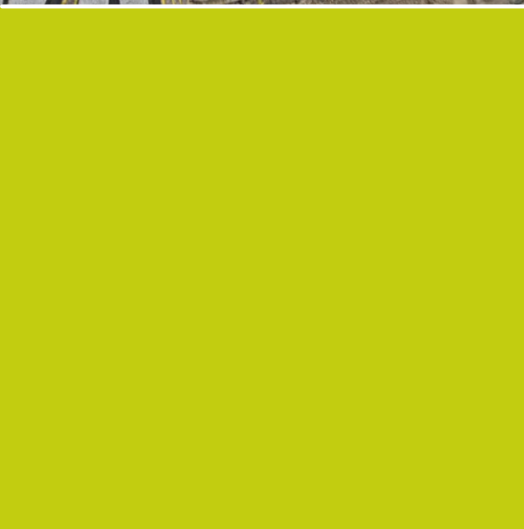
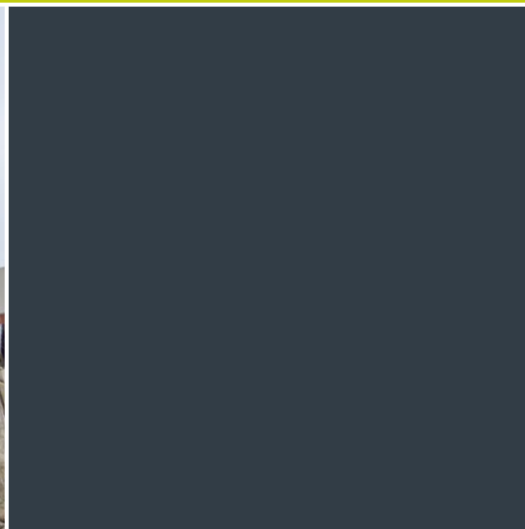


Le mâchefer, matériau du bâti ancien



Préambule

Chaque étudiant de l'ENTPE est tenu en fin de scolarité de réaliser un travail de fin d'étude (TFE) conditionnant l'obtention de son diplôme. Ce travail peut être réalisé dans le cadre d'un stage ou en autonomie. Pour ma part, j'ai choisi d'intégrer l'association Oïkos du 29 avril au 16 juillet 2021 dans le cadre d'un stage.

Les actions de Oïkos répondent depuis plusieurs décennies au besoin de construire et de rénover de façon plus durable en transmettant leur savoir sur la construction écologique aux collectivités, aux professionnels et au grand public (description complète en annexe). Aspirant moi-même à en apprendre davantage sur la construction durable mais aussi à participer à son développement, j'ai vu dans cet organisme l'opportunité de combiner ces deux motivations.

Etienne Rieux (Auteur)

Sommaire

Préambule	3
Sommaire.....	4
1. Introduction	5
1.1. Les enjeux de la rénovation.....	5
1.2. Le bâti ancien	6
1.3. Présentation du matériau mâchefer	6
2. Etat de l'art sur le mâchefer	8
2.1. Les sources de documentation.....	8
2.2. Les connaissances actuelles.....	9
2.2.1. La diversité des bétons de mâchefer	9
2.2.2. Approche quantitative des propriétés.....	11
2.2.3. Analyse qualitative des propriétés	15
3. Des projets exemplaires.....	19
4. Bonnes pratiques et points de vigilance spécifiques au bâti ancien et au mâchefer.....	20
4.1. Installer un système de ventilation	20
4.2. Gérer les remontées d'humidité	21
4.3. Réfléchir à l'isolation la plus adaptée	22
4.4. Tenir compte de l'humidité en partie basse en ITE	24
4.5. Poser un pare-vapeur en ITI.....	24
4.6. Utiliser des isolants biosourcés.....	25
4.7. Utiliser des enduits à la chaux.....	25
4.8. Critique.....	26
Conclusion.....	28
Bibliographie.....	30

1. Introduction

1.1. Les enjeux de la rénovation

Aujourd'hui, il n'est plus nécessaire de justifier la recherche de solutions pour diminuer les impacts des Hommes sur l'environnement. Que ce soit d'un point de vue des émissions de gaz à effet de serre, de la toxicité pour les écosystèmes ou de la consommation énergétique, il y a urgence à donner à nos sociétés la capacité à être durable. Un des secteurs les plus importants sur lequel agir est celui du bâtiment. D'après le rapport 2019 du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), le secteur du Bâtiment est le second émetteur de gaz à effet de serre (GES) en France produisant 20% des émissions de GES, après les transports avec 29% [1]. Les bâtiments sont également de grands producteurs de déchets, sur les 326 Mt de déchets produits en France en 2017, plus de 40 Mt proviennent de ceux-ci [2]. Une des solutions à apporter est de rénover massivement et de manière performante le patrimoine immobilier français. D'une part, la rénovation limite les constructions neuves, ce qui évite la consommation de ressources et la production de déchets. D'autre part, la rénovation énergétique performante diminue, comme l'intitulé le laisse comprendre, les besoins énergétiques des bâtiments. Dans ce sens, l'Etat, avec la loi relative à la transition énergétique et à la croissance verte de juillet 2017, a par exemple fixé l'objectif de rénover tout le parc de bâtiments au niveau Bâtiment basse consommation¹ d'ici 2050 [3]. Dis autrement, l'Etat se donne pour objectif de rénover environ 500 000 logements par an. Or, d'après l'Agence Nationale de l'Habitat (Anah), « seulement » 155 765 logements ont été rénovés en 2019 [4]. De plus, de trop nombreuses rénovations ne permettent finalement pas d'améliorer significativement la performance énergétique des logements. Un rapport de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) de 2017 estime que 75 % des maisons individuelles ayant eu des travaux sur la période 2014-2016 n'ont pas changé de classe DPE [5]. Cela peut être expliqué par un manque de sensibilisation des particuliers aux travaux de rénovations performantes mais aussi par un besoin de formation des professionnels du bâtiment, lesquels proposent de trop nombreuses malfaçons et arnaques.

Parmi les bâtiments existants en France plus d'un tiers sont qualifiés de bâti ancien. Ils représentent donc un levier considérable pour la rénovation. Mais, définissons d'abord ce qu'on appelle « bâti ancien ».

¹ En rénovation, ce niveau correspond à une consommation d'énergie primaire inférieure ou égale à 80 kilowattheures par mètre carré et par an (modulée selon la zone climatique et l'altitude)

1.2. Le bâti ancien

En rénovation, il est d'usage de classer les bâtiments existants en trois groupes : les bâtiments construits après 1975, ceux construits entre 1948 et 1975 et ceux d'avant 1948. C'est ce dernier groupe qui définit le bâti ancien. Les dates qui délimitent ces groupes sont davantage représentatives de modes constructifs différents que de dates de construction réelles d'un bâtiment en particulier.

Le groupe le plus récent comprend les bâtiments qui ont été construits après le choc pétrolier de 1973 et les réglementations thermiques qui en ont découlé en 1974. Ils présentent, en général, une meilleure performance thermique que les bâtiments d'après-guerre, i.e. le second groupe. En effet, celui-ci comprend le bâti construit dans un contexte particulier ; celui d'un besoin de construire vite, de l'émergence industrielle de nouveaux matériaux de construction (bétons) et de l'oubli de certains savoir-faire dû aux pertes humaines des deux guerres mondiales. Le dernier groupe, justement construit selon les savoir-faire régionaux, représente les bâtiments traditionnels [6]. Ceux-ci, malgré leur très grande diversité (brique, pierres diverses, pisé, colombage, mâchefer, etc.), possèdent des propriétés communes, notamment celle d'être perspirant, c'est-à-dire de ne pas être fermé à la vapeur d'eau.

Le présent rapport traite du bâti en mâchefer. Ce matériau est ambivalent. Comme nous le développerons plus loin, il a commencé à être utilisé autour de 1850 avec la méthode du pisé mais aussi conjointement à du béton moderne, selon des méthodes industrielles jusqu'en 1960. Cependant, du fait de ses propriétés il est classé dans le bâti ancien. Il s'agit maintenant de comprendre ce qu'est le mâchefer.

1.3. Présentation du matériau mâchefer

Le mâchefer dont il est question dans ce document est un matériau issu de résidus de hauts fourneaux. Il ne faut pas le confondre avec les MIOM (Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères), qui comme leur nom l'indique sont des produits de la combustion des déchets ménagers. Ceux-ci sont utilisés aujourd'hui par le secteur des travaux publics « comme sous-couche routière ou pour le comblement de fossés et de remblais » [7] mais sont interdits dans le domaine du bâtiment. Ils ont des propriétés très différentes du mâchefer de hauts fourneaux dont nous traitons ici. Nous ne parlerons pas non plus des « nouveaux bétons de mâchefer » faisant l'objet de nombreuses recherches scientifiques dans les régions du monde à l'activité sidérurgique encore très active comme l'Inde ou l'Afrique subsaharienne.



Figure 1. Mâchefer métallurgique à la sortie du four.
Source : [11]

Le premier mâchefer, celui que nous étudierons, se compose de scories de houille. D'après le dictionnaire Larousse, une scorie est une « partie mauvaise, inutile », c'est un synonyme de « déchet ». Ce terme est souvent employé pour parler des résidus issus de l'industrie métallurgique [8] (Figure 1). La houille (Figure 2), quant à elle, est un « combustible minéral fossile solide, provenant de végétaux ayant subi, au cours des temps géologiques, une transformation lui conférant un grand pouvoir calorifique » (définition Larousse [9]). Elle a été utilisée en France dès la Renaissance, probablement au XVIe siècle pour remplacer le charbon de bois dans les foyers et les fours de certains artisans. Mais c'est à partir de la fin du XVIIIe siècle, début de l'ère industrielle que l'exploitation de la houille devient importante. Elle est alors essentiellement utilisée dans les centrales thermiques pour la production d'électricité et le chauffage urbain, et dans la sidérurgie pour la production de fonte et d'acier [10]. C'est cette dernière utilisation qui produit des scories de houille.



Figure 2. Photo d'un morceau de houille. Source : [12]

D'après le mémoire de Mathilde Aulas « Les matériaux de construction peuvent-ils être patrimoine ? » [13], les scories de houille sont produites en grande quantité à Lyon au milieu du XIXe siècle. Elles constituent un déchet ultime encombrant la sortie des usines. C'est ainsi que l'idée d'utiliser cette matière pour en faire un matériau de construction naît à Lyon grâce à l'industriel François Coignet. Le matériau créé consistait à associer le mâchefer à un liant (chaux ou ciment). Cela constituait un matériau de construction peu coûteux. Il a été utilisé pendant environ un siècle, du milieu du XIXème siècle au milieu du XXème siècle durant lequel il a connu des évolutions de composition et d'utilisation importantes. Il existe, en effet, de nombreuses compositions de béton de mâchefer différentes, certaines contiennent également de la pouzzolane ou du sable [14]. Il existe aussi différentes manières de le poser. Historiquement banché comme le pisé, selon le savoir-faire lyonnais, il a également été utilisé en blocs maçonnés produits industriellement ou artisanalement, sous forme de briques ou de parpaings. Sa grande diversité en fait un matériau difficile à identifier et à caractériser physiquement. En conséquence, il a longtemps été très peu étudié scientifiquement. Il est d'ailleurs absent de la plupart des logiciels de simulation thermique utilisés par les bureaux d'études. Finalement, dans la seconde moitié du XXe siècle, le béton « moderne » a rapidement remplacé le béton de mâchefer.

Par abus de langage, on dit qu'un bâtiment est construit en mâchefer lorsqu'il est fait en béton de mâchefer.

2. Etat de l'art sur le mâchefer

2.1. Les sources de documentation

A l'heure actuelle, très peu d'études sur le mâchefer ont été réalisées. C'est seulement depuis le début de l'année 2018 que le Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et d'Environnement du Rhône (CAUE 69) s'intéresse au développement de connaissances sur ce matériau. En effet, comme nous l'avons évoqué en introduction, les enjeux de rénovation du bâti ancien se trouvent de plus en plus forts dans le contexte énergétique et climatique actuel. De plus, d'après le CAUE 69, les demandes de conseils pour la réhabilitation de bâtiments en mâchefer par les particuliers sont croissantes. C'est ainsi qu'en 2018, un groupe de travail sur le mâchefer a été créé sous l'impulsion de cet organisme, dont l'objectif est d'organiser et coordonner la recherche et les initiatives concernant ce matériau.

Ce groupe est constitué de nombreux acteurs du bâtiment qui ont évolué depuis sa création, et dont les principaux intéressés par les travaux actifs se regroupent deux à trois fois par an. La diversité et la quantité des organismes intéressés par ce travail révèlent le besoin de connaissances autour de ce matériau. En effet, pour ne donner qu'une liste non exhaustive des organismes participant ou suivant de très près les avancées du « Groupe de Travail Mâchefer » nous trouverons le CAUE 69 [16], le bureau d'étude Amstein+Walthert [17], plusieurs Centres d'Etudes sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA), Grand Lyon Habitat (GLH), la Métropole de Lyon, la Ville de Lyon, le Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA), des architectes ou l'Agence Locale de l'Energie et du Climat du Rhône (ALEC 69).

Depuis sa création en 2018, ce groupe a produit plusieurs documents pionniers dans la connaissance du mâchefer. Tout d'abord, deux textes composent une étude approfondie de la rénovation de 6 cités HBM² lyonnaises en mâchefer. Cette étude a été commandée par Grand Lyon Habitat, gestionnaire de ces bâtiments et soucieux de la bonne rénovation de son patrimoine. Le premier document, proposé par le CAUE 69, développe d'abord les aspects historiques des cités HBM avant d'analyser les différentes propositions de rénovations d'un point de vue architectural [15]. Le second, réalisé par le bureau d'étude Amstein+Walthert, compare la pertinence des solutions proposées par la maîtrise d'œuvre des 6 rénovations d'HBM sur les volets techniques et financiers, de la conception à la réalisation [18]. En parallèle de ce dossier, une série d'essais en laboratoire a été réalisée par le CEREMA Centre-Est, missionnée par la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN) [19]. Ces essais ont permis de mesurer la masse volumique, les propriétés de sorption et désorption et la résistance à la compression d'une quinzaine de blocs de mâchefer fournis par le CAUE et prélevés lors de la démolition d'un ancien

² « Initiées par la loi de Siegfried en 1894, (...) les cités HBM sont des ensembles de logements destinés aux ouvriers et à leurs familles, construits et proposés à la location par des sociétés privées, plus tard par des offices publics, afin de pallier la crise du logement en France » [15]

bâtiment industriel de 1960 à Lyon 7. Des méthodes d'investigations adaptées aux spécificités du matériau ont également été établies au cours de ce travail. La dernière ressource est un rapport de résultat suite à l'instrumentation d'une construction en parpaings de mâchefer construite en 1950 à Collongues-au-Mont d'Or (69). De décembre 2018 à décembre 2019, des capteurs ont été posés de part et d'autre d'un mur en mâchefer non isolé orienté Est, afin de mesurer les températures de surfaces et ambiantes, intérieures et extérieures, ainsi que l'humidité relative. Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus par le logiciel WUFI afin de vérifier la cohérence des calculs informatiques avec les mesures in situ.

Avant cette saisie du problème par le CAUE 69, la documentation se résumait à des productions éparées, s'intéressant aux aspects patrimoniaux et historiques du matériau, ou très anciennes pour lesquelles les enjeux de rénovation ne s'appliquaient pas.

Par exemple, le journal de l'exposition universelle de 1855 présente le matériau de François Coignet en avançant ses atouts selon les connaissances de l'époque [20]. Parmi les productions récentes, nous citerons le mémoire de Mathilde Aulas, aujourd'hui membre du groupe de travail Mâchefer [13]. Ce document retrace l'histoire des premiers bétons et leur rôle dans l'architecture des premières HBM lyonnaises.

Finalement, plusieurs professionnels entretiennent un savoir-faire, dont certains l'ont partagé au travers de sites web [21,22,23]. Il est important de garder un regard critique sur ces méthodes qui ne font pas forcément consensus et sur lesquels certains commerçants souhaitent simplement vendre leurs prestations.

2.2. Les connaissances actuelles

2.2.1. La diversité des bétons de mâchefer

Le matériau mâchefer présente une diversité immense pour de multiples raisons. Comme nous avons commencé à l'évoquer précédemment, il a d'abord été imaginé par François Coignet au milieu du XIXe siècle. On retrouve d'ailleurs, dans le journal de l'exposition universelle de 1855, la composition des premiers bétons de mâchefer (Figure 3) [20].

“ La composition à laquelle s'est arrêté M. Coignet est la suivante :

Sable, gravier, cailloutis.....	8 parties.	
Terre ordinaire cuite et pilée.....	1 —	
Cendres de houille pilées.....	1 —	”
Chaux grasse ou hydraulique non délitée.....	1 1/2	

Figure 3. Extrait du journal de l'exposition universelle de 1855. Source : [20]

Cependant, avec le temps et en s'exportant, cette formulation a été amenée à être modifiée, notamment en fonction des matières disponibles localement, de la progression de la connaissance sur les bétons et de l'utilisation qui devait en être faite (mur banché, parpaing, plancher, etc.). Aujourd'hui, un béton de mâchefer peut contenir différents pourcentages de granulats, de

pouzzolane, de scories de houille, de ciment, de chaux, de terre, etc. Chacun de ces éléments ayant sa propre diversité.

De plus, comme évoqué précédemment, le mâchefer a connu différentes utilisations. En effet, bien que ce béton ait été utilisé en grande majorité pour les parois verticales (i.e. les murs extérieurs, les murs de refend ou les cloisons), il se retrouve également dans l'isolation des planchers hauts [24]. Nous étudierons ici essentiellement les bonnes pratiques dans la rénovation des murs extérieurs. Les différents modes constructifs en béton de mâchefer peuvent se synthétiser en deux types : les murs en béton banché et les murs en blocs maçonnés.

- **Le béton de mâchefer banché**

Le béton de mâchefer peut être mis en place selon le même principe que le pisé : le matériau est coulé au milieu d'un coffrage d'au moins 45 cm d'épaisseur et allant jusqu'à 60 cm d'épaisseur, puis pilonné. Des couches successives d'environ 60 cm se superposent ainsi pour monter des murs allant bien au-delà de 3 étages. Par exemple, la cité d'habitations bon marché (HBM) Marius Donjon dans le 9^e arrondissement de Lyon atteint les 6 étages au-dessus du rez-de-chaussée [15]. C'est la méthode historique développée par François Coignet au XIX^e siècle, inspiré par les travaux de François Cointeraux sur le pisé. Plus tard, des méthodes de banchage sans pilonnage sont apparues.



Figure 4. Mur en béton de mâchefer sur un soubassement en béton "classique".
Source : [14]

- **Les blocs de béton maçonnés**



Figure 5. Blocs agglomérés de béton de mâchefer.
Source : [14]

Un second principe constructif consiste à monter des murs maçonnés avec des blocs de béton de mâchefer. Ces blocs sont divers, ils peuvent prendre la forme de briques ou de parpaings. On retrouve ce principe sous d'autres noms comme les moellons de mâchefer ou les blocs de mâchefer agglomérés. Ces murs maçonnés peuvent être porteurs en utilisant des parpaings de 25 cm ou 30 cm d'épaisseur [15] ou venir en remplissage d'une structure poteau/poutre avec des éléments autoportants comme des briques d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur. Ces méthodes ne permettent généralement pas de monter des bâtiments de plus de 3 étages [25].

Finalement, ceci engendre un besoin de tests en laboratoire sur des échantillons considérables de bétons de mâchefer, de provenances différentes, issus de différents principes constructifs (banché/blocs maçonnés), afin de mesurer quantitativement les propriétés de ce matériau.

2.2.2. Approche quantitative des propriétés

La connaissance du comportement d'un matériau passe par la mesure de plusieurs grandeurs physiques : la conductivité thermique, la capacité thermique massique et volumique, la masse volumique, la diffusivité, l'effusivité, la porosité, la résistance à la diffusion de vapeur d'eau, la teneur en eau, le coefficient d'absorption d'eau, la résistance à la compression et le module d'élasticité. Or, aujourd'hui les valeurs des principales caractéristiques du mâchefer sont mal connues, voire inconnues.

- **Définition des différentes grandeurs**

Les grandeurs thermiques

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

La **masse volumique**, notée ρ , mesurée en kg/m^3 , est la masse d'un matériau pour un volume de 1 m^3 .

La **capacité thermique massique**, notée C , mesurée en $J/(kg \cdot K)$, caractérise la quantité de chaleur à apporter à 1 kg de matériau pour élever sa température de $1^\circ C$. Cela signifie que plus C est grand, plus le matériau, pour une masse donnée, peut stocker de la chaleur.

La **capacité thermique volumique**, notée C_v , mesurée en $J/(m^3 \cdot K)$, caractérise la quantité de chaleur à apporter à 1 m^3 de matériau pour élever sa température de $1^\circ C$. Les capacités thermiques volumiques et massiques sont proportionnelles de coefficient ρ . Donc plus la masse volumique d'un matériau est élevée, plus il pourra stocker de calories. Ces grandeurs vont jouer dans l'inertie du matériau en rentrant dans le calcul de la diffusivité et de l'effusivité.

La **diffusivité thermique**, notée a , exprimée en m^2/s , est le rapport de la conductivité sur la capacité thermique volumique. Elle exprime la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température. Plus a est faible, plus le matériau transmet lentement la chaleur.

L'**effusivité**, notée b , exprimée en $J/(s^{0,5} \cdot m^2 \cdot K)$ est la racine de la conductivité multipliée par la capacité thermique volumique. Elle caractérise la capacité d'un matériau à absorber ou restituer la chaleur. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe rapidement la chaleur et moins sa surface se réchauffe vite.

Les grandeurs hygriques

La **porosité**, sans unité, est le taux d'espace « vide » dans le matériau. Selon la taille des pores et leur ouverture, la perspiration, l'hygroscopicité et la capillarité du matériau seront modifiées.

La **résistance à la diffusion de vapeur d'eau**, notée μ , sans unité, caractérise la capacité d'un matériau à empêcher son franchissement par la vapeur d'eau, par rapport à l'air immobile ($\mu_{air}=1$). Un matériau avec un faible μ est dit perspirant.

La **teneur en eau**, notée W , sans unité, caractérise la capacité d'un matériau à stocker de l'eau en son sein lorsqu'il est mis en contact avec de l'air humide. Plus la valeur est élevée, pour une humidité relative de l'air ambiant donnée, plus le matériau est dit hygroscopique.

Le **coefficient d'absorption d'eau**, noté A , exprimé en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{s})$, caractérise la capacité d'un matériau à absorber de l'eau liquide par contact direct et à la laisser se déplacer en son sein. Plus cette valeur est grande, plus le matériau est dit capillaire.

Les grandeurs mécaniques

Le **module d'élasticité**, noté E , exprimé en Pa, est le coefficient de linéarité entre la contrainte exercée sur un matériau considéré élastique et isotrope et son taux de déformation. Plus E est grand moins le matériau est déformé sous l'action d'une force.

La **résistance à la compression**, notée σ_c , exprimée en Pa, est la pression maximale que peut supporter un matériau avant sa rupture.

Dans la suite, nous détaillons les valeurs connues, pour le mâchefer, des grandeurs présentées ci-dessus.

- **Conductivité thermique λ**

Début 2021, le bureau d'étude Amstein+Walthert a réalisé un état de l'art des valeurs de la conductivité thermique du béton de mâchefer (Figure 6) [18].

Les résultats sont les suivants : les sources les plus fiables laissent supposer que les valeurs de conductivité des bétons de mâchefer sont comprises entre $0,25 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ et $0,75 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$.

Il est vraisemblable que les bétons de mâchefer soient au moins deux fois plus isolants que les bétons « modernes ».

Provenance	λ (W.m.°C)																
Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, Climaxion / Enertech / 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, 5 septembre 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 Etude du remplacement des agrégats par des résidus de combustion de centrales thermiques	0.5 à 0.65																
Techniques de l'ingénieur TBA 1112, 01 décembre 2004 (valeur en kcal/h.°C, 1kcal/h = 1.163W)	0.23 à 0.35																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Masse volumique apparente en kg/m³</th> <th>Résistance à la compression en kg/cm²</th> <th>Conductivité thermique en kcal/m h °C</th> <th>Absorption d'eau en pourcentage du volume ou du poids</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>800/850</td> <td>10/20</td> <td>0,2 à 0,3</td> <td>15 à 18</td> </tr> <tr> <td>850/950</td> <td>20/25</td> <td>0,2 à 0,3</td> <td>16 à 19</td> </tr> <tr> <td>900/1 000</td> <td>25/45</td> <td>0,2 à 0,3</td> <td>17 à 20</td> </tr> </tbody> </table>		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
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																	
<ul style="list-style-type: none"> - DIN EN 1745 2012-07 - TGL 35424/2 - Önorm B8110 (Ausg. 59) 	0.2 à 0.55 0.47 à 0.61 0.47																
Essais de conductivité thermique au fil chaud réalisés par Pierre Antoine Chabriac (Ecole d'Architecture de Saint Etienne, 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 Etienne.	0.2 à 0.4, moyenne à 0.3																

Figure 6. Valeurs des conductivités thermiques des bétons de mâchefer. Source : [18]

• Masse volumique ρ

La littérature d'époque donne des valeurs de la masse volumique comprises entre 800 kg/m³ et 900 kg/m³ [18]. Une étude plus récente, datant de 2018, réalisée par le CEREMA mesure cette valeur entre 1100 kg/m³ et 1200 kg/m³ pour du pisé de mâchefer [19].

L'article du journal Techniques de l'ingénieur du 1er décembre 2004 propose des masses volumiques comprises entre 800 kg/m³ et 1000 kg/m³ [26].

Il semble possible que la grande variabilité de composition du matériau entraîne une variabilité de la masse volumique également importante. Ce matériau demeure malgré tout un béton léger.

- **Porosité**

D'après l'étude du CEREMA de 2018, les échantillons de pisé de mâchefer étudiés avaient une porosité de 32%. Cette valeur en fait un matériau de construction poreux. Pour comparaison, le pisé de terre a une porosité de 36% [27] et les bétons « classiques » de l'ordre de quelques pourcents.

- **Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ**

Dans la même analyse que celle de la conductivité thermique [18], le bureau d'étude Amstein+Walthert réalise l'état de l'art des valeurs de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (Figure 7). Il remarque de manière pertinente l'importance de la connaissance des propriétés du mâchefer à la vapeur d'eau étant donné la sensibilité du matériau aux risques de condensation, risques que nous expliciterons plus en avant dans le reste de ce document.

Provenance	μ (-)
Site Internet www.energieplus-lesite.be (Université catholique de Louvain / Wallonie Energie SPW). Valeur suivant la densité (1 à 1.9)	6.5 à 14
Logiciel Antherm	
- DIN EN 1745 2012-07	5 à 15
- TGL 35424/2	5 à 14
<i>Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien</i> , Climaxion / Enertech / Oktave / Dorémi, décembre 2017	20
Matériau assimilé à une « pierre calcaire tendre grès Baumberger »	

Figure 7. Valeurs des résistances à la vapeur d'eau des bétons de mâchefer. Source : [18]

Les bétons de mâchefer semblent avoir une résistance à la vapeur d'eau comprise entre 5 et 20, ce qui en fait des matières ouvertes à la vapeur d'eau (i.e. perspirantes).

- **Teneur en eau**

D'après les essais du CEREMA, la teneur en eau du mâchefer à 80 % d'humidité relative (à 20 °C), est d'environ 1%. Elle est de l'ordre de 2% pour une humidité relative de 95%. Ces valeurs tendent à montrer une faible capacité hygroscopique du mâchefer mais non négligeable [19].

- **Résistance à la compression σ_c**

Toujours d'après les essais du CEREMA de 2018, la résistance en compression du pisé de mâchefer est très variable. Les valeurs sont comprises entre 1,5 MPa et 4,5 MPa.

L'article de Techniques de l'ingénieur propose des valeurs du même ordre entre 10 et 45 kg/cm² en fonction de la masse volumique du béton de mâchefer considérée, ce qui équivaut à environ 1 MPa et 4,5 MPa (figure 8).

Masse volumique apparente en kg/m ³	Résistance à la compression en kg/cm ²	Conductivité thermique en kcal/m h °C
800/850	10/20	0,2 à 0,3
850/950	20/25	0,2 à 0,3
900/1 000	25/45	0,2 à 0,3

Figure 8. Caractéristiques des bétons de mâchefer. Source : [26]

Le module d'élasticité, la capacité thermique massique et le coefficient d'absorption d'eau n'ont pas encore fait le sujet d'études en laboratoires.

- **Éléments toxiques**

Cette partie est également l'occasion de traiter des mesures de toxicité du mâchefer. En 2017, des étudiants de l'INSA Lyon ont conduit des essais de lixiviation. Cette méthode permet de connaître quelles sont les substances libérées par le mâchefer sous l'action de l'eau. Les résultats ont mis en évidence des composants toxiques (Arsenic, Cadmium, Chrome, Nickel, Plomb, Antimoine, ...) mais à des taux qui seraient sans danger pour la santé car inférieurs aux seuils donnés pour le réemploi dans les sous-couches routières. Cependant, ces essais ne permettent pas de connaître les risques existants avec les poussières respirables produites lors des chantiers, ceux-ci restent donc à évaluer [28,29].

On remarque que les valeurs données ici ne sont pas toujours nuancées en fonction de la diversité des mâchefers que l'on peut rencontrer et que les fourchettes de valeurs sont relativement fines. Cela peut laisser penser que les valeurs sont connues et uniformes. Pourtant, c'est bien le contraire qu'il faut observer. Ces résultats offrent tout de même des ordres de grandeur exploitables pour une analyse des propriétés d'un point de vue pratique.

2.2.3. Analyse qualitative des propriétés

Contrairement à ce que son nom peut laisser supposer, les bétons de mâchefer possèdent des propriétés très différentes de celles du béton actuel.

- **Les propriétés hygrothermiques**

Les bâtiments en mâchefer possèdent les comportements hygrothermiques suivants :

- ▶ Une conductivité thermique non-négligeable
- ▶ Une perspiration caractéristique du bâti ancien
- ▶ Des propriétés hygroscopiques faibles
- ▶ Une inertie thermique dépendante du type de bâti
- ▶ Différentes gestions de la capillarité
- ▶ Des remontées d'humidité par électro-osmose peu renseignées
- ▶ Des risques sous l'action de l'eau

a. Une conductivité thermique non-négligeable

La conductivité thermique du mâchefer est très souvent surestimée lors de la phase de conception. Les calculs réglementaires ne permettent pas une bonne estimation des propriétés thermiques de manière certaine (voir 2.2.2.) et la plupart des logiciels de simulation thermique ne disposent pas du mâchefer dans leur bibliothèque de matériau. Les éventuelles propriétés isolantes du mâchefer ne sont donc pas prises en compte. Cela n'aura que peu d'impact sur un bâtiment dont les murs sont minces. Par exemple, un bâtiment en brique de mâchefer en remplissage d'une structure poteau/poutre. Cependant, une paroi plus épaisse peut jouer un rôle isolant non négligeable. Pour avoir une idée, le BE Amstein+Walthert explique qu'un « mur de 50cm en mâchefer possède une résistance thermique de l'ordre de $1.8 \text{ m}^2 \cdot \text{°K/W}$, soit une résistance équivalent à un mur béton avec une isolation en PSE de 6cm d'épaisseur » [18]. Or, négliger la conductivité thermique d'une paroi en mâchefer plus épaisse peut avoir des conséquences néfastes pour le projet :

- Les solutions d'isolation mises en place ne sont pas adaptées aux objectifs. Les conséquences sont nombreuses : surcoûts, surconsommation de matière, perte excessive de volume en ITI, etc.
- Lorsque l'objectif d'isolation est haut, l'absence de prise en compte des propriétés thermiques du mâchefer peut nuire au confort d'été recherché (surchauffe).
- Les équipements de chauffage sont surdimensionnés.
- Les économies de chauffage liées à la rénovation sont surestimées. Cela implique que le temps de retour sur investissement est sous-évalué [18].

Il est donc important, dans la mesure où cela est possible, de réaliser un diagnostic thermique de l'existant avec des valeurs de résistance thermique adaptées.

b. Des propriétés hygroscopiques faibles

Nous rappelons que la propriété hygroscopique d'un matériau est sa capacité à capter l'humidité de l'air ambiant, elle est mesurée par sa variation de teneur en eau en fonction de l'humidité relative de son environnement. Le pouvoir du bâti ancien, de voir la quantité d'eau dans ses murs varier, a plusieurs conséquences. Tout d'abord, il entraîne une légère variation du volume du matériau. En pratique, cela signifie qu'un mur en mâchefer va avoir tendance à gonfler/dégonfler en fonction de sa teneur en eau. Ensuite, l'eau a des propriétés particulières lorsqu'elle change d'état. En s'évaporant, elle prend des calories à son environnement, cela engendre un rafraîchissement du mur. Inversement, la condensation de l'eau libère de la chaleur dans le mur. Ces phénomènes, caractéristiques du bâti ancien, sont aujourd'hui rarement pris en charge par les logiciels de simulation thermique.

L'importance du phénomène de sorption/désorption et les conséquences qu'il entraîne (mouvements de la paroi et phénomènes thermiques) sont encore très mal mesurées pour le mâchefer, il semblerait qu'elles soient faibles mais non négligeables.

c. Une inertie thermique dépendante du type de bâti

L'inertie thermique est la capacité d'un bâtiment à conserver sa température. Cela est possible par deux moyens : l'inertie par transmission, l'inertie par absorption. La première correspond au fait que la chaleur prendra plus ou moins de temps à traverser une paroi, on parle également de déphasage. Cette propriété est mesurée par la diffusivité. La seconde correspond au fait que les murs prennent du temps à atteindre l'équilibre thermique avec l'air ambiant. Cette propriété est mesurée par l'effusivité [30].

Une grande inertie thermique n'est pas toujours à rechercher pour un bâtiment, cela dépendra de son usage. Par exemple, des salles de réunions, utilisées occasionnellement, auront besoin de chauffer rapidement en hiver. Cependant, dans le cas de la rénovation d'un logement, occupé en permanence, augmenter ces phénomènes pourra améliorer le confort d'été et d'hiver en lissant les variations de température des murs.

En ce qui concerne le bâti en mâchefer, la grande diversité de ce matériau ne permet pas d'affirmer systématiquement qu'il aura une inertie intéressante pour une habitation. En effet, cela dépendra notamment de l'épaisseur des murs, laquelle peut varier de 10 cm à 60 cm selon le principe constructif. Néanmoins, en ordre de grandeur, pour une épaisseur de mur donnée, il participera à une inertie par transmission 3 fois meilleure que du béton classique et une inertie par absorption 2 fois moins bonne. Un mur en mâchefer de 40 cm aura donc un bien meilleur déphasage et une inertie par absorption aussi bonne qu'un mur en béton de 20 cm.

d. Différentes gestions de la capillarité

La capillarité est le phénomène de remontée de l'eau au travers d'un tube très fin sous l'action de la tension superficielle de l'eau. Les bétons de mâchefer sont des matériaux poreux. Les pores ouverts se comportent comme des tubes qui permettent la remontée capillaire de l'eau dans le mur. Ce phénomène permet rarement à l'eau de monter au-delà de 35 cm de hauteur si le mur n'est pas étanché. Entre 1850 et 1960, différentes réponses ont été apportées aux problèmes des remontées d'humidité dans les murs (effet de capillarité et électro-osmose, voir paragraphe suivant). Au XIX^{ème} siècle les savoir-faire locaux consistaient à construire des soubassements en pierre enduits à la chaux ou laissés apparents. Ceux-ci n'empêchaient pas l'humidité de monter, mais ils séchaient rapidement et ne se dégradait pas sous l'action de l'eau. Plus tard, les soubassements sont réalisés soit directement en mâchefer, soit en béton. Ceux en mâchefer peuvent engendrer des remontées importantes. Ceux en béton, matériau moins poreux, sont moins sensibles.

e. Des remontées d'humidité par electro-osmose peu renseignées

Ce phénomène a longtemps été confondu avec les remontées capillaires. Mais celui-ci peut provoquer des remontées d'humidité bien au-dessus des 35 cm de hauteur des remontées capillaires. Tandis que ces dernières sont dues à des forces de contact, le premier est dû à des champs électromagnétiques. Pour plusieurs raisons une différence de potentiel peut exister entre le sol et les murs d'un bâtiment. Lorsque le sol a le rôle de l'anode (pôle +) et le mur, la cathode (pôle -), l'eau chargée en sels remonte dans le réseau capillaire du mur sous l'influence du champ électrique ainsi créé [31]. Le mâchefer, matériau poreux peut être soumis à ce phénomène.

f. Des risques sous l'action de l'eau

Comme nous l'avons vu précédemment, les murs en mâchefer sont capables de réguler l'eau qu'ils contiennent. Cependant, cela n'est possible que si l'apport en eau n'est pas excessif et si le reste des composants de la paroi lui permet de respirer (i.e. laisser la vapeur d'eau circuler).

Dans la situation où un mur en mâchefer est en excès d'eau, il sera exposé à de nombreux désordres:

- Un risque accru d'éclatement dû au gel, pouvant mettre en cause ses performances structurelles ;
- Le décollement, la dégradation des revêtements ;
- L'apparition de moisissures en surface ;
- Le pourrissement des ossatures en bois et des isolants biosourcés le cas échéant ;
- Une dégradation des performances thermiques ;
- Un inconfort pour les habitants.

Il n'y a cependant pas de risque connu de dégradation structurelle d'un mur en mâchefer sous l'action de l'eau liquide comme cela peut l'être avec un mur en pisé. C'est d'ailleurs cette propriété qui a initié son utilisation à Lyon, où les inondations causaient des dégâts considérables aux bâtiments en pisé [20].

• **Les propriétés mécaniques**

Comme le pisé, le mâchefer est un matériau qui présente une très bonne résistance en compression souvent associé à des murs épais. Ces bâtiments se caractérisent par une grande solidité. Souvent observé comme étant un matériau très durable, il sera possible en général de maintenir des charges sur les éléments en mâchefer.

3. Des projets exemplaires

La rareté des travaux scientifiques spécifiques au mâchefer n'empêche tout de même pas de réaliser des rénovations exemplaires.

Quatre fiches accompagnent ce document. Ces exemples seront détaillés en plusieurs parties. Dans un premier temps, une mise en contexte sera réalisée, avant d'aborder les caractéristiques techniques et certains choix de conceptions intéressants à relever. Les informations apportées ne sont pas forcément particulières à la rénovation du mâchefer ou du bâti ancien mais apparaissent tout de même dans ce rapport car cela permet de rappeler qu'une rénovation est performante lorsque le projet est global. L'isolation des murs seuls ne constituerait pas une rénovation exemplaire. Enfin, nous nous focaliserons sur des aspects techniques précis portant sur le matériau qui nous intéresse.

Numéro	Maître d'œuvre	Type de bâtiment	Type de mâchefer	Localisation	Date de construction
1	SILO Architectes	Maison individuelle	Parpaings	Saint-Martin d'Hères	Années 1930
2	Côté Travaux : Odette Frering	Logements collectifs	Briques	Pélussin	Fin XIXème siècle
3	DETRY-LEVY & Associés	Maison individuelle	Banché	Caluire-et-Cuire	1931
4	Gilles Vuillaumier (Auto-rénovation)	Appartement	Banché	Villeurbanne	1911

Tableau 1. Synthèse des rénovations étudiées

4. Bonnes pratiques et points de vigilance spécifiques au bâti ancien et au mâchefer

Avant tout il est important de rappeler que le « mâchefer » désigne un ensemble de matériaux pouvant avoir des propriétés significativement différentes. Nous tenterons donc de proposer des bonnes pratiques à partir de l'analyse des projets précédents, en gardant un regard critique sur leur pertinence vis-à-vis des différents mâchefers. L'objectif n'est pas de proposer une manière standard de rénover un bâtiment en mâchefer, mais de proposer des pistes de réflexions pour trouver des solutions adaptées. Ces pistes de réflexions n'aboutissent pas forcément sur une ou des réponses définitives, l'exercice est aussi de montrer les discussions entre experts qui peuvent exister actuellement. Cette partie sera enrichie des informations obtenues auprès de différents professionnels du bâtiment et des bonnes pratiques et points de vigilances trouvés dans la littérature.

Nous proposerons 7 pistes de réflexion.

4.1. Installer un système de ventilation

Observations

Chacune des rénovations étudiées a mis en place un système de VMC. Bien qu'ils soient de différents types (simple flux ou double flux), ils garantissent un bon renouvellement de l'air intérieur.

En effet, les bâtiments anciens sont construits de telle sorte que les échanges hydriques entre l'intérieur et l'extérieur sont en général bien maîtrisés grâce notamment à la perspiration des parois et à une mauvaise étanchéité à l'air (Figure 9). Il est donc important que les travaux de rénovation n'entraînent pas une accumulation de l'eau à l'intérieur.

De nombreuses sources d'humidité (salles d'eau, cuisine, respiration des occupants, plantes, etc.) mènent l'air intérieur à être très chargé en vapeur d'eau. Pour éviter l'apparition de pathologies liées à l'eau (moisissures, condensation de l'eau dans le mur, inconfort des habitants), il est important de renouveler cet air. Comme nous

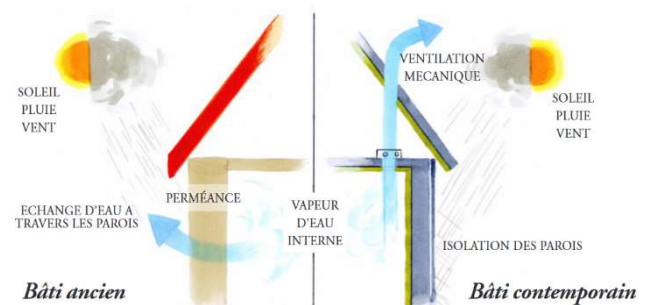


Figure 9. Schéma de l'équilibre hygrothermique dans le bâti ancien et contemporain. Source : [34]

l'évoquions, à l'origine l'air du bâti ancien était renouvelé naturellement par les imperfections d'étanchéité à l'air. Cependant, les enjeux de rénovation actuels mènent à contrôler l'air qui entre et qui sort des bâtiments afin de maîtriser les déperditions thermiques dues au renouvellement de l'air. Ce contrôle passe notamment par la mise en œuvre d'une très grande étanchéité à l'air des parois extérieures et la création d'ouvertures volontaires par lesquelles l'air qui circule est maîtrisé grâce à un système de ventilation. L'augmentation de l'étanchéité à l'air des parois perturbe le fonctionnement originel du bâti ancien, c'est pourquoi la mise en place d'une VMC et le contrôle régulier de son bon fonctionnement sont essentiels.

4.2. Gérer les remontées d'humidité

Observations

La ventilation naturelle du vide sanitaire du bâtiment 1 est améliorée.

La ventilation naturelle du garage du bâtiment 2 est améliorée.

L'enduit du bâtiment 1 a été remplacé par un enduit à la chaux.

L'enduit du rez-de-chaussée du bâtiment 2 a été enlevé.

La possibilité pour l'eau de pouvoir remonter dans les murs est normale dans le bâtiment ancien, lors de la rénovation il est important d'en tenir compte. A leur construction, la gestion de ces sources d'humidité était maîtrisée grâce à un principe simple : les murs et le sol avaient la possibilité d'évacuer l'humidité rapidement en séchant. Aujourd'hui, l'application de matériaux fermés à la vapeur d'eau sur le sol et les murs peuvent mettre en péril le fonctionnement hygrothermique du bâti ancien (Figure 10). Plusieurs professionnels du bâtiment proposent seulement de bloquer les remontées d'humidité sans réfléchir à l'importance de l'évaporation de l'eau. Cette solution ne devrait pourtant venir qu'en second temps, si l'humidité persiste.

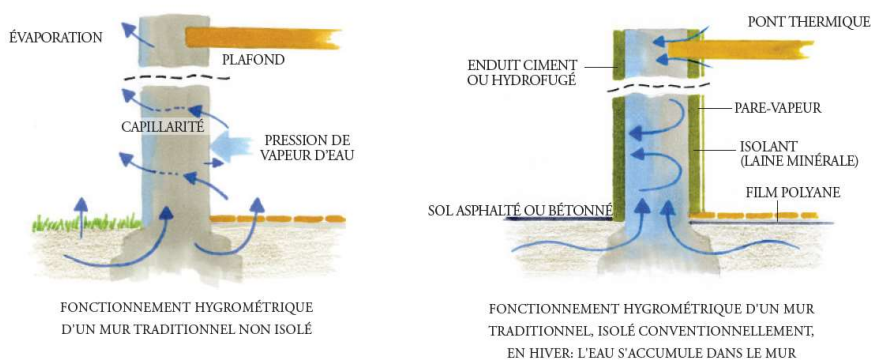


Figure 10. Schéma du fonctionnement hygro-métrique d'un mur ancien. Source : [34]

Tout d'abord, une première remarque, en général bien connue des maîtres d'œuvre est que l'imperméabilisation des sols environnant le bâti et du plancher bas engendrent l'accumulation de l'eau dans la terre et ne laisse à l'eau que les murs pour s'évacuer. Il faut donc laisser à nouveau la possibilité de sécher aux sols extérieurs et intérieurs. Pour le sol extérieur, il est recommandé d'enlever tous les éléments limitant l'évaporation de l'eau et de mettre des drains. Pour le sol intérieur, les fiches Atheba (amélioration thermique du bâti ancien), proposées par Maisons Paysannes de France, distinguent deux types de planchers bas : les planchers sur « terre-plein » et

les planchers sur espaces non chauffés. En ce qui concerne les planchers sur « terre-plein », on commence par ôter les éléments non-perspirants tels que les chapes ou dalles de béton. Puis, le principe le plus pertinent est la mise en place d'un hérisson ventilé et de drains. Finalement, un plancher perméable à la vapeur d'eau est posé. Pour les planchers sur un espace non chauffé, il faut s'assurer de la bonne ventilation de ce dernier [34].

Il faut ensuite garantir la capacité aux murs à évacuer les remontées d'humidité. Si l'enduit diminue cette capacité et que la paroi n'est pas sensible aux projections d'eau, on peut simplement l'ôter, ou alors l'enlever pour le remplacer par un enduit plus adapté ou une ITE (voir 4.3. et 4.7.).

Ces interventions permettront de conserver le fonctionnement hygrothermique originel du bâti.

Finalement, si les murs ne sèchent pas ou s'il n'est pas possible d'enlever suffisamment de surface imperméable autour du bâtiment, il existe plusieurs méthodes pour empêcher l'humidité de circuler dans les murs. Une solution, dite d'électro-osmose-phorèse, est d'implanter des électrodes (en cuivre dans le mur et en fer dans le sol) afin d'inverser la polarité mur/sol, sans apport d'énergie. Conjointement à la mise en place des électrodes, un produit spécifique d'électrophorèse est injecté dans le mur. Les particules, guidées par le nouveau champ électrique vont obturer le réseau capillaire et empêcher toute remontée d'humidité.

4.3. Réfléchir à l'isolation la plus adaptée

Observations

Une ITE est mise en œuvre sur les bâtiments 1 et 3.

Une ITI est mise en œuvre sur les bâtiments 2 et 4.

Un ECT est envisagé pour la rénovation du bâtiment 4.

Le choix de l'isolation ne peut pas être systématique. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte lorsqu'on choisit si l'isolation sera réalisée à l'intérieur, à l'extérieur ou s'il n'y aura pas d'isolation mais simplement un ECT. L'ECT est un enduit minéral utilisant sa grande effusivité pour qu'à une même température, la paroi paraisse plus chaude. Il est utilisé en intérieur pour augmenter le confort thermique, mais il ne diminue pas ou très peu les déperditions à travers le mur. Malgré tout, grâce à un meilleur équilibre du ressenti de température entre les murs et l'air ambiant les besoins de chauffage peuvent diminuer.

Parmi les paramètres qui jouent dans le choix, il y a évidemment la diminution des déperditions thermiques, le coût et le comportement hygrothermique des murs mais aussi la possibilité de pose (problèmes de l'ITI en site occupé, de l'ITE en appartement, ...), la perte de volume et la conservation du patrimoine.

En effet, un ECT ne diminuera pas les déperditions thermiques contrairement à une isolation. D'après des personnes vivant dans des bâtiments en mâchefer non isolés, un certain confort thermique existe, il relèvera donc du maître d'ouvrage de choisir dans quelle mesure est-ce que l'isolation est indispensable. Il est également important de noter qu'une isolation par l'intérieur augmente les risques de pathologies. En hiver, le mur de mâchefer, isolé des températures chaudes de l'intérieur, sera froid. Un risque de condensation existe donc à l'interface entre l'isolant et le mâchefer. Ceci peut provoquer une diminution des performances thermiques attendues voire une

dégradation de l'isolant ou un éclatement dû au gel. La pose d'un pare-vapeur diminue ce risque (voir 4.5.).

Les avantages et inconvénients de chaque solution sont résumés dans le tableau 2. Ce tableau est construit en supposant que les besoins de perspiration sont pris en compte. Cependant, quelques nuances sont encore à apporter. Selon l'épaisseur des murs en mâchefer existant la conservation des propriétés d'inertie et le confort thermique préexistant varient. Ensuite, pour pallier le problème de l'épaisseur des doublages d'isolation intérieure ou extérieure, il existe des enduits thermo-isolant (ETI) permettant de créer une couche isolante sur quelques centimètres seulement. Le bureau d'étude Amstein+Walthert, préconise l'utilisation des enduits du type Diathonite Evolution (marque Diasen) et Unilit 20 (marque Unilit). Ces solutions engendrent cependant des coûts importants. Enfin, une solution n'est pas à choisir pour l'ensemble du bâtiment. Par exemple, l'attention portée aux déperditions thermiques est influencée par l'orientation du mur et les apports solaires. Au niveau de la rénovation d'un ensemble de logement collectifs, telle que la Grande Cité Tase à Vaulx-en-Velin, l'architecte Manuela CERTAN explique qu'une longue réflexion a été menée au bout de laquelle la meilleure solution a été d'isoler les rez-de-chaussée par l'intérieur, d'isoler les combles et de changer certains éléments ponctuels tels que les menuiseries et les appuis de fenêtres, mais pour des questions de patrimoine, de coût et d'occupation l'isolation du reste des étages n'était pas envisageable.

	AVANTAGE	INCONVENIENT
ENDUIT CORRECTEUR THERMIQUE INTERIEUR	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Finition mince ✓ Confort thermique : casse l'effet de paroi froide ✓ Economique ✓ Travaux légers en site occupé ✓ Conservation de la façade 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Ne limite pas les déperditions thermiques ✗ Risque de condensation dans le mur
ISOLATION INTERIEURE	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Confort thermique : casse l'effet de paroi froide ✓ Confort acoustique ✓ Diminue les déperditions thermiques ✓ Conservation de la façade 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Consomme du volume ✗ Ponts thermiques (risques de pathologies : condensation, moisissures, ...) ✗ Risque de condensation dans le mur ✗ Difficile en site occupé ✗ Coûts élevés
ISOLATION EXTERIEURE	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Confort thermique : paroi chaude ✓ Confort acoustique ✓ Evite la condensation dans le mur ✓ Diminue les déperditions thermiques ✓ Limite les ponts thermiques ✓ Faisable en site occupé ✓ Pas de perte de volume ✓ Confort d'été : conserve l'inertie de la paroi ✓ Meilleure gestion de l'étanchéité à l'air 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Besoin de pouvoir modifier la façade ✗ Perte de l'aspect initial du bâtiment ✗ Coûts élevés ✗ Besoin de pouvoir augmenter le volume à l'extérieur

Tableau 2. Avantages et inconvénients des principales solutions de rénovation thermique

4.4. Tenir compte de l'humidité en partie basse en ITE

Observations

Les isolants en partie basse des bâtiments 1 et 3 sont imputrescibles.

En ITE l'isolation doit descendre sous le niveau de la dalle du plancher bas afin de couper le pont thermique qui pourrait exister. Deux cas existent alors : le plancher bas est suffisamment au-dessus du niveau du sol ou le plancher bas est au niveau du sol ou en-dessous.

Dans le premier cas, celui du bâtiment 1 avec un vide sanitaire par exemple, l'isolant peut être posé au-dessus du niveau du sol. Les remontées d'humidité sont ainsi coupées. En partie basse du mur, le mur peut tout de même avoir tendance à avoir un taux d'humidité élevée. L'isolant est donc imputrescible et perspirant.

Dans le second cas, celui du bâtiment 3, l'isolant doit descendre en-dessous du niveau du sol. Il doit donc être perspirant et imputrescible, mais aussi jouer le rôle de rupture capillaire.

4.5. Poser un pare-vapeur en ITI

Observations

Un pare-vapeur a été mis en œuvre dans le bâtiment 2.

Un pare-vapeur sera mis en œuvre dans le bâtiment 4.

Comme c'est évoqué dans la partie 4.3., en ITI il y a un plus grand risque de condensation de la vapeur d'eau à l'intérieur du mur. En effet, en ITI la maçonnerie est froide, donc l'eau a davantage tendance à se condenser dans ses pores, et notamment à l'interface avec l'isolant. Cela peut créer des problèmes importants (éclatement dû au gel, dégradation de l'isolant, ...). Pour éviter cela, les apports d'humidité (respiration, douche, cuisine, plantes...) ne doivent pas migrer dans le mur (isolant et mâchefer). Ils sont bloqués grâce à un pare-vapeur posé en partie intérieure. L'humidité éventuelle qui pénétrerait dans le mur pourra s'évacuer du côté extérieur grâce à l'ouverture à la vapeur d'eau des différentes couches du mur (isolant, mâchefer, enduit). Il est essentiel que la pose du pare-vapeur soit la plus parfaite possible car chaque imperfection produira une concentration de l'humidité importante.

Une membrane plus récente, appelée frein vapeur hygrovariable permet au mur de sécher également du côté intérieur lorsqu'il n'y a pas de risque que l'humidité du logement pénètre la paroi. En hiver, l'humidité relative de l'air intérieur est plus grande que celle du mur. Pour éviter que l'humidité ne migre à l'intérieur du mur, la membrane fonctionne comme un pare-vapeur classique en étant imperméable à la vapeur d'eau. En été, il y a des risques que ce soit l'humidité extérieure qui migre dans la paroi, la membrane est donc ouverte à la vapeur d'eau et permet au mur de sécher en évaporant également du côté intérieur.

Afin de faciliter les transferts de vapeur dans le mur et diminuer les risques liés à ce principe constructif il faut garantir une continuité entre l'isolant et la maçonnerie en mâchefer. Cela signifie qu'aucune lame d'air ne doit se trouver à cette interface. En fonction de l'isolant utilisé, l'utilisation d'un gobetis peut s'avérer pertinente.

4.6. Utiliser des isolants biosourcés

Observations

De la fibre de bois a été posée sur les bâtiments 1 et 3.

De la ouate de cellulose aurait été utilisée pour la rénovation 2 si elle avait été plus récente.

Tout d'abord pour des raisons de cohérence avec les enjeux de rénovation du bâti en mâchefer, il y a une réflexion à avoir sur l'impact des matériaux mis en œuvre.

Ensuite, comme il est souvent répété dans ce rapport, il faut respecter la perspiration du mur. Les matériaux biosourcés ont des propriétés hygriques particulièrement intéressantes. Leur résistance à la diffusion de vapeur d'eau est en général faible (voir tableau 3) et ils ont une meilleure hygroscopicité que les fibres minérales (laine de verre, laine de roche). Cette dernière caractéristique leur permet de mieux adsorber la vapeur d'eau, donc de faciliter le séchage du mur.

Isolant	Masse volumique apparente en kg/m ³	Conductivité thermique en W/(m.K)	Chaleur spécifique en J/(kg.K)	Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ
Panneaux fibres de bois haute densité	140/280	0,038/0,055	1600/2300	3/15
Fibres de bois semi-rigide	35/50	0,038/0,042	1600/2300	1/2
Panneau de liège expansé	100/150	0,036/0,042	1700/2000	5/30
Liège expansé (vrac)	70/100	0,036/0,042	1700/2000	1/3
Ouate de cellulose (soufflée ou projetée)	25/65	0,038/0,044	1600/2100	1/2
Laine de coton recyclée (Métisse)	18/75	0,039/0,048	1200/1400	2/3
Laine de chanvre	25/40	0,039/0,042	1300/1700	1/2
Laine de lin	20/35	0,037/0,044	1300/1700	1/2
Laine de mouton	15/25	0,035/0,045	1000/1800	1/2

Tableau 3. Principaux isolants biosourcés. Source : [35]

Pourtant, comme nous le précisons dans la partie 4.3., malgré la pose d'un pare-vapeur, le risque de condensation dans le mur en ITI n'est pas négligeable. Par conséquent, les isolants biosourcés, à l'exception du liège, risquent de se dégrader et de voir l'apparition de moisissures.

4.7. Utiliser des enduits à la chaux

Observations

Des enduits à la chaux ont été mis en œuvre sur chaque bâtiment.

Dans le domaine du bâtiment un enduit est le mélange d'un liant, d'agrégats et d'eau, donnant une pâte plus ou moins dense. Ils peuvent être minéraux, cela signifie que le liant est du plâtre, de la chaux, du ciment ou de l'argile, ou organique, c'est-à-dire composés de résine acrylique issue du raffinage du pétrole. Les rénovations des HBM dans les années 1980 ont montrées que ces derniers sont à proscrire pour la rénovation du mâchefer [15]. En plus d'avoir un impact environnemental médiocre, ils sont imperméables à la vapeur d'eau. Parmi les enduits minéraux, ceux au plâtre et à l'argile sont sensibles à l'eau liquide donc ne peuvent pas être exposés à la pluie. Ceux au ciment ne sont pas perspirants et ceux à la chaux possèdent des caractéristiques particulièrement intéressantes pour le mâchefer. En effet, les enduits à la chaux sont perspirants et hygroscopiques. Comme les isolants biosourcés, mais de manière plus prononcée, cela signifie qu'ils vont avoir tendance à capter l'humidité environnante, donc « aspirer » l'eau contenue dans le mur. Elle a aussi un pouvoir d'assainissement des murs humides : les bactéries et les champignons se développent moins à son contact [36]. Le CAUE 69 recommande donc leur utilisation sur les HBM, bâtiments en mâchefer banché construits dans les années 1930.

Dans un bâtiment en mâchefer, des enduits sont utilisés à différents endroits. Dans un premier temps, afin de limiter l'effritement, il est possible de projeter un lait de chaux (mélange de chaux et d'eau) sur les murs. Ensuite, on peut employer un gobetis. Le rôle du gobetis est de créer une interface entre le mur existant et un corps d'enduit ou un isolant afin de favoriser la migration de l'eau dans la paroi. Il est aussi souvent utilisé pour faciliter l'accroche de l'enduit de finition sur le mur. Les enduits à la chaux peuvent donc également être utilisés pour la finition intérieure ou extérieure. Finalement, on les retrouve pour la correction thermique des parois (voir 4.3.).

La composition des mâchefers étant différente d'un bâtiment à l'autre, il est conseillé de faire les mélanges sur place afin de pouvoir faire des tests et ajuster les formulations. Selon le taux de ciment ou de chaux dans le mâchefer, la tenue et la réaction de l'enduit ne seront pas les mêmes. L'utilisation d'enduits « bâtards » chaux/ciment ou chaux/argile peut d'ailleurs être préférée, du moment qu'il est minéral et perspirant.

4.8. Critique

Pour la plupart, les principes évoqués ci-dessus correspondent finalement aux conseils généraux pour le bâti ancien. En effet, plusieurs maîtres d'œuvre ont confié se référer aux bonnes pratiques connues pour le pisé. Pour les professionnels les plus consciencieux, le manque de connaissances théoriques du matériau est donc comblé par un respect de règles s'appliquant à un bâti plus exigeant que celui étudié. En effet, nous noterons que le mâchefer semble subir moins de pathologies que les autres matériaux de bâti ancien.

D'après la modélisation WUFI des différentes options d'isolation des cités HBM de Lyon, aucun principe constructif ne présente réellement de risque majeur [18]. En ce qui concerne les bâtiments en mâchefer banché, même une isolation par l'intérieur ne devrait pas engendrer de condensation dans les parties hautes des murs à partir du moment où la perspiration des murs est prise en compte, qu'un pare-vapeur est posé et qu'on installe une ventilation mécanique.

Finalement, les pratiques à noter, spécifiques au mâchefer sont :

- Une réflexion particulière dans les choix d'isolation, en tenant compte des propriétés thermiques du matériau ;

- Une attention portée aux poussières de chantier tant que les études sur la toxicité ne sont pas plus développées ;
- Un traitement de l'effritement éventuel ;
- Un accrochage suffisant des éléments portés par les murs en mâchefer (ossature, isolants rigides, ...).

Conclusion

Dans un contexte de réduction des émissions de gaz à effet de serre et des impacts sur la biodiversité, le secteur du bâtiment se doit de rénover l'existant plutôt que de construire du neuf. Avec la loi relative à la transition énergétique et à la croissance verte de juillet 2017, le gouvernement s'est donné pour objectif de rénover 500 000 logements par an. Parmi ces constructions existantes, le bâti ancien représente plus du tiers. Ce dernier regroupe les bâtiments construits selon des savoir-faire locaux (pisé, pierre, colombage, brique, etc.) et se caractérise par des comportements hygrothermiques communs : sensibilité à l'eau, perméabilité à la vapeur d'eau, pas de coupure de capillarité au niveau des soubassements, ventilation naturelle. Le bâti en béton de mâchefer appartient à ce groupe. Ce matériau est composé de scories de houilles (résidus de l'industrie sidérurgique) associé à un liant (chaux ou ciment). Il a été utilisé pendant environ un siècle, du milieu du XIX^{ème} siècle au milieu du XX^{ème} siècle durant lequel il a connu des évolutions importantes. De plus, il a très peu été étudié par la communauté scientifique. Couplé à sa grande diversité de composition et d'utilisation (pisé, banché, sous forme de parpaings ou de brique), les connaissances techniques sont peu développées. Ainsi, après avoir synthétisé ce qui était connu de ce matériau, nous nous sommes demandés comment se rénovent les bâtiments en mâchefer aujourd'hui.

Les valeurs connues des principales grandeurs hygrothermiques et mécaniques sont les suivantes:

Grandeur	Symbole	Valeur
Conductivité thermique	λ (en W/(m.°C))	0,25/0,75
Masse volumique	ρ (en kg/m ³)	800/1200
Porosité	-	32%
Résistance à la vapeur d'eau	μ (-)	5/20
Teneur en eau à 80% HR (à 20°C)	w_{80}	1%
Résistance à la compression	σ_c (en MPa)	1/4,5

Tableau 4. Synthèse des caractéristiques du mâchefer

La problématique de la rénovation du bâti en mâchefer n'en est encore qu'à ses débuts, impulsée depuis 2018 par le CAUE de Rhône-Métropole, par la création d'un groupe de travail. Les mesures réalisées jusqu'ici permettent simplement de fournir la tendance des propriétés du matériau : capillaire, perspirant, faiblement hygroscopique, faiblement conducteur de la chaleur en comparaison de la plupart des maçonneries.

Malgré tous, des projets de rénovations globales existent tels que nous l'avons vu à Saint-Martin d'Hères, à Pélussin, à Caluire-et-Cuire et à Villeurbanne. De ceux-ci, on remarque que les spécificités des différents mâchefers ne sont, aujourd'hui, pas suffisamment connues pour apporter des solutions particulières à ce matériau. Les réponses apportées par les maîtres d'œuvre sont celles adaptées au bâti ancien de manière générale, notamment celles du pisé.

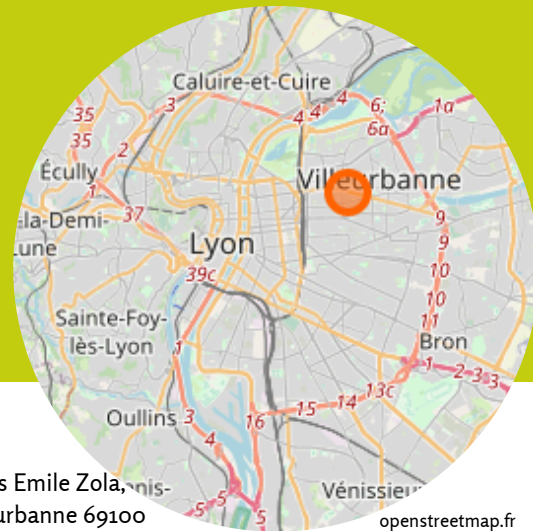
Ce rapport tente de résumer la situation actuelle de la rénovation du mâchefer afin que les particuliers et les professionnels comprennent les enjeux face à ce type de bâti. L'état de la connaissance sur ce matériau n'a cependant pas vocation à rester celui que nous décrivons. Au cours des deux années à venir, des campagnes d'essais en laboratoire sur de nombreux échantillons et une étude complète du matériau, également illustrée par des fiches de retour d'expérience devraient être publiées par le groupe de travail Mâchefer.

Bibliographie

- [1] CITEPA. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten, juillet 2019.
- [2] ADEME. Déchets chiffres-clés, Edition 2020, septembre 2020.
- [3] MTEs. Plan climat : plan rénovation énergétique des bâtiments, novembre 2017.
- [4] ANAH. Chiffres clés de l'ANAH 2019, janvier 2020.
- [5] ADEME. Enquête TREMI : campagne 2017, octobre 2018.
- [6] CEREMA Est. Synthèse bibliographique des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux biosourcés, octobre 2016.
- [7] BRGM. Mâchefers d'incinération : un nouveau matériau pour le développement durable, les enjeux des géosciences, n°5, février 2004.
- [8] Dictionnaire Larousse. Scorie [en ligne]. Disponible sur : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/scorie/71579> (Consulté le 15/04/2021)
- [9] Dictionnaire Larousse. Houille [en ligne]. Disponible sur : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/houille/40505> (Consulté le 15/04/2021)
- [10] Bulletin de Liaison des Professeurs d'Histoire-Géographie de l'académie de Reims. Les trois âges de la mine, N°27, 2002 [en ligne]. Disponible sur : http://www.cndp.fr/crdp-reims/ressources/brochures/blphg/bul27/ages_mine.htm (Consulté le 04/05/2021)
- [11] CEREMA. Rénovation du bâti ancien : le Cerema appuie le CAUE du Rhône dans la connaissance des bétons de mâchefers [en ligne]. Disponible sur : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/renovation-du-bati-ancien-cerema-appuie-conseil-architecture> (Consulté le 15/04/2021)
- [12] Wikipédia. Houille [en ligne]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Houille> (Consulté le 15/04/2021)
- [13] Aulas Mathilde. Les matériaux de construction peuvent-ils être patrimoine ?. Master II Pro : Patrimoine Architectural et Urbain de l'époque Médiévale à l'époque Contemporaine, septembre 2015 [en ligne]. Disponible sur : <https://fr.calameo.com/books/00269676743185833a0e3> (Consulté le 27/06/2021)
- [14] CEREMA Centre-Est. L'habitat en béton de mâchefer, s.d.
- [15] Avenier Cédric, Jorge Laura, Mazel Ivan, Cluzel Grégory. Mise en valeur et modernisation des Cités lyonnaises d'HBM : L'exemple des cités de Grand Lyon Habitat, 2019
- [16] Site du CAUE 69 [en ligne]. Disponible sur : <http://www.caue69.fr/> (Consulté le 15/04/2021)
- [17] Site du BE Amstein+Walthert [en ligne]. Disponible sur : <https://amstein-walthert.ch/fr/> (Consulté le 15/04/2021)
- [18] Amstein+Walthert, Etude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer : volet thermique, hygrothermique et énergétique – étude comparative des réhabilitations et méthodologies, Lyon : Grand Lyon Habitat, 2019
- [19] CEREMA Centre-Est. Mâchefer de construction : Essais en laboratoire, novembre 2018
- [20] Coignet François. Constructions économiques en béton pisé par M.François Coignet, Le journal de l'exposition universelle, gallica.bnf.fr / BnF, 1855
- [21] La maison Saint-Gobain. Rénovation d'une maison en mâchefer : nos conseils pour ne pas vous casser les dents ! [en ligne]. Disponible sur : <https://www.lamaisonsaintgobain.fr/guides-travaux/renovation-maison/renovation-maison-machefer-conseils> (Consulté le 12/04/2021)
- [22] La maison construction. Un mur à rénover, juin 2019 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.maison-construction.com/un-mur-a-renover.html> (Consulté le 10/05/2021)
- [23] Travaux bricolage. Mur en mâchefer : tout savoir sur les constructions en mâchefer, avril 2019 [en ligne]. <https://www.travauxbricolage.fr/travaux-interieurs/cloison-amenagement/murs-machefer/> (Consulté le 10/05/2021)
- [24] Cluzel Grégory. Connaissance des mâchefers : Compte-rendu réunion, 2 avril 2021.
- [25] Brief homly mag : Je rénove ma maison en mâchefer, s.d.
- [26] Les granulats légers. Techniques de l'ingénieur, 1 décembre 2004, TBA 1112, p 21

- [27] Heitz Philippe, Morel Jean-Claude, Fabbri Antonin, et al. L'isolation du pisé : pertinence et principes. Construction terre, Lyon : LGCB-ENTPE, 2015, 12 p.
- [28] Cluzel Grégory. Connaissance des mâchefers : Compte-rendu réunion, 15 juin 2018
- [29] Cluzel Grégory. Connaissance des mâchefers : Compte-rendu réunion, 28 novembre 2018
- [30] Oïkos. Formation : confort hygrothermique et isolation, 2020
- [31] Atelier Chevillotte. Diagnostic pour réduire l'humidité dans l'habitat [en ligne]. Disponible sur : <https://www.atelier-chevillotte.fr/diagnostic-humidite.htm> (Consulté le 28/06/2021)
- [32] Oliva Jean-Pierre, Courgey Samuel. L'isolation thermique écologique. terre vivante. 2010, p 88-89
- [33] Maisons Paysannes de France. Connaissance du bâti ancien : Comprendre son comportement hygrothermique, ATHEBA, juin 2010, 4 p.
- [34] Maisons Paysannes de France. Interventions à réaliser, à éviter : Les planchers dans le bâti ancien, Décembre 2010, 5 p.
- [35] Association Arcanne. Base de données matériaux, avril 2021, 6 p. [en ligne]. Disponible sur : <https://associationarcane.files.wordpress.com/2021/04/bdd-materiaux-courgey-oliva-2021-04.pdf> (Consulté le 28/06/2021)
- [36] Cerro Monique. Formation pour Oïkos : Réaliser des enduits et correcteurs thermiques à base de chaux et terre, juin 2021
- [37] Oïkos. Site internet [en ligne]. Disponible sur : <https://oikos-ecoconstruction.com/> (Consulté le 28/06/2021)

Rénovation d'un appartement en mâchefer de 1911



Cours Emile Zola, Villeurbanne 69100
openstreetmap.fr

Fiche d'identité

Type de bâtiment

Appartement situé au premier étage dans un immeuble de 6 niveaux construit en 1911 en **mâchefer banché** d'une épaisseur d'environ 60 cm, à l'exception de la façade nord qui est en pierres. Certains comblements d'ouvertures ont été réalisés en moellons de mâchefer. La forme de l'appartement aujourd'hui n'est très probablement pas celle de 1911. Des ouvertures sur les appartements adjacents ont été comblées et des cloisons ont été enlevées pendant son siècle d'existence.

Coûts

Budget de 80 000 €

Les travaux les plus coûteux n'ont pas encore été réalisés. Actuellement, les principaux coûts sont les suivants :

- Changement menuiseries : 12600 €, soit 3150 €/fenêtre (dépose/ évacuation des anciens vitrage/pose des nouveaux)
- Coulage chape béton et pose pare-vapeur : environ 1600 €
- Comblement des saignées et chaulage des murs : quelques centaines d'euros
- Le traitement du bois a été pris en charge par la copropriété

Acteurs

Auto-rénovation : Particuliers

Thermicien : Jean-Luc Delpont - BE thermique Héliasol

Surface

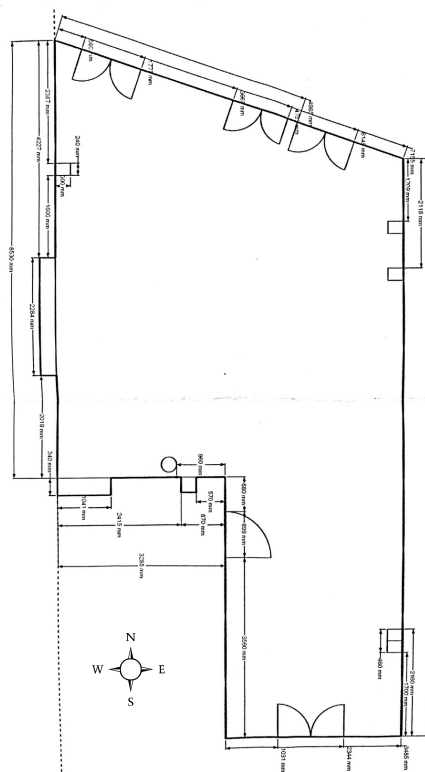
70 m²

En bref

Début 2020, un couple achète cet appartement et, rapidement les travaux commencent. L'objectif est de créer un logement confortable acoustiquement et thermiquement, tout en diminuant le plus possible les consommations énergétiques. Les propriétaires souhaitent également mettre en place des matériaux respectueux de l'environnement dans la mesure où le budget le permet. La conception et la réalisation se font en grande majorité en auto-rénovation. Ils s'entourent tout de même d'un thermicien pour les conseiller et font appel à des professionnels pour certains postes essentiels (coulage de la chape, pose des fenêtres ...).



1. Vue satellite du bâtiment



2. Plan de l'appartement

Caractéristiques techniques

Les travaux étant en cours, les caractéristiques proposées ici correspondent au projet envisagé.

Isolation

Type de paroi	Procédés constructifs (de l'intérieur de la paroi vers l'extérieur)	Résistance thermique* (en m ² .K/W)
Plancher bas	Finition carrelage ou parquet /Chape flottante enrobant les tuyaux du plancher chauffant /Panneau de liège expansé /Chape liaisonnée ciment (50 mm) /Pare-vapeur /Plancher sur solive existant	1,2
Murs mâchefer	Fermacell /Pare-vapeur /Biofib trio (60 mm) /Mâchefer banché (~500 mm) /Enduit extérieur	2,8
Mur pierre (façade nord)	Enduit de correction thermique /Pierre (500 mm) /Enduit extérieur	-
Menuiseries	Double-vitrage et menuiseries en chêne pose 'en neuf' en tunnel	0,7
Plancher haut	Plaques lourdes tenues par des suspentes anti-vibratiles /Ouate de cellulose (150 mm) /Plancher sur solive existant	4

Equipements

Ventilation : Ventilation mécanique contrôlée double flux

Chauffage et eau chaude sanitaire : Chaudière gaz à condensation alimentant un plancher chauffant et un ballon d'eau chaude.

Des choix de conception

Confort acoustique

Une attention particulière est portée au confort acoustique. Elle se caractérise par une réflexion portée sur l'intégralité des surfaces délimitant l'appartement. Tout d'abord, le principe masse/ressort/masse sera appliqué au plancher grâce à un isolant pris entre une chape liaisonnée et une chape flottante enrobant les tuyaux du plancher chauffant. Ensuite, l'isolation acoustique des parois verticales est assurée par l'isolant thermique posé sur une ossature désolidarisée des murs existants et des plaques de Fermacell, plus lourdes que du BA13. Le double vitrage atténue considérablement le bruit provenant de la rue côté nord. Enfin, l'isolation acoustique du plafond sera garantie par des plaques lourdes suspendues par un système anti-vibratile, diminuant les bruits de chocs, et une épaisseur importante d'isolant entre les plaques et le plancher haut existant.

Conservation du patrimoine

Les fenêtres ont été remplacées 'en neuf' en faisant réaliser des menuiseries sur-mesure, identiques à celles déposées afin de conserver l'esthétique de la façade extérieure du bâtiment. Il a notamment été fait attention à la référence de couleur de la peinture des menuiseries. De plus, les lambrequins ont été conservés et des jalousies, caractéristiques de l'architecture lyonnaise, seront installées.



3. Façade nord. A gauche : fenêtre neuve
A droite : fenêtre ancienne

Reprise des désordres initiaux

Problème : Un linteau est fissuré, cela ne menace cependant pas la structure du bâti.

Solution : Le linteau est renforcé par deux barres d'acier traversantes le long de sa partie inférieure (photo 5). Cependant, la manière dont cela a été réalisé n'est pas très satisfaisante. En effet, il ne reste que deux ou trois centimètres pour réaliser les finitions entre la partie supérieure de la fenêtre et les barres en acier. Cela pose notamment un problème pour le retour d'isolant dans l'embrasure de la fenêtre. De plus, la réparation aurait pu être plus pertinente en réfléchissant à une reprise structurelle partielle du linteau.

Problème : Une partie des solives du plancher haut est attaqué par des insectes et des champignons.

Solution : Un traitement contre les insectes xylophages et un fongicide ont été injectés dans les solives par un professionnel.



4. Traces d'insectes xylophages sur les solives



5. Linteau fissuré renforcé

Alternatives au projet

Le traitement thermique par l'intérieur des parois d'un appartement ancien est une problématique pour laquelle deux solutions principales existent, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients : la correction thermique par un enduit ou le doublage par un isolant. Chaque mur ayant ses spécificités (matériaux, orientation, pièce en contact, etc.), plusieurs solutions peuvent être mises en oeuvre dans un même bâtiment.

Ces deux méthodes permettent la diminution de la consommation de chauffage en jouant sur différents phénomènes. La correction thermique permet d'équilibrer la température du mur extérieur avec le reste de la pièce. L'air n'a ainsi pas besoin d'être excessivement chauffé pour compenser la sensation de froid provenant des murs. Quant à l'isolation, elle conserve la chaleur à l'intérieur du logement.

	Avantage	Inconvénient
Enduit correcteur thermique	<ul style="list-style-type: none">✓ Finition mince✓ Esthétique✓ Confort thermique : casse l'effet de paroi froide✓ Economique	<ul style="list-style-type: none">* Ne limite pas les déperditions thermiques
Doublage isolant	<ul style="list-style-type: none">✓ Confort thermique : casse l'effet de paroi froide✓ Confort acoustique✓ Diminue les déperditions thermiques	<ul style="list-style-type: none">* Consomme du volume* Prix élevé

Le chantier



6. Appartement à l'achat



7. Démolition de l'existant



8. Mise à nu totale de l'appartement



9. Pose de vis croisées qui liasonneront la chape ciment et le parquet existant

10. Après chaulage des murs et coulage de la chape liaisonnée



Planning

- février 2020 - février 2021 : démolition de l'existant jusqu'à mise à nu des murs et planchers + changement des menuiseries
- mars 2021 : remise en état des évacuations
- avril 2021 : rebouchage et chaulage des murs + préparation et coulage de la chape liaisonnée

Note : La crise sanitaire a considérablement ralenti les travaux (fermeture des déchèteries, de certains magasins, ...)

Zoom sur la mise en oeuvre sur du mâchefer banché de 1911

Mise à nu du mâchefer

Le mur existant était recouvert de plâtre. Il a été ôté avec un burineur électrique. Ce travail produit beaucoup de poussière. De plus, les études sur le taux de composants toxiques dans le mâchefer ne permettent pas d'affirmer que les poussières de chantier sont sans risque. Il est donc essentiel de s'équiper d'un masque. La poussière très fine a également eu tendance à bloquer l'appareil en s'accumulant, engendrant un besoin de nettoyage régulier.

Le comblement des saignées

Les nombreuses saignées, laissées par d'anciennes tuyauteries en plomb, ont été comblées d'un mortier chaux/sable/chanvre/granules d'argile expansé. Celui-ci a été pensé pour reprendre les contraintes mécaniques tout en limitant sa masse grâce aux granules d'argile expansé.

Limitation de l'effritement

Les murs ont été chaulés avec du lait de chaux projeté afin de limiter l'effritement. En effet, les propriétaires ont remarqué que le mâchefer sur lequel ils travaillent est un matériau qui s'effrite particulièrement facilement. Simplement en frottant les murs avec la main, des granulats et de la poussière se détachent.

Incompatibilité chaux hydraulique/plâtre

La chaux choisie dans la préparation du mortier de rebouchage est de la chaux aérienne. Bien que toutes les chaux soient perméables à la vapeur d'eau et compatibles avec le bâti ancien, la chaux hydraulique n'est pas compatible avec le plâtre existant qui ne pouvait pas être parfaitement enlevé. En effet, un phénomène chimique produirait un gonflement de celle-ci et la dégradation rapide de l'enduit.



8. Comblement des saignées existante par un mortier chaux/chanvre/argile expansé

Sensibilité à l'eau du mur en ITI

Les matériaux de doublage qui seront mis en oeuvre respecteront les contraintes liées à la sensibilité à l'eau du mur en mâchefer et aux risques accrus en isolation thermique par l'intérieur (ITI). En effet, en ITI la maçonnerie est froide, donc l'eau a davantage tendance à se condenser dans ses pores, et notamment à l'interface avec l'isolant. Cela peut créer des problèmes importants (éclatement dû au gel, dégradation de l'isolant,...). Pour éviter cela, les apports d'humidité, souvent importants dans les logements (respiration, douche, cuisine, plantes...) ne doivent pas migrer dans le mur (isolant et mâchefer). Ils sont bloqués grâce à un pare-vapeur posé en partie intérieure. L'humidité qui serait éventuellement présente dans le mur pourra s'évacuer du côté extérieur grâce à l'ouverture à la vapeur d'eau des différentes couches du mur (isolant, mâchefer, enduit).

Source : sauf mention contraire, photos et documents reproduits avec l'aimable autorisation des propriétaires.

Rénovation d'une maison en mâchefer de 1931



Caluire-et-Cuire
69300

openstreetmap.fr

Fiche d'identité

Type de bâtiment

Maison individuelle de deux niveaux construite en 1931. Le rez-de-chaussée est en béton banché, l'étage est en mâchefer banché. Une extension en parpaings est ajoutée lors de la rénovation.

Coûts

Coût total : 234 400 € TTC

- Maîtrise d'oeuvre : 25 700 € TTC
- Travaux : 205 000 € TTC
 - Dont 148 000 € pour la rénovation
 - Dont 57 000 € pour l'extension
- Etudes : 3 700 €

Surface

Habitation existante : 106 m² sur deux niveaux

Extension : 27 m² sur un niveau

Acteurs

Maîtrise d'ouvrage : Particuliers

Maîtrise d'oeuvre : DETRY-LEVY & Associés

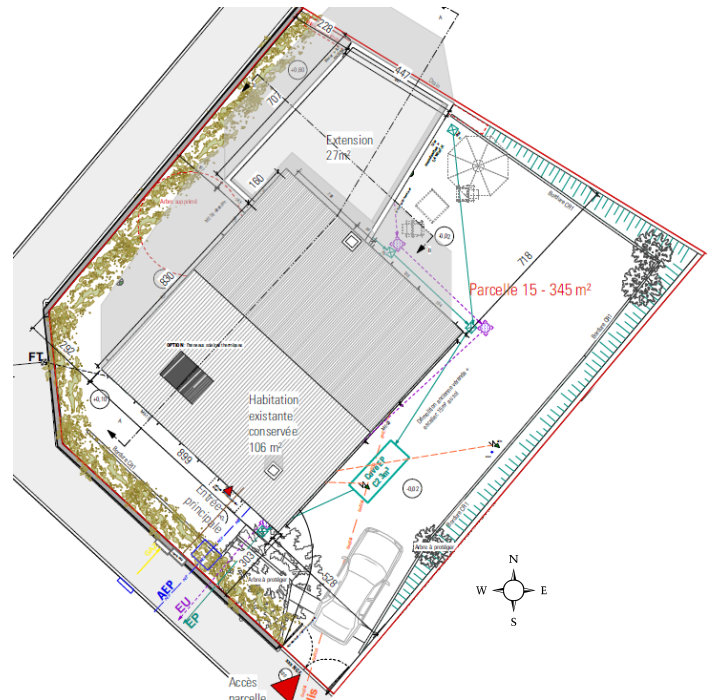
Contractant général : ATEKENERGIE bureau d'étude

Sous-traitants :

- Isolation : HALIS
- Menuiserie : Montbarbon
- Chauffage : TECKNI plomberie
- Ventilation : Société MAGNO

En bref

En début d'année 2019, cette maison trouve de nouveaux propriétaires ayant pour objectif de la rénover au niveau BBC Rénovation à travers une rénovation globale et performante. Ils s'entourent d'un maître d'oeuvre pour les accompagner dans la conception de leur projet et suivre les travaux. L'objectif a été atteint en faisant passer le bâtiment de la classe énergétique F (350 kWh/m²/an) à B (89 kWh/m²/an).



1. Plan masse du projet. Source : DETRY-LEVY&Associés



2. Vue sud des travaux finis.

Caractéristiques techniques

Isolation

Type de paroi	Procédés constructifs (de l'intérieur de la paroi vers l'extérieur)	Résistance thermique* (en m ² .K/W)
Plancher bas rénovation	Carrelage /Chape maigre (50 mm) /Polyuréthane projeté (120 mm) /Chape armée (70 mm) /Gravillons (50 mm)	5,6
Murs extérieurs rénovation	Enduit intérieur/ Mâchefer banché (600 mm) / Fibre de bois ISONAT Multisol (160 mm) /Enduit extérieur	5,3
Murs extérieurs extension	Plaque BA13 (12,5 mm) sur ossature métallique/ Pare vapeur /Fibre de bois ISONAT flex 55 (180 mm) /Parpaings (200 mm)/ Enduit extérieur	4,5
Menuiseries	Double vitrage 6/20/4 isolation renforcée avec gaz argon + faible émissivité avec couche d'oxydes métalliques sur vitrage intérieur. Menuiseries en pin lamellé-collé, finitions chêne. Pose en tunnel sur la limite extérieure de l'embrasure	0,77
Plancher haut rénovation : combles perdus	Plaque BA13 (12,5 mm) /Biofib Trio entre ossature acier galvanisé (160 mm) / Frein-vapeur /plancher sur lambourdes /ouate de cellulose projetée (350 mm)	11,6
Plancher haut extension : toit terrasse	Plaque BA13 (12,5 mm) /Biofib Trio (120 mm) /Pare-vapeur /Fibre de bois ISONAT Flex 55 (200 mm) /Plancher hourdis /Membrane bitume /Graviers	7,1

*Donnée par la maîtrise d'oeuvre ou calculée avec Ubakus

Précisions : Un retour d'isolant en fibre de bois de 40 mm est réalisé dans l'embrasure des fenêtres en tunnel

Equipements

Ventilation : Ventilation mécanique contrôlée double flux ATLANTIC Duocosy HR HY

Chauffage : Chaudière gaz à condensation alimentant un réseau de radiateurs avec robinet thermostatique + poêle à bûches 5 kW labellisé Flamme verte 7* en appoint

Des choix de conception

Simulation thermique dynamique

Préalablement à la réalisation des travaux le comportement hygrothermique du bâtiment a été modélisé sur le logiciel, dit de simulation thermique dynamique (STD), Pléiades Comfie. Cela permet d'optimiser la conception en termes de coûts et de consommations énergétiques. La rénovation est donc davantage adaptée aux objectifs et aux besoins des occupants.

Le confort d'été

Une grande attention a été portée au confort d'été. En effet, le contexte climatique actuel porte cette problématique au coeur des projets de rénovation performante. La réflexion a abouti sur la mise en place d'une isolation par l'extérieur en fibre de bois. Tout d'abord, **l'isolation par l'extérieur** permet d'utiliser l'inertie des murs en mâchefer au profit du confort d'été. L'inertie thermique est la propriété d'un bâtiment à s'opposer aux variations de températures. Deux phénomènes rentrent en jeu : la capacité des murs à conserver la température intérieure et la capacité des murs à transmettre lentement la chaleur qui les traverse (déphasage). L'épaisseur importante des murs du bâtiment (60 cm) lui confère surtout une bonne capacité à conserver la température intérieure. Quant à la fibre de bois en partie extérieure, au-delà des propriétés isolantes essentielles en hiver, dispose d'une faible diffusivité, ce qui augmente le déphasage. L'association de ces matériaux va donc permettre de lisser les températures intérieures. Notamment, en été, cela évitera les pics de chaleur en journée. Ensuite, des **brises soleils orientables (BSO)** ont été mis en place afin de limiter les apports de chaleur par le soleil trop importants en été.

Pourtant, d'autres éléments peuvent nuire au confort d'été. La ventilation double flux apporte un grand confort d'hiver car elle préchauffe l'air entrant. Le risque est qu'en été l'air entrant soit également préchauffé, empêchant la température de redescendre la nuit. Ce risque a été pris en compte grâce à un système de **by-pass régulé par une consigne**. Ce dernier permet à l'air entrant de contourner l'échangeur thermique. Enfin, l'isolation excessive du bâtiment ($R = 11,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ pour le plafond) peut également être source de surchauffe en été. De la même manière que pour la ventilation, il est important que la température intérieure puisse redescendre la nuit. Si la chaleur ne passe pas par les murs, il faudra que les occupants pensent à maintenir une **ventilation naturelle importante**.

Les contraintes de l'ITE

L'isolation thermique par l'extérieur est grandement facilitée par les façades régulières. Le choix a été fait de démolir le balcon, les escaliers, la véranda et de déposer la marquise. Ces éléments auraient pu être source de défauts de pose et de ponts thermiques.



3. Façade sud-est après dépose de l'escalier, du balcon, de la véranda et de la marquise

Alternatives au projet

Les propriétaires auraient souhaité un système de chauffe-eau solaire. Cependant, cette installation n'a pas été prise en compte suffisamment tôt dans la rénovation. En conséquence, l'ajout de ce système aurait eu un coût excessivement élevé. Il est donc important de le dimensionner et de l'intégrer dans les travaux globaux dès la phase d'avant-projet sommaire.

Le chantier



4. Façade sud-est avant les travaux

5. Pose des panneaux de fibre de bois



6. Fin des travaux

Planning

- juillet - août 2019 : Démolition
- septembre - octobre 2019 : Travaux sur le gros oeuvre
- novembre - décembre 2019 : Équipements + étanchéité + faux-plafonds, cloisons, enduits intérieurs
- janvier - février 2020 : Isolation extérieure et enduits extérieurs

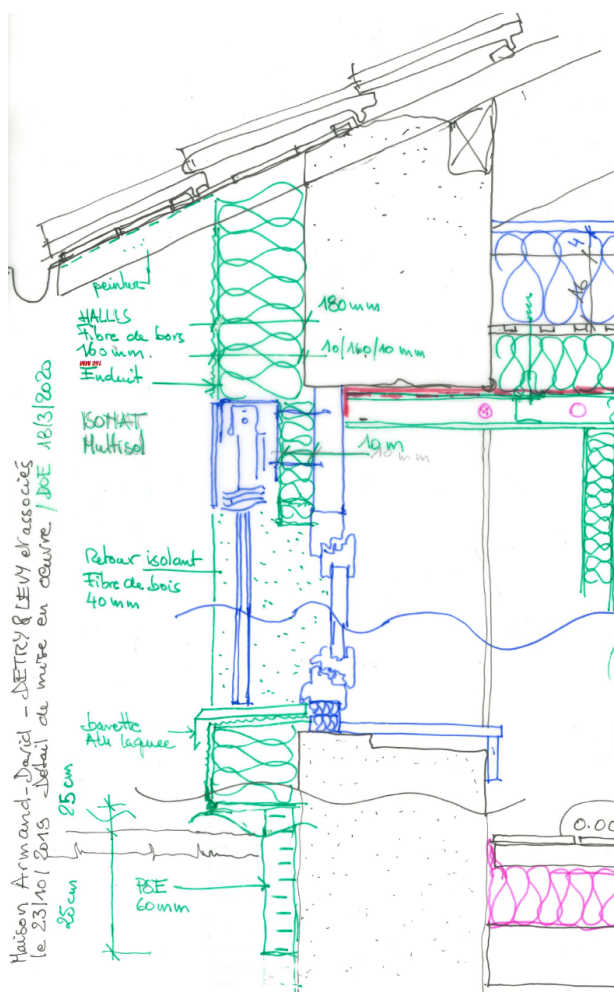
Zoom sur la mise en oeuvre sur du mâchefer banché de 1931

Perspiration du mur

Les apports d'humidité sont souvent importants dans les logements (respiration, douche, cuisine, plantes...). Or, le mâchefer est un matériau ouvert à la vapeur d'eau, cela signifie qu'elle va chercher à traverser le mur. Afin d'éviter que l'eau ne s'accumule dans le mur, et fasse apparaître des pathologies (éclatement dû au gel, diminution des performances thermiques ...), il est important que chaque couche du mur permette à la vapeur d'eau de s'évacuer. Ainsi, la laine de bois et les enduits à la chaux sont également perméables à la vapeur d'eau.

Sensibilité à l'eau de la fibre de bois

La fibre de bois est un matériau qui se dégrade lorsqu'il est exposé à une humidité trop importante. Elle ne peut donc pas être posée directement en contact avec le sol. Pour pallier ce problème la pose de la laine de bois ne commence qu'à 25 cm au-dessus du sol. Du polystyrène expansé (PSE) de 120 mm d'épaisseur, insensible à l'eau assure l'isolation thermique dans la partie basse du mur (figure 7).



7. Détails de mise en oeuvre. Source : DETRY-LEVY&Associés

Chevillage

Les panneaux en fibre de bois haute densité sont collés et chevillés comme l'exige le fabricant. Cependant, il y a une particularité dans cette rénovation car les chevilles utilisées sont plus grandes que ce qui s'utilise normalement et le nombre d'accroche est plus important. Les artisans ayant remarqué que le mâchefer de ce bâtiment était très friable, les chevilles de la marque Sto font 35 cm de long et rentrent de 20 cm dans les murs.

Source : Sauf mention contraire, les photos proviennent d'Olivier David

Réhabilitation d'une usine de tissage en logements collectifs



Pélussin
42410

openstreetmap.fr

Fiche d'identité

Type de bâtiment

Usine de tissage probablement construite à la fin du XIXe siècle. Il y a 2 niveaux, le rez-de-chaussée est en pierre, l'étage est composé d'une structure en poteau de pierre avec un remplissage des murs extérieurs en **moellon de mâchefer** de 10 cm d'épaisseur. La toiture à **shed** (toiture à forte déclivité) est en très mauvais état.

Surfaces

Existant : 243,2 m2 de surface construite totale sur 2 niveaux
Réhabilitation : 290 m2 de surface construite totale sur 3 niveaux
143 m2 SHAB sur 3 niveaux

Coûts

Coût des travaux : 170 000 € TTC

- voirie et réseau divers : 4 000 €
- maçonneries/démolition : 12 000 €
- charpente/ couverture/ isolation/ ossature bois : 75 000 €
- plâtrerie/peinture : 15 000 €
- plomberie/sanitaire : 12 000 €
- électricité : 12 000 €
- isolant sol + chape liquide : 7 000 €
- ventilation mécanique contrôlée : 3 000 €
- carrelage : 10 000 €
- menuiserie intérieur et finitions : 10 000 €
- serrureries (escaliers) : 10 000 €

Acteurs

Maîtres d'ouvrage : M et Mme Frering

Coordination des travaux et conseil en aménagement intérieur : COTE TRAVAUX (Odette Frering)

Maçonnerie : CEPA TONIO

Charpente/Isolation/Ossature bois/Menuiseries extérieures : INNOV'TOIT

Plâtrerie/peinture : P31

Electricité : JADELEC

Plomberie/sanitaire/VMC/Chauffage : L2J ENERGIES/F. MATHEVON

Isolation des sols + Chape liquide : Chape PEYRARD

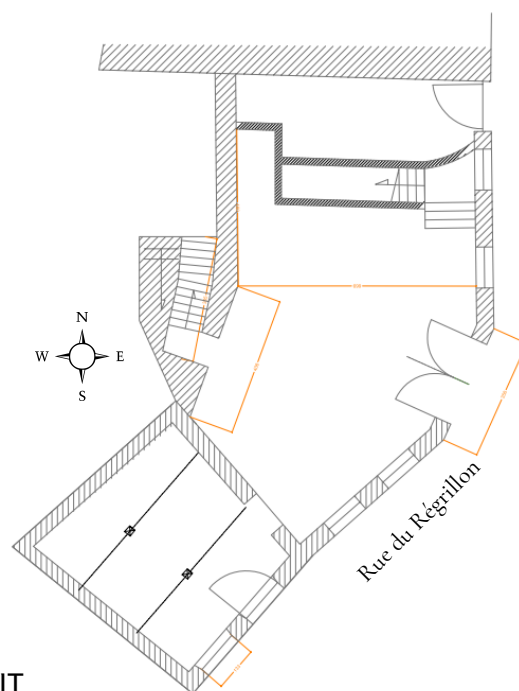
Carrelage/Faïence : P. ROCHETON

Menuiserie intérieure : C. ARSAC

Serrurier (escalier + garde-corps) : DUP METAL



1. Vue satellite du bâtiment



2. Plan du rez-de-chaussée

En bref

En 2012, l'ancienne usine de tissage de Pélussin est transformée en 3 logements locatifs (2 T2 et 1 T3). L'objectif est de faire une rénovation performante énergétiquement en utilisant des matériaux écologiques dans la mesure du possible. Les appartements ainsi créés sont de classe énergétique B ou C.



3. Vue est du bâtiment après-travaux

Caractéristiques techniques

Isolation

Type de paroi	Procédés constructifs (de l'intérieur de la paroi vers l'extérieur)	Résistance thermique* (en m ² .K/W)
Plancher bas	Chape béton (40 mm) /Mousse polyuréthane projetée (60 mm) /Voutain béton	2,5
Murs extérieurs ossature bois	Placo BA13 (12,5 mm) /Pare-vapeur /Ouate de cellulose insufflée (160 mm) entre ossature bois (160x40 mm) /Panneau OSB (18 mm) /Bardage bois mélèze naturel	3,7
Murs extérieurs anciens	Placo BA13 (12,5 mm) /Pare-vapeur /Laine de verre (100 mm) sur montant métallique/ Moellon de mâchefer (100 mm)/ Enduit chaux	2,9
Menuiseries	Double-vitrage basse émissivité châssis bois/alu	0,6 – 0,7
Plancher haut : isolation sous rampants	Placo BA13 (12,5 mm) /Pare-vapeur /Ouate de cellulose insufflée entre chevrons (300 mm)/ Pare-pluie /Tuiles plates en terre rouge cuite	6,1

*Donnée par la maîtrise d'oeuvre ou calculée avec Ubakus

Précision pour les menuiseries : Pose en applique intérieure 'en neuf' sur les murs existants/Pose en tunnel sur les nouveaux murs en ossature bois

Equipements

Ventilation : Ventilation mécanique contrôlée simple flux type hygro B

Eau chaude sanitaire : Ballons d'eau chaude thermodynamique sur air extrait

Chauffage : Installation de radiateurs électriques

Des choix de conception

Toiture à shed

Les toitures à *shed* sont des toitures que l'on retrouve sur les ateliers industriels, caractérisées par des versants aux déclivités différentes. Malgré le mauvais état de la toiture, il a été choisi de refaire la toiture en conservant ses caractéristiques pour garder l'esthétique industrielle du bâtiment :

- Un versant nord à forte déclivité, avec l'introduction ponctuelle de vitrages.
- Un versant sud est traditionnel, avec une pente de 30% et une couverture en tuiles plates en terre rouge cuite.

Création de terrasses

Pour améliorer la luminosité entrante dans les logements et rendre ces derniers plus agréables, une partie de la toiture est déposée pour permettre l'aménagement de deux terrasses et d'un balcon.

Ossature bois porteuse

Afin de ne pas reporter trop de charge sur les murs anciens, une ossature en bois porteuse est mise en place. Elle reprend les charges de la toiture et de la nouvelle mezzanine. Cette ossature sert également de caisson pour insuffler la ouate de cellulose.

Reprise des désordres initiaux

Problème : Remontée d'humidité dans les murs en pierre semi-enterrés.

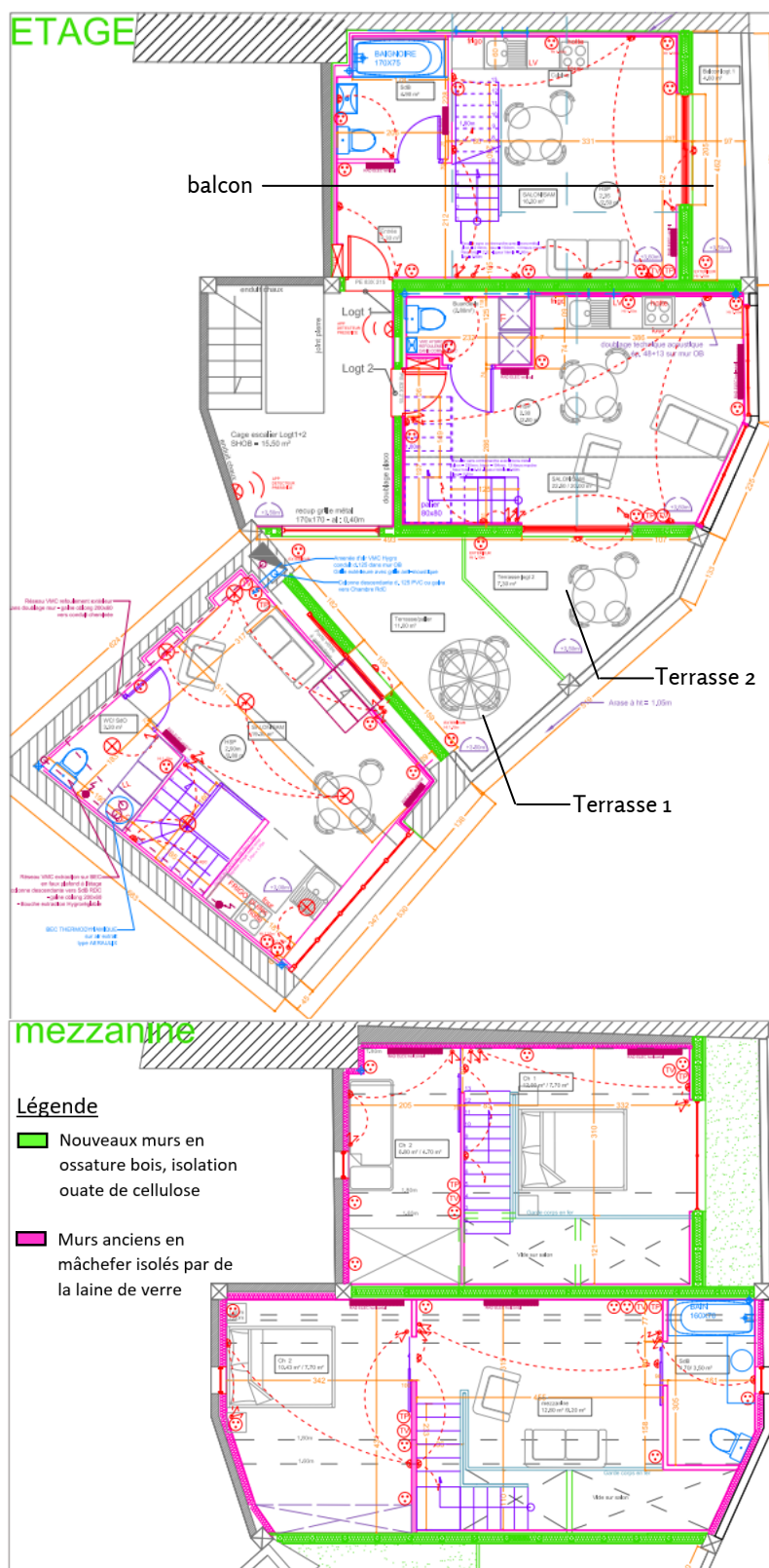
Solution : Le rez-de-chaussée est essentiellement occupé par le garage. Donc l'enduit extérieur existant est enlevé et les murs sont laissés à l'air libre avec une bonne ventilation naturelle.

Problème : Mur en moellon mince de mâchefer fissuré sur la façade est.

Solution : Une partie est déposée pour l'ouverture des terrasses. Le reste est consolidé par le linteau ferrillé continu sur les deux fenêtres (photo 6)

Alternatives au projet

La rénovation date de 2012, Odette Fering (coordinatrice des travaux) explique que si le projet avait été plus récent elle aurait réalisé une ossature bois continue, plutôt qu'un mix ossature bois/isolation laine de verre. La continuité de l'étanchéité à l'air est ainsi mieux assurée avec un maintien par les liteaux bois croisés sur l'ossature primaire et l'isolation est garantie par de la ouate de cellulose insufflée entre l'ossature bois. On crée ainsi, en quelque sorte, une boîte isolée dans le bâtiment qui permet de limiter les ponts thermiques tout en conservant l'aspect extérieur des façades.



4. Plan archi du premier étage du bâtiment et de la mezzanine.

Le chantier

Planning

- septembre 2010 - mars 2011 : conception + expertise par des artisans
- 4 avril 2011 : permis de construire
- septembre 2011 - février 2012 : travaux



5. Vue est du bâtiment avant travaux



6. Mise en place de l'ossature bois porteuse



7. Pose de la nouvelle toiture à shed

Zoom sur la mise en oeuvre sur du moellon mince de mâchefer

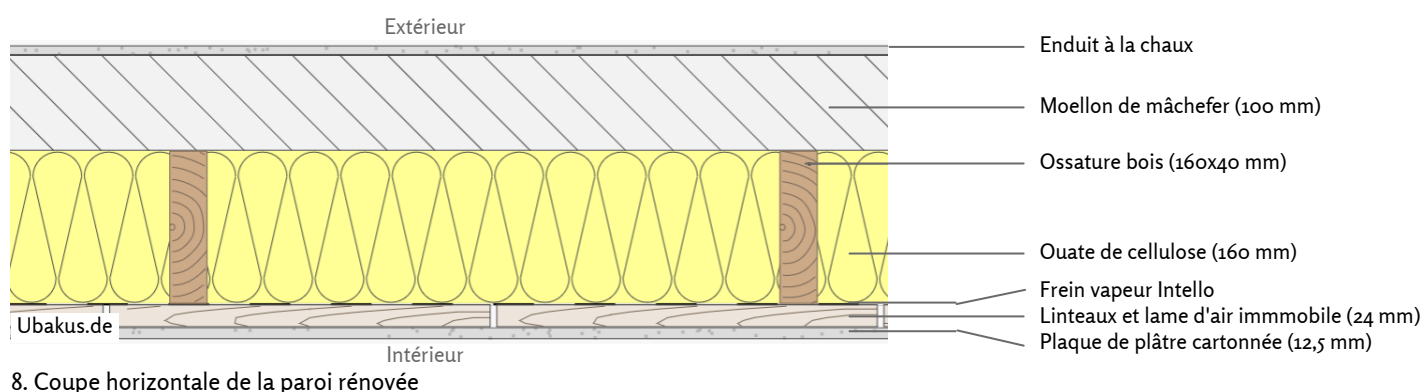
Sensibilité à l'eau du mur en ITI

Les matériaux de doublage qui ont été mis en oeuvre respectent les contraintes liées à la sensibilité à l'eau du mur en mâchefer et aux risques accrus en isolation thermique par l'intérieur (ITI). En effet, en ITI la maçonnerie est froide, donc l'eau a davantage tendance à se condenser dans ses pores, et notamment à l'interface avec l'isolant. Cela peut créer des problèmes importants (éclatement dû au gel, dégradation de l'isolant,...). Pour éviter cela, les apports d'humidité, souvent importants dans les logements (respiration, douche, cuisine, plantes...) ne doivent pas migrer dans le mur (isolant et mâchefer). Ils sont bloqués grâce à un pare-vapeur posé en partie intérieure. L'humidité qui serait éventuellement dans le mur pourra s'évacuer du côté extérieur grâce à l'ouverture à la vapeur d'eau des différentes couches du mur (isolant, mâchefer, enduit).

Et si c'était à refaire ?

La solution détaillée ici n'est pas celle qui a effectivement été mise en place en 2012, mais celle de créer une boîte isolée à l'intérieur du bâtiment, qui aurait été choisie aujourd'hui.

Une ossature bois porteuse (160x40 mm) est posée du côté intérieur des murs. Elle permet de reprendre les charges de la mezzanine et de la toiture. Un frein vapeur hygrovariable (Intello de Proclima) est posé sur l'ensemble des parois. Cela signifie qu'il ne présente pas toujours la même résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. En hiver, l'humidité relative de l'air intérieur est plus grande que celle du mur. Pour éviter que l'humidité migre à l'intérieur du mur, la membrane fonctionne comme un pare-vapeur classique en étant imperméable à la vapeur d'eau. En été, il y a des risques que ce soit l'inverse, la membrane est donc ouverte à la vapeur d'eau et permet au mur de sécher en évaporant également du côté intérieur. Cette propriété est très intéressante pour le bâti ancien caractérisé par sa sensibilité à l'eau. La continuité de l'ossature bois garantit une très bonne continuité du frein vapeur qui joue également le rôle très important d'étanchéité à l'air. De la ouate de cellulose insufflée vient ensuite en remplissage des espaces entre le mur et le frein vapeur. Enfin, des liteaux bois sont posés horizontalement, fixés à l'ossature bois, ils maintiennent l'étanchéité à l'air et permettent l'accroche des plaques de plâtre.



Source : Sauf mention contraire, les figures et photos proviennent d'Odette Frering. Les résistances à la vapeur d'eau proviennent de la base de donnée de l'association Arcanne (disponible sur : <https://associationarcanne.com/ressources/base-de-donnees-materiaux/>)

Rénovation d'une maison individuelle en mâchefer de 1930



Saint-Martin d'Hères 38400

openstreetmap.fr

Fiche d'identité

Type de bâtiment

Maison individuelle en parpaings de mâchefer construite dans les années 1930 sur vide sanitaire. Une extension en parpaings creux de béton moderne a été réalisée dans les années 1970 afin de faire deux logements locatifs dans ce bâtiment.

Coûts

Coût total : 262 000 € HT

- Travaux : 235 000 € HT
 - Dont charpente/isolation : 59 000 €
 - Dont menuiseries : 30 000 €
- Conception : 27 000 € HT

Surface

164 m2 sur deux niveaux

Acteurs

Maître d'ouvrage : Particuliers

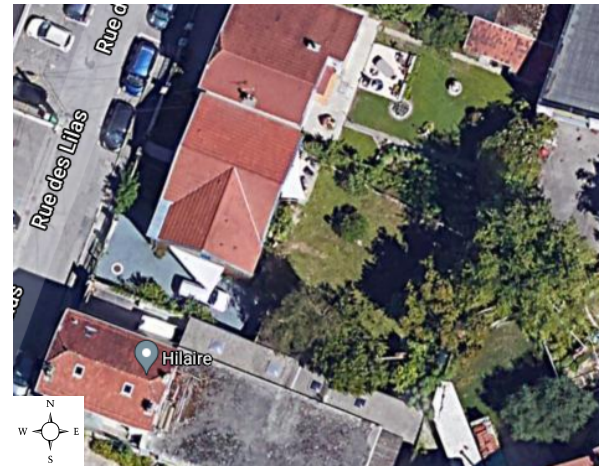
Maîtrise d'œuvre : SILO-Architectes

BE structure : Soraetec

Entreprises : SCOP Cabestan

En bref

Début 2016, un couple achète le bâtiment conçu pour deux appartements depuis les années 1970. Il souhaite lui rendre son usage initial, celui d'une maison individuelle, et améliorer les performances énergétiques du bâtiment pour atteindre les exigences de "Mur Mur 2", une campagne de rénovation portée par Grenoble Alpes-Métropole. Il s'entoure d'un architecte pour la maîtrise d'œuvre et le suivi des travaux. Peu d'études sont réalisées au préalable car très coûteuses. Le budget est réservé pour l'achat de matériaux biosourcés et la mise en œuvre de qualité. Seule une étude structure est effectuée.



1. Vue satellite de la parcelle. Source : Google Map



2. Vue ouest du bâtiment. Source : Yann Damiani

Caractéristiques techniques

Isolation

Type de paroi	Procédés constructifs (de l'intérieur de la paroi vers l'extérieur)	Résistance thermique* (en m ² .K/W)
Plancher bas sur vide sanitaire	Chape ciment (70 mm) /film polyéthylène (0,2 mm) /panneaux liège expansé (80 mm) /ravoilage billes d'argile expansé/plancher (OSB 18 mm) sur solive (225 x 75 mm)	2
Murs extérieurs bardage	Fermacell (12 mm) sur ossature M48 /parpaing de mâchefer (350 mm) /panneau laine de bois semi-rigide (140 mm) entre ossature bois /pare-pluie rigide en fibre de bois haute densité (20 mm) /lame d'air /bardage bois (38 x 38 mm)	4,9
Murs extérieurs enduit	Fermacell (12 mm) sur ossature M48 /parpaing de mâchefer (350 mm) /panneau rigide de laine de bois Pavawall bloc (160 mm) /entoilage + enduit chaux (~15 mm)	4,9
Menuiseries	Double-vitrage argon 24mm et menuiseries en pin section 58 mm pose en applique côté extérieur	0,7
Plancher haut : combles perdus	Plénum (70 mm) /plancher (OSB 18 mm) sur solive (225 x 75 mm) /pare vapeur /plaques de ouate de cellulose (180 mm)	4,5

*Donnée par la maîtrise d'oeuvre ou calculée avec Ubakus

Précision : L'intégralité des fenêtres ont été remplacées suite à la dépose complète du simple vitrage existant.

Equipements

Ventilation : Ventilation mécanique contrôlée simple flux type hygro B.

Eau chaude sanitaire : Installation d'un système de chauffe-eau 250L.

Chauffage : Installation d'une pompe à chaleur air/eau Zubadan 8 kW alimentant un plancher chauffant.

Des choix de conception

Architecture

La façade nord-ouest originelle de 1930 (photo 2) a été enduite afin de rappeler l'esthétique du bâtiment à sa construction. Le reste du bâtiment est en bardage bois pour un visuel plus contemporain.

Relation du bâtiment avec son environnement

Une grande ouverture a été créée du côté jardin (photo 3) afin d'améliorer la circulation entre la maison et le jardin. Cette ouverture n'a pas pour objectif initial d'améliorer la luminosité naturelle dans le bâtiment étant donné que l'existant présentait déjà 20% de surface vitrée.



3. Façade sud-est. Source : Yann Damiani

Confort thermique

- L'**isolation par l'extérieur** permet d'utiliser l'inertie des murs en mâchefer au profit du confort thermique d'hiver et d'été. L'inertie thermique est la propriété d'un bâtiment à s'opposer aux variations de températures. Deux phénomènes rentrent en jeu : la capacité des murs à conserver la température intérieure et la capacité des murs à transmettre lentement la chaleur qui les traverse (déphasage). L'épaisseur importante des murs du bâtiment (35 cm) lui confère surtout une bonne capacité à conserver la température intérieure. Quant à l'isolant en partie extérieur, en plus des propriétés isolantes essentielles en hiver, il apporte du déphasage. L'association de ces matériaux va donc permettre de lisser les températures intérieures. Notamment, en été, ils permettront d'éviter les pics de chaleur en journée et en hiver, la baisse trop importante de la température la nuit.
- Des **brises soleil orientables (BSO)** ont été mis en place sur les façades sud-est et sud-ouest afin de limiter un apport de chaleur par le soleil trop important.

Reprise des désordres initiaux

Problème : L'extension réalisée dans les années 70 était bâtie sans fondation, liée au corps d'origine de la maison. Une fissure est apparue, due au tassement du sol sous l'extension.

Solution : La fissure est reprise par dégarnissage et recolmatage avec un mortier fibré à haute résistance. Un agrafage est réalisé par scellement d'aciers en partie haute du mur. Un joint de dilatation est créé en désolidarisant l'extension du bâti de 1930 avec une saignée de 3 cm d'épaisseur à la disqueuse à béton, puis comblée par un joint silicone.

Problème : Des signes légers de remontées capillaires ont été remarqués. Notamment l'éclatement des enduits inadaptés en partie basse des murs.

Solution : La ventilation naturelle du vide sanitaire a été améliorée et l'enduit a été piqué pour laisser respirer le mur. Un enduit à la chaux, perspirant, est ensuite appliqué.



4. Fissure entre l'extension et l'ancien. Source : Soraetec

Alternatives au projet

D'après la maîtrise d'oeuvre, si le projet était à refaire aujourd'hui, elle préférerait isoler l'intégralité de la maison avec de la ouate de cellulose insufflée entre montants bois. Pour rappel, de la fibre de bois semi-rigide entre montants bois a été utilisée sur la majorité du bâtiment et de la fibre de bois haute densité chevillée-collée a été posée sur la façade côté rue.

En effet, d'après l'ouvrage *L'isolation thermique écologique* de Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey, l'énergie grise d'une isolation en panneaux de fibre de bois très haute densité est environ 6 fois plus grande que la même isolation en ouate de cellulose. L'énergie grise d'une isolation en panneaux de fibre de bois semi-rigide est environ 2 fois plus grande que la même isolation en ouate de cellulose.

Cependant, la fibre de bois haute densité a un meilleur bilan carbone en stockant environ 2 fois plus de carbone que la même isolation en ouate de cellulose. La fibre de bois semi-rigide a un bilan carbone à peu près nul.

Le chantier

Planning

- mars - août 2016 : phase diagnostic et conception
- septembre 2016 - juillet 2017 : phase travaux

5. Pose de l'ossature bois. Source : Yann Damiani



6. Pose de la laine de bois. Source : Yann Damiani



7. Pose du pare-pluie sur les façades recevant un bardage bois. Source : Yann Damiani
a. Vue nord

b. Façade sud-est



Zoom sur la mise en oeuvre sur du parpaing de mâchefer de 1930 à Grenoble

Perspiration du mur

Les apports d'humidité sont souvent importants dans les logements (respiration, douche, cuisine, plantes...). Or, le mâchefer est un matériau ouvert à la vapeur d'eau, cela signifie qu'elle va chercher à traverser le mur. Afin d'éviter que l'eau ne s'accumule dans le mur, et fasse apparaître des pathologies (éclatement dû au gel, diminution des performances thermiques ...), il est important que chaque couche du mur permette à la vapeur d'eau de s'évacuer. Ainsi, la laine de bois et les enduits à la chaux sont également perméables à la vapeur d'eau.

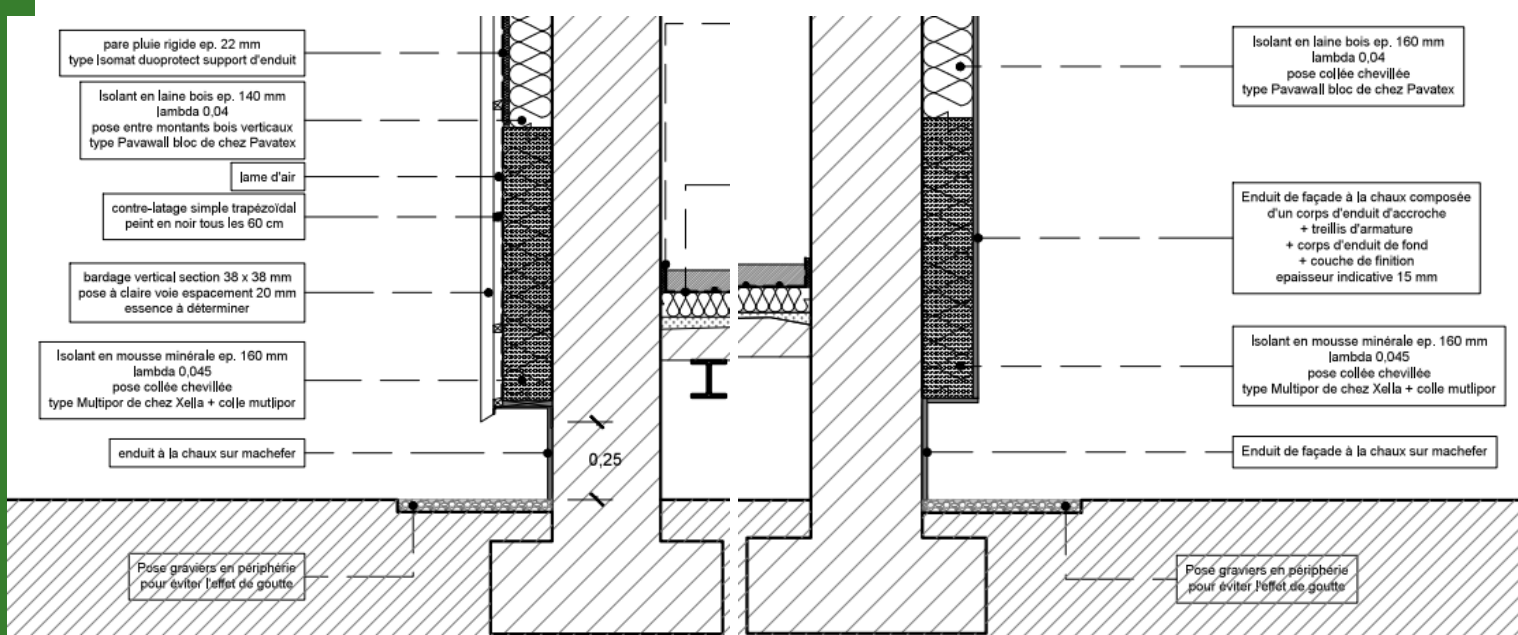
Ruptures capillaires

Afin d'éviter les remontées capillaires à travers l'isolant, la pose de la laine de bois ne commence qu'à 1,20 m au dessus du sol. Seul un enduit à la chaux a été appliqué sur les 25 premiers centimètres qui donnent sur le vide sanitaire, un espace tampon. Puis, des panneaux de mousse minérale Multipor de Xella sont appliqués sur les 95 centimètres suivants. Cet isolant, insensible à l'eau, ne craint pas l'humidité plus importante qui peut se trouver en partie basse du mur, tout en étant perméable à la vapeur d'eau.

Détails de pose

Finition bardage bois (Figure 6) : Les panneaux de laine de bois semi-rigides sont posés entre ossature bois. Cette dernière permet de supporter le pare-pluie rigide et le contre-lattage.

Finition enduit (Figure 7) : Les panneaux de laine de bois haute-densité sont collés et chevillés. L'ensemble "enduit à la chaux/corps d'enduit d'accroche" est directement appliqué sur l'isolant, comme prévu par le fabricant.



8. Détail de l'isolation du mâchefer avec finition bardage bois.

9. Détail de l'isolation du mâchefer avec finition enduit. Source : Yann Damiani

Source : Yann Damiani