme associative, le Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement est un organisme indépendant issu de la Loi sur l'Architecture de 1977. Il est composé d'une équipe pluridisciplinaire d'architectes, d'urbanistes, de paysagistes au service des territoires chargés d'exercer des missions d'intérêt public dont l'objectif principal est celui de la promotion de la qualité du cadre de vie et l'amélioration de l'environnement bâti ou non bâti. Ses missions sont de conseiller les maîtres d'ouvrage publics et privés, les collectivités territoriales et les administrations publiques et les particuliers ; de former les professionnels et d'informer et de sensibiliser les publics.

Conformément à ses statuts, l'association est gouvernée par un Conseil d'Administration qui réunit des représentants des acteurs institutionnels, professionnels, consulaires et associatifs sous la présidence d'un élu local.

Gage de l'indépendance et de la neutralité de son action, les ressources de l'association proviennent d'une part affectée de la Taxe d'Aménagement.

LE CEREMA

Placé sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de la Cohésion des territoires, le Cerema est un établissement public de l'État à caractère administratif (EPA) créé en 2014. Il constitue, au plan national et territorial, un centre de ressources et d'expertises techniques et scientifiques en appui aux services de l'État et des collectivités locales. Sa spécificité repose sur sa capacité à faire le lien entre les administrations centrales, les services déconcentrés de l'État, les collectivités territoriales et l'ensemble des acteurs qui contribuent à la mise en œuvre des politiques publiques dans les champs de l'aménagement et du développement durable.

Fort de son potentiel de recherche pluridisciplinaire, de son expertise technique et de son savoir-faire transversal, le Cerema intervient notamment dans les domaines de l'aménagement, de l'habitat, de la ville et des bâtiments durables, des transports et de leurs infrastructures, de la mobilité, de la sécurité routière, de l'environnement, de la prévention des risques, de la mer, de l'énergie et du climat.



Cité HBM Dauphiné Lacassagne
27, rue du Dauphiné, Lyon 3
B. Guérin, architecte (1929),
Réhabilitation thermique - ASUR architectes (2020)

AVANT-PROPOS

Depuis l'avènement des politiques publiques destinées à répondre aux engagements internationaux, nationaux et locaux en matière d'adaptation de l'habitat au changement climatique, et l'intégration des enjeux d'amélioration thermique dans la réhabilitation des bâtiments, le parc des logements de la période 1945-1974 a concentré l'essentiel des efforts. En effet, ce dernier est apparu d'emblée comme le plus énergivore, mais aussi celui dont la mise en œuvre de solutions techniques réputées efficaces comme l'isolation thermique y est souvent moins contrainte par les questions d'ordre patrimonial.

Le parc d'avant 1945, en revanche, a fait l'objet d'approches plus contrastées. Relevant de modes constructifs, de matériaux et de techniques de construction pour la plupart disparus, ces édifices se révèlent en effet plus délicats à traiter.

Parmi eux, le bâti en mâchefer occupe une place à part. Caractérisé par une hétérogénéité qui le rend inaccessible à toute normalisation, ce matériau a été peu étudié et peu documenté au cours du XX^e siècle et nos connaissances apparaissent aujourd'hui pour beaucoup comme insuffisantes pour arbitrer des choix d'intervention pertinents sur ces ouvrages.

Le CAUE Rhône Métropole et le Cerema réparent aujourd'hui cette carence en donnant aux acteurs de terrain les moyens d'engager, tant sur le territoire de la Métropole de Lyon que de celui du département du Rhône, des projets de réhabilitation respectueux des propriétés de ce matériau et des qualités d'habitat et d'architecture qu'il offre à notre cadre de vie.

Frédéric Pronchéry

Président du Conseil d'Architecture, d'Urbanisme
et de l'Environnement Rhône Métropole (CAUE)



Portion de mur banché en maçonnerie de mâchefer, 2024,
© G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

QU'EST-CE QUE LE MÂCHEFER ?

Le terme, composé à partir des mots « mâche » indiquant l'action d'écraser et de « fer », apparaît dès le XIII^e siècle. Il désigne étymologiquement le broyat de pierre tiré de certains sols naturellement chargés en minerais de fer, notamment dans les horizons pédologiques composés de roches volcaniques aux propriétés dites « pozzolamiques », caractérisant leur capacité à réagir avec la chaux et l'eau pour former des composés cimentaires.

À la révolution industrielle, les laitiers cristallisés issus de la combustion de la houille sont qualifiés de « mâchefers » et introduits comme agrégats dans la confection de matériaux de construction.

À noter que ce terme désigne également les résidus solides recueillis à la base des incinérateurs assurant la combustion des déchets d'ordures ménagères. Cette acception spécifique du terme mâchefer ne concerne pas la présente étude.

PARTIE 1	APPRÉHENDER LES QUALITÉS DU BÂTI EN PISÉ DE MÂCHEFER	15
	Éléments de caractérisation en région lyonnaise	
1.	CARACTÉRISATION ARCHITECTURALE DU BÂTI	16
1.1.	HÉRITAGES ET IDENTITÉ DU MÂCHEFER DE CONSTRUCTION	16
1.2.	UN BÂTI ANCIEN DU XX ^e SIÈCLE	32
1.3.	DIMENSION PATRIMONIALE DU BÂTI EN MÂCHEFER	36
2.	CARACTÉRISATION PHYSIQUE DU MATÉRIAU	43
2.1.	CONTEXTE DE LA CAMPAGNE DE MESURES	43
2.2.	ASPECT ET COMPOSITION	46
2.3.	NATURE PHYSICO-CHEMIE ET TOXICITÉ	46
2.4.	CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET COMPORTEMENTS MÉCANIQUES	48
2.5.	CARACTÉRISTIQUES ET COMPORTEMENTS HYGROTHERMIQUES	51
2.6.	COMPORTEMENT À L'HUMIDITÉ	55
2.7.	CARACTÉRISTIQUES ET COMPORTEMENTS ACOUSTIQUES	58
PARTIE 2	AGIR SUR LE BÂTI EN PISÉ DE MÂCHEFER	63
	Stratégies d'intervention sur le bâti	
1.	COMPRENDRE AVANT D'AGIR	67
1.1.	LE DIAGNOSTIC PATRIMONIAL	67
1.2.	LE DIAGNOSTIC TECHNIQUE PRÉALABLE	68
1.3.	LE DIAGNOSTIC ÉNERGÉTIQUE	71
1.4.	LES PRINCIPALES PATHOLOGIES OBSERVÉES	75
2.	ENTREtenir LA FAÇADE	79
2.1.	LA GESTION DE L'HUMIDITÉ	79
2.2.	LES TRAVAUX DE RAVALEMENT	81

3. TRANSFORMER L'HABITAT EN MÂCHEFER	91
3.1. RECOMPOSER LA FAÇADE	91
3.2. AGRANDIR, RESTRUCTURER, AMÉLIORER	93
3.3. DÉCONSTRUIRE PARTIELLEMENT ET RÉEMPLOYER	95
4. OPTIMISER LES QUALITÉS THERMIQUES DE L'ENVELOPPE	97
4.1. ADOPTER UNE LOGIQUE PROPRE AU BÂTI ANCIEN	97
4.2. ISOLATION ET CONFORT THERMIQUE : TROUVER LE JUSTE ÉQUILIBRE	105
5. QUELLES STRATÉGIES D'INTERVENTION POUR L'AMÉLIORATION THERMIQUE DU BÂTI EN MÂCHEFER ?	122
5.1. RECHERCHER UN COMPROMIS PATRIMOINE/ÉNERGIE PAR L'EMPLOI DE SOLUTIONS MIXTES	122
5.2. LEVER LES FREINS LIÉS À L'EMPLOI DE TECHNIQUES NON COURANTES	125
5.3. DÉFINIR UN OPTIMUM ÉNERGÉTIQUE	126
5.4. REPLACER LE PROJET DANS UNE PERSPECTIVE DE MOINDRE EMPREINTE CARBONE	130
CONCLUSION	133
ANNEXES	137
BIBLIOGRAPHIE	180
TABLE DES MATIÈRES	182
REMERCIEMENTS	187



Habitat individuel, v. 1950-1956,
67, Bd des Castors, Lyon 5

PARTIE 1

APPRÉHENDER LES QUALITÉS DU BATI EN PISÉ DE MÂCHEFER

Éléments de caractérisation en région lyonnaise

La terminologie de « pisé de mâchefer » est celle que nous avons choisie pour qualifier le matériau de construction qui fait l'objet de cette étude. Cette appellation apparaît en effet comme la plus significative au regard de ses parentés avec le pisé de terre crue, à la fois en termes de mode constructif et de comportement hygrothermique, comme nous le verrons plus loin.

Nous pouvons néanmoins retrouver au fil des écrits et documents d'archives d'autres dénominations courantes pour qualifier ce matériau : « béton

de mâchefer », « béton moulé », « béton aggloméré », « béton Coignet », « béton isolant », etc. Il n'y a pas de fausse appellation. Le béton est la définition même de la mise en œuvre composite dont il résulte. Quant au qualificatif qui y est accolé, il mentionne tantôt le nom de son « inventeur » ou promoteur, tantôt l'un des composants de son mélange, tantôt de la technique associée à sa mise en œuvre ou sa propriété.

Les autres formes de mâchefer (brique, parpaings, blocs) sont de fait exclues de l'étude.



Brique en béton de mâchefer moulé, 2018, © P-A. Chabriac



Maçonnerie de pierre jointoyée au mortier de mâchefer sur un immeuble stéphanois, 2017, © P-A. Chabriac



Maçonnerie en pisé de mâchefer, 2024, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Parpaings en béton de mâchefer, 2018, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

1 CARACTÉRISATION ARCHITECTURALE DU BÂTI

À Lyon, le mâchefer est utilisé pendant près d'un siècle comme matériau de construction pour l'habitat. Depuis la seconde moitié du XIX^e siècle jusqu'à la fin des années 50, il est présent dans une part considérable d'opérations de logements. Plus largement, l'agglomération lyonnaise abrite sans doute l'un des plus grands contingents de constructions en pisé de mâchefer à l'échelle nationale, où ce matériau fait figure de marqueur du paysage architectural et urbain.

1.1 HÉRITAGES ET IDENTITÉ DU MÂCHEFER DE CONSTRUCTION

1.1.1 Aux origines

Une économie constructive dérivée du charbon et de l'acier

Le mâchefer de construction est une matière constituée de scories issues de la combustion de machines à vapeur et de hauts fourneaux sidérurgiques. Il désigne par conséquent les résidus solides qui proviennent de la fusion de houille, de minerais ferreux ou de coke.

Ces mâchefers artificiels (par oppositions aux broyats de roche naturelle riches en fer) apparaissent dans tous les bassins d'activités liés à la fonderie et au moulage de l'acier. Ces résidus de combustion, ou scories, sont également présents le long des premières lignes de chemin de fer, au droit des « fosses mouillées », ces plateformes de maintenance où les cheminots procédaient au cendrage des chaudières à tubes des locomotives à vapeur.

D'abord employées comme adjuvants de mortiers de chaux, les scories sont associées à la réalisation d'ouvrages maçonnés à base de moellons, de briques ou de parpaings, pour l'édification de murs, de cloisons ou en remplissage de façades poteaux-poutres. On peut même le trouver sous une forme concassée, utilisé comme charge acoustique à la manière de ce que fût le « marin » dans les anciens planchers d'immeubles canuts.

Le mâchefer de construction a été employé dans de nombreuses régions françaises, et plus localement dans toute la vallée du Gier jusqu'à Saint-Étienne, plus au Nord dans le Forez et le Roannais, mais également dans la plaine iséroise jusqu'à Grenoble. Mais c'est à Lyon que la maçonnerie de mâchefer s'est

principalement développée sous sa forme banchée, comme « pisé de mâchefer » employé pour toutes sortes d'éléments constructifs porteurs : façades, murs-refends et murs-pignons.

Un instigateur lyonnais

L'ingénieur et industriel lyonnais François Coignet (1814-1883) est l'un des tous premiers en France à expérimenter le béton de mâchefer banché.

En 1848, il utilise cette technique à l'occasion de l'agrandissement de son usine, route d'Heyrieux, dans les faubourgs de Lyon. Il teste son « nouveau béton » en remplaçant le sable du mélange traditionnel sable-chaux-ciment par des scories de combustion de houille. Approvisionnées sur les chantiers, les cendres y étaient préalablement purgées des morceaux de coke et des corps étrangers qu'elles contenaient.¹

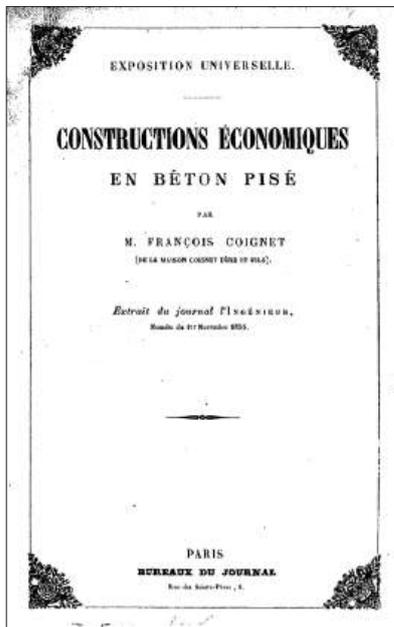
Une des premières « formulations » apparaît vers 1853, dans une construction réalisée par cet ingénieur en plaine Saint-Denis (93). Il y construit un mur de soutènement de sept mètres de hauteur revêtu d'un enduit à la chaux destiné à former la plateforme d'une maison édifiée peu après avec ce même précédé sur des plans de l'architecte Théodore Lachez.

Breveté en 1854, le « béton Coignet », n'en est pas moins en partie issu de la transposition empirique de techniques déjà existantes, celles du pisé de terre, largement développées en région lyonnaise, et dont François Coignet s'inspira pour mettre en œuvre son nouveau matériau. Dès le XVIII^e siècle, cette tradition vernaculaire du banchage avait en effet amplement été diffusée par l'auto-proclamé « professeur d'architecture rurale » François Cointeraux (1740-1830), lui aussi lyonnais d'origine.

Par ailleurs, de nombreuses innovations dans des domaines de recherche voisins furent concomitantes ; si bien que la paternité de ces « premiers bétons » est délicate à attribuer au seul François Coignet. Ainsi par exemple, au cours de la même période, en 1848, Émile Dupont et Charles Demarle créèrent la première usine de ciment à Boulogne-sur-Mer ; et, quelques années plus tôt, en 1817, Louis Vicat (1786-1861) avait déjà élaboré sa théorie sur l'hydraulicité des ciments et des chaux, en mettant en lumière la capacité d'une chaux à faire prise sous l'action de l'eau.

Toujours est-il que dès le milieu du XIX^e siècle, les conditions matérielles sont réunies pour qu'émerge et se développe ce qui deviendra au cours du XX^e siècle le béton que nous connaissons.

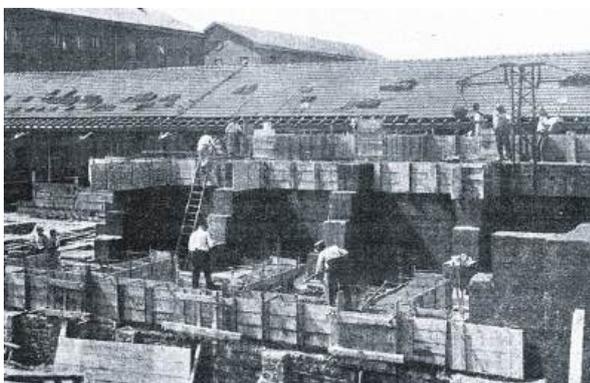
1. L. DONNEAUD, « Le pisé de mâchefer » Annales de la SAAL Vol. 21, 1922-1923.



Coignet, François (1814-1888), *Constructions économiques en béton pisé : exposition universelle, 1855*, source : gallica.BnF.fr



Plusieurs strates de maçonnerie représentatives des différents bétons élaborés par François Coignet. Ces essais sont encore visibles sur le mur de soutènement de la maison construite en 1853 à Saint-Denis (93), 2017, © F. Gaboriau



Chantier de construction des Grands Moulins de Perrache, v.1908, La Construction lyonnaise, 1913, L. Donneaud (Atelier d'imagerie)

1.1.2. Des ingrédients hétéroclites

En raison de sa mise en œuvre très empirique, le pisé de mâchefer a donné lieu à des maçonneries hybrides de compositions très variables d'un chantier à l'autre.

Outre la nature hétérogène et la provenance géographique variée des résidus de hauts fourneaux utilisés, le mélange recevait des volumes de chaux et de ciment en quantités inégales, parfois additionnés de granulats hétéroclites (sable, graviers, pouzzolane) voire de matériaux de rebuts (bris de terre cuite, terre argileuse, cailloutis...).

François Coignet en donne la formulation suivante dans l'addition à son brevet du 20 Mars 1855 : « Béton composé de sables, graviers, cailloutis, débris de pierres avec addition de cendres et scories de houille pilées ou non, de résidus et scories de travaux métallurgiques pilés ou non ; de terres quelconques cuites pilées ou non ; de pouzzolanes naturelles ou artificielles pilées ou non, ajoutées ensemble ou séparément ; le tout mélangé avec une certaine proportion de chaux grasse ou hydrique ».

Quelques soixante-quinze ans plus tard, en 1930, dans le descriptif de travaux de la Cité des États-Unis dans le huitième arrondissement de Lyon, l'architecte Tony Garnier explique le procédé constructif employé pour les façades de la manière suivante : « Les murs seront en béton de mâchefer exempt de matières acides, convenablement broyé et dosé à 150 kg de chaux hydraulique légère, chaux lourde ou ciment en cas de menace de gel, ou pour toute autre cause nécessitant cet emploi... ».

Ces deux descriptifs témoignent de la diversité des compositions qui ont pu être mises en œuvre au cours des XIX^e et XX^e siècles.

1.1.3. Une technique ancestrale et rudimentaire

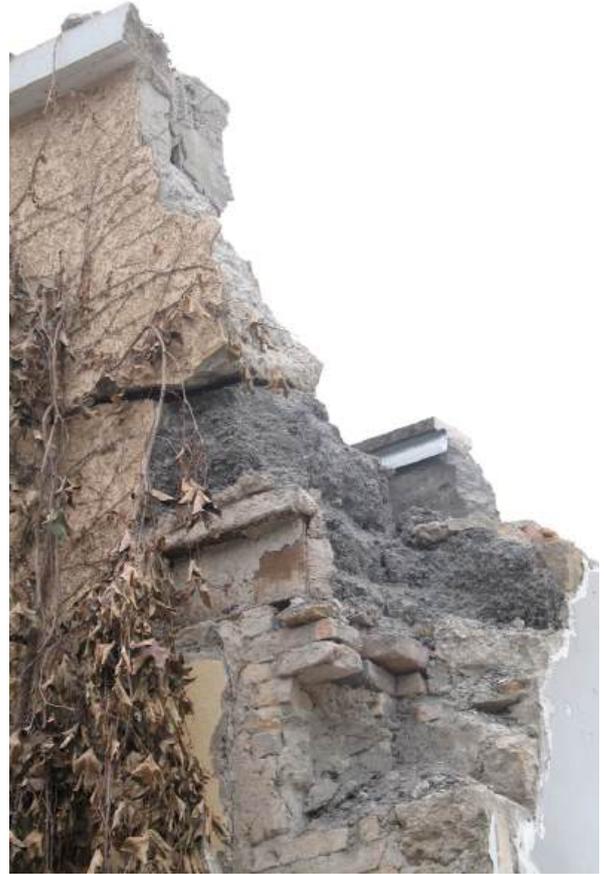
Hormis les différences dues aux origines multiples des composants et aux formulations empiriques, cette variabilité est également accentuée des mises en œuvre artisanales.

La technique du pisé est une méthode de construction utilisée à l'origine pour ériger des murs à base de terre crue. Elle est l'une des plus anciennes techniques de construction, utilisée dans de nombreuses régions du monde, notamment en Afrique du Nord, en Asie, en Europe (particulièrement en France), et en Amérique

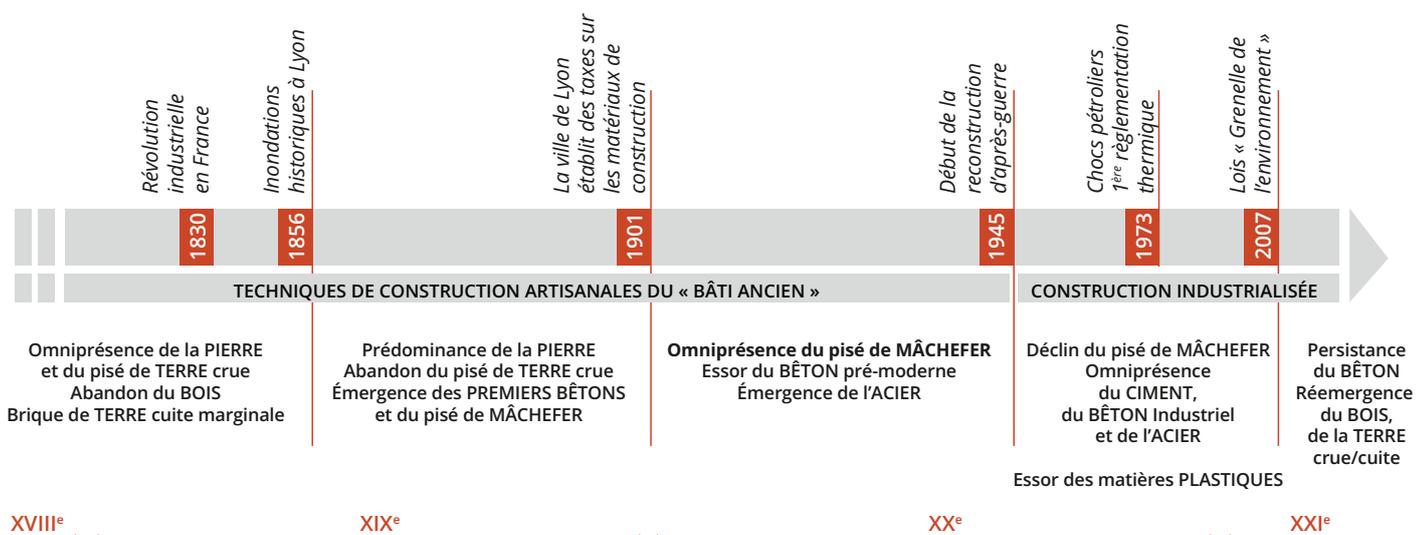
du Sud. Maintenu à l'aide de coffrages en bois, des couches successives de terre sont compactées à l'aide d'un pisoir jusqu'à atteindre la hauteur souhaitée pour le mur. Les banches sont alors retirées, permettant au mur de sécher à l'air libre. La terre étant sensible à l'humidité, le pisé est traditionnellement érigé dans nos régions sur un soubassement en pierre, permettant de désolidariser ainsi le matériau du sol. C'est dans cette technique ancestrale du banchage que les premiers bétons puisent leur principe d'édification.

Ainsi les ouvrages en pisé de mâchefer présentent-ils quasi systématiquement un soubassement en béton de gravier banché, de hauteur variable, protégeant les parois des remontées capillaires. Les parties courantes sont édifiées par lits successifs d'environ 60 cm, mesurables aux traces de banches lorsque la paroi n'est pas revêtue. Car la plupart du temps, le mur est protégé de la pluie par un enduit à la chaux hydraulique et au sable ou par un enduit bâtard.

Avec le pisé de terre crue, comme avec le béton de mâchefer, les formes sont nécessairement rectilignes, car la ligne droite est celle de la planche de bois des banches; et les décors réduits à leur plus simple expression, car le décoffrage n'autorise pas de finitions précises. Ce mode de mise en œuvre génère donc des défauts, notamment sur les arêtes, que les architectes et constructeurs masqueront par des moulurations en ciment, rapportées ou tirées au gabarit. Quant aux défauts de planéité du nu de façade, ils seront rectifiés lors de l'application de l'enduit.



Hétérogénéité des matériaux dans un mur de façade de bâti ancien, Chantier de démolition, Lyon 7^e, ZAC des Girondins, 2017, © J. Sor-doillet, CAUE Rhône Métropole



Les matériaux de construction de l'habitat à Lyon au cours de l'Histoire, CAUE Rhône Métropole

1.1.4. Un mode constructif traditionnel

Les Murs

Les murs de fondations sont exécutés en béton à base de gravier broyé et de chaux lourde, parfois jusqu'au niveau du 1^{er} étage, constituant le socle de l'édifice. Du 1^{er} étage jusqu'à la toiture, les parois sont en pisé de mâchefer proprement dit. L'épaisseur de ces dernières peut osciller entre 30 et 50 cm, parfois de manière dégressive avec la hauteur du bâtiment.

La cohésion des maçonneries est assurée par des chaînages périphériques en ciment armé. Les trumeaux, qui transmettent les charges, sont en béton de ciment portland, ou en ciment armé, tout comme les piliers éventuels. Les linteaux de baies sont également réalisés en ciment armé ; parfois en profilés d'acier enrobés au mortier de ciment.

Enfin, une fois débarrassée de ses banches, la maçonnerie est recouverte d'un enduit à la chaux ou d'un enduit bâtard, pour la protéger de la pluie battante. Le temps de séchage des parois banchées n'a pas été documenté dans les pièces d'archives rassemblées à l'occasion de la présente étude.

Les Planchers

Les planchers intermédiaires sont traditionnellement constitués d'une ossature de poutraison et solivage en bois supportant un sol en parquet sur lambourdes. Sous les poutres, une finition de plâtre projeté sur lattis est couramment mise en œuvre en plafond. Parfois, les planchers sont constitués d'une combinaison de techniques, poutrelles métalliques en profilés d'acier et solives bois, sur lesquelles reposent le plancher de surface. Plus tard, avec l'apparition du béton armé, il sera courant que les planchers intermédiaires soient construits à partir de poutrelles et hourdis béton, recouvert d'un sol en dalle ciment, lui-même recouvert d'un parquet sur lambourdes ou d'une chape carrelée. Le plancher bas sur cave est classiquement surélevé par rapport au niveau du sol extérieur, édifié sur le soubassement en béton de gravier, à l'endroit où commence l'édification du pisé de mâchefer. Ce plancher est composé de poutres et solives en bois massif ou de poutrelles métalliques et hourdis béton, plus rarement de voûtains en briques ou d'anciennes voûtes en pierre préexistantes.

Le plancher haut, quant à lui, est constitué par le plafond du dernier étage habité, qui peut être également le plancher des greniers.



Poutrelles acier formant linteau de baie, chantier de démolition de bâtiments construits en 1960 à Lyon 7, ZAC des Girondins, 2017, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Chantier de démolition à Lyon 4, 2018, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Têtes de poutrelles acier enchâssées dans le mur en mâchefer, photographie prise à l'occasion de l'ouverture d'une trémie dans une dalle d'étage lors du chantier de rénovation d'une maison individuelle sise 21, av. des acacias 69003 Lyon, 2019, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

1.1.5. Des atouts manifestes

Un matériau économique

Le système de construction rationnel et efficace associé à ce matériau, est en cohérence avec les moyens techniques modestes de son époque.

À Lyon, l'essor de ces premiers bétons dans la construction fut spectaculaire. La principale raison en est leur coût très faible, puisqu'issus des déchets produits dans des usines très nombreuses et mis à disposition gratuitement. Dans les années 1880, ce mode de construction s'était tellement répandu que les scories de houille venaient à manquer. On s'approvisionnait alors aux usines de Givors ou de Rive-de-Gier et aux compagnies de chemin de fer².

L'observation des modes de taxation par la ville de Lyon des droits de construction des immeubles d'habitation montre combien il était adapté à la recherche d'une maîtrise d'économie globale³ : « [Le matériau] s'emploie frais dans des moules préparés à cet effet. Plus les coffres seront simples, plus facile sera la construction, par conséquent, moins elle sera coûteuse⁴ ».

Cette rationalité constructive réside également dans cette matérialité robuste, résistante aux chocs, aux frottements, aux ultra-violets ou aux eaux pluviales⁵.

Matériau de construction économique, les mâchefers ont par conséquent beaucoup été utilisés pour des constructions utilitaires et des habitats populaires, dès 1880 et jusqu'aux années 1960, tant pour le logement collectif que l'habitat individuel.

Une rationalité constructive

Comme dans toute l'architecture de la maçonnerie, la façade révèle le mode constructif du bâtiment et manifeste les dispositions structurelles de l'ouvrage :

les descentes de charge dictent les compositions de baies, réparties de manière équilibrée, ordonnancées en travées verticales et alignées entre elles. L'effet de symétrie des façades est d'ailleurs une composante quasi permanente de la construction en mâchefer, tant dans l'habitat collectif que dans la maison individuelle.



Maçonnerie en béton de gravier (ht. 120 cm) sur un bâtiment en mâchefer en cours de démolition à Lyon 4, 2018, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

Des propriétés empiriques notoires

Parmi les raisons qui expliquent l'essor important du mâchefer à Lyon, certains pointent les graves inondations du printemps 1856 qui ont fragilisé les soubassements de nombreux bâtiments en pisé de terre crue, entraînant leur effondrement.

Si l'arrêté administratif du préfet Vaisse, en juin de la même année, marque a priori un coup d'arrêt à l'emploi de tous les pisés dans les projets de construction lyonnais⁶, le mâchefer sera peu à peu réhabilité dans les ouvrages. Grâce à l'évolution des

2. A. LOUVIER, *Emploi des scories de houille*, Annales de la SAAL, 1883-1885.

3. *Le logement populaire à Lyon et sa région*, 1890-1940 Tome, 1890-1920 Bulletin n°22 de la Société Académique d'Architecture de Lyon (Février 2015).

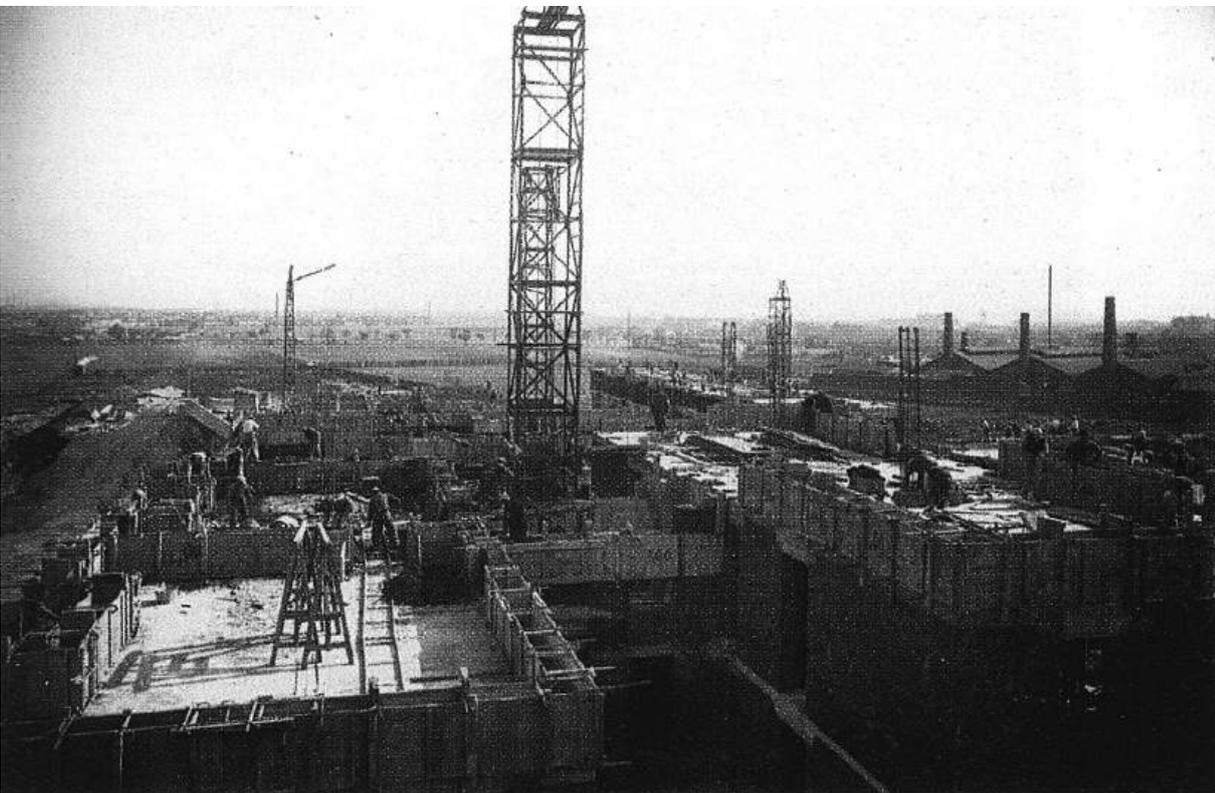
4. Tony Garnier, *Une Cité industrielle : construction*, 1917.

5. *Mise en valeur et modernisation des Cités lyonnaises d'HBM : l'exemple des cités d'Habitation à Bon Marché de Grand Lyon Habitat*, CAUE Rhône Métropole pour Grand Lyon Habitat (novembre 2019).

6. « [...] » Considérant que la surveillance des maçonneries en béton de chaux grasse et de mâchefer, dit, à Lyon, pisé de mâchefer, présente de très grandes difficultés ; que l'expérience des dernières crues a démontré que le plus grand nombre des pisés de mâchefer existants, sont ou trop maigres, ce qui les rend susceptibles de s'écraser sous des pressions mêmes faibles, ou mélangés de terre, ce qui les expose à être délayés par l'eau [...] il ne sera plus, à l'avenir, élevé, dans toute l'étendue de l'agglomération lyonnaise de constructions autres qu'en bonne maçonnerie de chaux et sable. » - Extrait du décret d'interdiction de la construction en pisé de terre par le préfet du Rhône Claude-Marius Vaisse (1799-1864) le 19 juin 1856.



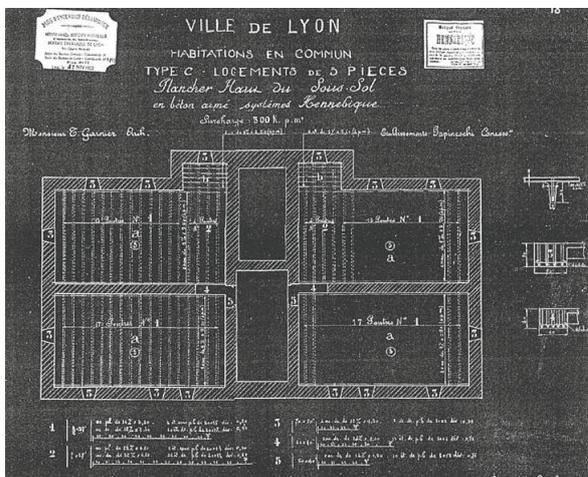
Stratification des lits de mâchefer banché apparentes sur les façades de la Cité HBM La Mouche à Gerland, Lyon 7, Robert et Chollat architectes ; Photo du chantier vers 1928, in L'Avenir. L'entreprise coopérative, P. Mardag



Chantier du quartier des États-Unis, Entreprise L'Avenir, T.Garnier architecte



Chantier de construction de la Cité Charial, Lyon 3, v. 1939, Jacques Lambert architecte, L'Avenir. L'entreprise coopérative, P. Mardaga, p.40



Plan de béton armé (selon procédé Hennebique) pour le sous-sol des immeubles d'habitations du quartier des États-Unis à Lyon 8, Tony Garnier architecte

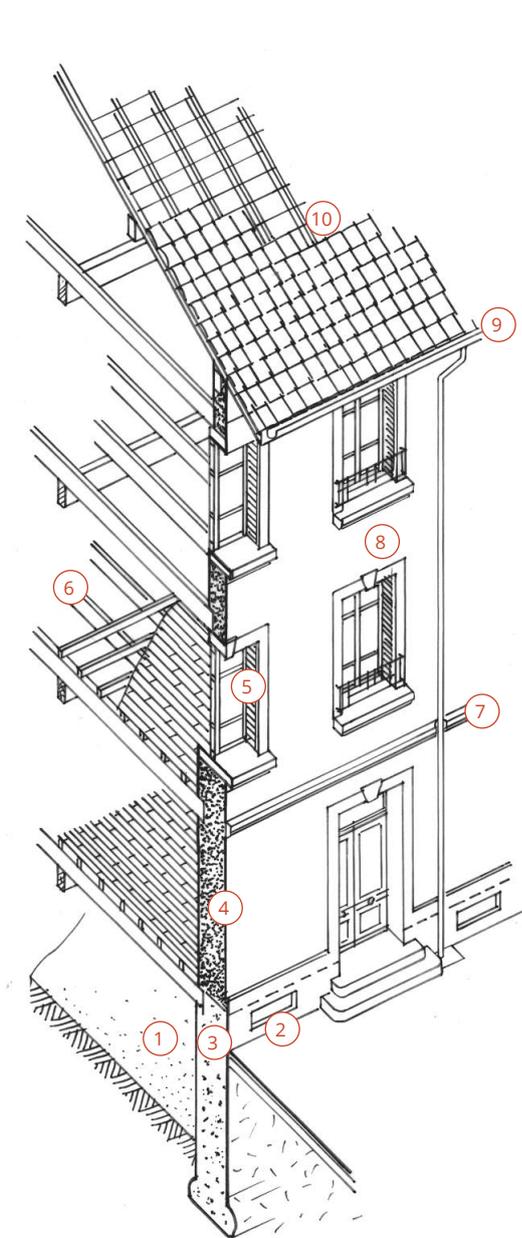
savoir-faire et au principe de l'assise en béton édicté en règle de l'art, leur meilleure résistance à l'érosion que la terre crue participa ainsi probablement de leur essor.

En outre, on prêta également au béton de mâchefer d'autres qualités : de bonnes performances mécaniques, une porosité qui le rendait léger par comparaison à d'autres maçonneries traditionnelles comme la pierre, la brique ou la terre crue, et qui lui conféraient des capacités thermiques notables, au point d'être qualifié parfois de béton isolant.

1.1.6. Des modèles de typologies emblématiques

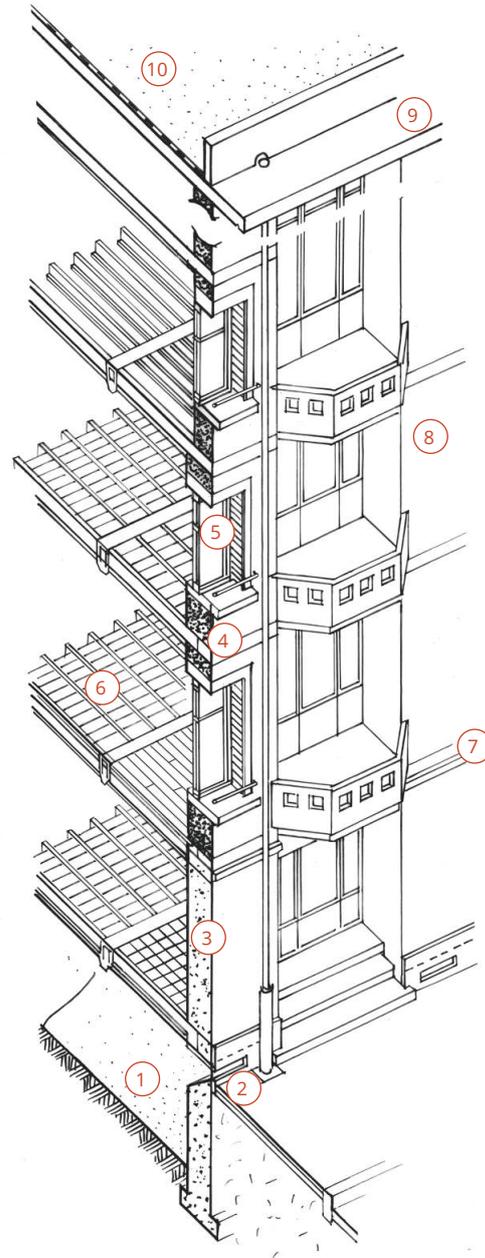
En raison de toutes ses qualités, le mâchefer fut impliqué dans une très grande diversité d'opérations.

On le retrouve aujourd'hui dans des formes aussi variées que l'habitat individuel ouvrier, le collectif de logements sociaux, l'immeuble de rapport, mais également des constructions d'équipement publics (écoles, mairies, maisons du peuple...) ainsi que, depuis le milieu du XIX^e siècle, dans un très large corpus de bâtiments d'activités, allant des petites



Principaux caractères constructifs de l'immeuble en mâchefer dans sa mise en œuvre traditionnelle :

1. Niveau de cave semi-enterré, sol en terre battue ou lit de gravier
2. Grille de ventilation du sous-sol
3. Murs d'assise en béton de gravier banché (de ± 60/80 cm au-dessus du terrain naturel)
4. Murs de façades en béton de mâchefer banché (ép. 45 cm environ) en lits successifs de hauteur 60 cm ; Arasements et linteaux en ciment armé
5. Baies verticales composées en travées régulières ; Garde-corps en ferronnerie, persiennes métalliques
6. Planchers intermédiaires en poutres et solivage bois
7. Modénatures en ciment naturel (cordons, moulures)
8. Enduit et décors (encadrement de baies fins) au mortier de chaux naturelle hydraulique
9. Forget, sous face et rives en bois peint (dépassée de toit de 40 cm env.), chéneaux extérieurs en zinc naturel ;
10. Couverture en tuile plate mécanique rouge



Principaux caractères constructifs de l'immeuble en mâchefer dans sa mise en œuvre pré-industrielle :

1. Niveau de cave semi-enterré, sol en terre battue, lit de gravier ou dalle en béton de chaux
2. Larmier de cave
3. Murs d'assise en béton de gravier banché (de 1 à 2 m de hauteur jusqu'à 2/3 niveaux pour les constructions de 5 étages et plus)
4. Murs de façades en ossature mixte de mâchefer et de ciment armé : trumeaux en mâchefer banché (ép. 40 cm env.) ; chaînages, linteaux (et poteaux dans des constructions de 5 étages et plus) en béton ou ciment armé
5. Baies composées en travées régulières ; Barre d'appui serrurerie ; Persiennes métalliques ; Garde-corps de loggias en briques de mâchefer ou ciment armé banché
6. Planchers en poutrelles béton ou acier (RDC) et hourdis béton ou brique
7. Modénatures en ciment prompt (cordons, appuis)
8. Enduit au mortier de chaux naturelle hydraulique
9. Bandeau d'acrotère
10. Dalle de toit terrasse en ciment armé étanchée



Hôtel Balay, 9 place Puvis-de-Chavannes, Lyon 6, Gaspard André architecte, 1892. Hôtel particulier de style Renaissance dont le principal décor est formé d'un bossage en table continue sur un support en maçonnerie de mâchefer. Source : Archives Municipales de Lyon



Façade sur rue de l'*Hôtel Balay*, à Lyon 6, après son ravalement de façade en 2015

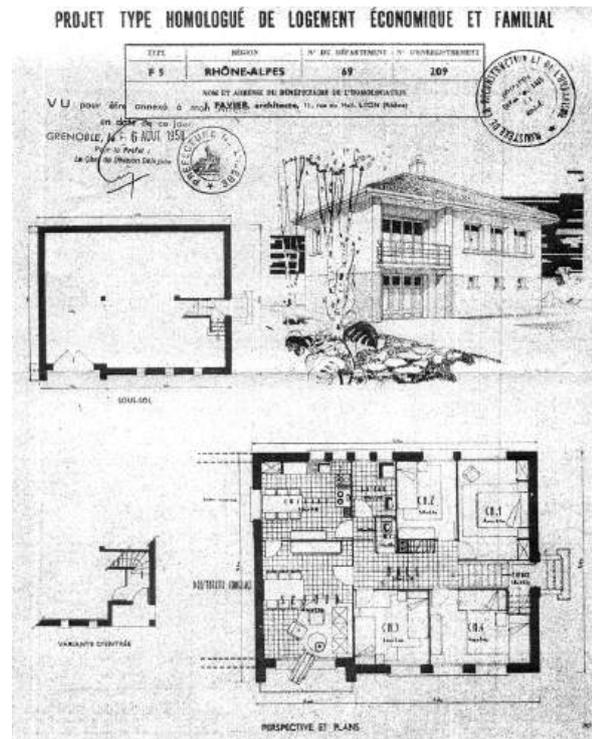


Détail de façade de l'*Hôtel Balay*, 9 place Puvis-de-Chavannes, Lyon 6, Gaspard André architecte, 1892

fabriques ou entrepôts faubouriens aux grandes usines manufacturières, en passant par toutes sortes de bâtiments industriels.

Même si l'habitat en mâchefer est par essence une construction d'essence populaire, illustrée par exemple au travers du mouvement « Castors », il a aussi été employé dans une forme d'architecture savante par des propriétaires plus fortunés. Cela se traduit par bâtiments en quête de distinction, et par définition moins standardisées, dans la construction de demeures bourgeoises ou d'hôtels particuliers aux façades davantage travaillées (notamment avec des modénatures ouvragées au ciment prompt), aux ouvertures plus généreuses et ouvragées, aux éléments de décors plus ostensibles (couronnements de baies, faux chainages d'angle, ferronneries, etc.) et par l'emploi de matériaux de finition plus nobles dans un style très académique et bourgeois où le support en mâchefer n'est jamais révélé.

Dans d'autres programmes d'habitat en revanche, comme les « Habitations à Bon Marché » (HBM) ou les « Plans Favier » plus tard, pour lesquels l'économie d'échelle permise par la série et la « taylorisation » ont pu être mises au service des crises du logement, on peut parler de « modèles typologiques du mâchefer ». La réplique de plans courants, de principes de distribution ou de « coffrages-type » sera également encouragée par les prémices de l'industrialisation du secteur du bâtiment au lendemain de la Seconde Guerre mondiale.



« Plan Favier » homologué par le MRU (Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme), 1958



Quartier de maisons « Plan Favier » dans une cité ouvrière de Corbas (69) construite en 1958, 2009, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Maisons jumelées de la « Petite Cité Tase » à Vaulx-en-Velin, v.1927. Le Logement populaire à Lyon et sa région 1890-1940, t.2 Bulletin n°23 de la Société Académique d'Architecture de Lyon, 2017, © Fonds Alep-Archipat



Habitat individuel sur plan Favier, 7 Rue de la Persévérance, Lyon 5, v. 1958



Ilôt Jean Macé, place J. Macé, Lyon 7, Pierre Labrosse architecte, photo du chantier de reconstruction, v. 1949, L'Avenir. L'entreprise coopérative.



Ilôt Jean Macé, place J. Macé à Lyon 7, Pierre Labrosse architecte, photo du chantier de reconstruction, v. 1951, L'Avenir. L'entreprise coopérative

1.1.7 Des réalisations entre tradition artisanale et modernité pré-industrielle

Si la composition des maçonneries est marquée par une grande hétérogénéité (selon la date d'édification, la région géographique, la nature des granulats, la provenance des scories...), leur principe structurel, a également subi quelques « hybridations » au fil du temps.

À la fin du XIX^e et au début du XX^e siècles, le pisé de mâchefer est mis en œuvre sur l'ensemble des façades élevées selon la technique du « mur-poids ». Cette mise en œuvre est utilisée pour des gabarits de faible hauteur, de deux à cinq niveaux, élevés sur une assise en béton de gravier, formant un socle structurel et conférant aux bâtiments un rapport au sol marqué. Plus tard, durant l'entre-deux-guerres, l'évolution des techniques et des matériaux voit se développer une mise en œuvre légèrement différente où les murs des étages présentent des aspects composites : le pisé de mâchefer banché, utilisé sur les parties courantes, cohabite avec du béton de ciment armé sur des éléments ponctuels structurellement plus sollicités : piliers, poutres, trumeaux, meneaux, linteaux, chaînages, dalles de terrasses, corniches, balustrades, etc.

Après la Seconde Guerre mondiale enfin, les programmes de bâtiments collectifs de la reconstruction, de gabarit plus important (parfois jusqu'à R+8) sont rendus possibles grâce à une mise en œuvre mixte : les façades sont constituées d'une ossature en béton armé sur un socle en béton de gravier, le mâchefer étant uniquement présent sous forme de remplissage de parois. Le recours à ce mode constructif assimilable à la technique « poteaux-poutre » permet de répondre des contraintes structurelles plus fortes. Cette technique hybride tardive, qui allie béton armé et béton de mâchefer, est caractéristique de certains immeubles de la reconstruction, à l'instar de l'ilôt Jean Macé dans le septième arrondissement de Lyon⁷.

Après la période de reconstruction massive d'après-guerre, l'emploi du pisé de mâchefer s'éteint peu à peu avec l'avènement de son cousin, le béton de ciment armé, plus rapide et plus simple à mettre en œuvre et avec la perte de savoir-faire occasionnée par la standardisation des matériaux et des processus constructifs au début des Trente Glorieuses.

7. Lire à ce propos l'article de Gilbert Richaud et Yuna Bourgeois sur l'architecture de la reconstruction à Lyon dans le bulletin n°24 de la Société Académique d'Architecture de Lyon (Janvier 2020).



Reconstruction en pisé de mâchefer d'un immeuble en pierre, 30 avenue Berthelot, Lyon 7, photographie après les bombardements de 1944 (Anonyme - Archives Municipales de Lyon, 3Ph 112) et après la reconstruction en 1949 (Michel Marin) - Du Logement à Lyon et ses environs 1940-1960, Bulletin n°24 de la Société Académique d'Architecture de Lyon (2020)

1.1.8. Un matériau support d'expressions stylistiques variées

Selon qu'il témoigne d'un mode de bâtir traditionnel issu de savoir-faire ancestraux ou de techniques influencées par la naissance de l'industrialisation, l'habitat en mâchefer a donné lieu à des expressions architecturales diversifiées.

On peut tenter de les catégoriser en deux grandes familles :

- d'une part l'habitat de style « régionaliste », apparu à la fin du XIXe siècle, qui conserve des éléments classiques de l'architecture bourgeoise, un mélange de conceptions héritées de l'empirisme vernaculaire et du dessin des beaux-arts ;
- d'autre part l'habitat de facture « moderne » avec des lignes géométriques épurées.

Les ouvrages de la première famille font état d'une composition étagée : un soubassement, un rez-de-chaussée surélevé avec un effet de perron, et une cave semi-enterrée ; au-dessus, un corps principal développant une hiérarchisation des niveaux ; enfin, un couronnement. Les façades développent un rapport équilibré des pleins et des vides, en général légèrement au bénéfice des parties opaques ; des baies aux proportions étirées, plus étroites que large, dans un rapport supérieur à un pour deux, avec une allège basse et un garde-corps en serrurerie. Parfois, la façade est ponctuée d'un petit balcon ou d'une petite loggia ainsi que d'éléments moulurés qui animent la façade : cordons, appuis, coudières, corniche, etc. Quant au toit, il est à pans, couvert de tuiles mécaniques et le forjet est marqué par une dépassée de toiture conséquente.

Cette écriture d'inspiration traditionnelle est dominante dans l'habitat lyonnais en mâchefer

comme en témoigne la récurrence de tous ces motifs stylistiques dans la ville. On pourrait d'ailleurs la qualifier « d'architecture d'accompagnement », tant elle cherche à se fondre dans le tissu urbain, avec son vocabulaire inspiré de l'immeuble bourgeois et un certain « art du simili » : des bandeaux, des encadrements de baies, des cordons d'étages, mais dans une gestion efficiente des formes et des formats ; des masses simples, et des motifs répétés.

Dans les ouvrages de la seconde famille on reconnaît les formes épurées qui avaient annoncé, à l'aube du siècle dernier, le renouveau de l'architecture, avec des volumes simples, de larges linteaux de baies, des porte-à-faux de balcons, des toits-terrasses... ; des particularités rendues possibles par les progrès techniques sur l'étanchéité et par l'essor du béton armé.

Cette association de deux techniques, la maçonnerie verticale en pisé de mâchefer d'une part, combinée à la maçonnerie horizontale en béton armé d'autre part, a donné lieu à tout un langage formel de la maçonnerie moulée. L'immeuble utilise la ligne droite, juste, sobre,

toujours économique, permise par le mode de coffrage du béton en planches de bois. Les pans coupés sur les arêtes animent les volumes avec des jeux d'ombres et lumières tout en corrigeant les problèmes de finitions (balèvres de laitance, nid de cailloux, épaufrures) et dont ces coffrages sont la cause. Les garde-corps se façonnent en béton plein (moins chers que l'acier et qui permettant de préserver l'intimité des occupants) avec des réservations formant ajours.

Toutefois, en dépit d'expressions architecturales précurseurs dans leur style prémoderne, la construction en mâchefer n'en appartient pas moins à la grande famille du bâti ancien, dont elle tire, outre son essence constructive, son comportement physique et son fonctionnement hygrothermique, comme nous le verrons plus loin.



Immeuble collectif en copropriété, 240 avenue Garibaldi, 38 rue des Rancy, Lyon 3, 1954, Pierre Tourret architecte



Ilot Rue Saint Lazare, Rue du Repos, Rue de la Madeleine, Lyon 7, 1914, Emmanuel Cateland architecte



Habitat individuel jumelé du lotissement communal auto-construit Les cottages « Bel Air-Les Brosses », v. 1930-1934, 33-35 rue Blasco Ibanez, Villeurbanne



Cité HBM Quivogne Habitat Collectif, 34 rue Quivogne, Lyon 2, Auguste Schaeffer architecte (1911), Jacky Suchail architecte (2020)



Habitat individuel, v. 1925, 64 rue Grange Bruyère, Lyon 5



Habitat collectif social sous gestion GLH, angle des rues Dangon et Ph. De Lassalle, Lyon 4, « Cité Vieille Croix-Rousse », v. 1921-1928, François et Victor Clermont architectes, Coopérative de Construction L'Avenir (1921-1929)

ÉMERGENCE
DES
PREMIERS
BÉTONS

François Martin Lebrun publie
Méthode pratique pour l'emploi du béton

1835

FML publie *L'art de bâtir en béton*

1843

François Coignet expérimente
le béton de mâchefer

1848

Inondations qui ruinent l'ensemble
de la rive gauche du Rhône construit
en grande partie en pisé de terre.

1856

Arrêté du préfet Vaïsse interdisant
« les constructions en pisé, et en béton
de chaux grasse et de mâchefer

1828

**L'architecte
François Martin Lebrun**
construit la maison
de son frère à Marsac
en béton moulé

1

1852

1854

**Construction des usines et
maison Coignet à Saint-Denis**
(véritable laboratoire
expérimental du béton Coignet)

2

1862

**Construction de l'Église
de Vésinet** en béton Coignet
par l'architecte Auguste Boileau

3

1872

**Construction de l'Église
Saint-Joseph-des-Brotteaux**
en béton de mâchefer

4

1872

**Le pisé de mâchefer
est autorisé à Lyon**
par le règlement et tarif
de voirie de la ville

1882

1883

**Reconstruction des usines
Gillet** et certains immeubles
attenant au 14 quai Serin
(aujourd'hui quai Gillet) à Lyon

5

1892

1913

**Construction de l'îlot
Part-Dieu par la société Mangini,**
rue de Rancy et rue de Rize

6

1896

**Livraison
de l'hôtel particulier Balaÿ**
9 place Puvis de Chavanne
en pisé de mâchefer
conçu par Gaspard André

7

1901

**Lyon établit des taxes sur les
matériaux de construction**
Le pisé de mâchefer est deux fois
moins taxé que la pierre

1904

1905

Construction de la Vacherie
au parc de la tête d'or en pisé
de mâchefer par Tony Garnier

8

1910

**Construction du premier
immeuble en béton armé de
Lyon** par Emmanuel Cateland,
24 quai Jâyr

9

1920

1930

**Premiers lotissements
de pavillons de banlieue**
5^e, 8^e, 9^e, 3^e arrondissement
construits en béton de mâchefer
et béton de gravier

10

1920

1933

**Construction de la Cité HBM
des États-Unis** en béton de
mâchefer par Tony Garnier

11

1932

1934

**Construction de la Cité HBM
Casimir Perrier (Perrache)** par
Jean Marin et Victor Adrien Robert

12

1940

1960

**Construction des
lotissements Favier**
Lyon 9

13

1958

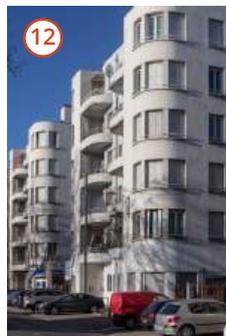
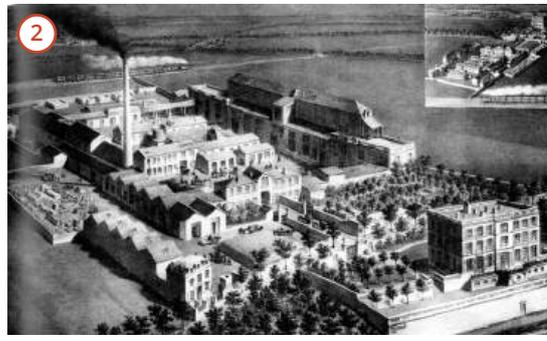
**Reconstruction de l'îlot
Jean Macé** par Pierre Labrosse
en béton de mâchefer et
ciment armé

14

ÉSSOR DU
MÂCHEFER
AU DÉTRIMENT
DU PISÉ ET DE
LA PIERRE

TRÈS FORTE
REPRÉSENTATION
DU MÂCHEFER
DANS LA
CONSTRUCTION
DE LOGEMENT

DÉCLIN DU
MÂCHEFER
AU PROFIT DU
BÉTON ARMÉ



1. *Maison* à Marssac-sur-Tarn (81), François-Martin Lebrun, architecte, Inventaire général de la Région Occitanie, Conseil départemental du Tarn, © Sonia Servant (2016)

2. *Manufacture et logement patronal des Usines Coignet* à Saint-Denis (93), François Coignet, constructeur, Lithographie de J. Devicque (d'après SIMONNET, Cyrille. *Le béton Histoire d'un matériau*. Parenthèse, Marseille, 2005), © Département de la Seine-Saint-Denis

3. *Église Sainte Marguerite du Vésinet* (78), Louis Auguste Boileau, architecte ; François Coignet, entrepreneur, © Gilbert Richaud

4. *Église St-Joseph-des-Brotteaux* à Lyon 6, Gaspard André, architecte, Bibliothèque Municipale de Lyon

5. *Usines Gillet* à Lyon 1 (quartier Serin), Inventaire général du patrimoine culturel de la Région Rhône-Alpes, Archives Municipales de la Ville de Lyon, © M. Couderette

6. *Immeuble de logements* à Lyon 3, Félix Mangini, promoteur, © Florent Perroud, CAUE Rhône Métropole

7. *Hôtel particulier Balay* à Lyon 6, © Florent Perroud, CAUE Rhône Métropole

8. *Vacherie du Parc de la Tête d'Or* à Lyon 6, Tony Garnier, architecte, © Florent Perroud, CAUE Rhône Métropole

9. *Immeuble de logements* à Lyon 9, Emmanuel Cateland, architecte, © Florent Perroud, CAUE Rhône Métropole

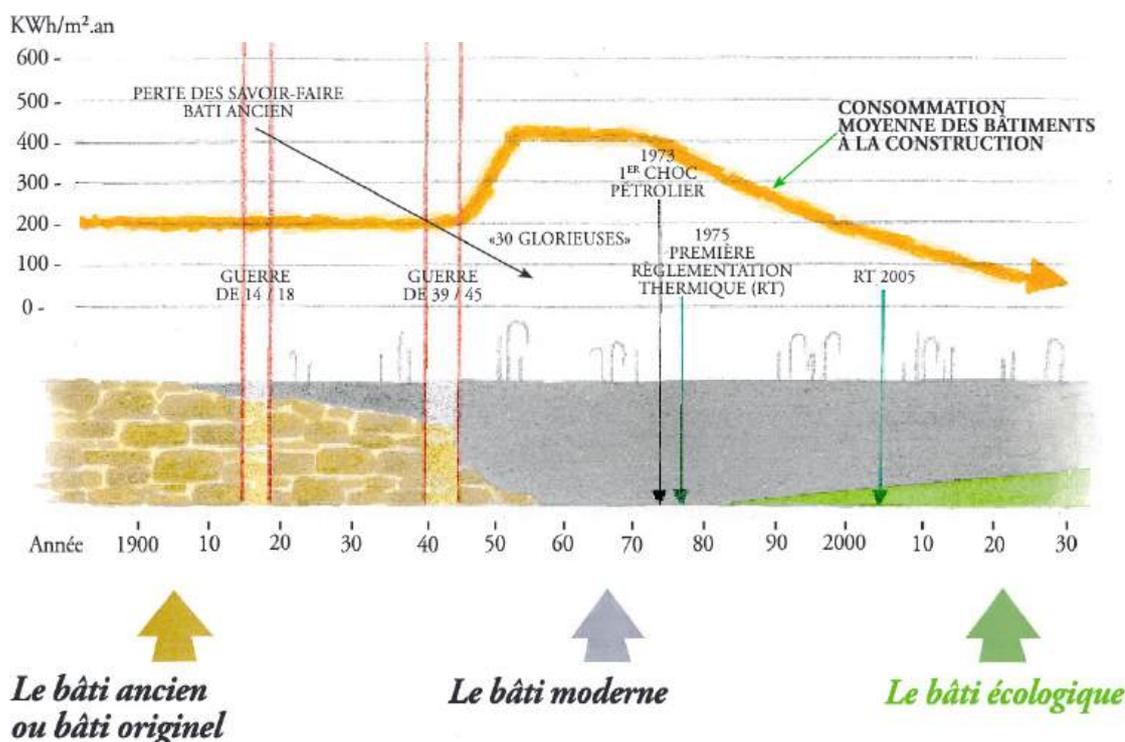
10. *Maison du lotissement Grange Bruyère* à Lyon 5, © Nathalie Sandt, CAUE Rhône Métropole

11. *Cité HBM des États-Unis* à Lyon 8, Tony Garnier, architecte, © Florent Perroud, CAUE Rhône Métropole

12. *Cité HBM Casimir Perrier* à Lyon, Victor-Adrien Robert et Jean Marin architectes, © Florent Perroud, CAUE Rhône Métropole

13. *Maison Favier* à Corbas, Modèle Marcel Favier, architecte, © Jacques Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

14. *Ilot Jean Macé* à Lyon 7, Pierre Labrosse, architecte, © Florent Perroud, CAUE Rhône Métropole



Comportements thermiques de l'habitat ancien et moderne, © ATHEBA, Maisons paysannes de France

1.2. UN BÂTI ANCIEN DU XX^e SIÈCLE

1.2.1. Le mâchefer dans la classification chronologique du bâti

Il est admis, mais faut-il néanmoins toujours le rappeler, que les bâtiments d'habitat en pisé de mâchefer sont à rattacher à la grande famille du bâti ancien.

Au regard des politiques publiques en matière de transition énergétique et des stratégies de rénovation à mettre en œuvre, il est d'usage de classer les bâtiments en trois catégories : le bâti ancien, construit avant 1948, le patrimoine des Trente Glorieuses construit entre 1948 et 1975 et les constructions récentes édifiées depuis 1975.

Le premier groupe réunit l'ensemble des édifices qui ont été construits selon des techniques et savoir-faire traditionnels à partir de matériaux issus de ressources locales, soit utilisés de manière brute comme la terre, la pierre ou le bois, soit après transformation comme l'argile, le sable, la chaux, le ciment naturel ou le mâchefer.

Le second groupe (1948-1975) comprend un corpus bâti apparu dans une conjoncture particulière,

celle d'une très forte crise du logement au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. Le besoin de démultiplier les opérations, de construire plus vite et plus haut, a favorisé les modes de préfabrication du logement, provoquant ainsi peu à peu l'abandon de savoir-faire traditionnels autrefois maîtrisés par une main-d'œuvre nombreuse et qualifiée largement décimée par la guerre. Le pisé de mâchefer continue cependant d'être utilisé, mais de manière déclinante, dans la construction de logements individuels et collectifs, jusqu'à la fin des années cinquante. Certaines opérations cherchent à optimiser les coûts en ayant recours à des modes constructifs mixtes, mêlant béton de mâchefer, béton armé et béton de gravier.

Le pisé de mâchefer est absent du groupe le plus récent, des ouvrages édifiés après le choc pétrolier de 1973, et qui ont la particularité d'avoir été assujettis à la toute première réglementation thermique qui a vu le jour l'année suivante. Les bâtiments de ce groupe ont reçu pour la plupart une isolation intérieure, ont été équipés de fenêtres à double vitrage et d'une ventilation mécanique. Il est cependant intéressant de constater qu'en termes d'étiquette énergétique, les bâtiments anciens d'avant 48 sont proches des premières constructions réglementées.

1.2.2. Une frugalité constructive

Issue d'une tradition constructive ancestrale transmise de génération en génération, la conception de l'habitat en pisé de mâchefer a fait appel au bon sens pratique pour se prémunir des risques et valoriser les potentialités de son environnement.

Compacité et ventilation naturelle

Comme pour l'habitat en pisé de terre ou en pierre, maisons et immeubles collectifs en pisé de mâchefer sont caractérisés par une forme simple et compacte, qui limite fortement les surfaces de déperdition.

Dans les tissus compacts de milieux urbains où sont nées les habitations en pisé de mâchefer, les linéaires de parois mitoyennes et d'adossement sont importants. Cela s'explique, entre autres, par la recherche d'une économie de moyens, de matière et de mise en œuvre et, *in fine*, la réduction du coût de construction. Les déperditions thermiques y sont conséquemment plus limitées que pour le bâti isolé. L'habitat n'en est pas moins bien ventilé puisque la possibilité d'ouvertures sur deux façades opposées, à la fois sur rue et sur cour, est courante dans ces configurations urbaines, rendant la ventilation naturelle efficace. Ce principe sera d'ailleurs systématisé dans les ensembles emblématiques en mâchefer que sont les Habitations à Bon Marché (HBM).⁸

Logiques de réemploi

De la même manière que le bâti ancien a de tout temps su mettre en œuvre des ressources locales (pierre, bois, terre) ou récupérées sur d'autres édifices, le bâti en mâchefer tire lui aussi sa matière première d'un « gisement de réemploi », celui des sites pourvoyeurs des scories de hauts fourneaux utilisées dans sa fabrication.

En outre, les filières opportunistes de construction donnent lieu à des édifications composites mêlant souvent, au sein d'ouvrages vieux d'un siècle, et de ce fait parfois maintes fois remaniés, plusieurs types de matériaux. Ainsi, bois, pierre, chaux, plâtre, brique, ardoise, fonte, zinc, plomb, pouzzolane peuvent être présents dans l'édifice, au sein du pisé lui-même, comme au sein d'ajouts constructifs divers ; à l'opposé du bâti récent, beaucoup plus homogène, tels les ouvrages en béton armé ou le même matériau est présent, depuis les fondations, jusqu'au toit-terrasse en passant par les murs.



Cité HBM Groupe Ravat, 46 rue Delandine, Lyon 2, 1923-1932

La phase de diagnostic et de caractérisation d'un état existant à un instant « T » est donc cruciale avant la conception d'un projet de transformation ou de rénovation comme nous le verrons plus loin (Partie 2). Mais c'est aussi de cette observation avant d'agir que peut découler une compréhension du comportement physique et hygrothermique des parois et de ses critères de fluctuations (nature des matériaux et conditions environnementales qui agissent sur eux : saisonnalité, sols, environnement végétal, etc.)⁹

Air, lumière et soleil

Parmi les logiques élémentaires présentes dans la conception de l'habitat en mâchefer, la prise en compte de la ventilation naturelle et des apports solaires est effective lorsque le contexte urbain le rend possible : on observe fréquemment par exemple que les baies sont plus grandes et plus nombreuses au Sud afin de bénéficier de la « solarisation passive » tandis que le Nord accueille des fenêtres de tailles plus petites et moins nombreuses pour protéger l'habitat

8. Se référer à ce sujet à l'étude : Mise en valeur et modernisation des Cités lyonnaises d'HBM : l'exemple des cités d'Habitation à Bon Marché de Grand Lyon Habitat, CAUE Rhône Métropole pour Grand Lyon Habitat (novembre 2019).

9. BERNARD Marc, Énergétique du patrimoine, *Revue D'a* n° 207, 2012.

du froid. Les contrevents (en général des persiennes rabattables et pour certaines permettant leur projection vers l'extérieur) contribuent au confort lumineux et thermique du logement; la nuit, ils contribuent à protéger la baie du vent froid en hiver et, le jour, à protéger le vitrage des rayons du soleil en été.

Logement traversant rendant possible la ventilation naturelle, vestibule jouant le rôle de sas thermique, séchoirs formant un espace tampon, agencement spatial répondant aux exigences thermiques des usages (séjour au Sud et cuisine au Nord), double-fenêtre protégeant du froid, persiennes extérieures protégeant du soleil, greniers faisant office de tampons thermiques en hiver comme en été... nombre de ces dispositifs « passifs » s'avèrent particulièrement pertinents et inspirent aujourd'hui l'habitat « bioclimatique ».

Au tournant du XX^e siècle, sous l'influence du mouvement hygiéniste, le renouvellement d'air des logements HBM est une question pensée dès la conception : les bâtiments sont conçus pour créer les conditions de logements traversants avec des façades ouvertes sur rue et sur cour. Les cabinets de toilettes et les WC, qui apparaissent à l'intérieur des logements populaires construits au début du XX^e siècle, sont ventilés naturellement par des fenestrons ouverts sur l'extérieur ou sur les cages d'escaliers. Les cuisines sont, elles aussi, ventilées par des fenêtres en premier jour. Rappelons que dans leur configuration originelle, toute pièce d'une habitation à bon marché (HBM) possède un ouvrant permettant un renouvellement d'air minimal. « La performance énergétique d'un logement dépend en grande partie de son organisation intérieure. Disposition des pièces entre elles, orientation par rapport au vent, au soleil, forme, volumétrie, surface vitrée; autant d'éléments d'architecture bioclimatique fondamentaux pour la performance énergétique du logement. »¹⁰

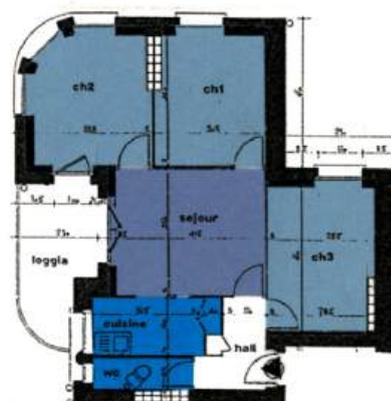
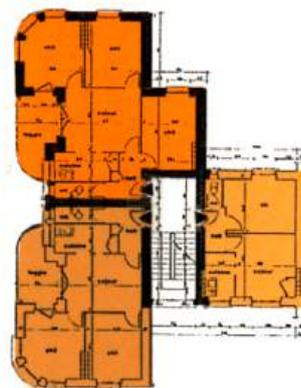
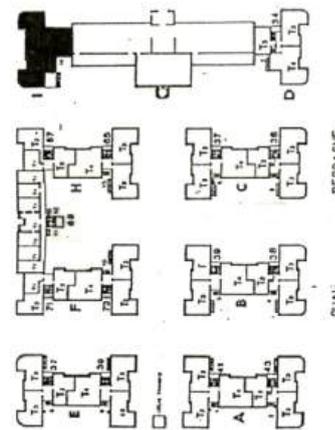
Nous verrons plus loin (Partie 2) comment le projet de réhabilitation pourra trouver le juste équilibre entre des mesures d'isolation thermique efficaces qui vont augmenter l'étanchéité à l'air de l'habitat et la gestion d'une ventilation et d'un renouvellement d'air hygiénique suffisante afin d'assurer à la fois une bonne qualité de l'air intérieur et la salubrité du bâti.

10. ATHEBA, Maisons Paysannes de France. Connaissance du bâti ancien. Fiche organisation espaces dans le bâti ancien. Juin 2010.

Principe typologique des logements T2 et T3 à double et triple orientation, Cité HBM Perrache, Résidence Casimir Perrier (1929-1934), Quai Perrache, Lyon 2, Victor-Adrien Robert et Jean Marin architectes, © C. Marcot, ENSAL, CAUE Rhône Métropole (2008)



Cité HBM Perrache, 1932-1934, 35-39 Quai Perrache, Lyon 2, Victor-Adrien Robert, Jean Marin architectes, source : AC Lyon : 0001 Ph 0723 (v. 1964)



Évolutivité et résilience

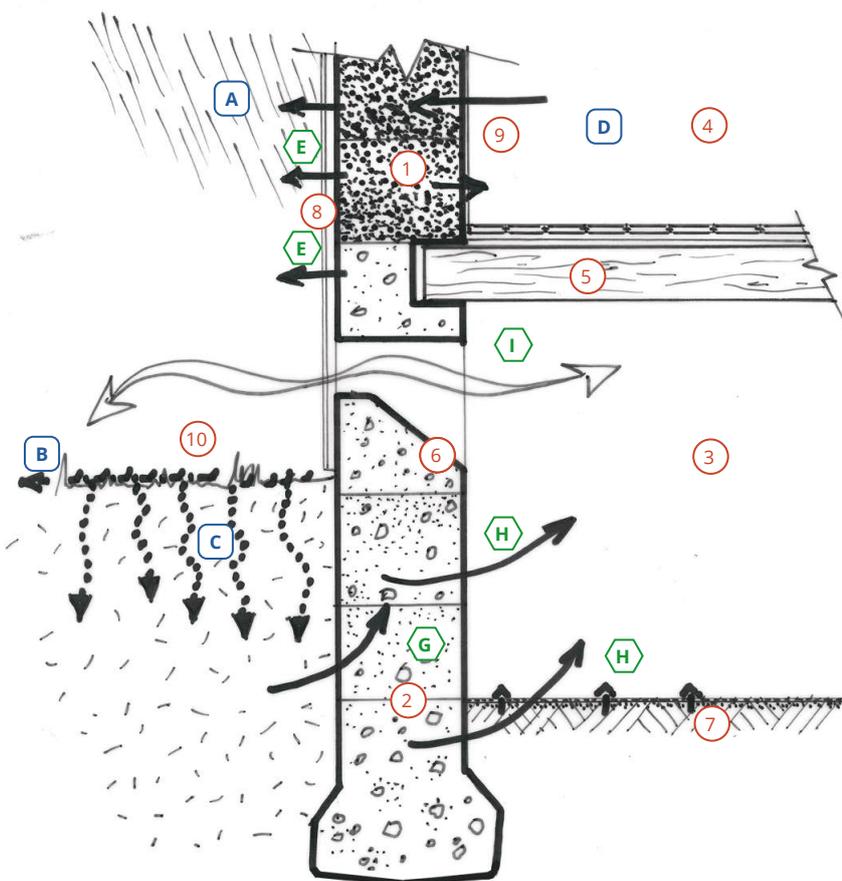
À l'instar des constructions anciennes, le bâti en mâchefer apparaît comme un bâti très « adaptable ». L'assemblage des éléments constructifs y est isostatique, c'est-à-dire qu'ils sont placés en « appui simple » ou en « articulation » ce qui permet de les remplacer à volonté. Du reste, le bâti en mâchefer a souvent pu être facilement transformé au cours de sa vie. Les reprises en sous-œuvre comme le percement d'une baie dans un mur de refend ou en façade par exemple y est aisé, à l'inverse de la construction en pisé de terre où l'exercice est plus délicat. Le bâti en pisé de mâchefer se prête également aisément à toutes sortes de transformations lourdes, y compris les surélévations. Plusieurs fiches de référence présentées en annexe du présent document témoignent de cette « transformabilité » du bâti en mâchefer.

Ces transformations sont souvent plus complexes pour les constructions en maçonnerie de béton armé, pour lesquelles les trémies ou les baies à ouvrir sur les voiles ferrailées et les dalles armées nécessitent des expertises préalables d'ingénierie des structures.

Si elles ont été correctement transformées au cours de leur vie, c'est-à-dire bien entretenues et épargnées d'interventions parasites, ces constructions anciennes présentent, comme on le verra plus loin, des qualités hygrothermiques intéressantes.

Régulation passive

En raison des caractéristiques spécifiques du matériau et de la manière dont il stocke et régule la chaleur et les transferts d'humidité, la maçonnerie massive épaisse de mâchefer, est associée à des propriétés d'inertie. En outre, les espaces-tampons en sous-sol et en comble des constructions ont des implications directes sur le confort des habitants.



Fonctionnement hygrothermique du mur en pisé de mâchefer, coupe verticale schématique en pied de façade

1. Mur de façade en maçonnerie de mâchefer banché
2. Mur de soubassement en béton de gravier banché
3. Sous-sol semi-enterré
4. Niveau de rez-de-chaussée surélevé
5. Plancher bas (têtes de solives sans contact avec la maçonnerie)
6. Larmier de cave et grille de ventilation
7. Sol perméable respirant (terre battue)
8. Mortier d'enduit extérieur capillaire (enduit chaux hydraulique)
9. Revêtement de paroi intérieur plus ou moins hygroscopique (enduit au plâtre naturel)
10. Sol extérieur perméable (terrain naturel) ou, à défaut, sol étanche avec contre-pente de ruissellement pluvial

CAUSES D'HUMIDITÉ

- A. Pluie battante – Humidification de la paroi
- B. Ruissellement pluvial en surface
- C. Infiltration gravitaire d'eau pluviale
- D. Vapeur d'eau excédentaire dans l'habitat

FONCTIONNEMENT NORMAL DU BÂTI

- E. Évaporation
- F. Migration de vapeur d'eau à travers la paroi
- G. Capillarité
- H. Transferts d'humidité
- I. Ventilation naturelle

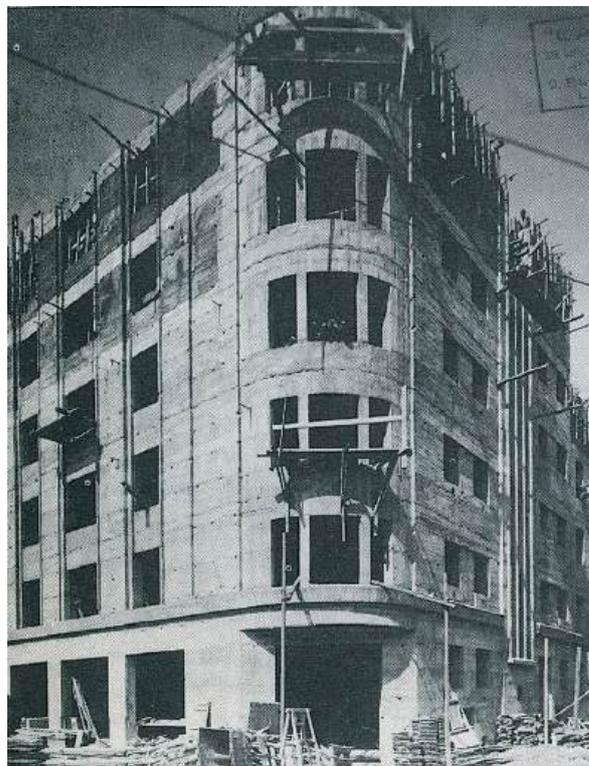
Si l'inertie fait souvent défaut aux édifices récents, elle est l'un des atouts principaux du bâti en pisé de mâchefer sur le plans thermique et hygrothermique. En hiver, les parois stockent la chaleur produite et la restituent dans l'habitat par rayonnement lent. En été, les parois épaisses et denses ont une capacité de déphasage thermique qui permet aux murs de freiner la pénétration de l'onde de chaleur en journée jusqu'au soir, à l'heure où le rafraîchissement par la ventilation naturelle par les fenêtres peut se faire.

Le plancher bas de rez-de-chaussée est construit non pas sur terre-plein, mais édifié sur un sous-sol, semi-enterré, constituant un local non chauffé (caves, ancien local de stockage du charbon reconverti en chaufferie...) et largement ventilé via des larmiers en pied de façade. Cette disposition constructive contribue à préserver le bâti de toute pathologie due à l'accumulation d'humidité.

Le plancher haut, quant à lui, est constitué par le plafond du dernier étage habité, qui peut être également le plancher des greniers. Sur le bâti en mâchefer, le volume des combles compris entre le plancher haut et la toiture n'est pas un espace destiné à être habité. Il a une fonction de tampon thermique permettant d'isoler l'habitation du froid en hiver et du chaud en été.

Ainsi toutes ces dispositions sont-elles particulièrement propices au confort de l'habitat en mâchefer et en font des ouvrages assez peu énergivores au regard d'édifices plus récents. Comme nous le verrons plus loin (Partie 2), ces caractéristiques constructives inhérentes à l'habitat en mâchefer constituent bien souvent des atouts stratégiques dans les projets d'amélioration thermique.

Savoir identifier et comprendre ces dispositions de l'habitat en pisé de mâchefer permet d'éclairer une réhabilitation raisonnée.



Ilot Jean Macé, place J. Macé à Lyon 7, Pierre Labrosse architecte, photo du chantier de construction, v. 1949, L'Avenir. L'entreprise coopérative

1.3. DIMENSIONS PATRIMONIALES DU BÂTI EN MÂCHEFER

Certains bâtiments du passé constituent un témoignage manifeste de traditions ancestrales que notre société est amenée à considérer à ce titre comme un patrimoine commun à préserver.

1.3.1. Une culture constructive

Parmi les ouvrages à (re)considérer pour ce qu'ils lèguent d'une culture commune passée, les ouvrages en mâchefer sont probablement appelés à figurer d'abord au titre de l'héritage immatériel, dont ils témoignent.

Depuis l'antiquité, l'architecture a toujours employé des matériaux naturels, comme la pierre et le bois. Si la pierre utilisée aujourd'hui est la même que celle qu'utilisaient les Romains à l'époque antique, de même pour le bois brut d'une certaine manière, le pisé de mâchefer quant à lui, est le résultat d'une invention humaine. Ce matériau présente donc un intérêt patrimonial à double titre.



Immeuble d'inspiration "classique", Cité HBM Groupe Ravat, 46 rue Delandine, Lyon 2 (1923-1932), Auguste Schaeffer architecte



Immeuble d'inspiration "prémoderne", Cité HBM Marius Donjon, 25 rue Louis Loucheur, Lyon 9 (1929-1933), Marius Pin architecte

Le premier intérêt tient à son caractère innovant. Le fait même qu'une époque ait inventé un matériau confère aux générations suivantes la responsabilité de ce legs. Le second intérêt relève de son évolution. En effet, depuis sa première composition qui a marqué son invention, il n'a cessé d'évoluer, jusqu'à donner le béton armé que nous connaissons aujourd'hui. De nos jours encore, le béton fait l'objet d'innovations, sur le plan structurel, matériel ou thermique : béton fibré, béton bas carbone, béton ultraléger, béton luminescent, béton connecté... Cette technique du gros œuvre, elle-même inspirée de celle du pisé de terre et développée dès le XVII^e siècle, perdure dans la technique des bétons coffrés. La valeur patrimoniale immatérielle de ces premiers bétons réside donc dans cette expression d'une création en mouvement.

Le site du Ministère de la Culture donne la définition suivante de la notion de patrimoine immatériel : « pratiques et savoirs dont chacun hérite en commun et qui s'efforcent collectivement de faire vivre, recréer et transmettre ». Les techniques de maçonnerie moulée

en mâchefer ont été pendant près d'un siècle et demi l'objet de développements continus, et plus particulièrement en Rhône-Alpes et à Lyon où elles furent le matériau de prédilection du logement ouvrier. Cela est vrai également pour les finitions des épidermes et des revêtements avec l'utilisation savante du ciment moulé pour les arêtes de murs, les corniches et les appuis de fenêtres. Il est significatif que le ciment naturel, très utilisé dans les modénatures de façades en mâchefer, ait fait l'objet de travaux de recherches scientifiques qui ont conduit à son classement en 2010 comme « matériau du Patrimoine ».

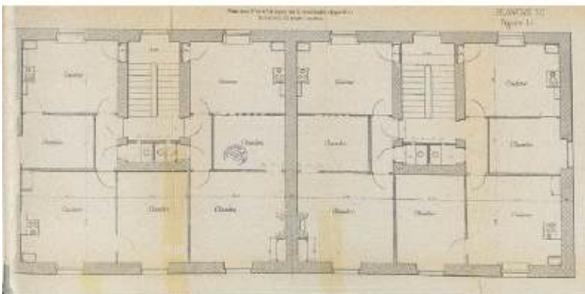
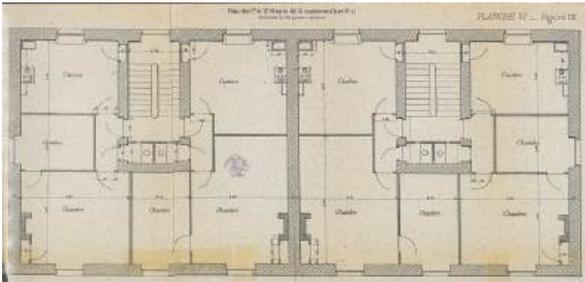
Comme le formule l'architecte Christian Marcot : « l'utilisation du béton de mâchefer, combinée à celle du béton armé, réfère d'une part à l'évolution de l'ancien message du pisé dont il améliore les performances et, d'autre part à la nouveauté qui arme le matériau. Hybride, cette solution constructive est une parfaite articulation entre la tradition qu'il incorpore et la modernité qu'il ouvre. Il correspond ainsi, au début du XX^e siècle, à un modèle historique. [...] Son adaptation



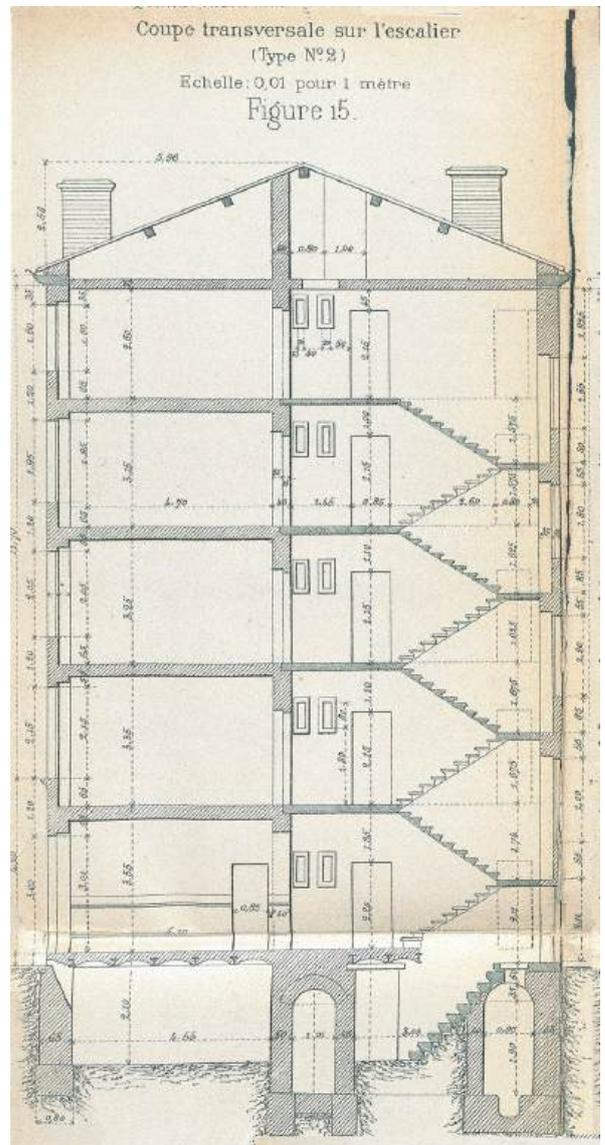
Rue des Serpollières, fin de chantier des habitations à bon marché de la Cité des États-Unis à Lyon 8, T. Garnier architecte, source : Archives municipales de Lyon, 4 FI 00335



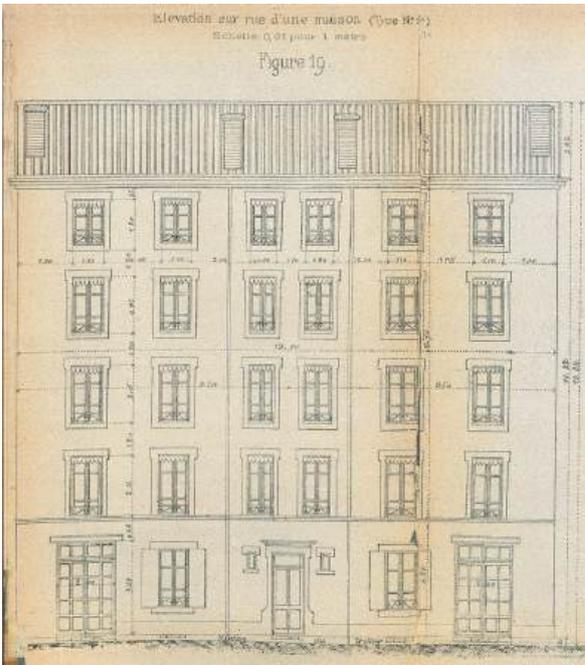
Premier immeuble d'habitations de la Cité des États-Unis, 1 Rue des Serpollières, Lyon 8, Tony Garnier architecte. Les trois immeubles « prototypes » ont été inscrits au titre des MH en octobre 2023, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Plan d'étage théorique d'un immeuble collectif type Mangini (n°1)



Coupe transversale théorique sur un immeuble collectif type Mangini (n°2)



Élévation théorique sur rue d'un immeuble collectif type Mangini (n°2)

Extraits de l'ouvrage F. Mangini, Bibliothèque Diderot ENS Lyon, Le Logement populaire à Lyon et sa région 1890-1940, t.1, Bulletin n°22 de la Société Académique d'Architecture de Lyon (2015)

possible à tous les programmes de constructions et tous les types de bâtiments procède du modèle architectural. Sa facture dépouillée, mettant en avant les dimensions structurelles et formelles plutôt que l'ornement, expose un modèle esthétique¹¹ »

1.3.2. Un patrimoine matériel en héritage

De manière patente, l'architecture en mâchefer renvoie aux diverses expressions architecturales de l'habitat : de l'hôtel particulier à la maison individuelle, en passant par l'immeuble de rapport ou le bâti de faubourgs, le pisé de mâchefer est constitutif de l'essence même d'un patrimoine architectural.

De la fin du XIX^e au début XX^e siècles, l'architecture domestique en pisé de mâchefer est un véritable marqueur identitaire du paysage bâti lyonnais. Singulièrement, elle porte même tout un pan de la mémoire sociale d'une population: celui des premières cités ouvrières et celui des Habitations à Bon Marché (HBM) en particulier. À Lyon, cette matérialité du mâchefer coïncide avec l'émergence d'une avant-garde du logement, portée par des promoteurs de renom comme l'architecte Tony Garnier qui l'utilisa dès 1905 dans toutes ses réalisations (villas, abattoirs et stade de la Mouche, hôpital Grange Blanche, Cité des États-Unis), et qui en fera même un marqueur esthétique de son architecture¹². Avant lui, on peut citer l'ingénieur, entrepreneur et mécène lyonnais, Felix Mangini, pionnier de « l'habitat abordable », qui réalisa plusieurs « modèles-types » d'opérations de logement collectif en pisé de mâchefer.

La reconnaissance dont ces illustres promoteurs de l'habitat populaire font aujourd'hui l'objet, implique de ne pas travestir leurs œuvres par des modifications substantielles, notamment à l'occasion de celles qui visent leur rénovation thermique, l'un des enjeux dont traitera la seconde partie de cette étude. Dès lors, et plus largement, les édifices en pisé de mâchefer réclament-ils probablement de bénéficier de toute l'attention nécessaire avant de procéder à la mise en œuvre d'un projet, qu'il soit destiné à leur entretien, leur restauration, leur réhabilitation ou même leur démolition¹³.

Suite à un constat national sur l'absence de protection au titre des monuments historiques du

patrimoine architectural, industriel et technique du XX^e siècle, le Ministère de la Culture et de la Communication a décidé en 1999 que la conservation et la mise en valeur de ces édifices seraient les principaux enjeux des prochaines années. À ce titre, fut créé un label « patrimoine du XX^e siècle », sans effet juridique mais destiné à promouvoir et diffuser la reconnaissance de ces édifices auprès du public. Lui a succédé récemment le « label Architecture contemporaine remarquable » instauré par l'article 78 de la loi sur la Liberté de Création, l'Architecture et le Patrimoine (LCAP) en 2016. « Ce label peut être attribué aux immeubles, ensembles architecturaux, ouvrages d'art et aménagements de moins de cent ans d'âge non protégés au titre des monuments historiques dont la conception présente un intérêt architectural ou technique suffisant. [...] Obligation est faite au propriétaire du bien labellisé d'informer le préfet de tout projet de travaux sur le bien¹⁴. »

En outre, les édifices empreints d'une réelle valeur patrimoniale, peuvent être inscrits ou classés au titre des Monuments Historiques. On peut citer par exemple la maison de François Coignet, construite en 1855 à Saint-Denis (93) et inscrite aux Monuments Historiques depuis 1998 mais également, depuis octobre 2023, des trois immeubles prototypes de la Cité Tony Garnier située dans le huitième arrondissement de Lyon.

Soulignons enfin, à une échelle plus large, l'existence des sites patrimoniaux remarquables (SPR) dont la vocation est de mieux protéger le patrimoine de certains territoires, au titre de la qualité des ensembles urbains, architecturaux ou paysagers qu'ils constituent. Se substituant aux anciens dispositifs de protection (ZPPAUP et AVAP¹⁵), les sites patrimoniaux remarquables sont : « les villes, villages ou quartiers dont la conservation, la restauration, la réhabilitation ou la mise en valeur présente, au point de vue historique, architectural, archéologique, artistique ou paysager, un intérêt public¹⁶. » Des bâtiments en pisé de mâchefer peuvent ainsi communément, à Lyon ou ailleurs, se retrouver dans ces périmètres de protection. C'est le cas par exemple à Albigny-sur-Saône et à Neuville-sur-Saône où de nombreux bâtiments en mâchefer y sont présents. Il est important de connaître l'existence de ces diverses protections à l'occasion de projets, pour les utiliser à bon escient, comme levier de décisions et de choix opérationnels.

11. Architecture contemporaine en site historique – 6 sites lyonnais en débat sous la direction de Christian Marcot – CERTU, 2009.

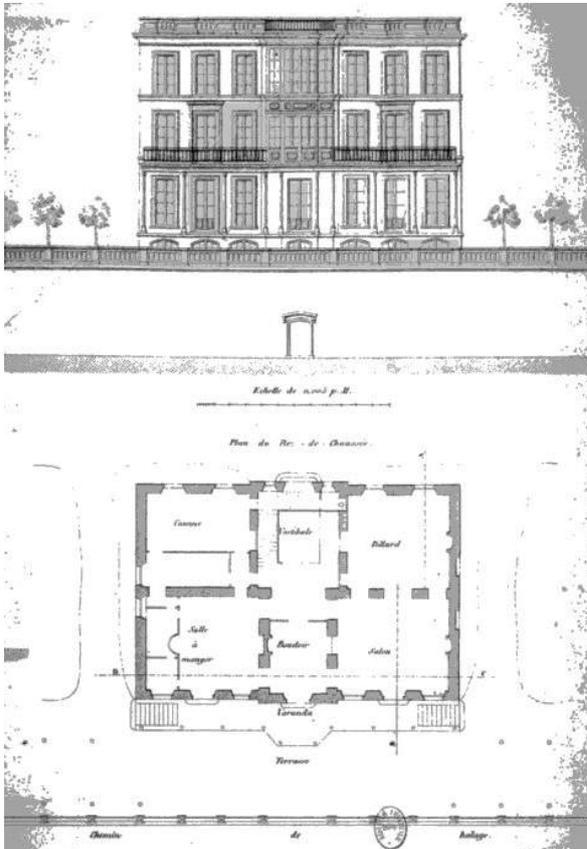
12. *Des matériaux pour la Cité industrielle : Tony Garnier et les premiers bétons*, dans Actes du 2^e Congrès francophone d'histoire de la construction (Lyon, 2014).

13. AULAS Mathilde, *Les matériaux de construction peuvent-ils être patrimoine ?* 2014-2015 p 103-104.

14. Site : culture.gouv.fr

15. Zone de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager ; Aire de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine.

16. Site : culture.gouv.fr



Plan et élévation de la maison Coignet, 1853, 72 rue Charles Michels, Saint-Denis (93), François Coignet, ingénieur et Théodore Lachez, architecte, source : L'Ingénieur, 1st November 1855, Plate XXXIII



Maison du directeur de l'ancienne usine Coignet construite en 1853 à Saint-Denis (93), 2017, © F. Gaboriau



Premier immeuble en béton à Lyon, 1911, 2 rue S^t-Cyr et quai Jâyr, Lyon 9^e, Emmanuel Cateland architecte (inscrit à l'inventaire des monuments historiques en 1991)



Habitat ouvrier, v. 1925-1927. Les petites Cité Tase à Vaulx-en-Velin (69) classées en Périmètre d'Intérêt Patrimonial (PIP) de la Métropole de Lyon



Habitat Collectif ouvrier, v. 1925-1929. Les grandes Cité Tase à Vaulx-en-Velin (69) classées en Périmètre d'Intérêt Patrimonial (PIP) de la Métropole de Lyon – Réhabilitation Sollard, Groupe 1001 vies Habitat (MOU:), AA Group, Archipat (MOE)

Logements collectifs privés en copropriété, Îlot Part-Dieu, 1892-1913,
19 rue d'Essling, Lyon 3, Félix Mangini constructeur (société des loge-
ments économiques)



2 CARACTÉRISATION PHYSIQUE DU MATÉRIAU

Les qualités du mâchefer sont reconnues de très longue date par de nombreux praticiens de la construction. Une note technique de la revue « La construction moderne » parue en 1892, décrit le programme de logement collectif édifié à Lyon par la Société des logements économiques de l'entrepreneur Felix Mangini (Ilôt desservi par les rues de la Rize, d'Es-sling, de la Bannière et de la Villardière) comme « de grande économie et salubrité grâce à l'emploi au-dessus du rez-de-chaussée élevé en maçonnerie, de béton de mâchefer (...) donnant des murs résistants mieux à l'incendie que ceux, plus coûteux, faits de matériaux calcaires et, de plus, moins bons conducteurs de la chaleur, ce qui rend les habitations moins froides en hiver et moins chaudes en été. » Les premiers bétons que l'on trouve dans la littérature de l'époque tantôt sous la dénomination de béton de gravier, tantôt de béton de mâchefer, selon la nature des agrégats utilisés, sont apparus en effet rapidement comme un matériau de prédilection du logement populaire ouvrier.

« [...] une grande économie et salubrité, grâce à l'emploi [...] de moellons ou de béton de mâchefer, formant un véritable monolithe, très usité à Lyon, [...] ce qui rend les habitations moins froides en hiver et moins chaudes en été. »

Propos rapportés de l'entrepreneur Félix Mangini cité dans « Maisons économiques de la ville de Lyon », article de La Construction Moderne, mars 1892, Le Logement populaire à Lyon et sa région 1890-1940, t.1, Bulletin n°22 de la Société Académique d'Architecture de Lyon, février 2015

Les qualités mécaniques et thermiques dont le mâchefer fut paré à cette époque étaient tirées de simples constats empiriques et ces caractéristiques n'ont guère été objectivées depuis.

L'objet du présent chapitre a pour but de livrer aux acteurs du bâtiment une approche scientifique des caractéristiques – mécaniques, hygrothermiques et acoustiques – du mâchefer de construction et de rendre compte objectivement de la variabilité de ces caractéristiques.

2.1 CONTEXTE DE LA CAMPAGNE DE MESURES

2.1.1 Objectifs

Si nous avons pu voir précédemment que les édifices en pisé de mâchefer pouvaient être assimilés, par de nombreux aspects – morphologie, mode constructif, enveloppe, etc. – à la grande famille du bâti ancien, notre propos est à présent de faire le point sur les éléments de caractérisation propres au matériau mâchefer.

Les attentes des architectes, maîtres d'œuvre et artisans du bâtiment, mais également des maîtres d'ouvrage, qu'ils soient particuliers ou professionnels, sont fortes, tant cette connaissance conditionne les stratégies de réhabilitation et d'interventions sur ces ouvrages. En effet, les savoirs pratiques s'étant progressivement éteints avec l'abandon de cette technique constructive, nos connaissances sur le bâti en pisé de mâchefer semblent aujourd'hui insuffisantes pour arbitrer sereinement des choix de travaux pertinents.

Or, comme sur toute construction existante à rénover, les spécificités constructives du bâti, les caractéristiques techniques de l'ouvrage, notamment les aspects mécaniques, hygrothermiques et physico-chimiques des matériaux employés doivent être pris en compte. C'est la condition *sine qua non* pour éviter les désordres et pathologies dus à des interventions inappropriées.

Le groupe de travail réuni entre 2017 et 2020 par le CAUE Rhône Métropole a permis de partager des initiatives, des connaissances et de livrer des premières conclusions. En particulier, dans la continuité de l'étude produite par le bureau d'études Amstein+Walthert en 2019 à l'occasion de la mission confiée au CAUE Rhône Métropole par le bailleur social Grand Lyon Habitat sur son parc d'HBM, de premiers essais ont été engagés par le laboratoire Géomatériaux du CEREMA à Bron et par le laboratoire Transformations de l'École nationale d'architecture de Saint-Etienne et de l'École des Mines de Saint-Etienne.

Cette première étude a été complétée en 2022 par une campagne d'essais sur des échantillons de pisé de mâchefer obtenus sur plusieurs chantiers lyonnais, destinée à parfaire la connaissance des caractéristiques physiques du matériau et, *in fine*, de problématiser les incidences sur les projets de réhabilitation et d'amélioration thermique de ce patrimoine.



Chantier de démolition sis 25-27, rue Félix Brun, Lyon 7, ZAC des Girondins, 2018, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Recueil d'échantillons de béton de mâchefer, 2017, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

Le présent chapitre vient donc rassembler les données disponibles et produites sur le mâchefer de construction du bassin lyonnais.

Ces connaissances, livrées ci-après donneront lieu à des recommandations pratiques pour la réhabilitation de l'habitat en mâchefer dans la seconde partie de cette étude.

Nota bene : À noter que les résultats exhaustifs des essais de caractérisation en laboratoire des mâchefers de construction réalisés par le Cerema sont disponibles sur demande auprès du CAUE Rhône Métropole.

2.1.2. Origines des prélèvements

Les essais de laboratoire effectués dans le cadre de cette investigation sont issus de prélèvements réalisés par le CAUE Rhône Métropole sur quatre chantiers de rénovation ou de démolition situés à Lyon :

- Site n°01
18, rue Christophe Crepet, Lyon 7^e arrondissement
- Site n°02
21, avenue des Acacias, Lyon 3^e arrondissement
- Site n°03
80, rue Philippe De Lassalle, Lyon 4^e arrondissement
- Site n°04
72, boulevard des États-Unis, Lyon 8^e arrondissement.

Des fiches d'identification des sites de prélèvement sont jointes en annexe.

Nota bene : Les essais réalisés en 2018 ont été menés sur des échantillons issus de chantiers de démolition sis, 25,27, rue Félix Brun, Lyon 7^e arrondissement (ZAC des Girondins).

2.1.3. Avertissement

Par nature non standardisé, le pisé de mâchefer est un matériau qui varie en fonction de sa formulation et de la provenance de ses composants. Il serait d'ailleurs plus juste de parler non pas « du pisé de mâchefer », mais « des pisés de mâchefer ».

En dehors de toute normalisation, les pisés de mâchefers restent ainsi marqués par cette forte hétérogénéité, caractéristique des fabrications artisanales. Les résultats de tests et de mesures présentés ci-après ne peuvent constituer par conséquent des données de référence valables pour tous les pisés de mâchefer.



Prélèvement 2017, détail d'un échantillon prélevé 25, 27 rue Félix Brun, Lyon 7^e (ZAC des Girondins), © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Prélèvement Site n°1, 2019, détail d'un échantillon prélevé 18 rue Christophe Crepet, Lyon 7^e © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Carottages réalisés sur un immeuble d'habitation de la Cité HBM des États-Unis (Tony Garnier architecte) lors du chantier de réhabilitation énergétique en 2021, 72, boulevard des États-Unis, Lyon 8, entreprise : BLB Constructions, maître d'ouvrage : GLH, maître d'œuvre : C&P architectes, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Prélèvement Site n°2, 2019, détail d'un échantillon prélevé 21 avenue des Acacias, Lyon 3^e © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Prélèvement Site n°3, 2019, détail d'un échantillon prélevé 80 rue Philippe De Lassalle, Lyon 4^e © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Échantillon prélevé en 2020 sur la Cité HBM Perrache, sise 41 Quai Perrache, Lyon 2, lors du chantier de réhabilitation de la résidence Casimir Perrier, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Prélèvement Site n°4, 2019, détail d'un échantillon prélevé 72, boulevard des États-Unis, Lyon 8^e © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

2.2. ASPECT ET COMPOSITION

2.2.1. Spécifications d'aspect

Comme nous le précisons plus haut, le mâchefer de construction est un matériau composite, produit à base de déchets industriels (scories de houille issues de la combustion des hauts fourneaux¹⁷) associés principalement à de la chaux, du ciment et du sable, auxquels il peut se trouver mêlé avec divers adjuvants : graviers, pouzzolane, déchets de terre cuite, argile cailloutis, petits galets, etc. Les échantillons recueillis sur quatre sites de chantier lyonnais témoignent par leur aspect de cette extrême variabilité, ne serait-ce qu'en termes de teinte : **les échantillons arborent une couleur grise, caractéristique des résidus de combustion de hauts fourneaux, dont le spectre de couleur s'étend du gris cendré au gris charbonneux, plus ou moins coloré par la teinte des composants** (scories elles-mêmes ou granulats).

Les échantillons recueillis font également état d'un aspect poreux qui confère au matériau cette caractéristique d'être léger par comparaison à d'autres blocs de maçonnerie comme la brique ou le béton. Certains s'avèrent relativement friables au toucher.

2.2.2. Composition du matériau

Le pisé de mâchefer présente, en quantité variable, les composants suivants :

- **cedres et scories de houille pilées ou non ; et/ou résidus et scories de fonderie métallurgiques (laitiers) pilés ou non ;**
- **chaux grasse ou hydraulique, ciment ;**
- **granulats divers (sable, graviers, pouzzolanes naturelles ou artificielles pilées ou non) ;**
- **matériaux de rebuts divers (débris de pierres, terres quelconques cuites pilées ou non, cailloutis).**

Dans son *Dictionnaire encyclopédique et biographique de l'industrie et de l'art industriel* (1881-1891), Eugene-Oscar Lami indique : « Les mâchefers sont du silicate d'alumine coloré par un peu de fer ; celui-ci provient, soit des pyrites du charbon, soit, dans les feux

17. À noter que le terme « mâchefer » désigne également depuis 1970 les résidus des usines d'incinération des ordures ménagères. L'utilisation de ces résidus ne sont pas admis dans le bâtiment, et leurs caractéristiques sont très différentes du mâchefer de hauts fourneaux.

de la forge, de l'oxydation du fer que l'on y chauffe : il semble donc que ce sont les cendres du combustible qui ont rongé le fer, d'où le nom de mâchefer¹⁸ ».

Un doute subsiste sur le fait que des laitiers de hauts-fourneaux (résidus issus de la fusion du métal) aient été utilisés dans le pisé de mâchefer, la traçabilité de ces matériaux étant difficile à établir de nos jours. Cependant, la littérature historique laisse penser que la grande majorité des bétons utilisaient des résidus de combustion de charbon, moins problématiques pour l'environnement que les laitiers¹⁹.

Dans son ouvrage de 1880 intitulé *Matériaux de toute espèce, employés dans les constructions depuis leur fondation jusques et y compris leur décoration*, Théodore Château, chimiste et industriel, corrobore cette hypothèse en parlant de scories de forges : « Il ne faut pas confondre les scories de forges avec les laitiers de hauts fourneaux. Les scories sont ces crasses de forges qu'on appelle communément mâchefer ; les laitiers sont des produits vitreux, ordinairement compacts, et qui n'ont aucune qualité pouzzolanique. On pulvérise les scories ou mâchefer, et on les passe au tamis de fil de fer très serré, de manière à les réduire à la grosseur de la poudre à canon²⁰. »

2.3. NATURE PHYSICO-CHEMIQUE ET TOXICITÉ

À ce jour, aucune étude probante n'existe sur le sujet de la toxicité hypothétique des mâchefers de construction. La caractérisation des risques pour la santé et l'environnement liés à ce matériau ne relevant ni des champs de compétence du Cerema ni de ceux du CAUE Rhône Métropole, les enquêtes susceptibles d'éclairer cet aspect sanitaire n'ont pas fait partie du périmètre d'investigation de la présente étude et aucune analyse chimique n'a été intégrée au programme d'essais en laboratoire.

Néanmoins, l'étude expérimentale menée en 2018 par un groupe d'étudiants de l'INSA de Lyon en partenariat avec le CAUE Rhône Métropole et le laboratoire

18. Citation tirée de l'ouvrage « De François Coignet à Tony Garnier : le pisé de mâchefer, un matériau oublié de l'ère industrielle, » Société d'histoire de Lyon - Archives et Architecture : Mélanges en mémoire, 2015.

19. Gestion des constructions en béton de mâchefer dans le cadre des politiques nationale d'amélioration thermique de l'habitat – 5 GEN – STRATENTER – Y. Anbri, C. Bouniol, J-E. Debay, A. Gourbière, N. Hastir, F. Schmitt, Y. Yang.

20. D'après la description qu'en dresse Théodore Château, la formulation du mortier de scories de forge se compose de huit parties de chaux éteinte par immersion, mesurée en poudre, trois parties de ciment et trois parties de scories réduites en poudre.

SRATENTER²¹ avait permis de mettre en lumière la présence potentielle de laitiers dans certaines cendres de mâchefers, dont l'innocuité environnementale et sanitaire dépend de la teneur en résidus divers – métaux lourds (mercure, plomb, cadmium, arsenic, chrome VI), sulfates, COT (carbone organique total) – et du taux d'imbrûlés. Les études du laboratoire DEEP de l'INSA de Lyon avaient été conduites sur deux échantillons de pisé de mâchefer issus de travaux de démolition sur un bâtiment industriel du septième arrondissement de Lyon et un bâtiment de logement de la Cité HBM de Perrache²². Cela ne présage pas de résultats équivalents sur tous les mâchefers de construction.

Bien que les laitiers ne soient pas les scories les plus répandues dans les maçonneries de mâchefer – ces dernières étant plutôt en général à base de cendres issues de la combustion de la houille –, les résultats doivent tout de même être considérés pour apprécier le risque de toxicité du pisé de mâchefer et évaluer les conditions d'une possible réutilisation des déchets de

chantier (Se reporter à la 2^e partie – 3.3 Déconstruire partiellement et réemployer).

Des principes de précautions sont donc requis pour ce qui concerne les risques liés à la pollution environnementale des produits issus de la démolition des maçonneries de mâchefer, notamment en cas de lixiviation des gravats. Si l'étude citée plus haut a montré que les bétons de mâchefer présentaient *a priori* un faible comportement à la lixiviation de métaux lourds, il convient néanmoins de prendre en compte ce risque dans la gestion des déchets de chantier et dans leur traitement. En effet, l'étude des résidus de pisé de mâchefer issus de l'opération de démolition-reconstruction du pavillon H de l'hôpital Edouard Herriot dans le huitième arrondissement de Lyon avait démontré, *a contrario*, que lorsque le mâchefer était en contact avec une forte quantité d'eau, il pouvait dégager des métaux instables et devenir potentiellement dangereux pour la santé.

Par ailleurs, il est à noter que des praticiens de la maîtrise d'œuvre témoignent du fait que des diagnostics spécifiques font parfois état de la présence d'amiante dans des maçonneries de mâchefer notamment dans des ouvrages constitutifs de parois coupe-feu de locaux à risques (gaines techniques, locaux poubelles, cloisons de circulations, etc).

21. Gestion des constructions en béton de mâchefer dans le cadre des politiques nationale d'amélioration thermique de l'habitat – 5 GEN – STRATENTER – Y. Anbri, C. Bouniol, J-E. Debay, A. Gourbière, N. Hastir, F. Schmitt, Y. Yang.

22. 18, rue Christophe Crepet, Lyon 7 et 35,39, quai Perrache, Lyon 2 (HBM Casimir Perrier)



Cité HBM Perrache, Résidence Casimir Perrier, 1929-1934, avant réhabilitation, 41 Quai Perrache, Lyon 2, Victor-Adrien Robert et Jean Marin architectes



Échantillon de pisé de mâchefer prélevé sur le chantier de démolition sis 25-27 rue Félix Brun, Lyon 7, ZAC des Girondins, 2018, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

Au vu de ces observations, toutes les mesures de précaution s'imposent par conséquent lors des travaux d'intervention sur le matériau.

Sur chantier, masques et lunettes sont de rigueur pour les ouvriers exposés afin d'éviter l'inhalation ou l'ingestion de poussières potentiellement nocives.

En plus de ce type d'équipements, des systèmes d'aspiration à la source des poussières dégagées lors des travaux de percements et de découpage (carottage, sciage, meulage,...) sont également à recommander. Lors des travaux de démolition, l'opportunité d'un arrosage est à évaluer pour limiter les dégagements de poussières au-delà de la zone de chantier proprement dite.

En tout état de cause, les principes de précaution doivent guider la conduite de chantiers lors des opérations en sites occupés afin de protéger les usagers présents in situ ou à proximité immédiate.



Échantillon de béton de mâchefer prélevé sur un chantier de démolition, 80 rue Philippe De Lassalle à Lyon 4, 2019, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

2.4. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET COMPORTEMENTS MÉCANIQUES

L'expérimentation menée par les laboratoires d'essais du Cerema a permis d'obtenir des résultats significatifs sur les propriétés physiques et mécaniques des mâchefers de construction. Les essais menés ont portés sur les données suivantes :

- masse volumique ;
- masses volumiques des grains ;
- résistance mécanique à la compression ;
- résistances et modules en compression sous différentes conditions hydriques.

Le travail réalisé a permis de confirmer la pertinence des méthodes expérimentales développées pour les mâchefers de construction dans le précédent travail

du Cerema (à partir d'un unique site de prélèvement, rapport C16ES0031 – nov. 2018), et d'en proposer de nouvelles, notamment pour examiner l'influence de l'eau sur les résistances en compression.

2.4.1. Masse volumique ρ

La masse volumique agit sur la capacité du matériau à stocker la chaleur (plus le matériau est dense, plus il est capable de stocker la chaleur).

D'après l'étude du BE Amstein+Walthert, les données disponibles dans la littérature évoquent des masses volumiques très faibles comprises entre 800 et 900 kg/m³²³. Le journal Techniques de l'ingénieur du 1^{er} décembre 2004 indique une masse volumique comprise entre 800 et 1 000 kg/m³.

Les analyses en laboratoire lors de la première campagne d'essais du Cerema en 2018 avaient indiqué une masse volumique de 1 100 à 1 200 kg/m³ sur le bloc prélevé²⁴.

Quant aux divers échantillons testés en 2022, ils révèlent des masses volumiques sèches relativement faibles mais marquées par une forte dispersion, comprise entre 1 106 et 1 556 kg/m³ (Résultats d'essais du Cerema – Site de Bron), et entre 1 141 et 1 424 kg/m³ (Résultats d'essais du Cerema – Agence de Strasbourg).

De manière générale, on peut retenir que le pisé de mâchefer possède une densité relativement faible et qu'il peut être considéré comme un matériau de « maçonnerie légère ». **Une plage de masse volumique comprise entre 1 000 kg/m³ et 1 400 kg/m³ peut-être retenue, avec une valeur intermédiaire de 1 200 kg/m³.**

À titre de comparaison, le béton plein a une masse volumique qui oscille entre 2 300 et 2 600 kg/m³²⁵. Des produits de construction en terre crue (pisé, briques...) montrent couramment des valeurs entre 1 500 et 2 000 kg/m³.

Du point de vue de sa masse volumique, le pisé de mâchefer s'apparente à un béton de pouzzolane (densité de 1 000 à 1 600 kg/m³)²⁶.

23. Etienne VILLEMOT, Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer : volet thermique, hygrothermique et énergétique – étude comparative des réhabilitations et méthodologies. Amstein+Walthert pour Grand Lyon Habitat, 2019.

24. Cerema rapport C16ES0031 – nov. 2018.

25. Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey, L'isolation thermique écologique, 2023.

26. Ibid

Il convient également de souligner qu'au sein d'un même site de prélèvement, les échantillons montrent une dispersion moindre, des écarts de l'ordre de 150 kg/m³ pouvant être relevés. Cela démontre l'hétérogénéité du produit, même au sein d'une provenance unique (autrement dit au sein d'un même édifice).

Nota bene : les masses volumiques mesurées sur les « grains » de mâchefer sont supérieures à celles obtenues sur les blocs (comprise entre 1 585 et 1 960 kg/m³), ce qui est logique car la masse volumique des grains exclut en grande partie la macroporosité.

2.4.2. Porosité Φ

En considérant que les blocs secs ne sont constitués que de « grains » et de pores, il est possible de calculer la porosité (volume des vides / volume total) du matériau, pour chaque échantillon. La porosité est une valeur qui s'exprime sans unité. « C'est le taux d'espace « vide » dans le matériau. Selon la taille des pores et leur degré de connexion, la perspiration, l'hygroscopicité et la capillarité du matériau seront modifiées²⁷. »

D'après l'analyse en laboratoire réalisée en 2018 par le Cerema, « les échantillons de pisé de mâchefer étudiés avaient une porosité de 32 %. Cette valeur témoigne d'un matériau de construction très poreux.

Les essais menés en 2022 sur de nouveaux échantillons confirment cette porosité importante (et connectée) en l'infléchissant à la baisse, avec une valeur moyenne de 23 %. Cependant, en dehors du site n°2, de faible porosité, les autres échantillons présentent une proportion de vides macroscopiques relativement élevée, de l'ordre de 25 à 30 % du volume total.

Par comparaison, le pisé de terre possède une porosité qui avoisine 36% et les bétons pleins « classiques » de l'ordre de quelques pourcents seulement²⁸. »

Un granite compact non fracturé présente couramment des porosités très faibles, de l'ordre de 0,5 à 3 %. Les « basaltes » utilisés en construction, pouvant désigner aussi bien des matériaux fins très compacts que des matériaux beaucoup plus vacuolaires (en fonction de leur mode de formation géologique) peuvent présenter des porosités variant de 0,5 à plus de 30 %. Enfin, à l'extrême, le béton cellulaire peut atteindre plus de 80 % de porosité.

De manière générale, ces valeurs sont à considérer comme des ordres de grandeur. D'une part, elles peuvent varier significativement en fonction des méthodes de mesure, qui vont cibler des vides plus ou moins macro- ou microscopiques, accessibles à l'air / à l'eau / au mercure / etc. D'autre part, la valeur de porosité ne présage pas nécessairement des capacités d'interaction du matériau avec l'eau. Si les pores ne sont pas connectés par exemple, l'eau n'atteindra que la frange superficielle du matériau, et ne pourra pas l'imbiber en profondeur.

Cette porosité importante du pisé de mâchefer qu'il convient néanmoins de relativiser est à mettre en relation avec les phénomènes de capillarités pointés un peu plus loin ci-dessous.

2.4.3. Résistance à la compression σ

Lors des essais réalisés en 2022, les résistances en compression du mâchefer sont apparues hétérogènes et dépendantes de la teneur en eau du matériau. Le matériau sec (c'est-à-dire stabilisé dans les conditions ambiantes du laboratoire soit 40 à 60 % d'humidité relative) est systématiquement le plus résistant, malgré des valeurs dispersées d'un site à l'autre, mais aussi couramment au sein d'une même provenance. **Les résistances moyennes mesurées sur les différents sites vont de 1,1 à 4,2 MPa, avec des écarts-types de 15 à 35 % de la valeur moyenne.**

Mesurée lors des premiers essais en laboratoire effectués en 2018, la résistance à la compression avait été légèrement supérieure, située entre 1.5 à 4.5 MPa²⁹.

À titre de comparaison, les pisés de terre non stabilisés montrent couramment des résistances en compression comprises entre 1 et 2 MPa (et ils sont beaucoup plus sensibles à l'eau que les mâchefers puisqu'ils ne supportent pas la saturation).

En condition saturée (c'est-à-dire avec une teneur en eau comprise entre 22 à 28%), la résistance chute de manière variable en fonction des produits testés, avec des différences de 17 à 50 % relevées.

Une forte résistance à sec n'est pas gage d'insensibilité à l'eau : ainsi, les produits les plus solides en condition sèche sont ceux qui ont présenté la chute de résistance la plus forte en condition saturée. L'expérimentation montre également qu'une exposition à

27. Cerema rapport C16ES0031 – nov. 2018.

28. Ibid

29. CEREMA. Rapport, Mâchefer de construction, Essais en laboratoire, 2018

90 % d'humidité relative (humidité « normale haute » prolongée), correspondant à une teneur en eau de seulement 1 à 2 %, peut être suffisante pour obtenir des chutes de résistance significatives. Il est toutefois probable que les bâtiments anciens aient déjà subi de telles conditions, ce qui constitue un indice positif sur leur tenue générale à l'eau même en conditions pathologiques (peu d'écart entre les résistances saturées et à 90 % d'humidité relative).

La maîtrise de l'eau autour d'un mur en mâchefer est cependant toujours un élément sensible. Les essais montrent une dépendance à la teneur en eau de la résistance du matériau, la valeur moyenne à sec étant la plus favorable. Cela signifie que les mâchefers sont sensibles à l'eau et peuvent perdre une part de leur résistance en fonction des conditions hydriques (même s'ils ne se désagrègent pas comme pourraient le faire des argiles dans un matériau de terre crue). Par ailleurs, leur déformabilité n'est pas systématiquement affectée par l'imbibition : ainsi, bien qu'elle fasse baisser sa résistance, une humidification ponctuelle du pisé de mâchefer n'entraînera pas nécessairement de déformations significatives sur un mur existant.

Pour des opérations de rénovation, il sera donc vraisemblablement plus sécuritaire de travailler avec des hypothèses de résistances à 90 % d'humidité relative plutôt qu'avec l'hypothèse de résistance du matériau à sec qui peut s'avérer excessivement optimiste.

2.4.4. Résistance à l'arrachement

La question de la fixation dans la maçonnerie en mâchefer est un sujet délicat. En effet, le matériau étant réputé friable et hétérogène d'un bâtiment à l'autre, voire d'un lit de maçonnerie à l'autre sur une même construction, il n'existe aucun produit sous avis technique.

Au vu de la diversité de ces supports mais également de la diversité des produits utilisés pour réaliser des fixations dans ce type de maçonneries (chevilles à béton, spits, chevilles à frapper, clous en PVC, vis à béton en acier sans cheville³⁰...), les essais de résistance à l'arrachement ont été exclus de la campagne de tests mécaniques réalisés par le Cerema.

30. Les anciens utilisaient des chevilles en bois fixées sans perçage préalable dans la maçonnerie aux dires de M. Claude Dub de l'entreprise Iso Bois Construction - Propos recueillis par M. Villey (Cerema).



Presse utilisée pour les écrasements lors des essais mécaniques en laboratoire, © Cerema



Écrasement d'une éprouvette de mâchefer surfacée au plâtre, © Cerema

Toutefois, sur deux constructions en pisé de mâchefer ayant fait l'objet d'un retour d'expérience³¹ (voir fiches en annexe), les résultats de tests à l'arrachement réalisés lors des phases de préparations de chantier préalables à des travaux d'isolation thermique par

31. 16, rue Jean Marie Duclos, 69005 Lyon ; 14, rue Martin, 69003 Lyon.



Sur ce chantier situé 14 rue Martin à Lyon 3, les tests à l'arrachement réalisés par le fabricant se sont révélés concluants. Aucune mise en œuvre spécifique n'a donc été requise pour la pose des panneaux isolants en fibres de bois collés-chevillés sur le mur en béton de mâchefer, © Aerial architectes

l'extérieur³², ont permis de dresser les observations suivantes :

- les valeurs de résistance à l'arrachement sont dispersées, variant de 800 à 2700 N dans un cas (16 rue Duclos), et de 1100 à 2200 N dans l'autre (14 rue Martin), témoignant de l'hétérogénéité de la maçonnerie, à laquelle s'ajoutent les incertitudes propres aux essais ;
- les arrachements se produisent systématiquement par rupture en glissement le long du contact entre la cheville et la maçonnerie de mâchefer, sans rupture du support, ce qui tend à montrer que les maçonneries concernées restent a priori suffisamment robustes pour supporter l'effort de traction correspondant à la résistance au frottement entre la cheville et son support ;
- les calculs permettent, sur la base d'une quinzaine d'essais réalisés par site, de retenir une valeur correspondant à une classe 4 de résistance

32. 16, rue Duclos, Lyon 5 et 14, rue Martin, Lyon 3.

mécanique³³. Cette valeur moyenne basse, obtenue après application d'un coefficient de sécurité additionnel, permet de préconiser une densité suffisante de chevilles pour fixer le dispositif d'ITE.

2.4.5. Notions de tenue au feu

La conductivité thermique d'un pisé de mâchefer, soit son aptitude à transmettre le flux de chaleur, est faible (0,43 à 0,56 W/m.K). Il est à classer parmi les matériaux incombustibles (M0) dans la classification française (norme NP P. 92.507).

On estime que le pisé de mâchefer possède un bon comportement au feu, comparable à celui du béton, car il présente une inertie à la propagation du flux de chaleur dans sa masse, et la température ne s'y élève que lentement lorsqu'il est soumis à de hautes températures.

Cependant, il est à noter que les performances du pisé de mâchefer peuvent être plus ou moins affectées en fonction de la température maximale atteinte, de la durée de l'incendie mais également de la composition du matériau et de sa porosité (rapport eau/scories, nature du liant et des granulats) qui, comme nous l'avons souligné, peuvent être très variables d'un édifice à l'autre.

Lorsque la température atteint plusieurs centaines de degrés Celsius, des transformations microstructurales peuvent avoir lieu dans l'épaisseur des premiers centimètres du mur, et sont susceptibles d'entraîner une chute de la résistance à la compression.

On rappellera également que la résistance au feu requise dépend aussi du type de mur (porteur/autoporteur et/ou séparatif), du niveau de sollicitation mécanique, de sa masse volumique, du fait que le mur soit enduit ou non, de la présence d'éventuels percements (passages de gaines, conduits...), etc.

Les solutions constructives vis-à-vis du risque incendie seront donc adaptées en fonction de la famille du bâtiment³⁴ (masse combustible mobilisable, comportement au feu des éléments et produits, traitement des étanchéité aux jonctions façade-planchers, degré coupe-feu du mur mitoyen, règle du C

33. d'après le cahier CSTB 3035_v3 (classes allant de 1 à 8, la classe 1 étant la meilleure).

34. En matière de sécurité incendie, le terme « famille » fait référence à une classification des bâtiments en fonction de critères tels que leur usage, leur hauteur, leur superficie, leur configuration, etc. Cette classification est utilisée pour déterminer les normes et les exigences spécifiques en matière de sécurité incendie.

+ D, etc.); sachant que, compte tenu des typologies les plus couramment observées dans l'habitat en mâchefer – habitations isolées, en bande, jumelées ou petites habitations collectives inférieures à 3 étages –, les ouvrages relèvent principalement des familles les moins contraignantes (1^{ères} et 2^e familles).

2.4.6. Comportement au gel-dégel

La forte porosité du pisé de mâchefer et sa sensibilité aux phénomènes de capillarité exigent une certaine vigilance au regard des excès d'eau accidentels à l'intérieur des pores du matériau. Parmi eux, le risque d'éclatement au gel vise des cas extrêmes et peu courants.

Il s'agit en réalité des effets induits sur un mur « à nu », exposé à l'impluvium puis au gel ou d'un mur imbibé pathologiquement dans toute sa masse puis soumis au gel.

Le risque de gel intervient lorsque deux conditions sont réunies : une humidité relative > 95 % et une température négative. Le risque de gel est résolu avec un enduit protégeant efficacement le mur de la pluie battante. Plus la succion de l'enduit est faible moins l'enduit est sensible au gel.

Ainsi pour éviter la pénétration d'eau via l'enduit jusqu'au pisé de mâchefer, les enduits peu absorbants, c'est-à-dire à faible facteur d'absorption de la pluie battante, sont adaptés (enduits à la chaux : $A = 3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$; ou enduits minéraux : $A = 0.1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$). Le mur dans ses premiers centimètres extérieurs (sous l'enduit) ne présente donc pas de risque de gel (avec les conditions $T < 0^\circ\text{C}$ et $\text{HR} \geq 95\%$). En considérant que l'enduit a un rôle sacrificiel et qu'il doit être entretenu et renouvelé régulièrement, la structure n'est jamais mise en danger³⁵.

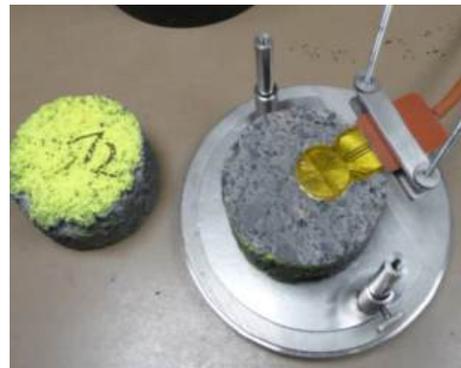
Les résultats acquis récemment dans la thèse de M. Lassana Bakary Traoré³⁶ sur le gel-dégel du pisé de terre montrent qu'il n'y a pas de problématique liée au gel sur les matériaux en terre crue lorsqu'ils sont dans leur état d'humidité normal (donc quasi secs). Les difficultés apparaissent uniquement en cas d'imbibition pathologique (qui est donc la cause réelle à traiter). Par extrapolation, on peut avancer l'hypothèse que

sur un matériau très poreux comme le mâchefer, il est probable qu'il n'y ait aucun problème à sec non plus. La question de désordres liés au gel pourrait éventuellement se poser sur un mâchefer imbibé à des degrés pathologiques.

2.5. CARACTÉRISTIQUES ET COMPORTEMENTS HYGROTHERMIQUES

Les essais hygrothermiques menés sur les échantillons de bétons de mâchefer en 2022 par les laboratoires du Cerema (Départements « Groupe Bâtiment, Construction, Immobilier » de l'agence de Strasbourg et « Risques, Infrastructures et Matériaux » de l'agence de Bron) ont porté sur les mesures suivantes :

- conductivité thermique ;
- diffusivité thermique ;
- capacité thermique volumique sèche ;
- teneurs en eau ;
- isotherme de sorption ;
- absorptivité liquide ;
- courbes de sorption et désorption en enceinte climatique ;
- facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau.



Sonde Hot Disk



Dispositif expérimental complet utilisé dans la mesure de la conductivité et de la diffusivité thermique

35. Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, Enertech pour Oktave – 2017.

36. Analyse physique et modélisation dynamique de l'impact du gel-dégel sur la durabilité des constructions en terre crue. Application au pisé – Thèse de Doctorat de Lassana, Bakary Traoré – TDS ENTPE – RN CEREMA – 2022.

2.5.1. Conductivité thermique λ

Notée λ , mesurée en $W/(m \cdot ^\circ K)$, la conductivité thermique est la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Plus sa valeur est petite, plus le matériau est isolant.

L'hétérogénéité du pisé de mâchefer et la variabilité de sa masse volumique d'un échantillon à l'autre requièrent une certaine prudence quant à la détermination de cette valeur.

L'inventaire des données existantes disponibles dans ce domaine, réalisé par le cabinet Amstein+Walthert en 2019, avait permis de déterminer une fourchette plausible situant la conductivité du pisé de mâchefer entre 0.25 et 0.75³⁷.

Toutefois, l'étude faisait référence également à des résultats d'expérimentations récentes menées par l'ingénieur et enseignant-chercheur Pierre-Antoine Chabriac, par ailleurs membre du GT mâchefer, dont les résultats permettaient d'affiner une valeur de conductivité thermique moyenne de l'ordre de 0.3W/m.°K.

Ses travaux, réalisés en novembre 2018 sur la base de relevés de température sur un immeuble d'habitation collectif situé rue Berthelot à Saint-Etienne (42), avaient permis en effet de déterminer une fourchette estimée entre 0,2 et 0,4 W.m.°C³⁸ corroborant les résultats d'autres essais au fil chaud réalisés un an plus tôt sur un bâtiment à La Mulatière (69)³⁹.

Dans le cadre de la campagne d'essais réalisée en 2022 par le laboratoire du Cerema, **les mesures réalisées selon la méthode du disque chaud ont permis d'obtenir des résultats de conductivités thermiques moyennes entre 0,43 W/m.K et 0,54 W/m.K.**

Les valeurs de λ obtenues sont donc légèrement supérieures aux premières.

Elles restent néanmoins significatives sur le plan thermique puisque trois à quatre fois moindres que celle d'un béton plein ordinaire de masse volumique équivalente (de 1,83 W/m.K) et proches d'un béton de pouzzolane.

Ces valeurs de conductivités thermiques sont également environ deux fois plus faibles que celle d'un parpaing en aggloméré de béton ou d'un pisé de terre crue (0,9 W/m.K)

Elles restent toutefois cinq fois plus élevées qu'un mélange terre-chanvre en formulation « Mur » (0,09 W/m.K) et deux à dix fois plus élevées qu'un béton cellulaire (de 0,06 à 0,3 W/m.K) et bien sûr sans comparaison avec un isolant (laine de roche 0.035 W/m.K)

Ces résultats corroborent l'analyse thermique, hygrothermique et énergétique menée en mars 2019 par le cabinet d'ingénierie Amstein+Walthert sur le patrimoine d'Habitations à Bon marché (HBM) de Grand Lyon Habitat : « [...] **le pisé de mâchefer, sans être un isolant, possède des caractéristiques d'isolation équivalentes à celle d'un bois dur. Les grandes épaisseurs mises en œuvre permettent d'obtenir une performance isolante du mur moyenne à basse.** À titre de comparaison, un mur de 50 cm en mâchefer possède une résistance thermique de l'ordre de 1.8 m².°K/W, soit une résistance équivalente à un mur en béton revêtu d'une isolation en polystyrène expansé (PSE) de 6 cm d'épaisseur⁴⁰ ».

2.5.2. Diffusivité thermique a

La diffusivité thermique est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau à transférer la chaleur. Elle rend compte de la vitesse à laquelle la température du matériau évolue en fonction des modifications de températures de son environnement. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique volumique). **Les mesures de diffusivité thermique moyenne obtenues sur les séries de tests menés en 2022 ont permis de déterminer une fourchette 0,5070.10-6 m²/s à 0,6275.10-6 m²/s.**

Ces valeurs sont plus faibles que celle d'un béton plein (de l'ordre de 0,79 10-6 m²/s) mais plus élevées que celle d'un béton de pouzzolane ' de l'ordre de 0,33 10-6 m²/s).

37. Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer : Volet thermique, hygrothermique et énergétique – Amstein+Walthert pour - Grand Lyon Habitat (Mars 2019).

38. Mesures effectuées sur un mur en béton de mâchefer sur les mois d'octobre et novembre 2018 – Laboratoire TRANSFORMATIONS – École Nationale Supérieure d'Architecture de Saint-Etienne.

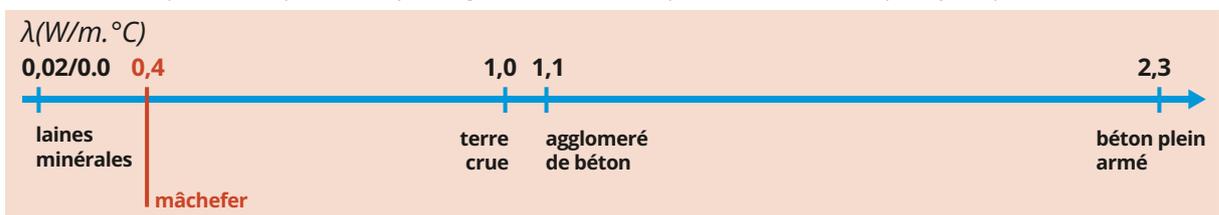
39. Mesures effectuées sur ancien bâtiment d'écuries sis 37, quai Jean-Jacques Rousseau, 69350 La Mulatière en août 2017 – Laboratoire TRANSFORMATIONS – École Nationale Supérieure d'Architecture de Saint-Etienne.

40. Calcul obtenu avec une valeur λ de 0,5476 W/m.K. L'épaisseur serait à ramener à 5 cm de polystyrène avec les valeurs λ obtenues sur les échantillons testés par le Cerema en 2022.

Aperçu des évaluations disponibles de la valeur λ des bétons de mâchefer dans la littérature scientifique récente – voir Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer : Volet thermique, hygrothermique et énergétique – Amstein+Walthert pour Grand Lyon Habitat (Mars 2019).

Provenance		λ (W.m.°C)		
Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, Climaxion / Eneritech / Oktave / Dorémi, décembre 2017 Matériau assimilé à une « pierre calcaire tendre grès Baumberger »		1,7		
Fascicule Th-U ex 2/5, RT existant, commission Th-Bat du 28/03/2018		1,6		
Étude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable, Nicolas Bur, thèse de l'Université de Strasbourg, 05/09/2012		0,8 à 2,1		
Use of Furnace Bottom Ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties, Binyu Zhang, Chi Sun Poon, Journal of Cleaner Production 99 (2015) 94-100 Étude du remplacement des agrégats par des résidus de combustion de centrales thermiques		0,5 à 0,65		
Techniques de l'ingénieur TBA 1112, 01/12/2004 (valeur en kcal/h.°C, 1kcal/h = 1,163W)		0,23 à 0,35		
Masse volumique apparente en kg/m ³	Résistance à la compression en kg/cm ²		Conductivité thermique en kcal/m.h°C	Absorption d'eau en pourcentage du volume ou du poids
800/850	10/20		0,2 à 0,3	15 à 18
850/950	20/25		0,2 à 0,3	16 à 19
900/1 000	25/45	0,2 à 0,3	17 à 20	
Logiciel Antherm – DIN EN 1745 2012-07 – TGL 35424/2 – Önorm B8110 (Ausg. 59)		0,2 à 0,55 0,47 à 0,61 0,47		
Mesure de la conductivité thermique à l'aide d'un fluxmètre type TESTO 635 réalisée la nuit du 28/02/2019 au 01/03/2019 dans un logement vide. Différence de température faible entre intérieur et extérieur rendant le résultat peu précis		0,2 à 0,6		
Essai de conductivité thermique au fil chaud réalisés par Pierre-Antoine Chabriac (École d'Architecture de Saint-Étienne, membre du groupe de travail mâchefer) en août 2017. Test réalisé sur ancienne écurie de chevaux située au 37 quai Jean-Jacques Rousseau à la Mulatière.		0,3		
Relevés de température réalisés sur un mur en mâchefer sur les mois octobre – novembre 2018 par Pierre-Antoine Chabriac. Relevés effectués sur immeuble d'habitation collectif rue Berthelot à Saint-Étienne.		0,2 à 0,4, moyenne à 0,3		

Conductivité thermique relative du pisé de mâchefer au regard d'autres matériaux (plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant).



Résistance thermique indicative de la paroi en pisé de mâchefer au regard d'autres matériaux (plus le coefficient de résistance thermique est élevée, plus la paroi est isolante – $R = \epsilon p / \lambda$).



2.5.3. Capacité thermique volumique sèche C_v

La capacité thermique volumique est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1m^3 de matériau pour élever sa température de un degré Kelvin. **La capacité thermique volumique sèche moyenne (obtenues par le Hot Disk) mesurée sur les échantillons de pisé de mâchefer est de l'ordre de $0,88\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$.**

Cette valeur est 2 à 3 fois plus faible qu'un béton plein classique ($C_v = 2,3\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$) ou un pisé de terre crue ($C_v = 2,8\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$). Elle est aussi plus faible que celle d'un béton de pouzzolane ($C_v = 1,3\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$).

Cela signifie que le mur en mâchefer, à volume équivalent, absorbera moins de chaleur en été lors des périodes chaudes qu'un mur en béton plein, un pisé de terre crue ou qu'un mur en béton de pouzzolane classique. Ainsi, pour la même chaleur apportée en été, sa température va davantage s'élever à volume équivalent qu'un mur de béton, un béton de pouzzolane ou un pisé de terre crue.

La capacité thermique volumique sèche moyenne du pisé de mâchefer est en revanche comparable à celle d'un parpaing d'aggloméré de béton ($C_v = 0,9\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$) ou d'un mélange terre-chanvre en formulation « Mur » ($C_v = 1,05\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$).

Nota bene : Il est possible de déduire la capacité thermique massique d'un matériau (symbole usuel c) autrement appelée chaleur massique ou chaleur spécifique de la capacité thermique volumique sèche. Elle reflète la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique, pour une masse donnée, quand sa température augmente. Les valeurs sont liées par la formule suivante :

Capacité thermique massique (en $\text{J/kg}\cdot\text{K}$) = Capacité thermique volumique (en $\text{J/m}^3\cdot\text{K}$) / masse volumique (en kg/m^3).

Autrement dit, **la capacité thermique massique du pisé de mâchefer est de l'ordre de $733\text{ J/kg}\cdot\text{K}$.**

2.5.4. Inertie thermique

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à échanger (à stocker, à conserver, puis à restituer) la chaleur de manière diffuse avec les éléments en contact. Plus cette inertie est élevée, plus le bâtiment mettra du temps à se refroidir en hiver et à se réchauffer en été. Elle est surtout déterminée par les propriétés des couches superficielles du matériau composant une paroi et s'évalue à l'aide de deux paramètres : la diffusivité et l'effusivité ; une forte inertie étant caractérisée par une faible diffusivité et une forte effusivité.

Dans le cas de la rénovation d'un logement principal, c'est-à-dire occupé en permanence, maintenir, voire augmenter l'inertie des parois pourra améliorer le confort d'été et d'hiver de l'habitat en lissant les variations de la température intérieure. **Pour une même épaisseur de paroi, le mur en pisé de mâchefer participera à une inertie par transmission (désignant le temps que met la chaleur à traverser la paroi, appelé aussi déphasage), trois fois meilleure que celle du béton banché et une inertie par absorption (désignant le temps que met le mur à atteindre l'équilibre thermique avec l'air ambiant), deux fois moins bonne.**

Un mur en mâchefer de 40 à 50 cm d'épaisseur aura un bien meilleur déphasage et une inertie par absorption aussi bonne qu'un mur en béton de 20 cm⁴¹.

2.6. COMPORTEMENT À L'HUMIDITÉ (EAU LIQUIDE OU À L'ÉTAT DE VAPEUR)

2.6.1. Capillarité et absorptivité liquide $C_{w,s}$

Le phénomène de remontée capillaire qualifie le transfert de l'eau à l'état liquide du sol vers le mur en contact avec celui-ci. Plus le matériau est poreux, plus le phénomène sera important.

La maçonnerie en pisé de mâchefer est identifiée comme ayant une très forte activité capillaire (A_w supérieur à $100\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot 0,5)$).

Les échantillons testés confirment cette propriété avec **des coefficients d'absorption d'eau dans le matériau par capillarité élevés ($C_{w,s}$ entre 147 et $238\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot 0,5)$).**

Ces valeurs sont supérieures à celles d'une pierre calcaire tendre ($125\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot 0,5)$) et à fortiori à celles d'un béton ($16,7\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot 0,5)$).

2.6.2. Propriétés hygroscopiques

Les propriétés hygroscopiques d'un matériau témoignent de sa capacité à capter l'humidité relative de son environnement. Généralement, on considère que le bâti ancien (terre crue, brique, pierre) possède cette caractéristique de voir varier, au sein même de ses parois, la quantité en eau, ce phénomène entraînant une petite variation du volume du matériau.

Sur les échantillons testés en 2018, une teneur en eau maximale de 27 % avait été mesurée sur le matériau

41. Étienne RIEUX, Le mâchefer matériau du bâti ancien, OIKOS (2021).

saturé, associée à une masse volumique humide maximale de 1466 kg/m^3 .

Les échantillons de 2022 ont montré des teneurs en eau maximales à saturation de 22.6 à 28.1 %, pour des masses volumiques humides variant de 1440 à 1868 kg/m^3 .

On retrouve une forte dispersion des résultats, ce qui est cohérent avec l'hétérogénéité des masses volumiques sèches et des porosités.

Soumis à des cycles de sorption-désorption en enceinte climatique, les échantillons de pisé de mâchefer se montrent en revanche en réalité assez peu hygroscopiques, avec des variations de teneur en eau de 1,5 à 2,5 % entre 0 et 95 % d'humidité relative.

De même, l'isotherme de sorption, tiré des mesures réalisées sur les nouveaux échantillons en 2022, confirme la faible hygroscopicité du pisé de mâchefer avec une teneur en eau volumique à une humidité relative de 94 % qui se situe entre $18,77 \text{ kg/m}^3$ et $26,53 \text{ kg/m}^3$.

Ces résultats sont proches de ceux obtenus dans les expérimentations de 2018. Ils démontrent qu'en conditions d'usage normales, la teneur en eau d'un mâchefer de construction ne devrait jamais dépasser 1,5 à 2,5 %, ce qui reste très inférieur aux teneurs en eau à saturation mesurées évoquées précédemment. L'observation de teneurs en eau plus élevées en situation réelle ne peut donc être liée qu'à des situations pathologiques, comme des imbibitions répétitives par l'impluvium, des remontées capillaires, des écoulements parasites, etc.

Ces mesures tendent donc à confirmer une capacité hygroscopique du pisé de mâchefer relativement faible⁴², quoique non négligeable.

À titre de comparaison les valeurs obtenues sont approximativement 2 à 3 fois moindres que celles pouvant être mesurées sur des terres à pisé ou sur des briques de terre crue.

Les bienfaits de l'hygroscopicité, caractérisés par des phénomènes de transfert d'humidité entre les murs et l'air intérieur, au bénéfice du confort thermique de l'habitat, sont donc à relativiser pour le pisé de mâchefer.

42. Ibid.



Échantillons de mâchefer immergés lors des mesures de teneur en eau du matériau saturé, © Cerema



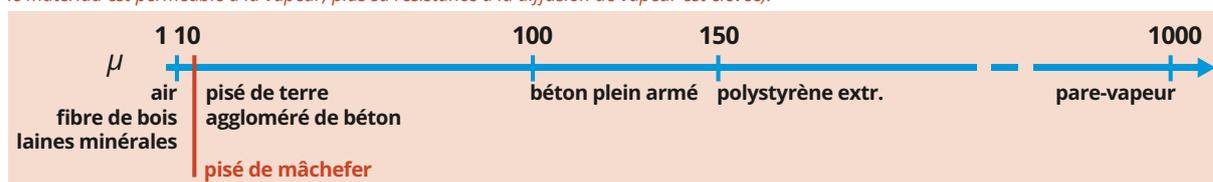
Égouttage des échantillons au tamis avant pesée, © Cerema

2.6.3. Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ

Les murs de bâtis anciens sont généralement qualifiés de perspirants, en raison de la capacité de leur matériau (pisé de terre crue, brique de terre cuite, pierre très tendre) ou des liants (joints des appareillages en pierre ou en brique) à laisser migrer la vapeur d'eau à travers la paroi du fait de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de l'habitat.

Cette valeur μ , qui s'exprime sans unité, désigne la capacité d'un matériau à résister à la circulation de vapeur d'eau par rapport à l'air immobile ($\mu_{\text{air}} = 1$). Plus le μ est faible, plus le matériau est perspirant. C'est une valeur à prendre en compte dans une réhabilitation, car elle permet de connaître la sensibilité de la paroi à la migration de vapeur d'eau.

Coefficient relatif de résistance à la diffusion de vapeur d'eau du pisé de mâchefer au regard d'autres matériaux (plus le coefficient est grand, moins le matériau est perméable à la vapeur, plus sa résistance à la diffusion de vapeur est élevée).



BASE DE DONNÉES MATÉRIEAUX				
Grandeur	Masse volumique	Conductivité thermique	Chaleur spécifique	Facteur de résistance à la vapeur d'eau
Symbole	ρ	λ	c	μ
Unité	kg/m ³	W/m.K	J/kg.K	sans unité
Éléments de maçonnerie				
Granit	2500 / 2700	2,800	1000	10000
Calcaire dur	2000 / 2190	1,700	1000	150 / 200
Calcaire tendre	1600 / 1790	1,100	1000	25 / 40
Béton plein armé (1 à 2% d'acier)	2300 / 2400	2,300	1000	80 / 130
Parpaing d'aggl. de ciment creux	850 / 1100	0,900 / 1,100	1000	10 / 15
Béton de pouzzolane	1000 / 1600	0,350 / 0,520	1000	20 / 30
Béton cellulaire	325 / 825	0,090 / 0,290	800 / 1000	5 / 10
Brique de terre cuite (pleines)	1700 / 2400	0,690 / 1,040	1000	10 / 16
Brique de structure	550 / 850	0,340 / 0,640	1000	10 / 16
Brique auto-isolante (monomur)	650 / 850	0,120 / 0,140	850 / 1200	8 / 15
Pisé, bauge, bétons de terre	1770 / 2000	1,1 / 0,996	1500	4 / 10
Mortiers et enduits				
Mortier à base de ciment et de chaux	500 / 2000	0,300 / 1,300	1000	6 / 85
Enduit sable-ciment courants	1800 / 2000	1,000 / 1,300	850 / 1000	25 / 85
Enduits bâtard chaux naturelle-ciment	1700 / 1900	0,700 / 1000	850 / 1000	10 / 30
Enduits sable-chaux naturelle courant	1400 / 1800	0,550 / 0,800	850 / 1000	6 / 20
Enduit terre allégés (sable/argile/fibres)	650 / 1500	0,150 / 0,500	1500 / 1800	2 / 5
Enduit chaux-chanvre	750 / 850	0,150 / 0,200	1500	10 / 13
Enduits isolants	200 / 450	0,028 / 0,070	1000 / 1500	4 / 13
Béton de chanvre (chênevotte)	400 / 800	0,120 / 0,250	1500 / 1700	5 / 13
Isolants				
Panneaux laine de bois	<30 / 450	0,080 / 0,100	1700 / 2300	
Panneaux de fibre de bois	<200 / 1000	0,070 / 0,200	1700 / 2300	
Panneaux fibres de bois / haute densité	140 / 280	0,038 / 0,055	1600 / 2300	3 / 15
Panneaux fibres de bois / densité moy.	60 / 120	0,038 / 0,042	1600 / 2300	3 / 5
Panneaux de liège expansé	100 / 150	0,036 / 0,042	1700 / 2000	5 / 30
Laines de verre / densité moy. à haute	30 / 150	0,038 / 0,040	1030	1
Laine de roche / densité moy. à haute	25 / 200	0,042 / 0,048	840 / 1030	1
Polystyrène exp. - PSE / densité moy. à haute	15 / 60	0,038 / 0,044	1450	60
Polystyrène extrudé - PSX	20 / 60	0,031 / 0,050	1450	150

Extrait de la base de données matériaux de l'Association Arcanne (« Courgey-Oliva »), avril 2021
<https://associationarcanne.com/ressources/base-de-donnees-materiaux/>

SYNTHÈSE DES DONNÉES DE CARACTÉRISATION DU PISÉ DE MÂCHEFER								
Grandeur	Masse volumique	Résistance à la compression	Conductivité thermique	Chaleur spécifique	Facteur de résistance à la vapeur d'eau	Porosité	Teneur en eau (20°C, 80%HR)	Absorptivité liquide
Symbole	ρ	σ	λ	c	μ	φ	W	Cw,s
Unité	kg/m ³	M Pa	W/m.K	J/kg.K	sans unité	%	%	g/(m ² *s0.5)
Maçonnerie de mâchefer (pisé)								
Essais Cerema 2022	1100 / 1400	1,2 / 4,2	0,43 / 0,54	733	9 / 14	23	1,5 / 2,5	147 et 238
Etude A+W 2019	800 / 1000	1 / 4,5	0,25 / 0,75	-	10	32	1	-
Essais Cerema 2018	1100 / 1200	1,5 / 4,5	-	-	-	32	1,05 / 1,2	-

Origine des sources :

- résultats des mesures obtenues lors des essais menés en laboratoire par le Cerema en 2019 et 2022 sur plusieurs échantillons de pisé de mâchefer prélevés sur des bâtiments lyonnais ;
- données collectées lors de l'inventaire réalisé par le bureau d'étude A+W en 2019 sur un panel de mesures disponibles dans littérature scientifique et technique.

Les mesures réalisées en 2022 par le Cerema nous indiquent que **le pisé de mâchefer est un matériau très ouvert à la vapeur d'eau, avec un facteur μ de résistance à la diffusion de vapeur d'eau compris entre 9,2 et 14,1 en moyenne.**

Ces résultats sont à prendre avec précaution, car la taille des échantillons n'a pas permis de respecter la surface minimale requise par la norme NF EN ISO 12572.

Ils confirment néanmoins la forte sensibilité des parois en pisé de mâchefer à la migration de vapeur d'eau.

Le cabinet A+W en 2019 avait retenu une valeur moyenne de 10 pour ses simulations⁴³.

Le pisé de mâchefer est donc comparable à un pisé de terre crue du point de vue des échanges gazeux de vapeur d'eau (μ de l'ordre de 10), comparable également à un béton cellulaire, à un bloc de béton de chanvre ou à un enduit de plâtre. Il est trois fois moins perspirant qu'un mélange terre-chanvre en formulation « Mur » (μ compris entre 3 et 4). Il est dix fois plus perméable qu'un béton plein (μ compris entre 80 et 130).

Le pisé de mâchefer nécessite donc une attention particulière lors de l'adjonction d'épidermes extérieurs et/ou intérieurs (Voir la seconde partie du présent rapport d'étude).

2.7 CARACTÉRISTIQUES ET COMPORTEMENTS ACOUSTIQUES

Plusieurs simulations ont été réalisées par le laboratoire UMRAE de Strasbourg. Compte tenu de la variabilité des bétons de mâchefer, les calculs ont été menés en prenant en compte des plages en termes de masse volumique, de module d'Young ou de résistivité afin d'obtenir des valeurs minimales, moyennes et maximales : la masse volumique comprise entre **1000 kg. m⁻³** et **1400 kg. m⁻³** est définie avec une valeur intermédiaire de **1200 kg. m⁻³** ; pour le module d'Young, les valeurs retenues sont respectivement de **100, 500** et **1000 MPa** ; enfin pour la résistance au passage à l'air, la valeur minimale de résistivité retenue est de **0, 5. 106 N. m^{-4. s}** ; l'hypothèse de seuil maximal est représentée par le cas spécifique du solide isotrope (sans prise en compte de la structure poreuse



Échantillons de mâchefer retenus pour la caractérisation des propriétés acoustiques, © Cerema

du mâchefer) et les valeurs intermédiaires sont de **1. 106** et de **10. 106 N. m^{-4. s}**.

En s'appuyant sur ces données, plusieurs caractérisations expérimentales et simulations au niveau de la paroi ont été menées par le laboratoire UMRAE de Strasbourg avec pour objectif de déterminer les performances en affaiblissement acoustique de différents types de bétons de mâchefer et d'évaluer les performances possibles de parois rénovées vis-à-vis des seuils réglementaires demandés pour les bâtiments d'habitation.

Compte tenu de la variabilité des bétons de mâchefer, les essais menés ont permis d'établir des plages de valeurs concernant leur masse volumique, leur module d'Young et leur résistance au passage à l'air (valeurs minimales, moyennes et maximales).

43. Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer : Volet thermique, hygrothermique et énergétique – Amstein+Walthert pour Grand Lyon Habitat (Mars 2019).

2.7.1. Absorption acoustique

Cette propriété qualifie l'atténuation de la puissance de l'onde sonore au contact du matériau.

Le coefficient d'absorption acoustique est l'indice qui mesure la capacité d'un matériau à absorber l'énergie sonore qui lui est transmise plutôt que de la réfléchir.

Les performances en absorption acoustique du pisé de mâchefer restent très modérées, entre 0 et 25 % environ.

D'une manière générale, on peut dire que bien que la porosité du pisé de mâchefer soit relativement élevée, elle n'est pas suffisante pour le considérer comme un bon matériau acoustique. Cependant, il faut noter qu'une paroi en pisé de mâchefer n'est pas destinée à rester à l'état brut mais qu'elle doit être revêtue, à l'extérieur comme à l'intérieur.

2.7.2. Affaiblissement acoustique dB

L'indice d'affaiblissement acoustique est lié à la capacité d'une paroi à atténuer la transmission du son (énergie acoustique) entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment ou entre deux locaux intérieurs. Afin d'évaluer la capacité des bétons de mâchefer à réduire la transmission des ondes sonores, il a été décidé de s'appuyer sur l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré R_w .

En fonction du caractère plus ou moins dense du pisé de mâchefer couplé avec ses propriétés mécaniques et son niveau de résistance au passage à l'air, une plage de valeurs d'indice d'affaiblissement acoustique pondérée peut être estimée entre 38 et 51 dB.

Ces valeurs d'affaiblissement acoustique pondérées sont en deçà de celles présentées par le béton et la brique pleine, qui présentent des valeurs de masses volumiques largement supérieures. La plage de masses volumiques présentée par le béton de mâchefer est plus proche de l'ordre de grandeur des parpaings de béton creux ou des briques creuses. Cependant, les valeurs d'indice d'affaiblissement acoustique pondéré du mâchefer s'avèrent en deçà de celles présentées par ces deux matériaux. Cela peut s'expliquer en partie par la grande hétérogénéité de leurs constituants et des performances mécaniques moins élevées. En revanche, sauf dans le cas de figure le plus défavorable, à savoir faible masse volumique, faible module d'Young et très forte perméabilité, le

béton de mâchefer semble présenter des performances en affaiblissement acoustique supérieures à celles du pisé de terre crue. Enfin, quel que soit le type de mâchefer, il sera toujours plus performant, en termes d'affaiblissement acoustique, que des bétons de type terre-chanvre qui présentent des masses volumiques beaucoup plus faibles.

2.7.3. Évaluation des performances acoustiques des parois

Des simulations ont permis d'évaluer les performances en isolement acoustique de parois de mâchefer vis-à-vis des seuils réglementaires préconisés dans le guide CNB « Réglementation acoustique des bâtiments⁴⁴ » dans le cas des bâtiments d'habitation.

Pour cela plusieurs simulations ont été réalisées pour un mur de refend séparatif entre locaux puis pour un mur de façade au regard de l'isolement aux bruits extérieurs.

Cas de l'isolement intérieur entre locaux

Les résultats des simulations sont présentés pour le cas de parois d'une épaisseur de 30 cm, les refends étant généralement moins épais que les murs de façades (45 cm en moyenne).

Alors qu'une paroi constituée uniquement de béton de mâchefer ne suffit pas à atteindre toutes les valeurs réglementaires, une isolation rapportée de 10 cm d'isolant fibreux et une plaque de plâtre (type BA13) s'avèrent suffisantes pour dépasser largement tous les seuils concernant l'isolement acoustique entre deux logements distincts.

Cas de l'isolement aux bruits extérieurs

Les simulations ont été menées sur la base d'un mur de façade d'une épaisseur de 45 cm. Pour une paroi composée uniquement de pisé de mâchefer, seul le cas le plus favorable avec un matériau présentant la plus haute masse volumique et l'élasticité mécanique la plus élevée (masse volumique : 1 400 kg/ m³ ; module d'Young : 1 000 MPa) permet de respecter l'ensemble des seuils réglementaires, quels que soient la catégorie de l'infrastructure de transport, routières ou ferrées (ces dernières impliquant notamment tout le parc de logements PLM construit en pisé de mâchefer) et la distance entre cette infrastructure et l'habitation.

44. Guide du CNB - Réglementations acoustiques des bâtiments.

Pour les autres cas, l'épaisseur du béton de mâchefer est suffisante pour respecter les seuils requis pour des habitations situées hors secteur affecté par le bruit des transports.

Dans le cas des parois de type ITI (sous plaque de plâtre) ou ITE (sous enduit ou bardage), quelle que soit la nature du béton de mâchefer, les rénovations proposées permettent d'obtenir des performances supérieures aux seuils préconisés dans le Guide CNB, et ce, que l'habitation soit située dans un secteur affecté par le bruit des transports ou non.

En revanche, les simulations réalisées avec des murs revêtus seulement d'un enduit de correction thermique conduisent à une baisse de performance en termes d'affaiblissement acoustique. En effet, l'application d'un enduit de masse volumique plus faible entraîne l'apparition de fréquences critiques et de respirations (diminutions des performances en affaiblissement acoustique pour des fréquences spécifiques) plus nombreuses que pour une paroi de pisé de mâchefer brute sans revêtement. Cela peut être lié à l'absence de découplage entre l'enduit et le mâchefer sur lequel il est appliqué directement.

Enfin, il faut garder à l'esprit que les performances en isolement acoustique obtenues pour les différents types de parois rénovées sont issues de simulations et doivent être utilisées avec précaution et sous forme de plages de données indicatives, notamment en raison de la grande variabilité de la structure et des propriétés mécaniques des bétons de mâchefer.



Cité cheminote PLM Croix Barret, 79 rue Croix-Barret, Lyon 8, Habitat Collectif social sous gestion ICF

Habitat individuel, 1933, 5 rue Pierre Curie, Bron (69), maître d'œuvre inconnu, réhabilitation et agrandissement (2021), F. Genouvrier architecte (Barn architecture)



5

PARTIE 2

AGIR SUR LE BÂTI EN PISÉ DE MÂCHEFER

Stratégies d'intervention sur le bâti

En ce début de XXI^e siècle, les enjeux démographiques liés à un double phénomène de croissance et de vieillissement de la population, couplés à des enjeux climatiques de réductions des émissions de gaz à effet de serre, entraînent notre parc bâti dans un mouvement de rénovation massif et profond.

Encouragé par des politiques d'appui à la transition énergétique (Lois Grenelles ; Loi TEPCV ; Plateformes de rénovation énergétique ; Service public de l'efficacité énergétique, etc) mais également par la raréfaction des terrains à bâtir dans une perspective zéro artificialisation (objectif ZAN de la Loi ELAN, opération de revitalisation des territoires ORT), ce mouvement de transformation touche aujourd'hui l'ensemble du parc d'habitat.

Dans ce contexte, la rénovation du bâti en mâchefer se situe au carrefour de plusieurs enjeux que la première partie de cette étude a pu mettre en lumière :

- des enjeux environnementaux d'abord : du fait de son niveau de consommation énergétique supposément élevé et du volume important de logements concernés, le parc d'habitat en mâchefer est appelé à devenir un levier important pour atteindre les objectifs nationaux de réduction des consommations énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre ;
- des enjeux techniques ensuite : l'édifice en mâchefer présente des particularités constructives et un comportement physique spécifique qui le distingue du reste du corpus bâti du XX^e siècle (Partie 1). En particulier, son comportement par rapport aux flux d'air et d'humidité peut induire des pathologies du bâti en cas de travaux inadaptés. Les projets de densifications résidentielles et notamment de surélévations interrogent également les capacités structurelles et, dans une moindre mesure, acoustiques, de ce matériau.
- des enjeux culturels enfin : bien que la majeure partie du parc d'habitat en mâchefer ne puisse pas prétendre à une protection patrimoniale, sa valeur identitaire dans le paysage urbain lyonnais exige à minima une attention particulière lors de sa réhabilitation et de travaux de ravalement.

Les savoirs pratiques s'étant progressivement éteints depuis deux à trois générations avec l'abandon de ce matériau dans la construction, la compréhension fine du patrimoine dont il relève demande à être réactivée pour arbitrer des choix d'intervention pertinents.

Par méconnaissance, des entreprises ont recours à des solutions de rénovation standards, mises au point pour le bâti récent, d'après 1948, ou à des produits issus de l'ère de l'industrialisation du bâtiment. Nous verrons que beaucoup de ces options s'avèrent souvent inadaptées.

Sans compter que persiste dans le regard porté sur l'habitat en mâchefer l'apriori négatif que ce sont des ouvrages anciens et obsolètes, qui nécessitent par conséquent d'être entièrement rénovés, autrement dit, au sens littéral, « remis à neuf ». Or force est de constater que le bâti en mâchefer a été conçu pour durer. Son quasi-siècle d'existence au service de trois générations d'habitants en est la preuve. Quelle construction actuelle peut en effet prétendre à une espérance de vie comparable ?

Ainsi serait-il fâcheux que les modifications apportées aujourd'hui au patrimoine bâti en mâchefer compromettent sa pérennité en négligeant les valeurs intrinsèques qui lui ont permis de traverser le siècle.

Cette deuxième partie propose de faire le point sur les choix appropriés en matière de méthode, de dispositifs et de matériaux pour réhabiliter l'habitat en mâchefer.

Elle tend à montrer de quelle manière une démarche de projet fondée sur la prise en compte des caractéristiques et des propriétés du mâchefer, de ses qualités et de ses faiblesses, peut mieux guider les interventions futures sur ce parc bâti.

Principales caractéristiques du bâti en pisé de mâchefer

- **des ouvrages composites** quant à la nature et à la morphologie de leur structure.

Ils présentent de la chaux du plâtre, du béton de gravier et pour ce qui est de la maçonnerie de mâchefer proprement dite, leur composition est également hétérogène en raison de provenance variable et de formulations artisanales. L'ancienneté de ces constructions a pu également donner lieu à des adjonctions ou des reconstructions partielles qui en font des ouvrages parfois mixtes rendant les phases de diagnostics avant intervention indispensables ;

- **des ouvrages « isostatiques » sur le plan structurel ;**

Les franchissements sont en appuis simples sur des murs-poids ce qui les rend facilement adaptables et évolutifs tout au long de leur vie avec des pièces substituables et remplaçables à volonté et les travaux de reprise en sous-œuvre dans les parois périphériques sont généralement aisées ;

- **des ouvrages perméables aux transferts de vapeur d'eau ;**

Cette propriété permet de réguler l'humidité dans les parois et d'assurer la salubrité de l'habitat ;

- **des ouvrages peu altérables au contact de l'eau liquide ;**

Cependant, les contacts prolongés avec l'eau peuvent provoquer des dommages pathologiques collatéraux ;

- **des ouvrages peu déperditifs sur le plan thermique ;**

Leur compacité et leur simplicité morphologique en font des volumes qui présentent des coefficients de forme avantageux sur le plan thermique, à fortiori dans des dispositions de noyaux urbains présentant des linéaires conséquents de parois mitoyennes.

Balcons, oriels et encorbellements sont rares. Les volumes de combles (les toitures-terrasses ne représentant pas la majorité du genre) constituent des tampons thermiques précieux en été comme en hiver (à condition qu'ils n'aient pas été aménagés en surfaces habitables) et de surcroît facilement isolables ;

À la différence des autres types de maçonnerie (pierre, béton, brique), le pisé de mâchefer en raison de sa constitution physico-chimique et de sa structure microporeuse d'une part, et

de sa mise en œuvre banchée en parois de forte épaisseur d'autre part présente une résistance thermique non négligeable. En outre, le phénomène de pont thermique n'est pas comparable à celui qui se produit avec le mode de construction industriel en béton armé et la part des murs dans les déperditions globales est moindre.

- **des ouvrages propices au confort thermique en été comme en hiver ;**

La plupart des logements ont été conçus pour favoriser une ventilation traversante entre rue, cour et courette (à condition qu'ils n'aient pas été recoupés à postériori), selon des principes hygiénistes adaptés au rafraîchissement estival nocturne.

En outre les organisations urbaines de ces habitats ont généralement ménagé des espaces jardinés généreux en pleine terre en cœur d'îlot, originellement à vocation vivrière et constituant aujourd'hui des îlots de fraîcheur arborés (à condition qu'ils n'aient pas été bâtis à postériori).

Grâce à la massivité de leurs murs, ces bâtiments présentent des propriétés d'inertie qui permettent de lisser les variations de température saisonnières et journalières.

- **des ouvrages conformes aux exigences de confort acoustique ;**

- **des ouvrages à faible empreinte carbone.**

Au même titre que tout bâti existant, ils présentent bien sûr l'avantage d'avoir déjà été construit ce qui doit encourager à leur entretien et à leur réhabilitation plutôt qu'à leur démolition, mais plus encore, leur édification a permis le stockage de déchets industriels et témoignent d'une démarche vertueuse de réemploi et de construction en circuit court.



1. COMPRENDRE AVANT D'AGIR

Bon nombre d'observateurs dressent ce constat alarmant : le résultat des politiques de rénovation énergétique du parc de logements menées depuis quinze ans est largement insuffisant au regard des objectifs que s'est fixé l'État en matière de réduction des gaz à effet de serre à l'horizon 2050¹. Malgré des campagnes de subventions massives, souvent ambitieuses, les chiffres et les témoignages font état de projets mal conduits, de niveaux de consommation après travaux significativement supérieurs aux prévisions, et d'un parc résidentiel – maisons individuelles, immeubles collectifs en copropriétés et logements sociaux – inégalement rénové.

Parmi les principales causes identifiées, ressortent les injonctions de politiques contradictoires, les exécutions de chantiers défailtantes, le fait que les maîtres d'ouvrage soient non professionnels, non sachants et/ou insuffisamment accompagnés et que les phases de diagnostic soient trop souvent négligées.

Ce dernier point constitue en effet une phase stratégique de l'initiation d'un projet, le socle sur lequel pourront être échafaudées des orientations appropriées.

Pour le bâti ancien, qui a pu subir plusieurs phases de transformations au cours de sa vie, mais peut-être plus encore pour le bâti en mâchefer, dont les propriétés conditionnent les réponses énergétiques et thermiques, la réussite du projet repose bel et bien sur la justesse des diagnostics.

1.1. LE DIAGNOSTIC PATRIMONIAL

Partie intégrante de la phase d'étude préalable, la question de la valeur architecturale du bâtiment étudié doit être posée très tôt. En effet, certaines interventions comme les extensions, la création d'ouvertures ou l'isolation thermique par l'extérieur sont susceptibles d'entraîner un changement d'aspect significatif du bâtiment. Une appréciation de la valeur patrimoniale de l'ouvrage est donc nécessaire en amont afin d'orienter la réponse proposée.

Cette appréciation repose d'une part sur une analyse historique succincte, d'autre part sur l'évaluation de l'intérêt architectural des différents éléments constituant le bâti. Afin de consolider l'approche, elle

devra être collégialement partagée avec les acteurs impliqués dans le conseil et l'instruction des futures demandes d'autorisations réglementaires d'urbanisme.

Pour comprendre le contexte urbain et paysager dans lequel s'est édifié et a évolué l'ouvrage bâti, une analyse, plus large, à l'échelle de la parcelle, sera souvent utile (ouvrages mitoyens, environnement végétal, présence d'un cours d'eau, etc).

Même s'il ne s'agit pas d'aborder la rénovation du bâti en mâchefer à la façon de la restauration d'un monument historique, loin de là, il n'en demeure pas moins que l'intervention devra s'inscrire dans le respect de l'existant. Dès lors, les interventions lourdes sur les ouvrages en mâchefer sont à évaluer au cas par cas. En particulier, l'acceptabilité de l'isolation thermique par l'extérieur sera à apprécier au regard de l'importance des modénatures en façade, de la qualité des matériaux choisis pour ce faire ainsi que des détails d'exécution retenus pour leur mise en œuvre.

Pour bon nombre de bâtiments en mâchefer, l'existence d'un diagnostic patrimonial complet et étayé constituera une base précieuse dans le cadre des échanges avec les services en charge de l'instruction des demandes d'autorisation de travaux.

Rappelons à ce propos que tout projet comportant des interventions en façade requiert une déclaration préalable (DP), qui sera instruite par le service urbanisme de la ville et potentiellement par l'Unité Départementale de l'Architecture et du Patrimoine (ABF/UDAP) si le projet se situe dans un périmètre protégé. L'obtention d'aides financières aux travaux de rénovation énergétique est également conditionnée à cette validation réglementaire du projet.

Ce cheminement administratif sera d'autant facilité que le porteur de projet aura su se faire accompagner par un professionnel compétent, maître d'œuvre ou architecte. En outre, pour un projet de transformation d'un édifice en mâchefer, il est préférable que ce dernier soit rompu à la réhabilitation du bâti ancien et, pour les édifices en mâchefer qui témoignent d'une valeur patrimoniale reconnue (par exemple classé comme Élément bâti à Préserver au PLU-H), le recours à un architecte du patrimoine sera indiscutablement un avantage.

1. Stéphane BERTIER, Rénovation énergétique des bâtiments du XX^e siècle : À quoi servent les architectes ? p58-59, d'a n°289, Mai 2021.

1.2. LE DIAGNOSTIC TECHNIQUE PRÉALABLE

Au-delà de l'aspect patrimonial, l'analyse du bâti existant consiste en un diagnostic technique, qui comprend un relevé détaillé de l'existant, l'analyse de l'état de conservation des ouvrages et le recensement des différentes transformations subies par la construction au fil des ans. Ce travail peut se faire au besoin avec l'appui de documents d'archives (plans, photos, descriptifs, publications).

L'emploi du pisé de mâchefer dans la construction de logements ayant couvert une période qui s'étend de la fin du XIX^e siècle jusqu'au milieu du XX^e siècle, les constructions ont pour la plupart subi plusieurs vagues de travaux, allant de simples opérations d'entretien (ravalement, couverture, zinguerie, menuiseries, etc.) à d'autres, plus conséquentes, destinées à adapter l'habitat aux évolutions des besoins, des modes de vie et de nouvelles réglementations (restructurations, agrandissements, création d'ouvertures, isolations, etc.). Parfois, telle ou telle campagne de travaux a pu entraîner des désordres, par méconnaissance du bâti, de son fonctionnement, ou par la mise en œuvre de produits et de matériaux inadaptés.

Les programmes de réhabilitation, et en particulier ceux de la rénovation énergétique dont il sera question plus loin, sont donc l'occasion de réaliser un état des lieux et un bilan architectural exhaustif.

Cette phase intéresse de nombreuses compétences. **Il faut insister sur le risque d'amalgame qui perdure aujourd'hui entre l'architecture récente du béton armé, et celle plus ancienne du béton de mâchefer, même si toutes deux ont marqué le XX^e siècle.** Comme l'explique l'architecte François Chatillon, « le patrimoine du XX^e siècle meurt de la normalisation² », en raison de l'inadaptation des standards actuels à ce bâti ancien du XX^e siècle. Le problème majeur de cette architecture en mâchefer, c'est son apparente proximité avec le bâti récent. On croit le connaître parce que le mode constructif de type pré-industriel est analogue. Mais, en réalité, la construction en mâchefer a probablement davantage à voir avec la construction en pisé qu'avec la construction en béton.

2. François CHATILLON, *Les halles de Boulingrin 1920-2012*, Paris (2012)



Mur de façade d'un ancien bâtiment d'activité transformé en habitat comprenant trois matériaux de maçonnerie distincts : pierre, béton de gravier et pisé de mâchefer, © N. Sandt



Habitat individuel de type plan Favier (v. 1958), 14 allée des cavatines, Lyon 5



Habitat individuel diffus (v.1925), 38 rue Grange Bruyère, Lyon 5

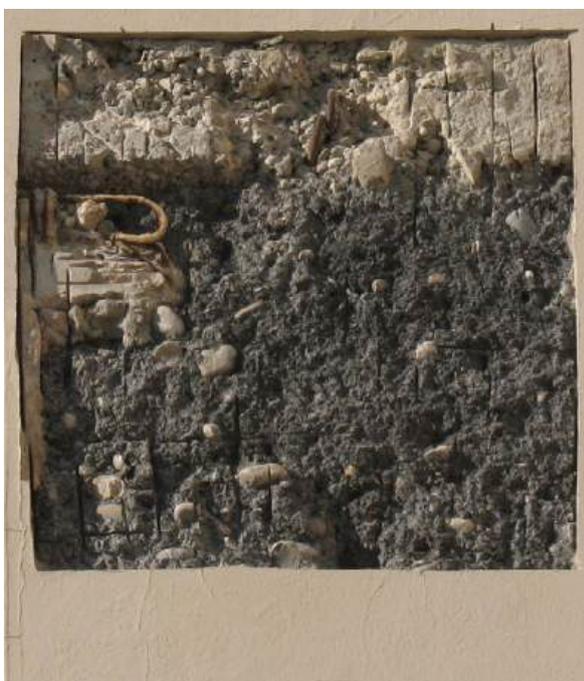
Ainsi, un diagnostic technique préalable peut avantageusement faire apparaître des données relatives au comportement hygrothermique de l'ouvrage³, au-delà des données standardisées ou partielles couramment délivrées (coefficient U, ponts thermiques éventuels, etc.). Pour le bâti ancien, plus encore que pour le bâti d'après-guerre, la caractérisation des parois, leur rôle constructif (mur refend, façade extérieure, façade-pignon...), leur exposition (paroi nord ou sous masque solaire), la nature des espaces qu'elles délimitent (cuisine, sanitaires, espaces chauffés de logements, espaces non chauffés de parties communes), etc., influencent le « fonctionnement thermique » de l'ouvrage.

Concernant les façades, une attention particulière pourra être apportée à la caractérisation de la nature et de la qualité des modénatures et des enduits, des points souvent négligés dans les analyses courantes.

Enfin, autre point notable, en raison d'une composition hétérogène (Partie 1) les sondages destructifs sur les façades en mâchefer sont à faire réaliser en plusieurs endroits par le maître d'ouvrage : en rez-de-chaussée, aux étages intermédiaires, en partie sommitale. Ils permettront de déterminer la nature des matériaux constitutifs des parois et leur mode de mise en œuvre : parois en pisé de mâchefer, ossatures en béton armé et remplissage en mâchefer banché ou en briques de mâchefer, mises en œuvre mixtes, etc. Rappelons que les soubassements sont en général en béton de gravier et que les parois d'étages peuvent être graduellement dosées en scories au fur et à mesure de l'élévation, avec une épaisseur de mur pouvant parfois être dégressive de bas en haut (Partie 1).

Toutes ces données conditionnent le programme ultérieur de travaux et les modes d'interventions sur l'ouvrage. Des « scans structure » peuvent également apporter des renseignements utiles comme sur la connaissance des entraxes de poutrelles et conditionner l'implantation ultérieure de trémies (gainés de ventilation).

Qu'ils soient d'ordre technique, sanitaire ou énergétique, les dysfonctionnements ou les points faibles d'un bâtiment doivent nécessairement être bien identifiés pour programmer des travaux utiles et efficaces.



Sondage destructif réalisé sur un immeuble HBM à Caluire (69) au cours des études préalables au chantier, donnant à voir le pisé de mâchefer à nu, le nez de dalle et le linteau de baie en ciment armé avec son ferrailage (2017), © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

3. FRANZ GRAF, GIULIA MARINO, La cité du Lignon 1963-1971 : étude architecturale et stratégies d'intervention, *patrimoine et architecture – hors-série*, janvier 2012.

Ravalement des façades enduites sur mâchefer

Pathologies ou anomalies récurrentes

Maçonnerie

- Infiltration d'eau
- Fissures structurelles
- Altération des enduits recouvrant le mâchefer (décollés ou manquants)
- Altération des appuis (en ciment, en ciment prompt, en béton)
- Enduits faïencés, fissurés, lacunaires...
- Présence d'enduits ne permettant pas la perspiration indispensable à la préservation du mâchefer (ciment)
- Présence de peintures incompatibles avec leur support (produits organiques, RPE, etc.)
- Présence de graffitis et d'anti-graffitis
- Éclats d'enrobage de linteaux métalliques

Menuiseries

- Défaut d'étanchéité des menuiseries
- Ouvrages fusés ou vermoulus
- Hétérogénéité des éléments de menuiseries extérieures (mobilier de façade, fenêtres, garde - corps, luminaires, volets roulants...)
- Présence de fenêtres PVC et volets roulants, impostes pleines suite à modification de l'agencement intérieur
- Portes d'immeubles altérées (peintures inadaptées sur bois massif, éléments lacunaires)
- Altération du forget ou parties manquantes
- Présence de peintures au plomb

Serrurerie

- Éclatement des scellements des éléments de serrurerie
- Corrosion des éléments de serrurerie
- Défauts de solidité du garde-corps
- Manque de garde-corps
- Affaissement des persiennes et corrosions des lames
- Présence de peintures au plomb

Couverture, Zinguerie

- Infiltration / Défaut d'étanchéité
- Vétusté des évacuations d'eaux pluviales (che-neaux, gouttières, descentes, dauphins)
- Altération des cheminées

Réseaux

- Présence disgracieuse de réseaux courants forts et faibles (Câbles ERDF/ENEDIS, Télé-com, TNT/Satellite Éclairage public, Caténares Tram/Trolleybus)
- Devantures et enseignes
- Mauvais placement de l'enseigne
- Recouvrement d'enseignes obsolètes
- Mauvaise qualité du matériau d'habillage (pérennité et robustesse), appauvrissement de la qualité architecturale des habillages

Bon à savoir

Le temps du diagnostic peut être également le moment de lancer d'autres investigations pour apprécier l'état de dégradation du second-œuvre, ou repérer la présence de matières nocives dans les matériaux en place (amiante, plomb, métaux lourds, etc.). Les édifices d'avant 1948 sont parfois tout aussi concernés par les problématiques de l'amiante que ceux des Trente Glorieuses. Les réhabilitations lourdes, mais également les travaux ponctuels menés dans les années 1980-90 sur l'habitat individuel ou sur le parc social de logement collectif par exemple, ont pu introduire de l'amiante sous une forme d'autant plus diffuse qu'elle n'a pas été homogène : joints-colles de carrelage, colles de sol souple, joints de menuiseries, etc.



Mise à jour des poutrelles métalliques d'une dalle d'étage à l'occasion de l'ouverture d'une trémie d'escalier dans une maison individuelle, 21 av. des acacias 69003 Lyon, 2019, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

1.3. LE DIAGNOSTIC ÉNERGÉTIQUE

Dernier volet des études préalables d'avant-projet : le diagnostic énergétique. Il a pour but de produire des projections en termes de scénarios d'amélioration énergétique et de programme de travaux afférents. Ces hypothèses sont donc à élaborer sur la base d'une connaissance fine du bâtiment pour laquelle l'évaluation de la consommation d'énergie existante et future est capitale.

Pour ce faire, deux types d'information sont utiles : la modélisation thermique du bâtiment sur la base de consommations conventionnelles et le relevé des consommations réelles.

Ces données permettent de produire un modèle du bâtiment fiable et d'évaluer sous formes d'hypothèses l'efficacité des différents postes de travaux envisagés : isolation thermique des murs, remplacement des menuiseries, installation d'une ventilation mécanique, etc.

Ces deux approches complémentaires sont indissociables et permettent d'apprécier à sa juste valeur les chances de réussite d'une opération de réhabilitation énergétique.

L'état des lieux du bâti

comporte plusieurs approches complémentaires :

- une analyse succincte du mode constructif (système structurel et spatial), de la composition des éléments de clos-couvert (murs de façades, toiture...) et des planchers ;
- une analyse historique succincte (par analogie, recherche documentaire (archives) ou relevé in situ) des éléments de façade remarquables à remettre en état ;
- la description de la nature des locaux (rez-de-chaussée, étages et combles, annexes...);
- le relevé sommaire des façades et des éléments caractéristiques (menuiseries de portes et fenêtres, décors, balcons, etc.);
- la reconnaissance des parois existantes : constats visuels et sondages si nécessaire sur toutes les façades et en plusieurs points ;
- la caractérisation des épidermes extérieurs et intérieurs de tous les murs de façade ;
- l'évaluation de l'état sanitaire du bâtiment : repérage des pathologies et des dégradations du bâti et identification des causes ; contrôle et suivi des couvertures, menuiseries, caves, réseaux d'eau pluviales, etc. ;
- la description de la nature et de l'état du mobilier et accessoires équipant les façades (occultations, forêts, gardes-corps, lambrequins, marquises, cheneaux, descentes EP, etc.)



Bon à savoir

La modélisation thermique

La modélisation thermique consiste, par le calcul, à donner une évaluation théorique des consommations du bâtiment. Une représentation physique du bâtiment est réalisée (nature et performance des murs, ponts thermiques, systèmes de chauffage, etc.). Il s'agit d'une représentation dite « conventionnelle » dans laquelle les usages du bâtiment, les modes d'occupation des habitants (temps passé dans le logement, durée d'ouverture et fermeture des ouvrants, etc.) mais également dans une certaine mesure la composition des parois, sont représentés de façon forfaitaire, autrement dit hypothétique.

L'outil de modélisation le plus répandu est issu de la réglementation thermique appliquée à l'existant. Il s'agit d'un moteur de calcul basé sur la RT2005. Le coefficient synthétique retenu est le coefficient d'énergie primaire « Cep » (prenant en compte les consommations de chauffage, d'eau chaude, de refroidissement, des auxiliaires et de la ventilation). L'obtention d'aides financières pour la réhabilitation est généralement assujettie à des valeurs seuils tirées de ce calcul réglementaire (certificats d'économies d'énergie, Plan Climat, labels, etc.). L'évaluation des Cep « avant » et « après » travaux est donc souvent un passage obligé, la comparaison des deux valeurs étant généralement retenue pour apprécier la performance de « l'effort d'amélioration énergétique ».

Il est également possible de recourir à des méthodes de simulation thermique (STD), plus complexes et donc plus coûteuses, mais également plus précises et plus fiables. Elles consistent à modéliser un bâtiment à la fois dans sa composition physique

et dans ses usages, en fonction de la connaissance précise que l'on a des modes d'occupation. On parle de modélisation dynamique. Cette démarche est parfois fort utile lorsque les biais du calcul réglementaire sont jugés trop importants.

N.B. : Le DPE (Diagnostic de Performance Énergétique) dont la notoriété tient au fait qu'il est obligatoire dans le cadre des mises en location ou vente de biens immobiliers n'est pas un outil de modélisation mais un outil de calculs thermiques. Il n'offre malheureusement qu'une évaluation très approximative et insuffisante pour réaliser le diagnostic thermique d'un bâtiment et entreprendre des travaux en connaissance de cause.

Consommations réelles et consommations conventionnelles d'énergie

En parallèle de la modélisation théorique, il est toujours prudent de capitaliser les informations relatives aux consommations réelles du bâtiment, c'est-à-dire celles établies par les compteurs d'énergie (Gaz, Électricité, Fuel,...). Ces données renseignent sur le niveau de consommation effectif du bâtiment, et peuvent informer indirectement des modes d'occupation et du « comportement énergétique » des habitants.

La compréhension du niveau de ces consommations est fondamentale lors de la phase de diagnostic. Les causes des éventuels écarts avec les consommations théoriques issues de la modélisation (surconsommations liées à des dysfonctionnements techniques ou régulation défaillante, sous-consommation révélant des situations d'auto-restrictions ou de précarité énergétique...) doivent toutefois être élucidées pour orienter les choix des travaux.

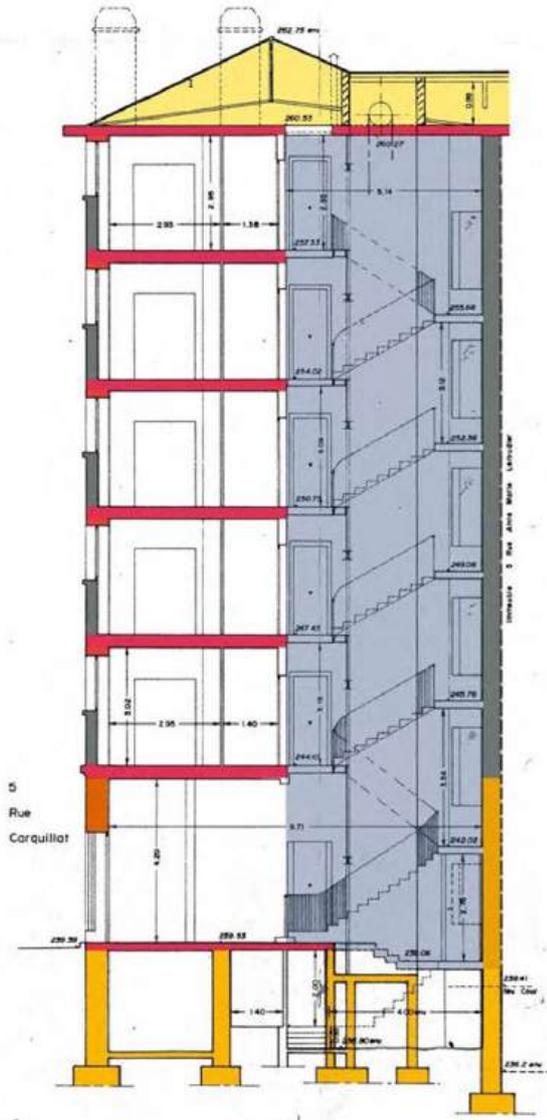
Des modes d'évaluation à consolider

L'écueil des approches d'évaluation vient souvent du fait qu'un ouvrage du XX^e siècle n'est pas intuitivement associé à la catégorie du bâti ancien et que les réponses standards et solutions techniques courantes appliquées à la rénovation d'un parc architectural récent ne sont pas adaptées à un ouvrage en pisé de mâchefer.

Tout l'enjeu porte donc sur la manière dont l'outil de calcul utilisé permettra ou non de caractériser précisément la maçonnerie et d'ajuster en conséquence ses propriétés thermiques. Trop souvent, la valeur de conductivité thermique utilisée dans les modélisations du bâti en pisé de mâchefer est rapportée à la valeur

par défaut du béton de ciment (Voir chapitre 4 de la 2^e partie : Optimiser les qualités thermiques de l'enveloppe), ce qui n'est pas comparable.

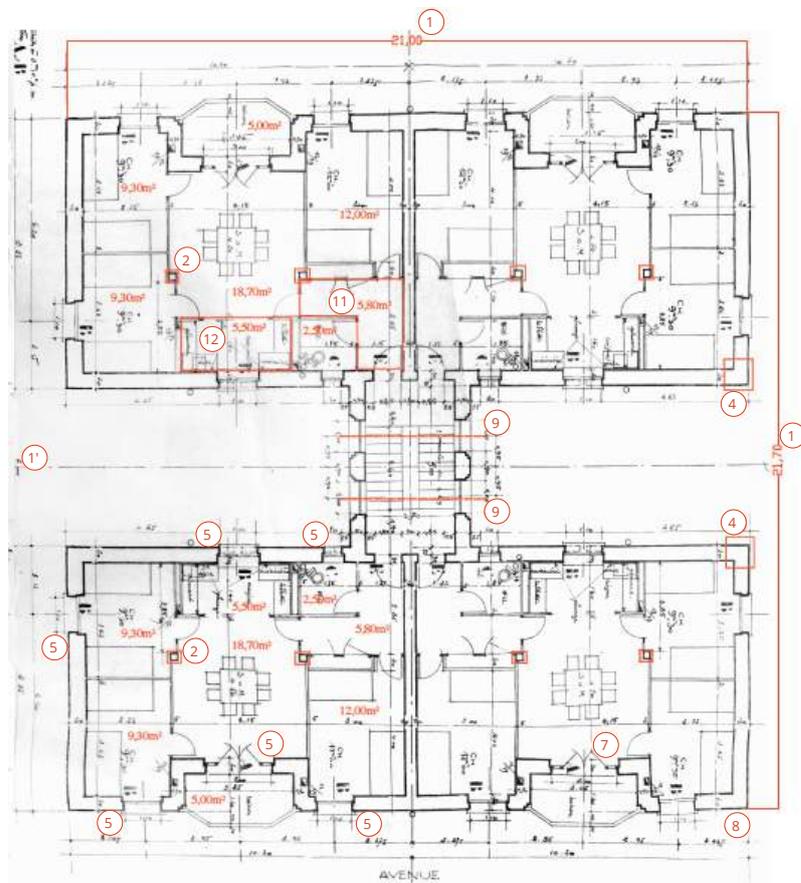
La recherche documentaire, notamment la datation de l'ouvrage, l'identification précise des éléments constitutifs des murs et des toitures doivent ainsi permettre de contribuer à l'évaluation des performances thermiques de l'ensemble des composants de l'enveloppe. Des diagnostics complémentaires comme la thermographie peuvent apporter des renseignements utiles qui peuvent révéler par exemple la présence d'éléments en béton formant des ponts thermiques (chainages, linteaux, poteaux).



Analyse anatomique sur les documents d'archives de la Cité HBM Clos-Jouve, rue Carquillat, Lyon 4 (Grand Lyon Habitat), Extrait du Diagnostic technique et architectural, pièce-type d'un diagnostic technique © Fleurent Valette architectes



Thermographie réalisée sur une maison « Castor » de 1957, 7 allée des Troènes à Lyon 5, pièce-type d'un diagnostic énergétique © Cerema (Février 2018).



Extrait de l'analyse comparée des deux projets conçus par Tony Garnier pour la Cité HBM des États-Unis (Projet initial de 1920 et projet réalisé de 1931), © Archives Municipales de Lyon, côte 1616WP243, pièce-type d'un diagnostic patrimonial © Archipat

Modifications structurelles :

1. Modification de l'emprise générale
projet 1 : 27,00 x 18,60 m
projet 2 : 21,70 x 21,00 m
- 1'. Mais largeur du redent central constante à 5,00 m
2. Mur de refend transformé en poteaux porteurs moins larges
3. Suppression du retrait des façades
4. Suppression des redents des angles extérieurs
5. Réduction du nombre de fenêtre de 7 à 6 par logements
6. Suppression de l'éclairage naturel du vestibule
7. Modification de l'orientation de la S. à M. de N/S à E/O
8. Suppression du traitement de l'angle coupé
9. Rapprochement des 2 travées de fenêtres de la cage d'escalier

Modifications d'aménagements :

10. Disparition des placards aménagés dans les chambres et le salon
11. Agencement général de l'entrée modifié
12. Fusion du débarras et de la cuisine en une plus grande pièce
13. Disparition de la gaine de chauffage direct de la S. à M.

Analyse du système constructif (extrait)

Fondations et sous-sol :

- Fondations de 80 cm d'épaisseur sous les murs de façades, de refend et d'escaliers et de 60 cm pour les murs de fosses ;
- Murs en béton de gravier (dosé à 150 kg de chaux hydraulique par m³ de gravier).

Murs de façade en soubassement :

- Murs des façades du RdC en béton de chaux lourde (dosé à 250 kg par m³ de gravier) jusqu'à la hauteur des cordons couronnant le soubassement ;

- Piliers des locaux en RdC en béton de ciment portland (dosé à 300 kg par m³ de gravier). Armatures dans les piliers de section < 1 m ;
- Autres murs en béton ordinaire jusqu'à la hauteur de 80 cm au-dessus du sol des RDC ;
- Revêtement du soubassement en ciment imitant un aspect de pierre dure avec de gros bossages.

Murs de façade en étage courant :

- Murs en pisé de mâchefer d'épaisseur 45 à 50 cm (dosé à 150 kg de chaux hydraulique par m³ de mâchefer) ;
- Revêtement d'imperméabilité pathologique (résines organiques thermoplastiques des années 60) appliqué sur les enduits d'origine de la construction (badigeon de chaux hydraulique)

Balcons :

Balcons du 5^e étage en ciment armé faisant corps avec le plancher couvrant le 4^e étage et supportés par des consoles en ciment armé.

Planchers :

- Planchers en béton armé (hourdis creux placés entre poutrelles porteuses) de 30 cm d'épaisseur (35 cm pour le RdC) formant chaînage continu de tous les murs ;
- Poutres principales engravées aux deux tiers de l'épaisseur des murs.

Escaliers :

Escaliers de caves et d'étages courants en pierre de taille dure.

Toiture :

- Assemblage mixte de pièces d'acier et de bois formant charpente ;
- Structure métallique porteuse, fermes en pointe de diamant, chevronnage et voligeage en bois ;
- Couverture en tuile mécanique de terre cuite (pente 45% env.) ;
- Souches de cheminées pourvues d'un socle en ciment et d'un habillage en briques de terre cuite.

La recherche d'une efficacité réelle de la réhabilitation énergétique doit pouvoir s'appuyer sur une connaissance fine du comportement thermique du bâtiment.

Des objectifs de performance à hiérarchiser dans une vision d'ensemble

Rappelons qu'une approche globale est indispensable pour atteindre les meilleurs niveaux de performance énergétique sans avoir à réengager des travaux dans les années futures.

Dans cette optique, le projet devra veiller à préparer une programmation de travaux dits « BBC compatibles » sur plusieurs postes, dont il est désormais admis de considérer que l'ordre de priorité est le suivant : réduction des besoins en tout premier lieu, optimisation des systèmes ensuite, recours aux ENR enfin⁴.

Ainsi, le diagnostic énergétique doit permettre de déceler les pistes de travaux qui permettent tout d'abord de réduire les besoins en privilégiant les systèmes passifs : amélioration des performances de l'enveloppe (façades, menuiseries, toitures, plancher bas), contrôle des apports solaires (gestion du rayonnement par saisonnalité, habitabilité thermique d'été, confort lumineux, etc.), sensibilisation des occupants aux fonctionnements du bâtiment et notamment aux comportements responsables en hiver et en été.

Ensuite, et conséquemment au traitement passif de l'enveloppe, le diagnostic doit livrer les données d'état des lieux qui permettent d'évaluer l'opportunité de réajuster les systèmes techniques existants (production de chauffage et d'ECS, ventilation, climatisation) pour répondre au nouvel équilibre thermique et aéraulique du bâtiment et remplacer si nécessaire les équipements techniques par des systèmes plus performants, moins énergivores et de préférence collectifs (chauffage et production d'ECS, raccordement au réseau de chaleur urbain, etc.).

Enfin, et seulement en dernier lieu, l'étude énergétique peut démontrer si la production d'énergie renouvelable sur site s'avère opportune (solaire photovoltaïque, solaire thermique, géothermie).

L'analyse énergétique du bâti existant comporte plusieurs approches complémentaires :

- une présentation des caractéristiques du bâtiment et de son contexte immédiat (environnement bâti, compacité, taux de percements, masques solaires, destination des usages par niveau, exposition des logements, espaces tampons (combles, parties communes, celliers, etc.) ;
- des relevés d'échanges avec les occupants pour identifier les comportements pouvant influencer sur les consommations énergétiques ;
- une analyse des besoins actuels en termes d'énergie sur la base des relevés de consommations réels ;
- l'analyse des performances et déperditions thermiques des différents éléments composant l'enveloppe de l'ouvrage ;
- un contrôle du fonctionnement des équipements et systèmes en place (ventilation, chauffage, ECS) ;
- une évaluation du gisement solaire (apports passifs, potentiel photovoltaïque).

1.4. LES PRINCIPALES PATHOLOGIES OBSERVÉES

Avant d'intervenir sur un ouvrage en mâchefer, une recherche des éventuelles pathologies est indispensable, afin d'éviter non seulement de les aggraver lors des travaux à mener, mais surtout, d'entrevoir les pistes de résolutions ou de correction à l'occasion du projet.

Comme évoqué précédemment, l'âge d'une construction en pisé de mâchefer – qui est au minimum de soixante-quinze ans, et plus souvent proche du siècle – est synonyme d'interventions multiples au cours de la vie du bâtiment (ou de transformations plus ou moins lourdes ; installation de chauffages individuels, création de salles de bains, remplacement de fenêtres, ravalement de façade, installation de cages d'ascenseurs, etc.). Ces réhabilitations successives ont souvent été réalisées au coup par coup, dans le cadre d'approches « normalisées » et sans étude globale : ravalements à base de peintures organiques plastiques, fenêtres en PVC double-vitrage posées en rénovation sur les anciens dormants en bois, salle de bains créées avec des ventilations insuffisantes ou bouchées à posteriori, etc.

4. « Scénario négaWatt » – Association NégaWatt.

1.4.1. Les Pathologies liées à l'humidité

Premier sujet de désordres constatés dans les bâtiments d'après l'Agence Qualité Construction (AQC) : les pathologies liées à l'humidité. Comme l'ont montré les essais réalisés par le Cerema, le mâchefer est poreux et perméable à la vapeur d'eau. En effet, il est capable de se gorger d'humidité en excès et des risques de dégradations peuvent survenir : du désordre esthétique (traces d'humidité sur les façades, effritement des enduits, microfissurations) à des problèmes d'ordre sanitaires (apparition de champignons), voire structurels (pourrissement ou corrosion des têtes de solives, fissures structurelles...).

La faible connaissance du bâti en mâchefer et, d'une manière générale, l'attention inégale des porteurs de projets aux spécificités du bâti ancien, ont pu conduire à fragiliser ou endommager certaines constructions. Des désordres graves ont même parfois pu causer leur disparition prématurée. On pense à certains bâtiments en pisé de terre, pour lesquels une mauvaise gestion de l'humidité dans les parois a pu occasionner des phénomènes de condensation à l'intérieur des murs, des remontées capillaires ou des pénétrations d'eau de pluie dans les murs façades. Les signes visibles, comme l'apparition de traces de salpêtre, le décollement de couches d'enduit ou l'érosion directe des murs, en l'absence, ou après disparition d'enduit, peuvent être parfois longs à se manifester.

En pied de façade, la hauteur de remontée de l'humidité peut couramment être observée jusqu'à 35 cm au-dessus du sol, voire davantage si l'épiderme est étanche.

Souvent en cause, la mise en œuvre de matériaux inappropriés ou incompatibles avec les caractéristiques hygrothermiques du support : enduits ciments, enduit plastique, ancien RPE, isolants extérieurs étanches à la vapeur d'eau, doublages intérieurs, reliquats de papiers peints vinyliques derrière des doublages, peintures plastiques, toiles de verre avec colle plastique, etc.

La nature pédologique⁵ du sol est également un facteur de vigilance pour le bâti en mâchefer, notamment lorsque les sols sont peu drainants. Les anciennes fouilles pour l'installation d'une cuve enterrée, ou des travaux de terrassements à l'occasion d'une extension ou d'une construction avoisinante auront pu entraîner des modifications des circulations hydriques dans le terrain et provoquer les désordres.

5. Partie de la géologie qui étudie les caractères chimiques et physiques des sols.

Si les conséquences structurelles de ces phénomènes s'avèrent en général moins critiques sur le bâti en mâchefer que sur les ouvrages en pisé de terre comme en témoignent les résultats d'essais présentés (Partie 1), les causes, le cas échéant, nécessitent impérativement d'être investiguées.

Citons également les travaux d'aménagement réalisés au cours de la vie d'un bâtiment (appropriation et isolation des combles, remplacement des fenêtres, doublages intérieurs, pose de sols plastiques sur les parquets etc.) mais également les nouveaux modes de vie et l'évolution des standards de confort, d'hygiène (multiplication des salles d'eau, fréquence des douches, installation de lave-linge et sèche-linge à l'intérieur de l'habitation, etc.) pour lesquels la gestion de l'humidité est devenue un point critique. Le nécessaire renouvellement d'air du logement requiert alors des dispositifs spécifiques, naturels ou mécaniques, pour permettre l'évacuation de la vapeur d'eau excédentaire générée à l'intérieur de l'habitat.



Décollements de revêtement peint sur appui de baie en ciment naturel (2020), Cité HBM Clos Jouve, 1 rue Carquillat, Lyon 4, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

1.4.2. Les pathologies structurelles

Les structures des édifices en mâchefer sont constituées de murs pleins et de dalles en poutrelles-béton ou acier (souvent employées pour les dalles de RDC sur cave) et hourdis béton. Du fait de l'âge des structures, une microfissuration a pu naître dans les planchers, sans gravité en elle-même, et permettre l'infiltration de l'eau condensée dans le cœur de la structure et dans ses armatures. Ces pathologies peuvent être conséquentes pour l'intégrité structurelle du bâti, et il

convient de s'assurer à tout moment de leur absence. On peut rappeler également ici, à titre indicatif car elle ne relève pas d'une typicité du mâchefer, la problématique du tassement différentiel des sols. Cette pathologie que le dérèglement climatique rend de plus en plus fréquente, naît de l'alternance de longues périodes de sécheresses et d'épisodes pluvieux intenses, notamment en présence de sols argileux. Les mouvements de terrain qu'elle provoque (retraits, gonflements) peuvent générer des fissures verticales ou biaises dans les murs, souvent reliées aux angles des ouvertures du bâtiment. Une cartographie nationale de l'exposition aux risques de gonflement et retrait des argiles existe en ligne⁶.

Le pisé de mâchefer étant à la fois plus résistant et moins ductile que le pisé de terre crue, il est difficile d'affirmer, en l'état des connaissances, qu'il s'adapte mieux que ce dernier aux déformations du sol support.

Plus rarement enfin, des pathologies structurelles entraînant des fissurations de la maçonnerie ont pu survenir consécutivement à des surcharges mal réparties sur une poutre ou suite à la surélévation du bâti, par l'adjonction d'un ou plusieurs niveaux supplémentaires. Si les analyses menées en laboratoire témoignent de bonnes capacités de résistance à la compression (1^{ère} partie), les surélévations du pisé de mâchefer en structure légère à l'instar des murs à ossature bois restent très souvent privilégiées par les maîtres d'œuvre.

Bon à savoir

Parmi les spécialistes de la construction, l'architecte est celui à qui s'imposent les obligations d'assurance les plus étendues. Inscrit auprès d'un ordre professionnel, il est obligatoirement assuré pour ses engagements, pour les dommages causés à une tierce personne et pour les désordres et les malfaçons dont il peut être reconnu responsable.

Points de vigilance en phase préparatoire du projet de maîtrise d'œuvre (cas des bâtiments de logement collectif) :

- lancer l'ensemble des diagnostics (patrimonial, technique, énergétique) en même temps le plus en amont possible ;
- échanger avec les services instructeurs (Service urbanisme, UDAP) sur la base des études de diagnostic ;
- confier le diagnostic technique, patrimonial, énergétique (y compris relevés, sondages, thermographie, équipements techniques, et visites des logements) à l'équipe de maîtrise d'œuvre chargée des travaux ;
- ou confier une mission de synthèse des diagnostics à l'équipe désignée ;
- intégrer une simulation thermique dynamique (STD) pour contrôler le l'habitabilité d'été et calibrer finement les consommations prévisionnelles dès les premières estimations de coût global (phase DIAG ou APS) ;
- lancer un relevé partiel mais représentatif des locaux avant l'APD ;
- réaliser une étude de programmation en coût global pour les questions énergétiques (investissement travaux + coût de l'énergie) comprenant :
 - montants de travaux,
 - montants annexes (dont prestations intellectuelles, assurances, déménagements, etc.),
 - consommations énergétiques,
 - frais d'entretien et de maintenance,
 - frais de remplacement des équipements en fin de vie,
 - revalorisation de la valeur vénale du bien.
- réaliser des investigations complémentaires (« scans structure », diagnostic amiante, diagnostic plomb) lorsque cela s'avère utile pour la phase opérationnelle ;
- intégrer systématiquement des interventions sur l'optimisation de la ventilation et le remplacement des systèmes chauffage non structurés ou électriques.

6. <https://infoterre.brgm.fr/actualites/exposition-au-retrait-gonflement-argiles>

Résidence Jean Macé (v. 1946-1949), Place Jean Macé, Avenue Berthelot,
Lyon 7, Pierre Labrosse architecte



2. ENTRETENIR LA FAÇADE

Afin de préserver la salubrité des bâtiments, l'entretien régulier des façades est un impératif, indépendamment des projets de réhabilitation ou de rénovation énergétique. La pollution de l'air entraîne un encrassement progressif des enduits. Sur le pisé de mâchefer, les conséquences sont principalement esthétiques (noircissement), celle-ci n'entraînant pas d'altération mécanique des enduits ou de la maçonnerie en elle-même.

Toutefois, même si les enduits en place ont été réalisés dans les règles de l'art et présentent une bonne résistance à l'érosion (enduits peu poreux et peu perméables), des décollements de matière dus à des humifications répétées provoquée par l'eau de pluie battante (orientations Sud-Sud-Ouest/Ouest et Nord-Ouest) et des cycles de gels et de dégels peuvent finir par les altérer sur le temps long.

L'action de la pluie peut également engendrer une altération des éléments en béton ou ciment armé apparents ou non, et la corrosion de fers (éclats d'enrobage de linteaux métalliques entraînant la fissuration ou l'éclatement des épidermes).



Décollements de peinture au droit des pièces humides (2020), Cité HBM Clos Jouve, Lyon 4 © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

Les autres désordres observés peuvent venir de malfaçons, ou être la conséquence d'altérations connexes. Le développement de mousses, sur des façades à l'ombre ou au nord, peut être le signe de présence d'humidité excédentaire dans la paroi. L'action de l'eau de pluie peut également créer des traces de coulures, notamment lorsque les dispositifs de protection vis-à-vis du ruissellement ont disparus (couvertines ou appuis manquants), en cas

d'oxydation des ouvrages de serrurerie (lambrequins, garde-corps, marquises, etc.) ou lorsque les dispositifs de conduite d'eau ne sont plus étanches (descentes et chéneaux). Enfin, il peut s'agir de la présence de produits ne permettant pas la perspiration indispensable à la préservation du mâchefer (peintures organiques, RPE, produit anti-graffitis, etc.).

2.1. LA GESTION DE L'HUMIDITÉ

2.1.1. Traiter les remontées capillaires

Pour les constructions en mâchefer comme pour tout bâti ancien en général, les murs de fondations sont en contact direct avec le sol. Selon la porosité du matériau qui les constitue, l'eau contenue dans le sol est alors susceptible de migrer dans la paroi. C'est le phénomène physique de capillarité par lequel un liquide tend à monter au travers d'un corps poreux en dépit des forces de la gravité.

Ainsi qu'il l'a été démontré par les analyses en laboratoire (1^{ère} partie), le pisé de mâchefer est un matériau à la fois très poreux et très capillaire. Il aura donc une forte tendance à absorber l'eau liquide à laquelle il sera exposé, notamment à celle présente dans le sol mais également à celle issue du rejaillement ou du ruissellement pluvial en pied de murs. C'est la raison pour laquelle le bâti en pisé de mâchefer a généralement fait l'objet de précautions constructives lors de son édification par les anciens : la base de l'ouvrage est construite avec un béton de gravier dépourvu de scories, à l'instar des constructions en pisé de terre qui sont édifiées sur des soubassements en pierre.

Toutefois, qu'il soit en pierre, en terre ou en mâchefer, une manifestation modérée de capillarité est un phénomène normal dans le bâti traditionnel. Bien connu des anciens, parce que présentant un risque d'incompatibilité avec les conditions d'un habitat sain, il était maîtrisé grâce à une mesure simple, qui consistait à conserver aux murs et aux sols leur capacité à évacuer rapidement cette humidité excédentaire en surface, par simple évaporation.

Dans le cas de travaux de rénovation, il s'agira donc d'éviter (ou de déposer, le cas échéant), tous les revêtements étanches qui sont des causes d'altération de cette régulation hygrothermique « naturelle ». On veillera notamment à ce que les sols entourant les murs de la construction, aussi bien à l'ex-

térieur qu'à l'intérieur (pour ce qui concerne les sols sur terre-plein, c'est-à-dire en contact direct avec le terrain naturel) soient perméables en évitant les chapes et dalles en béton. S'il s'agit d'une cave, la terre battue sera préférentiellement laissée nue. En présence de revêtements asphaltés ou en enrobés sur des trottoirs contigus au mur extérieur par exemple, il s'agira de s'assurer que le nivellement de surface présente une contre-pente suffisante pour éloigner l'eau de ruissellement du mur.

À l'intérieur, si le sol est celui d'une pièce habitée, la mise en place d'un hérisson ventilé et de drains, puis d'un plancher, peut être judicieuse⁷.

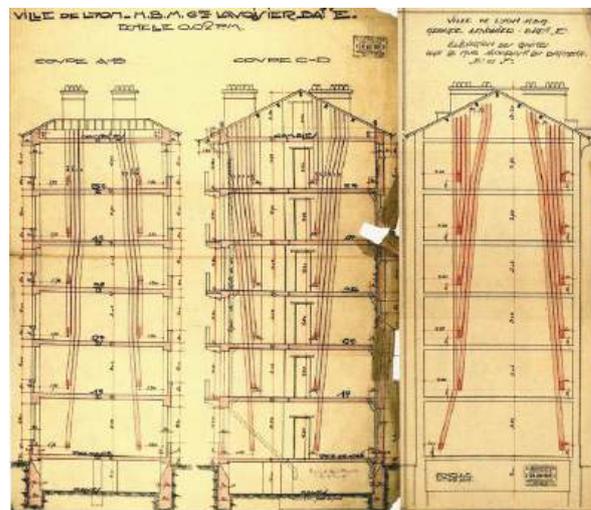
Par ailleurs, comme il a été dit, on veillera à faciliter l'assèchement des pieds de façade en permettant aux parois d'évacuer l'humidité : il s'agira alors de piquer les enduits inadaptés à la base des murs en extérieur (mais également en intérieur, le cas échéant). Cette opération n'est pas anodine car retirer un enduit ciment épais et présent depuis de longues années sur une maçonnerie de mâchefer peut la fragiliser (cas du ciment Portland). En cas de doute, il sera alors nécessaire de procéder à un diagnostic pour définir si un étayage doit être réalisé afin de retirer l'enduit inadapté. Le nouvel enduit de façade devra être perspirant, à base de chaux hydraulique.



Altération des épidermes sacrificiels sur un pied de façade d'immeuble du Groupe HBM Lavoisier (1923-1929), © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

2.1.2. Assurer la ventilation du logement

Autrefois, la ventilation de l'habitat était assurée *de facto* par les nombreux défauts d'étanchéité de l'enveloppe bâtie : fenêtres et portes mal ajustées sur les feuillures des tableaux de baies, joints de vitrages poreux, planchers disjoints mettant en contact le logement avec des combles ou des caves ventilées, mais également les conduits de cheminées à foyers ouverts, conduits de ventilation et de fumées fonctionnant par dépression... Ces circulations parasites avaient pour conséquence d'assurer par défaut un certain renouvellement d'air (dépression naturelle), permettant d'éviter tout désordre grave en termes de pathologies du bâti.



Groupe HBM Lavoisier, Élévation des gaines, V. Bonnetin architecte (1927) - Le Logement populaire à Lyon et sa région 1890-1940, t.2 Bulletin n°23 de la Société Académique d'Architecture de Lyon (2017)

Lors de travaux de ravalement, qui associent le remplacement des menuiseries de fenêtres à la réfection complète des façades, la question de la gestion de l'humidité à l'intérieur du logement devient cruciale. Une ventilation régulée et continue du logement, en toute saison, est alors nécessaire, si besoin grâce à la mise en place d'un tirage mécanique contrôlé (VMC).

Cet aspect sera plus largement abordé dans un prochain chapitre, consacré à la rénovation thermique.

7. Lire à ce sujet : Maisons Paysannes de France - Les planchers dans le bâti ancien, Décembre 2010

2.2. LES TRAVAUX DE RAVALEMENT

Les bâtiments en mâchefer, malgré leur apparente proximité avec les édifices en béton de la seconde moitié du XX^e siècle, réclament une grande vigilance lors des opérations de ravalement, à la fois en termes de respect des propriétés hygrothermiques de la paroi et en termes d'attention aux modénatures.

2.2.1. Choix des produits de façade

Compte tenu de la forte capillarité mesurée du matériau (1^{ère} partie), la surface extérieure d'un mur en pisé de mâchefer devra nécessairement être protégée de la pluie, toute arrivée d'eau liquide pouvant être absorbée très rapidement par la maçonnerie. Il devra donc impérativement être revêtu d'un épiderme : enduit, vêtture ou bardage.

Il n'est pas rare d'observer, depuis le début des années 2000, des opérations de ravalement impliquant des matériaux d'habillage en métal ou en bois, parmi lesquels on peut citer le zinc, l'aluminium, le clin de bois massif (mélèze, pin douglas). La pertinence de ces dispositifs, dès lors qu'il s'agit de complexes ventilés qui ne présentent pas d'incompatibilité avec le fonctionnement hygrothermique du mur en mâchefer, est à évaluer au cas par cas.

En accord avec le mode constructif de mur-poids maçonné, il est conseillé d'opter pour de l'enduit, les bardages ou les vêttures relevant davantage du vocabulaire de la construction légère.

Bon à savoir

L'enduit désigne le revêtement composé d'une ou plusieurs couches d'un matériau malléable, destiné à assurer la protection de l'ouvrage qu'il recouvre. Il est fait en trois fois : crépissage ou gobetis, rembourrage (corps d'enduit) et mouchetage (finition). Il s'obtient par le mélange d'un liant, d'agrégats et d'eau.

Il est qualifié de minéral lorsque la chaux, le ciment, l'argile, ou le plâtre font office de liant.

A contrario, un enduit peut être organique, c'est-à-dire composé de résines acryliques issues du raffinage du pétrole. Au-delà du fait que ce type d'enduit présente un bilan environnemental médiocre, il est inadapté au mur de construction en mâchefer car imperméable à la vapeur d'eau. Le revêtement organique peut néanmoins être privilégié sur des zones vulnérables comme les appuis de baies qui sont très soumis aux intempéries et dont les fragilités à l'eau sont souvent cause de sinistralité.



Cité HBM Casimir Perrier (1929-1934 ; V-A. Robert, J. Marin arch.) - 41, Quai Perrache, Lyon 2 ; avant et après réhabilitation en 2019 (J-F. Marin et P. Marin arch.)

Principes généraux de traitement des maçonneries à l'occasion des travaux de ravalement

Les travaux de préparation peuvent nécessiter :

- la purge des enduits à la chaux altérés ou la purge totale des enduits sur base ciment teints dans la masse en partie courante et soubassements et/ou structures en béton ;
- le décapage des peintures sur enduits conservés puis le lavage ;
- l'agrafage des fissures structurelles (sous étude BET structure) ;
- l'injection de coulis de chaux hydraulique dans les fissures sur enduit conservés ;
- le comblement des lacunes ponctuelles dans la maçonnerie de mâchefer en mortier de ciment, en béton ou agglomérés de béton.

Le traitement des maçonneries porte sur :

- la reprise des appuis dans leur matériau d'origine ;
- le traitement par étanchéité résine et passivation anticorrosion de fers sur les balcons béton sur consoles métalliques rapportées ;
- le traitement des linteaux métalliques par purge des enduits les recouvrant, et renforcement suivant altération et corrosion (passivation générale) ;
- la mise en œuvre d'un gobetis et dégrossi au mortier de chaux ;
- la mise en œuvre d'un corps enduit à la chaux avec renforcements ponctuels armés (fibres végétales si possible, fibres synthétiques, treillis en fibre de verre), avec une finition à l'identique de l'origine (voir § Couleurs et finitions des enduits, ci-après) ou l'application d'une peinture à la chaux ou peinture minérale.

Nota Bene : opter pour des revêtements minéraux épais (RME) à la chaux uniquement (Éviter les RME à base de résine silicate). Proscrire les revêtements plastiques épais (RPE) et les peintures filmogènes à base de résines acryliques ou siloxanes.



Rénovation de la Cité HBM Quivogne Habitat Collectif, 36 rue Quivogne, Lyon 2, Auguste Schaeffer architecte (1911), Jacky Suchail architecte (2020)



Ravalement traditionnel d'une maison type Plan Favier à Lyon 5, © N. Sandt

Ravalement des façades enduites sur mâchefer

Travaux connexes

Menuiseries

- Remplacement des menuiseries défectueuses en bois
- Reprise des étanchéités entre maçonnerie et menuiserie par calfeutrement
- Harmonisation des dispositifs selon modèles originels (fenêtres, persiennes, volets battants...)
- Traitement de finition des menuiseries (prescriptions particulières à prendre en compte en cas de présence de plomb)
- Reprise et rajouts des éléments manquants à l'identique (forme et matériau) sur les forgets
- Décapage des peintures sur portes d'immeuble en bois massif et recouvrement par vernis ou lasure ; reconstitution des éléments de décors manquants ; protection des bas de porte en laiton

Serrurerie

- Reprise des scellements des éléments (garde - corps, lambrequins, éléments séparatifs)
- Traitement ou peinture de finition
- Mise en place de bavettes de protection des arases en cas de pente inversée ou nulle
- Restauration des persiennes soit par décapage en bain et thermolaquage soit par traitement sur site par recouvrement anticorrosif ou remplacement à l'identique

Couverture, Zinguerie

- Re-suivi ou remplacement des descentes EP en zinc ou cuivre
- Ressuivi ou remplacement des brisis

Étanchéité

- Sur les balcons béton rapportés sur consoles métalliques, traitement par étanchéité résine et passivation anticorrosion de fers

Réseaux

- Réduction de l'impact des réseaux

Devantures et enseignes

- Dépose des dispositifs publicitaires surdimensionnés et surabondants
- Rénovation des caissonnages en bois comme à l'origine (essence de bois massif noble)

Tant pour leur caractère typique de l'habitat faubourien que pour leur appartenance au style constructif prémoderne, les façades enduites sur mâchefer réclament une attention particulière à l'occasion des travaux de ravalement afin de reproduire notamment le rendu des enduits d'origine, de qualité et d'aspect très diversifiés. Les effets de matière, le traitement des arrêtes et la précision des alignements pourront en effet évoquer tantôt des modénatures décoratives traditionnelles, tantôt souligner une géométrie très épurée. Pour ce faire, les angles seront dressés à la truelle et on évitera les baguettes en PVC.

2.2.2. Qualité des enduits

Pour ce qui concerne le choix des enduits, les points d'attention pour le mur en mâchefer correspondent aux points de vigilance requis pour le bâti ancien de manière générale. D'ailleurs, plusieurs maîtres d'œuvre ont confié se référer aux bonnes pratiques connues pour le pisé de terre lorsqu'ils intervenaient sur le pisé de mâchefer⁸. Pour les professionnels les plus vigilants, le manque de connaissances théoriques du matériau est donc compensé par un respect de règles s'appliquant à un bâti considéré comme plus exigeant que celui étudié.

La pertinence de l'emploi d'un enduit à la chaux sur le bâti ancien est d'ailleurs largement démontrée sur le terrain, par les retours d'expérience, en dépit de difficulté à modéliser le comportement d'un tel enduit et à disposer de références normatives adaptées pour encadrer sa bonne mise en œuvre⁹.

Ainsi, les enduits avec une chaux naturelle largement dosée sont fréquemment privilégiés pour le bâti en mâchefer.

La chaux permet de protéger les façades des intempéries, des effets du vent et de la pluie, tout en laissant la vapeur d'eau s'évacuer librement. Le fait que l'enduit soit microporeux ne signifie pas qu'il ne soit pas étanche à l'eau. Bien au contraire, si l'eau sous forme de gaz transite à travers l'enduit, l'eau à l'état liquide est bloquée. Avec un enduit extérieur à la chaux, la façade est donc imperméable à la pluie, au ruissellement et aux intempéries.

Les enduits de restauration chaux-sable à grains fins, qui sont à la fois perméables à la vapeur d'eau ($6 \leq \mu \leq 20$)¹⁰ avec un Sd avoisinant 0,10 m, et étanche à

l'eau (facteur d'absorption à la pluie battante $A \leq 1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) sont adaptés au mâchefer. Ils sont fabriqués à partir d'un mortier de chaux grasse ou aérienne, avec un dosage de 300 à 400 Kg de chaux par mètre cube de mortier. Il est recommandé de recourir à un produit ayant un μ inférieur à 9 ou égal à 10.

A contrario, les enduits ciment, qui sont composés d'un mortier de ciment (en général dosé à 400 kg de ciment par mètre cube de mortier) restent peu compatibles avec les caractéristiques du mur en mâchefer. Quoique relativement ouverts à la vapeur d'eau, avec un facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) non négligeable estimé entre 25 et 85¹¹, ils sont insuffisamment capillaires et ne permettent pas à l'eau de transiter dans un sens ou l'autre et ainsi de faciliter le séchage du mur.

Bien qu'engendrant une résistance structurelle un peu moins importante que celle du ciment, la microporosité du mortier de chaux lui confère la capacité à laisser transiter une grande quantité de vapeur d'eau sans se dégrader, et d'évacuer, le cas échéant, les excédents d'humidité de la paroi. Cette diffusion se faisant toujours du point chaud vers le point froid, le transit s'inverse au fil des saisons : en été, la vapeur d'eau migre vers l'intérieur de l'habitation tandis qu'en hiver la vapeur d'eau cherche à rejoindre l'extérieur.

À noter par ailleurs que l'enduit à la chaux est généralement considéré comme un enduit protecteur, qui a vocation à être renouvelé régulièrement.

Bon à savoir

Les enduits à base de chaux peuvent être utilisés aussi bien en extérieur (chaux hydraulique – NHL ou aérienne – CL) qu'en intérieur (chaux aérienne). En outre, la chaux est une ressource naturelle, issue d'une roche calcaire sédimentaire, dont les gisements sont abondants. Contrairement à la chaux aérienne, la chaux hydraulique naturelle contient 12 à 20 % d'argile. Elle réagit par hydraulité, c'est-à-dire qu'elle subit une première prise au contact de l'eau. C'est cette phase de carbonatation qui donne à l'enduit sa dureté et son adhérence finales.

On trouve la chaux hydraulique (NHL) sous plusieurs taux d'hydraulité qui influent sur sa dureté. Plus elle est hydraulique, plus elle est dure. NHL 2, une chaux relativement souple particulièrement indiquée pour le pisé de terre, et NHL 3 conviennent toutes les deux pour les supports en mâchefer.

N.B. Ne pas confondre la chaux NHL avec la chaux hydraulique artificielle nommée HL. Veiller à ne pas utiliser de la chaux dont le chiffre est suivi d'un Z (par exemple NHL3,5-Z) qui contient du ciment.

8. Groupe de travail sur le mâchefer réuni par le CAUE Rhône Métropole entre 2017 et 2020.

9. Lire à ce sujet l'étude réalisée en 2017 par le bureau d'étude Entertech pour Oktave : *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien*.

10. Valeurs issues de la base de données Matériaux dite « Courgey-Oliva » – Association Arcanne – 2021.

11. Ibid

Autrefois, l'utilisation d'enduits bâtards, associant ciment et chaux dans un mélange auquel il était parfois ajouté de l'argile et du sable, était souvent préférée du fait de leur meilleure tenue¹². La présence de ciment (naturel ou artificiel) confère en effet de la solidité à l'enduit et permet un séchage plus rapide. Il n'est donc pas rare de rencontrer des constructions en pisé de mâchefer enduites au mortier bâtard, qui a l'avantage d'être à la fois plus solide que le mortier de chaux et plus respirant que le mortier de ciment. Il est utilisé en particulier pour réaliser le corps d'enduit (en deuxième couche), et dans une formulation assez maigre (de l'ordre de 130 kg/m³).

Si la pertinence d'enduits traditionnels à la chaux paraît donc irréfutable pour le bâti en mâchefer, les enduits dits « bâtardés », bien que beaucoup moins souples, peuvent également convenir. En effet, contrairement au pisé de terre crue et malgré son caractère poreux, le pisé de mâchefer est peu hygroscopique et les variations dimensionnelles d'origine hygrothermique du matériau sont vraisemblablement négligeables.

Toutefois, lors de ravalement à l'enduit bâtard, on veillera à ce que la teneur en chaux soit largement majoritaire dans le mélange, car elle conditionne le facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) du mortier qui peut varier entre 10 et 30¹³ selon les formulations. En général, la part de chaux dans le mortier bâtard doit avoisiner deux tiers du mélange. Cela doit être vérifié systématiquement notamment lors du recours aux enduits prêts à l'emploi proposés par l'industrie du bâtiment et dont les appellations « enduit à la chaux » ou « enduit traditionnel » masquent en réalité des formulations largement adjuvantées et insuffisamment dosées en chaux.

Pour limiter l'effritement du support, il est possible de projeter au préalable un lait de chaux (mélange de chaux et d'eau) sur la maçonnerie brute décroulée. Sur ce support, un gobetis permettra de créer une couche d'accroche pour le corps d'enduit et de favoriser la migration de l'eau dans la paroi vers l'extérieur.

Compte tenu des qualités variables du pisé de mâchefer d'un bâtiment à un autre, en particulier en termes de cohésion, le choix de l'enduit doit se faire au cas par cas. Si les conditions et l'espace alloué au chantier le permettent, il sera toujours préférable de réaliser les mélanges d'enduit sur place afin de pouvoir tester et ajuster les formulations.

2.2.3. Purge des anciens épidermes

Avant de procéder à un ravalement de mur en mâchefer, qu'il soit traditionnel ou thermique, on veillera à ôter tous les épidermes existants (extérieurs ou intérieurs) inadaptés à la diffusion de la vapeur d'eau : on pense bien sûr aux enduits en ciment, insuffisamment capillaires, et dont certaines formulations peuvent être trop fermées à la vapeur d'eau, mais également à des revêtements appliqués lors de précédentes campagnes de ravalement (peintures organiques ou revêtements plastiques épais, par exemple).

Bon à savoir

Cas particulier des supports déjà enduits au ciment Portland :

Le ciment Portland est un ciment artificiel obtenu par la cuisson de roches calcaires (75 à 80 % de carbonate de chaux) et de roches argileuses (20 à 25 %), broyées puis moulées finement et enfin mélangées à du gypse pour retarder la prise. Il constitue ce qu'on appelle le « Clinker » (ou « ciment brûlé » dans son ancienne appellation). Il est à l'origine des ciments courants modernes (CEM)

Il est fréquemment considéré comme inadapté au bâti ancien ; le risque de désordres liés à l'humidité (décollement) étant plus important qu'avec un enduit de chaux naturelle beaucoup plus capillaire.

Cependant, il a pu être utilisé pour enduire de nombreux ouvrages en mâchefer dans les années 1930 à 1950 sans que cela ne s'avère pathologique, probablement en raison de formulations et des procédés de fabrication adéquats (dosage, mélange, broyage, etc) et dès lors que les parois intérieures (enduites au plâtre, ou doublées en briques) n'ont pas reçu d'habillage isolant étanche à la vapeur d'eau.

Dans le cas d'un ravalement de façade revêtue d'un enduit en ciment Portland de bonne tenue et encore parfaitement adhérent sur une maçonnerie de mâchefer, une colature¹⁴ peut être effectuée avant d'appliquer un enduit traditionnel à la chaux et un badigeon. On aura au préalable décapé l'intégralité des peintures éventuellement présentes sur l'enduit avec un lavage haute pression.

En revanche, si l'enduit de ciment Portland est altéré, il est recommandé de procéder à son piquage complet avant la mise en œuvre d'un enduit traditionnel à la chaux en trois couches.

12. Mise en valeur et modernisation des Cités Lyonnaises d'HBM : l'exemple des cités d'Habitation à Bon Marché de Grand Lyon Habitat, CAUE Rhône Métropole pour Grand Lyon Habitat (novembre 2019).

13. Base de données Matériaux dite « Courgey- » - Association Arcanne - 2021.

14. Lait de chaux épaissi d'une charge minérale (en général une poudre de pierre).



Appui de baie maçonné, Cité HBM Clos Jouve, 1 rue Carquillat, Lyon 4
© G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

2.2.4. Décors, modénatures et finitions

Le projet de ravalement est déterminé par le caractère des façades en particulier le traitement ornemental de certains éléments structurels de la façade ou de modénatures (en général en ciment naturel) destinées à la protéger du ruissellement ou du rejaillissement pluvial, et à en valoriser l'architecture : corniches, bandeaux, cordons, appuis, chainages, sous-bassements...

Dans le cas de façades présentant des modénatures nombreuses ou travaillées, l'isolation thermique par l'extérieur pourra être déconseillée afin de préserver leurs qualités architecturales (Voir plus loin chapitre 4).

Brettelé, taloché, ribbé, tyrolien ou brut de lance, l'enduit est fréquemment travaillé pour offrir des qualités de finition diverses sur les différentes parties qui composent l'élévation : fond de façade, encadrements de baies, angles de murs, pied de mur, etc. Lors de travaux de ravalement, il s'agit de resituer cette finesse des effets de matière. Il est intéressant d'observer notamment que les sous-bassements présentent en général des textures plus grossières pour ces parties basses, en contact avec le sol et davantage exposés aux agressions mécaniques et aux rejaillissements.

On veillera cependant à n'employer les finitions texturées que de manière ponctuelle, ces textures étant sujettes à l'encrassement par les polluants atmosphériques et au développement de mousses, en particulier sur les façades Nord ou dans des situations fraîches et humides. Ainsi pour les fonds de façade, il s'avère préférable d'opter pour des finitions lisses, talochées, éparvérées, ou grattées fin.



Pied de façade, Cité HBM Clos Jouve, 1 rue Carquillat, Lyon 4,
© G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Couronnement de façade, Cité HBM Clos Jouve, 1 rue Carquillat, Lyon 4,
© G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



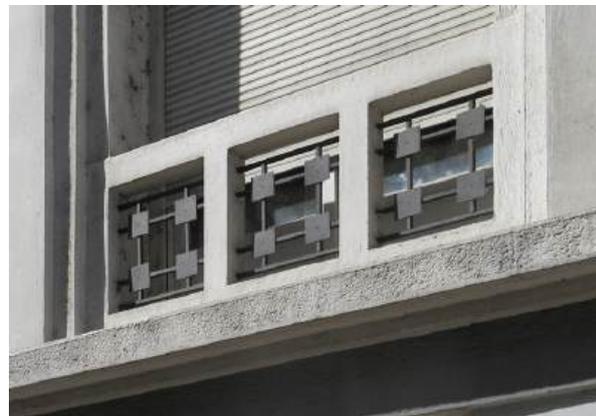
Bandeau, frise et allège décorative sur deux maisons jumelées, Petites Cités Tase, Vaulx-en-Velin (69)



Enduit bossagé ornant la façade d'un Hôtel particulier, 9, place Puvis de Chavannes, Lyon 6 – G. André architecte (1892)



Modénature d'entrée en pied d'immeuble collectif, 53, avenue Berthelot, Lyon 7 – P. Labrosse architecte (1949)



Garde-corps mixte métal-ciment, appui ciment et encadrement rudenté, 27, rue du Dauphiné, Lyon 3 – B. Guérin, architecte (1929) © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

! Bon à savoir

Les couleurs

L'enduit est traditionnellement teinté par les sables présents dans le mélange, ou par l'adjonction de pigments naturels. Autrefois, la texture et la qualité des enduits à la chaux pouvaient varier d'une construction à l'autre, car le sable utilisé pour fabriquer le mortier dépendait de la nature du sol où celui-ci était prélevé, construction et environnement composant alors un ensemble chromatique éminemment harmonieux.

Même si les fabricants industriels proposent aujourd'hui de larges gammes de teintes pour leurs enduits, à la faveur, entre autres, de pigments artificiels, il demeure préférable de s'en tenir aux couleurs locales, utilisées historiquement, et qui ont forgé les tonalités du terroir lyonnais.

Pour les constructions en mâchefer, qui sont pour la plupart modestes, les enduits étaient quasi exclusivement teintés par les sables utilisés : des gris colorés chauds tirant sur le beige.

Les enduits blancs, sont à éviter, car ils relatent une histoire faussée de la construction lyonnaise en mâchefer. Appuyés par les effets d'une mode inspirée de l'archétype de la maison néo-moderne, ils n'ont pas davantage de sens à Lyon et ses environs que les ocres jaunes ou rouges qui ont par le passé cherché à pasticher la maison néo-provençale.



1, rue Carquillat, Lyon 4 © CAUE Rhône Métropole

Le mobilier et les équipements de façade

Un projet de ravalement ne se limite pas au traitement des murs mais intègre la rénovation ou le renouvellement des accessoires de façade : garde-corps, lambrequins, occultations, forjets, zinguerie, marquises, etc. Au-delà de la réfection de façade *stricto-sensu*, un projet de ravalement implique donc une approche multiposte du programme de travaux : le projet doit veiller en particulier à recenser les éléments manquants, endommagés ou inappropriés (garde-corps, lambrequins, ...) et à réharmoniser le mobilier de façade en visant la restitution des dispositifs d'origine. C'est l'occasion, entre autre, de déposer les éléments impropres : volets roulants et coffres, unités extérieures de PAC, conduits de ventilation, jambettes, ventouses, etc.

Comme pour tout programme de ravalement, il s'agit de restaurer un état de façade en adéquation avec la typologie et l'époque architecturale. Le bâti en mâchefer de l'entre-deux-guerres, par exemple requiert des menuiseries de portes et de fenêtres en bois, des ouvrages de conduite des eaux pluviales en zinc naturel, des ouvrages de serrureries/ferronneries en acier laqué ou en fonte, des dispositifs d'occultations en métal laqué (persiennes en acier laqué rabattables, parfois à projection), des emmarchements de perron en maçonnerie de pierre et des marquises en acier peint et vitrage armé...

Les écarts par rapport à cet objectif ambitieux de retour à un « état originel » sont toujours possibles, mais les choix retenus ne doivent pas remettre en cause l'intégrité architecturale de l'édifice.



Habitat collectif social sous gestion GLH, 105 rue Jacques-Louis Hénon, Lyon 4, « Cité Vieille Croix-Rousse » (v. 1921-1928), François et Victor Clermont architectes, Coopérative de Construction L'Avenir (1921-1929)



Les menuiseries

Étant donné l'importance du sujet de la thermique, qui s'invite désormais au premier rang des enjeux de réhabilitation ou d'entretien de l'habitat, **le choix doit se porter préférentiellement sur la menuiserie en bois, de bonne qualité, et sur le vitrage performant, issus de fabricants qualifiés et expérimentés** (avec une attention particulière à la qualité des assemblages – parclose, petit bois – et des quincailleries).

L'hubrisserie métallique, en aluminium ou en acier, de même que l'hubrisserie en polychlorure de vinyle (PVC) sont des éléments anachroniques de l'architecture en mâchefer.

Posés en rénovation (c'est-à-dire avec conservation de l'ancien dormant en bois), les performances thermiques et phoniques sont rarement satisfaisantes en raison des phénomènes de dilatations différentielles entre matériaux (bois/aluminium ou bois/PVC), d'autant plus si le cadre d'origine a été peu ou mal entretenu. À cela s'ajoutent des apports lumineux amoindris par la réduction du clair de vitrage.

Une dépose totale (y compris de l'ancien dormant) avec la mise en place d'un joint mousse polyuréthane imprégné de résine synthétique (type « compriband ») est donc systématiquement à privilégier, en veillant à assainir le support au préalable, y compris, si nécessaire, en reprenant la feuillure maçonnée.



Logements collectifs privés en copropriété, Îlot Part-Dieu, 1892-1913, 19 rue d'Essling, Lyon 3, Félix Mangini constructeur (société des logements économiques)

Les occultations

L'époque des bâtiments en mâchefer coïncide, dans la région de Lyon, avec le développement des dispositifs de persiennes métalliques. Robustes et pérennes, elles ont traversé les épreuves du temps sans difficulté. Certaines ont près de 100 ans et celles qui ont été entretenues fonctionnent toujours.

Mobiles (rabattables, en « accordéon »), elles permettent de moduler l'ambiance intérieure en termes de clarté et d'ensoleillement. Les modèles dotés d'un système à projection sont particulièrement intéressants, car leur flexibilité allie confort d'été (protection solaire, ventilation nocturne), confort lumineux (régulation de l'éclairage naturel) et confort visuel (régulation de la vue sur l'extérieur, voire du vis-à-vis).

Ces dispositifs, typiques du bâti de cette époque, sont à pérenniser autant que possible ; soit en les conservant après révision complète (décapage, thermolaquage, réglage et graissage), soit en les remplaçant à neuf. Le parti pris de leur conservation peut être problématique en cas d'ITE, car il prive l'enveloppe d'une isolation thermique des tableaux de baies.

En cas de dépose définitive, des systèmes alternatifs peuvent être proposés, comme les brises-soleil-orientables (BSO) dont le léger anachronisme sur une architecture XX^e est généralement toléré.

Quant au volet roulant, apparu au milieu du XX^e siècle est très peu représenté dans l'habitat en mâchefer. Il n'offre de surcroît aucune plus-value en termes de confort d'été et de régulation visuelle et lumineuse.



23, rue Louis Loucheur, Lyon 9 © CAUE Rhône Métropole



Habitat individuel (1933), 5 rue Pierre Curie, Bron (69), maître d'œuvre inconnu - Réhabilitation et agrandissement (2021), BARN architecture
F. Genouvrier

3. TRANSFORMER L'HABITAT EN MÂCHEFER

Bien souvent, les opérations de restructuration lourde consistent à redonner de l'attractivité à un habitat vétuste, qui par sa superficie, sa typologie, son organisation intérieure ou son rapport à l'extérieur ne correspond plus aux modes de vie actuels. Il s'agit donc de permettre des transformations maîtrisées de ces édifices : adjonctions, surélévations, percements, créations de terrasse, etc. avec le souci de ne pas dénaturer le bâti existant.

Dans cette logique, on veillera à entretenir plutôt que remplacer, perpétuer plutôt que réinventer... Le recours à d'autres codes stylistiques, entendus comme la volonté de dépasser le pastiche ou le simple mimétisme, et de rechercher une réécriture contemporaine de l'objet est toujours possible, sous réserve que cette transposition tire sa justification d'une leçon du site et d'une compréhension fine du contexte urbain, architectural et paysager.

La réponse au programme doit également proposer une juste adéquation aux facteurs environnementaux, notamment en termes de consommation du foncier, de limitation de l'empreinte carbone et d'économie d'énergie.

Dans ce contexte général, comment entrevoir les possibilités de transformation du bâti en mâchefer ?

3.1 RECOMPOSER LA FAÇADE

La construction en mâchefer, issue de la technique ancestrale du mur autoporteur, révèle en façade la structure même du bâtiment. Celle-ci exprime ainsi les dispositions constructives, mais traduit également dans sa géométrie et son organisation les fonctions et les usages. On veillera par conséquent à respecter cette intégrité constructive lors d'opérations de restructuration. La façade du bâti en pisé de mâchefer est une expression du mur poids. Elle se caractérise ainsi par l'importance des surfaces pleines et par une logique de travées. Cet aspect de la construction inscrit le bâtiment dans son époque, sans effet de mode, avec le souci de la cohérence constructive, une sobriété certaine de la composition et une intemporalité des formes. Cette composition morphologique, très rationnelle, est également héritée

des formes traditionnelles du bâti ancien : étagement et hiérarchisation des niveaux (soubassement, corps principal, couronnement), équilibre des pleins et des vides (parties opaques/parties transparentes), ordonnancement des percements (alignements horizontaux, aplombs des travées, effets de symétrie, etc.), proportions des ouvertures, récurrence des motifs (nombre restreint de matériaux, de formes et de formats).

On remarque également souvent le soin apporté au rapport au sol, en particulier dans le traitement des rez-de-chaussée en lien avec l'espace public. Cela tient notamment au socle constructif qui met en œuvre un matériau de maçonnerie distinct de celui des élévations.

À l'occasion de travaux en façade, même si des projets plus interventionnistes sont toujours possibles, on privilégiera par conséquent le maintien de l'ordonnancement initial des ouvertures – travées et effets de symétrie sont très présents dans la construction en mâchefer –, la préservation des seuils d'entrée d'origine, la proportion des percements (rectangulaire, format plus haut que large) et le principe de cet effet de socle qui assoit la façade.

Les modénatures même si elles peuvent paraître parfois anecdotiques, sont à préserver ou à restaurer. Le cachet de l'architecture ordinaire en mâchefer tient à quelques éléments discrets, dont il convient de préserver ou de restituer la présence : des appuis de baies saillants formant coudières, des garde-corps ouvragés en serrurerie, une marquise mettant à l'abri quelques marches devant un pas de porte, une proportion de baie, sa redivision par des petits-bois...



Habitat individuel type Plan Favier à Lyon 5 © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Habitat individuel (v. 1925), 64 rue Grange Bruyère, Lyon 5, ravalement traditionnel, restauration de la marquise



Habitat individuel (v. 1950-1956), 67 Bd des Castors, Lyon 5, reprise du perron



Habitat individuel (v. 1925), 13 rue de l'oiseau blanc, Lyon 5, adjonction latérale, ravalement



Habitat individuel (1933), 5 rue Pierre Curie, Bron (69), réhabilitation et agrandissement, travail sur les menuiseries (2021 - BARN architecture)



Habitat individuel type Plan Favier à Lyon 5, suppression du balcon et modification d'ouvertures, ré-écriture contemporaine © N. Sandt

3.2. AGRANDIR, RESTRUCTURER, AMÉLIORER

Points de vigilances architecturales

Comme pour la transformation de la façade, un projet d'adjonction se doit de respecter l'intégrité architecturale du bâti existant. À ce titre, qu'il fasse l'objet d'une surélévation ou d'une extension horizontale, le projet doit être attentif à ce que le bâti initial conserve sa primauté sur les éléments neufs rapportés... en termes de gabarit et de prééminence visuelle.

Lors de la réfection du toit d'un édifice en mâchefer, il est recommandé de restituer le matériau de couverture d'origine, à savoir une tuile plate mécanique à emboîtement, plus rarement une tuile canal, et plus exceptionnellement une tuile émaillée vernissée. Les toitures-terrasses peuvent être présentes sur ces bâtiments. Leur isolation pourra être envisagée en étant vigilant à la réhausse d'acrotère. Lors de surélévations, le choix de la forme du toit – à pans (mono pan, double pan, etc.), ou plat (toit-terrace ou à faible pente) – devra répondre avant tout à une logique de composition architecturale d'ensemble et d'insertion dans le contexte (ensoleillement, considérations patrimoniales, surplombs visuels, etc.).

Par ailleurs, lors de restructurations lourdes occasionnant des recompositions à l'intérieur du bâtiment, il s'agira de maintenir ou recréer des orientations traversantes pour les logements, qui sont des qualités précieuses de l'habitat en mâchefer.

Points de vigilances techniques

Les surélévations sont à entreprendre sous couvert d'une étude d'ingénierie structure.

Les essais de caractérisation du pisé de mâchefer ont permis de montrer que les résistances moyennes à la compression se rapprochent des résistances couramment mesurées sur du pisé de terre, entre 1000 et 3000 kPa (1^{ère} partie).

Ils ont également permis de mettre en lumière que les mâchefers sont sensibles à l'eau et peuvent perdre une part de leur résistance en fonction des conditions hydriques (même s'ils ne se désagrègent pas comme pourraient le faire des argiles dans un matériau en terre crue). Ainsi, des augmentations de teneur en eau modérées (1 à 2 % pour une stabilisation à 90% HR) peuvent entraîner des différences significatives par rapport aux résistances à sec (« à sec » signifiant ici stabilisé dans

l'ambiance du laboratoire soit 40 à 60 % HR). La maîtrise de l'eau autour d'un mur en mâchefer est donc un élément d'autant plus sensible dès lors qu'il s'agit de surcharger les murs par leur exhaussement.

Les résultats montrent une dépendance systématique à la teneur en eau de la résistance du matériau. Cela signifie également que si des essais mécaniques doivent être réalisés dans le cadre d'un diagnostic de bâtiment par exemple, une mesure de teneur en eau sera utile pour que les essais soient effectués dans des conditions hydriques les plus proches possibles de la réalité. Pour des opérations de rénovation, il pourrait être intéressant de travailler avec la valeur de résistance stabilisée à 90 % HR : il s'agit d'une valeur sous humidité « normale haute » susceptible d'être rencontrée par le bâtiment au cours de sa vie, et qui présente, d'après les résultats obtenus, une certaine sécurité vis-à-vis d'éventuelles imbibitions pathologiques (faibles différences entre les résistances saturées et sous 90 % HR).

Enfin, toujours sur le plan structurel, même si le pisé de mâchefer est peu sujet aux phénomènes de dilatation et de rétraction sous l'effet des variations de températures et d'humidité, il est recommandé, lors d'un projet d'extension, de veiller à désolidariser le bâtiment neuf du bâtiment en mâchefer¹⁵. Cette précaution structurelle est souvent l'occasion d'un détail architectural pour exprimer, sous forme d'un joint creux ou d'un retrait de façade, cette discontinuité physique entre ouvrage ancien et ouvrage neuf.



Habitat individuel (1933), 5 rue Pierre Curie, Bron (69) – Réhabilitation et agrandissement (2021), BARN architecture F. Genouvrier

15. Précisons toutefois que les résultats des essais du Cerema menés au laboratoire de Bron n'ont pas visé ce sujet de variations volumiques et donc ne donnent pas d'information sur ce point.

Points de vigilances acoustiques

Quelle que soit la destination des espaces, le confort acoustique est un des facteurs essentiels de bien-être dans les bâtiments. Les sources de bruit sont multiples et leurs nuisances peuvent avoir des conséquences graves : troubles de la vigilance, de l'attention, de l'apprentissage, du sommeil, pathologies cardio-vasculaires, stress, etc.

Afin de maîtriser l'exposition des personnes aux bruits, des réglementations existent à l'attention des maîtres d'ouvrage¹⁶. **Les bâtiments d'habitation en pisé de mâchefer sont à rattacher aux « considérations relatives aux bâtiments existants » (Volet C du guide CNB) pour lesquels il est vivement conseillé, lors de travaux de rénovation importants, de chercher à atteindre les performances acoustiques et les niveaux d'isolement seuils exigés par les règlements propres aux bâtiments neufs.**

Les essais menés par le Cerema ont permis d'attirer l'attention sur les points de vigilances requis liés à l'acoustique dans l'habitat en mâchefer, sur la base des normes constructives ou des standards de qualité connus sur les produits (1^{ère} partie).

Murs de refends entre logements

Alors qu'une paroi constituée uniquement de béton de mâchefer ne suffit pas à atteindre tous les seuils réglementaires, les simulations ont permis de constater que l'adjonction sur un mur séparatif (mur de refend en pisé de mâchefer de 30 cm d'épaisseur séparant deux logements distincts) d'un isolant fibreux de 10 cm et d'une plaque de plâtre (type BA13) permettait de respecter les seuils réglementaires concernant l'isolation acoustique entre locaux intérieurs distincts.

Au cours des dernières décennies, les progrès en matière de maîtrise des déperditions thermiques ont indirectement influé sur le confort acoustique des logements – les menuiseries à double vitrage ont par exemple pu représenter, pour les logements, des gains substantiels en termes de protection contre les bruits aériens. Néanmoins, il faut souligner que ces progrès sur l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, qui ont directement bénéficié à l'isolation acoustique vis-à-vis des bruits extérieurs, ont souvent pu, *a contrario*, avoir un impact négatif sur la perception relative des bruits intérieurs, notamment entre logements.

Cet aspect n'est pas à négliger lorsqu'il convient d'agir sur la rénovation des appartements.

Par ailleurs, le recours fréquent à des modes constructifs légers dans des opérations de surélévation de bâti en mâchefer, nécessite une vigilance accrue dans ce domaine de l'isolement acoustique. Par essence, les modes constructifs de préfabrication légère employés (planchers à ossature bois) sont moins efficaces contre la propagation du son que les ouvrages lourds et massifs (dalles constituées de hourdis en béton présents dans les constructions en mâchefer).

Enfin, il faut signaler qu'aucune solution satisfaisante ne permet de se prémunir parfaitement contre la propagation des bruits solidiens dans les bâtiments anciens d'une manière générale, et en pisé de mâchefer en particulier.

Murs de façades

Concernant les murs périphériques, les résultats des valeurs d'indices d'affaiblissements acoustiques pondérés simulés pour cinq types de complexes de façade ont été présentés dans le rapport d'essai du Cerema.

La performance obtenue est intimement liée à la nature du pisé de mâchefer. Une façade en pisé de mâchefer est généralement suffisante pour respecter les seuils dans le cas d'habitations situées hors d'un secteur affecté par le bruit des transports.

Mais les tests sur divers échantillons de matériau ont montré que seul le pisé présentant la plus haute masse volumique et l'élasticité mécanique la plus élevée permettait de respecter l'ensemble des seuils réglementaires, quelle que soit la catégorie de l'infrastructure de bruit et la distance entre cette infrastructure et l'habitation.

Les façades en mâchefer de 45 cm d'épaisseur recevant une isolation thermique (en ITI ou ITE) permettent d'obtenir des performances supérieures aux seuils préconisés dans le Guide CNB.

À noter que l'application d'un enduit de correcteur thermique extérieur conduit à un affaiblissement des performances en isolement acoustique de la paroi mais reste compatible avec les exigences réglementaires pour le cas des habitations situées hors secteur affecté par une zone de bruit (catégories 3 et 4).

Les enduits de correction thermique intérieurs (type chaux-chanvre ou terre-chanvre) représentent une bonne solution d'amélioration, à la fois en termes d'isolement et de correction acoustique. Ils colmatent avantageusement les infiltrations d'air qui constituent des ponts phoniques et leurs caractéristiques physiques leur confèrent également des propriétés d'absorption favorables au confort acoustique intérieur.

16. Réglementation acoustique des bâtiments – Guides du Conseil National du Bruit.

3.3. DÉCONSTRUIRE PARTIELLEMENT ET RÉEMPLOYER

Les murs en mâchefer sont autoportants et participent, comme un tout indissociable, à la résistance structurale du bâtiment. Toute intervention de démolition sur les murs doit donc être soumise à un diagnostic structurel et être préparée par un professionnel.

Pour les éléments déposés ou démolis lors du chantier (gravats, menuiseries, volets), on pourra recourir au réemploi ou au recyclage, avec une attention fine aux filières.

Les entreprises de démolition sont tenues de mener des analyses dites « pack ISDI » sur les gravats de démolition de maçonneries en mâchefer afin de mesurer les concentrations de COT (Carbone Organique Total). Les concentrations courantes de COT sur éluat (de l'ordre de 500 mg/kg de matière sèche) permettent d'évacuer les bétons de mâchefer en installation de stockage des déchets non dangereux (ISDND). Le mâchefer de construction est considéré comme un matériau inerte sans propriété toxique avérée pour l'environnement, au regard des normes actuellement en vigueur.

Après acheminement en déchetterie, les déchets issus de démolition des maçonneries de mâchefer peuvent être enfouis dans des gisements de graves naturelles. Cependant les gravats peuvent aussi être utilisés, dans un objectif « zéro décharge », en sous-couche routière et remblais. Cette réutilisation est néanmoins réglementée pour pallier d'éventuels risques sur l'environnement notamment en cas de concentrations de COT excessives.



Chantier de démolition à Lyon 7^e, ZAC des Girondins (2018), © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

Bon à savoir

Il est à souligner que beaucoup d'éléments de second-œuvre du parc d'habitat en mâchefer ont pu résister au temps et témoignent aujourd'hui, par leur présence, de leurs qualités de robustesse et de pérennité. Les remplacer par des produits ordinaires du commerce est synonyme d'une perte irréversible de qualité constructive et architecturale. Bon nombre de ces éléments s'avèrent facilement réparables ou révisables : portes en chêne massif, quincailleries de fenêtres, cloisons en briques, persiennes, marquises... Ils peuvent non seulement continuer à servir leur fonction plusieurs années, mais permettent aussi la préservation de l'identité architecturale et constructive des édifices. De surcroît, ces éléments sont aujourd'hui bien souvent impossibles à refabriquer avec le même niveau de qualité et de finition.

À défaut, et pour certains d'entre eux, les filières de réemploi sont recommandées pour leur trouver une seconde vie.

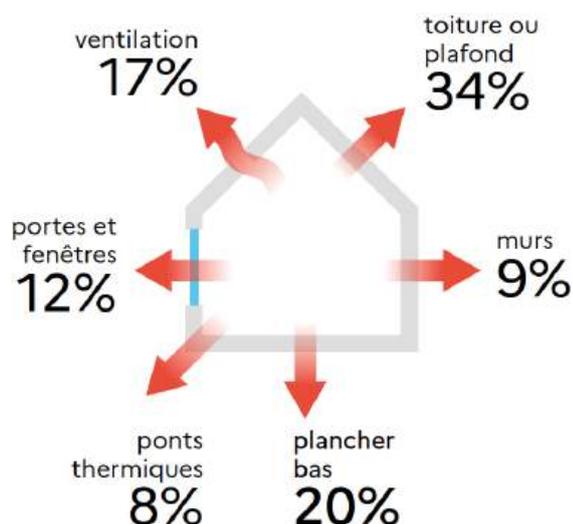
*Habitat collectif social sous gestion GLH, 105 rue Jacques-Louis Hénon,
Lyon 4, « Cité Vieille Croix-Rousse » (v. 1921-1928), François et Victor
Clermont architectes, Coopérative de Construction L'Avenir (1921-1929)
– en cours d'étude de réhabilitation énergétique (Fleurent architectes)*



4. OPTIMISER LES QUALITÉS THERMIQUES DE L'ENVELOPPE

La performance thermique des façades, c'est-à-dire la capacité plus ou moins grande des murs à s'opposer aux déperditions de chaleur, est un facteur crucial pour expliquer les consommations d'énergie. **Les bâtiments en pisé de mâchefer ont tous été conçus à une époque où les procédés d'isolation étaient encore inexistantes.**

Néanmoins, l'isolation des façades n'est pas la seule réponse aux enjeux énergétiques et les propriétés du matériau réclament des arbitrages dans la stratégie de rénovation de l'habitat.



« Schéma des déperditions de chaleur », source : Nouveau Diagnostic de performance énergétique (DPE), Ministère de la transition écologique, février 2021

4.1. ADOPTER UNE LOGIQUE PROPRE AU BÂTI ANCIEN

4.1.1. Relativiser la part des murs dans les déperditions thermiques

D'après l'étude du cabinet d'ingénierie thermique Amstein & Walthert, menée en 2019 sur un échantillon de cinq cités lyonnaises d'Habitation à Bon Marché (HBM) en mâchefer, « l'analyse en coût global et en énergie globale montre que les économies d'énergie liées à l'isolation thermique sont incontestables¹⁷ ». L'isolation de la façade n'est toutefois pas le poste de travaux le plus efficace en termes d'amélioration thermique de l'enveloppe du bâti ancien. Ce constat est corroboré par les modèles thermiques sur les typologies de l'habitat ancien en maçonnerie traditionnelle et par les DPE (diagnostics de performance énergétique) qui montrent que la toiture par exemple est bien plus déperditif que les parois extérieures. Près de deux tiers des déperditions thermiques se font par le toit, les infiltrations et le renouvellement d'air ; les murs n'étant responsables que de 9 à 15 % des déperditions totales selon les sources. Évidemment ces chiffres sont à prendre avec précaution, car ils sont intimement liés à la surface de l'enveloppe, au rapport de proportion entre la surface de toiture et celle des murs, ainsi qu'au taux de percement des façades.

Même si ces données ne sont que des valeurs moyennes, et qu'elles doivent être prises en compte comme telles, elles renseignent sur une tendance et montrent que, à contrario du bâti des Trente Glorieuses, l'enjeu ne porte pas nécessairement en premier lieu sur l'isolation des murs.

Une fois traitées les déperditions liées à la toiture, aux menuiseries, au renouvellement d'air et au plancher bas, les murs de façade peuvent ainsi apparaître comme des leviers d'action secondaires. En dehors d'objectifs de performance très élevés, comme le niveau passif, l'atteinte de niveaux d'isolation satisfaisants est possible, sans toucher aux murs. Des opérations de réhabilitations architecturales en mâchefer parviennent d'ailleurs à atteindre le niveau de performance Effinergie BBC Réno sans recourir à l'ITE¹⁸.

17. Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer, Amstein+Walthert pour Grand Lyon Habitat (Mars 2019).

18. Réhabilitation énergétique de la Cité d'HBM Emile Zola, sise 143, cours E. Zola à Villeurbanne – Maîtrise d'Ouvrage : EMH ; Maîtrise d'oeuvre : Fleurent Architectes.

L'étude du cabinet A+W menée en 2019 montre qu'un mur en pisé de mâchefer de 50 cm possède un pouvoir isolant équivalent à une paroi composée d'un voile en béton doublé de 6 cm de polystyrène expansé ; et que dans les calculs de résistance minimale à mettre en œuvre au sens de la « RT existant élément par élément » la résistance complémentaire requise n'est par conséquent que de $1.4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (depuis 2023). Cette information ouvre la porte à des solutions additives ou mixtes, moins invasives, d'enduits correcteurs thermiques intérieurs ou d'enduits thermo-isolant extérieurs par exemple.

Cette approche n'est pas à négliger, notamment pour des édifices en mâchefer à forte valeur patrimoniale, pour lesquels l'ITE est exclue d'emblée. Le nouveau Label Effinergie Patrimoine, devrait par ailleurs apporter une certaine souplesse pour labelliser les rénovations énergétiques du bâti ancien, même dépourvues d'isolation thermique des murs.

4.1.2. Prioriser les travaux d'isolation en toiture

Le toit représente en moyenne 30 % environ des déperditions totales d'une habitation individuelle ancienne. Ainsi, **l'isolation du plancher haut - à condition que les combles n'aient pas été convertis en surfaces habitables - permettra de maîtriser thermiquement le volume chauffé sur sa partie supérieure, avec un très bon rapport coût d'investissement/gain énergétique.**

Une solution consiste à disposer un matelas isolant sur le sol. Le tampon thermique ainsi conservé entre le dernier étage habité et l'air extérieur permet de contribuer efficacement à l'isolation de l'enveloppe.

Pour des combles déjà isolés, il convient de vérifier l'état des fibres (en général de laines minérales affaissées, ou dont les performances ont été dégradées lors d'anciens dégâts des eaux) et leur répartition homogène sur toute la surface des combles.

Comme pour les caves, mais dans une moindre mesure, les combles doivent demeurer ventilés naturellement afin d'éviter toute pathologie.

Cette isolation des combles est bénéfique en hiver, sur le plan des déperditions de calories, mais également en été du point de vue de la protection de l'habitat contre les pics de température. Le choix d'isolant à forte masse volumique est alors requis.



Habitat individuel (v. 1950-1956), 69 Bd des Castors, Lyon 5

4.1.3 Questionner la problématique des ponts thermiques

Les ponts thermiques sont une interruption ou un affaiblissement localisé dans l'enveloppe d'un bâtiment. Ils sont plus ou moins nombreux et plus ou moins importants selon la structure du bâtiment et son mode constructif. **Dans les bâtiments en pisé mâchefer de facture traditionnelle, les ponts thermiques dit « intégrés » sont relativement faibles et peu nombreux.** Les ouvrages de liaisons ou d'assemblages structurels, qui mettent en contact intérieur et extérieur, y sont quasi absents. À l'instar des typologies de bâti ancien, il y a peu d'encastres des structures. La technique inhérente à la construction en mâchefer employée jusque dans l'entre-deux-guerres, celle du mur pisé, produit une morphologie qui ne génère que peu ou pas d'excroissances extérieures. Les liaisons planchers/murs sont réalisés par des empochements ponctuels de solivages en bois, considérés comme relativement neutres dans la conduction des échanges thermiques.

Ce mode constructif de mur-poids rend en quelque sorte le bâti en pisé de mâchefer « isostatique » sur le plan thermique.

Le mâchefer est en outre un matériau intrinsèquement peu conducteur. Même s'il est souvent assimilé à tort au béton, sa conductivité thermique est équivalente à celle du bois ($\lambda = 0,4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) et sept à huit fois plus faible que celle du béton. L'épaisseur conséquente des murs en pisé de mâchefer – 45 cm en moyenne – offre une résistance minimale de la paroi qui contribue à limiter les températures trop basses côté intérieur (et conséquemment les risques de pathologie liées à la condensation)¹⁹.

Deux points de vigilance sont néanmoins à mentionner à ce stade :

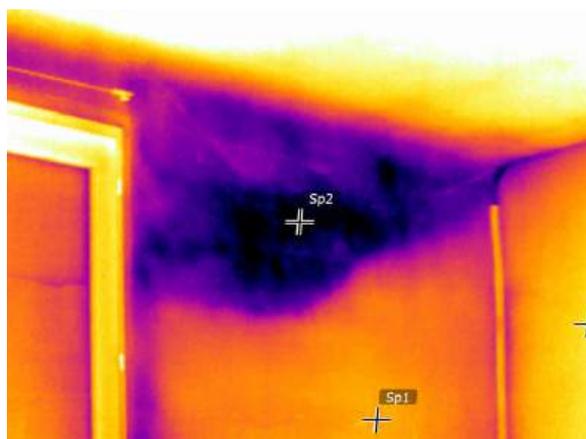
Tout d'abord, il convient de souligner que l'enveloppe en mâchefer peut présenter plusieurs points de faiblesses thermiques liées aux caractéristiques constructives du matériau :

- les soubassements de l'édifice tout d'abord qui sont constitués de maçonneries de gros béton ;
- les ouvrages de structure ponctuelle, par exemple les linteaux, qui sont en béton ou ciments armés ;
- les chaînages périphériques, qui ceinturent l'édi-

- fice et créent les assises d'étages ou couronnent le sommet de l'édifice, également en béton ;
- enfin les allèges de fenêtres, qui peuvent couramment présenter des épaisseurs réduites.

Toutes ces singularités de l'enveloppe maçonnée ne présentent pas les mêmes propriétés que le reste de l'élévation.

De manière générale, on observe également que les derniers étages des constructions en pisé mâchefer, notamment celles édifiées avant la Première Guerre mondiale, peuvent être de facture plus précaire : les murs de façade des derniers étages présentent parfois moins d'épaisseur, pour des raisons structurelles mais aussi économiques, ce qui expose davantage les occupants aux aléas du climat extérieur.



Thermographie réalisée sur une maison individuelle type « Castor » de 1957 sise 7 allée des Troènes à Lyon 5 en février 2018. Les éléments les plus déperditifs repérés sont les chaînages et les liaisons entre le bâti et les menuiseries. © Cerema pour le CAUE Rhône Métropole

19. Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer – Amstein+Walthert pour Grand Lyon Habitat (Mars 2019).



Résidence Jean Macé (v. 1946-1949), Place Jean Macé, Avenue Berthelot, Lyon 7, Pierre Labrosse architecte

On citera enfin les variantes constructives tardives observées sur les immeubles collectifs de grande hauteur (de 6 étages ou plus) et qui peuvent présenter des techniques structurelles mixtes d'ossature en béton armé et remplissage en mâchefer, fréquemment utilisées jusqu'à la fin des années 1950.

Autrement dit, si l'importance des ponts thermiques apparaît comme relative dans la construction en mâchefer, cela ne signifie pas qu'ils ne doivent pas être pris en compte dans le cadre de la réhabilitation. Ne pas traiter les ponts thermiques lors d'une rénovation de niveau BBC amoindrit l'efficacité de l'isolation mise en œuvre. Plus un bâtiment est isolé et plus les ponts thermiques non traités ou résiduels prennent une part prépondérante en termes de déperditions (consommation et confort) et de risques sanitaires (condensations). L'impact des ponts thermiques sur les déperditions thermiques globales du bâtiment sera fonction de leur nombre et de leur importance (matériaux, longueur et épaisseur).

4.1.4. Faire une utilisation éclairée des outils de calculs

Différentes campagnes de mesures ont montré que les sources de surconsommations constatées dans certains bâtiments supposés atteindre un niveau de performance BBC Rénovation sont multiples et engagent toute la chaîne d'acteurs : une erreur de conception, un défaut de mise en œuvre sur chantier, des problèmes de réglage et de maintenance, le comportement des usagers (en particulier lié au choix des températures de consigne); mais également toutes les imperfections des modèles de prévision²⁰. Comme l'avait montré le rapport Batan²¹ en 2011, **les logiciels réglementaires, qui sont basés sur des calculs simplifiés, ne reflètent pas la réalité**. Ils accentuent au contraire les défauts des bâtiments anciens au regard de la norme, parce qu'ils ne tiennent pas compte de ses comportements spécifiques : inertie journalière et saisonnière, déphasage thermique, conductivité thermique réelle, etc.

20. Groupe de travail Réflexion Bâtiment Responsable 2020-2050 (RBR 2020-2050) Note thématique « Bâtiments responsables, usages et confort : quelles lignes directrices pour demain ? » (Novembre 2017) Rédaction : Marc Desportes.

21. Le projet BATAN est une étude sur la modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien d'avant 1948 réalisée sous l'égide du Ministère de l'Écologie et du Développement durable et l'ADEME en 2011 par des laboratoires de recherches (Cerema, EN-TPE, INSA, Université de Lyon).

D'une manière générale, les calculs énergétiques réglementaires s'avèrent peu adaptés au bâti préindustriel. Bon nombre d'observateurs et de praticiens de la réhabilitation témoignent du fait que le bâti ancien ne peut pas être modélisé par les logiciels couramment utilisés, notamment ceux utilisés pour générer les DPE (Méthode 3CL) ou en calculs thermiques conventionnels (méthode THCEX). Et cela vaut, bien évidemment, pour ce qui est de la performance thermique du parc en mâchefer.

Quoiqu'il en soit, la valeur réelle de la résistance thermique du mur en pisé de mâchefer n'est en général pas prise en compte dans les moteurs de calculs standards.

Le mur en mâchefer, que l'on trouve parfois dans la littérature sous la significative dénomination de « béton isolant », possède des performances de conductivité qui se révèlent en réalité non négligeables (voir Partie 1), alors même que les approches normatives les considèrent comme comparables à celles d'un béton classique.

Cette approximation dans le diagnostic a plusieurs effets :

- une augmentation des besoins supposés d'isolation thermique des murs ;
- une surévaluation des gains énergétiques théoriques attendus ;
- une mise en œuvre de travaux surabondants
- un renchérissement superfétatoire des budgets de travaux.

Sans compter une empreinte carbone conséquente et un impact parfois dommageable sur l'aspect esthétique du bâtiment (ITE) voire de potentiels risques pathologiques.

La réglementation thermique pour l'existant (RTex) imposait jusqu'en 2018, une résistance minimale de 2.3 m².°K/W lors de l'isolation d'un mur extérieur de façade. La résistance de base d'une paroi de 45 cm en pisé de mâchefer étant relativement proche de cette valeur limite, l'effort à produire sera donc faible pour atteindre cet objectif²².

Bon à savoir

En matière de logement social, dont une part significative du parc est constitué d'un patrimoine en pisé de mâchefer, les conséquences des approximations sur la conductivité réelle du mâchefer sont fâcheuses. Le financement par la troisième ligne de quittance permet en effet – sans avoir à valider par un accord collectif – de faire apparaître une contribution du locataire au partage des économies d'énergie dégagées par les travaux. Or, le montant de cette contribution se fait sur la base de la méthode de calcul réglementaire. Du fait de l'inadaptation de la méthode Th-CE ex au bâti ancien en mâchefer, les caractéristiques des états initiaux sont péjorées, les économies d'énergie attendues majorées, et les montants demandés aux locataires surévalués par rapport aux économies réelles de charge qu'ils pourront réaliser²³.

Comme il a déjà été évoqué plus haut, le recours au calcul réglementaire comme seul critère d'attribution du classement énergétique du bâtiment et, *a fortiori*, de choix du programme de travaux, est donc préjudiciable. Face à ce risque, il faut rappeler que d'une part, les méthodes de calculs peuvent être affinées via des logiciels qui permettent de travailler avec des valeurs ajustées, et d'autre part, que les simulations à l'aide de ces logiciels doivent être confrontées aux consommations réelles du bâti, sur la base de factures dans des conditions « normales » d'usage des logements²⁴, et ce, afin d'ajuster les calculs théoriques (Voir § Le diagnostic énergétique). Cela signifie que les études thermiques sur le bâti en pisé de mâchefer n'ont de réelle valeur que si elles donnent lieu à des calculs poussés. À ce titre, un DPE ou même un audit réglementaire basique, apparaissent comme largement insuffisants. En réalité, des allers-retours entre conception et calculs s'avèrent toujours indispensables pour affiner un scénario optimal de travaux.

Rappelons en outre que les préconisations de travaux formulées dans les DPE restent non opposables et purement indicatives²⁵.

Certaines simulations bien utilisées et effectuées par des professionnels avertis peuvent aider à statuer

22. L'étude du cabinet A+W citée précédemment a montré qu'un mur en pisé de mâchefer de 50 cm possède un pouvoir isolant équivalent à une paroi composée d'un voile en béton doublé de 6 cm polystyrène expansé.

23. Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer : Volet thermique, hygrothermique et énergétique – Amstein&Walther pour Grand Lyon Habitat (Mars 2019).

24. Ibid.

25. Certaines sont d'ailleurs incompatibles avec le droit des sols et les exigences légales en termes de protection du patrimoine (unité extérieure de PAC, isolation par l'extérieur, fenêtres PVC, etc ...).

sur les arbitrages les plus pertinents – type d'isolation, choix des produits – mais également sur tous les autres axes d'amélioration énergétique de l'ouvrage étudié – performance des fenêtres, isolation de la toiture, protection solaire, etc.

Dans cette même logique, la capacité d'un projet à proposer des réponses sur mesure, en fonction des variations de contextes géographiques, de situations patrimoniales, d'usages et de scénario d'occupation, etc. au-delà d'un unique objectif de performances à atteindre, sera tout à fait salutaire. Une étude de simulation thermodynamique (STD) demeure en cela un excellent outil pour approcher finement la question du projet énergétique en fonction des caractéristiques du bâti et des modes de vie des occupants. Cela signifie en filigrane que pour des opérations modestes pour lesquelles le recours à une STD n'est pas envisageable – en particulier celles qui concernent l'habitat individuel – la dispense d'audit énergétique préalable peut permettre un investissement dans une étude de maîtrise d'œuvre architecturale approfondie assortie d'un volet thermique.

Pour conclure sur ce point, on rappellera que le calcul thermique peut être utilisé à plusieurs fins. La méthode choisie (Th-CE ex, DJU/3CL, STD) est donc à adapter à l'objectif visé, qui peut être varié :

- justifier la conformité à la réglementation thermique globale. Cependant cela est sans objet pour le parc bâti en mâchefer qui est soumis aux minimas performanciers de la « RT élément par élément » où seule l'atteinte d'une résistance plancher en cas de travaux d'isolation de la façade est requise²⁶ ;
- justifier la conformité à un label (par exemple BBC Effinergie Reno) ou à un référentiel ;
- calculer les consommations prévisionnelles et aider au choix des travaux, en termes de performance, de confort et de coût global (investissement + exploitation + maintenance).

Ci-après le bureau d'études A+W propose une approche pertinente de l'utilisation de ces outils en fonction des objectifs de réhabilitation énergétique et de respect d'un niveau de label réglementaire.

26. Résistance thermique de 3,7 m² K/W en vigueur à la date des travaux de la présente étude.

	Calcul Th-CE ex	Simulation thermique dynamique (STD)	Calcul DJU / 3CL (méthode DPE)
Caractéristiques	Calcul réglementaire de la réglementation thermique (RT existant) Calcul complexe suivant méthode avec nombreux paramètres d'entrée	Simulation détaillée horaire de l'ensemble des paramètres	Calcul statique ou pseudo-dynamique
Avantages	Méthode unique pour l'ensemble des constructions en France Méthode requise pour les labellisations, aides et subventions	Prise en compte de l'ensemble des phénomènes (inertie, occupation, charges, etc.)	Très simple à mettre en œuvre et calibrer par rapport à l'existant
Inconvénients	Non adapté au bâti traditionnel et aux bâtiments antérieurs à 1948 Calcul opaque favorisant certains systèmes au détriment d'autres Non adapté aux phénomènes inertiques importants	Simulation complexe à mettre en œuvre et analyser Complexe à vérifier et analyser	Peu adapté à bâti très performant Non réglementaire : Chaque BET peut proposer ses propres paramètres
Adapté à	Recherches de subventions et conformité aux normes et labels	Calcul prévisionnel de charges Confort d'été	Calcul prévisionnel de charges

Domaines d'utilisation recommandés pour les méthodes de calculs thermiques courantes ; Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer : Volet thermique, hygrothermique et énergétique, Amstein+Walthert pour Grand Lyon Habitat (Mars 2019)

Il apparaît clairement que les niveaux d'objectifs de performance évalués sur la base du calcul réglementaire en phase de programmation ou d'avant-projet ne permettent pas d'opérer des choix éclairés en phase projet.

4.1.5. Améliorer l'étanchéité à l'air et optimiser la ventilation

Avant même la supposée faible résistance thermique des murs, la ventilation et le renouvellement d'air constituent des points faibles majeurs du bâti ancien, puisque ce poste peut peser jusqu'à près d'un tiers des déperditions d'un logement.

Au-delà des déperditions stricto sensu, les infiltrations d'air liées à des défauts d'étanchéité de l'enveloppe sont également en cause. En général, ils sont concentrés sur le pourtour des menuiseries au contact de la maçonnerie, mais également au droit de tout point singulier où la maçonnerie de mâchefer n'est pas parfaitement continue : jonction avec les planchers bas (sur caves) et hauts (sous greniers), au droit des passages de gaines, conduits, anciennes bouches ou grilles d'aérations, etc.

Parallèlement à cette chasse aux infiltrations, sources d'inconfort (par exemple, de sensations de courant d'air froid en hiver), le projet doit veiller à permettre une ventilation du logement, cette fois-ci régulée, voire contrôlée, et non plus subie. Il s'agit donc d'agir d'une part sur l'amélioration de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et d'autre part sur la maîtrise de débits de renouvellement d'air.

Car en dépit des déperditions calorifiques qu'elle génère, cette ventilation demeure indispensable pour assurer une qualité de l'air intérieur satisfaisante.

Bon à savoir

Les polluants de l'air intérieur peuvent être d'origine interne (COV, CO₂ expiré, tabac, produits ménagers, etc.) ou externe (pesticides, particules fines, etc.).

Leur impact sur la santé est avéré et largement documenté, comme le révèle l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI)²⁷.

Il est à noter que la ventilation permet de réguler également le taux d'humidité présent dans l'habitat en évacuant la vapeur d'eau produite dans le logement, facteur essentiel du confort thermique et de lutte contre les risques de pathologie du bâti ancien.

C'est donc pour le bâti en mâchefer un point crucial, *a fortiori* pour un bâti qui aurait déjà fait l'objet de travaux d'isolation (combles, fenêtres, murs, etc.). À cette fin, un tirage contrôlé – naturel, mécanique ou hybride (se reporter à l'encart Bon à savoir) – permettra d'assurer une ventilation satisfaisante de l'habitat.

Il y a donc là un triple enjeu de confort thermique, de santé publique et de salubrité du bâti.

Bon à savoir

Parmi les dispositifs de ventilation contrôlée, on distingue les modes de fonctionnement naturels, mécaniques ou hybrides.

Ventilation naturelle

La ventilation naturelle qui équipe parfois certains bâtiments de logements en mâchefer d'après-guerre repose sur un principe physique simple : celui du différentiel de pression de l'air entre intérieur et extérieur. Ce phénomène du tirage thermique s'observe également lorsque l'air chaud, plus léger que l'air froid, s'élève et génère à l'intérieur du logement un balayage naturel. Les pièces d'eau (cuisine, sanitaires, salle de bain) plus chaudes que les autres espaces en raison de leurs usages (cuisson, douches, température de consigne) sont donc des lieux propices à l'évacuation de l'humidité. Celle-ci se fait via des bouches d'aération situées en hauteur, elles-mêmes raccordées à des conduits cheminant verticalement jusqu'en toiture. Les grilles d'entrée d'air, quant à elles, sont situées dans les façades des cuisines, plus tard dans les huisseries de fenêtres des pièces « sèches » (salon, chambre, etc.). Ce système de tirage naturel permanent est fréquent dans les maisons ou immeubles construits avant 1974. Dépourvu de dispositif mécanique pour la circulation de l'air et son évacuation, il a l'avantage de ne rien consommer, tout en étant parfaitement silencieux (sauf en cas de vent fort). Ce système est également plus efficace en hiver qu'en été puisque le débit du tirage naturel est fonction de l'écart de température entre intérieur et extérieur. Ce système de ventilation est très aléatoire et dépendant des conditions météorologiques (température de l'air, pression atmosphérique). L'inconvénient majeur réside dans le fait que, durant la période estivale, le risque d'humidité et de condensation n'est pas impossible, tandis qu'en hiver, une sur-ventilation et donc une déperdition calorifique, est fréquentes.

27. www.oqai.fr/fr



Ventilation hybride

Lorsque le système de ventilation naturelle est équipé d'un ventilateur pour faciliter le tirage thermique, on parle alors de ventilation hybride, de ventilation naturelle assistée (VNA) ou de ventilation « hybride ». Il associe une assistance mécanique à la ventilation naturelle pour renouveler l'air ambiant lorsque le tirage est insuffisant (conditions météorologiques défavorables : absence de vent, écart de température intérieur/extérieur insuffisant, température extérieure supérieure à la température intérieure, situation fréquente en été, etc.). Ce dispositif électrique intermittent est moins consommateur qu'une ventilation mécanique contrôlée. En cas de panne du ventilateur, la ventilation naturelle demeure fonctionnelle. La VNA propose une alternative de renouvellement de l'air intérieur plus économe en énergie que la ventilation mécanique simple flux ou la ventilation double flux.

Ventilation mécanique

Un tirage contrôlé mécanique, assuré par une VMC simple flux, permettra d'assurer une ventilation de l'habitat au juste niveau, sans gaspiller de calories. La ventilation simple flux assure le renouvellement permanent de l'air intérieur à travers des gaines dans toutes les pièces humides du logement. Plus efficace qu'une ventilation naturelle classique, elle répond aux exigences normatives de débit de renouvellement d'air fixées. Avec une technologie hygroréglable (de type A ou B), elle permettra d'adapter le débit d'air au taux d'humidité dans l'air. Les systèmes de ventilation mécanique double flux, outre le fait qu'ils soient plus coûteux à l'achat, sont également plus chers à l'entretien et parfois plus complexes à faire fonctionner pour un bilan énergétique discutable dans l'ancien. Les appareils avec programmeurs et thermostats sont également d'une gestion plus complexe et soumise à une obsolescence prématurée s'ils subissent un défaut d'entretien ou une mauvaise utilisation.

La ventilation centralisée est le système le plus courant installé dans l'habitat neuf depuis la fin des années 1960. L'intégration de cet équipement en réhabilitation n'est pas chose aisée, à fortiori en site occupé, puisqu'il faut disposer d'un local technique ou d'espace sous combles et faire cheminer des gaines dans des logements souvent de petite taille. Sa mise en œuvre nécessite souvent la création de faux plafonds, sachant que la distance entre pièces humides et colonne ne doit pas être excessive au risque d'une perte de charge importante impactant les débits de renouvellement d'air.

Dans les bâtiments collectifs, l'intégration d'une colonne d'extraction nécessite des interventions assez lourdes, avec la perforation des planchers entre étages, si l'on veut s'épargner la pose inesthétique de conduits extérieurs.

La stratégie peut consister à exploiter les conduits de cheminées existants, les conduits shunts ou même les gaines condamnées de vide-ordures. Notons au passage que la suppression des conduits et souches de cheminées, lors d'une réfection de toiture par exemple, n'est pas un acte anodin car elle condamne la possibilité d'éventuels travaux ultérieurs sur la ventilation. Le rôle de ces ouvrages techniques dans la résilience future de l'habitat est capital.

La ventilation mécanique centralisée nécessite en outre l'existence ou la pose d'entrées d'air dans les pièces sèches, en général percées dans les huisseries de fenêtres.

En tout état de cause, les objectifs d'amélioration thermique et d'optimisation de la ventilation doivent être poursuivis en parallèle. C'est un point crucial dès lors que l'on procède à des travaux qui consistent à améliorer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe habitée.



Travaux de création de trémies techniques pour passages de gaine dont VMC dans un immeuble de logement collectif, Cité HBM Dauphiné-Lacassagne, 27 rue du Dauphiné, Lyon 3, B. Guérin, architecte (1929), Réhabilitation thermique (2020), G. Sanchez architecte (ASUR) (2020), © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

4.1.6. Veiller à l'humidité dans les parois

Un projet d'amélioration thermique, quelle que soit la nature des travaux embarqués (isolation des murs, remplacement des menuiseries, modification de la ventilation, isolation des planchers hauts et bas,...), modifie le comportement hygrométrique du bâtiment. La question de la gestion de l'humidité dans les parois doit par conséquent constituer un volet technique à part entière.

Les sources d'humidité dans les parois se répartissent en trois grandes familles :

- les sources extérieures au bâtiment : pénétration d'eau de pluie par la façade et remontées capillaires (par le sol, les fondations ou les murs enterrés);
- les sources provenant du bâtiment lui-même : l'eau contenue de manière résiduelle dans les matériaux constitutifs des parois ou ayant des origines accidentelles (dégât des eaux, fuite de réseau ou de toiture);
- les sources liées aux usagers : respiration et sudation des occupants, cuisson, hygiène (douches, lavage et séchage du linge).

Ces flux d'humidité, sous forme d'eau liquide ou de vapeur, dépendent de facteurs circonstanciels externes (comportementaux, météorologiques, par exemple des gradients de température entre intérieur et extérieur) ou sont liés aux caractéristiques intrinsèques du bâtiment (fonctionnements hygrométriques de ses composants, ponts thermiques...). Dans certaines conditions, ces facteurs permanents ou circonstanciels peuvent occasionner des pathologies²⁸.

À noter que pour veiller à une bonne gestion de l'humidité dans les parois à l'occasion d'un projet de réhabilitation thermique d'un bâtiment en mâchefer, **les approches par les méthodes statiques (type Glaser) sont largement insuffisantes et le recours à des méthodes de simulation hygrothermique dynamique (type Wufi) s'avère nécessaire**²⁹.

28. Lire à ce sujet l'étude réalisée en 2017 par le bureau d'étude Enertech pour Oktave : *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien*.

29. L'humidité dans les parois – Savoir faire les choix pour des bâtiments sains et pérennes – Samuel Courgey – Arcanne – www.associationarcanne.com

4.2. ISOLATION ET CONFORT THERMIQUE : TROUVER LE JUSTE EQUILIBRE

Au-delà des aspects strictement performanciers du bâtiment (maîtrise des consommations et isolation), la question énergétique gagne à être abordée également sous l'angle du confort, une notion trop souvent négligée car plus difficilement quantifiable et pour partie propre au mode de vie de chacun.

Pourtant, c'est bien cette notion de confort qui est le but de l'architecture, de sa fonction originelle et fondamentale, et qu'il est utile de revisiter à l'aune de l'urgence écologique. Comme le rappelle l'architecte Philippe Rahm : « pour comprendre l'origine de l'architecture, il faut revenir à notre condition "homéotherme" et à la nécessité de devoir maintenir le corps humain à 37°C.(...)»³⁰.

4.2.1. Identifier et traiter les sources d'inconfort

La sensation de confort repose sur des facteurs physiologiques mais aussi culturels qui se sont traduits au XX^e siècle par une hausse constante des températures de consigne. Néanmoins, le ressenti thermique d'un logement chauffé à 22°C mais aux parois froides peut être aussi déplorable que son bilan énergétique. Cela signifie que la mesure d'un thermomètre ne permet pas de saisir la notion de confort thermique.

En effet, cette notion recouvre une réalité complexe car il s'agit toujours d'un ressenti de l'habitant, dans une situation concrète, et dans le cadre de tel ou tel usage de l'habitat. Elle peut donc avoir une dimension sociologique, psychologique, physiologique et comporte par conséquent une part de subjectivité.

Pour autant, des facteurs objectifs peuvent déterminer l'appréciation du confort thermique, tels que le rayonnement d'une paroi, l'effusivité d'un matériau, l'albédo d'un revêtement, l'effet de serre produit par un vitrage, la capacité thermique d'un matériau d'enveloppe, des phénomènes de convection (vitesse de l'air ventilé naturellement ou mécaniquement), d'hygrométrie relative, et bien sûr de niveau d'activité physique et de vêture de l'occupant.

On aurait tort de présenter les dispositions relatives à l'amélioration du confort thermique comme des leviers accessoires puisque l'action qui consiste

30. Philippe RAHM, *Histoire naturelle de l'architecture : comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments*, Éditions du Pavillon de l'Arsenal (2020).

en hiver à réhausser le thermostat de son logement au-delà des températures de consigne, en induisant une surconsommation énergétique, peut par exemple trouver sa cause dans le besoin de compenser une vitesse de l'air ventilé trop rapide ou un effet de paroi froide.

Avec le dérèglement climatique et l'augmentation significative de la fréquence des pics caniculaires, le confort d'été est par ailleurs devenu un enjeu crucial d'habitabilité, malheureusement largement sous-estimé par les réglementations actuelles sur la rénovation du bâti existant.

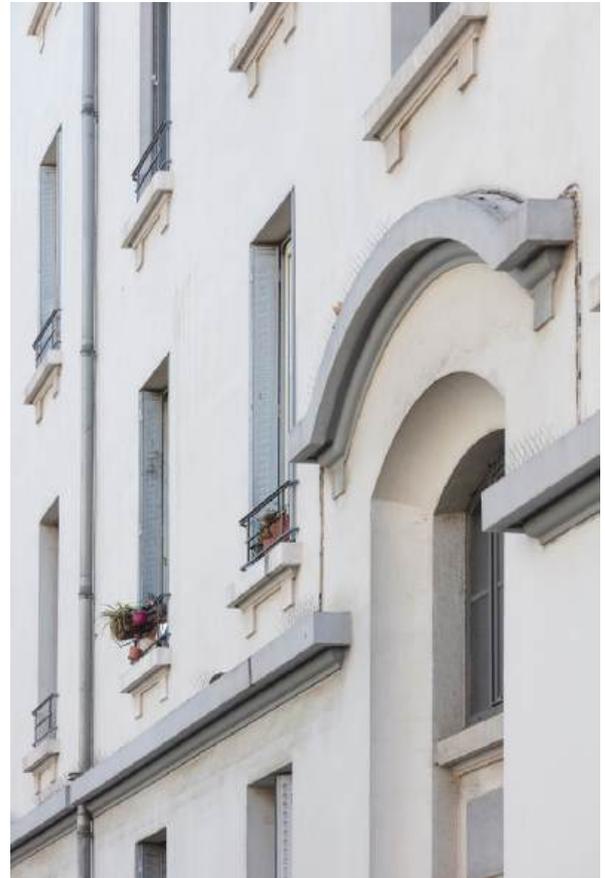
L'inconfort estival peut être ressenti dès 23°C, pour peu que le taux d'humidité soit supérieur à 70 %. Ce constat doit inciter les concepteurs et les propriétaires à intégrer très en amont cette notion de confort d'été dans leurs réflexions. L'enjeu est stratégique : éviter le recours à l'installation de dispositifs actifs de rafraîchissement, particulièrement énergivores et contre-productifs en termes de lutte contre les îlots de chaleurs urbains puisque l'air chaud rejeté contribue à aggraver ce phénomène délétère.

La qualité de la réhabilitation énergétique ne peut donc se réduire à une problématique de consommation de kW/h, même s'il demeure malheureusement le critère unique, sinon principal, de légitimation officielle d'un projet de rénovation énergétique, voire de sa labellisation³¹.

Valoriser l'inertie du matériau

Parmi les atouts propres au « matériau mâchefer » favorisant le confort thermique de l'habitat, soulignons sa capacité inertielle. On sait que **l'inertie est, d'une manière générale, le grand atout des murs massifs en maçonnerie dans le bâti ancien par comparaison avec d'autres modes constructifs récents comme le mur en aggloméré de béton creux ou, plus encore, avec le mur à ossature légère (bois ou métal).**

L'inertie permet de lisser les températures sur la journée, en stockant la chaleur apportée par les apports solaires et en la restituant la nuit. En hiver, le mur restitue lentement la chaleur par rayonnement. En été, il limite les surchauffes intérieures en accumulant pendant la journée une partie de la chaleur, qu'il ne restitue que plus tard, pendant la nuit. On parle de « déphasage thermique » pour qualifier cette qualité



Habitat collectif social sous gestion GLH, 105 rue Jacques-Louis Hénon, Lyon 4, « Cité Vieille Croix-Rousse » (v. 1921-1928), François et Victor Clermont architectes, Coopérative de Construction L'Avenir (1921-1929)

de latence dans le transit des flux de chaleur. Pour ne pas perdre ce bénéfice, un choix éclairé en cas d'isolation thermique devra être fait comme nous verrons plus loin.

À la lecture des résultats des essais en laboratoire menés par le Cerema, cette qualité inertielle semble, de prime abord, devoir être relativisée pour ce qui concerne le pisé de mâchefer. En effet, les mesures de masses volumiques effectuées, font état de valeurs peu élevées, notamment par comparaison avec d'autres matériaux comme la pierre ou le béton, ainsi que d'une capacité thermique volumique faible. Mais l'épaisseur des murs mis en œuvre dans les maçonneries de mâchefer banché, généralement comprise entre 40 et 50 cm, compense l'effet de ces caractéristiques.

Dans sa mise en œuvre banchée, c'est-à-dire en paroi épaisse, le béton de mâchefer présente donc une réelle qualité d'inertie de masse (*a contrario* d'autres formes d'emploi constructif du mâchefer comme la brique ou le moellon). Ainsi, même si cette qualité

31. Lire à ce sujet le feuillet « Une brève histoire de l'isolation » de l'architecte Hubert Lempereur parue dans la revue D'a (n°247 à 255) en 2016 et 2017.

demeure moins significative que pour une paroi en pisé de terre ou en moellons de pierre de même épaisseur, la qualité inertielle du pisé de mâchefer est équivalente voire supérieure à un voile de béton armé³².

Comme il sera vu plus loin, **la mise en place d'une isolation par l'intérieur est contre-indiquée dans ce contexte de recherche de confort d'été**. En effet cette disposition prive les occupants des bénéfices de l'inertie des maçonneries. Si la solution d'une ITI est requise pour une raison ou une autre – le recours à une ITI est parfois la seule solution pour répondre à un besoin conséquent de réduction des déperditions thermiques d'un habitat en mâchefer – un isolant à forte masse volumique, comme des panneaux de fibres de bois de forte densité, est à privilégier.

Enfin, il est à noter qu'à l'inverse du pisé de terre, dont c'est une des propriétés les plus remarquables, le pisé de mâchefer est peu hygroscopique. Il n'offre donc pas les mêmes atouts en termes de régulation de l'humidité de l'air ambiant que la terre crue. Ce phénomène, qui permet aux murs en pisé de terre d'adoucir en été la température intérieure en évaporant l'eau qu'ils ont stockée en saison froide, ne sera pas comparable pour le mur en mâchefer, même si le phénomène de transfert de vapeur d'eau à l'intérieur de la paroi (perspiration) peut malgré tout être bénéfique au confort thermique des occupants.

Recourir aux protections solaires systématiques Afin de limiter les surchauffes de l'habitat en période estivale, et maximiser les bienfaits de l'inertie thermique du mur en mâchefer, il est indispensable de pouvoir protéger les vitrages du rayonnement solaire direct.

Un bâtiment « eco-responsable » ne devrait intégrer la climatisation active que comme une solution de recours lors de pics caniculaires critiques, et fonctionner, en dehors de ces épisodes occasionnels, uniquement avec des principes de régulation passifs. Ainsi, les dispositifs de protections solaires extérieures

32. La quantité de chaleur à fournir pour élever un matériau de 1°C est le produit de son volume par la capacité thermique volumique du matériau par la différence de température. Pour deux murs différents le produit qui change est donc l'épaisseur du mur par la capacité thermique volumique. Avec les valeurs moyennes mesurées pour le béton de mâchefer en épaisseur 50 cm on obtient : $0.5 \times (0.9 < C_p < 1.15) = 0.45 \text{ à } 0.57$. Pour le béton de ciment plein en épaisseur 20 cm on obtient : $0.2 \times 2.3 = 0.46$. Avec un mur en pisé de mâchefer de 50 cm la qualité inertielle (au sens de la quantité de chaleur à fournir pour élever le matériau de 1°C) est donc proche voire plus favorable qu'avec un mur en béton plein de 20 cm.

s'avèrent-ils indispensables pour l'habitabilité d'été des logements : les façades Sud et Ouest sont les plus exposées (orientations les plus défavorables pour le climat et la latitude lyonnaise), mais il faut également veiller aux orientations Nord-Ouest qui sont également très concernées en l'absence de masque environnant, ainsi qu'aux baies zénithales pratiquées en toiture et qui sont sources d'apports solaires extrêmement néfastes. Les orientations Est et Nord-Est restent à traiter mais sont le lieu d'un inconfort moindre.

Sur l'habitat en mâchefer, persiennes et stores extérieurs peuvent remplir ce rôle de protection. Treilles et masques végétaux peuvent également contribuer à limiter efficacement la pénétration du rayonnement solaire dans le logement.



Résidence d'habitat collectif en copropriété, Résidence "Garibaldi-Rancy" (1951/1954), 240 avenue Garibaldi, Lyon 3, Pierre Tourret architecte – Ravalement traditionnel : DPS (2022)

Adapter les usages aux ambiances

Comme nous l'avons montré plus haut, le bâti ancien a été conçu de manière à satisfaire à des critères de confort, dans une logique d'économie à la fois de moyen et de coût. Sur le plan fonctionnel, il répond

également aux besoins des occupants avec la même rationalité. Les ambiances fraîches et humides sont naturellement localisées au Nord, en rez-de-chaussée ou dans les espaces semi-enterrés, tandis que les ambiances chaudes et sèches sont situées, *a contrario*, sous les toits et au Sud.

Si ces logiques se sont pour la plupart perdues au cours du XX^e siècle avec l'ère de l'énergie bon marché, qui a permis de réguler « à la demande » les niveaux de confort, et sont devenues des intrants absents de la conception de la plupart des projets de réhabilitation, ces préoccupations reviennent peu à peu à l'esprit des acteurs les plus attentifs aux effets du dérèglement climatique et à la crise énergétique qui marque ce début de XXI^e siècle.

Ainsi parmi les dispositions écologiques du bâti ancien en mâchefer, **le maintien des combles perdus comme espace tampon permet de conserver au toit tout son potentiel de protection thermique en été.**

Pour peu que le toit ne devienne pas, à l'occasion d'un projet de rénovation, une opportunité pour transformer les combles en pièces habitables, l'isolation thermique du plancher haut de l'habitat en mâchefer constitue donc un poste stratégique de la valorisation de son confort intrinsèque.

On veillera également à limiter les châssis de toit, à la fois en taille et en nombre, ces ouvertures étant responsables de phénomènes de surchauffe.

Agir sur le rayonnement et l'effusivité des parois

Comme le révèlent désormais de nombreuses enquêtes, le niveau requis de confort thermique hivernal varie selon que le foyer est composé de personnes âgées sédentaires, abrite un enfant en bas âge, de jeunes actifs, etc.

En revanche, quel que soit le foyer, on observe que certaines conditions spécifiques motivent une demande de complément de chauffage. C'est le cas, par exemple, pour un logement orienté au Nord. Des dispositions peuvent néanmoins être prises, souvent à moindre coût, pour améliorer le confort thermique d'hiver.

L'effet de paroi froide se produit lorsqu'un écart important de température survient entre l'air ambiant et la surface des murs. Ainsi, même lorsque le thermomètre indique une température de l'air intérieur de 20°C, le phénomène de paroi froide procure pourtant une sensation inconfortable. Un rideau épais devant la fenêtre est une solution simple et économique pour limiter cet

effet du rayonnement froid, qui amène parfois l'occupant à chauffer au-delà de la température de consigne. Sur les murs, cet effet peut également être contrecarré par la mise en œuvre d'enduits correcteurs thermiques (ECT) sur les murs de façade côté intérieur. Outre le fait qu'il limite son rayonnement, l'ECT participe à la résistance thermique de la paroi, tout en conservant les propriétés d'inertie du mur et son équilibre hygrométrique. Il diffuse de manière homogène les calories captées en surface et contribue à équilibrer les températures des parois et de l'air.

Composés de fibres végétales isolantes liées à la chaux, les enduits correcteurs sont très profitables au confort thermique. On pourra, par exemple, mettre en œuvre un enduit chaux-chanvre de 20 mm d'épaisseur, appliquer un enduit à base de cellulose ou de billes de liège ou un enduit terre à base d'argile. La pose de panneaux isolants de liège collés avec finition enduit terre-argile permet d'effectuer cette correction sans modifier l'équilibre hygrothermique du mur grâce à la continuité capillaire.

La mise en place de parements intérieurs légers sur les murs (boiseries ou tapisseries (intissés ou papier peint à base de fibre cellulosiques ou de fibres textiles à l'exclusion des produits vinyliques ou à base de polyester...), au même titre que l'installation de rideaux au droit des fenêtres, est également profitable au confort thermique.

4.2.2. L'hypothèse de l'ITI dans l'habitat en mâchefer

Comme pour d'autres types de constructions, l'isolation intérieure présente beaucoup d'inconvénients : suppression des bénéfices de l'inertie thermique sur le confort, création de ponts thermiques, perte de surface habitable (perte de revenu pour le bailleur), conduite d'un chantier en site occupé, modification des réseaux (électrique, chauffage, eau, etc.).

Mais la solution de l'ITI pour l'habitat en mâchefer est également problématique pour d'autres raisons, qui tiennent cette fois aux spécificités du matériau et singulièrement à sa perspiration, liée à des risques de pathologies dues à la modification du fonctionnement hygrométrique de la paroi.

Lorsque l'on isole un bâti en pisé de mâchefer par l'intérieur, les risques de condensation dans le mur en hiver sont accrus. En effet, le mur restant froid et la température intérieure étant élevée, lorsque le flux de vapeur d'eau entre en contact avec le mur,

elle change de phase, passant de l'état gazeux à l'état liquide, notamment à l'interface avec l'isolant. Cela peut être la cause de pathologies – apparition de moisissures, dégradation de la résistance thermique de l'isolant en cas d'humidité persistante, détérioration de l'isolant s'il est à base de composants putrescibles (fibres végétales)... Il est important de rappeler qu'aucune solution ne permet de garantir la pérennité de l'isolant intérieur, quel qu'il soit, en présence d'une source d'humidité.

La modélisation réalisée en 2019 par le bureau d'études A+W (calcul unidimensionnel sous logiciel WufiPro, sans effet de pont thermique intégré, isolant minéral et plaque de plâtre intérieur) a montré qu'en l'absence de pare-vapeur, les humidités relatives dans la paroi sont fortes en continu, avec des valeurs entre 60 % et 85 %, pouvant conduire à la formation d'eau liquide à la jonction entre le mur et l'isolant, avec un risque accru dans les situations les plus critiques ; au droit des pièces humides, en façade Nord, avec un fort taux d'occupation du logement.

Pour pallier ces risques, l'humidité intérieure ne doit pas théoriquement pénétrer dans la paroi. L'utilisation d'un pare-vapeur, posé contre l'isolant, côté intérieur, pourra contribuer à limiter fortement le flux de vapeur d'eau, en particulier en saison d'hiver où l'humidité relative de l'air intérieur est plus grande que celle du mur. Toutefois, pour éviter le risque de condensation, le pare-vapeur doit constituer une barrière parfaitement continue – ce qui constitue une prouesse en soi dans des conditions ordinaires de chantier – car chaque imperfection produira une concentration d'humidité. Mais au-delà de l'exigence de perfection requise dans sa mise en œuvre, la pérennité sur le temps long des produits (membrane et adhésifs) pose légitimement question car elle ne peut être concrètement assurée... Par principe, tous les produits du bâtiment atteignent à moyen, sinon à long terme, un état d'obsolescence.

Dans ce contexte, il faudra donc être attentif à la nature des enduits extérieurs qui devront, à l'inverse des épidermes intérieurs (peintures, papiers peints...), être très ouverts à la vapeur d'eau afin de permettre

	Propriétés liées à la perméabilité à la vapeur d'eau			Propriétés liées à l'absorption de l'humidité de l'air et de l'eau liquide		Propriétés liées au caractère dégradable			
	Non perspirant	Peu à très peu perspirant	Perspirant	Non hygroscopique et non capillaire	Plus ou moins hygroscopique et capillaire	Non putrescible et non altérable	Non putrescible et très peu altérable	Non putrescible mais altérable	Putrescible et altérable
Verre cellulaire	✓			✓		✓			
Panneau de polyuréthane		✓		✓			✓		
Polystyrène extrudé		✓		✓			✓		
Polystyrène expansé		✓		✓			✓		
Laine Minérale			✓	✓				✓	
Panneau de liège		✓		✓			✓		
Mousse minérale			✓		✓		✓		
Panneau de fibre de bois			✓		✓				✓
Ouate de cellulose			✓		✓				✓
Laine de chanvre			✓		✓				✓

Classement de quelques matériaux isolants selon leurs comportements à l'humidité, CAUE Rhône Métropole

à l'humidité résiduelle présente dans le mur de s'évaporer. Les matériaux composant la paroi devront ainsi avoir une perméabilité croissante de l'intérieur vers l'extérieur (soit un S_d (épaisseur d'air équivalente en m) de plus en plus faible).

! Bon à savoir

Les panneaux denses d'isolant intérieur doivent être collés ou posés à sec sur tasseaux avec maintien d'une lame d'air ventilée en haut et en bas. Une lame d'air non ventilée entre le mur et l'isolant génère a contrario une discontinuité capillaire et donc un risque de concentration d'eau liquide à cet endroit. Dans ce cas, l'isolant doit donc parfaitement adhérer au mur sur toute la hauteur.

Les isolants biosourcés, qui sont généralement capillaires (autrement dit, qui repartissent bien l'eau liquide dans leur masse en cas d'humidification), ont donc de bonnes capacités de séchage. Ils sont en revanche putrescibles et le risque de dégradation est réel en cas de mauvaise gestion de l'humidité (ventilation défaillante par exemple).

Leur caractère hygroscopique peut-être un atout pour le confort thermique, car ils possèdent une capacité à capter l'humidité de l'air ambiant, favorisant ainsi un ressenti de confort : l'hygrométrie s'autorégule selon la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, selon les températures intérieures et extérieures et selon l'activité humaine dans l'habitat. Dans une ambiance saine, où le taux d'hygrométrie reste normal, ce caractère hygroscopique du matériau isolant doit être vu comme un avantage pour le confort des occupants, puisque l'isolant joue le rôle de régulateur hygrométrique de la pièce. Il y a un risque en revanche à employer ces isolants biosourcés à base de fibres végétales lorsque la ventilation mécanique est défaillante et/ou que la production de vapeur d'eau est très importante dans le logement (par exemple, en cas de sur-occupation).

On peut évoquer également ici l'intérêt de l'application sur les murs en mâchefer des enduits intérieurs à la chaux ou des enduits à base d'argile, qui, outre leur bon facteur de diffusion à la vapeur d'eau, sont également des matériaux hygroscopiques (capables de capter l'humidité environnante contenue dans l'air ambiant).

Des produits spécifiques peuvent contribuer à améliorer l'efficacité de cet impératif de barrage à la vapeur d'eau : il s'agit de produits appelés freins-vapeur. Ils se mettent en œuvre en lieu et place d'un pare-vapeur classique. La résistance de ces membranes varie avec l'humidité relative ambiante : quand l'humidité relative est faible (typiquement en hiver), la résistance est élevée. Et inversement, lorsque l'humidité relative est élevée (en été ou en cas d'infiltrations parasites), la résistance est faible. Ceci permet de protéger la paroi contre la migration de vapeur, tout en permettant son séchage dans le cas d'humidité non prévue (fuites, remontées capillaires, infiltrations d'eau de pluie...).

Des membranes techniques spéciales dites orientées ou hygrovariables (S_d variable), sont conçues pour stopper l'échange gazeux dans le sens intérieur-extérieur tout en maintenant une migration d'humidité dans le sens extérieur-intérieur, facilitant le séchage de la paroi en cas de points de condensation. En été notamment, où l'humidité extérieure a tendance à pénétrer dans le mur en raison du différentiel de pression à cette saison, elles permettront d'évacuer l'humidité vers l'intérieur et de sécher plus rapidement. Ces dispositifs de régulation de la vapeur d'eau dans la paroi en cas d'ITI seront avantageusement couplés à une bonne ventilation du logement.

Avant d'opter pour le choix de l'ITI, il est donc crucial de concentrer les efforts sur la mise en œuvre du complexe isolant : soin apporté à la conception des détails techniques d'exécution en phase d'études, pose soignée et contrôlée en phase chantier. Mais il faudra garder à l'esprit que si la pose de la membrane frein-vapeur diminuera les risques de désordre à court et moyen terme, aucune garantie d'un fonctionnement hygrométrique optimal n'est possible à long terme, et que cela conduit à recommander le recours indispensable et systématique à un dispositif actif de ventilation mécanique.

Par ailleurs, les calculs thermiques devront mettre l'accent sur la prise en considération des éventuels ponts thermiques au droit des planchers et des murs refends, les risques de pathologie étant accrus à ces endroits : l'air intérieur, chaud et chargé en humidité entre en contact de ces zones, froides car non isolées, et l'humidité relative étant très élevée, cela peut provoquer l'apparition de moisissures.

Un cas critique est celui des planchers intermédiaires en poutrelles-hourdis, très fréquents sur le bâti en mâchefer, et pour lequel une ITI peut être source de graves désordres en raison du passage d'air résiduel dans la partie creuse des entrevous (les entrevous placés le long des murs n'ont pas forcément été bouchés) quasi impossible à résorber³³. Dans ce cas, le recours à l'ITI est à déconseiller.

Il faut souligner ici l'importance de soigner les carnets de détails et la mise en œuvre ; par exemple en prévoyant de manchonner les murs refends (retours d'isolant sur les parois séparatives) et d'isoler des portions de dalles. On ne manquera pas, enfin, de retirer tous les épidermes existants intérieurs inadaptés à la diffusion de la vapeur d'eau et notamment les couches de papiers peints vinyliques, les peintures plastiques ou les toiles de verre avec colle plastique.

4.2.3. Le ravalement thermique (ITE, ECT)

Rappelons tout d'abord que si l'isolation thermique par l'extérieur des façades (ITE) constitue en général une mesure relativement efficace pour juguler les déperditions énergétiques des murs périphériques des bâtiments, elle ne représente pas un poste de travaux prioritaire pour l'habitat en pisé de mâchefer (Cf. chapitre Adopter une logique propre au bâti ancien). Néanmoins, la recherche d'une conformité à un niveau de label (BBC Rénovation) nécessaire à la captation de subventions peut obliger à y avoir recours. La phase d'étude permettra au maître d'ouvrage de procéder aux points d'arbitrage nécessaires entre coût d'investissement, efficacité énergétique, charges énergétiques et exigences patrimoniales.

Concernant ce dernier paramètre, **rappelons que l'opportunité de l'isolation thermique par l'extérieur est à évaluer au regard de l'acceptabilité architecturale du projet** : qualité des matériaux, conditions de mises en œuvre et pérennité du dispositif. L'isolation thermique par l'extérieur est, du reste, rarement envisageable dans les centres anciens, car incompatible avec les exigences de préservation patrimoniale qui peuvent s'imposer (périmètres de sauvegarde et de mise en valeur) ou faire consensus.

33. Consulter à ce propos l'étude réalisée en 2017 par le bureau d'étude Enertech pour Oktave : *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien*.

Conditions de mise en œuvre d'une ITI

- identifier et régler au préalable tout désordre lié à l'humidité dans les parois (remontées capillaires, infiltrations d'eau dans les murs de façade...);
- s'assurer que l'enduit extérieur (enduits chaux-sable ou bâtardé) ait une perméabilité à la vapeur d'eau (coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ), une étanchéité à l'eau pluviale (facteur A d'absorption à la pluie battante suffisantes : $6 \leq \mu \leq 20$ ($Sd \leq 0,5$ m) et $A \leq 1,5$ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) et un réel aspect capillaire. Purge de l'enduit ciment le cas échéant et ravalement de façade avec un enduit adapté ;
- identifier la nature constructive des planchers intermédiaires :
 - en présence de plancher à poutres et solivage en bois :
 - * rompre le pont thermique en incorporant un isolant dans l'épaisseur du plancher en périphérie ;
 - * assurer la continuité du frein vapeur au droit du plancher (sciage du plancher, fixation par un adhésif souple adapté au support bois) Raccord du frein vapeur autour des pièces de bois avec adhésif ou colle adaptés.
 - en cas de plancher hourdé (à poutrelles et entrevous) :
 - * renoncer à l'ITI en raison de l'impossibilité de résorber le transit d'air humide dans les hourdis (porosité des traversées de réseaux – chauffage, eau, électricité, évacuations, gaine techniques... – irrésorbables);
- purge des épidermes existants intérieurs (papiers peints vinyliques, toiles de verres encollées, revêtements plastifiés, etc.) hors enduit plâtre ;
- mise en œuvre d'une isolation fibreuse sur ossature (ouate de cellulose, laine de bois, fibre de bois, laine de roche) ;
- mise en œuvre d'un frein vapeur hygrovariable (à faible Sd) continu ;
- mise en place d'un parement de finition (plaque de plâtre sur ossature et peinture acrylique).

L'ITE sur le bâti en mâchefer présente néanmoins plusieurs avantages : en premier lieu, elle permet de coupler ravalement (entretien de la façade) et amélioration thermique. Elle permet de « réchauffer » la paroi en mâchefer et ainsi de se prémunir de tout risque de condensation dans le mur, même en cas de ventilation insuffisante (pour peu que le matériau isolant ait la perspirance requise). Elle permet d'isoler le bâtiment de manière « isotherme », à condition d'opter pour une isolation continue, c'est-à-dire y compris en tableaux de baies (ce qui implique souvent d'adapter ou de remplacer les dispositifs d'occultations des baies). Elle permet enfin de résorber les infiltrations et les défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe et de conserver à l'habitat en mâchefer les propriétés de l'inertie thermique des parois.

Les dispositifs d'ITE adaptés au mâchefer

Dans le cas où l'ITE serait un scénario recevable sur le plan patrimonial, **il revient au maître d'œuvre de veiller à ce que les épidermes existants conservés ou les épidermes neufs rapportés ne freinent pas la migration de vapeur d'eau à travers la paroi**

en pisé mâchefer, matériau par essence poreux. La modélisation réalisée en 2019 par le bureau d'études A+W avait néanmoins montré que le maintien d'un ancien enduit ciment extérieur de type Portland derrière l'isolant thermique rapporté n'était pas pathogène en soi (calcul unidimensionnel réalisé sous logiciel WufiPro, sans effet de pont thermique intégré). Le choix de l'isolant reste toutefois crucial.

Le choix des isolants (ITE)

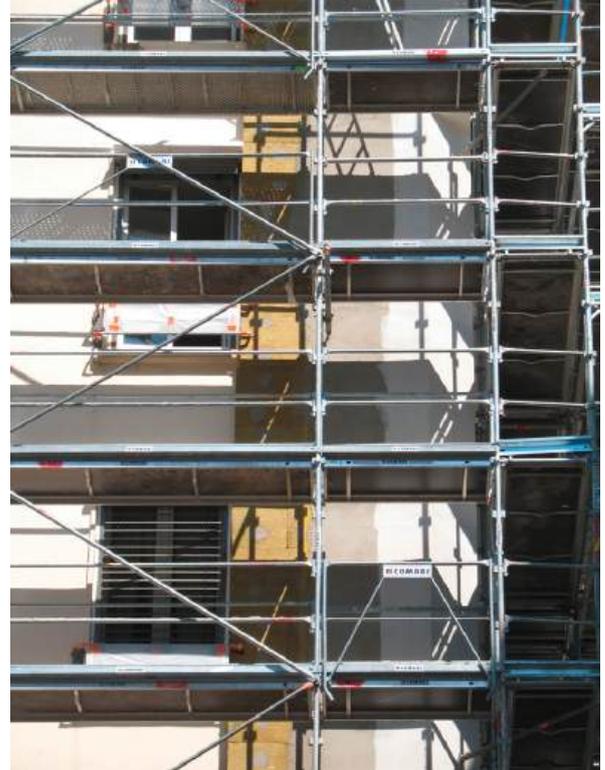
Le cas des isolants sous enduit

Le recours à des isolants dits « conventionnels » à rapporter sur le pisé de mâchefer est à évaluer avec précaution. **Si les laines minérales présentent des caractéristiques satisfaisantes en termes de diffusivité à la vapeur d'eau ($\mu=1$), il n'en est pas de même pour tous les polystyrènes qui s'avèreront contre-indiqués.**

D'une manière générale, les matériaux dit « bio-sourcés » ont des propriétés particulièrement intéressantes pour le mâchefer : leur résistance à la diffusion de vapeur d'eau est généralement faible (isolant à base de fibre de bois $1 < \mu < 5$) et ils ont une



Cité HBM Perrache, Résidence Casimir Perrier (1929-1934) lors du chantier de réhabilitation thermique, 41 Quai Perrache, Lyon 2, Victor-Adrien Robert et Jean Marin architectes (1934) – Jean-François et Pierre Marin (2020) © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Cité HBM Montchat, Résidence Les Charmilles (1928-1932) lors du chantier de réhabilitation thermique, 59 rue Camille, Lyon 3, Deschavannes, Petit, Pinet architectes (1934) – AAMCO architectures (2018) © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Habitat Collectif social sous gestion GLH, 1bis rue du repos, Lyon 7, Emmanuel Cateland architecte (1914) – Ravalement thermique : Axe Architecture (2016)



Façade endommagée sur un immeuble isolé par l'extérieur à Caluire (69), 2017, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

meilleure hygroscopicité que les fibres minérales conventionnelles (laine de verre, laine de roche). Cette dernière caractéristique leur permet de mieux « adsorber » la vapeur d'eau et donc de faciliter le séchage du mur en cas d'humidité accidentelle et temporaire dans la paroi³⁴.

Tout comme la maçonnerie mâchefer, la plupart des isolants biosourcés stockent et transmettent lentement la chaleur, ce qui leur permet d'agir sur le déphasage thermique de la paroi. Cette caractéristique est liée à la densité et à la capacité thermique élevée de la plupart des isolants biosourcés. Comprise entre 6 à 10 h, soit 2 à 3 fois plus que celle permise par des laines minérales pour une même épaisseur, cette capacité de déphasage permet de ralentir largement la transmission de l'onde de chaleur dans le mur.

Pour répondre aux situations d'exposition de l'ITE aux chocs en pied de façade, on pourra avoir recours au béton cellulaire, dont la résistance mécanique aux

chocs avoisine 30 Joules. Ce matériau isolant présente par ailleurs beaucoup d'avantages : une composition minérale (eau, sable, chaux et ciment), une forte capacité capillaire, un faible coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau ($5 < \mu < 10$), et une capacité d'inertie et de déphasage thermique.

Les isolants tels que la laine de bois, de chanvre, ou des panneaux de liège combinés à un enduit isolant sur le mur en pisé de mâchefer permettent également d'allier des qualités d'inertie thermique et de perméabilité, avec une efficacité remarquable, été comme hiver.

À l'inverse, les laines minérales et les matériaux issus de l'industrie pétrochimique même denses (panneaux rigides de laine de roche, polystyrène expansé ou extrudé), restent moins efficaces en été et plus fragiles.

Le « béton de chanvre », mélange de chènevotte et d'un liant à base de chaux, constitue une alternative intéressante en remplissage d'une ossature en bois, pour compléter par l'extérieur la performance ther-

34. Etienne RIEUX, *Le mâchefer matériau du bâti ancien*, OIKOS (2021).

mique de la paroi en pisé de mâchefer. En outre les éléments de modénatures peuvent être refabriqués à partir de moules et goujonnés sur place afin de restituer les reliefs existants. Ces techniques sont couvertes par les règles professionnelles.

Les enduits de finition adaptés à un dispositif d'isolation par l'extérieur d'un mur en mâchefer sont les mêmes que pour un ravalement traditionnel : l'enduit traditionnel chaux-sable non adjuvanté (sans additif hydrofuge) répond en cela parfaitement à l'impératif d'une grande perméabilité à la vapeur d'eau. Les produits fortement dosés en chaux naturelle hydraulique sont à privilégier (Voir plus haut) avec un dosage avoisinant 300 à 400 kg de chaux pour un mètre cube de sable. Ce n'est pas toujours le cas des produits proposés par les fabricants de dispositifs d'ITE « prêt à l'emploi ». On veillera par ailleurs à ce que l'enduit possède l'avis technique adapté au complexe d'isolant extérieur.



Échantillon de béton de chanvre, exposition TerraFibra Architectures (co-production Pavillon de l'Arsenal, amàco, Grands Ateliers) présentée au CAUE Rhône Métropole (2023)

Le cas des isolants sous vêtture

Les précautions sont similaires au cas précédent, à quelques exceptions près (isolants sans avis technique pour ce mode de pose notamment pour bon nombre de fibres biosourcées).

Comme il a été dit (Cf 2.2.2. Choix des épidermes), les vêttures relevant davantage du vocabulaire de la construction légère que de celle du mur-poids maçonné, l'habillage des bâtiments en mâchefer par des dispositifs de panneaux, semble moins pertinent en termes d'expression architecturale. **Au cas par cas, cette hypothèse peut s'envisager dans une optique de réécriture architecturale complète.**

Le cas spécifique de la résistance à l'arrachement sur la maçonnerie de mâchefer banché.

Concernant les chantiers d'amélioration thermique du bâti en pisé de mâchefer, la mise en œuvre d'une isolation par l'extérieur « classique » au moyen de panneaux calés et chevillés ou de bardages ventilés relève de techniques dites « non courantes », car le support, du fait de l'hétérogénéité du matériau, n'est pas couvert par l'ATEC. La mise en œuvre de l'ITE sur le bâti en pisé de mâchefer peut par conséquent nécessiter un engagement formalisé du maître d'ouvrage afin qu'il partage la responsabilité de son maître d'œuvre.

Des modalités d'assurance spécifiques peuvent également être anticipées pour lesquelles un protocole de suivi par le fabricant du produit rapporté peut être demandé par l'assureur afin garantir sa mise en œuvre. La garantie assurantielle pourra être obtenue par exemple moyennant la réalisation de tests de résistance au moyen d'un extractomètre en plusieurs points de la façade (en général à chaque étage). Les résultats d'essais permettent d'évaluer l'adhérence et d'analyser le type de rupture. La valeur obtenue n'est valable que pour le chantier testé (Se reporter à la 1^{ère} Partie – Paragraphe 2.4.4.)

Pour le maître d'œuvre, cela implique de prévoir l'intégralité du système de façade sur les produits d'un seul et même fabricant et l'application de surcoût (police d'assurance). Il convient de privilégier des chevilles PVC (par rapport aux chevilles métalliques) afin de limiter les ponts thermiques structurels. Pour la structure porteuse de bardages extérieurs, le nombre de points d'accroche exigé peut être majoré, ce qui a pour conséquence un surcoût de travaux (pose et fourniture), une augmentation des ponts thermiques et une réduction de la performance globale de l'isolant.



*Rénovation globale (y compris ITE)
d'un immeuble d'habitation en copropriété,
14 rue Martin, Lyon 3, © Aerial architectes*



Bon à savoir

Deux cas de figure peuvent s'observer en ITE selon que le plancher bas est situé au-dessus ou en dessous du niveau du terrain naturel. Dans le premier cas, le plus couramment répandu dans la construction en mâchefer, l'isolant pourra être interrompu au-dessus du sol extérieur, permettant à la partie basse du mur de gérer librement l'évaporation de son humidité excédentaire moyennant que l'enduit le permette. Dans le second cas, pour un bâtiment sur terre-plein par exemple ou bien avec un niveau habitable semi enterré, l'isolant devra en revanche être conduit, au moins sur quelques dizaines de centimètres, sous le niveau du terrain naturel. Il devra par conséquent présenter les propriétés d'être à la fois imputrescible et perspirant (bien que le mur en pied de façade soit en général en béton de gravier dépourvu de scories de mâchefer) et jouer un rôle de rupteur capillaire. Le liège expansé, par exemple, pourra remplir ces exigences. Les autres matériaux biosourcés qui, à l'exception du liège, présentent le risque de se dégrader en présence d'humidité sont contre-indiqués, au moins en partie basse de façade. Dans les deux cas, la mise en œuvre d'un drain périphérique pourra compléter les dispositions anti-remontées capillaires.

N.B.

À condition que la base du mur ne soit pas sujette aux transferts de vapeur d'eau, des matériaux non capillaires comme le verre cellulaire ($\mu = \infty$), plaque de polyuréthane ($30 < \mu < 200$) ou de polystyrène extrudé ($80 < \mu < 200$) peuvent constituer une solution ponctuelle pour une bande de pied de façade notamment en partie enterrée.

L'alternative des enduits correcteurs thermiques (ECT) ou « thermo-isolants »

Même s'ils ne peuvent être considérés comme une isolation thermique en tant que telle (pour être classé comme isolant, un matériau doit avoir un λ inférieur à 0,07), les enduits correcteurs thermiques présentent néanmoins des niveaux de résistances non négligeables (Tableau ci-après). Les ECT ont, en outre, l'avantage de permettre de colmater certains défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe (en général au contact des menuiseries mais également aux abords du forgeret à la jonction mur-toiture), ou de désordres plus conséquents (fissurations non structurelles).

Conditions de mise en œuvre d'une ITE

Privilégier l'isolation enduite sans lame d'air pour des raisons d'intégrité architecturale (l'architecture en pisé de mâchefer est une architecture enduite) :

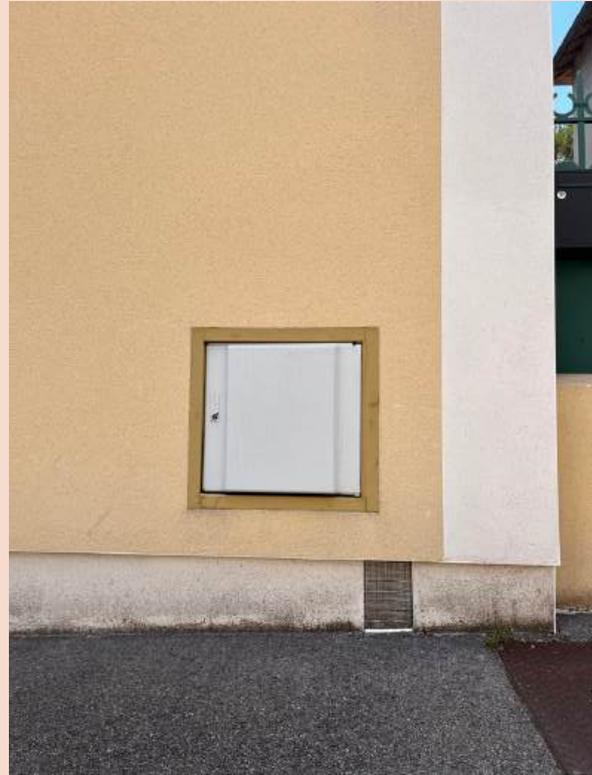
- identifier et régler au préalable tout désordre lié à l'humidité dans les parois (remontées capillaires, infiltrations d'eau, ...);
- purge des enduits à la chaux altérés et piquage complet des enduits sur base ciment inadaptés (imperméables à la vapeur d'eau et/ou non étanches à l'eau);
- décapage des peintures sur enduits conservés (cas des ciments portland de bonne tenue et encore parfaitement adhérent) par lavage haute pression et ratissage à la chaux naturelle avant badigeon.

Après préparation du support et traitement de la maçonnerie si nécessaire (Voir 2.2 Les travaux de ravalement)

- mise en place d'une isolation thermique (Isolant fibreux ouvert à la diffusion de vapeur d'eau : fibre de bois, béton de chanvre, laine de roche...) en veillant à l'adhérence et la continuité capillaire entre la paroi et l'isolant (absence de lame d'air) ainsi qu'au chevillage (tests à l'arrachement requis);
- reprise des appuis et restitution des modénatures par des produits de substitution;
- mise en œuvre d'un enduit minéral capillaire et ouvert à la vapeur d'eau (ordre de grandeur $S_d < 2m$) ou d'un bardage ventilé, sous réserve de l'acceptabilité architecturale et des exigences techniques (capacité de résistance à l'arrachement des fixations dans le pisé de mâchefer, produit pare-pluie très ouvert à la vapeur d'eau, etc.).

N.B.

- la compatibilité entre l'enduit et l'isolant doit être conforme aux préconisations de mise en œuvre des documents techniques unifiés; les produits doivent provenir du même fabricant;
- pour une amélioration énergétique performante, des travaux intérieurs seront nécessaires pour assurer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe (continuité du parement intérieur requise).



Mise en œuvre d'une ITE sur une maison de ville en pisé de mâchefer comprenant :

- la restitution des appuis de fenêtre en béton ;
- le traitement du pied de façade en isolant épais formant soubassement (ajustement à la pente en long) ;
- l'incorporation des coffrets ;
- l'arrêt de l'isolant au droit de la descente EP.

La correction thermique agit en surface de l'enduit. Une épaisseur de 5 cm de mortier d'enduit chaux-chaivre est en général suffisante pour constituer un « saut » de performance, les premiers centimètres étant les plus efficaces en termes de plus-value thermique.

Composé d'agrégats aux propriétés isolantes, d'un liant et d'eau, les enduits correcteurs s'appliquent sur les murs extérieurs de l'enveloppe. Les enduits à base de chaux, perspirants et hygroscopiques, sont particulièrement adaptés au comportement des murs en mâchefer et les adjuvants pigmentés ne s'altèrent pas au contact des UV³⁵ contrairement à bon nombre d'enduits extérieurs organiques industriels colorés.

De même que la chaux sera préférée au ciment pour le liant, les matières végétales seront à privilégier aux matières minérales comme la perlite, ou synthétiques comme les billes de polystyrène. Compte tenu du comportement hygrothermique du pisé de mâchefer, les matières isolantes seront de préférence des fibres végétales (granulats de liège, chènevotte, etc.) mélangées à de la chaux.

Le mortier d'enduit thermo-isolant à base de chanvre possède une conductivité, comprise entre 0,07 à 0,11W/m.K. Par comparaison, le lambda d'une fibre de bois est de 0,036W/m.K. (Pour rappel, plus le coefficient lambda de conductivité thermique est faible, plus l'isolant est performant).

Les enduits dits organiques, *a contrario* des enduits minéraux, sont composés de résines acryliques issues du raffinage du pétrole³⁶. Ils sont imperméables ou très peu perméables à la vapeur d'eau, ce qui rend leur utilisation inadaptée aux supports en mâchefer.

Pour les parois en mâchefer, on privilégiera donc uniquement des enduits correcteurs thermiques à base de chaux naturelle.

À noter que le recours à l'enduit thermo-isolant est conditionné à un décroûtage complet de l'enduit existant et la mise à nu du support en mâchefer (DTU). Cette hypothèse est donc à évaluer avant tout au regard de l'état de la façade.

Le décroûtage complet de l'enduit existant est d'ailleurs profitable si le bâtiment présente des modénatures à préserver. De cette manière, les reliefs pourront rester saillants (appuis de baies, cordons,

corniches en ciment prompt...) y compris avec une épaisseur d'enduit correcteur thermique significative de 50 ou 60 mm.

Le principal frein à l'emploi des enduits correcteurs thermiques est qu'ils ne remplissent pas les conditions d'éligibilité aux aides et aux labels et certificats d'économie d'énergie. Leurs niveaux de conductivité thermique et les épaisseurs d'emploi pour lesquelles ils sont pertinents sur le plan architectural (20 à 50 mm environ) ne permettent pas d'atteindre les valeurs seuils de résistance thermique requise.

Bon à savoir

Parmi les enduits correcteurs thermiques, il faut mentionner le cas particulier de l'aérogel de silice, produit développé par le secteur industriel et expérimenté à Lyon sur l'opération de réhabilitation énergétique de la Cité HBM des Etats-Unis (Lyon 8) par le bailleur GLH. La modélisation réalisée en 2019 par le bureau d'études A+W a montré que le comportement thermique d'un enduit thermo-isolant à base d'aérogel de silice (Fixit222 ®) était semblable à celui d'un isolant extérieur. L'enduit thermo-isolant projeté possède une teneur en eau importante lors de la mise en œuvre, ce qui explique une teneur en eau et une humidité relative importante dans la paroi pendant toute la durée du séchage. D'après le fabricant, trois ans sont nécessaires au séchage complet du produit. Cela peut sembler peu compatible avec la nature poreuse du mâchefer. Toutefois, l'examen de l'évolution sur 10 ans semble montrer que cette humidité est dégagée le premier été, et que les teneurs en eau des matériaux composant la paroi (enduit extérieur, pisé de mâchefer, enduit plâtre intérieur) sont stables et a priori sans conséquence pathologique.

À titre indicatif, le tableau ci-après présente les caractéristiques hygrothermiques des principaux mortiers thermo-isolants du marché. Ces mortiers d'enduits sont applicables sur tous types de maçonneries conformes au DTU 20.11 « parois et murs en maçonnerie ».

35. Mise en valeur et modernisation des Cités Lyonnaises d'HBM : l'exemple des cités d'Habitation à Bon Marché de Grand Lyon Habitat, CAUE Rhône Métropole pour Grand Lyon Habitat (novembre 2019).

36. Ibid



Projection d'un enduit thermo-isolant (Fixit222 ®) sur une maçonnerie en pisé de mâchefer et phases de finitions, chantier de réhabilitation énergétique de la Cité HBM des États-Unis (Tony Garnier architecte) en 2021, 74 boulevard des États-Unis, Lyon 8 - Entreprise : Reppelin - Maître d'ouvrage : GLH - Maître d'œuvre : C&P architectes - © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole

Produit	Marque ®	λ (W/m ² °C)	μ (sans unité)	Principaux composants
Aga biotherm	Haga ®	0.07	8	chaux et liège
Agatherm Aérogel	Haga ®	0.029	4 à 6	chaux et liège
Chanvribat + Tradical	BCB Weber ®	0,15	6 à 12	chaux et chanvre
Ediltéco	Isoltéco ®	0,058	9	billes de polystyrène expansées
Enduit thermo-isolant 222	Fixit ®	0.028	4 à 5	aérogel de silice (silicates)
Diathonite Evolution	Diasen ®	0.045	4	chaux, liège, argile et silice (sous forme de plancton)
Diathonite Thermactive 037	Diasen ®	0.037	3	chaux, liège, argile et silice;
IsolArgilus	Argilus ®	0,06	5	argile (Usage intérieur uniquement)
LCG enduit chanvre	Lisbonis Chaux Grasses ®	0,072	5	chaux hydraulique naturelle NHL 3.5, chène-votte
Parnature	ParexLanco ®	0.066	5	chanvre
Unilit 20	Unilit/HD System ®	0.066	4	chaux, perlite et silice expansée

Caractéristiques hygrothermiques des principaux mortiers d'enduit « thermo-isolants » ou « correcteurs thermiques » du marché (ces valeurs sont indicatives car elles varient en fonction des compositions de l'enduit), CAUE Rhône Métropole.

À titre de comparaison :

- la conductivité thermique (λ) du polystyrène expansé est de 0,039, celle de la laine de verre, selon sa densité, varie entre 0,038 et 0,044 ; celle de la laine de roche entre 0,042 et 0,05, celle du béton armé est de 1,65, celle de l'enduit traditionnel à la chaux est de 0,7 ;
- la résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ) de l'enduit traditionnel à la chaux est de 7, celle du pisé de terre est de 10, celle du béton armé est de 105.

TRAITEMENT EXTÉRIEUR DES PAROIS**Isolation thermique (ITE)****Avantages / Atouts**

- Préservation des bénéfices de l'inertie de la maçonnerie lourde (habitabilité d'été notamment) en cas d'absence d'ITI existante;
- neutralisation des déperditions thermiques par les murs et amélioration de l'étanchéité à l'air ;
- résorption des ponts thermiques (en cas de planchers hourdis et poutrelles métalliques notamment) ;
- réduction des risques de condensation à l'intérieur de la paroi
N.B. Conservation de la diffusion de vapeur d'eau naturelle sans adjonction de pare-vapeur intérieur ;
- maintien de la surface habitable ;
- maintien des équipements sur les parois périphériques intérieures (réseaux d'électricité et de plomberie) ;
- chantier possible en site occupé ;
- ravalement de façade inclus.

Inconvénients / Risques / Contraintes

- Altérations visuelles significatives (modification des forçets, épaississement des tableaux de baies (effet "meurtrière"), disparition des modénatures, effet "hors-sol" du pied de bâtiment), risque de dégradation patrimoniale ;
- intervention nécessaire sur les équipements et mobiliers de façade (dépose et modification ou changement des gardes-corps, contrevents, marquises, etc.) ;
- moindre résistance mécanique des zones sensibles de la façade (fragilité accrue des pieds de façade, arêtes, angles saillants,...) ;
- dégradations à moyen et long terme sans restitution des ouvrages de protection de la façade: appuis de baies saillants, larges débords de toit, soubassement minéral épais,...) ;
- empiètement avec la/les propriété(s) voisine(s) en cas d'ITE rapportée sur la limite parcellaire ;
- création de ponts thermiques en tableaux de baies en cas de conservation occultations existantes ;
- perte de luminosité et d'ensoleillement (du fait de l'épaississement des tableaux de baies) ;
- demande d'autorisation d'urbanisme obligatoire avant travaux.
N.B. Pour remédier à ces inconvénients, des solutions techniques et architecturales peuvent être étudiées moyennant parfois surcoût (restitution des protections de façade et des modénatures, remplacement des portes et fenêtres en dépose complète et déplacement des menuiseries au nu extérieur de la maçonnerie (coupure du pont thermique, restitution du facteur de lumière du jour, et des capacités d'apports solaires, etc.)

Correction thermique (ECT)**Avantages / Atouts**

- Préservation des bénéfices de l'inertie de la maçonnerie lourde (habitabilité d'été notamment) en cas d'absence d'ITI existante ;
- préservation des modénatures d'origine moyennant une épaisseur d'enduit compatible ;
- réduction des déperditions par ponts thermiques en cas d'isolation intérieure existante et des risques induits de condensation ;
- amélioration du confort thermique ;
- maintien de la surface habitable existante ;
- maintien des équipements sur les parois périphériques intérieures (réseaux d'électricité et de plomberie) ;
- chantier possible en site occupé ;
- ravalement de façade inclus ;
- soution par défaut en cas de débord d'ITE interdit sur domaine public (Règlement de voirie, Normes PMR).

Inconvénients / Risques / Contraintes

- Amélioration modérée de la performance thermique de la paroi (incompatible avec la plupart des seuils éligibles aux aides et aux labels) ;
- nécessite le décroûtage complet de l'enduit existant ;
N.B. Parfois cela peut être un avantage en cas d'enduit existant inadapté au mâchefer ou en mauvais état ;
- demande d'autorisation d'urbanisme obligatoire avant travaux.

TRAITEMENT INTÉRIEUR DES PAROIS**Isolation thermique (ITI)****Avantages / Atouts**

- Préservation de l'aspect extérieur du bâtiment ;
- diminution des déperditions thermiques et amélioration du confort thermique (température de surface des parois intérieures – effet dit "de paroi froide") ;
- chantier facilité (abrité, pièce par pièce, sans échaffaudage) ;
- coût théorique compétitif ;
- dispense d'autorisation d'urbanisme.

Inconvénients / Risques / Contraintes

- Dégradation du confort d'été avec la privation de l'inertie thermique du mur (exception avec certains produits et types de mise en œuvre) ;
- création de ponts thermiques au droit des dalles et des murs refends (points de faiblesse hygro-thermique: déperdition calorifique et risques pathologiques accrus) ;
- nécessité de traiter l'étanchéité à l'air de l'enveloppe (risque de condensation à interface entre le mur et l'isolant) par l'emploi d'une membrane hygrovariable en veillant à sa parfaite mise en œuvre (laisons murs/plafonds, murs/sols et pourtours des baies) ;
- nuisance de chantier en cas d'intervention en site occupé ;
- inconfort lié à l'effet de paroi froide induit au contact des ponts thermiques résiduels non traités (dalles, murs refends) et risque de condensation de l'humidité ambiante sur ces surfaces en l'absence de ventilation efficiente ;
- diminution de la surface habitable.

Correction thermique intérieure (ECT)**Avantages / Atouts**

- Amélioration du confort thermique (amélioration de la température de surface des parois intérieures) ;
- préservation de l'aspect extérieur du bâtiment ;
- chantier facilité (abrité, pièce par pièce, sans échaffaudage) ; Travaux légers en site occupé ;
- dispense d'autorisation d'urbanisme.

Inconvénients / Risques / Contraintes

- Insuffisant pour neutraliser les déperditions thermiques des parois pleines.

ÉCHELLE INDICATIVE DES RISQUES DE PATHOLOGIES ULTÉRIEURES LIÉES AUX TRAVAUX DE RÉNOVATION THERMIQUE DE L'HABITAT EN PISÉ DE MÂCHEFER			
	Risque minimisé	Risque faible à moyen	Risque fort
RAVALEMENT	<ul style="list-style-type: none"> ▶ enduit extérieur perspirant et capillaire (ex. mortier chaux-sable) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ enduit extérieur au mortier bâtard chaux-ciment 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ paroi extérieure nue ou décroulée (béton de mâchefer exposé à la pluie) ▶ revêtement extérieur étanche à la vapeur d'eau (ex. enduit hydrofuge, mortier de ciment, film polymère, peinture organique...).
ISOLATION THERMIQUE PAR L'EXTÉRIEUR	<ul style="list-style-type: none"> ▶ matériau isolant perspirant en fibres végétales (ex. panneaux ou blocs fibre de bois, chanvre-argile...), ou fibres minérales (laine de roche) ▶ sous enduit minéral perspirant et capillaire ▶ sous bardage ventilé avec pare-pluie ouvert à la VE* 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ matériau peu perméable à la VE* (ex. polystyrènes) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ matériau fermé à la vapeur d'eau (ex. verre cellulaire, liège - hors pied de façade)
ISOLATION THERMIQUE PAR L'INTÉRIEUR	<p>Conditions préalables:</p> <ul style="list-style-type: none"> • mur extérieur imperméable à la pluie (pas de maçonnerie brute); • planchers intermédiaire traditionnel (solivage bois); • système actif de renouvellement d'air permanent. <ul style="list-style-type: none"> ▶ matériau fibreux ouvert à la VE* et capillaire (ex. ouate de cellulose ou chaux-chanvre projetée, bloc de chanvre, panneaux de laine de bois...) ▶ matériau non putrescible en cas de risques de remontées capillaires (ex. mousse minérale, silicate de calcium, perlite non hydrophobe...) ▶ continuité capillaire lors de la pose de l'isolant (contact isolant/mur) ou lame d'air ventilée ▶ membrane hygro variable, orientées ou frein-vapeur étanche à l'air côté intérieur ▶ finition intérieure non étanche à la VE* (ex. peinture à la chaux) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ avec pare-vapeur (non hermétique à long terme) ▶ matériau isolant non capillaire (ex. polystyrènes expansés ou extrudés, laine minérale, panneau de polyuréthane, panneau de verre cellulaire...) ▶ avec planchers intermédiaires en poutrelles hourdis 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ absence de frein vapeur ▶ isolant rapporté sur une paroi revêtue d'une finition étanche à la VE* (ex. laque, papier peint vinylique...) ▶ absence de ventilation
CORRECTION THERMIQUE EXT et/ou INT	<ul style="list-style-type: none"> ▶ matériau perspirant et capillaire (ex. chaux-chanvre, chaux-liège) et hygroscopique en intérieur (ex. argile-chanvre) ▶ en complément de l'ITE ou de l'ITI ci-dessus 		
	<p><i>Commentaire :</i> La perméabilité théorique à la VE* des différents composants de la paroi est étudiée pour permettre sa migration vers l'extérieur ou l'intérieur en toutes circonstances et toutes saisons.</p>	<p><i>Commentaire :</i> Une exécution vigilante est requise pour assurer les conditions théoriques du comportement à la VE*. Des risques de condensation sur les murs et/ou à l'intérieur des parois subsistent cependant :</p> <ul style="list-style-type: none"> • ponctuellement au droit des ponts thermiques de dalles et murs refends ; • dans certains cas particuliers ou situations critiques ; • en hiver, au droit de pièces humides situées en façade Nord ; • si la ventilation défaille • lors d'arrivées d'eau dans le matériau (remontées capillaires, dégât des eaux) ; • à long terme lorsque le pare-vapeur n'est plus hermétique. <p>Une bonne ventilation minimisera les risques.</p>	<p><i>Commentaire :</i> L'approche théorique du comportement à la VE* est problématique. Une ventilation mécanique est indispensable mais insuffisante pour garantir l'absence de pathologie.</p>

*VE : Vapeur d'eau

5. QUELLES STRATÉGIES D'INTERVENTION POUR L'AMÉLIORATION THERMIQUE DU BÂTI EN MÂCHEFER ?

Au terme de ce travail compilatoire sur le devenir du bâti d'habitation en mâchefer, les approches stratégiques de sa réhabilitation dessinent un chemin subtil entre valorisation de ses propriétés thermiques et respect de l'héritage culturel qu'il représente.

5.1. RECHERCHER UN COMPROMIS PATRIMOINE/ÉNERGIE PAR L'EMPLOI DE SOLUTIONS MIXTES

5.1.1. Des approches sur-mesure plutôt que des recettes à appliquer

Le scénario de réhabilitation patrimoniale et le scénario d'amélioration thermique sont naturellement interconnectés et donnent lieu, nécessairement, à la recherche d'un compromis.

Pour viser un juste équilibre entre préservation patrimoniale et amélioration thermique, on évitera par exemple d'isoler par l'extérieur la façade noble (en général façade principale sur rue), en ayant éventuellement recours à un enduit correcteur, et on favorisera en revanche l'habillage en ITE des pignons et des façades secondaires (en général façade arrière sur cœur d'îlot, sur cour ou jardin). On pourra également garder en tête une hiérarchie des façades à prioriser dans l'isolation thermique avec par ordre d'importance les expositions Nord, Est, Ouest, Sud.

Cela reste théorique et doit être évalué au cas par cas, notamment au regard des masques solaires liés au relief, à la végétation, au bâti environnant, des corridors de vent...).

5.1.2. Isolation thermique extérieure des façades-pignons

Nombre de bâtiments en mâchefer sont implantés sur des limites séparatives entre parcelles et présentent des élévations latérales aveugles. L'ITE peut être mise en œuvre sur ces murs qui ne présentent, par définition, ni modénature ni ornementation. Pour les typologies d'habitat collectif en centre-ville, ces murs



Habitat individuel (1933), 5 rue Pierre Curie, Bron (69), Réhabilitation, agrandissement et isolation par l'extérieur (2021), BARN architecture F. Genouvrier



Pignon en pisé de mâchefer non revêtu, 21, rue Gambetta, Givors (69), © T. Dubertret, ALEC de la Métropole de Lyon



Habillage thermique rapporté par l'extérieur sur une façade sur cour, Cité HBM Dauphiné-Lacassagne (GLH), 27 rue du Dauphiné, Lyon 3, B. Guérin, architecte (1929) – Chantier de réhabilitation énergétique (2020), ASUR architecte, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Réhabilitation, surélévation et isolation par l'extérieur d'une maison individuelle de 1930, 16 rue Jean Marie Duclos, Lyon 5, Aurélien Gely architecte (2021)

étaient souvent considérés lors de leurs constructions comme « en attente » d'édifications adjacentes et n'étaient pas conçus pour être exposés au froid et aux intempéries. C'est souvent la raison pour laquelle des pignons présentent parfois un mâchefer à nu, non enduit. Les pathologies telles l'infiltration d'eau de pluie à travers des parois exposées à l'Ouest ou au Sud sont couramment constatées.

5.1.3 Isolation thermique extérieure des « façades-arrières »

Lorsque les façades ne portent aucun décor et sont dénuées de reliefs, alors la pratique de l'isolation extérieure sous enduit est mieux acceptée. Les formes urbaines insérées dans les tissus urbains, avec une distinction architecturale forte entre façades d'apparat et façades arrière, typique des formes traditionnelles d'inspiration haussmanniennes, se prêtent donc à des isolations côté « cœur d'îlot ».

Attention cependant aux bâtiments des Cités d'Habitation à bon marché (HBM) pour lesquels cette opposition architecturale est moins marquée, les prin-

cipes hygiénistes ayant banni la pratique et l'image de la cour fermée pour développer le principe de l'îlot ouvert³⁷.

5.1.4 Isolation thermique extérieure des façades principales : postures assumées et partis pris architecturaux

Pour ces façades ouvragées pour lesquelles un programme d'isolation est retenu, on observe globalement deux postures :

- une option « préservationniste » qui vise leur persistance sous forme d'une restitution factice à base de produits d'imitation en matériaux polymères ou équivalent,
- une option « radicale » qui fait le deuil de l'expression plastique originelle et prend acte de la disparition des reliefs de façade en proposant une réécriture architecturale complète.

Le choix est à trancher au cas par cas.

37. Ibid

Cas de l'isolation thermique extérieure avec imitation de la façade d'origine

Dans le premier cas, l'exercice requis est en général celui qui consiste à reproduire la forme d'origine afin de réaliser une imitation la plus fidèle possible de l'état architectural préexistant. Il s'agit de restituer au mieux les modénatures et les décors portés (appuis, cordons, bandeaux, encadrements, soubassements, etc.) afin de conserver les jeux d'ombre et de lumière, de travailler les détails pour éviter l'effet d'épaississement consécutif à l'isolation rapportée.

Les considérations économiques étant généralement décisives, les pratiques les plus courantes consistent à recourir à des produits factices d'imitation comme les faux appuis de baie ou les moulures en matériaux polymères. Sans ouvrir le débat du bien fondé d'un exercice architectural dont le but peut se résumer à la création d'un pastiche, on insistera d'une part sur l'absence de retour d'expérience de long terme sur ces solutions nouvelles proposées par les fabricants pour répondre à l'enjeu patrimonial, d'autre part sur le contexte normatif qui impose des modalités d'exécution difficilement compatibles avec une imitation parfaite et l'atteinte de résultats esthétiquement satisfaisants (sur-ajouts de bavettes sur les cordons et appuis, arrêt des isolants au-dessus du niveau du sol, etc.) et des exigences de résistance aux sollicitations mécaniques courantes.

Cas de l'isolation thermique extérieure sans imitation de la façade d'origine

A *contrario*, dans le second cas, l'ITE sur un bâtiment en mâchefer peut être réalisée sans intention de reproduire l'image de la façade. Cela peut facilement s'entrevoir pour des immeubles de facture simple et dépouillée ; moins facilement pour des édifices plus travaillés ou pour lesquels le contexte urbain est sensible (Périmètre de sauvegarde et de mise en valeur, Périmètre d'intérêt patrimonial, etc.). L'exercice n'est pas aisé, les attentes étant celles de produire des façades architecturalement aussi dignes d'intérêt que celles qui ont été recouvertes.

C'est à un architecte que doit revenir la responsabilité de cet exercice car elle relève de sa seule compétence.



Prototype d'isolation thermique par l'extérieur sur pignon-test (2016), Hervé Vincent architecte, Cité HBM Clos Jouve, 3 rue Carquillat, Lyon 4, © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Maison de lotissement « Castors » en parpaings de mâchefer (v.1950 – plan de l'architecte F. Grimal), 14 rue des frères Lumière, Sainte-Foy-Les-Lyon (69), Extension et Rénovation globale y compris ITE (2017), © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Projection d'un enduit thermo-isolant chaux-silice, Cité des États-Unis, 72, boulevard des États-Unis, Lyon 8, T. Garnier architecte (1935) – Chantier de réhabilitation énergétique (2021), C&P architectes, © CAUE Rhône Métropole – G. Cluzel

5.2. LEVER LES FREINS LIÉS À L'EMPLOI DE TECHNIQUES NON COURANTES

Pour répondre aux exigences de la transition énergétique et de la préservation de l'environnement, les professionnels du bâtiment sont incités à développer et à recourir à de nouveaux procédés ou à des matériaux innovants. Dans ce domaine, la gamme croissante proposée sur le marché (correcteurs thermiques, enduits thermo-isolants, isolants biosourcés, modénature en mousse polyuréthane haute densité, résines polyester et fibre de verre, etc.) témoigne d'un effort d'innovation. Certains sont présentés comme une réponse adaptée à l'amélioration thermique du bâti en mâchefer.

D'ailleurs, le sont-ils tous vraiment ? Dans ce cas, les artisans s'appuient sur des règles de l'art qu'ils maîtrisent et étendent mais sont tenus de le faire en responsabilité, c'est-à-dire en évaluant les aléas techniques et en mutualisant le risque avec les autres acteurs de la construction (architecte, bureau d'études techniques, maître d'ouvrage, bureau de contrôle...). Car si tout professionnel est tenu d'accompagner la totalité de ses prestations de garantie, il est important de rappeler que ces dernières ne sont automatiques que pour les techniques dites « courantes ».

À noter que **le choix du bureau de contrôle missionné par le maître d'ouvrage sera primordial pour faciliter l'assurabilité de techniques de construction non courantes.**

Bon à savoir

Pour rappel, les pratiques dans le secteur du bâtiment sont régies par deux types de mise en œuvre des procédés et produits constructifs. D'une part, celles qui appartiennent aux techniques dites traditionnelles, qui s'appuient sur les normes françaises de construction (NF). D'autre part, celles qui appartiennent au domaine non traditionnel, qui proposent des matériaux ou procédés innovants et ne bénéficient pas d'un retour d'expérience suffisant.

Cette distinction se traduit par deux statuts différents :

- les techniques traditionnelles font l'objet de normes édictées dans les documents techniques unifiés (DTU) établis par le CSTB, de documents techniques de référence (préfigurant des avant-projets de DTU sous forme de recommandations professionnelles du programme RAGE) ainsi que de règles professionnelles, élaborées par les organismes professionnels désireux de formaliser le cadre réglementaire de leurs métiers et destinées à être traduites en normes de mise en œuvre (NF DTU) ;
- dans le domaine non traditionnel en revanche, les techniques font l'objet d'une procédure d'évaluation (Avis techniques dits ATec, Document technique d'application dits DTA, Appréciation technique d'expérimentation dite ATex, Pass Innovation, etc.).

Cette distinction entre techniques traditionnelles et techniques non traditionnelles conditionne l'assurabilité des travaux (assurance décennale des entreprises). Seules les techniques appartenant au domaine traditionnel et les procédés sous ATec, DTA, et ATex sans mise en observation, sont couvertes automatiquement par l'assurance décennale car elles relèvent des techniques dites courantes. En revanche, quand le procédé ou le produit est classé dans le domaine non courant – ce qui peut être le cas pour certains enduits isolants ou correcteurs thermiques notamment –, il est de la responsabilité de l'entreprise d'en informer l'assureur afin de souscrire une éventuelle surprime, et/ou se voir imposer un accompagnement spécifique et/ou obtenir une adaptation de ses garanties.

Cette précaution est nécessaire pour toutes les familles de procédés non validés par la Commission Prévention Produits (C2P) de l'AQC (règles professionnelles refusées, Atec et DTA mis en observation, ATex avec avis réservé ou défavorable). À défaut, l'entreprise ne sera pas couverte en cas d'éventuels dommages affectant son ouvrage après réception.

5.3 DÉFINIR UN OPTIMUM ÉNERGÉTIQUE

La réglementation thermique applicable aux bâtiments existants (RT existant encore en vigueur à l'écriture de ce document) date de 2009. Elle distingue les bâtiments construits après 1948 (avec une industrialisation du bâti plus importante) et les bâtiments d'avant 1948, considérés comme relevant d'une architecture moins industrialisée et pour lesquels les exigences sont moindres.

Dans les deux cas, les bâtiments sont soumis à la RT dite « élément par élément ». Celle-ci réclame que les interventions liées à la thermique respectent une performance plancher.

Au-delà de ce cadre réglementaire, le maître d'ouvrage peut également demander la conformité à des labels afin de capter financements et subventions. Parmi les plus répandus, le label Effinergie Rénovation (équivalent BBC Effinergie Rénovation pour les bâtiments antérieurs à 1948) est nécessaire par exemple à l'obtention des aides spécifiques de la Région Auvergne-Rhône-Alpes et de la Métropole de Lyon. Ce label se concentre sur cinq postes de consommation énergétique dont il compare le calcul théorique du bâtiment rénové à un objectif absolu de 80 kWhEP/m².an, modulé par zone géographique et d'altitude (96 kWhEP/m².an à Lyon). Mais cette évaluation théorique est calculée à partir de la méthode Th-CE ex, laquelle, n'est pas adaptée au bâti ancien, comme nous l'avons vu.

Enfin, si certaines plateformes territoriales d'aides à la rénovation énergétique conditionnent leurs aides à la mise en œuvre de bouquets de travaux pour inciter à une approche globale, ces dispositifs restent cantonnés à des barèmes de performance qui ne prennent pas en compte les leviers du confort thermique : réduction des besoins de chauffage (isolation de l'enveloppe, remplacement des menuiseries, amélioration de l'étanchéité à l'air) et amélioration des performances systèmes (production, distribution et émission de chauffage, production et distribution de l'ECS, optimisation de la ventilation contrôlée, recours aux ENR).

Ces constats conduisent à imaginer, pour la réhabilitation énergétique de l'habitat en mâchefer, d'autres pistes de projet, moins normatives et moins conventionnelles. Il s'agit de travailler, au cas par cas, une réponse spécifique, en fonction de l'enveloppe budgétaire et des objectifs énergétiques poursuivis.

Bien que les économies d'énergie liées à l'isolation soient incontestables et que la réduction des dépenses soit une priorité (économies de charges, réduction de la précarité énergétique), le poste façade n'est pas nécessairement le poste le plus efficient du point de vue du rapport entre investissement et gain énergétique atteint par les travaux.

L'examen complet du bâtiment étudié est donc à réaliser pour évaluer les postes de réduction des déperditions qui seraient les plus facilement atteignables (ou présentant le meilleur ratio coût / performance). Pour établir cette vision objective, la prise en compte de la conductivité thermique réelle de la paroi est indispensable.

En réalité, la performance thermique intrinsèque des parois extérieures peut donc se satisfaire d'épaisseurs d'isolant moindres, ce qui peut réduire l'énergie grise ou même, dans certains cas, de l'absence d'isolation.

La question de l'objectif énergétique posée ici ne remet pas en cause l'intérêt ou la nécessité de l'isolation, mais suggère les alternatives qui pourraient se poser au cas où elle serait écartée pour des raisons diverses, qu'elles soient économiques ou patrimoniales.

Dans le cadre d'un budget plus restreint qui, par exemple, ne permettrait pas de traiter le bâtiment dans sa globalité, plusieurs pistes sont à questionner et à mettre en balance :

- le remplacement des menuiseries de fenêtre par des huisseries et vitrages performants lorsque le ratio des pertes par les baies en façade est conséquent (taux de percement, performance des menuiseries en place);
- l'atteinte d'une performance satisfaisante à l'aide de techniques d'enduits de correction thermique moins coûteux que des dispositifs d'ITE;
- à cela s'ajoutent les autres postes de travaux d'amélioration de l'enveloppe hors façade (toiture, plancher bas).

Se reporter au scénario de réhabilitation énergétique ci-contre

Scénario de réhabilitation énergétique de l'habitat en pisé de mâchefer

La démarche repose sur une stratégie adaptée au bâti ancien (massif, perspirant et inertiel)

1. Toiture

Objectifs

- Préserver les combles perdus pour conserver l'effet de volume tampon thermique en été et en hiver
- Maximiser de l'isolation thermique ; Performance visée à titre indicatif : $U < 0,10$ à $0,15$

Recommandations

- Pour les couvertures à pans
 - Isolation renforcée du plancher des combles par flocage
Ex : Ouate de Cellulose ou Chènevotte
 - À défaut, isolation haute densité sous rampant
Ex : Laine de bois
 - Isolation par l'extérieur « sarking », uniquement en cas de comble déjà habité et salubre, sous réserve de dispositions permettant de soigner les rives de toit
- Pour les toits-terrasses
 - Isolation renforcée y compris traitement des ponts thermiques des acrotères

2. Baies

Objectifs

Remplacer les menuiseries de portes et fenêtres par des dispositifs performants en été comme en hiver ; Performance d'hiver visée à titre indicatif : $U_w < 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

Recommandations

- Pour les menuiseries
 - Remplacement des menuiseries obsolètes (simple vitrage, sur-vitrages et double vitrage de première génération) par des menuiseries bois à double vitrage thermique et acoustique (dessin identique à l'origine)
Ex : huisseries en bois avec double vitrage VIR (isolation renforcée) ; 4/16/4 minimum, avec traitement faible émissivité) ; triple vitrage argon en façade Nord
 - Mise en œuvre uniquement après dépose complète (y compris anciens dormants), avec emploi de fond de joint, mastics élastomères et bandes de mousses pré-comprimées
 - Déport des tapées vers l'extérieur en cas d'ITE
 - Mise en place de réglettes de ventilations dans les pièces sèches en cas de VMC
- Pour les protections solaires
 - Mise en place de protections extérieures mobiles sur tous les vitrages y compris au Nord (course

solaires estivales étendue et rayonnement diffus)

Ex : persiennes métalliques, brise-soleil orientable aluminium à lames C80 sur câbles tendus (compris lambrequin), volets en bois (au cas par cas), jalousie lyonnaise traditionnelle en bois dans les sites patrimoniaux remarquables ; volets roulants à exclure

3. Ventilation

Objectifs

Assurer un renouvellement d'air minimum garanti

Recommandations

- Maximisation de la ventilation naturelle
Ex : Free-cooling direct
- Recours à une mécanisation simple
Ex : VMC Hygro B

Nota :

- Investigation approfondie des études thermiques pour maximiser l'emploi de la ventilation naturelle et optimiser le complément en VMC hygro simple basse pression
- Recours à la ventilation double flux uniquement si l'étanchéité à l'air de l'enveloppe bâtie est étudiée et testée ($< 1,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$)

4. Plancher bas sur cave

Objectifs

Mettre en place une barrière thermique performante au niveau du plancher de RdC habité (à usage de logement ou d'activité) ; Performance visée à titre indicatif : $U < 30$

Recommandations

Isolation renforcée insufflée ou projetée en sous face de plancher

Ex : Ouate de Cellulose

Nota :

Pour déterminer la nature précise des travaux, évaluer les capacités d'isolation du plancher bas selon plusieurs critères :

- le mode constructif : traditionnel (poutres et solives bois ou voutains), ou préindustriel (dalles sur poutrelles aciers et hourdis, voutains sur poutrelles acier...)
- l'état structurel du plancher et sa capacité à supporter des surcharges d'isolation
- les transformations plus ou moins opportunes apportées au cours de la vie du bâtiment et à corriger
- la qualité et l'aspect du plancher existant

5. Murs extérieurs

Objectifs

- Valoriser les propriétés d'inertie offertes par les épaisseurs importantes de maçonnerie pour se protéger du chaud en été
- Rechercher une isolation thermique aussi performante que possible ; Performance visée à titre indicatif : $U < 0,25$ à $0,18$

Nota :

- Se reporter au tableau Avantages/Inconvénients de la page 120
- Pour déterminer la nature des travaux, évaluer les capacités d'isolation des murs selon :
 - la typologie de la façade (décorée ou non),
 - son état sanitaire (altéré ou non),
 - les contraintes extérieures (possibilité de débords sur domaine public et avoisinants)
 - les contraintes intérieures
- Les caractéristiques techniques du matériau de construction nécessitent une étude spécifique afin de s'assurer de la compatibilité des produits appliqués avec les propriétés hygrothermiques du support

5.1. Traitement par l'intérieur

Recommandations

Restriction de l'ITI seule (sans traitement thermique extérieur complémentaire) au profit d'une correction thermique intérieure : application d'un parement ou d'un revêtement à faible effusivité (enduit correcteur thermique) cumulable avec une ITE ou un ECT extérieur ultérieur ;

Nota :

- L'isolation par l'intérieur (ITI) ne doit être envisagée qu'avec la mise en œuvre d'un traitement thermique extérieur complémentaire des murs (enduit correcteur thermique ou isolation) sauf si les études de diagnostic garantissent l'absence de ponts thermiques en façade
- Dans ce cas, envisager d'incorporer un isolant en vrac (Ex : perlite) dans la lame d'air parfois présente entre le mur en pisé de mâchefer et le doublage existant en brique plâtrière
- Cas des murs déjà isolés par l'intérieur :
 - déposer l'isolant intérieur en particulier s'il s'agit d'un PSE ou d'une laine minérale sans frein vapeur
 - à défaut (en cas d'ITI existante maintenue ou renforcée), privilégier la mise en œuvre d'un ECT par l'extérieur (réduction des ponts thermiques, limitation des risques de condensation, amélioration de la performance de la paroi).

5.2. Traitement par l'extérieur

Recommandations

- Sur des façades de simple facture et peu décorées uniquement (notamment sur cour et en pignon) : mise en place d'une isolation extérieure performante (ITE) en semi-vêtue sous enduit (sans lame d'air) en envisageant la reconstitution des modénatures.

Ex : fibre de bois et Liège en pied de façade

- Sur les façades les ouvragées avec décors portés importants (exigence patrimoniale) : exclusion de l'isolation extérieure (sous enduit ou vêtue). Dans ce cas, le recours à l'enduit correcteur thermique (ECT) peut être envisagé (avec purge nécessaire des anciens enduits)

Nota :

- Éviter l'isolation extérieure sous bardage ventilé pour des raisons d'intégrité architecturale, sauf exception, par exemple sur façades sans décor ni modénature dans une optique de réécriture architecturale complète et sous réserve d'une conception soignée (choix du bardage ou de la vêtue, calepinage, joints, détails soignés de tous les points sensibles : forêts/acrotères, pieds de façade, angles et arrêtes, tableaux de baies, seuils et emmarchements, etc.)
- Privilégier les isolants robustes en partie basse de façade et traiter le soubassement jusqu'au sol
- Utiliser des enduits correcteurs thermiques (ECT), après décroustage complet des enduits anciens existants pour éviter de noyer les moulures d'origine en ciment naturel (à décaper ou gommer)
- Éviter les couvertines alu thermolaqué et les appuis de fenêtres en matériaux polymères, trop fragiles ou nécessitant des découpes et jointages ; Privilégier les appuis béton à rupteur de pont thermique ou favoriser l'emploi du zinc plié avec soudures
- Une isolation par l'extérieur performante requiert une continuité de l'habillage y compris en tableaux de baies ce qui peut impliquer le remplacement des éléments d'occlusion extérieure

6. Restructurations et aménagements intérieurs

Objectifs

Favoriser l'éclairage naturel en hiver et la ventilation naturelle nocturne en été

Recommandations

Conservation ou restitution des configurations traversantes ou à orientations multiples des logements

7 Systèmes de production d'énergie

Objectifs

Remplacer ou optimiser le système existant par une installation à rendement élevé

Recommandations

- Sélection d'un système de production d'énergie au fonctionnement simple et ne nécessitant qu'un process courant en matière d'entretien et de maintenance
- Choix du système :
 - en fonction des performances du bâti après travaux d'amélioration thermique réalisés ou projetés
 - en fonction du diagnostic technique et énergétique en veillant à n'omettre aucune valeur (performances réelles du mâchefer, ressources énergétiques disponibles alentours, etc...)

Nota :

N'envisager le recours à des systèmes complémentaires d'appoint en énergie renouvelable (solaire photovoltaïque, solaire thermique, poêle à bois, etc.) qu'une fois menés les travaux d'isolation thermique

Approche méthodologique du projet de rénovation énergétique

- Évaluer la part de la façade dans les déperditions globales ;
- identifier précisément les points faibles de l'enveloppe : ponts thermiques, toiture, menuiseries, plancher bas ;
- le cas échéant, produire les calculs de ponts thermiques et évaluer les risques de condensation (systématiquement en cas de projet d'ITI et dans une moindre mesure en ITE) ;
- en cas de projet d'ITI, réaliser une thermographie et de mesures de températures de surface en hiver pour évaluer l'importance des ponts thermiques (qui seront amenés à peser davantage dans le bilan global) ;
- réaliser des calculs de diffusion de vapeur d'eau sur la base d'un outil de modélisation dynamique (type WUFI) pour valider les choix des matériaux en façade (isolants, enduits, vêtements, bardages) ;
- dès les premières estimations de coût global (en phase DIAG ou APS), intégrer une simulation thermodynamique pour traiter la question de l'habitabilité d'été et estimer les consommations prévisionnelles ;
- effectuer des calculs en coût global et en énergie globale pour affiner les choix ;
- en cas d'ITE calée / chevillée, accepter la réalisation d'une « mise en œuvre de techniques non courantes » engageant la responsabilité des porteurs de projet (maître d'ouvrage et maître d'œuvre) ; Intégrer les exigences assurancielles dans les marchés de travaux ;
- prévoir des équipements de protection de chantier adaptés à la découpe de maçonneries, et des systèmes d'aspiration à la source pour limiter les dégagements de poussières.

5.4 REPLACER LE PROJET DANS UNE PERSPECTIVE DE MOINDRE EMPREINTE CARBONE

Des grands ensembles aux opérations de rénovations urbaines, la seconde moitié du XX^e siècle aura beaucoup construit mais elle aura également beaucoup détruit, avec une pratique assumée de la *tabula rasa*. Si la question de conserver, rénover, reconverter le bâti existant émerge paradoxalement au cours des Trente Glorieuses, portée par le début de la patrimonialisation des centres historiques dans les années 1970, le terme de réhabilitation acquiert depuis une vingtaine d'années un nouveau sens avec les enjeux environnementaux : énergie, ressources, démographie, déchets...

La réhabilitation architecturale s'inscrit désormais dans une visée climatique globale de décarbonation qui porte en elle les prérequis d'une approche nécessairement durable : en tout premier lieu, l'exercice qui consiste à conserver l'essentiel d'un édifice et à prolonger sa durée de vie en pérennisant les qualités attendues par ses occupants (fonctionnalité, sécurité et confort) s'inscrit de fait dans cette logique du « bas carbone » avec laquelle aucune opération de démolition-reconstruction ne pourra rivaliser, même avec les meilleures velléités de consommation zéro.



Chantier de démolition, Lyon 4, 2018, © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Mâchefer, 2017, installation de l'artiste espagnole Lara Almarcegui, 85m³ de gravats issus de la déconstruction du portail de la Halle Girard. Création présentée lors de la Biennale d'art contemporain de Lyon en 2017 © Blaise Adilon

Mais il ne faudrait pas, cependant, que les moyens mis au service de sa réhabilitation ne desservent la cause. Or, force est de constater que la seule quête de performance se traduit bien souvent par un recours à des technologies à très fort bilan carbone, au premier rang desquelles la mise en œuvre de complexes d'ITE, la mécanisation des systèmes (pompes à chaleur, occultations, ventilation double-flux...) et l'appareillage de l'habitat (motorisation, automatisation, domotique...).

Cette approche est à réinterroger, à la lumière du dérèglement climatique à l'œuvre et des risques de précarisation énergétique qui, précisément, fragilisent les réseaux électriques qui alimentent la ville (pompes, circulateurs, climatiseurs, sécurité, etc.). Les coûts induits de ces solutions ne sont pas sans conséquence en termes d'entretien-maintenance. Et on ne peut pas nier l'obsolescence intrinsèque que revêtent par essence tous ces équipements.

Tout comme l'évaluation économique suppose d'apprécier des retours sur investissement, la notion d'« amortissement carbone » suppose de mettre en vis-à-vis le coût carbone des solutions (énergie grise entre autres) rapporté à leur durée de vie et de favoriser les conditions d'adaptation et de résilience.

Une approche durable de la réhabilitation du parc bâti en mâchefer, loin d'être seulement à évaluer à l'aune d'une massification des process et des réponses destinées à réparer des bâtiments soi-disant obsolètes, est donc probablement à s'inscrire tout aussi légitimement dans une perspective de culture de la ville « bas carbone ».

Par bien des aspects, le bâti en mâchefer est, intrinsèquement, un modèle de construction durable et « éco-logique » : il est frappant de constater que cet habitat, construit pour durer avec le souci constant de son entretien, à partir de matériaux économiques issus d'un déchet industriel recyclé en circuit court, édifié par des artisans locaux, au savoir-faire non délocalisable, répond précisément aux attentes de la transition environnementale. Sa morphologie compacte et traversante qui ménage à la fois les vertus de la ventilation naturelle, une relation à l'espace public et à un espace jardiné privatif, dans un rapport bâti/non-bâti bien équilibré, apparaît aussi comme un modèle.

Enfin, l'inertie thermique, les capacités de déphasage et les propriétés isolantes de son matériau principal en font une réponse constructive particulièrement propice aux exigences d'une adaptation au dérèglement climatique et aux occurrences des pics de chaleur.

S'appuyant sur les trois piliers, écologique, économique et social, eux-mêmes inscrits dans une dimension historique et culturelle, la réhabilitation fine et raisonnée de ce patrimoine pourrait même relever de ce que certains nomment aujourd'hui « l'âge de la frugalité », une stratégie de rénovation sobre en matière, en technologie et en énergie.



*Résidence d'habitat collectif social sous gestion GLH, Angle rue du Repos,
Rue de la Madeleine, Lyon 7 (1914), Emmanuel Cateland architecte
(1914) - Ravalement thermique : Axe Architecture (2016)*

Résidence d'habitat collectif en copropriété, Résidence "Garibaldi-Rancy"
(1951/1954), 240 avenue Garibaldi, Lyon 3, Pierre Turrel architecte -
Ravalement traditionnel : Maîtrise d'œuvre Cabinet DPS (2022)



CONCLUSION

UNE ARCHITECTURE EN QUÊTE DE (RE)CONNAISSANCE

Il y a un plus d'un siècle, l'émergence du pisé de mâchefer, un matériau à la fois économique et aux qualités notables, tant structurelles que thermiques et acoustiques, avait permis de faire progresser la cause de l'habitat populaire, en prolongeant, par l'utilisation ancestrale du banchage, des techniques constructives artisanales tirées de la tradition locale du pisé de terre. Ces expériences constructives sont arrivées jusqu'à nous, notamment au travers de modèles typologiques préindustriels fameux, comme les Cités HBM ou les maisons castors, qui font référence aujourd'hui. À l'heure où ce parc bâti du XX^e siècle entre dans une ère de « modernisation », la présente étude a permis d'apporter un nouvel éclairage sur ce patrimoine bâti méconnu, longtemps ignoré et souvent sous-estimé bien que massivement répandu à Lyon et dans sa région.

Ce matériau poreux, capillaire, perspirant, faiblement hygroscopique et faiblement conducteur de la chaleur au regard de la plupart des maçonneries lourdes, s'avère présenter quelques atouts notables qui permettent de poser les jalons d'une approche raisonnée de sa réhabilitation. Sa mise en œuvre traditionnelle, selon un procédé de banchage épais, lui confère notamment une inertie et une résistance thermique particulièrement profitables à l'aune des enjeux climatiques actuels.

Cette étude a pu montrer combien l'architecture du mâchefer était un parc d'habitat spécifique, à mi-chemin entre le bâti ancien dont il hérite de nombreuses caractéristiques constructives et le bâti récent dont il adopte certains codes stylistiques. Composer avec les impératifs techniques, les considérations architecturales et urbaines, les exigences d'usage, de confort et de pérennité du bâti, auxquels il faut ajouter les contraintes financières de plus en plus critiques, est un exercice délicat.

Pour réhabiliter ces constructions et viser notamment des objectifs d'économie d'énergie et d'amélioration du confort thermique, retenons, comme souvent en matière d'intervention sur l'existant, qu'il n'existe pas de recette toute faite, mais plutôt que les solutions sont toujours spécifiques, ou à adapter au cas par cas.

*Primum non nocere*¹

Avant toute chose, on veillera aux risques de dégradation ou de sinistralité ultérieurs. En cas de ravalement thermique, il s'agira de contrôler la compatibilité des nouveaux produits rapportés avec les supports, la maçonnerie elle-même mais également les épidermes existants intérieurs et extérieurs conservés, le cas échéant. La nature des échanges gazeux dans la paroi, la position du point de rosée et l'efficacité de la ventilation, sont à contrôler systématiquement.

En effet, au-delà des risques pathologiques graves, des aménagements inappropriés peuvent entraîner la perte des qualités intrinsèques du pisé de mâchefer, comme son inertie thermique ou ses capacités de déphasage.

Contrairement aux bâtiments neufs, qui font l'objet d'une conception de A à Z, le bâti existant nécessite d'être ausculté avant d'être modifié. Un diagnostic global préalable s'impose pour prendre les bonnes décisions sans nuire aux ressources et aux atouts du « déjà-là ». À cette fin, l'implication d'un professionnel maître d'œuvre est indispensable.

Éloge de l'architecture ordinaire

Si le corpus bâti lyonnais en mâchefer relève pour l'essentiel de l'architecture ordinaire, on aurait tort cependant de mésestimer sa réelle valeur patrimoniale. Cette valeur repose sur la force du nombre, et sur la capacité de tous ces édifices anonymes à former une matrice de la ville.

Il est vrai que plusieurs spécimens d'architecture singulières en mâchefer ont été pointés, au fil du temps, à l'occasion de recensements sur la ville : c'est le cas par exemple de certains ouvrages à préserver, repérés comme Éléments Bâti Patrimoniaux (EBP) au règlement d'urbanisme de la Métropole de Lyon. D'autres, beaucoup plus rares, bénéficient même de protections exceptionnelles au titre de leur classement ou inscription à l'inventaire des Monuments Historiques.

1. L'expression latine "*Primum non nocere*" signifie "D'abord, ne pas nuire". Souvent associée à l'éthique médicale elle exprime le principe selon lequel, avant d'administrer un traitement ou une intervention, le soignant doit s'assurer que celui-ci ne causera pas de préjudice au patient.



Immeuble collectif Société des logements économiques, 24 rue de la Bannière, Lyon 7, Opération Îlot Part Dieu (1892-1913), Construction Félix Mangini (Société des logements économiques)



Ancien quartier d'habitat ouvrier dit « Petite Cité Tase » à Vaulx-en-Velin (v.1925-1927) – Label Architecture Contemporaine Remarquable du Ministère de la Culture (2002) ; Périmètre d'Intérêt Patrimonial du PLUH de la Métropole de Lyon (2021)

Et d'autres encore, comme les cités HBM, pourraient certainement prétendre à une plus grande reconnaissance dans la mémoire collective lyonnaise.

Le référencement de certaines d'entre elles au label « Architecture Contemporaine Remarquable » (autrefois connu sous l'appellation « Label XX^e ») ne serait en effet pas usurpé au regard de leur statut de marqueur de l'histoire de l'habitat social lyonnais et des multiples qualités et innovations qu'elles recèlent.

Mais au-delà de ces quelques ouvrages remarquables, la très grande majorité des édifices en mâchefer qui n'a été, pendant près d'un siècle, que le produit de la construction courante, n'en demeure pas moins digne d'intérêt. Non seulement sur le plan historique, social et culturel mais également sur le plan de la qualité qu'ils confèrent à notre cadre de vie.

Bon nombre de maisons ouvrières en mâchefer par exemple, constitutives de quartiers ou d'ensembles bâtis homogènes, produisent des effets remarquables sur le paysage urbain. Prises isolément, leur intérêt est modeste. Considérées dans leur ensemble en revanche, leur forte identité collective compose des tissus de très grande qualité. Plusieurs secteurs pavillonnaires commencent d'ailleurs à faire l'objet de périmètres d'intérêt patrimoniaux (PIP) identifiés au document d'urbanisme de la Métropole de Lyon, témoignant de la reconnaissance d'une forme de « bien commun » pour ces quartiers.

(Ré)concilier patrimoine et performance énergétique

Cette légitime reconnaissance de la valeur patrimoniale de l'architecture en mâchefer exige de tous un regard attentif et une vigilance particulière à l'occasion des mutations dont elle fait l'objet.

Avec la crise climatique que traverse le XXI^e siècle, l'architecture en mâchefer est interrogée, au même titre que l'ensemble du parc bâti existant, sur sa capacité à évoluer pour répondre à la nécessité de réduire sa consommation énergétique.

La résolution de ce paradoxe – penser ce bâti comme un patrimoine à la fois à préserver et à faire muter – constitue l'un des défis les plus passionnants qui se présentent aujourd'hui aux architectes. Rarement dans l'histoire, les maîtres d'œuvre ont eu à réinterroger à ce point leurs pratiques.

À l'instar de bouleversements historiques comme ceux qui ont fait naître les mouvements hygiénistes après les grandes épidémies de la fin du XIX^e siècle, ou ceux qui ont permis l'industrialisation du bâtiment au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, la crise climatique réinterroge aujourd'hui la manière même d'aborder le projet architectural, avec une visée inédite : celle de « faire du neuf avec du vieux ». Sur le plan des ressources, tandis que les constructions nouvelles tendent vers l'énergie zéro, une quête équivalente

pour la rénovation du bâti existant peut apparaître comme chimérique. Mais l'architecture en mâchefer a également de nombreux atouts que le neuf n'a pas, en termes de durabilité et d'empreinte carbone : une matérialité robuste, des modes de mise en œuvre simples, éprouvés, des épidermes peu vulnérables aux attaques du temps et des composants de second œuvre facile à entretenir, ajustables et réparables.

Quelle que soit la typologie d'habitat développée – individuelle ou collective – les formes simples issues de la construction en mâchefer sont l'illustration d'une exceptionnelle rationalité architecturale qui fait aujourd'hui la démonstration de sa capacité à évoluer dans une forme de modernité renouvelée. En attestent de nombreux projets de réhabilitation, dont quelques exemples sont présentés en annexe de cette étude. La capacité de ces constructions à être réinvesties et transformées près d'un siècle après leur construction pour être adaptées aux modes de vie actuels est la preuve de cette adaptabilité.

Reconnaissons aujourd'hui à tous ces édifices en mâchefer une valeur d'exemplarité sinon de témoignage historique pour les générations futures, en espérant que le présent document contribuera à les sortir de l'anonymat ou de l'indifférence.



ANNEXES

Données sur le recueil d'échantillons et les sites de prélèvements



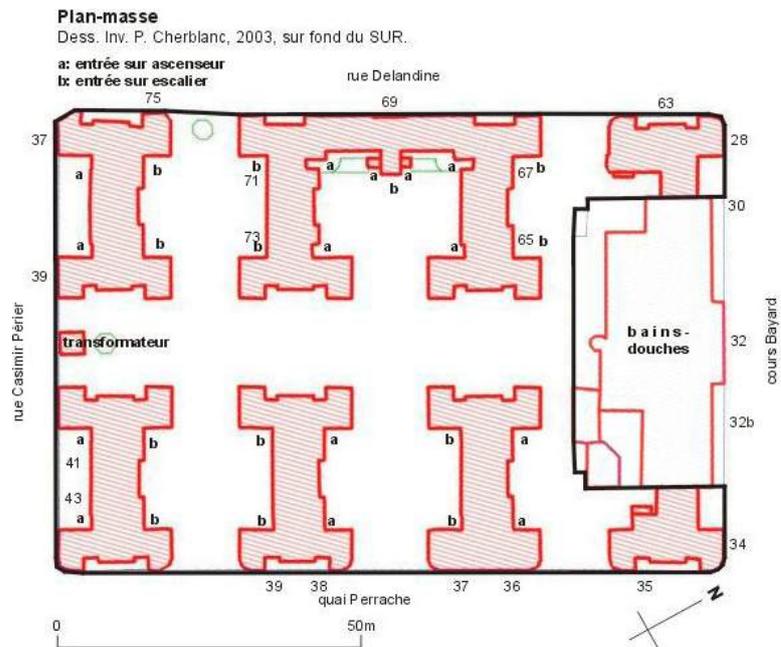
1964, source AC Lyon : 0001 Ph 0723



GoogleStreetView, oct. 2017



échantillons, # 25 x 10 cm © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole





GoogleStreetView (état avant démolition – 2008)



Bloc échantillon prélevé (déc. 2018) © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Bloc échantillon (détail) © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Chantier démolition (12.12.2018) © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole

FICHE ÉCHANTILLON n°02

adresse	21 avenue des Acacias 69003 LYON	enduit	Enduit à la chaux taloché 5 mm + finition tyrolienne 5 mm
date construction	1939	observations	Échantillons prélevés sur chantier lors de la création d'une ouverture sur le pignon ouest. Les échantillons proviennent de la partie supérieure de la baie, au dessus du soubassement et hors zone de chaînage périphérique (à une hauteur comprise entre 2,25 et 2,85 m à une distance comprise entre 0,60m et 1,70 m de l'angle de la maison)
propriétaire	Privé	divers	Projet de rénovation d'une maison incluant le rehaussement du plancher de l'étage, la création de baies dans les façades (dont une donnant sur un agrandissement latéral)
type	Pavillon R+1+combles	Résultat du prélèvement	2 blocs parallélépipédiques prélevés avec 6 faces relativement planes sans enduit ; un morceau d'environ 40 x 30 x 20 et un morceau d'environ 35 x 15 x 15
surface	Environ 100 m ² au sol Terrain 330 m ²		
descriptif	<p><u>Soubassement</u> : murs de 42 cm en gros béton de gravier roulé sans armature sur une hauteur de 2,20 m</p> <p><u>Rdc r+1</u> : murs banchés de 40 cm d'épaisseur en béton de mâchefer</p> <p><u>Structure massive</u> murs porteurs de refend en blocs de mâchefer ; planchers houis béton de mâchefer sur solivages en poutrelles acier</p>		
épaisseur mur	40 à 42 cm		



Source : Données cartographiques Google



Sur site avant travaux (2018) © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



chantier démolition (30.03.2019) © Y. André



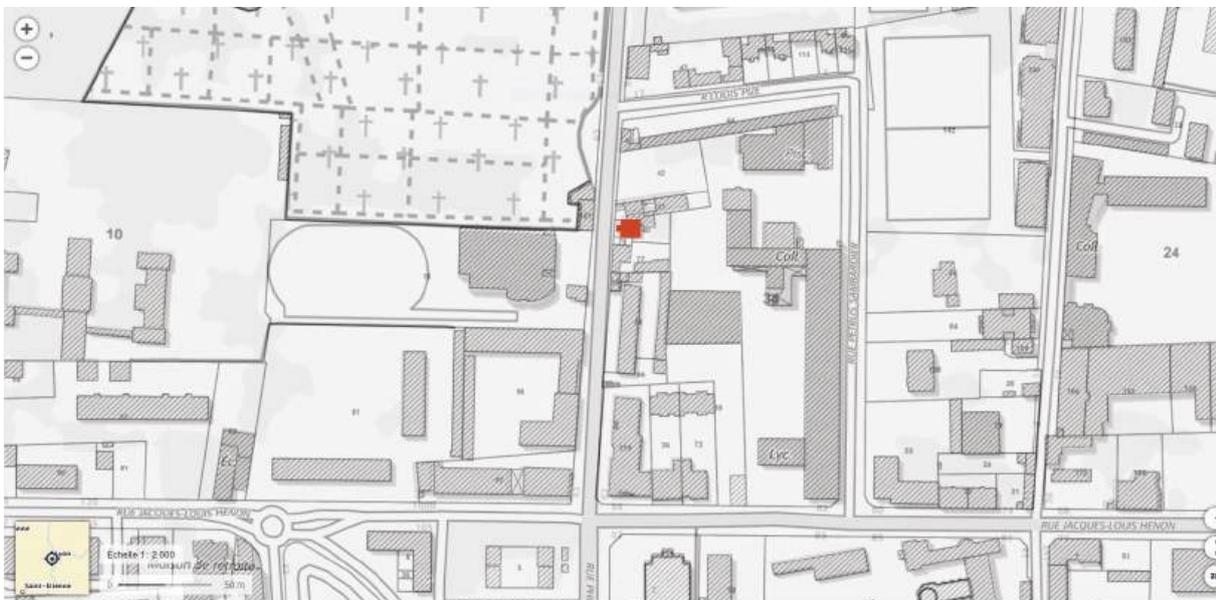
Bloc échantillon prélevé sur site (30.03.2019) © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Vue avant démolition (emplacement de l'ouverture à créer vers la future extension) © Y. André

FICHE ÉCHANTILLON n°03

adresse	80 rue Philippe de Lassalle 69004 LYON	enduit	Enduit chaux taloché 6 mm + finition ciment tyrolienne 2 mm
date construction	1948	observations	Mâchefer avec quelques granulats roulé silico-calcaires 20 mm, petit gravier concassé 2 mm Divers restes végétaux (feuilles, tiges) et aciers (rond 4 mm)
propriétaire	En mutation foncière	divers	Démolition en vue opération promotion immobilière SLC PITANCE. Projet 17 logements "Le Prisme" Démolisseur : CEDDIA TP, Lambert Duplany. Il propose de transmettre les analyses environnementales du labo DMS Démolition 8 échantillons dispo- nibles au CAUE ; environ 45 x 30 cm
type	Pavillon R+1+combles		
surface	Environ 80 m ² au sol		
descriptif	<u>Soubassement</u> : béton de gravier <u>Rdc r+1</u> : mâchefer banché <u>Structure massive</u> murs porteurs mâchefer banché ; planchers solivages bois		
épaisseur mur	45 cm		



Source : Données cartographiques Google



Sur site (30.05.2018) © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



Bloc échantillon prélevés (nov. 2018) © J. Sordoillet, CAUE RM



Bloc échantillon (détail) © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



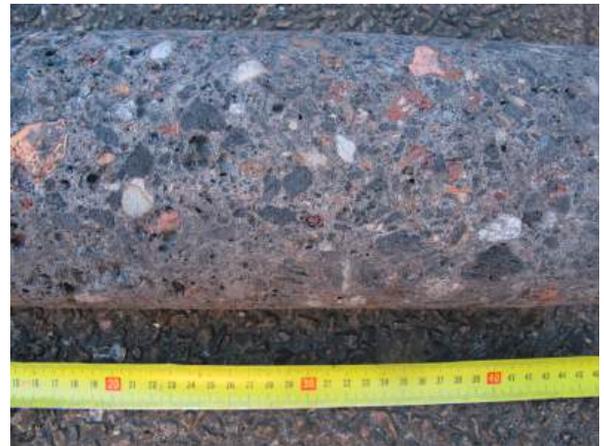
Chantier démolition (30.11.2018) © J. Sordoillet, CAUE Rhône Métropole



GoogleStreetView (2021)



Prélèvements sur site (mars 2021) © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Bloc échantillon (détail) © G. Cluzel, CAUE Rhône Métropole



Vue du chantier et zone de carottage (08.02.2021) © G. Cluzel, CAUE RM



ANNEXES

Fiches de retour d'expérience : cinq opérations de réhabilitation d'habitat en mâchefer en région lyonnaise

Ce recueil relate des expériences de rénovations, architecturale et énergétique, menées sur cinq bâtiments de logements en pisé de mâchefer construits dans l'agglomération lyonnaise entre 1913 et 1956.

Chaque fiche présente une analyse technique et architecturale succincte du projet, le descriptif sommaire des travaux réalisés, ainsi que les consommations énergétiques, avant et après travaux.

Ces retours d'expérience n'ont pas vocation à être des modèles à suivre, mais ils illustrent la capacité de ces édifices à répondre aux enjeux d'aujourd'hui tout en composant avec des contextes patrimoniaux ou urbanistiques exigeants.

MAISON INDIVIDUELLE – BRON (69)

RÉNOVATION ET EXTENSION D'UNE MAISON EN MÂCHEFER

INFORMATIONS GÉNÉRALES	
Localisation	Bron
Type de bâtiment	maison
Surface	177 m ² de surface habitable avec l'extension
type de matériaux	pisé de mâchefer
Construction	1933
PROGRAMME	
Isolation thermique des murs par l'extérieur	ouate de cellulose et fibre de bois
Isolation de combles perdus	ouate soufflée et laine de bois
Changement menuiserie	bois double vitrage
Changement systèmes	VMC double flux + poêle granulé + chauffe-eau thermodynamique
CHANTIER	
Durée	chantier en cours, débuté en octobre 2021
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	
Avant travaux	596 kWh _{ep} /m ² /an
Après travaux	96 kWh _{ep} /m ² /an
COÛTS	
Montant total	165 500 €, dont 115 000 € pour l'extension. ITE : 19 000 € Menuiseries : 24 600 € Isolation plancher bas : 1500 € Poêle à granulé : 5670 € VMC double flux : 7140 € Chauffe-eau thermodynamique : 3780 €
Subventions	27 323 € dont 10 844 € via le dispositif EcoReno'v, 8 479 € via les CEE et 8 000 € via Ma Prime Rénov'
ACTEURS	
MO	BARN architecture F. Genouvrier
BE	Caeli Conseil B. Frézet
Test étanchéité à l'air	ITE infiltrométrie
Entreprises	Isobois, Tout feu Tout Flamme, PCS associés, Solution ventilation

CONTEXTE

État des lieux

Maison de 3 niveaux, mitoyenne sur un côté dans un lotissement construit en 1933. Construite en hauteur elle est assez étroite. La maison comportait une extension maçonnée sur 2 niveaux qui a été démolie et remplacée par une extension en ossature bois sur 3 niveaux.

Choix de conception

Les propriétaires souhaitent améliorer le confort de leur maison, acquise en 2020, tout en réduisant leurs consommations d'énergies. Ils se sont rapprochés de l'ALEC de Lyon pour connaître les solutions techniques envisageables et les aides financières mobilisables pour parvenir à un niveau de performance « BBC Rénovation ». La conception du projet et le suivi des travaux ont été réalisés par un architecte.

Contexte énergétique

La maison étant inhabitée depuis plusieurs années il n'y avait pas de facture d'énergie. Les consommations d'énergies avant et après travaux ont été estimées par le bureau d'études thermiques en utilisant la méthode de calcul de la RT existante globale (ThCE-Ex).

La mesure de perméabilité à l'air de l'enveloppe a permis de démontrer que l'objectif de 1,70 m³/(h.m²) était atteint : $Q_{4Pa-surf} = 0,55 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$.



Façade sur rue avant travaux © O. Charnay



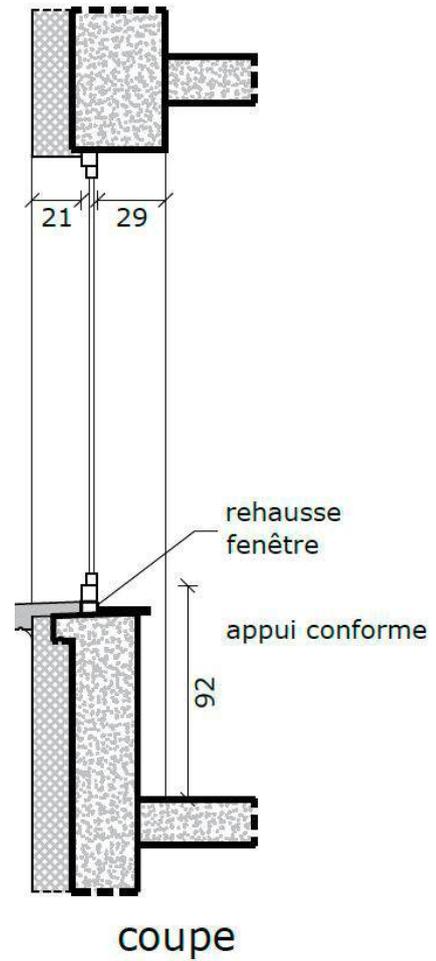
Mise en œuvre de l'ITE © O. Charnay



Projection après travaux © O. Charnay



Emprise extension, vue sur gros-béton du RDC © O. Charnay



Détail de la mise en œuvre de l'ITE © BARN

TRAVAUX

Postes	État avant travaux	Travaux réalisés
Façade existante	Aucune isolation. Le rez-de-chaussée est en gros béton ainsi que les chaînages en angle et en ceinture support de la charpente. Les étages sont en pisé de mâchefer.	Isolation thermique extérieure en ouate de cellulose insufflée dans caissons ép. 120 mm et fibre de bois rigide support d'enduit ép. 40 mm, R total 3,87. Enduit traditionnel en 2 couches et reconstitution des modénatures (liserés bichromie autour des baies).
Façade extension	Ancienne extension en béton démolie.	Création d'une nouvelle extension en ossature bois. Isolation thermique extérieure en ouate ép. 160 mm + fibre de bois ép. 60 mm, R total 5,33
Toiture existante	Toiture à pans avec croupe au niveau du pignon reposant sur un chaînage en béton et un IPN. Tuiles mécaniques plates en terre cuite.	Toiture réhabilitée : reprise tuiles, changement zinguerie, isolation intérieure en ouate soufflée : R = 8
Toiture extension	Ancienne extension démolie	Toiture en pente avec tuiles mécaniques, isolation extérieure en ouate ép. 320 mm + fibre de bois ép. 60 mm, R total 8.
Plafond garage = plancher bas d'une partie du logement	Aucune isolation, plafond en hourdis métallique et remplissage mâchefer.	Isolation intérieure en polyuréthane 68 mm R = 3,15
Plancher bas extension	Ancienne extension démolie	Isolation sous chape : en polyuréthane 68 mm, R = 3,15
Menuiseries	Menuiseries en bois simple vitrage sur jardin et PVC double vitrage sur rue.	Menuiseries bois Double vitrage (bois local) 4/20/4 Uw 1,3 Sw 0,36 + Volets persiennes métalliques à projection

Postes techniques	État avant travaux	Travaux réalisés
Chauffage	Chaudière fioul avec radiateurs en fonte et cheminée à foyer ouvert.	Suppression de la cheminée et de la chaudière. Installation d'un poêle granulé Flamme verte 7* de 8 KW
Ventilation	Aucune ventilation.	VMC double flux autoréglable
Eau chaude sanitaire	Chauffe-eau électrique.	Chauffe-eau thermodynamique _ Monobloc air extérieur _ 270L _ COP (à 7°C) 2,98

BILAN

Les caractéristiques physiques du mâchefer ont bien été intégrées dans cette réalisation en choisissant une isolation thermique extérieure à base de matériaux bio-sourcés. Ce choix a permis de préserver le confort d'été (inertie du mâchefer) en plus des limitations de chauffage.

Durant l'été 2022, la maison est restée fraîche bien que les volets n'aient pas encore été installés.

Nota : installation d'un drain en sous-bassement pour se prémunir des remontées capillaires (présence d'humidité dans la cave avant travaux due à la proximité de la nappe phréatique).

Le bâtiment est situé dans le périmètre d'intérêt patrimonial A1 de la commune. Un premier projet proposé par un précédent cabinet d'architecture n'avait pas intégré l'ensemble des contraintes liées au PLU ce qui a entraîné une perte de temps et obligé le maître d'ouvrage à changer d'architecte. La forme et l'usage de l'extension ont au final été largement guidés par les contraintes réglementaires et patrimoniales.

Nota : la fixation de l'ossature secondaire sur le pisé de mâchefer pour mettre en œuvre l'isolation extérieure a demandé de trouver un système de fixation hors document technique unifié (DTU) qui convienne.

Pour maintenir les ambitions fortes sur ce projet dans l'enveloppe budgétaire, les occupants ont pris en charge une partie des travaux (hors clos-couvert) ce qui n'était pas l'objectif de départ.

MAISON INDIVIDUELLE – LYON 5

RÉNOVATION ET SURÉLÉVATION D'UNE MAISON EN MÂCHEFER

INFORMATIONS GÉNÉRALES	
Localisation	Lyon 5 ^e
Type de bâtiment	maison
Surface	110 m ² de surface habitable après travaux
type de matériaux	pisé de mâchefer
Construction	1930
PROGRAMME	
Isolation thermique des murs par l'extérieur	laine de roche
Isolation toiture	ouate de cellulose et laine de chanvre
Changement menuiserie	bois-alu double vitrage
Changement systèmes	chaudière gaz condensation + VMC simple flux
CHANTIER	
Durée	chantier en cours, débuté en mars 2022, durée prévue 1 an
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	
Avant travaux	380 kWh _{ep} /m ² /an
Après travaux	73 kWh _{ep} /m ² /an
COÛTS	
Montant total	environ 300 000 €
Subventions	7 500 € via le dispositif EcoReno'v, 800 € via les CEE et prêt de 50 000 € à taux 0% via éco-PT
ACTEURS	
MO	Aurélien GELY Architecte
BE thermique	ERMEL Energie
Test étanchéité à l'air	ASTB SAS
Entreprises	Delorme Concept 2D (démolition), Granjon Frères (gros œuvre/maçonnerie), Lofoten (charpente/couverture)

CONTEXTE

État des lieux

Maison individuelle d'un niveau (combles non aménageables) sur garage, dans un lotissement construit à partir des années 1930. Cette maison est typique de ces années : lignes simples, croupe de toit, RdC surélevé, etc. La maison comportait des dépendances côté jardin qui ont été démolies. La surface habitable initiale était de 63 m².

Choix de conception

Les propriétaires souhaitaient agrandir et améliorer le confort de leur maison. Plusieurs possibilités s'offraient à eux : démolir et reconstruire une maison neuve ; ajouter une extension côté rue ; ou enfin ajouter un étage. Soucieux d'intégrer au mieux le projet dans son environnement et pour bénéficier d'un maximum de lumière, les propriétaires ont fait le choix d'agrandir la maison par le biais d'une surélévation. La conception du projet et le suivi des travaux ont été réalisés par un architecte.

Contexte énergétique

Les consommations d'énergies avant et après travaux ont été estimées par le bureau d'études thermiques en utilisant la méthode de calcul de la RT existante globale (ThCE-Ex).

La mesure de perméabilité à l'air de l'enveloppe a permis de démontrer que l'objectif de 0,60 m³/(h.m²) était atteint : $Q_{4Pa-surf} = 0,29 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$.



Façade sur rue avant travaux © A. Gély



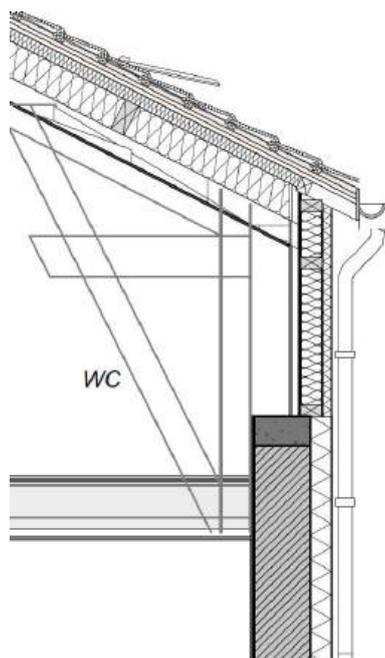
Arase mâchefer après démolition des combles © A. Gély



Projection après travaux © A. Gély



Mise en place des fers pour ceinture béton support surélévation © A. Gély



Détail en coupe de la surélévation © A. Gély



Mise en place des fers pour ceinture béton support surélévation © A. Gély

TRAVAUX

Postes	État avant travaux	Travaux réalisés
Façade existante	Aucune isolation. Le rez-de-chaussée est en gros béton et les étages sont en pisé de mâchefer de 40 cm d'épaisseur.	Isolation thermique extérieure en laine de roche ép. 140 mm, R= 4. Enduit organo-minéral fin ép. < 10 mm.
Façade surélévation	Combles perdus.	Création d'une surélévation en ossature bois. Les anciens combles ont été supprimés et les murs arasés juste au-dessus du plancher haut. Une ceinture en béton d'une vingtaine de cm et de l'épaisseur des murs a été ajoutée afin de supporter la surélévation. Isolation thermique extérieure en ouate de cellulose ép. 140 mm, R = 3,5. Le dimensionnement de la ceinture béton et de la charpente ont été faits par l'entreprise de charpente.
Toiture	Toiture à pans avec croupe au niveau du pignon reposant sur un chaînage en béton et un IPN. Tuiles mécaniques plates en terre cuite.	Charpente traditionnelle, la nouvelle ferme repose sous la ceinture béton, dans des encarts béton spécialement réalisés dans le mâchefer. Ce choix technique a été motivé pour optimiser l'utilisation de l'échafaudage. Isolation intérieure en ouate de cellulose entre pannes de chevrons ép. 40 cm + complément panneaux laine de chanvre ép. 30 mm. R total = 9,3. L'escalier qui mène à l'étage de la surélévation est suspendu à la charpente pour éviter le report de charge sur les planchers.
Plancher bas	Aucune isolation, plafond en poutrelles métalliques et hourdis béton avec remplissage mâchefer.	Plancher conservé, isolant polyuréthane sous chape ép. 30 mm, R = 1,3 + isolant en sous face en fibre de bois ép. 80mm R = 1,9.
Menuiseries	Menuiseries en bois simple vitrage.	Modification de la taille des ouvertures existantes. Menuiseries bois-alu double vitrage 4/16/4 Uw = 1,3 W/m ² .K avec entrées d'air + brises soleil orientables. Des lambrequins en aluminium seront ajoutés par la suite.

Postes techniques	État avant travaux	Travaux réalisés
Chauffage	Chaudière gaz avec radiateurs en fonte sans vanne thermostatique.	Remplacement de la chaudière par une chaudière gaz condensation. Plancher chauffant au 1 ^{er} étage et radiateurs au 2 nd étage.
Ventilation	Aucune ventilation.	VMC simple flux
Eau chaude sanitaire	Eau chaude sanitaire produite par ballon électrique.	Eau chaude sanitaire produite par la chaudière gaz condensation

BILAN

Les caractéristiques physiques du pisé de mâchefer ont bien été prises en compte avec l'ajout d'une ceinture béton permettant de supporter le poids de la surélévation.

Le choix de la surélévation a permis de respecter la typologie des pavillons qui composent l'environnement de la maison. La bichromie de la façade a été restituée : bandeaux et tour des baies de couleur plus claire. Les protections solaires sont des BSO associés à des lambrequins rappelant les jalousies lyonnaises.

Une terrasse en platelage bois sur un structure acier indépendante est prévue côté jardin dans le prolongement de la salle à manger.

Le bâtiment est situé dans le périmètre d'intérêt patrimonial, zone UR1c de la commune. La construction d'une nouvelle toiture aurait pu permettre de créer des débords de toiture plus importants, similaires aux maisons environnantes. Par ailleurs, le choix d'un enduit fin organique en façade interroge.

Nota : la fixation de l'ossature secondaire sur le pisé de mâchefer pour mettre en œuvre l'isolation extérieure a nécessité des tests d'arrachement. Les fixations préconisées de grande longueur (215 mm) ont été implantées avec une grande densité du fait de l'hétérogénéité du matériau.

RÉSIDENTIE SOCIALE, VILLEURBANNE RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE D'UNE RÉSIDENCE EN MÂCHEFER

INFORMATIONS GÉNÉRALES	
Localisation	Villeurbanne quartier Ferrandière-Maisons Neuves
Type de bâtiment	résidentiel collectif social composé de 3 bâtiments et 111 logements
Surface	8078 m ² de surface habitable
type de matériaux	pisé de mâchefer, gros béton pour les planchers, les chaînages, le soubassement et le RDC
Construction	1955
PROGRAMME	
Isolation thermique extérieur	en polystyrène au niveau du RDC et en laine de roche au niveau des étages supérieurs
Objectif	-37% de consommation de chauffage
CHANTIER	
Durée	les travaux ont duré 2 ans et demi. Il y a eu entre 7 et 8 mois de perdus à cause de l'épidémie. Travaux terminés en avril 2021
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	
Avant travaux	182,6 kWh _{ep} /m ² /an
Après travaux	123,5 kWh _{ep} /m ² /an
COÛTS	
Montant total	34 000 € TTC par logement
Subventions	CEE
ACTEURS	
MOA	Alliade habitat
MO	Atelier d'architecture Paris & Associés

CONTEXTE

État des lieux

La résidence est composée de 3 bâtiments qui constituent un îlot semi-ouvert autour d'un vaste espace central paysagé. La parcelle est non close ce qui ne permet pas de distinguer l'espace public de l'espace privé. L'architecture est séquencée avec une partie haute en R+9 et 2 bâtiments en R+3. Les balcons du bâtiment en R+9 et d'un bâtiment en R+3 encadrent les cages d'escaliers. Le rez-de-chaussée des bâtiments donnant sur l'avenue comporte des commerces.

Choix de conception

La particularité de ce programme est qu'il s'intéresse au « mieux-vivre » des habitants sur la plupart de ses composantes :

- le changement d'image, lié à la rénovation de l'enveloppe et à la revalorisation des parties communes (redimensionnement des halls, escaliers, paliers d'étages) accueillantes, claires, sécurisées et remises aux normes ;
- l'amélioration du confort des logements, grâce à l'isolation thermique (façades, planchers bas, portes palières) ;
- la requalification des espaces extérieurs (espaces de services, stationnement, éclairage, espaces végétalisés et de détente/promenade) avec mise aux normes accessibilité ;
- accès PMR aux 4 logements du RDC d'un bâtiment en R+3.

Contexte énergétique

Audit énergétique global avant travaux. Choix de rénover les parties collectives de la résidence. Le bâtiment a été labellisé BBC rénovation.



Emprise de la résidence. Vue de l'ilot paysagé. Source : Google



Vue sur rue bâtiment R+3 © Cerema



Immeuble R+9, SAS et nouvelle verrière © Cerema



Zoom nouvelle verrière © Cerema

TRAVAUX

Postes	État avant travaux	Travaux réalisés
Façades à partir du R+2	Façades en mâchefer. L'épaisseur du mâchefer diminue dans les étages les plus élevés. Chaînages en béton armé. Les cages d'escalier sont éclairées par des claustras en béton. Les pignons aveugles ont été isolés en 2007, lors du ravalement de façade, par un complexe polystyrène + enduit RPE de 82 mm d'épaisseur au total.	Isolation par l'extérieur en laine de roche de 16 cm recouverte de 2 cm d'enduit à la chaux. Au niveau de la cage d'escalier, suppression du claustra en béton et mise en place d'une verrière avec double vitrage, profils à rupture de pont thermique. Ajout de SAS devant les entrées pour agrandir les halls et améliorer l'adressage.
Planchers	Planchers en béton.	Aucune intervention sur les étages. Isolation par flocage (R=3) en sous-face du plancher bas du rez-de-chaussée.
Toiture	Toiture terrasse en béton. Travaux d'étanchéité des toitures en 2015, isolant polyuréthane d'épaisseur 120 mm.	Reprise de la couverture en béton sur la périphérie des toitures. Les acrotères étant isolés sur leur face extérieure uniquement.
Menuiseries	Menuiseries remplacées en 2007 par des menuiseries PVC double vitrage 4/18/4 équipées de volets roulants.	Révision des menuiseries : reprise des mécanismes, des joints et du jeu. Ajout de stores bannes aux derniers étages et chez les commerçants. Reconstitution des appuis de fenêtre en béton fibré.
Soubassement et RDC	En béton	Isolation par l'extérieur en polystyrène expansé recouvert de briques.
Portes palières	Portes palières « sans-soucis » datant de 1985.	Nouvelles portes respectant la réglementation thermique ($U_d < 1.8 \text{ W/m}^2\text{°C}$), phonique et incendie. Ajout de portes coupe-feu transparentes à chaque étage du bâtiment en R+9

Postes techniques	État avant travaux	Travaux réalisés
Chauffage	Chaufferie commune équipée de 2 chaudières. Une chaudière gaz condensation et une chaudière basse température de secours.	Calorifugeage des réseaux de chauffage.
ECS	ECS individuelle au gaz + quelques ballons électriques pour les studios.	Remplacement de 30 chauffe-eaux gaz par des chauffe-eaux gaz à condensation.
Ventilation	VMC simple flux autoréglable	Ventilation basse pression hygro-réglable. Les bouches d'extraction, les entrées d'air et les caissons VMC ont été remplacés.

BILAN

Afin de préserver les qualités intrinsèques du mâchefer, le maître d'œuvre a mis en place une isolation à base de matériaux perspirants.

Le projet d'isolation thermique par l'extérieur cherche à préserver l'intégrité architecturale de la résidence : reconstitution des appuis filants en béton fibré, restitution des trumeaux en creux, travail sur un soubassement minéral robuste (brique) et maintien de l'effet claustra sur les cages d'escaliers.

RÉSIDENTE COLLECTIVE EN COPROPRIÉTÉ – LYON 3 RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE D'UN IMMEUBLE EN MÂCHEFER

INFORMATIONS GÉNÉRALES	
Localisation	Lyon 3 ^e – quartier Montchat
Type de bâtiment	immeuble d'habitation de 6 lots en copropriété regroupés en 4 appartements
Surface	325 m ² de surface habitable
type de matériaux	pisé de mâchefer, gros béton pour les planchers et chaînages et béton de gros graviers pour le soubassement
Construction	1955
PROGRAMME	
Isolation thermique extérieur	en fibre de bois
Isolation des combles par l'extérieur	sarking en fibre de bois
Objectif	-37% de consommation de chauffage
CHANTIER	
Durée	les travaux ont débuté au printemps 2020 et à cause de l'épidémie ont été plus longs que prévu
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	
Avant travaux	272 kWh _{ep} /m ² /an
Après travaux	153 kWh _{ep} /m ² /an
COÛTS	
Montant total	130 000 € TTC, dont 72 000 € pour l'isolation des murs, 47 000 € pour les travaux de toiture et 11 000 € pour l'ingénierie
Subventions	environ 25 000 € via le dispositif EcoReno'v et les CEE
ACTEURS	
MOA délégué	Lyon Régie
MO	Airial Architectures
Entreprise	Boule Fils

CONTEXTE

État des lieux

Bâtiment mitoyen, toiture à 3 pans (pignon à l'Est). Façade Nord sur rue. Ornaments : verrière et marquage de l'entrée par motif de façade. Façade Sud côté jardin, avec balcons filants et une terrasse avec escalier au rez-de-chaussée.

Façade Ouest aveugle et face Est mitoyenne avec une maison et un mur.

Les balcons présentent des épaufrures, et les garde-corps des points de rouille.

La façade fait l'objet d'une injonction de ravalement.

Contraintes et choix de conception

Au Sud : balcons filants de 90 cm de large et larges baies vitrées

À l'Est : mur mitoyen sur 50% de sa surface. Aucune isolation pour ces 2 façades.

Contexte énergétique

Audit énergétique global avant travaux. Choix de rénover les parties collectives de la copropriété.



Façade Nord, avant travaux © Aerial



Façade Nord, après travaux © Aerial



Façade Sud, pendant travaux © Aerial



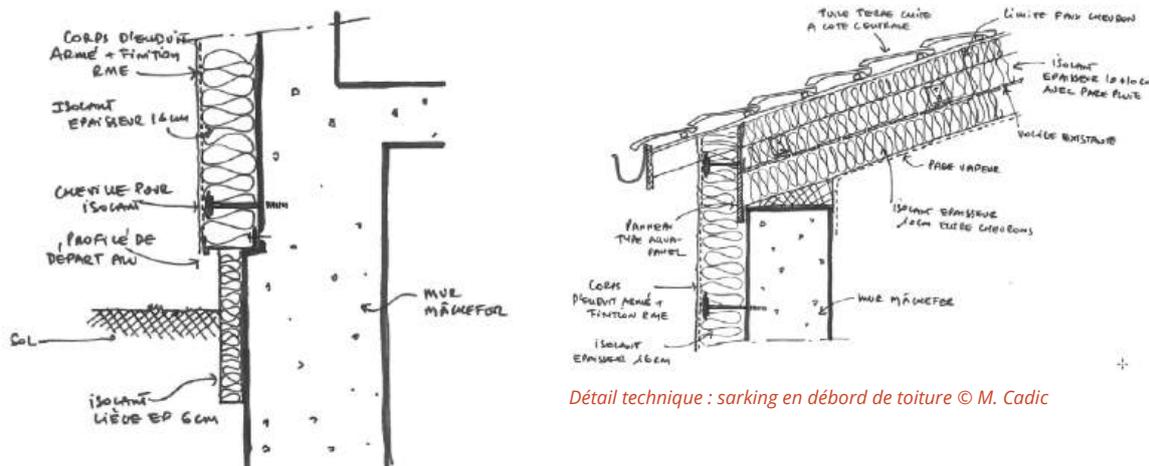
Façade Sud, après travaux © Aerial

TRAVAUX

Postes	État avant travaux	Travaux réalisés
Façades	Façades en mâchefer de 40 cm d'épaisseur, enduit ciment, petites fissures. Chaînages en béton armé.	Isolation par l'extérieur des façades Nord et Ouest en fibre de bois de 16 cm recouverte de 2 cm d'enduit à la chaux ($R = 4,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)
Plancher bas	Plancher en béton, isolé au niveau d'un logement du RDC. La cage d'escalier n'est pas isolée.	Aucune intervention
Toiture	Charpente d'origine, excellent état. Couverture tuiles mécaniques plates en fin de vie et zinguerie à refaire.	Isolation mixte : 10 cm de laine de bois entre chevrons et 22 cm de fibre de bois en sarking ($R = 7,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$). Anciens chevrons arrasés au nu de la façade pour que l'épaisseur de l'ITE ne soit pas visible. Nouveaux "faux chevrons" mis en place en débord de toiture.
Menuiseries	Menuiseries remplacées en 2015 par des menuiseries bois double vitrage 4/16/4 Fe ($U_w = 1,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)	Appuis de fenêtres recréés et barres d'appui refixées pour garder le même recul
Soubassement	En béton de gros gravier pour éviter les remontées capillaires.	

Postes techniques	État avant travaux	Travaux réalisés
Chauffage	Chauffage individuel gaz installé en 2015	Aucune intervention
Ventilation	Ventilation mécanique contrôlée collective installée en 2015	Déplacement du bloc VMC lors de l'aménagement des combles

DÉTAILS DE POSE



Détail technique : sarking en débord de toiture © M. Cadic

Détail technique : isolation du soubassement © M. Cadic

BILAN

Le ressenti du confort des habitants de l'immeuble est très positif, (suppression des courants d'air froid dans les habitations, confort d'été agréable même dans les combles aménagés).

Le projet a fait l'objet de compromis pour limiter le coût d'investissement. La rénovation aurait pu atteindre le niveau BBC avec la mise en place de chaudières gaz à condensation (10%), l'isolation de la façade sud (9%), l'isolation de la cage d'escalier (non évaluée), l'isolation complète du plancher bas (7%) et le remplacement des menuiseries du dernier logement (3%).

RÉSIDENCE SOCIALE – LYON 2 RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE

INFORMATIONS GÉNÉRALES	
Localisation	Lyon Confluence
Type de bâtiment	ensemble d'immeubles d'habitation de 150 logements
Surface	10 000 m ² de surface habitable
type de matériaux	fondations et RDC en béton de gravier et élévations en pisé de mâchefer.
Construction	de 1913 à 1930
PROGRAMME	
Isolation des murs pignons par l'extérieur	isolant minéral en verre cellulaire
Isolation des combles par l'intérieur	laine de roche
Objectif	BBC rénovation
CHANTIER	
Durée	2 ans de 2018 à 2020
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	
Avant travaux	455 kWh _{ep} /m ² /an
Après travaux	92,2 kWh _{ep} /m ² /an
COÛTS	
Montant total	5,12 Millions € HT, dont 512 500 € pour l'isolation des murs, 92 000 € pour l'isolation en toiture et 1,17 millions € pour les menuiseries
Subventions	environ 742 000 € via le dispositif EcoReno'v et 450 000 € via la Commission Européenne
ACTEURS	
MOA	Société Régionale d'HLM de Lyon
MO	Jacky Suchail architecture
Entreprise	Bouygues Bâtiment Sud-Est
Assistance maîtrise d'usage	Vie to B
Consultant en ingénierie du patrimoine	D2P
BE structures et fluides	Matté

CONTEXTE

État des lieux

La cité Mignot est l'un des tout premiers ensembles hygiénistes construits à Lyon. Elle est inscrite à l'inventaire du patrimoine de la ville de Lyon. L'ensemble est formé de trois modules en H et reprend le principe de la cour ouverte. Chaque module est formé de 3 corps de bâtiments. De larges espaces permettent l'ensoleillement et l'aération de toutes les façades.

Choix de conception

L'objectif de cette rénovation et de concilier performance énergétique, amélioration du confort des habitants et mise en valeur de ce patrimoine historique.

Contexte énergétique

Audit énergétique global avant travaux. Bâtiments labellisés BBC rénovation et Horizon 2020.



Cité Mignot avant travaux © Bouygues



Cité Mignot avant travaux © Bouygues



Cité Mignot après travaux © Google



Cité Mignot après travaux © Google

TRAVAUX

Postes	État avant travaux	Travaux réalisés
Façades	Le rez-de-chaussée est en béton de gravier, et les élévations en mâchefer. L'épaisseur des murs diminue dans les étages élevés. Les façades sont enduites, elles portent un décor géométrique réalisé en crépi sur les premiers bâtiments, puis peint sur les suivants. Ce décor est à conserver et rénover.	Isolation intérieure en polystyrène expansé TH35 ép. 12 cm pour le rez-de-chaussée. Les autres étages sont uniquement enduits à la chaux. Façades pignons : ITE par un isolant minéral de verre cellulaire (STDB Therm composé à 50% de chaux et 50% de silice), ép. 6 cm (R=1.58 m ² .K/W). Rénovation des frises décoratives de type art déco réalisée en enduit gris clair gratté contrastant avec l'enduit blanc lisse de la façade.
Soubassement	Soubassement en béton de gravier.	Aucune intervention.
Plancher bas	Une partie est en voutains de brique (immeubles 1913-1914) et l'autre en béton (immeubles 1930). Absence d'isolant	Isolation en sous-dalle, flocage en fibre minérale ($\lambda = 0.046$ W/m.k) de 14 cm d'ép.
Planchers intermédiaires	Planchers en béton	Aucune intervention.
Toiture	Absence d'isolant, couverture en tuiles mécaniques.	Mise en œuvre d'une couverture en tuile (Montchanin Losangée) conforme à la demande de l'étude patrimoniale. Isolation sous comble en laine de roche ($\lambda = 0.04$ W/m.k) de 34 cm d'ép.
Menuiseries	Les menuiseries d'origine étaient en bois, elles ont été progressivement remplacées par des fenêtres PVC double vitrage. Résultat hétérogène en façade.	Remplacement des menuiseries par des menuiseries en bois double vitrage $U_w = 1.3$ W/m ² .K

Postes techniques	État avant travaux	Travaux réalisés
Chauffage	Chauffage individuel électrique.	Raccordement au chauffage urbain. Taux ENR : 60 %. Mise en place de radiateurs à eau avec robinets thermostatiques
Ventilation	Ventilation naturelle	Mise en place d'une ventilation mécanique simple flux avec entrées d'air et bouches d'extraction hygro-réglable A.
Eau chaude sanitaire	Chauffe-eau individuel électrique	Raccordement au chauffage urbain. Taux ENR : 60 %

BILAN

Le choix de conserver les décors à forte valeur patrimoniale en façade et des caractéristiques thermiques intrinsèques du mâchefer (inertie, perspiration) a guidé le projet.

La mise en place d'un suivi des consommations énergétiques a permis de mesurer la qualité des travaux de rénovation et proposer un outil de suivi efficient aux occupants et au syndicat de copropriété.

Enfin, le choix de n'intervenir que 4 jours par appartement a permis de minimiser l'impact des travaux sur les résidents.

Les travaux de rénovation énergétique se sont concentrés sur l'amélioration de la performance des surfaces vitrées et sur le changement des systèmes de ventilation et de chauffage. Le gain de 76 % est essentiellement dû au raccordement au réseau de chaleur urbain.

BIBLIOGRAPHIE

- AVENIER, Cédric, ROSIER, Bruno, SOMMAIN, Denis. *Ciment naturel*. Glénat, 2007. 176 p.
- BOURDEIX, Pierre. *Des avantages de l'adoption du système Lyonnais de construction en béton dit de mâchefer*. Extrait de *l'Ingénieur Constructeur*, mai-juillet 1918
- BIGORGNE, Julien. *La réhabilitation des habitations à bon marché (h.b.m.) – Vers une évolution "durable" – Cahier 2 : les évolutions techniques*. Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR), 2019. 52 p.
- CAMUS, B, ROJAT, F, RUL, G, *Mâchefer de construction – Essais en laboratoire*. CEREMA Centre-Est, 2018
- CHATEAU, Théodore. *Technologies du bâtiment ou étude complète des matériaux de toute espèce employés dans les constructions depuis leur fondation jusques et y compris leur décoration*. 2^e ed. Paris : Société Centrale des Architectes. Vol. 1^{er}, 1880. 850 p.
- CLUZEL, Grégory (Dir.), *Mise en valeur et modernisation des Cités lyonnaises d'HBM : l'exemple des cités d'Habitation à Bon Marché de Grand Lyon Habitat*. CAUE Rhône Métropole, 2019. 188 p.
- COIGNET, François. *Exposition Universelle. Constructions économiques en béton pisé par M. François Coignet. Extrait du Journal l'Ingénieur*. Bureau du journal, 1^{er} novembre 1855. 11 p.
- COIGNET, François. *Des Bétons agglomérés appliqués à l'art de construire. Mémoire adressé à la commission des arts insalubres de l'Académie des sciences*. Paris : E. Lacroix, 1861. 378 p.
- COLLINS, Peter. *Splendeur du béton : les prédécesseurs et l'œuvre d'Auguste Perret*. Édition Hazan, 1995. 576 p.
- COURGEY, Samuel, OLIVA Jean-Pierre. *L'isolation thermique écologique. Conception, matériaux, mise en œuvre – Neuf et réhabilitation*. 3^e ed. 20 Terre vivante, 2023. 256 p. (Techniques de pro).
- FAURE. *Résumé des procès-verbaux des séances pendant l'année 1856. Rapport de M. Faure, séance du 1^{er} février 1856. Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des Ingénieurs Civils*, 1856.
- FLEURY, François, BARIDON, Laurent, MASTRORILLI, Antonella & AL. *Les temps de la construction. Processus, acteurs, matériaux*. Picard, 2016. 1312 p. (Architectures contemporaines – Études).
- FREDET, Jacques. *Types courants de l'architecture mineure parisienne De la fin de l'époque médiévale à nos jours avec l'anatomie de leur construction*. Éditions de la Villette, 2020. 800 p.
- GAGES, Patrice. *L'Avenir, entreprise coopérative : 70 ans de l'histoire d'une métropole : 70 ans d'architecture*. Mardaga, 1989. 184 p.
- GARNIER, Tony. *Les Grands travaux de la ville de Lyon : études, projets et travaux exécutés (hôpitaux, écoles, postes, abattoirs, habitations en commun, stade, etc.)*. Massin, 1921. 56 planches.
- GENESTIER, Philippe (Dir.), GRAS, Pierre (Dir.). *Sacré béton ! Fabrique et légende d'un matériau du futur*. Éditions Libel, 2015. 208 p.
- LOUVIER, Antonin. *Emploi des scories de houille. Annales de la Société académique d'architecture de Lyon*, vol. 8, 1883, p. 44-45.
- MARCOT, Christian. *Architecture contemporaine en site historique – 6 sites lyonnais en débat*. Certu, 2009. 223 p. (Dossiers du Certu).
- OCHANDANIO, Jean Luc. *Lyon, un chantier Limousin, Les maçons migrants (1848 – 1940)*. Éditions Lieux Dits, 2011. 264 p.
- RICHAUD, Gilbert. *De François Coignet à Tony Garnier : Le pisé de mâchefer un matériau oublié de l'ère industrielle*. Dans *Archives et architecture, Mélange en mémoire de François Régis Cottin*. Société d'histoire de Lyon, 2015. p. 403-430.
- RIEUX, Etienne. *Le mâchefer, matériau du bâti ancien*. Oïkos, 2021. 51 p.
- SANDT, Nathalie. *Rénover le pavillon des trente glorieuses en région Lyonnaise*. CAUE Rhône Métropole, 2018. 114 p.

VILLEMOT, Etienne. *Grand Lyon Habitat. Étude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer : volet thermique, hygrothermique et énergétique – étude comparative des réhabilitations et méthodologies*. Amstein+Walthert, 2019.

Le logement populaire à Lyon et sa région Tome 1 1890-1920. Bulletin n°22. Société Académique d'Architecture de Lyon, 2015. 138 p.

Le logement populaire à Lyon et sa région Tome 2 1820-1924. Bulletin n°23. Société Académique d'Architecture de Lyon, 2017. 283 p.

Du logement à Lyon et ses environs 1940-1960. Bulletin n°24. Société Académique d'Architecture de Lyon, 2020. 102 p.

Mémoire

AULAS, Mathilde. *Les matériaux de construction peuvent-ils être patrimoine ? L'exemple des premiers bétons pour la cité des Etats-Unis de Tony Garnier* – Mémoire d'études dirigé par Nathalie Mathian et Gilbert Richaud. Master II Pro Patrimoine architectural et urbain de l'époque médiévale à l'époque contemporaine. Université Lyon II Lumière (2014-2015), 144 p.

Articles de revues

Collectif. Les Maçons de la Creuse. *Bulletin de liaison*. Juin 2010. N° 14, 80 p.

BERTHIER, Stéphane. Rénovation énergétique des bâtiments du XX^e siècle : À quoi servent les architectes ? *D'architecture*. Mai 2021. N°289, p. 57.

COURGEY, Samuel. Quand il faut isoler la maison ancienne. *Maison Paysanne de France*. Mars 2019. N°211, p. 11.

DREVON, Jean François. Énergétique du patrimoine. *D'architecture*. Avril 2012. N°207. p. 33

FEINE, Louis. Les matériaux nouveaux utilisables pour la construction de nos habitations. *L'illustration*. 30 mars 1929. N°4491 La maison.

LEMPEREUR, Hubert. Une brève histoire de l'isolation. Septembre 2016 – Octobre 2017. *D'architecture*. N°247-257.

RICHAUD, Gilbert. Du règlement sanitaire au plan d'extension : les origines du logement social public à Lyon (1900-1920), Le logement populaire à Lyon et sa région 1890-1940, tome 1. 1890-1920. *Bulletin de la Société Académique d'Architecture de Lyon*. Février 2015. N° 22. p. 98-137. (voir p. 102-108).

Internet

ATHEBA, Maisons Paysannes de France. *Connaissance du bâti ancien. Fiche Comprendre son comportement hygrométrique*. Juin 2010. [en ligne]. Disponible sur : <https://maisons-paysannes.org/restaurer-et-construire/fiches-conseils/>

Association Arcanne. *Base de données matériaux*. 2021. [en ligne]. Disponible sur : <https://associationarcanne.files.wordpress.com/2021/04/bdd-materiaux-courgey-oliva-2021-04.pdf>

CLIMAXION, Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien. Synthèse bibliographique pour la rénovation performante à destination des concepteurs et artisans, 2017

Enertech pour Oktave et le programme Climaxion de la Région Grand Est et de l'Ademe. 2017. [en ligne]. Disponible sur : https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/modules/catalogue/pdf/45/171221_Etude%20humidite%20b%C3%A2ti%20ancien_vfinale.pdf

PARTIE 1	APPRÉHENDER LES QUALITÉS DU BÂTI EN PISÉ DE MÂCHEFER	15
	Éléments de caractérisation en région lyonnaise	
1	CARACTÉRISATION ARCHITECTURALE DU BÂTI	16
1.1	HÉRITAGES ET IDENTITÉ DU MÂCHEFER DE CONSTRUCTION	16
1.1.1.	Aux origines	16
	– L'économie locale du charbon et de l'acier	16
	– Un instigateur lyonnais	16
1.1.2.	Des ingrédients hétéroclites	17
1.1.3.	Une technique ancestrale et rudimentaire	17
1.1.4.	Un mode constructif traditionnel	19
	– Les murs	19
	– Les planchers	19
1.1.5.	Des atouts manifestes	20
	– Un matériau économique	20
	– Une rationalité constructive	20
	– Des propriétés empiriques notoires	20
1.1.6.	Des modèles de typologies emblématiques	22
1.1.7.	Des réalisations entre tradition artisanale et modernité pré-industrielle	26
1.1.8.	Un matériau support d'expressions stylistiques variées	27
1.2	UN BÂTI ANCIEN DU XX^e SIÈCLE	32
1.2.1.	Le mâchefer dans la classification chronologique du bâti	32
1.2.2.	Une frugalité constructive	33
	– Compacité et ventilation naturelle	33
	– Logiques de réemploi	33
	– Air, lumière et soleil	33
	– Évolutivité et résilience	35
	– Régulation passive	35
1.3	DIMENSION PATRIMONIALE DU BÂTI EN MÂCHEFER	36
1.3.1.	Une culture constructive	36
1.3.2.	Une patrimoine matériel en héritage	39
2	CARACTÉRISATION PHYSIQUE DU MATÉRIAU	43
2.1	CONTEXTE DE LA CAMPAGNE DE MESURES	43
2.1.1.	Objectifs	43
2.1.2.	Origines des prélèvements	44
2.1.3.	Avertissement	44
2.2	ASPECT ET COMPOSITION	46
2.2.1.	Spécifications d'aspect	46
2.2.2.	Composition du matériau	46

2.3. NATURE PHYSICO-CHIMIQUE ET TOXICITÉ	46
2.4. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET COMPORTEMENTS MÉCANIQUES	48
2.4.1. Masse volumique	48
2.4.2. Porosité	49
2.4.3. Résistance à la compression	49
2.4.4. Résistance à l'arrachement	50
2.4.5. Notions de tenue au feu	51
2.4.6. Comportement au gel-dégel	52
2.5. CARACTÉRISTIQUES ET COMPORTEMENTS HYGROTHERMIQUES	52
2.5.1. Conductivité thermique	53
2.5.2. Diffusivité thermique	53
2.5.3. Capacité thermique volumique sèche	55
2.5.4. Inertie thermique	55
2.6. COMPORTEMENT À L'HUMIDITÉ	55
2.6.1. Capillarité et absorptivité liquide	55
2.6.2. Propriétés hygroscopiques	55
2.6.3. Résistance à la diffusion de vapeur d'eau	56
2.7. CARACTÉRISTIQUES ET COMPORTEMENTS ACOUSTIQUES	58
2.7.1. Absorption acoustique	59
2.7.2. Affaiblissement acoustique	59
2.7.3. Évaluation des performances acoustiques des parois	59
– Cas de l'isolement intérieur entre locaux	59
– Cas de l'isolement aux bruits extérieurs	59

PARTIE 2 AGIR SUR LE BÂTI EN PISÉ DE MÂCHEFER **63**

Stratégies d'intervention sur le bâti

1. COMPRENDRE AVANT D'AGIR	67
1.1. LE DIAGNOSTIC PATRIMONIAL	67
1.2. LE DIAGNOSTIC TECHNIQUE PRÉALABLE	68
1.3. LE DIAGNOSTIC ÉNERGÉTIQUE	71
– Des modes d'évaluation à consolider	72
– Des objectifs de performance à hiérarchiser dans une vision d'ensemble	75
1.4. LES PRINCIPALES PATHOLOGIES OBSERVÉES	75
1.4.1. Les pathologies liées à l'humidité	76
1.4.2. Les pathologies structurelles	76
2. ENTRETENIR LA FAÇADE	79
2.1. LA GESTION DE L'HUMIDITÉ	79

2.1.1. Traiter les remontées capillaires	79
2.1.2. Assurer la ventilation du logement	80
2.2. LES TRAVAUX DE RAVALEMENT	81
2.2.1. Choix des produits de façade	81
2.2.2. Qualité des enduits	84
2.2.3. Purge des anciens épidermes	85
2.2.4. Décors, modénatures et finitions	86
3. TRANSFORMER L'HABITAT EN MÂCHEFER	91
3.1. RECOMPOSER LA FAÇADE	91
3.2. AGRANDIR, RESTRUCTURER, AMÉLIORER	93
– Points de vigilances architecturales	93
– Points de vigilances techniques	93
– Points de vigilances acoustiques	94
3.3. DÉCONSTRUIRE PARTIELLEMENT ET RÉEMPLOYER	95
4. OPTIMISER LES QUALITÉS THERMIQUES DE L'ENVELOPPE	97
4.1. ADOPTER UNE LOGIQUE PROPRE AU BÂTI ANCIEN	97
4.1.1. Relativiser la part des murs dans les déperditions thermiques	97
4.1.2. Prioriser les travaux d'isolation en toiture	98
4.1.3. Relativiser la problématique des ponts thermiques	99
4.1.4. Faire une utilisation éclairée des outils de calculs	100
4.1.5. Améliorer l'étanchéité à l'air et optimiser la ventilation	103
4.1.6. Veiller à l'humidité dans les parois	105
4.2. ISOLATION ET CONFORT THERMIQUE : TROUVER LE JUSTE ÉQUILIBRE	105
4.2.1. Identifier et traiter les sources d'inconfort	105
– Valoriser l'inertie du matériau	106
– Recourir aux protections solaires systématiques	107
– Adapter les usages aux ambiances	107
– Agir sur le rayonnement et l'effusivité des parois	108
4.2.2. L'hypothèse de l'ITI dans l'habitat en mâchefer	108
4.2.3. Le ravalement thermique (ITE, ECT)	111
– Les dispositifs d'ITE adaptés au mâchefer	112
– Le choix des isolants (ITE)	112
– L'alternative des enduits correcteurs thermiques ou « thermo-isolants »	116
5. QUELLES STRATÉGIES D'INTERVENTION POUR L'AMÉLIORATION THERMIQUE DU BÂTI EN MÂCHEFER ?	122
5.1. RECHERCHER UN COMPROMIS PATRIMOINE/ÉNERGIE PAR L'EMPLOI DE SOLUTIONS MIXTES	122
5.1.1. Des approches sur-mesure plutôt que des recettes à appliquer	122
5.1.2. Isolation thermique extérieure des façades-pignons	122

5.1.3 Isolation thermique extérieure des « façades-arrières »	123
5.1.4 Isolation thermique extérieure des façades principales : postures assumées et partis pris architecturaux	123
5.2 LEVER LES FREINS LIÉS À L'EMPLOI DE TECHNIQUES NON COURANTES	125
5.3 DÉFINIR UN OPTIMUM ÉNERGÉTIQUE	126
5.4 REPLACER LE PROJET DANS UNE PERSPECTIVE DE MOINDRE EMPREINTE CARBONE	130
CONCLUSION	133
ANNEXES	137
Données sur le recueil d'échantillons et les sites de prélèvements	137
– Fiche échantillon n°00	139
– Fiche échantillon n°01	143
– Fiche échantillon n°02	147
– Fiche échantillon n°03	151
– Fiche échantillon n°04	155
Fiches retour d'expérience (Rex) : cinq opérations de réhabilitation d'habitat en mâchefer en région lyonnaise	159
– Maison individuelle – Bron (69) – Rénovation et extension d'une maison en mâchefer	161
– Maison individuelle – Lyon 5 – Rénovation et surélévation d'une maison en mâchefer.....	165
– Résidence sociale – Villeurbanne – Rénovation énergétique d'une résidence en mâchefer.....	169
– Résidence collective en copropriété – Lyon 3 – Rénovation énergétique d'un immeuble en mâchefer ...	173
– Résidence sociale – Lyon 2 – Rénovation énergétique	177
BIBLIOGRAPHIE	180
TABLE DES MATIÈRES	182
REMERCIEMENTS	187

Remerciements

Ce travail a pu voir la jour grâce au concours des membres permanents ou occasionnels du « Groupe de travail sur le mâchefer » qui ont généreusement répondu à l'invitation du CAUE Rhône Métropole, ainsi qu'à la coopération de nombreux interlocuteurs extérieurs – praticiens, entrepreneurs, ingénieurs, architectes, chercheurs, enseignants, historiens, maître d'œuvre, conducteurs de travaux... – qui, depuis 2018, y ont directement ou indirectement contribué.

Que toutes et tous en soient ici remerciés :

Benoît Allochon,
Yves André,
Mathilde Aulas,
Romain Anger,
Cédric Avenier,
Jérôme Beccavin,
Anissa Ben Yahmed,
Maxime Bonnevie,
Julien Bigorgne,
Julien Burgholzer,
Mathieu Cadic,
Richard Cantin,
Antoine Castrique,
Émilie Catherin,
Arnaud Cecillon,
Manuela Certan,
Pierre-Antoine Chabriac,
Cédric Chagot,
Anne-Laure
et Olivier Charnay,
Rosen Coquio,
Anna Costes,
Samuel Courgey,
Coralie Coutellec,
Laurent Dandres,
Florence Delomier-Rollin,
Sébastien Delmas,
Roland Delord,
Vincent Drape,
Claude Dub,
Thomas Dubertret,
Sylvain Dupeuble,
Lambert Duplany,
Bilal Essaid,
Aurélien Gély,
François Genouvrier,
Rémy Gourdon,
Marine Guis,
Denis Javelle,

Damien Joseph,
Rachid Kaddour,
Georges-Henry Laffont,
Philippe Lamy,
Franck Lebail,
Cédric Lentillon,
Hubert Lempereur,
François Leroux,
Anthony Mayet,
Sylvain Mangili,
Christophe Margueron,
Valérie Martos-Libon,
Jacques Mehu,
Bertrand Monchecourt,
Élodie Morel,
Stéphane Moteau,
Dorothee Oliver,
Yves Perrodin,
Martin Piton,
François Reppelin,
Gilbert Richaud,
Étienne Rieux,
Vincent Rigassi,
Nathalie Sandt,
Aurélie Sauvignet,
Jacques Sordoillet,
Jacky Suchail,
Étienne Villemot,
Julien Wenger

Ainsi que leurs structures :

AA Group ARCHITECTES
AIRIAL ARCHITECTES
ALEC DE LA METROPOLE
DE LYON
ALLIADE
AMACO
AMSTEIN+WALTHERT
APAVE
APUR
ATERRA
AQC
ARCANNE
ATELIER MULTIPLE
ARCHITECTES
ATELIER MONCHECOURT
& CO
AVENIER ARCHITECTE
BARN ARCHITECTURE
BLB CONSTRUCTION
BOUYGUES IMMOBILIER
CAUE RHÔNE METROPOLE
CEDDIA TP
CEREMA CENTRE-EST
DGALN
DRAC AUVERGNE-RHÔNE-
ALPES
DREAL AUVERGNE-RHÔNE-
ALPES
ÉCOLE NATIONALE
SUPERIEURE DES MINES
DE SAINT-ÉTIENNE
ENERTECH
ENSAB
ENSAG
ENSASE
ENTPE
FLEURENT ARCHITECTE
GRAND LYON HABITAT
INSA DE LYON
JSA
METROPOLE DE LYON
MILLOT DEMOLITIONS
NOVÆ ARCHITECTES
OIKOS
PARIS ET ASSOCIES ATELIER
D'ARCHITECTURE
RENOV'CONFORT
REPELIN ENTREPRISE
RIGASSI ARCHITECTE ET
ASSOCIES
SANDT-SULMONT
ARCHITECTE
SLP PITANCE
UDAP DU RHÔNE
UNIVERSITE LYON 2
VILLE DE LYON (DAU)

Ce document a été réalisé par le CAUE Rhône Métropole dans le cadre de ses missions statutaires d'intérêt public, avec le soutien de la Direction régionale des affaires culturelles Auvergne-Rhône-Alpes (DRAC).

Direction éditoriale :

Frédéric Pronchéry, *président du CAUE Rhône Métropole*
et Sébastien Sperto, *directeur*

Conception et coordination :

Grégory Cluzel, *architecte-conseiller et chargé de projet au CAUE Rhône Métropole*

Partenariat technique :

Cerema (*Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement*)

Coordination :

Isabelle Pereyron, *Cerema Centre-Est*

Fiches Opérations (Rex) :

Marianne Villey, *Cerema – Laboratoire d'Autun,*

Isabelle Pereyron, *Cerema Centre-Est*

Essais en laboratoire :

Bernard Carnus, Fabrice Rojat (*Département Risques, Infrastructures et Matériaux – Site de Bron*) ; Laurent Crouzet, Etienne Gourlay et Julien Borderon (*Unité Bâtiment Construction Immobilier – Agence de Strasbourg*) ; Clément Piegay, Philippe Glé et David Ecotière (*Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale – UMRAE – Agence de Strasbourg*)

Rédaction :

Grégory Cluzel

Travaux préparatoires :

Mathilde Aulas

Relecture :

Coralie Coutellec, Mélina Ramondenc, Anna Costes (*CAUE Rhône Métropole*)

Conception graphique et maquettage :

Julien Montet

Illustrations graphiques :

Grégory Cluzel (*CAUE Rhône Métropole*), *sauf mentions contraires*

Crédits photographiques :

Florent Perroud (*CAUE Rhône Métropole*), *sauf mentions contraires*

Documentation :

Christine Archinard (*CAUE Rhône Métropole*)

Diffusion et communication :

Magali Trinquier (*CAUE Rhône Métropole*)

Les CAUE, créés par la loi sur l'architecture du 03 janvier 1977, portent la mission d'intérêt public de promouvoir la qualité de l'architecture, de l'urbanisme et de l'environnement dans leurs territoires.

La reproduction, sous quelque forme qu'elle soit, de tout ou partie de ce document, est interdite sans l'autorisation expresse du CAUE Rhône Métropole.

La responsabilité des auteurs ne saurait être engagée sur la base des recommandations formulées et des choix opérationnels assumés par les maîtres d'ouvrage et leurs maîtres d'œuvre.

CAUE Rhône Métropole

6 bis quai Saint-Vincent
69001 LYON
www.caue69.fr
2024

