



AMSTEIN + WALTHERT

Grand Lyon Habitat

Etude sur le patrimoine HBM et le matériau mâchefer



Volet thermique, hygrothermique et énergétique - étude comparative des réhabilitations et méthodologies

Affaire n°900137
Version 01 / 5 mars 2019
Version de diffusion

Impressum

Maître d'ouvrage

Grand Lyon Habitat
Direction du Patrimoine et du Cadre de Vie
Service Réhabilitation – Elodie Morel
Tél. +33 (0)4 26 10 54 82

Mandataire

AMSTEIN + WALTHERT SAS
9 rue du Lac
F-69003 Lyon
Tél. +33 (0)4 78 95 29 69
Fax +33 (0)9 82 11 10 58
E-mail : infoly@amstein-walthert.fr

Rédaction

M. Etienne Villemot

Distribution

Diffusion publique – toute reproduction nécessite l'autorisation préalable de A+W et GLH.

Versions

Version : 2 du 18/10/2021

Nom de fichier

R190129VILE1_137_Rapport_final_HBM_Machefer_v2

Sommaire

Validation et suivi des mises à jour.....	5
1 Introduction	6
2 Préambule : matériau mâchefer : caractéristiques et comportement hygrothermique.....	8
2.1 Caractéristiques hygrothermiques du matériau	9
2.2 Bâtiments en mâchefer : comportement hygrothermique	14
3 Corpus GLH HBM	27
4 Bilan – évaluation et bonnes pratiques	36
4.1 Mise en place du programme travaux et évolution	36
4.2 Diagnostic initiaux	39
4.3 Techniques pour l'isolation du bâti mâchefer.....	42
4.4 Nuisances spécifiques du matériau mâchefer	45
4.5 Calcul thermique et coût global	46
4.6 Quel objectif énergétique ?	49
4.7 Particularités méthodologiques	53
5 Méthodologie de suivi.....	56

Validation et suivi des mises à jour

Version	Date	Identifiant et Visa			Descriptif succinct des mises à jour
		Auteur	Relecteur	Direction	
1	05.03.19	VILE	PYTH	MAUC	Version initiale
2	18.10.21	VILE	Elodie Morel	MAUC	Version diffusable
3					
4					
5					
6					

1 Introduction

Les HBM (Habitat à bon marché) constituent une étape importante de l'évolution de l'architecture et des techniques du bâtiment, en particulier du logement. Parmi leurs nombreuses particularités et sujets d'intérêt, l'utilisation du matériau mâchefer (comme élément structurel ou de remplissage) est une caractéristique induisant une modification de l'architecture et des techniques utilisées, de même qu'une durabilité dans le temps. Utilisé de manière importante comme matériau de construction sur une bonne partie du XXème siècle, le mâchefer est un matériau aujourd'hui encore largement méconnu, dont les caractéristiques techniques non standardisées sont seulement approchées, et dont le traitement est assez peu homogène. A l'heure des politiques de massification de la rénovation énergétique des bâtiments, Grand Lyon Habitat (GLH) – au même titre que de nombreux bailleurs sociaux – doit traiter des résidences construites en mâchefer.

Contrairement à d'autres matériaux, le traitement en isolation intérieure ou extérieure n'est pas automatique et ne doit pas se poser de façon systématique du fait des caractéristiques intrinsèques du matériau, et de nombreuses questions se posent, en particulier sur :

- Le comportement thermique du matériau : ses caractéristiques d'inertie et de déphasage apportent du confort en été, et apportent de la performance en hiver. Comment profiter de ces avantages tout en améliorant la performance du bâtiment ?
- Le comportement hygroscopique du bâtiment : le mâchefer est un matériau perméable à la vapeur d'eau. En cela, l'intervention sur le bâti doit être maîtrisée afin de ne pas piéger d'eau à l'état liquide. L'équilibre initial du mur doit également être pris en compte lors de toute intervention.
- La prise en compte du matériau dans les calculs thermiques : le matériau mâchefer est non seulement non standardisé (la production étant à base de sous-produits / déchets, ses caractéristiques varient d'un immeuble à l'autre / d'une zone géographique à l'autre), mais les méthodes de calcul ne prennent pas forcément en compte l'influence de l'inertie et des échanges hygroscopiques. Ainsi, la performance réelle n'est pas forcément corrélée à la performance calculée, par exemple sur les méthodes non dynamiques.
- Les caractéristiques mécaniques du matériau, son état hygroscopique lors du chantier ainsi que la toxicité éventuelle des poussières amènent des contraintes particulières dans la gestion du chantier, en particulier dans le cadre d'un chantier en site occupé.

Grand Lyon Habitat est intervenu sur plusieurs de ses résidences HBM au travers de différentes méthodes d'intervention. Le but de cette étude est de faire un bilan intermédiaire de ces interventions, et d'évaluer l'efficacité des différentes approches utilisées.

En leur permettant de prendre en compte les connaissances ainsi acquises tant sur le matériau que sur la méthode d'intervention, ce retour d'expérience permettra d'infléchir le cahier des charges et la conduite de projet des prochaines tranches de réalisation des différentes opérations en cours. En outre, par sa volonté d'améliorer la connaissance et in fine la qualité technique et architecturale de ses rénovations, la présente étude contribuera à placer GLH comme acteur exemplaire de la filière du logement social de la région lyonnaise.

Plusieurs résidences sont actuellement en cours d'intervention, et ont été sélectionnées par GLH comme support éventuel pour cette étude. Cette sélection s'est faite sur la base des interventions en cours. Au vu du nombre de résidences proposées, nous proposons de nous intéresser à l'ensemble de ces groupes dont les caractéristiques sont précisées ci-dessous, sans faire d'échantillonnage. Les différentes opérations concernées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Résidence	Caractéristiques	Avancement opération
Perrache	Extérieure (ITE) et intérieure (ITI) selon localisation	Travaux à 50%
Dauphiné	ITE, ITE ponctuelle	Travaux à 30%
Montchat	ITE	Réception fin 2018
Tony Garnier	ITE par enduit isolant	Contractualisation entreprises en cours

Résidence	Caractéristiques	Avancement opération
Clos Jouve		Arrêt en APS
Donjon		Arrêt en APS

Grand Lyon Habitat souhaite avoir une base de comparaison entre les différentes approches d'intervention proposées par les maîtrises d'œuvres et choisies par la maîtrise d'ouvrage, sur les points suivants :

- Méthode de calcul thermique et pertinence des méthodes utilisables (calcul statique, dynamique, réglementaire) ;
- Coût global investissement + exploitation / maintenance, lié au temps de retour sur investissement ;
- Problématiques et questions communes étant ressorties dans les processus d'études ou de chantier ;
- Bonnes pratiques, qu'elles soient en conception ou en réalisation ;
- Approche des caractéristiques hygrothermiques du matériau et de ses apports dans la thermique du bâtiment HBM (transfert d'humidité dans les parois + isolation + inertie + déphasage).

Nous avons construit notre étude sur ces différents points, en l'articulant autour des grands axes suivants :

- En préambule, rappel général sur les caractéristiques hygrothermiques des matériaux de construction et des spécificités des mâchefer par rapport à des matériaux courants (ex. comparatif avec béton massif). Rappel des phénomènes intrinsèques, des enjeux majeurs du matériau avec simulations de diffusion de vapeur d'eau. Rappel des pathologies courantes et exceptionnelles : quels sont les risques (condensation en particulier) présentés par le matériau mâchefer et ses mises en œuvre (structurel ou remplissage, rapport à un isolant mis en œuvre ultérieurement, rapport à un revêtement de façade) ;
- Bilan : collecte et compilation des données des différentes opérations : études, chantier et exploitation ; Cette collecte a pour but une restitution comparative des éléments clé des données recueillies, et non une compilation exhaustive et une analyse systématique.
- Evaluation : analyse comparative et critique des différentes opérations. Cette analyse critique n'a pas un objectif de jugement des unes par rapport aux autres, mais de faire ressortir les bonnes pratiques des opérations ;
- Prospective : proposition d'une méthode de suivi spécifique commune des bâtiments étudiés ou traités ultérieurement par GLH (monitoring). Ce suivi pourrait être mis en place systématiquement sur l'ensemble des cités, comme outil de suivi simple et fiable afin de pouvoir les suivre pendant quelques années et progresser dans l'acquisition de connaissances. Etablissement d'un cahier des charges de ce suivi qui regrouperait les bonnes pratiques inventoriées plus haut et la méthode de suivi (exemple : suivi annuel des consommations pour chauffage collectif, mise en place enquête individuelle pour non collectif avec évaluation représentativité échantillon, enquête confort d'été, paramétrage et mise en œuvre monitoring, vigilance sur les plaintes locatives...)

Cette étude s'articule avec l'étude menée par le CAUE Rhône Métropole sur les HBM, et qui s'intéresse aux groupes du corpus d'études sur les points de vues historiques, patrimoniaux, architecturaux et urbains. Les différents aspects croisés de cette étude ne sont pas repris dans le présent rapport, et il conviendra d'accompagner sa lecture de celle du rapport du CAUE.

Nous avons également utilisé des données et échangé avec le groupe de travail mâchefer, monté par le CAUE Rhône Métropole. Monté en 2018, il a pour objet de fédérer les différentes initiatives, recherches et points d'intérêts sur la question de la caractérisation du matériau mâchefer. Il réunit notamment les partenaires suivants : CEREMA / DGALN DREAL, ENSAL, Ecole des Mines de St Etienne, INSA de Lyon, UDAP 69, Grand Lyon Habitat, Agence Qualité Construction, le CAUE Rhône Métropole et notre bureau d'étude.

2 Préambule : matériau mâchefer : caractéristiques et comportement hygrothermique

Le matériau « mâchefer » est un béton utilisant des résidus de haut fourneau (mâchefer de haut fourneau ou scories) en complément ou remplacement des granulats du béton (sable et gravier) de granulats. Cette utilisation a pour but de réutiliser des déchets produits à proximité et d'alléger le béton ainsi produit. On retrouve ainsi dans la littérature des mentions du béton de mâchefer sous le terme de « béton léger », « béton de pouzzolane » ou encore « béton isolant ».

A noter que le mot « mâchefer » représente aujourd'hui le mâchefer issu des usines d'incinération des ordures ménagères depuis 1970. L'utilisation de ces résidus ne sont pas admis dans le bâtiment, et leurs caractéristiques sont très différentes du mâchefer de haut fourneau.

On retrouve des constructions à base de ce matériau à proximité des centres de production métallurgique, dans des constructions datant de la fin du XIX^{ème} siècle jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle. Son utilisation se retrouve suivant différentes formulations et suivant différentes techniques constructives :

- Pisé de mâchefer (= béton banché)
- Briques de mâchefer
- Remplissage mâchefer avec structure béton

Ce matériau étant un matériau de récupération et de recyclage, sa composition peut être très hétérogène selon l'emplacement (et la provenance des scories) et la période de fabrication. Ainsi, sur un même chantier et en fonction de l'approvisionnement en matériau, on peut retrouver des compositions différentes, et des caractéristiques différentes.

Dans la suite de ce rapport, nous nous intéresserons plus particulièrement au béton de mâchefer de type « pisé de mâchefer » de la région lyonnaise, datant de la période 1925-1935. C'est cette période et cette provenance qui représente le contexte de la construction des groupes HBM de la présente étude.



Photo 1 : Blocs de béton de mâchefer banché sur un chantier de démolition à Lyon Gerland (photo CAUE Rhône Métropole)



Photo 2 : échantillons de mâchefer prélevés par le CAUE Rhône Métropole

2.1 Caractéristiques hygrothermiques du matériau

Dans le cadre de la thermique du bâtiment, plusieurs caractéristiques intrinsèques du bâtiment vont avoir une influence sur les transferts de chaleur et d'humidité :

Symb.	Nom	Unité	Explications	Valeurs exemples
λ	Conductivité thermique	W/m.°C	Capacité du matériau à transmettre (conduire) la chaleur. Plus la valeur est grande et moins le matériau est isolant	Béton 1.5 à 2.5 Laine de roche (LR) 0.035
C	Capacité thermique massique	J/kg.°K	Capacité du matériau à stocker la chaleur. Plus la valeur est forte et plus il pourra stocker de la chaleur et contribuer à l'inertie du bâtiment	Béton 880 LR 1'030
ρ	Masse volumique	kg/m ³	Masse volumique du matériau. Relié à la capacité thermique massique elle agit sur la capacité du matériau à stocker la chaleur (plus le matériau est dense, plus il est capable de stocker la chaleur)	Béton 2'200 LR 70
μ	Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	-	Capacité du matériau à diffuser de la vapeur d'eau par rapport à une couche d'air de même épaisseur. Plus le facteur de résistance est élevé, plus un matériau est imperméable à la vapeur d'eau	Air 1 Béton 30-200 LR 5 Verre infini
φ	Porosité	-	Capacité du matériau à stocker de l'eau en phase liquide	

D'autres paramètres agissent également sur les transferts de chaleur et d'humidité (sorption, succion, capillarité) et les paramètres évoluent en fonction des conditions extérieures et intérieures. Dans le cadre de la présente étude ces caractéristiques ne sont pas reprises.

En dehors de la masse volumique, en moyenne située entre 800 et 900 dans la littérature d'époque, les caractéristiques du matériau sont peu connues.

2.1.1 Détermination du λ

Le béton de mâchefer possède une hétérogénéité en fonction de sa provenance et de son époque de mise en œuvre. De nombreuses données contradictoires se retrouvent sur ce matériau, que nous repreneons ci-dessous en les classant de la donnée la moins fiable à la plus fiable.

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 - DIN EN 1745 2012-07 - TGL 35424/2 - Önorm B8110 (Ausg. 59)	0.2 à 0.55 0.47 à 0.61 0.47																
Mesure de la conductivité thermique à l'aide d'un fluxmètre type TESTO 635 réalisée la nuit du 28.02.2019 au 01.03.2019 dans un logement vide du groupe Perrache. Différence de température faible entre intérieur et extérieur rendant le résultat peu précis	0.2 à 0.6																
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																
Mesure de la conductivité thermique à l'aide d'un fluxmètre type TESTO 635 réalisée les nuits du 10.12.2020 au 16.12.2021 dans des logements vides du groupe Clos Jouve.* * élément ajouté suite à la première diffusion du rapport, et dont les conclusions ne sont pas reprises	0.25 à 0.45, moyenne à 0.40																

Bien que les valeurs de la bibliographie couvrent une large plage de valeurs, la tendance des différentes sources laisse à penser que des valeurs de conductivité des bétons de mâchefer se situent entre 0.25

et 0.75. Les essais et mesures effectués par le groupe de travail mâchefer (cf. présentation en introduction) concordent avec la valeur issue de la revue « techniques de l'ingénieur » de décembre 2004.

De même, l'analyse d'une thermographie montre une performance du mâchefer clairement meilleure que la performance du béton. Les valeurs de 1.6 et 1.7 nous semblent donc très surestimées car les flux de chaleur diffèrent fortement sur un même mur avec du béton ou du mâchefer. La thermographie présentée ci-dessous montre une façade du groupe Clos Jouve à Lyon 4. La présence d'un chaînage béton tous les 2 étages est clairement visible par les flux plus importants de chaleur qui y transitent.



Figure 1 : thermographie groupe Clos Jouve, Enertech

Nous proposons pour la suite de cette étude de prendre en compte une valeur de conductivité thermique de l'ordre de 0.3W/m.°C.

Cette valeur montre que le béton mâchefer, sans être un isolant, possède des caractéristiques d'isolation équivalentes à celle d'un bois dur. Les grandes épaisseurs mises en œuvre permettent d'obtenir une performance isolante du mur moyenne à basse. A titre de comparaison, un mur de 50cm en mâchefer possède une résistance thermique de l'ordre de 1.8m².°K/W, soit une résistance équivalent à un mur béton avec une isolation en PSE de 6cm d'épaisseur.

La réglementation thermique existant (RT ex) imposait jusqu'en 2018 une résistance minimale de 2.3 m².°K/W lors de l'isolation d'une paroi verticale. On voit que la résistance de base est proche de cette valeur limite, et que l'effort à produire n'est pas énorme pour atteindre une performance « minimale ».

On peut également relier cette valeur à la valeur limite de la SIA 180 (norme suisse sur la protection thermique des bâtiments), qui fixe une valeur de 2.5 comme satisfaisant « les exigences de confort thermique et d'absence de condensation superficielle ». La résistance de 1.8, sans satisfaire cette condition, s'en rapproche toutefois.

2.1.1.1 Comparaison aux valeurs prises en compte sur les projets de réhabilitation

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs de conductivité thermique issues des dossiers des réhabilitations du corpus GLH :

Opération concernée	λ (W.m.°C)
Clos Jouve	0.9 (Diag)
Dauphiné	1.7
Donjon (assimilé à béton)	0.9
Montchat	1.25
Perrache (calcul thermique réglementaire)	1.8 (TH-CE ex) 0.5 (STD)
Tony Garnier : réévaluation de la valeur du λ suite à calibration par rapport à consommations réelles	1.6 (DIAG) 0.85 (suite)

Il apparaît ci-dessus que les valeurs de conductivité thermique prises en compte par les équipes de maîtrise d'œuvre dans le cadre des études thermiques sont très différentes, et largement défavorables pour le matériau (en dehors de la STD de Perrache qui prend une valeur plus réaliste). Ainsi, les performances initiales sont sous-estimées, et les économies de charges liées à la réhabilitation vont être surestimées.

2.1.2 Détermination du μ

La valeur du coefficient de résistance à la vapeur d'eau est un élément crucial dans l'analyse du matériau. En effet, le mâchefer est souvent assimilé au pisé de terre sur sa sensibilité vis-à-vis de l'eau et des risques de condensation. En fonction de sa capacité à diffuser la vapeur d'eau et à son isolation, le risque de pathologie est plus ou moins fort et le traitement par un pare vapeur sera différent. Le tableau ci-dessous montre les origines des données à notre disposition.

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 »	

Les données sont peu nombreuses mais cohérentes, une valeur de 10 a été prise en compte dans les simulations et la suite de notre étude.

2.2 Bâtiments en mâchefer : comportement hygrothermique

2.2.1 Transferts d'humidité à travers le matériau

Le comportement thermique d'une construction et des matériaux de construction fait appel à des phénomènes simples de convection, conduction et rayonnement qui sont aujourd'hui bien connus et maîtrisés par l'ensemble des acteurs de la construction. Le comportement hygroscopique, consistant aux phénomènes de migration d'eau sous forme liquide et vapeur, est moins connu. L'objet de ce rapport n'est pas de présenter ces phénomènes mais de présenter le comportement spécifique du matériau mâchefer.

Pour plus d'informations sur les phénomènes de transfert de vapeur et d'humidité, les sources suivantes peuvent être consultées (liste non exhaustive et très partielle) :

- Le site internet www.energieplus-lesite.be de l'université catholique de Louvain et de département de l'énergie et du bâtiment durable de Wallonie
- Le rapport Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, Climaxion / Enertech / Oktave / Dorémi, décembre 2017
- Le rapport « Les transferts d'humidité dans les bâtiments », Clément Carpetier – Enertech, avril 2011
- Le guide du CSTB « Transferts d'humidité à travers les parois », septembre 2009

2.2.1.1 Phénomènes

Le schéma ci-dessous montre les différentes sources d'humidité qui vont exister dans un bâtiment. Tous les matériaux possèdent une perméabilité plus ou moins grande à la diffusion de vapeur d'eau, et des transferts vont avoir lieu entre intérieur et extérieur.

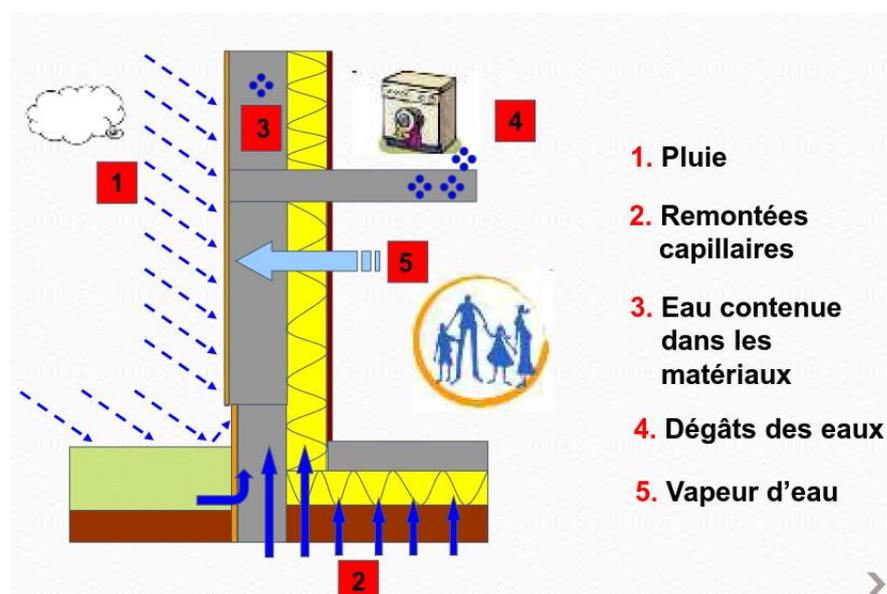


Figure 2 : Samuel Courgey - Arcane - formation Bourgogne Bâtiment Durable "l'humidité dans les parois", octobre 2013

Liés aux gradients de température entre intérieur et extérieur, ou aux ponts thermiques, ces transferts peuvent occasionner des condensations avec formations d'eau liquide, et amener à des pathologies dans le bâtiment.

2.2.1.2 Pathologies

La formation d'eau liquide peut entraîner des pathologies dans les matériaux ou sur les bâtiments. Ces pathologies peuvent être de tout type :

- Apparition de moisissures sur les murs ;
- En cas de matériau organique (structure bois par exemple), pourrissement du matériau et de la structure ;
- Infiltration dans la structure béton et oxydation des parties métalliques (armatures, poutrelles, chainages), entraînant leur corrosion et un potentiel affaiblissement structurel ;
- Eclatement des enrobages du béton armé et suppression de la protection ;
- Si de l'eau liquide se situe dans une zone soumise au gel, éclatement du matériau (vu en général sur les enduits extérieurs) ;
- Diminution de la résistance mécanique en fonction de l'humidité : certains matériaux (et en particulier les matériaux organiques) peuvent voir leur résistance mécanique diminuer avec leur teneur en eau. Pour le matériau mâchefer ce comportement n'est pas connu.

Les structures des groupes HBM étudiés sont constituées de murs en pisé de mâchefer plein avec dalles en poutrelles-béton (métal au RDC sur 50% des groupes) et hourdis béton. Du fait de l'âge des structures une microfissuration peut s'être créée dans les planchers, permettant l'infiltration de l'eau condensée dans le cœur de la structure et dans les armatures de celle-ci.

Ces pathologies peuvent être importantes pour l'intégrité structurelle du bâti, et il convient de s'assurer à tout moment de leur absence.



Photo 3 : Eclatement d'un enduit imperméable sur mur mâchefer - rue Valensaut, 11.2018



Photo 4 : Moisissure sous menuiserie - Dauphiné - Diag technique L. Aydstian mars 2010



Photo 5 : pourrissement d'une ossature bois - source Afordex

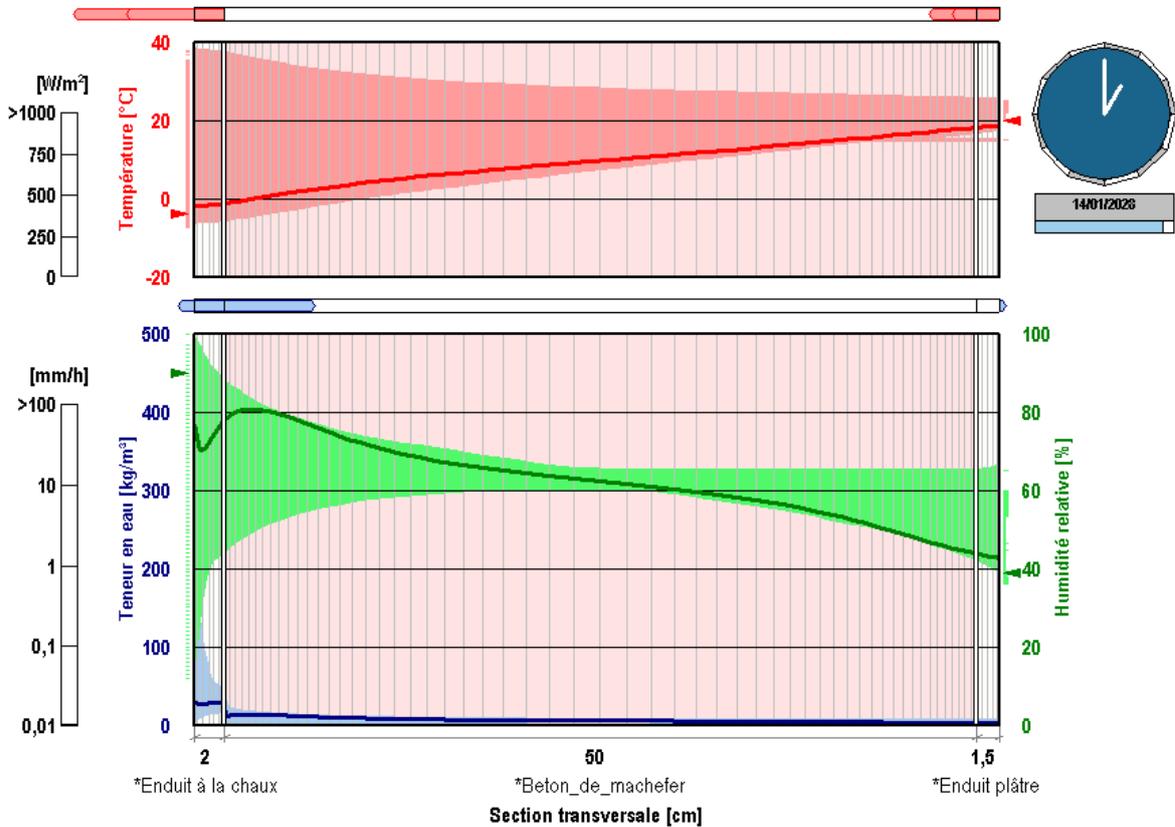
2.2.2 Transfert d'humidité – simulations

Afin de comprendre le comportement hygrothermique du matériau « béton de mâchefer », nous avons modélisé un mur plein sous le logiciel WUFI Pro. Ce logiciel permet de simuler le comportement d'un mur « standard » sur la dimension intérieure – extérieur (pas d'effet de pont thermique intégré, calcul unidimensionnel) en fonction des conditions intérieures et extérieures, sur une période donnée. Les données de simulation sont données dans le tableau ci-dessous :

Donnée	Unité	Enduit extérieur (enduit à la chaux)	Mâchefer	Enduit intérieur (enduit plâtre)
Version du logiciel	-	Pro 5.2		
Epaisseur de la couche	cm	2	50	1.5
Densité	kg/m ³	1'600	900	850
Porosité	-	0.3	0.6	0.65
Chaleur spécifique	J/kg.°K	850	850	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	W/m°K	0.7	0.3	0.2
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	-	7	10	8.3
Humidité typique de construction	kg/m ³	250	100	400
Surface extérieure : étanchéité à la pluie		Sans résistance supplémentaire		
Fraction de la pluie restant à la surface		0.7		
Climat extérieur		Fichier climat Grenoble CSTB		
Conditions intérieures		Conditions EN15026		
Durée de simulation		10 ans		

2.2.2.1 Mur non isolé – situation initiale

Le graphique ci-dessous présente le résumé de la simulation effectuée sur un mur non isolé initialement. Les courbes rouges et vertes représentent les valeurs à un temps donné, les traces plus claires représentent l'ensemble des positions adoptées par la courbe.



Sur un instant typique d'hiver ci-dessus, on peut observer la courbe de température (en rouge) entre extérieur (à gauche) et intérieur (à droite). Les caractéristiques d'isolation du matériau étant homogènes, cette courbe de température est linéaire.

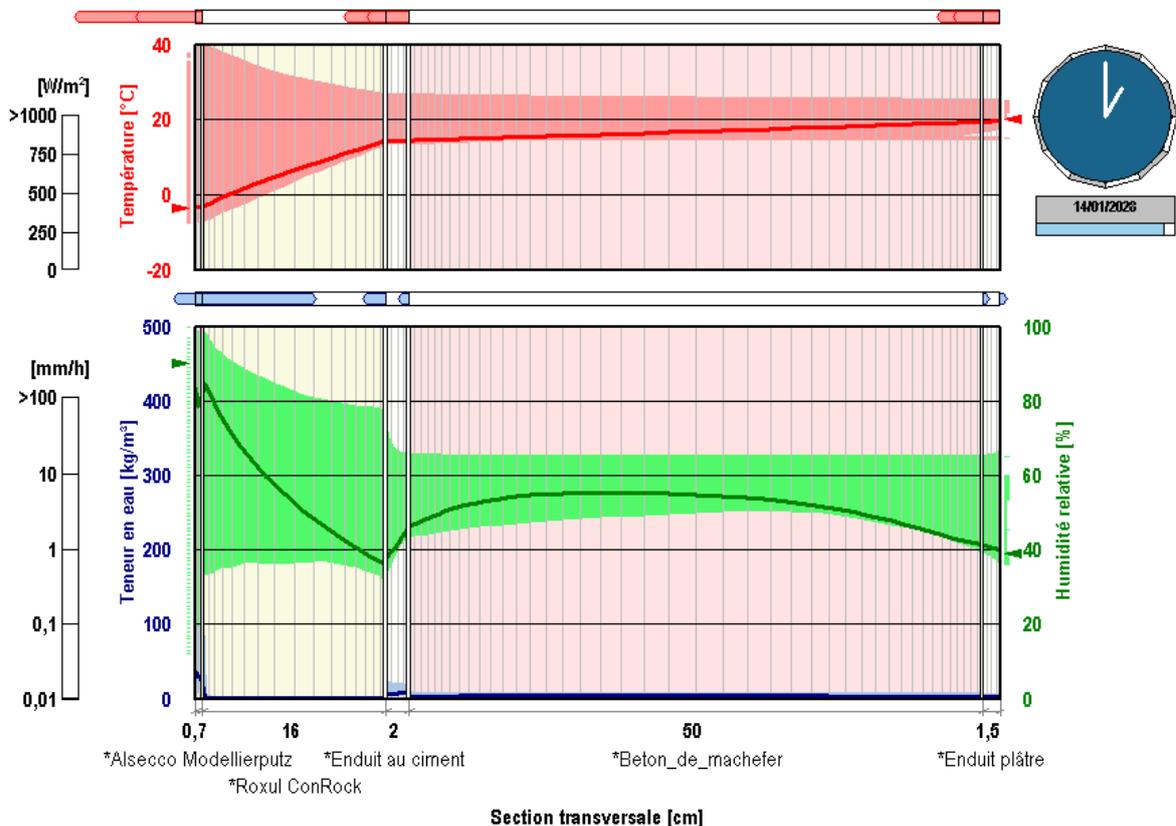
La courbe verte montre l'humidité relative dans les mêmes conditions. L'humidité relative représente la fraction d'humidité dans l'air par rapport à l'humidité maximale (pression de vapeur saturante / point de rosée). Cette humidité maximale varie, et plus l'air est froid plus l'humidité relative va être élevée. Dans le mur non isolé, l'humidité relative dans le mur reste dans des valeurs stables en fonction des années, avec des teneurs en humidité côté intérieur inférieures à 60%.

Les différents cas problématiques pouvant se poser et se révéler dans les simulations sont :

- Augmentation de l'humidité dans le matériau au fur et à mesure des années : cette augmentation montre un état de déséquilibre, qui peut mener à long terme sur une saturation du matériau et une formation d'eau liquide ;
- Humidité relative dans le matériau supérieure à 80% (cette valeur de 80% est indicative, chaque matériau doit être regardé de manière indépendante) ;
- Présence d'eau liquide en quantité importante dans le matériau (condensation ou non évacuation des infiltrations ou remontées capillaires par exemple) ;

2.2.2.2 Mur isolé par l'extérieur – laine minérale

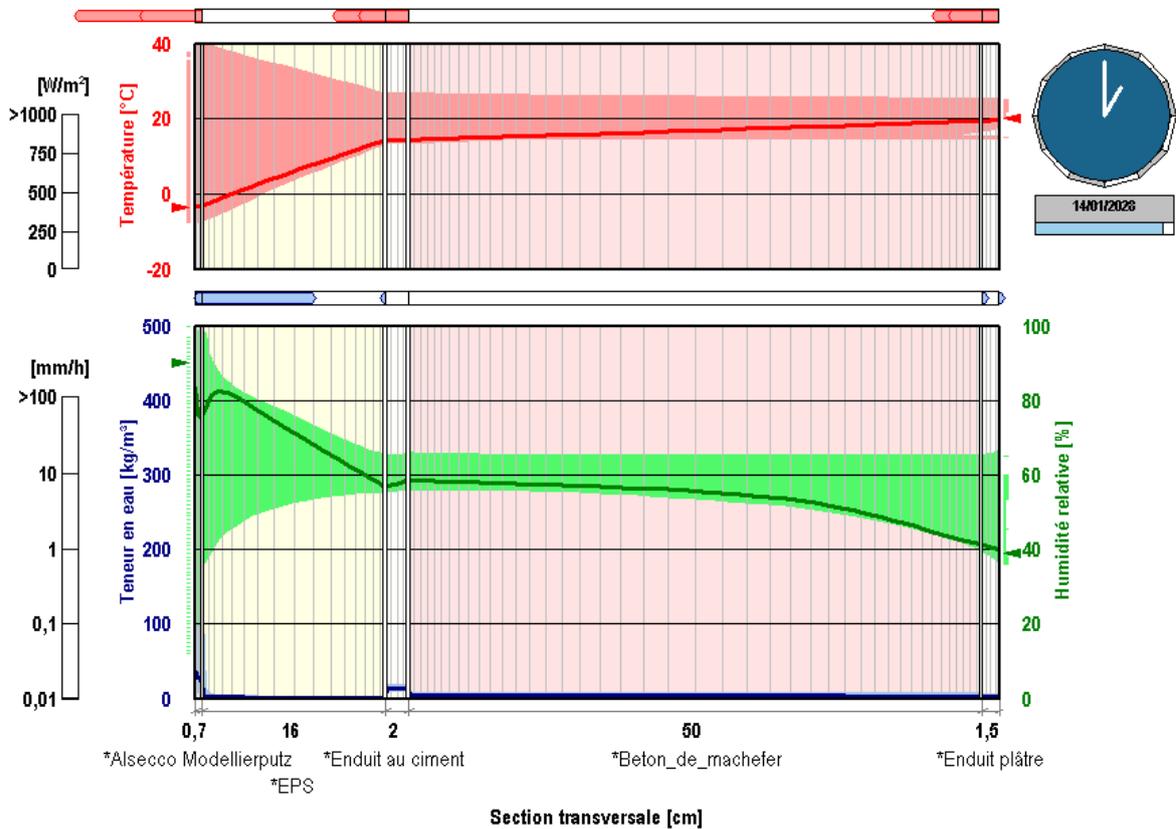
Donnée	Unité	Enduit ext	Isolant	Enduit accroch.
Epaisseur de la couche	cm	0.7	16	2
Densité	kg/m ³	1'400	145	1'750
Porosité	-	0.3	0.95	0.3
Chaleur spécifique	J/kg.°K	850	850	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	W/m°K	0.7	0.033	1.2
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	-	35	1.2	35
Humidité typique de construction	kg/m ³	250	0.39	280



L'isolation thermique par l'extérieur avec de la laine minérale (type laine de roche) est le cas semblant le moins problématique. En effet, l'isolation par l'extérieur tend à faire remonter la température dans le matériau, et réduit donc le risque de condensation et de création d'eau liquide. Le matériau possédant une bonne perméabilité à la vapeur d'eau, l'évacuation de celle-ci vers l'extérieure est possible. La simulation du cas sans enduit ciment à l'interface mâchefer – isolant montre un comportement identique.

2.2.2.3 Mur isolé par l'extérieur – polystyrène expansé

Donnée	Unité	Enduit ext	Isolant	Enduit accroch.
Epaisseur de la couche	cm	0.7	16	2
Densité	kg/m ³	1'400	30	1'750
Porosité	-	0.3	0.95	0.3
Chaleur spécifique	J/kg.°K	850	1'500	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	W/m°K	0.7	0.04	1.2
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	-	35	50	35
Humidité typique de construction	kg/m ³	250	1.79	280

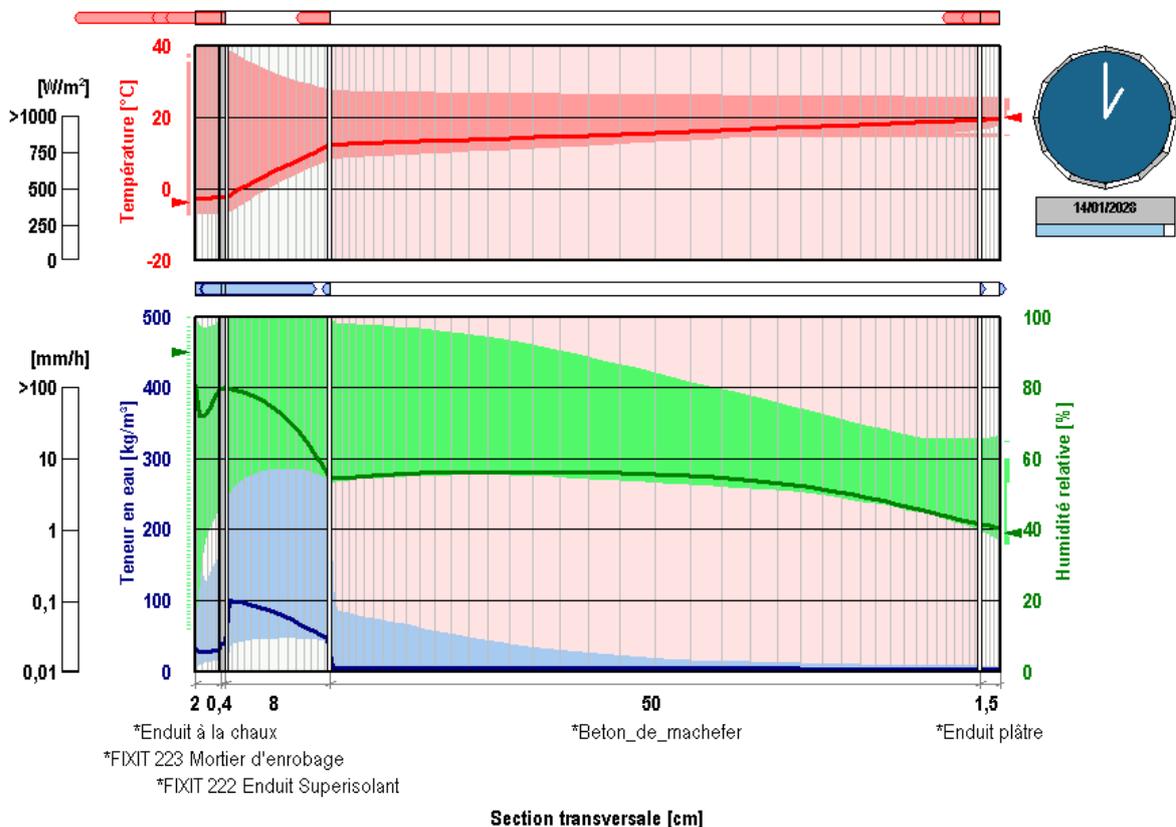


La simulation montre que la mise en place de polystyrène expansé en extérieur sur les murs de type mâchefer ne pose pas de problème de concentration trop grande d'humidité dans les murs. En effet, l'isolation par l'extérieur tend à faire remonter la température dans le matériau, et réduit donc le risque de condensation et de création d'eau liquide. Le matériau possédant une perméabilité à la vapeur d'eau correcte, l'évacuation de celle-ci vers l'extérieure est possible.

Des polystyrène présentant une perméabilité plus élevée à la vapeur d'eau existent sur le marché, et peuvent maximiser la conservation d'un bon fonctionnement.

2.2.2.4 Mur isolé par l'extérieur – enduit thermo-isolant (FIXIT 222®)

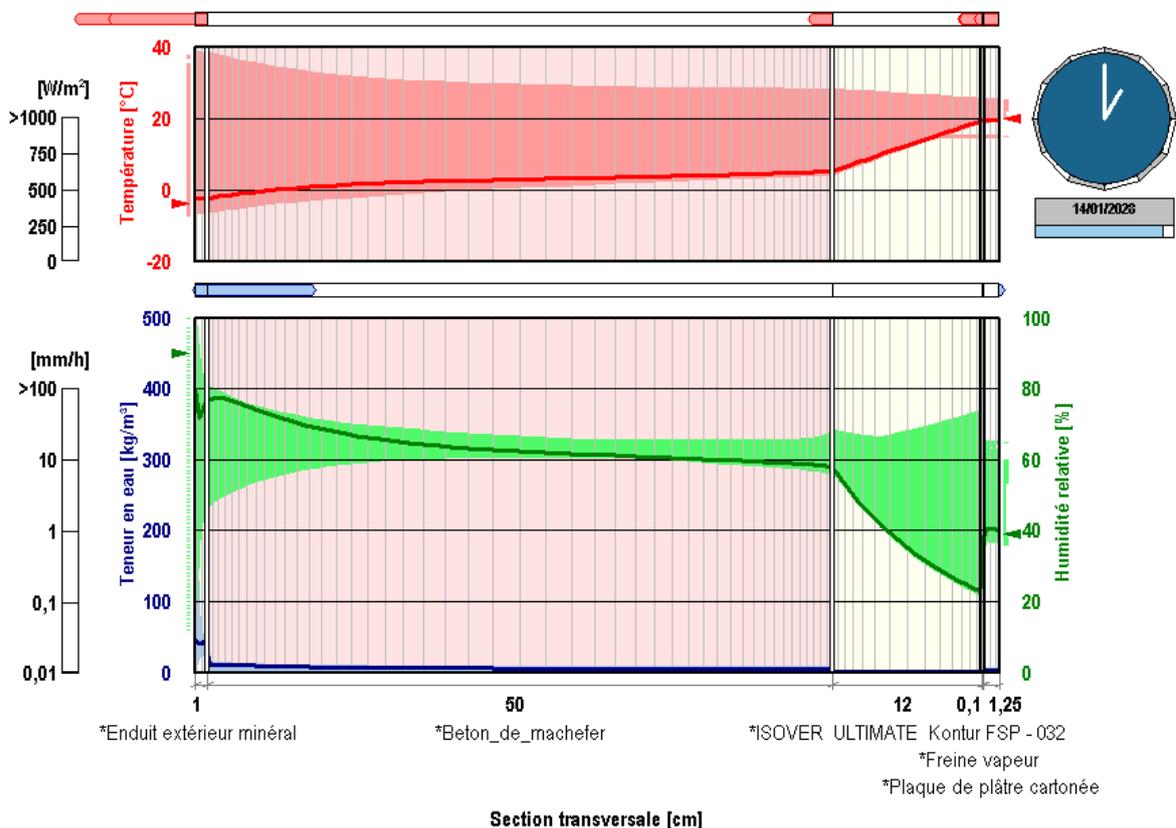
Donnée	Unité	Enduit ext	Mortier enrobage	Fixit 222
Epaisseur de la couche	cm	2	0.4	8
Densité	kg/m ³	1'600	1'250	220
Porosité	-	0.3	0.41	0.92
Chaleur spécifique	J/kg.°K	850	1'000	500
Conductivité thermique sèche, 10°C	W/m°K	0.7	0.35	0.028
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	-	7	7	5
Humidité typique de construction	kg/m ³	250	145	100



Le comportement thermique de l'enduit isolant est semblable à celui des autres isolants extérieurs. L'enduit thermo-isolant possède une teneur en eau importante lors de la mise en œuvre, ce qui explique une teneur en eau et une humidité relative importante dans le matériau et dans le mur mâchefer le temps du séchage (séchage total en 3 ans). Toutefois l'examen de l'évolution sur 10 ans montre que cette humidité est dégagée en été, et que les teneurs en eau des matériaux sont stables.

2.2.2.5 Mur isolé par l'intérieur – laine de verre sur ossature avec pare vapeur (cas Dauphiné ponctuellement)

Donnée	Unité	Isolant	Frein-vapeur	Plaque de plâtre
Epaisseur de la couche	cm	12	0.1	1.3
Densité	kg/m ³	40	130	850
Porosité	-	0.95	0.001	0.65
Chaleur spécifique	J/kg.°K	1'030	2'300	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	W/m°K	0.031	2.3	0.2
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	-	1	10'000	8.3
Humidité typique de construction	kg/m ³	0.5	0	6.3

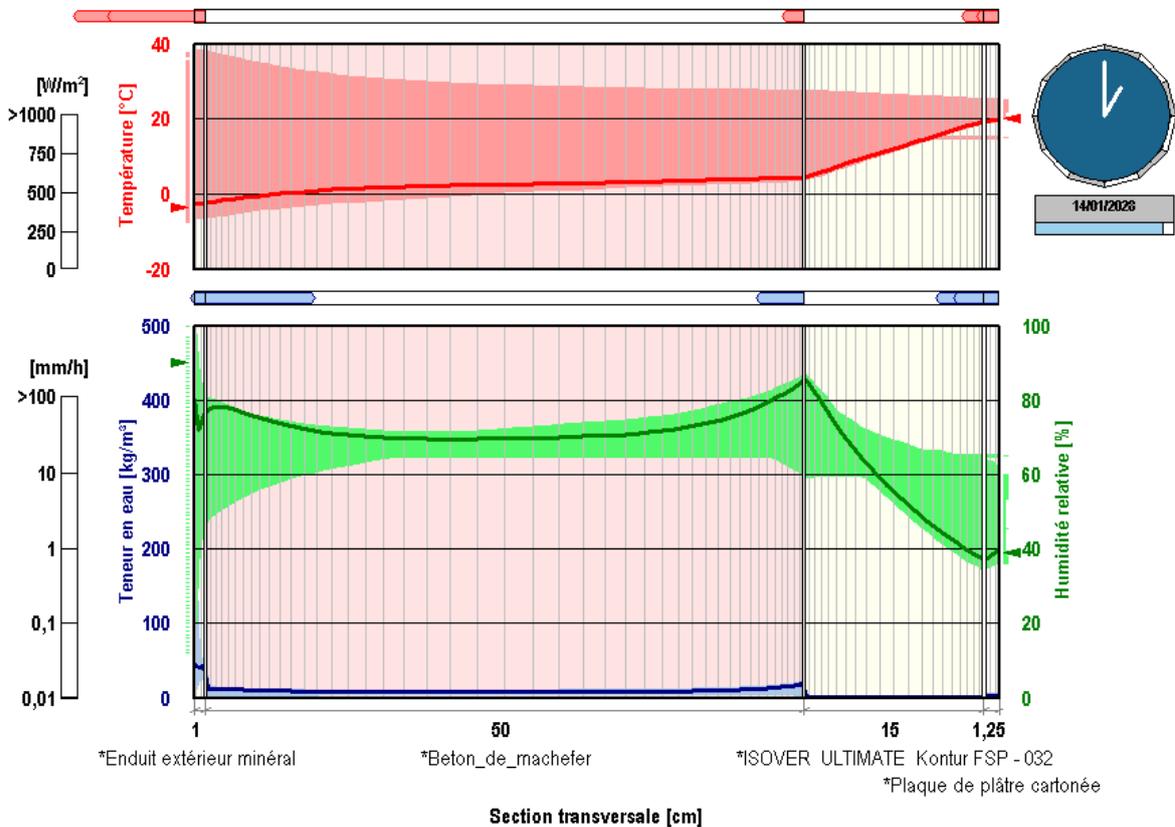


Avec une isolation intérieure, la couche en mâchefer est située côté froid, et a de ce fait une humidité relative plus importante. Le pare vapeur côté intérieur empêche la diffusion de vapeur depuis l'intérieur vers l'extérieur en hiver, et l'humidité venant de l'extérieur en été peut s'évacuer en hiver en retournant vers l'extérieur.

La mise en œuvre parfaite du pare vapeur en chantier d'existant étant difficilement réalisable, des passages d'humidité vont avoir lieu aux défauts. Ces passages sont assimilables à des « ponts thermiques » pour l'humidité, et vont engendrer localement un comportement identique à celui sans pare vapeur présenté ci-dessous.

2.2.2.6 Mur isolé par l'intérieur – laine de verre sur placostil sans pare vapeur

Donnée	Unité	Isolant	Plaque de plâtre
Epaisseur de la couche	cm	12	1.3
Densité	kg/m ³	40	850
Porosité	-	0.95	0.65
Chaleur spécifique	J/kg.°K	1'030	850
Conductivité thermique sèche, 10°C	W/m°K	0.031	0.2
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	-	1	8.3
Humidité typique de construction	kg/m ³	0.5	6.3



La température étant plus faible dans le matériau mâchefer et la vapeur d'eau pouvant transiter depuis l'intérieur, les humidités relatives dans le matériau sont fortes en continu, avec des valeurs entre 60% et 85%. On note à long terme une stabilisation de l'humidité relative du matériau (pas d'augmentation des valeurs maximales après 4 années d'augmentation), montrant qu'un équilibre est trouvé à des valeurs d'humidité relatives fortes. Ces valeurs peuvent conduire à la formation d'eau liquide à l'interface entre mur et laine de verre, et à la stagnation liquide à l'interface avec la laine de verre, pouvant conduire à un pourrissement de celle-ci. Cette formation peut particulièrement se trouver dans les pièces défavorisées (pièces humides, façade Nord, logement à forte occupation).

2.2.2.7 Comparaison des solutions

Le graphique ci-dessous compare l'humidité relative au milieu de l'épaisseur du mur en matériau mâchefer, suivant les différents cas d'isolation :

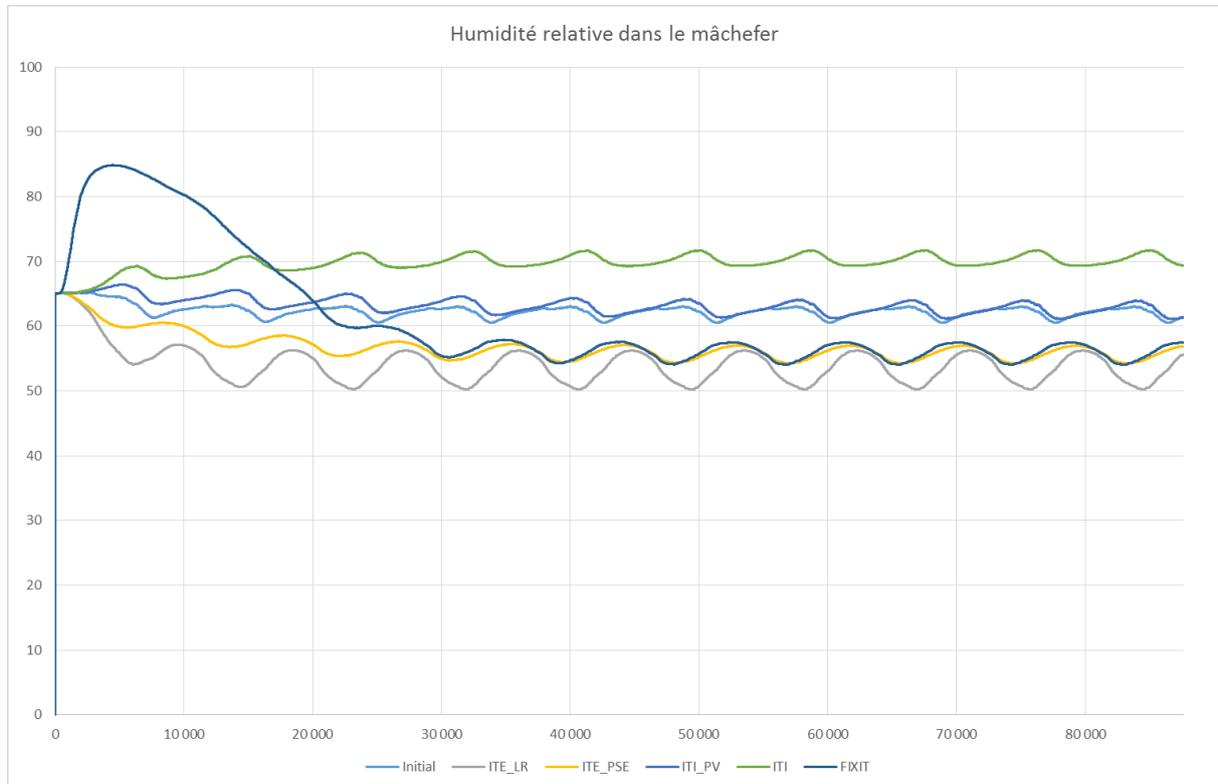


Figure 3 : évolution de l'humidité relative au milieu de la couche de mâchefer sur 10 ans pour différents cas d'isolation

Toutes les solutions comparées ci-dessus ont un comportement assez stable dans le temps, avec une variation annuelle faible de l'humidité relative dans le matériau et une convergence assez forte vers une valeur d'équilibre située entre 55% et 70%. Aucune solution d'isolation n'est donc problématique de manière générale, et même avec une solution d'isolation par l'intérieur sans pare vapeur, l'humidité ne s'accumule pas dans le matériau.

On retrouve les conclusions de l'intérêt des solutions d'isolation par l'extérieur, et en particulier de l'isolation par laine de roche qui laisse passer le plus la vapeur d'eau vers l'extérieur, avec des points d'équilibre plus bas. Cette teneur en eau plus basse dans le matériau va permettre de sécuriser la construction vis-à-vis des risques liés à l'humidité (en cas de dégât des eaux par exemple).

On remarque pour la solution d'isolation avec un enduit thermo-isolant FIXIT® une humidité relative très élevés les 2 premières années. Cette humidité est liés à la grande teneur en eau du produit à la mise en œuvre. Le temps que l'enduit sèche et que l'ensemble de l'eau soit évacuée vers l'extérieur, l'humidité passe également dans le mur en mâchefer. Toutefois cette humidité s'évacue au bout de 2 ans, et la teneur en eau dans le mur en mâchefer revient à un niveau équivalent à celui de l'isolant en polystyrène expansé.

2.2.3 Ponts thermiques

La mise en place d'une isolation sur un mur initialement non isolé peut augmenter l'importance des ponts thermiques dans le bâtiment. Ceux-ci constituent les points faibles de l'enveloppe, via une discontinuité de l'isolant (par exemple dalles intermédiaires en isolation par l'intérieur ou balcons en isolation par l'extérieur) ou par les périphéries de ceux-ci (par exemple arrêt de l'isolant en pieds de façade). Lorsque l'on isole la paroi, on va limiter le flux surfacique de chaleur qui la traverse. La différence de température entre intérieur et extérieur étant identique, des flux subsistent, qui se concentrent sur les passages possibles, localisés aux points singuliers. Tous ces points singuliers vont former des ponts thermiques, qui vont ressortir de façon plus importante.

A titre d'exemple, la mise en place d'un isolant intérieur va réduire la température dans l'ensemble du mur en concentrant la caractéristique isolante dans l'isolant. Les refends, au lieu d'avoir une liaison au mur extérieur à la température ambiante, vont l'avoir à une température proche de la température extérieure. Les flux à ces interfaces vont donc être plus grands qu'initialement.

Ces températures plus faibles des parois en contact avec des ponts thermiques peuvent avoir deux effets défavorables :

- Inconfort par effet de paroi froide ou contact
- Condensation de l'humidité ambiante sur ces surfaces. Cette condensation va produire les mêmes effets que ceux présentés ci-dessus.

L'analyse des ponts thermiques peut être réalisée à l'aide d'une caméra thermique ou d'un enregistreur de température de surface. Ces derniers peuvent également renseigner sur les points de rosée et les risques de condensation.

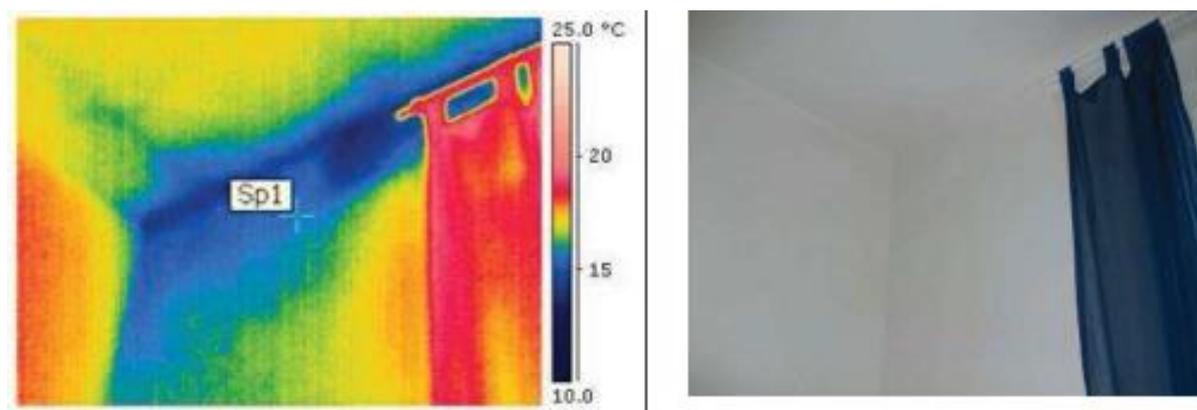


Figure 4 : Extrait du rapport de diagnostic de Perrache - Thermi Fluides - Juillet 2010

Une simulation sur le logiciel AnTherm a été réalisée dans le cadre de cette étude, en fonction des caractéristiques déterminées du béton banché de mâchefer, et sur un point particulier d'isolation intérieure. La simulation réalisée a été la liaison entre un mur en béton de mâchefer de 50cm d'épaisseur avec une isolation intérieure, une dalle béton de 30cm de hauteur et un refend en béton de 50cm de largeur (sur les groupes HBM étudiés, les refends ne sont pas constitués de béton mais de mâchefer), en considérant les dalles et refends comme traversant jusqu'au nu extérieur.

Les caractéristiques des matériaux utilisés sont précisés ci-dessous :

Donnée	Unité	Mur	Plancher	Refend
Matériau	-	Mâchefer + laine de verre	Béton armé	Béton non armé
Epaisseur de la couche	cm	50 + 12	30	50
Conductivité thermique λ	W/m.°K	0.3 / 0.035	2.5	1.7

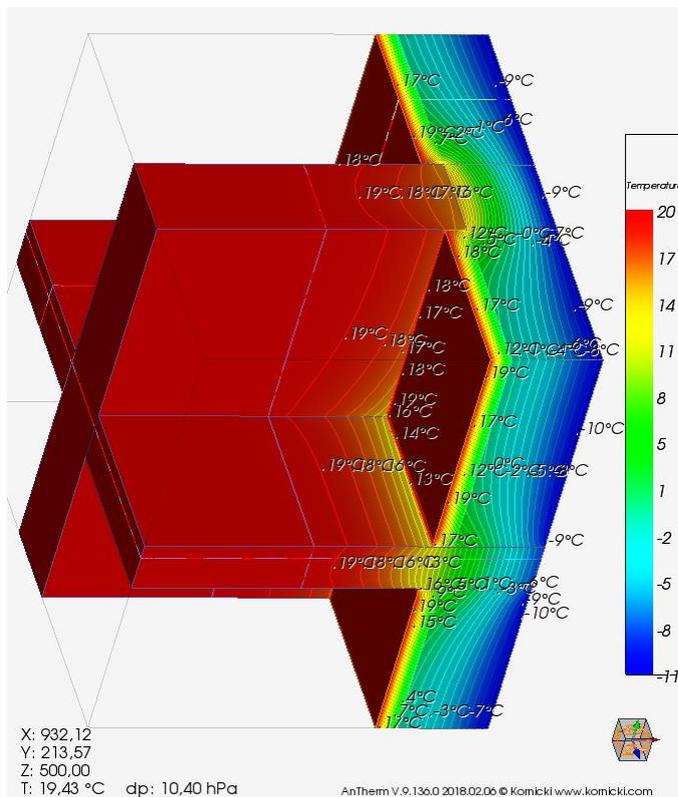


Figure 5 : modélisation thermique d'un pont thermique plancher intermédiaire / mur / refend

Cette simulation apporte les renseignements suivants :

- Les ponts thermiques créés par la traversée de l'isolant intérieur par le plancher ou le refend ne sont pas problématiques vis-à-vis des problèmes de condensation sur une pièce de vie ou sur une pièce humide. Sur une pièce humide, les températures des ponts thermiques sont toujours proches des températures de rosée (~12.5°C dans le cas d'une pièce humide) ;
- La grande épaisseur des murs mâchefer permettent d'avoir une résistance minimale du béton, et d'éviter des températures trop basses côté intérieur. Pour des murs d'épaisseur plus faibles, le pont thermique sera plus important et les risques de condensation plus forts ;

Des analyses identiques seraient à réaliser sur les différents points singuliers des réhabilitations, en particulier des interventions avec isolation intérieure, afin de s'assurer de l'absence de risque de condensation.

2.2.4 HBM et mâchefer : atouts et faiblesses

Les HBM étudiés dans le cadre de cette étude sont des bâtiments assez compacts, avec des murs épais (50cm en général, avec une variabilité entre groupes et entre les étages inférieurs et supérieurs d'un même groupe pouvant aller jusqu'à 10cm), des planchers intermédiaires lourds et de nombreuses orientations. L'analyse des paramètres physiques effectuées ci-avant montre les caractéristiques suivantes :

- Thermique d'hiver et isolation du bâti : les murs épais en béton de mâchefer forment une isolation minimale (équivalent à mur béton + 6cm d'isolant PSE). Cette isolation initiale a souvent été sous-estimée lors des études initiales et des calculs réglementaires, et permet une limitation des déperditions du bâti. Dans les calculs de résistance minimale à mettre en œuvre au sens de la RT existant « élément par élément » elle est à prendre en compte, réduisant la résistance complémentaire à mettre en œuvre à 1.1 m².°K/W (1.4 à partir de 2023). Les inconforts dans ce type de bâti vont être liés aux phénomènes suivants :
 - o Points faibles de l'enveloppe (pont thermique / épaisseur plus faible du mur extérieur comme en allège des fenêtres de cuisine à Tony Garnier / jonctions entre menuiseries et murs) ;
 - o Mauvaise qualité des menuiseries extérieures et infiltrations d'air ;
 - o Chauffage non structuré, de rendement faible, avec population souvent précaire utilisant le sous-chauffage comme moyen d'économies financières ;
- ⇒ **Prise en compte de la performance initiale du bâti, traitement des points faibles et ponts thermiques**
- ⇒ **Attention à avoir sur ponts thermiques créés et condensation intérieure**
 - Thermique d'été : la grande épaisseur des murs va apporter une inertie intéressante au bâtiment. On peut évaluer cette inertie comme équivalent à celle d'un mur béton d'une épaisseur réduite de moitié (densité du béton de mâchefer inférieure de moitié à celle du béton). La typologie des HBM et le lien historique avec les courants hygiénistes permet une bonne ventilation naturelle (traversante ou non). Les protections solaires sont à adapter en fonction des orientations, en privilégiant les BSO sur les orientations Sud et Ouest (orientations les plus défavorables en thermique d'été pour le climat lyonnais, l'orientation Est reste à traiter mais est le lieu d'un inconfort moindre);
- ⇒ **Inertie intéressante à conserver, privilégier systèmes d'isolation extérieure et attention à avoir sur protections solaires**
 - Transferts d'humidité : la question du transfert d'humidité dans les constructions en matériau mâchefer est sensible mais non critique vis-à-vis des transferts d'humidité dans le bâti. On peut comparer sa résistance à la diffusion de vapeur d'eau à celle d'un freine vapeur. Peu de problème se posent au niveau de l'isolation extérieure, en dehors d'infiltrations d'eau à l'intérieur des murs avec un revêtement extérieur imperméable. La présence de soubassement béton (jusqu'à 1.5 à 2m de hauteur par rapport au sol) permet de prévenir les remontées capillaires. En isolation intérieure, une attention est à porter sur la présence d'un pare vapeur intérieur, afin de limiter la transmission d'humidité depuis l'intérieur, ainsi que sur la présence de ponts thermiques pouvant occasionner des désordres de condensation et des effets de paroi froide.
- ⇒ **Réflexion sur pare vapeur systématique, attention sur ponts thermiques et condensation en ITI**

3 Corpus GLH HBM

6 groupes HBM en mâchefer ont fait l'objet d'une opération de réhabilitation dans les années 2010 par Grand Lyon Habitat. Ces groupes constituent le corpus de référence de la présente étude, ainsi que de l'étude coordonnée par le CAUE Rhône Métropole.

	Clos Jouve	Dauphiné	Donjon	Montchat	Perrache	Tony Garnier
Nombre de logements	297	231	285	248	175	275
Localisation	Lyon 4	Lyon 3	Lyon 9	Lyon 8	Lyon 2	Lyon 8

Les différents groupes, bien qu'ayant des caractéristiques et des architectures bien distinctes, forment un corpus assez homogène, tant au niveau des caractéristiques générales et architecturales que de l'époque de construction.

3.1.1 Groupes

Les paragraphes ci-dessous reprennent les principales caractéristiques des différents groupes. Il peut être utile de se référer à l'étude du CAUE Rhône Métropole pour l'analyse plus complète et détaillée des différents groupes.

Les tableaux récapitulatifs des entretiens réalisés avec les responsables d'opération GLH et les équipes de maîtrise d'œuvre sont disponibles en annexe au présent rapport et fournissent des informations complémentaires et plus détaillées sur les processus de conception et de réalisation.

Clos Jouve	
Nombre de logements	297
Localisation	Lyon 4 – boulevard de la croix-Rousse – rue des Chartreux 
Construction	1930-1934 – architecte Victor Clermont
Typologie	Bâtiments en R+5 alignés sur rue autour d'un cœur d'îlot. 2 plots en U sur boulevard, 1 plot en T en cœur d'îlot Commerces au RDC
Caractéristiques architecturales / techniques	Modénatures et peintures en façades, bas-relief ponctuel Balcon au R+4 sur boulevard, loggias sur plots et toiture tuile 4 pans
Coût d'opération	Travaux (APS) : 10'350'000 €HT (35'000€/logt)
Traitement thermique de l'enveloppe	Souhaité par MOE : ITE sur rue et sur Cour. Opposition de l'UDAP
Restructuration	Noyau pièces humides prévu en restructuration avec éléments préfabriqués
Entreprise	Sans objet
Caractéristiques	Projet stoppé en APS (modification du programme suite à reprogrammation budgétaire) et redémarre en 2020 avec une nouvelle équipe de MOE. Opposition très forte avec UDAP sur sujet ITE : volonté politique de démonstrateur. Mise en place témoin échelle 1 de l'ITE en cœur d'îlot Méthodologie envisagée questionnée par rapport à travaux en site occupé et nuisances locataires



Dauphiné	
Nombre de logements	231
Localisation	Lyon 3 – rue du Dauphiné 
Construction	1931-1932 – architectes B. Guérin (D1), F. Rochette (D2) et P. Galland (D3)
Typologie	Bâtiments en R+6 alignés sur rue avec redents en H en cœur d'îlot. 2 groupes distincts Dauphiné 1+2 et Dauphiné 3
Caractéristiques architecturales / techniques	Modénatures en façades, soubassement béton moucheté Balcon filant au R+5 sur rue Toiture tuile 4 pans
Coût d'opération	Travaux (consultation) : 11'000'000 €HT (48'000€/logt)
Traitement thermique de l'enveloppe	Sur arrière ITE avec polystyrène sous enduit ITI ponctuelle sur points faibles d'après calcul thermique Menuiseries extérieures remplacées par menuiseries bois
Restructuration	Création de WC dans l'ensemble des logements 2 allées restructurées (24 logements) suite à étude marketing
Entreprise	Entreprise générale
Caractéristiques	Relation avec l'EG conflictuelle (procédure de justice en cours) : adaptations en cours de chantier + délais de chantier (volonté EG : réduire délais)



Donjon	
Nombre de logements	285
Localisation	Lyon 9 – rue du Dauphiné 
Date de construction	Début années 1930 – architectes Pin et Bernard
Typologie	6 bâtiments en R+7 en H
Caractéristiques architecturales / techniques	Peu de modénatures en dehors de la corniche filante entre R+1 et R+2 Loggias Toiture terrasse
Coût d'opération	Travaux (APS) : 13'410'000 €HT (47'000€/logt)
Traitement thermique de l'enveloppe	Nombreuses options ITE, ITI, enduit thermo-isolant étudiées Remplacement des menuiseries extérieures
Restructuration	Restructuration salle de bains 100 logements
Entreprise	Sans objet
Caractéristiques	Projet stoppé en APS : réduction du budget suite à loi de finances 2018

Montchat	
Nombre de logements	248
Localisation	Lyon 8 – rue Ferdinand Buisson- rue de la Balme 
Date de construction	-
Typologie	6 bâtiments + 2 demi-bâtiments en R+6 en I
Caractéristiques architecturales / techniques	Modénatures : angles tronqués, soubassement béton moucheté, corniche filante en enduit moucheté au dernier étage Loggias Toiture tuile 4 pans
Coût d'opération	Travaux (réception) : 14'300'000 €HT (58'000€/logt)
Traitement thermique de l'enveloppe	ITE par laine de roche sous enduit Conservation des menuiseries extérieures
Restructuration	Création salle de bains sur ensemble des logements
Entreprise	Entreprise générale
Caractéristiques	Travaux prévus en site occupé, réalisés en site libre (nuisances trop importantes) EG en accompagnement projet et adaptations

Perrache	
Nombre de logements	175
Localisation	Lyon 2 – Cous Bayard, rue Casimir Perrier 
Date de construction	1932-1934 – architectes J. Marin et V-A. Robert
Typologie	6 bâtiments en R+6 en I
Caractéristiques architecturales / techniques	Modénatures : façades lisses sans soubassement, décrochés volumétriques en étages élevés et angles courbes Balcons Toitures terrasses
Coût d'opération	Travaux (consultation) : 15'000'000 €HT (56'000€/logt)
Traitement thermique de l'enveloppe	Façades sur rue : ITI par laine de verre en doublage avec ossature Façades arrières : ITE par laine de roche sous enduit Remplacement des menuiseries extérieures
Restructuration	Restructuration d'une allée de T1 en T2 (diversification offre) Restructuration pièces humides systématique
Entreprise	Entreprise générale
Caractéristiques	Travaux en site libre Résidentialisation et traitement des espaces extérieurs mené en amont : dégradations sur chantier

Tony Garnier	
Nombre de logements	Tranche concernée : 275 – Total : 1'567 logements
Localisation	Lyon 8 – boulevard des Etats-Unis – rue Wakatsuki 
Date de construction	Livraison 1933 – architecte Tony Garnier
Typologie	Tranche 1 : 3 bâtiments en R+5 en H, 1 barre en R+5
Caractéristiques architecturales / techniques	Modénatures : peu de modénatures hors corniche au dernier étage Loggias Toitures terrasses Commerces en RDC sur plots
Coût d'opération	Travaux (PRO) : 18'500'000 €HT (67'000€/logt)
Traitement thermique de l'enveloppe	Enduit thermo-isolant sur ensemble des façades Fermeture des loggias Remplacement des menuiseries extérieures
Restructuration	Restructuration des T4 pour création d'un WC indépendant Restructuration des RDC au niveau des halls et accès
Entreprise	Lots séparés
Caractéristiques	Travaux en site libre Mise en place d'un témoin en enduit thermo isolant

3.1.2 Points communs caractéristiques des groupes étudiés

Caractéristique	Commentaire
Epoque de construction	Entre 1925 et 1935
Parois verticales – construction	Béton de mâchefer banché (pisé de mâchefer) en murs, épaisseur moyenne 50cm (sauf sur éléments ponctuels, ex. allèges de fenêtres cuisine Tony Garnier, 20cm) Soubassement en gros béton jusqu'à 1 ou 2m de hauteur (protection contre remontées capillaires) Chainages béton tous les 2 étages (Clos Jouve)
Planchers	Poutrelle hourdis <ul style="list-style-type: none"> - Dauphiné : poutrelle métal hourdis brique - Perrache + Montchat : poutrelle + hourdis béton - Tony Garnier : poutrelle métal hourdis béton RDC, poutrelle + hourdis béton sur autres étages
Cloisonnement	Non porteur brique ou brique de mâchefer
Situation urbaine	Plan de composition urbain avec plots, bâtiments en H ou redents Dauphiné + Clos Jouve : façades urbaines alignées
Typologies	Nombreux logements traversants Larges ouvertures sur extérieures Protections solaires extérieures dès l'origine
Conception des logements	Logements de dimensions équivalentes aux standards actuels, avec cuisines indépendantes. Pas de salles de bains à l'initial, uniquement salle d'eau avec WC et lavabo Chambres grandes par rapport aux standards actuels, salles de séjours plus modestes
Chauffage et ventilation initiale	Pas d'équipement de chauffage ou de ventilation à l'initial. Conduits de fumée individuels dans cuisine et/ou entrée pour mise en place d'un poêle central
Réhabilitations	Peu de réhabilitation globale homogène des groupes. On notera <ul style="list-style-type: none"> - Des réhabilitations au logement menées dans les années 1990. Ces réhabilitations menées par Grand Lyon Habitat constituaient en des travaux « à la carte » dont le choix était laissé aux locataires. En résulte une grande hétérogénéité des installations - Des réhabilitations aux relocations, effectuées par l'agence locative ; - Des interventions ponctuelles pour des remises à niveau matériels ; - Sur certains groupes (Donjon, Tony Garnier) : réhabilitations globales
Population	Population vieillissante et vulnérable. L'attachement est très fort au groupe et l'attractivité est bonne. De nombreux résidents ont passé plus de 10 ans dans leur appartement ou leur groupe.

3.1.3 Points communs des projets

Caractéristique	Commentaire
Lancement de la consultation	Entre 2010 et 2013
Temps de projet	Temps d'études longs (hors Montchat) : diagnostics lancés 2 ans avant les consultations MOE + temps d'études longs <ul style="list-style-type: none"> - Clos Jouve : 4 ans pour APS - Dauphiné : 4 ans (+1.5ans pour démarrage chantier) - Donjon : 2 ans pour APS - Perrache : 2 ans - Montchat : 1 an - Tony Garnier : 5 ans
Coûts de travaux au logement	Coût de travaux élevés : 47'000 à 85'000€HT/logement
Expérience de la maîtrise d'œuvre sur HBM et mâchefer	En dehors de Clos Jouve, les équipes d'architectes choisis pour la maîtrise d'œuvre avaient des expériences sur des HBM ou des bâtiments mâchefer
Objet initial de la réhabilitation	Réhabilitation énergétique Les aspects de restructuration ou patrimoniaux sont apparus en cours de projet
Réflexions patrimoniale initiale	Diagnostics intégrant des aspects patrimoniaux sur certains sites (Perrache, Clos Jouve) Intégration des architectes des bâtiments de France (ABF) identique à projets « classiques », amenant des surcoûts et retards en cours de conception
Evolution du programme travaux	Evolution importante sur la majorité des projets pour intégrer : <ul style="list-style-type: none"> - Contraintes patrimoniales - Restructurations de logements - Regroupement de typologies
Travaux en site occupé / site libre	Travaux majoritairement en site libre. Sur certains groupes des sites occupés étaient prévus : <ul style="list-style-type: none"> - Montchat : après 1^{er} bâtiment, travaux en site libre choisi par GLH - Dauphiné : travaux en site occupé mais 60% des logements libérés (vulnérabilité locataires / restructuration / intervention en pièces sèches)
Entreprise générale / lots séparés	Travaux majoritairement en entreprise générale (hors Tony Garnier : lots séparés)

4 Bilan – évaluation et bonnes pratiques

4.1 Mise en place du programme travaux et évolution

4.1.1 Bilan

Les opérations de réhabilitation HBM étudiées ont été lancées sur des programmes de réhabilitation énergétique. Ces programmes sont liés à la date de lancement des opérations (début des années 1990), des objectifs et financements disponibles à l'époque et principalement centrés sur les thématiques énergétiques.

De fait, les programmes travaux initiaux comprenaient essentiellement des objectifs de réduction des consommations énergétiques, et des isolations systématiques avec des objectifs de calcul réglementaire et de label BBC.

Lors de toutes les premières phases d'études des opérations de réhabilitation s'est posée la question de la restructuration des logements. Ceux-ci offrent effectivement des volumes intéressants, mais sont aujourd'hui décorrélés du « produit logement » du début de XXIème siècle, notamment en termes de surfaces et de répartition des surfaces entre les différentes pièces. L'ajout d'équipements techniques va également demander des créations de gaines (évacuation des pièces d'eau, ventilation mécanique, chauffage).

De manière générale sur le corpus d'étude, les principales interventions de restructuration ont concerné les points suivants:

- Réaménagement de la salle de bains : la salle d'eau « couloir » a été aménagée au fur et à mesure de la vie du bâtiment dans les WC, un seul point d'eau étant prévu à l'origine. Cette salle de bains, de largeur 1m, nécessite de passer au-dessus des WC pour accéder à la douche, et n'est adaptée ni au mode de vie actuel, ni à la population vieillissante des groupes ;
- Redistribution des pièces : les chambres à coucher étaient à la base plus grandes que le salon, qui constituait une pièce de vie annexe. La situation s'est aujourd'hui inversée, avec des chambres à coucher très grandes et un salon petit (13m² sur exemple ci-dessous sur le groupe Perrache) ;
- Redistribution des typologies, avec la création de typologies T3-T4 au détriment des typologies T1 et T2 par regroupement de logements et diminution du nombre global ;
- Création de gaines de chauffage et de ventilation pour passage de la VMC et du chauffage et ECS collectifs

Ces restructurations apparaissent donc comme un point à questionner dans les réhabilitations, et représentent un coût important du point de vue des travaux, et du point de vue de la difficulté à laisser le locataire en place pendant les travaux.

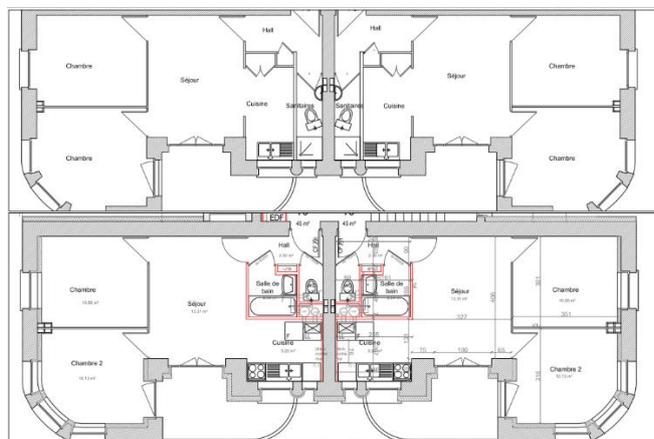


Figure 6 : Exemple de restructuration des pièces humides (groupe Perrache, cabinet Marin)

La majorité des groupes HBM n'a pas subi de réhabilitation majeure entre leur construction et l'époque actuelle, mais plutôt des interventions ponctuelles sur des remises aux normes (accessibilité, sécurité, électricité, ...), des remises à niveau technique, ou des réhabilitations au logement au choix du locataire (en particulier Perrache et Etats-Unis). De fait, l'état des logements est très hétérogène, et les interventions successives n'ont pas forcément été faites de manière homogènes et coordonnées.

Au niveau de la gestion en maintenance des équipements et de la gestion de son parc par Grand Lyon Habitat, il a été compliqué dans les projets de ne pas intervenir de manière systématique et homogène.



Figure 7 : Exemple de configurations de salle de bains sur une même typologie (groupe Donjon)

Enfin, la question de la thermique et de l'énergétique se pose du point de vue de l'isolation du bâti et du remplacement des menuiseries extérieures, mais également des systèmes de chauffage, de production ECS et de ventilation :

- Au niveau du chauffage, la majorité des logements a été traitée avec des chaudières gaz individuelles. En moyenne sur les groupes on retrouve 30% de logements en électrique direct, ou avec des chauffages non structurés (par exemple radiateur central gaz ou poêles d'appoint à pétrole ou bois). Ces systèmes posent problème au niveau de leur faible performance pour un coût énergétique élevé, et au niveau de la sécurité et des risques qu'ils entraînent ;
- Sur l'ensemble des groupes, des pathologies liées à l'absence ou l'insuffisance de ventilation sont présents. L'augmentation de l'étanchéité à l'air (et l'augmentation des ponts thermiques en cas d'isolation intérieure) vont augmenter encore ces pathologies. L'intervention sur la ventilation par la mise en place d'une ventilation mécanique semble donc indispensable.

Diagnostic	Clos Jouve 297 logts	Dauphiné 231 logts	Donjon 285 logts	Montchat 248 logts	Perrache 175 logts	Tony Garnier 275 logts
Budget programme (k€HT)	7'450 (base)	5'200 (base)		8'516 (base)	14'000	7'953 (base)
Budget final (k€HT)	APS 10'305	Chantier 11'150	APS 13'410	Réception 14'300	APD 15'000	DCE 18'504
Coût / logt (€HT / logt)	34'700	47'620	47'000	57'660	85'700	67'500
Part liée à la thermique (k€HT - %)	4'050 39%	4'800 43%	6'225 46%		4'475 30%	9'260 50%
Part liée à la façade (k€HT - %)	1'800 17%	1'590 14%	2'050 15%		2'150 14%	5'750 31%
Part liée à la restructuration (k€HT - %)	610 6% (22 logts)				1'765 11.7%	

L'examen des budgets consacrés aux différentes opérations classé dans le tableau ci-dessus montre des coûts de travaux aux logements importants (sur une réhabilitation « classique » d'une barre des années 60, le coût de travaux au logement tournait en moyenne au début des années 2010 entre 25'000 et 35'000€HT au logement). Le coût total des réhabilitations pour Grand Lyon Habitat est d'autant plus élevé que le coût des déménagements et des relogements s'ajoute au coût de travaux.

A noter que les programmes initiaux intégraient uniquement les remises en état des logements (« base »), et considéraient en option les travaux d'amélioration énergétique permettant l'atteinte du label BBC Rénovation et la restructuration des logements.

Une grande partie est consacrée aux problématiques thermiques et énergétiques (systèmes « passifs » comme l'isolation de la façade ou le remplacement des menuiseries extérieures ou « actifs » comme les systèmes). Les coûts spécifiques à la façade sont très élevés sur le groupe Tony Garnier, pour lequel le coût de l'enduit thermo-isolant est très important par rapport aux autres systèmes d'isolation.

4.1.2 Evaluation

L'ensemble des opérations ont vu leur programme fortement évoluer, ainsi que leur budget fortement augmenter entre la programmation initiale et la livraison. Les coûts d'opération sont élevés au regard du coût de travaux d'intervention au logement. Ces coûts d'opérations sont pour partie liés aux prestations qualitatives développées en façade, mais également à la remise à niveau d'un patrimoine immobilier qui n'avait pas été rénové de manière complète depuis près de 80 ans. Cette remise à niveau complète permet de resituer ces logements dans les standards de logements neufs du point de vue de leur « durabilité ». La question du loyer facturable par le bailleur est à poser par rapport à l'investissement réalisé, les augmentations de loyer étant limitées et les niveaux de loyer plus faibles que pour des logements neufs.

Sur les prochaines réhabilitations pour lesquelles un budget aussi conséquent ne pourra forcément être alloué, la question de la priorisation entre les différents éléments de programme (entretien courant, remise à niveau complet des équipements, restructuration des logements, traitement thermique de l'enveloppe, ...) devra être posée, ainsi que celle de l'adaptation du patrimoine aux normes actuelles (thermique, sécurité, techniques, ...). L'approche globale de la rénovation, en croisant les aspects architecturaux, techniques et patrimoniaux sera une clé de la recherche de finesse et d'efficacité dans les interventions.

4.1.3 Bonnes pratiques

Les bonnes pratiques identifiées dans le cadre de la programmation initiale et des démarrages d'études sont :

- Examen des restructurations simples ou complexes dès le démarrage, y compris avec étude marketing sur offre de logements à développer ;
- Diagnostic exhaustif des équipements techniques ;
- Etudes en coût global pour les questions énergétiques, comprenant :
 - o Montants de travaux
 - o Montants annexes (dont prestations intellectuelles, maîtrise d'œuvre sociale, déménagements)
 - o Consommations énergétiques
 - o Frais d'entretien et de maintenance
 - o Frais de remplacement des équipements en fin de vie
 - o Revalorisation de la valeur patrimoniale
- Intégration systématique des interventions en ventilation, et de remplacement des systèmes chauffages non structurés ou électriques ;

4.2 Diagnostic initiaux

4.2.1 Bilan

L'ensemble des programmes de travaux du corpus de groupes a été monté sur des objectifs de réhabilitation énergétique, basé sur des diagnostics thermiques et énergétiques datant du début des années 2010.

Ces diagnostics se sont accompagnés pour certains de diagnostics techniques et architecturaux, diagnostics sociaux, et/ou de diagnostics patrimoniaux.

Diagnostic	Clos Jouve	Dauphiné	Donjon	Montchat	Perrache	Tony Garnier
Urbain	05.2012 <i>Fleurent + Valette</i>	-	-	-	07.2010 <i>Fleurent + Valette</i>	-
Architectural	05.2012 <i>Fleurent + Valette</i>	04.2010 <i>Aydostian + Genoud</i>	-	-	07.2010 <i>Fleurent + Valette</i>	11.2013 <i>C&P</i>
Technique	05.2012 <i>Fleurent + Valette</i>	04.2010 <i>Aydostian + Genoud</i>	-	10.2013 <i>Egis</i>	07.2010 <i>Fleurent + Valette</i>	11.2013 <i>C&P</i>
Energétique	05.2012 <i>Thermi-fluides</i>	04.2010 <i>MG+</i>	11.2009 <i>Campatec</i>	10.2013 <i>Egis</i>	07.2010 <i>Thermi-fluides</i>	11.2013 <i>Quadriplus</i>
Patrimonial	05.2012 <i>Fleurent + Valette</i>	11.2014 <i>Architekt-on</i>	07.2015 <i>Archipat</i>	-	07.2010 <i>Fleurent + Valette</i>	01.2015 <i>Archipat</i>

La partie patrimoniale du diagnostic a été traitée par un diagnostic en tant que tel dans la majorité des réhabilitations, et par un architecte du patrimoine dans la moitié des réhabilitations. Par contre, on note que la réalisation de ces diagnostics a été réalisée dans la moitié des cas à posteriori du lancement de programme, suite à des échanges avec les ABF (UDAP 69).

On remarque ensuite que la majorité des diagnostics a été mené par des équipes différentes des équipes de maîtrise d'œuvre mandatées pour les réhabilitations. Mis à part pour Tony Garnier et Perrache, les équipes de maîtrise d'œuvre ont donc dû baser leurs études sur des documents tiers et sur une mission diagnostic partielle. La diversité des typologies et la diversité des états (liée en particulier aux réhabilitations aux logements des années 1990) rendent une systématisation de projet plus sensible, pendant la conception et pendant les travaux.

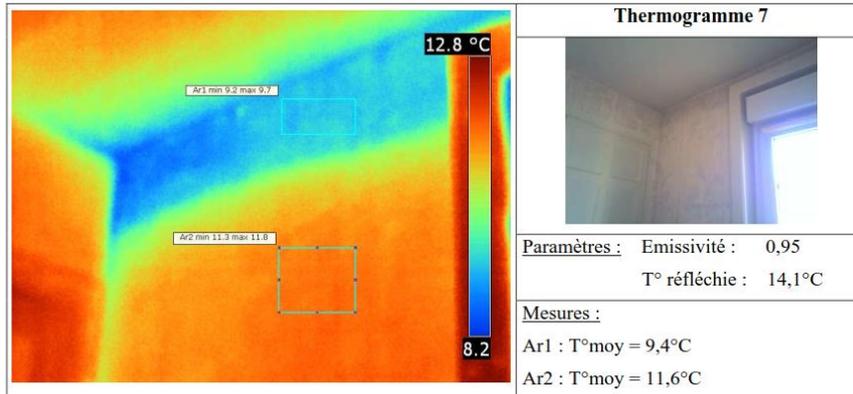
	Clos Jouve	Dauphiné	Donjon	Montchat	Perrache	Tony Garnier
Relevés géomètre	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Nombre de typologies	Non renseigné	45	26	5	7	6

La question des diagnostics s'est également posée sur la question du plomb et de l'amiante. Contrairement à ce que la première opération sur le groupe Montchat avait anticipé, les groupes construits avant 1950 souffrent tout autant des problématiques de l'amiante que leurs homologues des 30 Glorieuses. Les réhabilitations bailleurs, faites par les agences à la relocation, réhabilitations au logement des années 1990 ou les travaux locataires ont introduit de l'amiante dans une majorité de logements, sous une forme d'autant plus diffuse que cette introduction n'a pas été faite de manière homogène (certaines colles de carrelage ou de sol souple par exemple).

Ainsi sur le groupe Perrache sur lequel des bordereaux de prix unitaires avaient été prévus sur le traitement de l'amiante, 20 à 30% des surfaces ont été traitées en désamiantage.

Des diagnostics complémentaires ont été menés sur certaines résidences et ont apporté des renseignements intéressants :

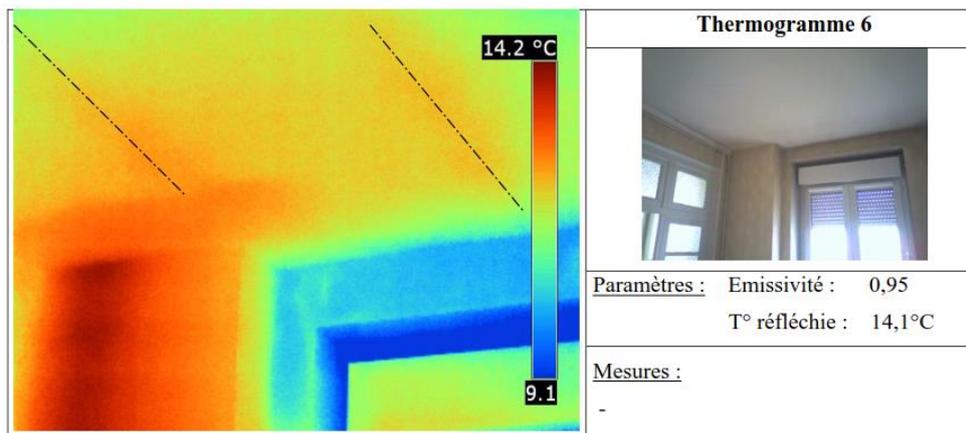
- Thermographie : Perrache et Clos Jouve. Sur Clos Jouve, elles ont révélé un chaînage béton faisant pont thermique tous les 2 étages (voir ci-dessous) et la structure porteuse. Sur Perrache, les ponts thermiques et sources de déperditions principales ont été soulignés ;
- Scans structure : ces scans peuvent être utiles sur la connaissance des entraxes de poutrelles pour prévoir la mise en place ultérieure des trémies (réalisé sur Daupiné) ;



Le thermogramme 7 met en évidence une différence de matériaux en partie haute des murs extérieurs. Nous avons identifié ce phénomène sur tous les murs extérieurs. Il s'agit probablement d'un renfort en béton sur le mur courant en béton de mâchefer, pour répartir les charges ponctuelles des poutres des dalles (chaînage périphérique).

Ces zones en béton génèrent des points froids (écart de température de surface de 2°C pour 11°C d'amplitude entre l'intérieur et l'extérieur. Ce point froid a généré une « ombre » plus sombre sur le papier peint (condensation).

Figure 8 : copie d'écran du rapport de diagnostic Enertech sur Clos Jouve - 11/12/2013 : repérage des éléments constructifs



Ce thermogramme permet de repérer les poutres des dalles hourdis. Nous avons mesuré un entraxe d'environ 60cm. Ce principe de repérage pourra être utilisé en phase chantier pour repérer où il est possible d'effectuer des carottages pour passer des réseaux (chauffage, ECS...) sans endommager la structure.

Figure 9 : copie d'écran du rapport de diagnostic Enertech sur Clos Jouve - 11/12/2013 : repérage de la structure

4.2.2 Evaluation

La complexité d'une opération de réhabilitation de logement se situe en partie dans la gestion des locataires (site occupé ou site libre), mais également dans la connaissance fine de l'existant. Sur les réhabilitations des groupes HBM, cette connaissance est d'autant plus importante qu'une grande hétérogénéité peut se retrouver :

- Liée à la construction : les techniques de constructions industrialisées n'étaient pas encore complètes, et des différences de dimensions peuvent se retrouver entre 2 typologies à priori identiques ;
- Liée à la perte d'informations : les plans d'origine ne sont pas forcément retrouvés, ou des plans non réalisés sont retrouvés ;
- Liée aux réhabilitations passées : sur les HBM, les réhabilitations au logement donnaient le choix au locataire d'une intervention « à la carte ». Certains logements n'ont aujourd'hui pas de chauffage ou pas de salle de bains, ou des douches positionnées dans les chambres ;

Le passage dans l'intégralité des logements se fait au cours de la réhabilitation et des adaptations au projet sont faites au fur et à mesure.

En cours de chantier, il peut toutefois être difficile de s'adapter, en fonction de l'entreprise présente. Sur Montchat, l'entreprise générale a été moteur dans cette adaptation, alors que sur Dauphiné elle est un frein aux adaptations nécessaires.

De plus, ces adaptations nécessitent de reprendre les données de conception et les échanges avec les interlocuteurs. Ces reprises et échanges sont une cause des dérapages de planning de certaines opérations.

4.2.3 Bonnes pratiques et suggestions

Les bonnes pratiques identifiées concernant la mise en place des diagnostics sont :

- Lancer l'ensemble des diagnostics en même temps ;
- Confier une mission de synthèse des diagnostics au maître d'œuvre désigné ;
- Intégrer un diagnostic patrimonial immédiat, pour avoir les données de base de discussion avec les différentes parties prenantes de l'instruction (UDAP, Service Urbanisme) ;
- Lancer un repérage amiante partiel mais représentatif avant l'APD ;
- Confier le diagnostic technique, architectural et les visites de logements à l'équipe de maîtrise d'œuvre en charge de la réhabilitation ;
- Demander un taux de visite de 80% des logements en phase DIAG, viser les 100% de visites pour diminuer les aléas ;
- Intégrer dans les marchés de travaux des BPU (amiante et adaptations logements) ;
- Réaliser une thermographie du bâtiment ;
- Réaliser des diagnostics complémentaires (en particulier scans structure) lorsque cela s'avère apporter des informations au projet. En cas de sondages destructifs nécessaires, mise en place dès la phase diagnostic sur logements vacants;

4.3 Techniques pour l'isolation du bâti mâchefer

4.3.1 Bilan

L'objectif énergétique prioritaire des opérations et la conformité à un niveau de label BBC Rénovation pour la captation de subventions a amené l'ensemble des opérations sur la mise en place d'une isolation thermique.

Cette isolation thermique a été l'objet de nombreux débats internes et externes aux projets, et a mené à des solutions différentes pour chaque groupe. En particulier, les points suivants ont amené les décisions de la maîtrise d'ouvrage :

- Coût d'investissement ;
- Efficacité énergétique et charges énergétiques ;
- Aspect patrimonial et urbain avec ABF et service instructeur de la Ville de Lyon ;

Sur la partie du coût d'investissement, des surcoûts inhérents aux caractéristiques des HBM sont à prendre en compte, et alourdissent de manière importante les budgets :

- ITE : reprise des modénatures en préfabriqué ;
- ITE : réfection des appuis de fenêtres et des dormants des menuiseries pour conserver une profondeur de baie identique depuis l'extérieur ;
- ITI : comme dans toutes les réhabilitations, l'ITI est très compliquée à mettre en œuvre en site occupé ;

Peu d'échanges spécifiques au matériau mâchefer et à ses risques sur le bâti ont été amenés à notre connaissance par les chargés d'opérations et les maîtrises d'œuvre rencontrées. Les caractéristiques thermiques prises en compte (cf. §2.1.1.1) dans les calculs thermiques réglementaires en sont un signe, les échanges avec les responsables d'opération et les maîtres d'œuvre ont confirmé ce fait.

De manière générale, la connaissance initiale se résumait à une attention à avoir sur les transferts d'humidité et sur la mise en place des produits isolants en façade perméables à la vapeur d'eau. Ces connaissances étaient issues de l'expérience des architectes ou des fabricants de produits en façade.

Aucune étude n'a été menée sur les problématiques particulières, en dehors d'une étude de Enertech sur Clos Jouve et démontrant un risque en cas d'isolation intérieure, et qui n'a pas été portée à notre connaissance dans le cadre de notre étude. Des calculs de valeurs de ponts thermiques ont été menés sur certaines opérations (par exemple Dauphiné) suite aux questionnements des responsables d'opération.

Le choix entre les deux types d'isolation (intérieure ou extérieure) a été un choix de faisabilité patrimoniale et financier. L'ensemble des opérations était initialement en isolation extérieure, et les échanges avec les ABF et services instructeurs de la Ville de Lyon ont amené un certain nombre de contraintes sur l'isolation.

Sur Dauphiné, l'isolation intérieure a été mis de manière ponctuelle sur une sélection de parois les plus défavorisées. Cette isolation partielle permet de limiter l'impact des travaux intérieurs (nuisances locales + perte de surface habitable). Toutefois, elle induit une hétérogénéité au sein du bâti, qui peut entraîner des phénomènes de parois froides, en plus des ponts thermiques produits par les isolations intérieures. En cas de situation de condensation, l'isolation de certaines parois va concentrer le phénomène sur les parois restantes, pouvant amener à des volumes d'eau plus importants localement.

Sur Perrache, l'utilisation combinée d'isolation intérieure et extérieure permet d'avoir une isolation présente sur l'ensemble des murs, et évite ainsi les phénomènes de parois froides. Cette utilisation combinée peut poser des problèmes au niveau des ponts thermiques (ponts thermiques identiques à une isolation thermique par l'intérieur). Si ceux-ci sont vérifiés ou traités, la solution permet un traitement complet du bâti.

	Clos Jouve	Dauphiné	Donjon	Montchat	Perrache	Tony Garnier
Type d'isolation	ITE (APS)	ITE (arrière) ITI localisé cas par cas	ITE (APS)	ITE	ITE (arrière) ITI (sur rue)	Enduit thermo-isolant extérieur
Matériau	Laine de roche	Poly-styrène expansé (PSE)	Sans objet	Laine de roche	Laine de roche	FIXIT 222®
Epaisseur (cm)	16	ITE : 16 ITI : 10 - 12	16	15	15	6
Résistance thermique de l'isolant (m ² .°K/W)	4.6	ITE : 4.2 ITI : 3.75	3.7	3.95	ITE : 4.15 ITI : 4.40	2.14

Le traitement mis en place sur le groupe « Tony Garnier » est un traitement d'isolation par l'extérieur par un enduit super-isolant à base de nanogel (produit FIXIT 222®). Ce produit originaire de Suisse est très utilisé sur du bâti ancien, et présente des qualités thermiques ($\lambda = 0.028$) et hygroscopiques très bonnes, tout en permettant un rendu de finition optimal. Il a été mis en œuvre sur un prototype sur le groupe Tony Garnier sans problème spécifique remonté à ce jour. Son coût est très élevé par rapport à des systèmes ITE et ITI plus traditionnels.

D'autres enduits isolants existent, de coût inférieur mais aux propriétés thermiques inférieures, par exemple :

- Isolteco (marque Edilteco) : $\lambda = 0.051$, à base de chaux et polystyrène
- Diathonite Evolution (marque Diasen) : $\lambda = 0.045$, à base de chaux, liège, argile et silice
- Unilit 20 (marque Unilit) : $\lambda = 0.066$, à base de chaux et de silice expansée
- Biotherm (marque Haga) : $\lambda = 0.07$, à base de chaux et de liège

Ces enduits isolants n'ont pas été étudiés par les équipes de maîtrise d'œuvre au-delà du diagnostic, du fait des gardes fous de la RT existant « élément par élément » et de la performance très élevée de l'enveloppe demandée. Les performances du mâchefer ayant été sous-estimées, l'épaisseur d'enduit isolant nécessaire était considéré comme trop important.

Le point spécifique du chantier est peu problématique dans les opérations en cours ou terminées pour l'ITE, avec des tenues correctes des systèmes calés-chevillés. Un point administratif lié à la nécessité d'une assurance spécifique pour le matériau mâchefer est à anticiper dans le cadre du chantier (support non couvert dans l'ATEC du fait de l'hétérogénéité du matériau). Sur le chantier Dauphiné par exemple, un protocole de suivi systématique par le fabricant a été demandé par l'assureur pour garantir la bonne mise en œuvre, résultant en la nécessité de prévoir l'intégralité du système de façade sur les produits d'un même fabricant.

4.3.2 Evaluation

L'étude préambule sur le matériau montre que les risques sont faibles vis-à-vis de l'humidité dans le matériau dans le cas d'une ITE, mais que des risques existent dans le cadre d'une ITI, en particulier lié aux ponts thermiques. L'incidence de ces ponts thermiques a été évoqué sur certains projets avec des calculs de ponts thermiques effectués, mais sans que les conclusions ressortent clairement dans les études ou dans les entretiens avec les responsables d'opération. Une attention est nécessaire sur ces

problématiques de ponts thermiques après la livraison des opérations, car les problèmes peuvent apparaître au bout de plusieurs années (les murs se « chargent » d'eau liquide au fur et à mesure des années).

Les échanges initiaux sur l'architecture montrent qu'aucune solution globale ne s'impose sur l'ensemble des HBM, et que l'étude au cas par cas s'impose. La présence ou non de modénatures, la texture de certaines parties, le positionnement par rapport à l'espace public, la modification du rapport pleins-vides, constituent autant d'éléments qui vont faire pencher une solution par rapport à une autre.

Du point de vue strictement thermique et des phénomènes physiques du bâtiment, il apparaît que la mise en place d'une isolation thermique extérieure (en semi-vêture sous enduit ou par un enduit isolant) possède les avantages suivants :

- Conservation de l'inertie en été ;
- Limitation des ponts thermiques et risques de condensation associés ;
- Conservation de la diffusion de vapeur d'eau naturelle sans adjonction de pare-vapeur et exigence de mise en œuvre

Les solutions par enduit isolant (FIXIT ou autres isolants) paraissent intéressante, qu'elles soient utilisées seules ou en complément d'une isolation par l'intérieur, par le traitement des ponts thermiques, la conservation de l'inertie du bâti et la migration de vapeur d'eau dans le matériau. La solution d'enduit superisolant à base de nanogel (enduit FIXIT®) est une solution techniquement très intéressante, mais qui présente un surcoût très important par rapport à une ITI ou ITE classique (+100% sur le poste façade pour Tony Garnier).

Les solutions combinées (ITE et ITI suivant localisation sur rue / cour ou selon typologie du mur) permettent de régler des questions au « cas par cas ». La multiplicité des ponts thermiques créés par l'isolation par l'intérieur impose toutefois une étude plus poussée des ponts thermiques et induit des risques accrus.

4.3.3 Bonnes pratiques

Les bonnes pratiques identifiées pour cet item (techniques d'isolation de la maçonnerie mâchefer) sont :

- Avoir des échanges avec les services instructeurs (UDAP, Service urbanisme) dès la phase diagnostic ;
- Réaliser systématiquement les calculs de ponts thermiques et évaluer les risques de condensation, en ITI et dans une moindre mesure en ITE ;
- Sur les opérations livrées en ITI, évaluer l'importance des ponts thermiques à l'aide d'une thermographie et de mesures de températures de surface en hiver ;
- Réaliser des calculs de diffusion de vapeur d'eau de type dynamique (type WUFI) lors des choix des matériaux de traitement de façade ;
- Accepter la réalisation d'une « mise en œuvre de techniques non courantes » en cas d'ITE calée / chevillée, amenant un engagement du maître d'ouvrage et de la responsabilité du maître d'œuvre.

4.4 Nuisances spécifiques du matériau mâchefer

4.4.1 Bilan

Peu de contraintes chantier particulières aux HBM ou au matériau mâchefer ont été relevées sur les groupes pour lesquels le chantier a débuté. Le travail sur le matériau ne pose pas de problème particulier aux entreprises, que ce soit pour les percements ou les accrochages. Ont été constatés les points particuliers suivantes :

- Sciage et coupage (groupe Montchat, sciage des appuis de baies en parties communes pour création d'ascenseur) : le matériau est assez friable et pulvérulent lors du sciage. L'utilisation d'une scie circulaire a été nécessaire. Sur Perrache, un arrosage a été mis en place lors des découpes importantes pour éviter le dégagement de poussières trop important ;
- Accrochage des chevilles (groupes Dauphiné et Perrache) : des attestations d'assurance spécifiques ont été demandées pour la mise en œuvre de l'ITE en semi-vêtue. Le procédé est considéré comme hors ATEC par les assurances. La fourniture de cette assurance spécifique n'a pas posé de problème (hors délais administratifs) sur Perrache. Sur Dauphiné, l'assurance a exigé un contrôle du fabricant de produit à toutes les étapes de mise en œuvre, nécessitant la mise en place d'une unique gamme de produits. Sur Perrache, le nombre de points d'accroche est très important en particulier pour la structure porteuse du bardage extérieur. Ce nombre important de point d'accroche va augmenter les ponts thermiques et réduire la performance globale de l'isolant.

Les percements dans le matériau dégagent de la poussière dans la composition et les risques pour la santé des travailleurs sont inconnus. Les échanges avec le groupe de travail montrent que le matériau comprend des éléments pouvant être toxiques, toutefois le détail de ces éléments a été obtenu par un procédé de lixivation, très éloigné des conditions qui peuvent se retrouver dans un cas courant.

4.4.2 Evaluation

Peu de nuisances particulières au matériau apportent des contraintes en organisation ou équipements de chantier. Une analyse des poussières dégagées par les percements (par exemple aspirateur avec filtre porté par opérateur sur une journée de travail en façade) pourrait être une démarche intéressante du point de vue de la santé au travail, et donner des indications sur le dégagement effectif de polluant par rapport à une valeur limite d'exposition professionnelle.

4.4.3 Bonnes pratiques

Les bonnes pratiques identifiées pour cet item sont :

- Intégrer dans les appels d'offres les exigences assurancielles ;
- Préférer une prescription sur un seul fabricant pour les interventions en façade ;
- Prévoir des équipements adaptés à la découpe de matériaux pouvant être pulvérulent, et des systèmes d'aspiration à la source pour les dégagements de poussières ;

4.5 Calcul thermique et coût global

4.5.1 Bilan

Dans le cadre d'une réhabilitation, le calcul thermique peut être utilisé à plusieurs fins :

- Justifier la conformité réglementaire à la réglementation thermique (RT - sans objet pour les HBM qui sont soumis à la RT « élément par élément » ne nécessitant pas de réalisation de calcul thermique global) ;
- Justifier la conformité à un label ou un référentiel ;
- Calculer les consommations prévisionnelles et être un outil d'aide à la décision en réflexion en coût global (investissement + exploitation + maintenance).

Plusieurs méthodes de calculs thermiques existent, et vont donner des résultats qui doivent être utilisés uniquement dans le domaine d'utilisation de la méthode. Pour mémoire, on peut simplifier l'approche des différentes méthodes de calcul suivant les critères suivants :

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

Les calculs thermiques utilisés dans les différentes opérations reflètent les objectifs de réhabilitation énergétique et des respect d'un niveau de label réglementaire. Elles sont détaillées ci-dessous :

	Clos Jouve	Dauphiné	Donjon	Montchat	Perrache	Tony Garnier
Th-CE ex	Toutes phases	Toutes phases	Toutes phases	Toutes phases	Toutes phases	Toutes phases
STD	DIAG	-	-	-	DIAG	-
DJU	DIAG - APS	DIAG - APS	-	-	DIAG - APS - APD	DIAG - APS - APD
Calcul prév. De charges basé sur	Calcul simplifié	DJU	Pas de calcul prév.	Th-CE ex	DJU	Calcul mensuel

Les différentes études transmises montrent une importance prioritaire sur les questions de calcul réglementaire, par rapport aux exigences des niveaux du label BBC-Effinergie. Des calculs prévisionnels en coût global basé majoritairement sur des calculs adaptés sont effectués. Toutefois ces calculs utilisent des valeurs défavorables pour le matériau mâchefer, et vont donc amener à des résultats surévalués en termes d'économies de charges. De plus ils ne sont pas forcément mis à jour au fur et à mesure de la conception, et des tableaux faisant uniquement apparaître des performances en calcul réglementaire sont utilisés dans les choix des phases ultérieures (p.e. Dauphiné).

Les opérations Perrache et Tony Garnier utilisent le financement de la « 3^{ème} ligne de quittance ». Ce type de financement permet – sans avoir à valider par un accord collectif – de faire apparaître une ligne sur la quittance de loyer représentant les économies d'énergies dégagées par les travaux. Le calcul de cette ligne se fait à partir de la méthode réglementaire, en divisant les économies d'énergie entre le bailleur et le locataire. Du fait de l'inadaptation de la méthode Th-CE ex au bâti ancien, les caractéristiques des états initiaux vont être péjorés, les calculs d'économies d'énergie majorées et les montants demandés aux locataires majorés par rapport au pourcentage réel d'économies d'énergies.

	Clos Jouve	Dauphiné	Donjon	Montchat	Perrache	Tony Garnier
Economie chauffage selon Th-CE ex	85%	82%	71%	56%	82%	77%
Economie chauffage selon calcul prévisionnel	66%	76%	-	-	87%	59%

On notera sur le tableau ci-dessus que les calculs thermiques de Perrache montrent une économie plus importante selon le calcul prévisionnel que suivant la méthode Th-CE ex. N'ayant pas accès à l'intégralité des calculs effectués, nous n'avons pu déterminer la raison possible de cette différence.

4.5.2 Evaluation

En majorité, des méthodes de calcul adaptées à la destination des calculs ont été utilisées pour effectuer des calculs de charges prévisionnelles et des calculs en coût global. Les simulations de type simulation thermique dynamique et de type simplifié (par exemple DJU) ont été calibrées par rapport aux consommations existantes, et ont mené dans certains cas à la réévaluation des caractéristiques du matériau mâchefer.

Toutefois, les caractéristiques initiales de conductivité thermique du mâchefer ayant été sous-évaluée par les différentes équipes (en dehors de la STD de l'opération Perrache pour lequel la valeur de conductivité reprise est proche du réel), les économies de charges réelles à la livraison seront plus faibles que celles calculées et attendues.

Les opérations utilisant la 3^{ème} ligne de quittance vont également avoir des économies d'énergies surévaluées et une participation du locataire pouvant être supérieure à la moitié des économies effectivement réalisées.

Les opérations ayant été livrées pour la première (Montchat) à l'automne 2018, un comparatif des consommations réelles finales par rapport aux consommations prévisionnelles n'est pour le moment pas possible.

La question de la thermique d'été a été peu évoquée dans les documents de projet à notre disposition, en particulier dans les groupes bénéficiant d'isolation par l'intérieur. La caractérisation du confort d'été prévisionnel dans les réhabilitations par une STD peut être un élément d'aide à la décision aux stades des arbitrages.

4.5.3 Bonnes pratiques

Les bonnes pratiques identifiées pour cet item (calcul thermique) sont :

- Intégrer dans le contrat de maîtrise d'œuvre une simulation thermique dynamique pour définir le confort d'été et éventuellement les consommations prévisionnelles. Cette simulation thermique dynamique peut être mise en œuvre dès les premières estimations de coût global (phase DIAG ou APS) ;
- Demander l'explicitation des calculs prévisionnels de charges par les méthodes simplifiées (DJU), afin de permettre de visualiser les paramètres utilisés et de valider les hypothèses prises en cas de contrôle ;
- Mettre en place un suivi énergétique à minima annuel sur les 3 premières années de fonctionnement complet des groupes et comparer aux économies prévisionnelles annoncées en phase études ;
- Examiner les économies réelles par rapport aux économies prévisionnelles et évaluer la surcharge de la 3^{ème} ligne de quittance ;

4.6 Quel objectif énergétique ?

Pour rappel, la réglementation thermique applicable aux bâtiments existants (RT existant) applicable sur les projets étudiés et encore ne vigueur à l'écriture de ce dossier date de 2009. Elle distingue les bâtiments construits après 1948 (avec une industrialisation du bâti plus importante) et les bâtiments avant 1948, considérés comme relevant d'une architecture moins industrialisée et pour lesquels les exigences sont moindres. Elle comporte 2 volets :

- La RT « globale », pour les gros projets de rénovation de bâtiments après 1948, demandant de justifier par le calcul thermique une performance globale (« 5 postes » : chauffage + ECS + éclairage des parties communes + auxiliaires de chauffage + auxiliaires de ventilation) inférieure à une valeur données ;
- La RT « élément par élément », demandant que les interventions liées à la thermique respectent une performance minimale (garde-fou). Par exemple, l'ajout d'un isolant en façade doit avoir une épaisseur suffisante pour résulter en une performance de paroi minimale après intervention.

Les HBM étant construits avant 1948, ils sont soumis uniquement à la RT « élément par élément », et la performance demandée par la réglementation est aisément atteignable. Au-delà de la réglementation, le maître d'ouvrage peut demander la conformité à des labels (par exemple Effinergie Rénovation) afin de capter des financements ou subventions.

L'objectif énergétique de l'ensemble des 6 opérations est lié à l'obtention d'un label Effinergie Rénovation (équivalent BBC Effinergie Rénovation pour les bâtiments antérieurs à 1948), nécessaire pour l'obtention de subventions spécifiques (Région Rhône Alpes puis Grand Lyon). Ce label regarde le bâtiment d'un point de vue énergétique uniquement, sur les 5 postes de consommations cités ci-dessus. Il compare le calcul théorique du bâtiment rénové à un objectif absolu de 80kWhEP/m².an, modulé par zone géographique et d'altitude. Ce calcul théorique est calculé à partir de la méthode Th-CE ex, non adaptée au bâti avant 1948 (cf. §4.5). La prise en compte d'un objectif global prend par contre en compte l'ensemble des actions d'amélioration énergétique, qu'elles portent sur les besoins de chauffage (isolation de l'enveloppe, remplacement des menuiseries, amélioration de l'étanchéité à l'air), les performances des systèmes (production, distribution et émission de chauffage, production et distribution ECS, ventilation) ou bien la production d'énergie (solaire photovoltaïque ou thermique par exemple).

Par rapport à l'objectif du label Effinergie Rénovation à 96kWh/m².an sur les bâtiments rénovés, les calculs thermiques réglementaires initiaux ont donné les résultats suivants :

	Clos Jouve	Dauphiné	Donjon	Montchat	Perrache	Tony Garnier
Cep initial kWhEP/m ² .an	264	460	345	321	443	338

Ces niveaux de base sont – à l'exception de Clos Jouve – très importants, et probablement surestimés par rapport au Cep réel (en particulier pour Dauphiné et Perrache), du fait de la prise en compte du matériau.

Ce niveau de performance et ce label ont été des éléments de décision importants au niveau des projets, et en particulier au niveau de l'isolation de la façade. La baisse des dotations des offices d'habitat social liés à la loi de finance 2017 ont amené à la réduction des budgets alloués aux opérations. Les projets de réhabilitation HBM lancés ou relancés à l'heure actuelle ont des budgets réduits par rapport aux budget des opérations passées, et des choix devront être effectués entre les différentes problématiques qui ont été traitées dans les 6 opérations étudiées (restructurations de logements et leur adaptation aux usages actuels, et le traitement thermique de la façade). Ces choix pourront se faire en privilégiant l'un ou l'autre des aspects, en phasant les opérations sur des ré-interventions futures, ou bien sur des interventions moins poussées sur l'une ou l'autre des problématiques.

La question de l'objectif énergétique posée ci-dessous ne remet pas en cause l'intérêt ou la nécessité de l'isolation, mais étudie les alternatives qui pourraient se poser en cas d'impossibilité d'intervention en façade (technique, économique ou patrimoniale).

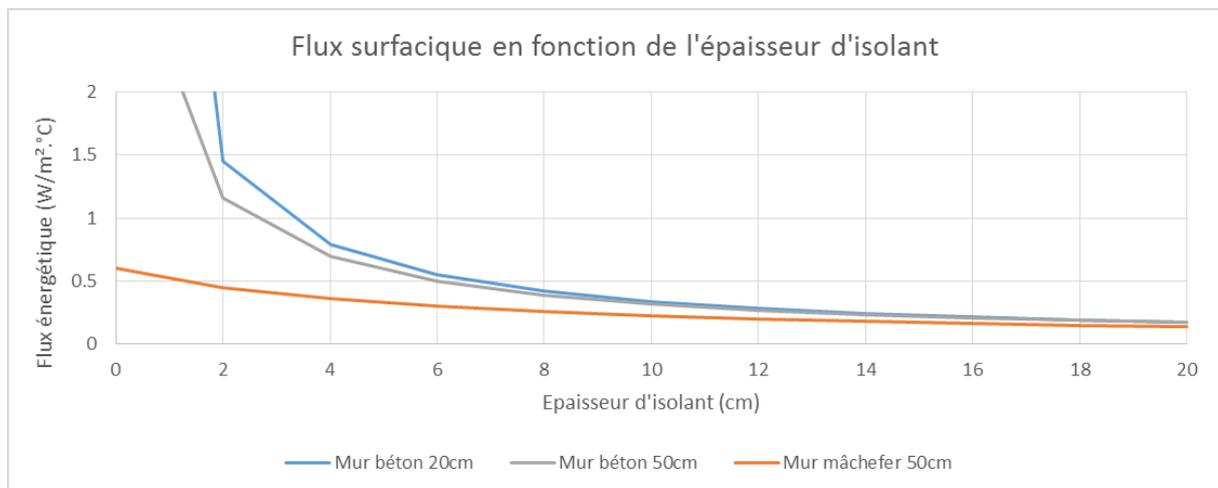
4.6.1 Bilan

Sans remettre en cause les choix effectués par les différentes équipes de maîtrise d'œuvre, il apparaît que certaines données de bases biaisées ont pu modifier la connaissance de l'état initial (l'état final étant très lié à la performance de l'isolation, il est moins impacté par ces biais) :

- Prise en compte des caractéristiques initiales du mâchefer ;
- Méthode de calcul utilisée (Th-CE ex) ;

L'état initial étant défavorisé, les économies d'énergie ainsi que les calculs d'économies de charges se retrouvent surévalués par rapport à la réalité.

L'efficacité d'une isolation est maximale dans les premiers centimètres à isoler, le flux énergétique traversant la paroi étant inversement proportionnel à la résistance thermique. De fait, la présence d'une performance isolante initiale de la construction en mâchefer va avoir pour effet que l'ajout d'une grosse épaisseur d'isolant va avoir un impact moins fort que sur un mur complètement non isolé.



Les calculs thermiques basés sur des conductivités thermiques proche du béton ($\lambda = 1.7$) vont ainsi avoir une efficacité de l'isolation surestimée par rapport à des calculs basés sur une conductivité plus faible. La mise en place d'une épaisseur d'isolant de 16cm va diviser le flux énergétique par la façade par 4, alors que dans les calculs il peut apparaître divisé par plus de 10.

Au-delà de l'échelle du graphique ci-dessous, il est à noter que l'isolant d'un mur en mâchefer a son efficacité en termes énergétiques, avec une réduction majeure du flux traversant les façades. L'importance du flux traversant les façades par rapport aux déperditions globales de l'ensemble du bâtiment est par contre à évaluer lors du choix d'un programme travaux avec ou sans isolation thermique. Sur cette question, l'étude « Habitat ancien en Alsace » (septembre 2015) commandée par la DREAL Alsace, la DRAC Alsace et mise en place par le CEREMA et l'atelier ODM d'architecture montre une approche équivalente intéressante : les performances énergétiques des réhabilitations sont simulées sur 3 scénarios, allant de l'intervention uniquement sur planchers hauts, bas et menuiseries jusqu'au traitement complet de l'enveloppe. Les résultats de cette étude montrent qu'une réflexion sur l'importance respective des différentes pertes doit mener à la mise en place du projet énergétique.

Deux réflexions sont menées ci-dessous, en comparant 4 traitements thermiques d'une façade : par un ravalement seul, par une isolation extérieure à base de polystyrène expansé (PSE) ou laine de roche sous enduit, et par une isolation extérieure à base de laine de verre sous bardage. Cette réflexion est faite avec les épaisseurs « standards » d'isolation. Sur le HBM en mâchefer, la performance thermique intrinsèque des parois extérieures va nécessiter des épaisseurs d'isolant moins importantes (de l'ordre de 8cm), ce qui peut réduire l'énergie grise et l'investissement nécessaire.

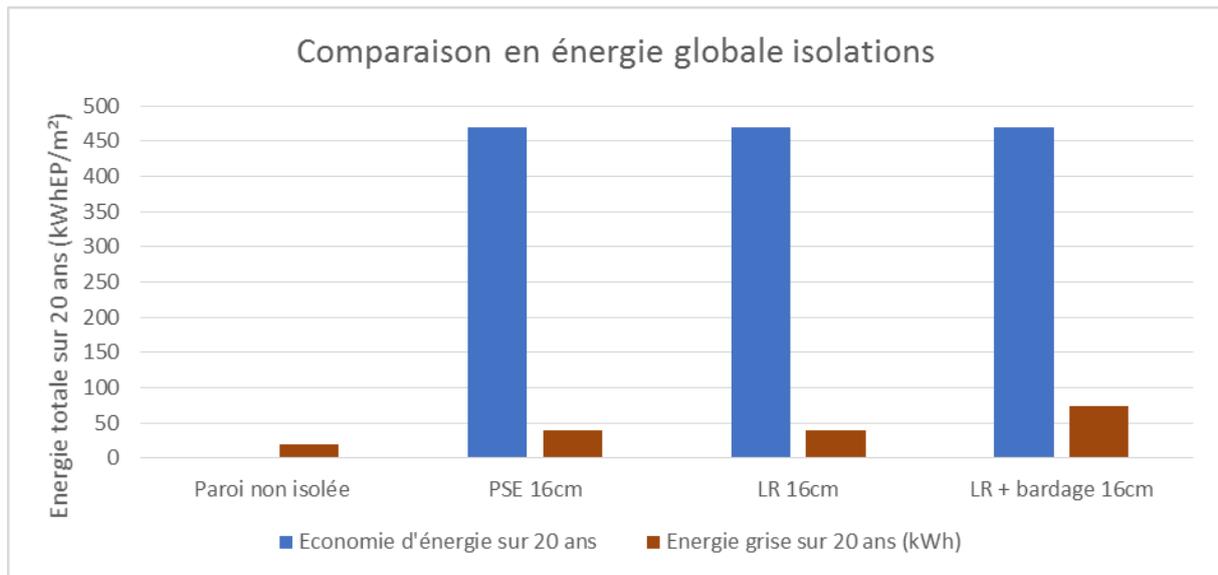


Figure 10 : comparaison du point de vue énergie / énergie grise du traitement thermique des façades

Une réflexion en énergie grise sur l'isolation d'une paroi montre que le bilan énergétique énergie grise / énergie économisée est dans tous les cas favorable à une isolation (données issues de la base de données INIES sur l'énergie grise des matériaux). Énergétiquement il est donc incontestable que l'isolation a un intérêt du point de vue des économies d'énergie.

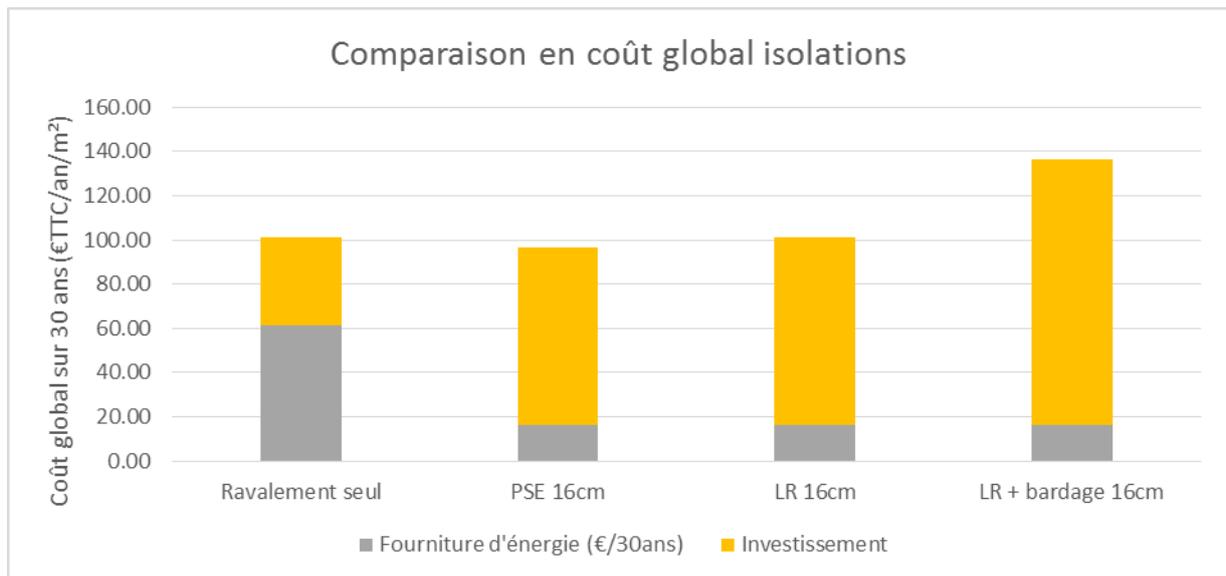


Figure 11 : Comparaison en coût global du traitement thermique d'une façade en mâchefer

Une analyse en coût global (investissement + coût énergétique) est plus nuancée, et montre que le retour sur investissement de l'isolation des façades n'est pas à regarder du point de vue strictement économique. Sur 30 ans on arrive à une équivalence entre investissement et économies de charges. L'intervention d'isolation est donc utile du point de vue financier, d'autant plus dans une optique de réduction des charges locataires et de réduction de la précarité énergétique.

4.6.2 Evaluation

Le traitement d'une paroi dans le cadre d'une réhabilitation énergétique passe obligatoirement par le traitement en isolation de l'enveloppe, et la réduction des déperditions du bâtiment. Dans le cadre des réhabilitations des groupes HBM, traitant la thermique de manière complète et globale et cherchant une

performance de bâtiment basse consommation, l'isolation des parois était un incontournable, que ce soit au niveau des calculs thermiques ou des économies d'énergie recherchées. On a vu plus haut que les économies d'énergie calculées ont été surestimées par les méthodes de calcul et les hypothèses utilisées. De même, les labels aujourd'hui en place (Effinergie Rénovation) obligent à l'utilisation du calcul réglementaire sans prendre en compte les données patrimoniales et caractéristiques intrinsèques du bâtiment.

L'analyse en coût global et en énergie globale montre que bien que les économies énergétiques liées à l'isolation soient incontestables et que la réduction des besoins énergétiques doive rester une priorité, le poste façade n'est pas forcément le poste le plus efficient (performance par rapport aux efforts investis). L'examen complet du bâtiment et de ses points faibles est à réaliser pour évaluer des postes de réduction des déperditions qui seraient plus facilement atteignables (ou présentant un meilleur rapport performance / coût d'investissement).

Dans le cadre d'un budget plus restreint qui ne permettrait pas de traiter l'ensemble des points faibles du bâtiment, plusieurs pistes de questionnement sont à mettre en balance dans la réalisation de la façade :

- Contraintes patrimoniales demandant la mise en place d'ITI (mais attention sur travaux en site occupé compliqués, risques sur les ponts thermiques à simuler, perte en inertie du bâti) ;
- Possibilité d'atteindre une performance correcte par des techniques d'enduits de correction thermique plus simples dans leur mise en œuvre (chaux – argile, chaux – liège, chaux – perlite, ...)
- Coût global charges énergétiques / investissement ;
- Énergie globale énergie grise / énergie consommée ;
- Ratio des pertes par la façade dans le global des pertes du bâtiment ;

Le label « Effinergie Patrimoine », développé à titre expérimental à partir du printemps 2019, permet des dérogations sur la performance finale atteinte si des contraintes patrimoniales empêchent d'arriver à l'objectif fixé de 80 kWhE.P./m².an. Il nécessite l'avis d'un architecte du patrimoine sur la demande de dépôt de dossier pour justifier des difficultés inhérentes au bâtiment et à ses caractéristiques. Il est donc particulièrement adapté à ce type de bâtiment.

4.6.3 Bonnes pratiques

Les bonnes pratiques identifiées pour cet item (performance énergétique à atteindre) sont :

- Évaluer l'importance des déperditions par la façade dans le global et identifier de manière précise les points faibles du bâtiment (ponts thermiques, toiture, menuiseries, ...)
- Ces points faibles identifiés, étudier les interventions simples et les bouquets d'interventions permettant de les traiter, pour un investissement fixé ;
- Effectuer des calculs en coût global et en énergie globale ;
- Réflexions sur les labels patrimoniaux (en particulier Effinergie Patrimoine) dans les recherches de financement ;

4.7 Particularités méthodologiques

Sur cet aspect de la méthodologie des études et de l'intervention, la multiplicité des retours d'expériences nous a conduit à adopter une restitution par sous-thème plutôt que de grouper les éléments de bilans et d'évaluation.

4.7.1 Bilan – évaluation – bonnes pratiques

Le déroulement des opérations et les gros retards ou arrêts de ces dernières sont pour certaines liées à des particularités méthodologiques des bâtiments existants, des bâtiments patrimoniaux et des HBM.

	Clos Jouve	Dauphiné	Donjon	Montchat	Perrache	Tony Garnier
DIAG	11.2009	2011	2015	10.2013	07.2010	11.2013
APS	11.2016	09.2013	2016	01.2014	07.2013	01.2014
Consultation	Arrêt APS	09.2015	Arrêt APS	07.2014	12.2014	09.2018
Début chantier	-	12.2017	-	01.2015	09.2015	03.2019
Livraison	-	2020	-	10.2018	2020	2022

4.7.1.1 Expérience de la maîtrise d'œuvre

Les méthodologies employées par les équipes de maîtrise d'œuvre sont similaires à celles employées dans d'autres réhabilitation en site occupé (visite maximale de logements, statistiques, fiches par logement, anticipation des adaptations chantier).

L'anticipation des travaux réalisables ou non en site occupé et les avertissements à la maîtrise d'ouvrage ont également permis d'anticiper les évolutions site occupé / site libre, et les contraintes financières et organisationnelles liées.

Bonne pratique identifiée : exiger des références équivalentes en réhabilitation de logements en site occupé pour le mandataire.

4.7.1.2 Prise en compte des enjeux patrimoniaux

Le lancement des opérations HBM s'est fait en intégrer la contrainte patrimoniale de manière non poussée. En dehors de Clos Jouve et Dauphiné, les groupes ne se situent pas en zone de prescription ABF et leur intervention n'a pas été anticipée beaucoup plus en amont que les opérations plus classiques.

La plupart des diagnostics se sont faits sans approche patrimoniale (en dehors des diagnostics intégrant des recherches patrimoniales menés par l'agence Fleurent + Valette sur Perrache et Clos Jouve). Les échanges avec les ABF se sont fait de manière décoordonnée et au fil des opérations, selon les demandes des équipes de maîtrise d'œuvre.

L'intégration des avis des ABF sur les projets d'opération a amené à reconsidérer l'approche patrimoniale, avec en particulier :

- Des demandes de diagnostics patrimoniaux complémentaires (Tony Garnier, Dauphiné, Donjon) ;
- Des échanges avec mises en place de prototypes en grandeur réelle pour examen avant validation (Tony Garnier, Clos Jouve) ;
- Des remises en question des principes d'isolation par l'extérieur proposées (Clos Jouve : refus du principe d'ITE, Perrache : ITI en place sur rue et certains éléments sur proposition architecte, Dauphiné : ITE supprimée sur rue) :

- Des prescriptions amenant des surcoûts importants (par exemple décalage des allèges de fenêtres pour conserver la profondeur de baie sur Perrache et Tony Garnier, ou remplacement menuiseries extérieures) :

Une réunion de coordination entre les ABF des différents secteurs et les maîtrises d'œuvre des différentes opérations a été organisée dans le courant des opérations. Cette réunion n'a pas amené de « doctrine » commune de la part de l'UDAP, mais a permis de comparer les différentes approches.

L'implication de la direction de GLH a été particulièrement importante sur l'acceptation de l'ITE par les ABF, en particulier sur les opérations Dauphiné et Clos Jouve.

Bonnes pratiques identifiées :

- Réaliser un diagnostic patrimonial systématique ;
- Pouvoir intégrer un architecte du patrimoine dans l'équipe de conception ;
- Anticiper les échanges avec les ABF en actant les prescriptions au plus tôt ;

4.7.1.3 Evolution du budget ou du programme

Les budgets initiaux étant basés sur de la réhabilitation énergétique avec « simple » remise à niveau des équipements, l'intégration de la restructuration des logements (cf. §4.1), les prescriptions particulières des ABF, les opérations de désamiantage et la nécessité d'effectuer les travaux en site libre pour certains groupes ont apporté des grosses modifications de budget. Ces augmentations sont une des causes des retards pris dans la conception, ayant nécessité des arbitrages plus fréquents et importants.

Bonnes pratiques identifiées :

- Anticiper les échanges avec les ABF en actant les prescriptions au plus tôt ;
- Intégrer le diagnostic social au plus tôt pour évaluer les contraintes chantier soutenables ;

4.7.1.4 Population du groupe

Tous les groupes sont habités d'une population à majorité vieillissante et fragile, avec une antériorité importante dans le groupe, dans leur appartement ou ailleurs dans la résidence. Cette fragilité, couplée à l'importance des travaux prévus en site occupé, a amené à pencher en faveur d'une intervention en site libre sur la totalité ou sur une majorité de logements (opérations en logements tiroirs ou avec logement refuge).

Les interventions ont amené les situations suivantes :

- Interventions en site libre : Perrache + Montchat (prévu en site occupé mais transformé en site libre après 1 bâtiment) + Tony Garnier
- Interventions en site occupé : Dauphiné (mais 60% des logements en site libre)

L'intervention de la maîtrise d'œuvre sociale (MOS) dans le cadre des travaux a été prépondérante sur l'ensemble des opérations, pour le suivi des déménagements ou relogements, la signalisation de locataires fragiles, la gestion des logements relais et les relations entre entreprises et locataires.

Bonnes pratiques identifiées :

- Intégrer le diagnostic social au plus tôt pour évaluer les contraintes chantier soutenables ;
- Privilégier les réhabilitations en site libre en cas de restructuration, d'ITI ou de modification d'allège de fenêtre ;
- Systématiser le recours à une maîtrise d'œuvre sociale ;

4.7.1.5 Retards chantier

Les principaux retards chantier notés dans les opérations liés aux causes suivantes :

- Attestations d'assurance pour chevilles du complexe ITE (procédé hors ATEC : besoin attestation spécifique) : Dauphiné;

- Gestion des déménagements (Montchat, Perrache, Dauphiné) ;
- Services concédés (Perrache : GRDF pour coupure des colonnes montantes) ;
- Limitation des contraintes chantier (Dauphiné) ;

A noter que les entreprises générales intervenant sur les groupes (à part Tony Garnier, ensemble des opérations en travaux en EG) ont tendance à tenter de minorer le temps passé sur chantier et à multiplier les ouvertures de logements. Ces réductions de planning sont adaptées en site libre, mais imposent des contraintes très fortes en site occupé. Sur Dauphiné, l'EG souhaitait effectuer 1 ouverture de logement par jour, alors que le planning initial en PRO prévoyait 2 ouvertures par semaine.

Bonnes pratiques identifiées :

- Assurer une continuité de planning entre conception et réalisation ;
- Evaluer les délais entreprises proposés au regard des contraintes locataires lors de la consultation ;

4.7.1.6 Adaptations chantier

Comme toutes les réhabilitations, les adaptations chantier sont nécessaires, du fait de découvertes, dévolutions dans les logements entre diagnostic et travaux, ou de modification des modes opératoires.

Ces adaptations sont parfois d'autant plus nécessaire que les plans d'exécution logement par logement ne sont pas forcément intégrés à la consultation ou à la mission DET, et que les modes opératoires des entreprises générales sont plus ou moins souples. Sur Montchat, ces adaptations ont été traitées de manière très souple par l'entreprise, alors que sur Dauphiné elles ont été plus problématiques.

Bonnes pratiques identifiées :

- Intégrer dans les marchés de travaux des BPU pour les adaptations chantier ;
- Intégrer à la mission de maîtrise d'œuvre la réalisation de plans EXE par logements ;

4.7.2 Synthèse bonnes pratiques

Les bonnes pratiques identifiées pour cet item sont :

- Exiger des références équivalentes en réhabilitation de logements en site occupé pour le mandataire ;
- Réaliser un diagnostic patrimonial systématique en amont ;
- Pouvoir intégrer un architecte du patrimoine dans l'équipe de conception ;
- Anticiper les échanges avec les services instructeurs (UDAP, service urbanisme) en actant les préconisations au plus tôt, y-compris hors périmètre ABF ;
- Privilégier les réhabilitations en site libre en cas de restructuration, d'ITI ou de modification d'allège de fenêtre ;
- Intégrer le diagnostic social au plus tôt pour évaluer les contraintes chantier soutenables ;
- Systématiser le recours à une maîtrise d'œuvre sociale ;
- Assurer une continuité de planning entre conception et réalisation ;
- Evaluer les délais entreprises proposés au regard des contraintes locataires lors de la consultation ;
- Intégrer à la mission de maîtrise d'œuvre la réalisation de plans EXE par logements ;
- Intégrer dans les marchés de travaux des BPU pour les adaptations chantier ;

5 Méthodologie de suivi

Sur les 4 opérations en travaux ou réceptionnées, la mise en place d'un suivi après réception nous paraît important pour valider les performances énergétiques atteintes d'un côté, et vérifier l'absence de pathologies d'un autre. Nous conseillons la mise en place des actions de suivi suivantes :

Type de suivi	Méthode conseillée
Consommation de chauffage	<p>Suivi mensuel des consommations de chauffage, et comparaison de l'évolution en ôtant l'aléa climatique (comparaison en kWh/DJU).</p> <p>Relève :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Chauffage collectif : relève mensuelle des consommations de combustible par l'exploitant ; - Chauffage individuel : récupération des données du gestionnaire de réseau GrDF, ou sondage annuel envoyé par e-mail aux locataires ; <p>Analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comparaison aux consommations initiales (si disponible) et prévisionnelles pour évaluer la précision des méthodes utilisées ; - Evaluation des économies réelles locataires par rapport à la troisième de ligne de quittance ; - Vérification de la stabilité des consommations selon les années ;
Ponts thermiques (ITI ou ITE)	<p>Thermographie intérieure et extérieure sur logements réhabilités. Sur ponts thermiques les plus importants : vérification de la température de surface et du point de rosée.</p> <p>Réalisation d'une thermographie comparative à réception + 3 ans pour évaluer évolution de la performance du mur (la présence d'humidité dans l'isolant intérieur baisserait par exemple les performances de celui-ci).</p>
Thermique d'été	Instrumentation d'un panel de logements (5 logements par groupe maximum) avant / après réhabilitation avec sonde de température intérieure.
Humidité dans les matériaux	Si présomption d'humidité dans le matériau (calcul du pont thermique / thermographie / retour locataire), mesure de l'hygrométrie dans le matériau par humidimètre