

# Réhabilitation des bâtiments en pisé de mâchefer : Les enseignements du « GT Mâchefer »

Grégory Cluzel, architecte conseiller – CAUE Rhône Métropole  
Etienne Villemot, architecte ingénieur – BE Amstein+Walthert

## DEROULE DE LA PRESENTATION

- **Qu'est ce que le mâchefer de construction ?**
- **Actualité du Groupe d'intérêt de travail sur le mâchefer : objectifs et contributions**
- **Premiers éléments de caractérisation du matériau mâchefer**
- **Premiers éléments d'interprétation en matière de stratégie de réhabilitation**
- **Points de vigilance**
- **A retenir**



**HABITAT COLLECTIF**

1856 - Immeuble COIGNET - 59-61 rue Charles-Michels à Saint-Denis - François COIGNET, ingénieur – réhabilité en 2015



**HABITAT COLLECTIF**

1952/1954 – Résidence CALIFORNIE – Avenue J. Mermoz, Lyon– Raymond WALCH, Napoléon BULUKIAN, Promoteurs - Pierre TOURRET architecte





**HABITAT COLLECTIF SOCIAL**

1928/1932 – Cité HBM Montchat, Lyon 3 – Deschavannes., Petit, Pinet, architectes, réhabilitée en 2019 (AAMCO arch.)



Cité HBM de L'Abbaye  
Grenoble (38)

Groupe HBM La Richelandière  
St-Etienne (42)





**HABITAT INDIVIDUEL**

1958 – Lotissement FAVIER – Lyon 9



**HABITAT INDIVIDUEL**

1924-1956 – Petite Cité Tase – Vaulx-en-Velin

## Qu'est-ce que le mâchefer de construction ?



Blocs de béton de mâchefer banché sur un chantier de démolition à Lyon Gerland - © CAUE 2019



Échantillon 25x10 cm prélevé sur un mur de façade ep. 45 cm – Cité HBM Perrache, Lyon 2 © CAUE 2018

## Qu'est-ce que le mâchefer de construction ?



*Mur en béton de mâchefer sur un  
soubassement en béton de ciment*  
© CEREMA 2016



*Blocs agglomérés de mâchefer*  
© CEREMA 2016



*Parpaings de mâchefer sur un mur intérieur*  
Impasse Dupeyroux, Lyon 4 © CAUE 2018

## Qu'est-ce que le mâchefer de construction ?



*Mur en béton de mâchefer sur un soubassement en béton de ciment*  
© CEREMA 2016



*Blocs agglomérés de mâchefer*  
© CEREMA 2016



*Parpaings de mâchefer sur un mur intérieur*  
Impasse Dupeyroux, Lyon 4 © CAUE 2018

**Grande hétérogénéité des mâchefers selon :**

- **origine et composition des scories**
- **dosage ciment / scories / (chaux)**
- **localisation dans la façade**

# Qu'est-ce que le mâchefer de construction ?

## MAÇONNERIE

- 01 Béton de gravier et chaux hydraulique (ciment pour les piliers)
- 02 Pisé de mâchefer et chaux hydraulique
- 03 Dalles de ciment (ép. 5) + aisseliers ciment
- 04 Enduit de mortier de chaux lourde
- 05 Boisseaux de poterie dans les murs
- 06 Briques enduites au mortier de ciment
- 07 Enduit de mortier de chaux hydraulique
- 08 Chufes, canalisations en tuyaux de grès

## PIERRE DE TAILLE

- 09 Calcaire de Villebois bouchardé gros
- 10 Calcaire de Trept bouchardé fin

## CIMENTERIE

- 11 Enduit, et moulures, poussées en mortier de ciment
- 12 Coudière en mortier de ciment moulé sur place

## BETON ARMÉ

- 13 Plancher béton de ciment armé système Hennebique
- 14 Escalier sur limon en béton de ciment armé (idem)
- 15 Linteau en béton de ciment armé

## COUVERTURE

- 16 Chape d'asphalte

## REVÊTEMENTS CARRELAGE

- 17 Mosaïque
- 18 Carreaux de terre cuite vernissée « de Marseille »
- 19 Carreaux de faïence
- 20 Granito

## MENUISERIE

- 21 Portes de cave en planches de sapin
- 22 Portes palières à panneaux en chêne, de communication sapin
- 23 Portes balcon à panneaux en chêne vitrées
- 24 Croisées en chêne vitrées
- 25 Abat-jour lames sapin avec lambrequins
- 26 Aisseliers de cloison en sapin + plinthes
- 27 Parquet chêne à lames droites sur lambourdes

## SERRURERIE, QUINCAILLERIE

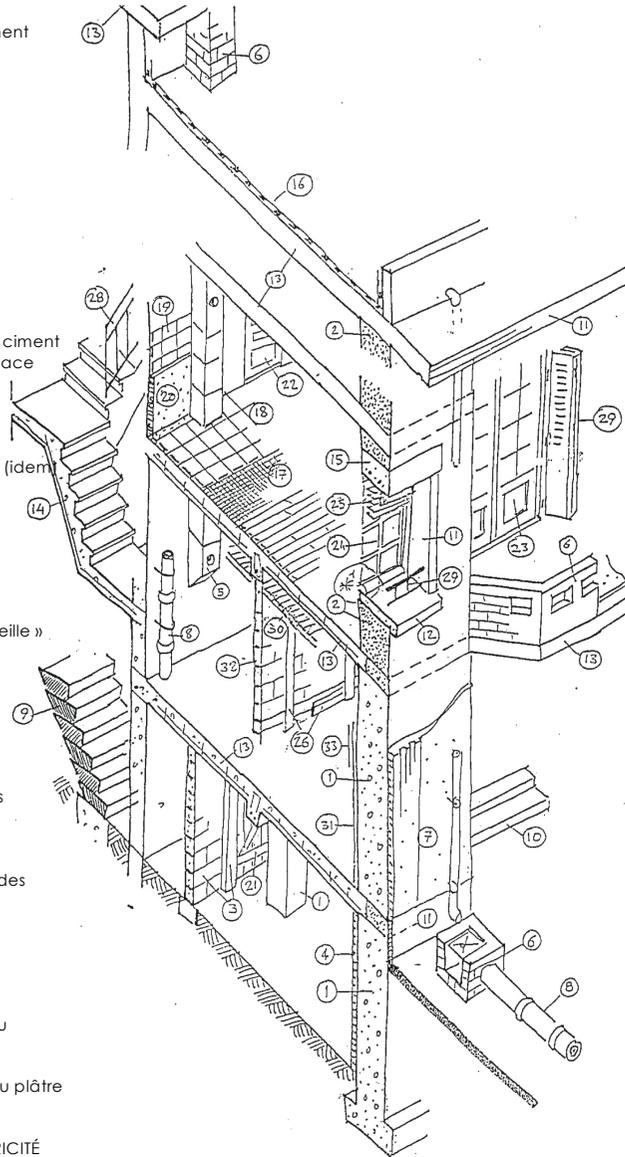
- 28 rampe fer forgé
- 29 Banquettes de croisées en fer (tôle d'acier)

## PLÂTRERIE, PEINTURE

- 30 Plafond en plâtre sur lattis sapin (dégrossi au mortier bâtard)
- 31 Enduits intérieurs au plâtre
- 32 Cloisons de briques de 3 enduits 2 faces au plâtre
- 33 Peintures et papiers peints

## VITRERIE, ZINGUERIE, PLOMBERIE, SANITAIRE, GAZ, ELECTRICITÉ

## TERRASSEMENT



Vue du chantier de la Cité des Etats-Unis vers 1933 (en haut)  
Et de l'Hôpital Grange Blanche vers 1930 (en bas)



**Cité des Etats-Unis - Eclaté descriptif de la construction des bâtiments  
d'après CCTP de T. Garnier (ill. M. Paulin)**

## Points de vigilance

Problématiques de l'isolation des murs de façade en pisé de mâchefer

- Pont thermique
  - Point froid et inconfort
  - Condensation superficielle
- Transfert vapeur d'eau :
  - Condensation dans l'isolant
  - Condensation dans la structure

>>> Risques de condensation

- Moisissures : qualité de l'air intérieur
- Dégradation des surfaces
- Dégradation de l'isolant
- Dégradation de la structure du bâtiment



*En haut:  
Tableaux de baies et menuiseries dégradées*

*En bas à droite:  
Moisissures sur allège maçonnée*

*En bas à gauche:  
Façade traitée avec une peinture organique*

## GT Mâchefer : Objectifs et contributions

### Mise en place d'un dispositif d'échanges informels à l'initiative du CAUE Rhône Métropole en 2018 pour:

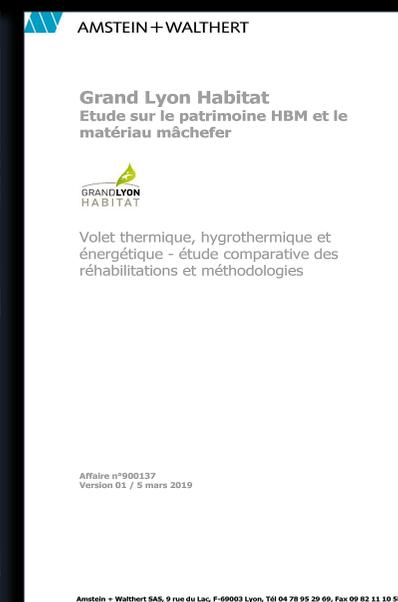
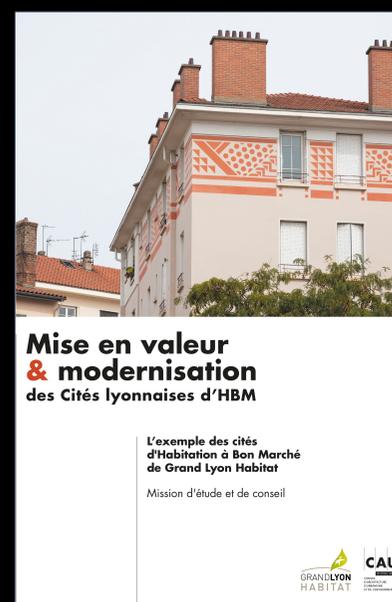
- Identifier les sources de connaissance sur le matériau mâchefer
- Partager un état de l'art
- Évaluer et répondre aux besoins des acteurs du bâtiment et des professionnels de la construction

*Mise en valeur et modernisation des Cités lyonnaises d'HBM  
L'exemple des cités de Grand Lyon Habitat  
Grand Lyon Habitat / CAUE 69 - 2018*

*Volet thermique, hygrothermique et énergétique:  
étude comparative  
Grand Lyon Habitat / Amstein + Walthert - 2018*

### COMPOSITION DU GT MÂCHEFER (liste non exhaustive)

- **CAUE RHÔNE METROPOLE – Association – Lyon**
- **CEREMA/DGALN – Etablissement public d'Etat**
  - unité Usages et Performances du Bâtiment – L'Île- d'Abeau
  - unité Géomatériaux – Bron
- **GLH – Bailleur social public – Lyon**
- **AMSTEIN+WALTHERT – Bureau d'études ingénierie thermique – Lyon**
- **ENSASE – Laboratoire Transformation – Saint-Etienne**
- **ECOLE DES MINES – Saint-Etienne**
- **ENTPE – Laboratoire LEHNA – Vaulx-en-Velin**
- **INSA – GIS EEDEMS – Villeurbanne**
- **UNIVERSITE LUMIERE LYON 2 – Lyon**
- **AQC – Antenne régionale – Lyon**
- **MINISTERE de la Culture – DRAC AuRA – UDAP 69**
- **VILLE de Lyon – DAU Service ravalement Patrimoine**
- **Divers professionnels et structures associatives**



## GT Mâchefer : Objectifs et contributions

Les contributions déjà portées à la connaissance du GT Mâchefer:

- Dans le cadre d'un module de formation professionnelle sur la réhabilitation thermique du bâti XXème organisé par le CAUE69 :

• **« Rénover le pavillon ordinaire des trente glorieuses en région lyonnaise : Étude de diagnostic architectural et constructif et propositions de recommandations pour une rénovation qualitative » - 2018**

Constitutrice : Nathalie Sandt, architecte du patrimoine, avec l'appui technique du CEREMA; Direction et coordination : Jacques Sordoillet - CAUE Rhône Métropole

- Dans le cadre d'un partenariat pédagogique entre le CAUE69 et l'INSA de LYON:

• **« Gestion des constructions en béton de mâchefer dans le cadre des politiques nationales d'amélioration thermique de l'habitat » - 2018**

Direction d'étude: Rémy Gourdon – Etudiants de l'INSA Lyon labo EEDEMS - 5 GEN-STRATENTER - CAUE Rhône Métropole; Coordination : Jacques Sordoillet - CAUE Rhône Métropole

- Dans le cadre d'une collaboration entre le CAUE69 et le CEREMA:

• **« Rapport sur les mâchefers de construction : essais en laboratoire » - 2018**

Fabrice Rojat - CEREMA - Centre-Est Département Laboratoire de Lyon / CAUE Rhône Métropole ; Direction d'étude et coordination : Cédric Lentillon CEREMA pour le CAUE Rhône Métropole

- Dans le cadre d'une demande de conseil et d'expertise adressée au CAUE 69 par GLH :

• **« Mise en valeur et modernisation des Cités lyonnaises d'HBM : L'exemple des cités de Grand Lyon Habitat » - 2019**

Contributeurs : Laura Jorge, Ivan Mazel, Cédric Avenier; Direction d'étude et coordination : Grégory Cluzel - CAUE Rhône Métropole pour Grand Lyon Habitat

• **« Mise en valeur et modernisation des Cités lyonnaises d'HBM : Volet thermique, hygrothermique et énergétique » - 2019**

Direction d'étude : Etienne Villemot – Bureau d'études Amstein + Walthert pour Grand Lyon Habitat

## GT Mâchefer : Objectifs et contributions

A venir :

- Dans le cadre d'un programme de recherche-Action en partenariat avec le CEREMA:
  - « **Bien rénover le bâti en mâchefer** » - *démarrage début 2021*

Direction d'étude et coordination : CAUE Rhône Métropole pour Grand Lyon Habitat en partenariat avec le CEREMA

> Outil d'aide au repérage et à l'identification du bâti en mâchefer

> Document de sensibilisation des acteurs du bâtiment à la rénovation architecturale et énergétique de l'habitat en mâchefer

> Recueil de fiches de référence portant sur la rénovation architecturale et énergétique de bâtiments de logement en mâchefer

Le volet 2 s'appuiera sur des essais effectués par le CEREMA destinés à parfaire la caractérisation du matériau mâchefer :

- **analyses hygro-thermiques** : chaleur spécifique, conductivité thermique, perméabilité à la vapeur d'eau et interaction des paramètres en fonction taux humidité dans le matériau
- **analyses mécaniques** : arrachement et résistance mécanique corrélée au degré d'humidité dans le mur
- **analyses acoustiques** : absorption, affaiblissement, résistivité

## Premiers éléments de caractérisation du matériau mâchefer

Dispositions constructives type du pisé de mâchefer \* :

- Murs en béton de mâchefer, **épaisseur 50cm**. Sauf situations ponctuelles (allèges de fenêtres, placards en façade...)
- **Soubassement** en béton de gravier
- **Chaînages béton** en fonction de la hauteur de la construction (ex. Cité Clos Jouve)
- **Planchers en poutrelle hourdis** – en majorité poutrelles métalliques sur plancher bas RDC et béton sur étages (collectif) ou solivage bois (MI)



Thermographie  
Façade Cité Clos Jouve  
(Diagnostic énergétique  
Enertech - 2016)



Cité HBM Clos-Jouve – Lyon 4

(\*) Données issues du volet thermique, hygrothermique et énergétique de  
étude comparative sur les HBM  
Grand Lyon Habitat / Amstein + Walther - 2018

## Transferts hygrothermiques : rappel sur les phénomènes en jeu

**Température** et point de rosée dans le matériau : plus la température est faible, plus la pression de vapeur saturante (point de condensation) est faible

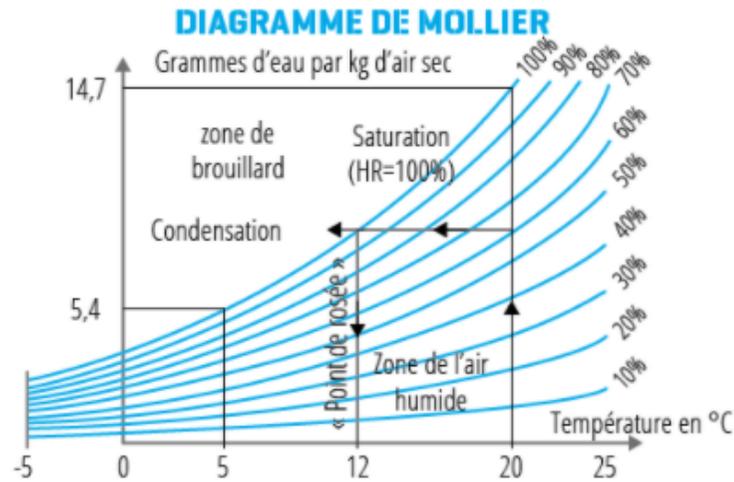
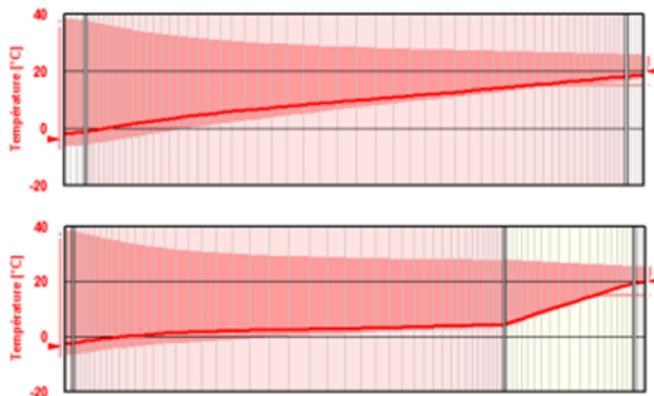
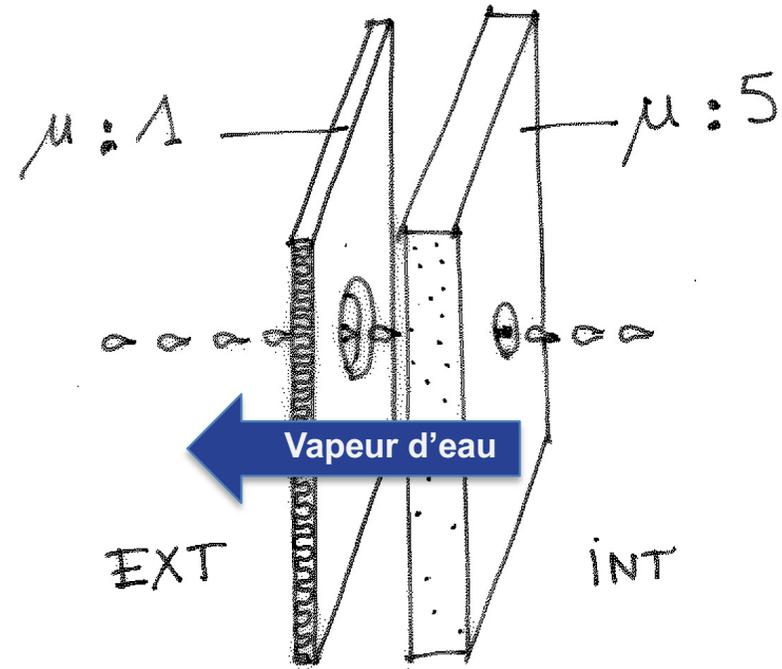


Diagramme de Mollier - AQC

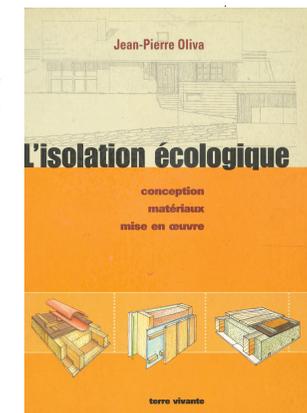


Evolution des températures dans un mur non isolé (en haut) et isolé (en bas) – AMSTEIN + WALTHERT

**Résistance à la diffusion de vapeur d'eau :** Plus le facteur de diffusion est faible, plus la résistance à la migration de vapeur d'eau est faible



Règle « 5/1 » d'après J-P Oliva -  
*L'isolation écologique* (Ed. Terre vivante - 2001)



## Premiers éléments de caractérisation du matériau mâchefer

### Propriétés techniques et hygrothermiques du pisé de mâchefer \*

$\lambda$  = entre 0,2 et 0,4 W/m.°C (Conductivité thermique)

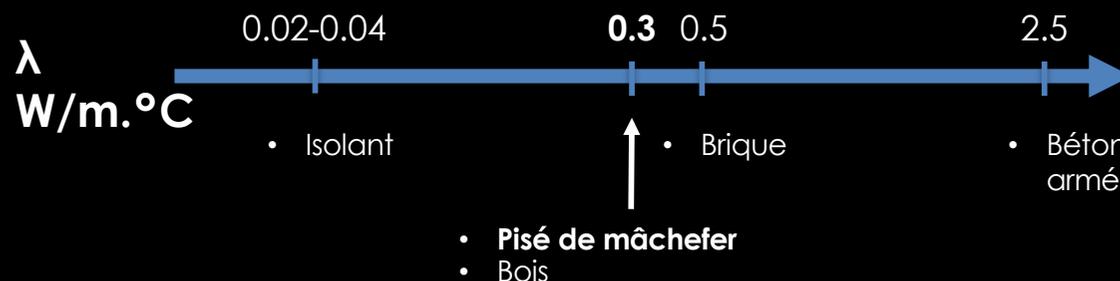
\* Caractéristiques déterminées par comparaison des ressources et travaux des membres du GT mâchefer (CEREMA, ENSASE/EMSE, ENTPE, A+W, CAUE 69)

Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant



Echantillon testé pour la conductivité thermique

P.A. Chabriac / ENSASE / Ecole des mines de St Etienne



Extrait du volet thermique, hygrothermique et énergétique: étude comparative  
Grand Lyon Habitat / Amstein + Walthert - 2018

## Premiers éléments de caractérisation du matériau mâchefer

### Propriétés techniques et hygrothermiques du pisé de mâchefer \*

$\mu$  = entre 5 et 15 (Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau)

\* Caractéristique déterminée par comparaison des ressources et travaux des membres du GT mâchefer (CEREMA, ENSASE/EMSE, ENTPE, A+W, CAUE69)

Plus le facteur de diffusion est faible, plus la résistance à la migration de vapeur d'eau est faible



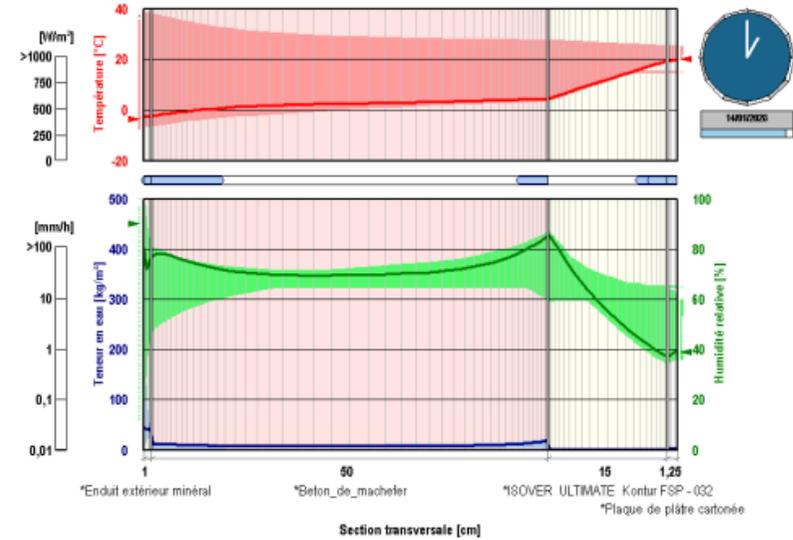
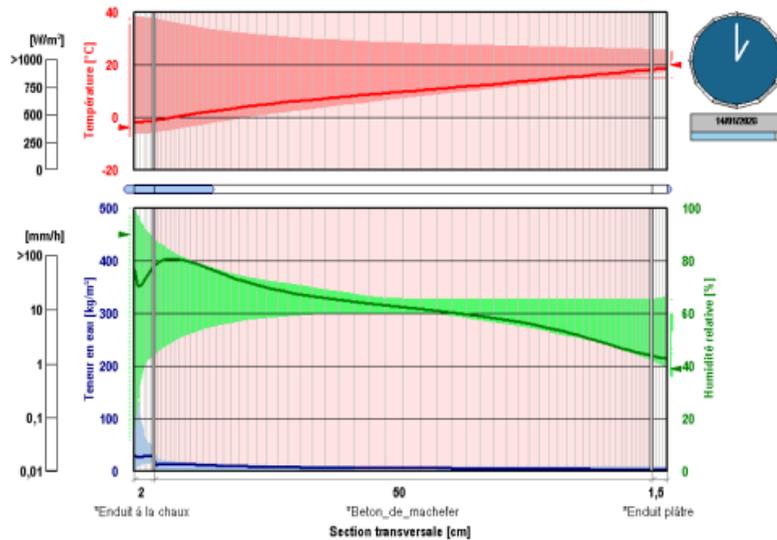
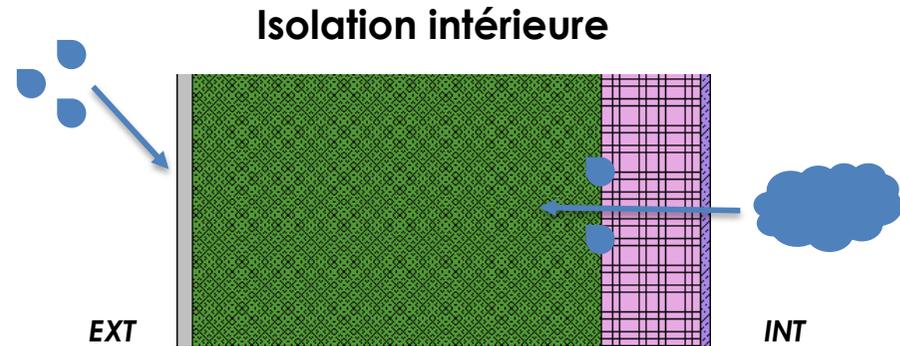
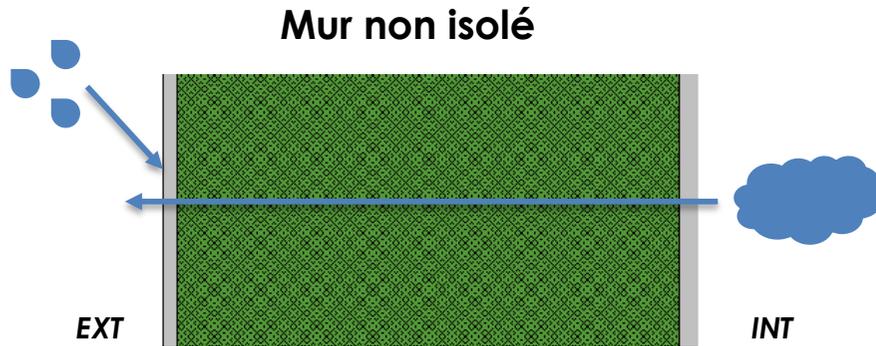
Extrait du volet thermique, hygrothermique et énergétique: étude comparative  
Grand Lyon Habitat / Amstein + Walthert - 2018

Quelques valeurs de  $\mu$   
sources croisées : CSTB, Energie+

Maçonnerie	
Métaux	infini
Pierre dure	>1000
Béton armé 18 cm	105
Pierre tendre	25
Bloc de parpaing de béton plein	13
Brique standard 20 cm	13
Pisé de terre (1900Kg/m3)	10
Briques de terre cuite pleines	10
Bloc de parpaing de béton creux	10
Béton plein laitier de haut fourneau (1600 Kg/m3)	10
Plaque de plâtre	7
Enduits	
Enduit en mortier de ciment	25
Enduit résine	10 — 25
Enduit terre et pisé	10
Enduit plâtre intérieur	8
Enduit au mortier de chaux	7
Isolants	
Verre cellulaire (plaques)	70.000-infini
Polystyrène extrudé	150
Mousse PU (30 Kg/m3)	150
Polystyrène expansé	60
Laine de bois	5
Laine minérale	1,1—1,8
Laine de chanvre, lin, coton, paille	1
Ouate de cellulose	1

Premiers éléments d'interprétation en matière de stratégie de réhabilitation

Cas de l'isolation thermique par l'intérieur du mur de mâchefer



Simulation WUFI sur mur mâchefer avec ITI dans la situation la plus défavorable - Extrait du volet thermique, hygrothermique et énergétique: étude comparative - Grand Lyon Habitat / Amstein + Walthert - 2018

## Premiers éléments d'interprétation en matière de stratégie de réhabilitation

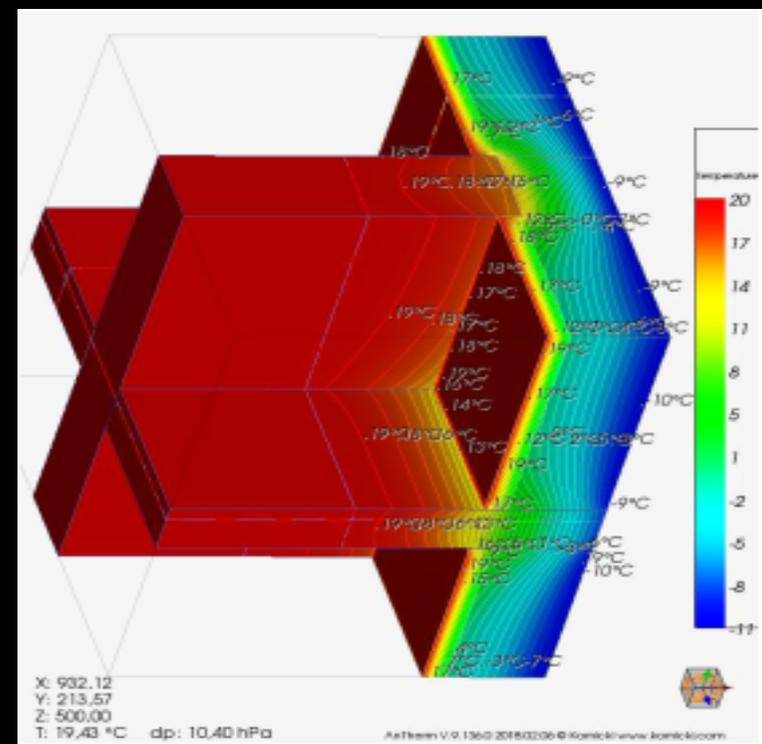
**L'ITI est contre-indiquée** pour le bâti en maçonnerie de mâchefer banché

Beaucoup d'inconvénients

- **Mur refroidi > risque de condensation**
- **Augmentation des ponts thermiques**
- **Problématique d'évacuation de l'humidité intérieure et de séchage éventuel du mur**
- **Suppression de l'inertie**
- **Difficulté d'intervention en site occupé**
- **Réduction de la surface habitable**

Démarche méthodologique avant de faire ce choix

- Calcul avec prise en compte du pare-vapeur
- Calcul et vérification des ponts thermiques



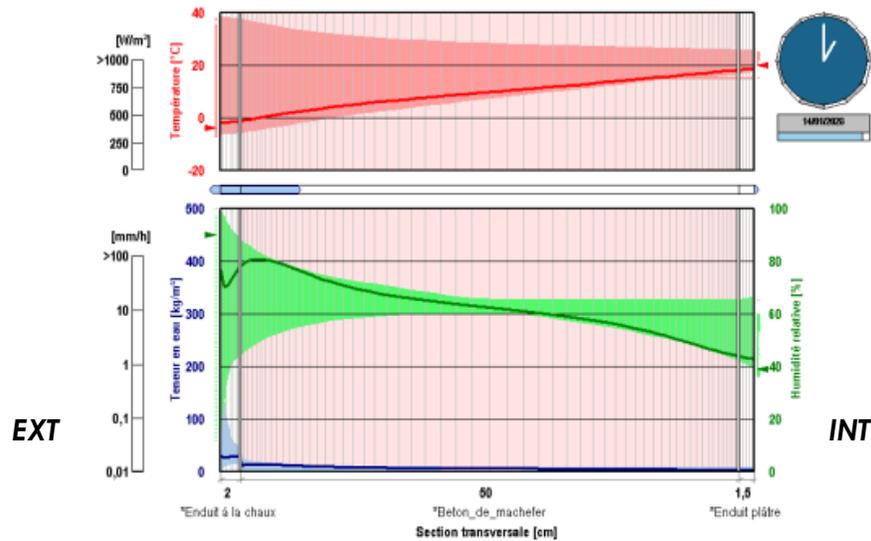
En haut:  
Thermographie façade Cité HBM Clos Jouve  
(Extrait diag énergétique Enertech)

En bas:  
Simulation des ponts thermiques sur logiciel AnTherm

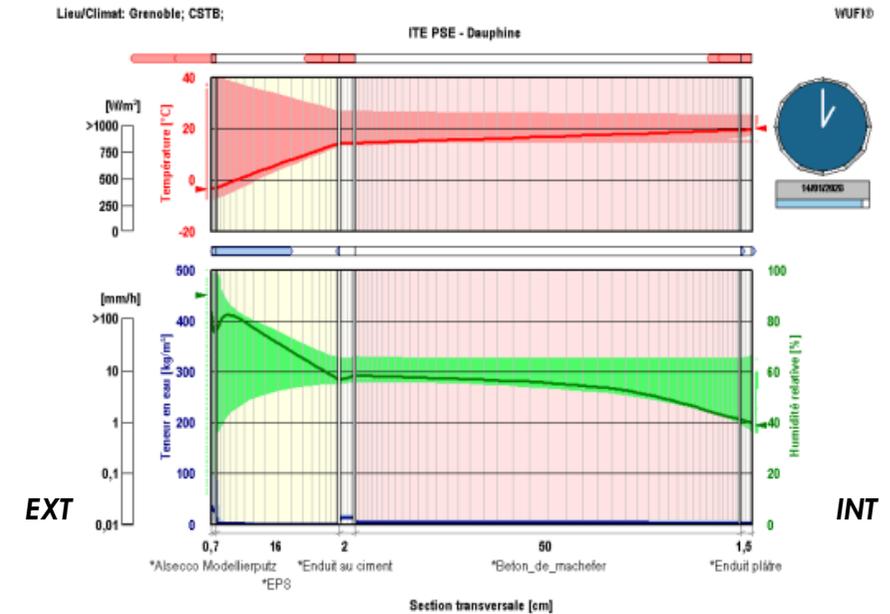
Premiers éléments d'interprétation en matière de stratégie de réhabilitation

Cas de l'isolation thermique par l'extérieur du mur de mâchefer

Mur non isolé



Isolation extérieure



Simulation WUFI sur mur mâchefer avec ITE - Extrait du volet thermique, hygrothermique et énergétique: étude comparative - Grand Lyon Habitat / Amstein + Walthert - 2018



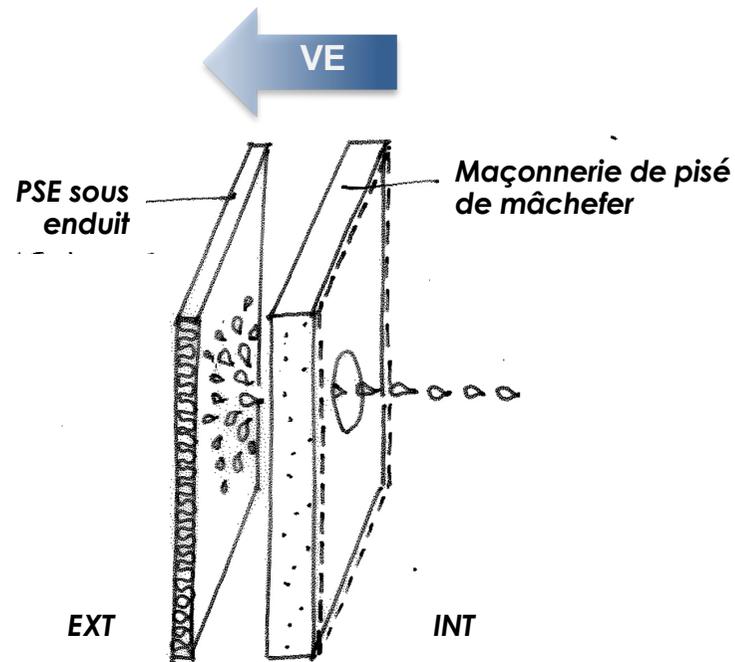
ITE sur Cité HBM Perrache



ITE sur Cité HBM Montchat

Premiers éléments d'interprétation en matière de stratégie de réhabilitation

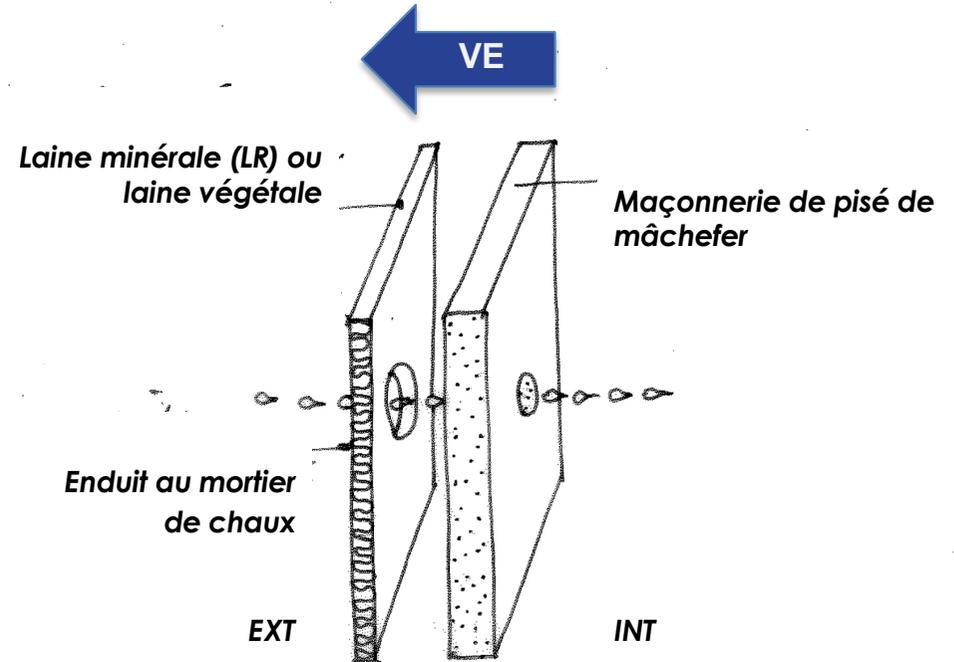
Cas de l'isolation thermique extérieure du mur de mâchefer



**STRATEGIE CONVENTIONNELLE**

> obligation d'un pare-vapeur continu

( $\mu = 1000$ ) pour bloquer le flux de vapeur d'eau



**STRATEGIE RAISONNEE**

(aucune barrière vapeur nécessaire)

## Premiers éléments d'interprétation en matière de stratégie de réhabilitation

**L'ITE appelle des précautions** pour le bâti en maçonnerie de mâchefer banché

Des avantages

- **Réchauffement du mur**
- **Suppression des ponts thermiques**
- **Conservation de l'inertie**
- **Réduit les infiltrations d'air**

**Mais**

**Problèmes de gestion du surplus d'humidité dans le mur si le complexe isolant n'est pas suffisamment respirant (gamme limitée d'isolants)**

Méthodologie et matériaux

- LR : avec semi-vêture acceptable vis-à-vis des transferts hygrothermiques
- PSE : problématique en cas de remontée capillaires, dégât des eaux ou ventilation défaillante
- Enduit avec aérogel (coût important mais efficacité optimale)
- ECT solution à envisager en complément d'une ITI « à risque » mais avec une performance moindre (coût plus faible et adapté aux contraintes patrimoniales)



## Synthèse sur les scénarios d'isolation thermique du bâti en mâchefer

SCENARIO 0	SCENARIO 1	SCENARIO 2	SCENARIO 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ITE avec laines végétales (fibre de bois) voire minérales (LR) sous enduit minéral ou bardages ventilés</li> <li>• ETI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ITE avec PSE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ITI avec PV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ITI sans PV</li> <li>• enduit hydrofuge ou peinture organique</li> </ul>



**Absence de risque**

La perméabilité théorique à la VE des différents composants est étudiée pour permettre sa migration vers l'extérieur en toutes circonstances

**Risque faible**

Des risques sont présents dans des cas particuliers (par exemple: arrivées d'eau dans le matériau par remontées capillaires, ventilation intérieure défaillante, dégât des eaux...)

**Risque moyen**

L'exécution pour assurer les conditions théoriques du comportement à la VE est à surveiller de près.

**Risque fort**

L'approche théorique du comportement à la VE est problématique

**Echelle indicative des risques d'apparition de pathologies ultérieures dans la rénovation thermique de l'habitat en mâchefer**

ITE : isolation par l'extérieur  
 ITI : isolation par l'intérieur  
 ETI : enduit thermo isolant (aérogel de silice)  
 PV : Pare-vapeur  
 PSE : Polystyrene extrudé  
 LR : Laine de roche  
 LV : Laine de verre  
 VE : Vapeur d'eau

## A retenir

Pour se prémunir des désordres ultérieurs dans le cadre d'intervention sur des façades en pisé de mâchefer :

### **Privilégier le recours à des enduits, des parements extérieurs et des isolants offrant une grande perméabilité à la diffusion de vapeur d'eau**

- Pour ce qui concerne l'enduit :
  - Le seul apte à répondre à cet impératif est l'**enduit chaux-sable** non adjuvanté (sans additif hydrofuge)  
voire des enduits hydrauliques épais
- Pour ce qui concerne les isolants :
  - Eviter l'ITI
  - Lorsque l'isolation des parois pleines est pertinente, privilégier l'ITE à l'aide d'**isolants bio-sourcés** et notamment la fibre de bois \*; dans tous les cas préférer la laine de roche au polystyrène

### **...et moduler l'intervention au regard des autres enjeux**

environnementaux, économiques, patrimoniaux et usages pour aboutir au meilleur compromis entre efficacité énergétique, investissement et qualité produite

(\*) en s'appuyant par exemple sur les termes prescrits par le PLUH de la Métropole de Lyon : « Les travaux d'isolation par l'extérieur sur le bâti existant privilégient des matériaux renouvelables (Article « Ravalement, isolation par l'extérieur et énergies renouvelables »)

## CONTACTS

Grégory Cluzel, architecte conseiller – CAUE Rhône Métropole  
[g.cluzel@caue69.fr](mailto:g.cluzel@caue69.fr)

Etienne Villemot, architecte ingénieur – BE Amstein+Walthert  
[etienne.villemot@amstein-walthert.fr](mailto:etienne.villemot@amstein-walthert.fr)