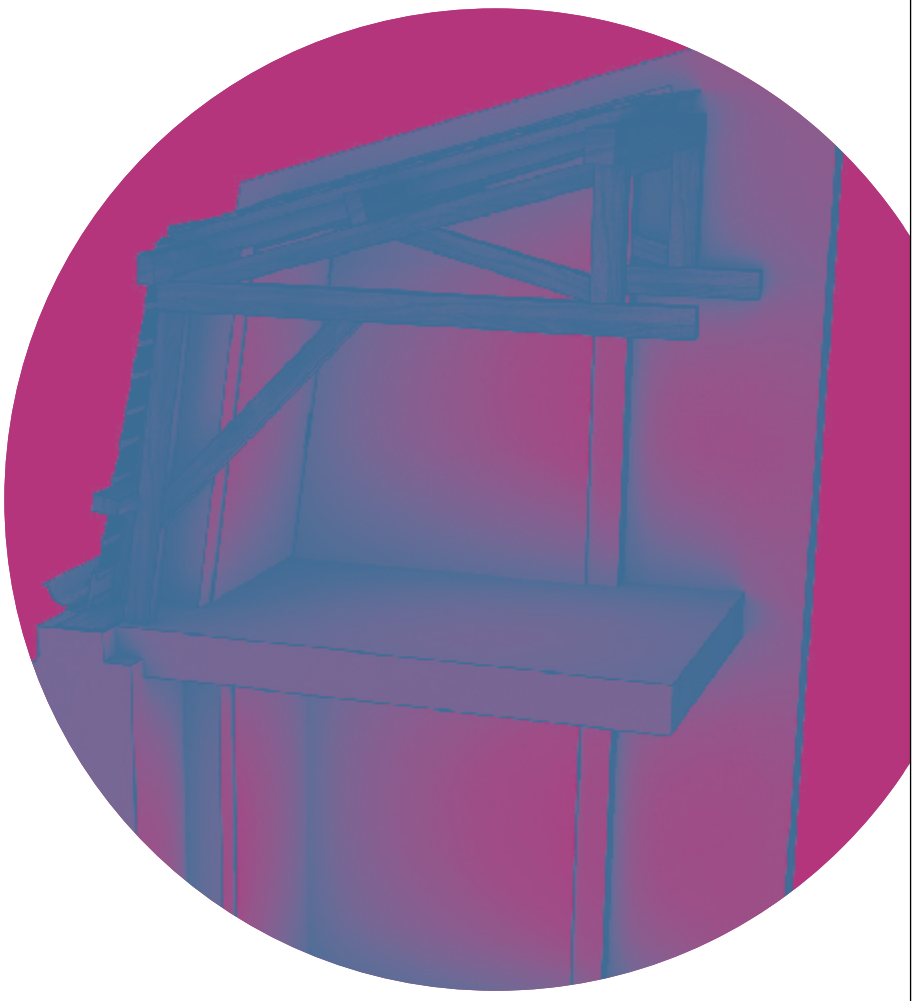
RAPPORT

ISOLANTS INNOVANTS EN RÉNOVATION : SOLUTIONS À BASE DE PANNEAUX ISOLANTS SOUS VIDE OU D'AÉROGEL

NOVEMBRE 2021



PROFEEL
9 défis pour la rénovation énergétique

AVANT-PROPOS

Avec le programme PROFEEL, la filière Bâtiment s'est rassemblée pour répondre collectivement aux défis de la rénovation énergétique. 16 organisations professionnelles ont été à l'initiative de cette démarche et, continuent aujourd'hui à la porter activement.

PROFEEL se compose concrètement de 9 projets, positionnés sur trois grands enjeux : favoriser le déclenchement des travaux de rénovation, garantir la qualité des travaux réalisés et consolider la relation de confiance entre les professionnels. Ces projets s'appuient sur l'innovation, qu'elle soit technique ou numérique, afin de mieux outiller les professionnels du bâtiment, d'améliorer les pratiques sur le marché de la rénovation énergétique et de garantir la qualité des travaux réalisés. Ces outils permettront d'accompagner les acteurs durant toutes les étapes d'un projet de rénovation : en amont, pendant et après les travaux.

Dans le cadre du projet BONNES PRATIQUES, un des 9 projets PROFEEL, 14 nouveaux outils pratiques sont développés pour accompagner les professionnels dans la conception, la mise en œuvre et la maintenance de solutions techniques, clés ou innovantes de rénovation énergétique. Cette nouvelle collection d'outils s'inscrit dans la continuité des référentiels techniques produits dans le cadre de précédents programmes portés par la filière Bâtiment : PACTE et RAGE.

Le présent document est le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.

Pour plus d'information : https://programmeprofeel.fr/

PARTENAIRES PROFEEL :

Pouvoirs Publics

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Porteurs

AQC Agence Qualité Construction

CSTB le Futur en construction

Financeurs

EDF

TOTAL

ENGIE

eni

CPCU

Filière Bâtiments

AIMCC

CAPEB L'Artisanat du Bâtiment

FÉDÉRATION CINOV

ORDRE DES ARCHITECTES

COPREC

Fédération Française de l'Assurance

FFB Fédération française du bâtiment

FIEEC

FNBM Fédération du négoce de bois et des matériaux de construction

FRANCE FÉDÉRATION PROMOTEURS IMMOBILIERS

Pôle Habitat FFB

SCOP BTP

SYNTEC INGÉNIERIE

Unsfa Union des Architectes

Untec

L'UNION SOCIALE POUR L'HABITAT

PROFEEL, un programme financé par le dispositif des certificats d'économie d'énergie (CEE)

CEE Les certificats D'ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION 4

2 POSSIBILITES DE MISE EN ŒUVRE 5

3 LIMITATION DES RISQUES LIES À L'HUMIDITÉ SUR LES PAROIS ANCIENNES 23

4 CARACTÉRISATION ET BONNE UTILISATION DES PRODUITS À BASE D'AÉROGELS 62

5 CONCLUSION GÉNÉRALE 78

6 ANNEXES 80

VERSION
1

DATE DE LA PUBLICATION
Novembre 2021

MODIFICATIONS

Conception : Agence Bastille - Rédacteur : Cerema, CSTB, Pouget Consultants - Illustrations : Laubywane - Réalisation : Jouve - Editeur : Agence Qualité Construction - ISBN : 978-2-11-152019-6

1 INTRODUCTION

La réhabilitation énergétique d'un bâtiment à un niveau basse consommation, voire mieux, demande à ce que l'ensemble des six postes de travaux soient traités, dont les parois opaques (murs, combles et plancher bas). Suivant la nature des parois existantes, les propriétés hygrothermiques des matériaux en présence, les sollicitations climatiques et d'ambiance intérieure, il est nécessaire de choisir avec soin les composants du complexe d'isolation afin de ne pas générer de risques liés à l'humidité dans le bâtiment rénové. Pour les solutions traditionnelles, les arguments pour ces choix font l'objet d'outils, de guides et de recommandations professionnelles.

Pour certaines rénovations, comme pour des bâtiments anciens à caractère patrimonial, l'isolation par l'extérieur est difficile, voire impossible, à mettre en œuvre et l'isolation par l'intérieur peut être contrainte par le souhait de limiter la perte de surface habitable. En milieu urbain, le prix de l'immobilier peut donc entrer en conflit avec des épaisseurs d'isolant jugées trop importantes. Dans ce cas, des solutions d'isolation avec des produits isolants très performants sont adaptées. Deux types d'isolants seraient susceptibles d'être utilisés : soit des panneaux isolants sous vide (PIV), soit des isolants à base d'aérogels de silice (notamment, enduit ou matériaux fibreux).

Ces deux types de produits isolants sont plus coûteux que les isolants traditionnels, mais permettent de limiter l'emprise au sol du système et de réduire la perte de surface habitable pour un gain énergétique équivalent. Ces solutions d'isolation innovantes et performantes récentes nécessitent d'être étudiées pour mettre en évidence les éventuels risques et recommandations d'utilisations dans des bâtiments concernés par les problématiques liés à l'humidité, comme les bâtiments anciens par exemple. Certaines des solutions techniques étudiées dans ce rapport bénéficient déjà d'un Atex ou d'un AT. Cette étude se propose d'apporter des éléments de réponses complémentaires à ces problématiques à travers 3 axes.

D'une manière générale, l'étude analyse des systèmes d'isolation innovants, à destination des parois opaques en rénovation qui assurent une isolation performante tout en limitant la perte de surface habitable.

1 – Décrire une procédure particulière pour les PIV adaptée à la réhabilitation avec un focus sur la mise en œuvre dans un milieu occupé. L'utilisation d'isolants sous vide se fait généralement au niveau des parties privatives, au sein des logements donc en milieu occupé. La méthodologie de mise en œuvre doit être adaptée pour impacter le moins possible les occupants, la gêne ressentie par ces derniers au moment des travaux étant souvent l'un des principaux freins à l'isolation par l'intérieur.

2 – Réaliser des simulations pour limiter les risques sur les parois anciennes. L'apparition de ponts thermiques est probable lors du calepinage avec des panneaux PIV et pris en compte dans les avis techniques. Aussi nous proposons de focaliser notre étude sur les isolants sous vide sous formes de panneaux préfabriqués qui peuvent ou non être combinés en parallèle avec des bandes d'isolants fibreux ou d'autres isolants. Il s'agira de vérifier par des simulations hygrothermiques dynamiques sous plusieurs configurations de parois anciennes qu'il n'y a pas de risques de pathologies lié à l'humidité au niveau des points singuliers et le cas échéant de mettre en avant des bonnes pratiques.

3 – Proposer une caractérisation et bonne utilisation des produits à base d'aérogels. Les murs à rénover comportent souvent de l'eau liquide. Cette étude a pour but de vérifier la viabilité des aérogels de silice vis-à-vis de l'humidité et de déterminer des seuils acceptables pour ce type de produit. Nous traiterons des isolants renforcés avec de l'aérogel puisque ces nouveaux matériaux sont probablement amenés à se développer. Les propriétés hygrothermiques et de compatibilité avec les parois anciennes n'ont pas encore été étudiées. Des tests de caractérisation seront menés pour définir le comportement du matériau, à court et moyen/long terme (durabilité), pour les transferts d'humidité avant de réaliser les simulations hygrothermiques nécessaires à la détection de risques potentiels lié à l'humidité dans plusieurs configurations d'isolation de parois anciennes.

2 POSSIBILITÉS DE MISE EN ŒUVRE

2.1 MISE EN ŒUVRE DES ISOLANTS SOUS VIDE EN SITE OCCUPÉ

2.1.1 TYPOLOGIES CONCERNÉES

L'utilisation d'isolant sous vide permet, à résistance thermique équivalente, de réduire l'épaisseur du complexe isolant. Cette épaisseur limitée peut s'avérer particulièrement intéressante dans les villes où le prix de l'immobilier est élevé, notamment au niveau des centres anciens.
Afin de déterminer les typologies de bâtiment et les types de parois à étudier (Chapitre 3) une comparaison rapide des prix moyens de l'immobilier a permis de faire ressortir certaines villes, et donc certaines localisations et certains matériaux traditionnels utilisés. Les Villes de Paris, Lyon, Aix en Provence, Marseille, Bordeaux, Nice, Nantes, Toulouse, Rennes, Lille ou Strasbourg sont donc des lieux ou l'intensité des prix des appartements au mètre carré peut inciter à financer des solutions innovantes d'isolation pour économiser de l'épaisseur sur les parois.
Les typologies constructives en bâti ancien présentes sur Paris se retrouvent la plupart du temps dans les centres anciens des autres villes. Il est donc proposé, dans le cadre du projet AEROVIP de se focaliser sur les types de façades suivants :

- Façade en pierre de taille (pierre calcaire ferme),
- Façade en brique pleine (type immeuble HBM),
- Façade en pan de bois enduit.

Ces différentes configurations de façades seront utilisées pour les simulations hygrothermiques du chapitre suivant.

2.1.2 DIAGNOSTIC DU SITE, VISITE DE SITE EN AMONT

2.1.2.1 LE SITE, DONNÉES GÉNÉRALES

Le diagnostic initial, réalisé lors d'une visite de site préalable, doit permettre de fiabiliser la connaissance de l'état existant et d'estimer au mieux la complexité des travaux à réaliser. Les éléments relevés lors de cette étape permettront également de mieux vérifier l'absence de risque vis-à-vis de l'humidité à l'aide des résultats présentés au chapitre suivant.

Nous avons établi trois niveaux de diagnostic du site :

- **L'immeuble**
- **Le logement**
- **La paroi**

Les éléments suivants seront, à minima, à relever lors de la visite :

Immeuble
Zone climatique
Altitude
Monument historique (Se référer au PLU municipal pour voir si on se situe dans une zone concernée)
Site en secteur protégé (Se référer au PLU municipal pour voir si on se situe dans une zone concernée)
Autres travaux énergétiques prévus (notamment remplacement des fenêtres et amélioration des systèmes énergétiques)
Orientation de la façade concernée par les travaux
Exposition de la façade à la pluie (traces d'infiltration d'eau de pluie, état du revêtement extérieur)
Protection de la façade de la pluie (débord de toiture éventuel)
Pathologies existantes (par exemple présence de remontées capillaires…)
Logement
A quel étage se situe le logement
Logement traversant ?
Performance des menuiseries extérieures
Disposition fenêtres (applique, feuillure, tunnel)
Efficacité de la ventilation
Présence et type d'occultations
Présence éventuelle de moulures
Type de chauffage : notamment si chauffage collectif réseaux de distribution ECS / chauffage
Réseau évacuation
Type d'émetteurs de chaleur
Installation électrique (présence de goulottes…)
Présence de pathologies éventuelles (traces de moisissures dans les angles des pièces par exemple)
Paroi concernée
Matériau principal
Présence de pathologies liées à l'humidité (moisissures notamment)
Type de revêtement intérieur
Type de revêtement extérieur
Marques d'humidité revêtement extérieur
Pannes apparentes
Isolation existante ?
Type de plancher intermédiaire
Eléments / obstacles éventuels (détaillé au 1.1.2.2.)

TABLEAU 1 **Diagnostic du site (checklist des éléments à vérifier lors de la visite sur site)**

2.1.2.2 OBSTACLES ET POINTS SINGULIERS

La mise en œuvre d'isolant sous vide se fait à l'intérieur des logements, en parties privatives. La plupart de ces chantiers se font donc en site occupé. La gêne occasionnée par les travaux est souvent l'un des principaux freins au « passage à l'acte » des occupants. L'optimisation du temps passé sur site et le respect des délais est donc primordial pour pouvoir rassurer le maitre d'ouvrage sur l'impact des travaux dans son logement. Le tableau suivant présente une série d'obstacles fréquemment rencontrés en site occupé et qui peuvent impacter plus ou moins fortement les délais associés à la réalisation d'une isolation par l'intérieur à base d'isolants sous vide. 4 niveaux de complexité sont décrits :

- Le premier niveau de complexité nécessite simplement de déplacer l'obstacle ou de mettre en place de l'isolant complémentaire. Il impacte peu le délai global de réalisation.
- Le niveau 2 est une intervention plus chronophage et technique mais ne nécessite pas l'intervention d'un autre artisan sur d'autres lots de travaux contrairement au niveau 3 (« intervention spécialisée »).
- Le dernier niveau rend la mise en place d'isolant sous vide quasiment impossible.

On estime le temps d'intervention pour une isolation par l'intérieur sans difficultés techniques à quatre jours et demi (pour un logement moyen type T3). A ce temps de chantier viennent s'ajouter les temps d'intervention par obstacle à la pose d'un système avec des isolants sous vide présentés dans le tableau ci-dessous.

Obstacles à la pose d'isolant sous vide	Action	Niveau de complexité sur une échelle de 1 à 4	Temps d'intervention supplémentaire (en heures)	Intervention d'artisans spécialisés	Remarque
Convecteurs électriques / panneaux rayonnants	A déplacer	2	4	/	
Radiateurs eau chaude	A déplacer si vanne d'arrêt	3	4	Plomberie	
Tringles pour rideaux et stores	A déplacer	1	1	/	Perte d'efficacité / calepinage
Installation électrique	Isolant complémentaire à prévoir	1	4	/	Perte d'efficacité
Interrupteurs	Isolant complémentaire à prévoir	1	4	/	
Pannes apparentes	Calcul du calepinage	1	/	/	Perte d'efficacité / ponts thermiques
Plinthes et ou moulures	A déposer et reposer	1	8	/	
Angles saillants	Prévoir retour de membrane d'étanchéité	1		/	
Meubles de cuisine	/	4	/		Travaux induits trop impactant
Elément de charpente (blochet et semelle)	Isolant complémentaire à prévoir	1	4		Perte d'efficacité
Ballon ECS électrique	A déplacer	3	4	Electricité	
Gaines ECS et chauffages individuels	A déplacer	3	4	Plomberie	
Réseaux ECS collective	A déplacer	3	4	Plomberie	
Réseaux chauffage collectif	/	4	/	/	Complexe car nécessitant de couper la chaudière collective et vidanger les réseaux
Façade avec lucarne	Isolant complémentaire à prévoir	2		/	Perte d'efficacité / difficulté potentielle sur le traitement des jouées
Revêtement de finition	Travaux induits de finitions	2	6 – 10	/	Il faut prévoir une unité esthétique du revêtement sur l'ensemble de la pièce.
Entrée d'air en façade	/	4	/		Si des entrées d'air sont présentes en façade il faut, avant de les condamner, prévoir une amenée d'air neuf

TABLEAU 2 **Obstacles à l'installation d'isolant sous vide en chambres de service**

Ainsi, les éléments qui viennent contraindre fortement l'isolation de la façade par l'intérieur à l'aide de PIV sont :

- La présence de meubles (notamment de cuisine) contre la façade à isoler et difficilement déplaçables,
- La présence de réseaux de chauffage collectifs en logement,
- La présence d'entrées d'air en façade.

Le reste des obstacles cités ici entraine, dans le pire des cas, un allongement du temps d'intervention mais n'entrave pas le projet d'isolation par l'intérieur.

2.1.2.3 DIAGNOSTIC DES MENUISERIES ET DE LA VENTILATION

Lors de travaux d'isolation par l'intérieur deux autres lots travaux sont fortement impactés :

- Les menuiseries extérieures,
- La ventilation.

La phase de diagnostic doit permettre d'évaluer ces éléments :

- **L'état de performance thermique et de vétusté des menuiseries extérieures** doit être vérifié afin d'estimer si leur remplacement (à réaliser idéalement en même temps que l'intervention au niveau de l'isolation) doit être envisagé. Ainsi, des menuiseries extérieures vétustes et / ou à faible performance thermique seront à remplacer.
- **Le niveau d'efficacité du système de ventilation** : l'intervention au niveau de l'isolation de la paroi (et à fortiori lorsque les menuiseries extérieures sont remplacées) entraine une réduction du renouvellement d'air par le biais de défauts d'étanchéité / fuites d'air parasites. Le système de ventilation doit donc être suffisamment efficace pour pouvoir assurer un renouvellement d'air permanent et éviter les pathologies futures liées à l'humidité.

Le tableau ci-dessous permet d'estimer (en première approche, à l'aide d'un diagnostic visuel sur site) si la menuiserie est performante à l'aide d'un classement : 4 catégories sont définies : de la plus performante (4) à la plus déperditive (1).

Les menuiseries éligibles aux aides financières, telles que MaPrimeRénov, doivent par exemple avoir un coefficient de déperdition Uw < 1.7 W/m^2.K (par exemple une menuiserie de type 4/16/4 avec un coefficient Uw = 1.3 W/m^2.K), les menuiseries les plus déperditives ont un coefficient Uw parfois supérieur à 4 W/m^2 K (simple vitrage notamment).

Le niveau d'efficacité de la ventilation est également classé selon la même logique.

Performance thermique			
Performant	Performance moyenne	Performance faible	Energivore
4	3	2	1
Uw < 2,00	2,00 < Uw <2,6	2,6 < Uw < 4,00	Uw > 4,00
Vétusté			
Neuve	Rénovée	d'origine	Vétuste
Neuf ou en très bon état	Rénové mais en état moyen	Ancien et dégradé mais sans danger pour les habitants	Très dégradé et dangereux pour la sécurité des résidents
4	3	2	1
Ventilation			
Performant	Performance moyenne	Performance faible	Energivore
4	3	2	1
Simple flux hygro B	Simple flux régulé hygro A	Simple flux sans régulation (autoréglable)	Ventilation naturelle

TABLEAU 3 Diagnostic état et performance des menuiseries et de la ventilation

CONSEILS

Pour évaluer la performance de la fenêtre, on peut aussi se référer au numéro CEKAL. CEKAL est un organisme certificateur qui délivre des certificats de produits aux fabricants de vitrages isolants. Ce numéro permet d'avoir des informations sur l'efficacité du vitrage.

FIGURE 1 **Repérage du numéro CEKAL au niveau de la lame d'air**

CONSEILS

Un vitro-mètre peut également être utilisé. Il permet de déterminer l'épaisseur du vitrage ainsi que de la lame d'air entre deux vitrages.

FIGURE 2 **Vitro-mètre**

L'estimation du niveau d'efficacité de la ventilation nécessite de repérer dans les appartements si les entrées d'air et bouches d'extraction ne sont pas obstruées ou simplement poussiéreuses, ce qui viendrait limiter fortement le renouvellement d'air du logement.

Le détalonnage des portes doit également être évalué pour vérifier que l'air peut bien circuler dans l'intégralité du logement, même avec les portes fermées.

CONSEILS

Le détalonnage des portes recommandé est de 1,5 cm sur les pièces sèches et 2,5 cm sur les pièces humides.

2.1.3 PRODUITS EXISTANTS EN PAROIS VERTICALES

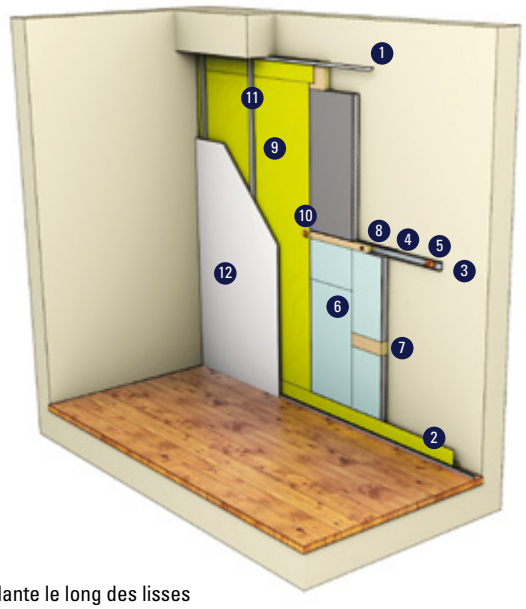
En France en 2020, deux fabricants principaux de panneaux PIV sont présents sur le marché.
L'accent est mis sur la faible emprise au sol des systèmes (entre 6 et 9,5 cm) pour des résistances thermiques allant de 4 à 8m^2K/W). Ces produits sont destinés à l'isolation par l'intérieur de parois verticales.

Produits	A	B	C
Composition du cœur	Silice amorphe compactée	Poudre de diatomée (silice)	Acide silicique pyrogène + inhibiteurs de radiation
Composition de la membrane étanche	Polyester métallisé		Aluminium évaporé et synthétiques
Protections	Plaques de polystyrène extrudé pré-collées de part et d'autre du panneau (2*3 mm)	Panneau de protection à installer lors de la pose	Panneau de protection à installer lors de la pose
Pays de commercialisation	France	France	Belgique et Royaume Uni
Usages autorisés par la fiche technique	ITI parois verticales	ITI parois verticales	ITI toutes parois sauf parois chauffantes
Type de certification technique	Avis technique Français	Evaluation Technique Européenne	Agrément Technique Européen
Conductivité thermique certifiée (W/m.K)	0.0027	0.0059	0.0042
Epaisseurs disponibles (mm)	31	20 et 40	20, 25, 30 et 40
Résistance thermique disponible (m^2.K/W)	4,25 à 8,8	3,05 à 6,3	3,31 à 6,61
Dimensions disponibles (mm*mm)	600*300 et 600*1000	600*200, 600*400 et 600*600	1300*600, 1200*600, 1000*600, 600*600, 500*600, 400*600, 200*600, et 300*400
Epaisseur totale du système (mm)	70 à 95	< 65	< 65

TABLEAU 4 **Comparaison de produits disponibles sur le marché**

2.1.4 COMPARAISON DES MÉTHODES DE MISE EN ŒUVRE

2.1.4.1 DESCRIPTION DES MÉTHODES DE MISE EN ŒUVRE POUR PAROIS EXISTANTES VERTICALES



1. Vissage des lisses hautes et basses
2. Collage des bandes de membrane hygrorégulante le long des lisses
3. Vissage des fourrures horizontales (selon le plan d'assemblage)
4. Collage des bandes de mousse protectrices sur la face haute des fourrures horizontales et sur la lisse basse côté mur
5. Mise en place des appuis brise ponts thermiques dans les fourrures
6. Collage des panneaux sous vide sur le mur selon le plan d'assemblage
7. Mise en place de l'isolant complémentaire fibreux th 32 au niveau des gaines électriques dans les fourrures horizontales, et dans les interstices (généralement en haut et au bord des parois)
8. Mise en place des rondelles rigides sur les appuis
9. Mise en place de la membrane hygrorégulante par embrochage sur les appuis et adhésivage des bandes entre elles
10. Mise en place des rondelles souples d'étanchéité et des clips pour fourrures sur les appuis
11. Clipsage des fourrures verticales sur les attaches et dans les lisses hautes et basses
12. Vissage des plaques de plâtre sur les fourrures

FIGURE 3 Mise en œuvre du produit A sur parois verticales

1. Vissage du rail bas en PVC
2. Pose d'un joint de protection sur les vis de fixation du rail bas
3. Pose d'une bande de joint à 50 cm pour éviter les flux d'air
4. Mise en place d'une rangée de panneaux sous vide dans le rail bas (simplement glissés dans le rail)
5. Pose d'un adhésif de joint aluminium étanche à l'humidité sur les jonctions verticales entre panneaux
6. Mise en place des panneaux de protection dans le rail bas, contre les panneaux sous vide
7. Mise en place de l'isolant complémentaire fibreux type laine minérale th 32 au niveau des gaines électriques, dans les fourrures horizontales, et dans les interstices (généralement en haut et au bord des parois)
8. Vissage d'une fourrure horizontale en PVC au-dessus de la rangée posée

Répétition des étapes 2 à 8 pour chaque rangée de panneaux, autant que nécessaire

10. Collage des plaques de plâtre par application d'une colle sur les fourrures visibles

FIGURE 4 Mise en œuvre du produit B sur parois verticales

2 2 MÉTHODE DE MISE EN ŒUVRE EN PAROIS INCLINÉES – CHAMBRES DE SERVICE

En France, les isolants sous vides ne sont pas à ce jour dédiés aux parois inclinées ou horizontales. Pourtant, cette application est autorisée à l'étranger, comme en Belgique et au Royaume Uni, mais aussi en Allemagne, en Estonie, en Russie… L'utilisation d'isolants sous vides en pans inclinés ne faisant pas l'objet d'avis technique en France cette dernière est pour le moment soumise à la responsabilité du poseur.

L'emprise au sol le long des parois verticales n'est pas le seul paramètre impactant la surface habitable, l'isolation des plafonds inclinés la diminue également. C'est donc un enjeu important pour les chambres de service où les toitures inclinées sont courantes, l'inconfort thermique très présent et l'espace manquant.

- Mise en œuvre d'un isolant en laine traditionnel en toiture inclinée

La mise en œuvre d'isolants traditionnels dans les combles aménagés consiste généralement à remplir les interstices entre chevrons avec une première couche d'isolant (en gardant un espace de 2 cm minimum avec la couverture, en particulier lorsqu'il n'y a pas d'écran de sous-toiture, avec 4 cm dans le cas d'une couverture en zinc), puis à embrocher une seconde couche d'isolant sur des suspentes vissées aux chevrons. L'isolant est maintenu contre le plafond en plaçant des rondelles sur les suspentes, puis une membrane pare vapeur y est également accrochée, suivie d'une ossature sur lesquelles sont vissées les plaques de plâtre.

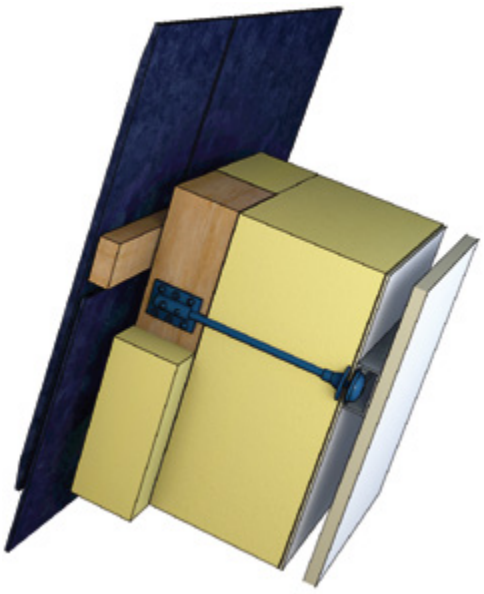


FIGURE 5 Système traditionnel d'isolation en pans inclinés (1/2)

FIGURE 6 Système traditionnel d'isolation en pans inclinés (2/2)

- Mise en œuvre du produit B en toiture inclinée (à l'étranger)

En combles aménagés, le système se pose entre deux tasseaux après remplissage de l'espace entre les chevrons par un isolant traditionnel. Les panneaux sous vide sont ensuite recouverts d'une membrane pare-vapeur, puis sont maintenus par les plaques de plâtre directement fixées sur les liteaux.

- Mise en œuvre de la gamme de produit A en toiture inclinée (à l'étranger)

La solution est adaptée aux combles aménagés. Elle se compose de panneaux d'isolation sous-vide protégés de deux plaques rigides de part et d'autre, dont l'une dépasse de quelques centimètres. Ainsi, ce surplus permet de fixer le panneau directement sur la charpente (ou sur des tasseaux rapportés en fonction de la charpente), après remplissage de l'espace entre chevrons avec un isolant secondaire.

Un écran pare-vapeur doit ensuite être placé sur l'ensemble de la surface isolée, puis les plaques de plâtre peuvent être fixées en finition, au niveau des liteaux, ou bien sur une armature métallique protectrice.

FIGURE 7 **Produit type A - isolant VIP associé à une plaque rigide**

2.2.1 MISE EN ŒUVRE EN CHAMBRE DE SERVICE : SPÉCIFICITÉS ET CONTRAINTES

2.2.1.1 TYPOLOGIE ET SPÉCIFICITÉS DES CHAMBRES DE SERVICE

Dans cette partie, on se focalise sur la mise en œuvre des isolants sous-vide dans les chambres de service, car elles concentrent tous les enjeux relatifs à l'utilisation de ces isolants. Toutefois, les conclusions de cette étude et la mise en œuvre proposée peuvent s'appliquer à d'autres types de logement, qu'il s'agisse d'appartements issus de la fusion d'anciennes chambres de service, ou plus généralement d'isolation de combles aménagés en habitat collectif ou individuel, sous charpente traditionnelle.

Définition légale

Les chambres de service désignent les chambres situées dans les combles des immeubles anciens des centres-villes, qui servaient autrefois de logement aux domestiques de l'immeuble. Selon le recensement de l'INSEE en 2011[1], Paris (intramuros) comptait environ 114 400 chambres de service, dont seulement 17 251 sont habitées au moment de l'étude. La cause de la vacance de ces logements est soit un problème de salubrité, soit une non-conformité aux législations, et donc une impossibilité de les louer. En effet parmi elles, 58 300 chambres ont une surface comprise entre 5 et 8 m^2 et se trouvent donc en dessous du seuil d'habitabilité.

Nous nous intéressons ici aux chambres de service pouvant être louées légalement à titre de résidence principale ; c'est-à-dire les chambres d'au moins 9 m^2 de surface mesurée sous une hauteur de plafond de 1,80 m, 20 m^3 au total, et un rapport Surface Vitrée/Surface de Plancher d'au moins 1/8. D'après l'étude de l'INSEE, cela représenterait environ 50 000 logements (dont 17 000 habités), soit plus de 500 000 m^2 habitables.

1 Données brutes du recensement : https://www.insee.fr/fr/statistiques/2044715
Article de presse : https://immobilier.lefigaro.fr/article/paris-compterait-100-000-chambres-de-bonne-inoccupees_bc7d19a4-91a8-11e5-9e69-3bdd6484fd6d/

CONSEILS

Le télémètre laser est l'un des outils les plus adaptés pour faire des relevés en chambre de service. Il peut mesurer des distances, des surfaces et des volumes avec certains modèles. Il peut également réaliser des mesures continues permettant d'éviter les obstacles (comme dans le cas de combles aménagés et pannes apparentes, il permet de calculer la longueur totale d'un pan de toiture en contournant l'obstacle des pannes). Il permet aussi de faire des mesures additionnées et soustraites pour faire l'addition de plusieurs mesures. Pour la mesure des appartements en comble, des télémètres de portée inférieure à 30 mètres sont largement suffisants.

Généralités

Ces chambres se trouvent dans leur grande majorité sous des charpentes « à la Mansart », contre le brisis, et parfois sous le terrasson. Positionnées directement sous les toitures de bâtiments anciens, elles sont très exposées aux inconforts thermiques, en particulier en été.
A l'origine, certaines de ces chambres faisaient partie d'un logement plus grand, mais leurs transformations massives en « studettes » indépendantes louées essentiellement à des étudiants ou à des jeunes travailleurs aux revenus modestes, nécessite l'installation d'équipements sanitaires et de cuisine. Des pièces sèches anciennes sont ainsi transformées en pièces humides, ce qui peut potentiellement générer des problèmes d'humidité sous les combles.
En résumé, les chambres de service représentent une surface habitable globale importante peu exploitée (notamment à Paris), présentant des enjeux techniques en termes de confort d'été et d'humidité, mais soumise à de fortes contraintes de taille et de volume. D'autre part, étant des logements ne présentant qu'une seule pièce, elles posent également la question des travaux d'isolation en site occupé.

2.2.1.2 PRINCIPALES DIFFICULTÉS TECHNIQUES

Dans le cas de travaux d'isolation des chambres de service les difficultés techniques identifiées sont les suivantes :

- Besoin d'adapter le calepinage à de potentiels éléments de charpente apparents (pannes notamment) et de traiter ces ponts thermiques
- Besoin de fixer les panneaux efficacement sous une surface inclinée ou horizontale
- Besoin d'apposer des panneaux plats contre un enduit pas toujours régulier ou plan
- Besoin de réguler l'humidité dans la paroi et de limiter la condensation en particulier au niveau des ponts thermiques

A ces contraintes s'ajoutent les contraintes spécifiques des isolants sous-vide :

- Dimensions standards, sur-mesure complexe ou onéreux,
- Pas de perçage possible sauf si un espace technique suffisant dédié a été anticipé.

Dans le cas d'une intervention en site occupé, le dépôt des revêtements existants est habituellement complexe, car entrainant de la saleté, des poussières et des déchets encombrants sur le chantier en plus d'en allonger la durée. Cependant, afin de pouvoir avoir accès aux chevrons pour la pose d'un isolant, la dépose systématique parait inévitable.

2.2.2 MISE EN ŒUVRE SOUS BRISIS

2.2.2.1 CAS MODÉLISÉS ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

Le cas du brisis pose plusieurs questions par rapport aux hypothèses prises pour les simulations. En ce qui concerne les configurations étudiées, la double isolation pose la question de l'isolant secondaire choisi.

COMMENT FAIRE

Pour être conforme à la RT élément (2023), il faut atteindre une résistance thermique de 3,2 m^2.K/W en brisis (pente >60°), et de 5,2 m^2.K/W en terrasson (pente < 60°) en zone climatique H1A.

Dans le cas d'une isolation continue d'une épaisseur constante des deux pans de toiture, on part du principe que c'est l'exigence la plus élevée qui doit être respectée.
En considérant les hypothèses de modélisation, la grande majorité des références commerciales de panneaux PIV assurent à elles seules la résistance thermique de 3,2 m^2 K/W en brisis. Cependant, dans le cas d'une isolation du terrasson, ou simplement d'une toiture de pente inférieure à 60°, Le choix d'un isolant PIV plus épais ou d'un isolant complémentaire avec un lambda inférieur à 0,032W/m.K peuvent s'imposer pour atteindre l'objectif réglementaire de 5,2 m^2.K/W.

COMMENT FAIRE

On peut se poser la question de la nécessité de protéger les panneaux du perçage en brisis, car le risque de perçage par un locataire est moins élevé qu'en paroi verticale. Cette hypothèse n'impacte pas les simulations, mais on décide dans un premier temps de privilégier un système techniquement simple plutôt qu'un système rendu complexe par la présence de plaques protectrices.

2.2.2.2 PRÉAMBULE À LA MISE EN ŒUVRE

Définition du modèle support

Les différentes configurations sont modélisées à l'aide d'un logiciel de 3D. La base choisie est un pan de brisis de longueur 3 m et de pente 75° (pente forte pour faciliter la visibilité du modèle, pouvant diminuer jusqu'à 60° en site réel), avec une hauteur sous plafond max de 2 m 50. Une fenêtre de toit de 78*98 cm supposée préexistante est présente sur le brisis. La composition de la toiture est conforme aux charpentes à la Mansart, avec un revêtement de toiture reposant sur des liteaux horizontaux, soutenus par des chevrons standard de 60*80 mm avec un espace maximum entre chevrons de 600 mm.

Le modèle est simplifié. Il a pour but de montrer les principes de mise en œuvre sur les parties courantes, c'est pourquoi le chevêtre autour de la fenêtre de toit n'est pas détaillé. Il est cependant pris en compte dans les points singuliers présentés dans la seconde partie de ce rapport.
Dans le modèle, une panne transversale soutient les chevrons. C'est une forme de charpente classique, même si la panne peut être absente ou au contraire complétée par d'autres éléments de charpente comme des jambes de forces (avec aisselier ou blochet).

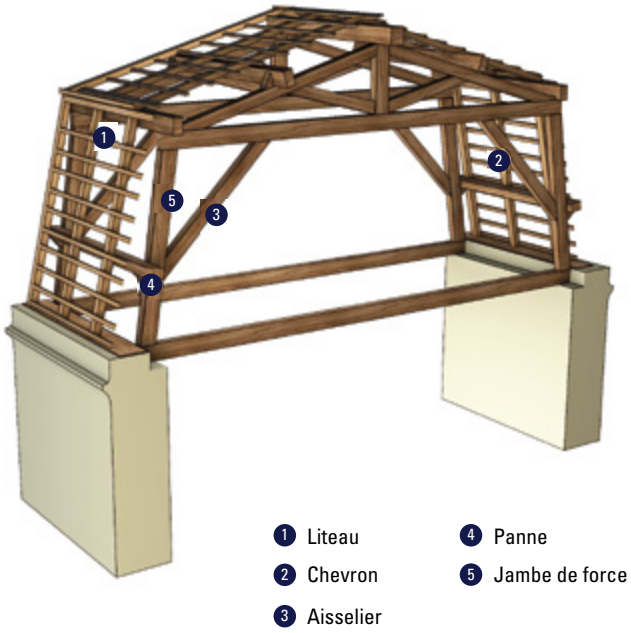
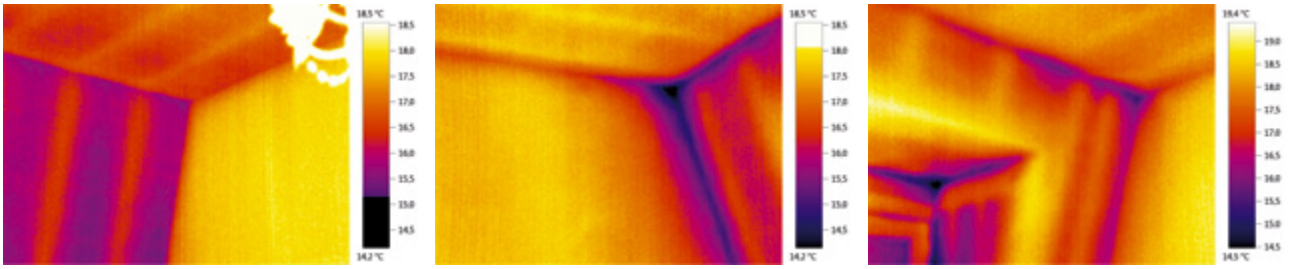


FIGURE 8 Charpente à la mansart

Dans le cas d'une charpente à la Mansart classique, les liteaux sont horizontaux, les chevrons verticaux et les pannes horizontales. Les pannes créent alors une rupture dans l'isolant car le complexe isolant n'est pas suffisamment épais pour les recouvrir. Les jambes de Force se trouvent intégralement dans la pièce (elles ne gênent pas le complexe isolant, sauf au niveau du sol si on installe une cloison verticale).
Dans le cadre d'une charpente traditionnelle à deux pans à fermes sur blochet, les liteaux et chevrons sont identiques, mais des arbalétriers soutiennent les pannes intermédiaires. Les pannes sont toujours un obstacle. Les arbalétriers et les jambes de force se trouvent également à l'intérieur de la pièce et ne gênent pas le complexe isolant, mais les blochets et les éventuelles semelles percent le complexe isolant jusqu'au revêtement de toiture lorsqu'ils reposent sur les murs, ou bien jusqu'au revêtement de façade lorsqu'ils sont incrustés dans ce dernier.
Ces deux typologies de charpente courantes couvrent les différentes formes de points singuliers pouvant rompre la continuité du complexe isolant.

Lors d'une mise en œuvre sur site, la typologie de la charpente doit être connue pour préparer le calepinage des panneaux ainsi que pour dimensionner et préparer les éléments de structure de fixation des panneaux PIV. Or la charpente n'est pas toujours visible, ce peut être le cas si un revêtement cache la charpente par exemple et que le revêtement ne peut pas être retiré en amont car le site est occupé. Deux opérations sont donc à réaliser avant la pose :

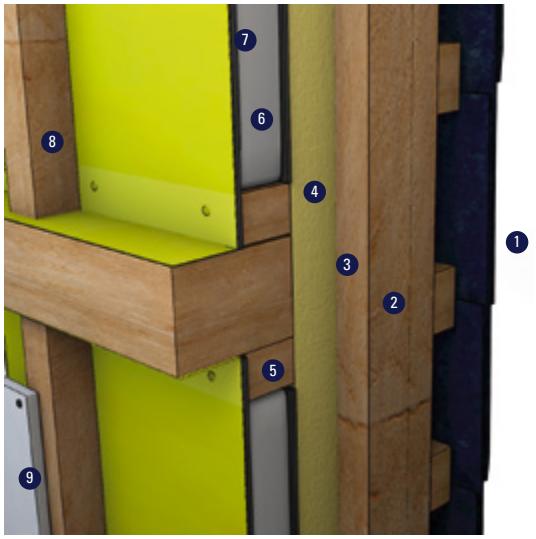
- La vérification de l'état général de la charpente. En effet, une charpente en bois dégradée ou une charpente métallique corrodée devra être remplacée dans le cadre de travaux plus lourds avant la pose d'isolants, sous peine de devoir déposer tout le système d'isolation quelque temps plus tard lors de travaux nécessaires sur la charpente.
- La vérification du matériau de charpente et de la typologie de charpente, qui peut être effectuée grâce à des documents techniques, une visite du bâtiment, ou encore l'obtention d'images par caméra thermique pour déterminer la forme de la structure derrière le revêtement et préparer les éléments de fixation et de traitement des points singuliers en conséquence.



2.2.2.3 RECHERCHE DE PRINCIPES DE MISE EN ŒUVRE SOUS BRISIS

● **Adaptation de la mise en œuvre d'un produit isolant sous vide sous brisis : Solution 1**

La méthode issue des produits de la famille A peut être adaptée au brisis comme montré ci-dessous, pour une épaisseur à partir des chevrons d'environ 6,5 cm.



De l'extérieur à l'intérieur et suivant leur ordre de pose, on trouve les éléments suivants :

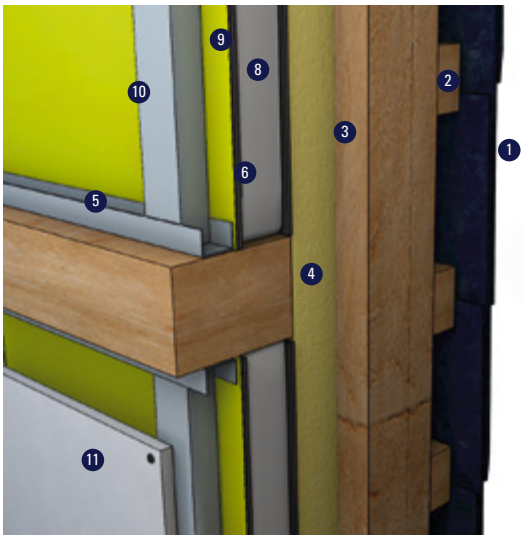
1. Revêtement de toiture
2. Liteaux
3. Lame d'air de 2 cm
4. Isolant entre chevrons d'épaisseur suivant la profondeur des chevrons, fourré si isolant laine, vissé avec rondelle large si isolant en panneaux rigides de polyuréthane
5. Armature horizontale en bois
6. Panneaux PIV avec plaque intégrée et isolant complémentaire
7. Membrane pare-vapeur
8. Contre-lattage en bois et vide technique
9. Plaques de plâtre

FIGURE 9 Adaptation en brisis des produits de la famille A

Tout comme le système A, on utilise des attaches dans les fourrures horizontales, on embroche la membrane pare-vapeur dessus en assurant l'étanchéité à l'air, puis on clipse les fourrures verticales avant de visser les plaques de plâtre dans ces dernières. Avec ce système, on a l'avantage de garantir la continuité du pare-vapeur en partie courante, et de visser tous les éléments dans la charpente. Cependant, au niveau d'une panne ou d'un autre élément de charpente apparent, le pare-vapeur est discontinu et de l'air humide peut traverser la paroi. C'est un point d'intérêt à pris en compte dans les modélisations.

- **Mise en œuvre inspirée des « solutions à l'étranger » : Solution 2**

La Solution 2 s'inspire des solutions en combles aménagés avec des panneaux sous vides commercialisés à l'étranger :



De l'extérieur à l'intérieur et suivant leur ordre de pose, on trouve les éléments suivants :

1. Revêtement de toiture
2. Liteaux (présentés comme un plan continu sur les schémas simplifiés)
3. Lame d'air de 2 cm (entre chevrons)
4. Isolant entre chevrons
5. Rails apposés sur les pannes
6. Bandes pare-vapeur collées contre le rail
7. Fourrures horizontales et attaches clipsables
8. Isolant PIV et isolant complémentaire
9. Membrane pare-vapeur
10. Fourrures métalliques verticales (vide technique entre les fourrures)
11. Plaques de plâtre vissées dans les fourrures

FIGURE 10 Proposition d'une solution 2 en brisis

2.2.3 SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES ET ÉTAPES DE POSE DE LA SOLUTION 2

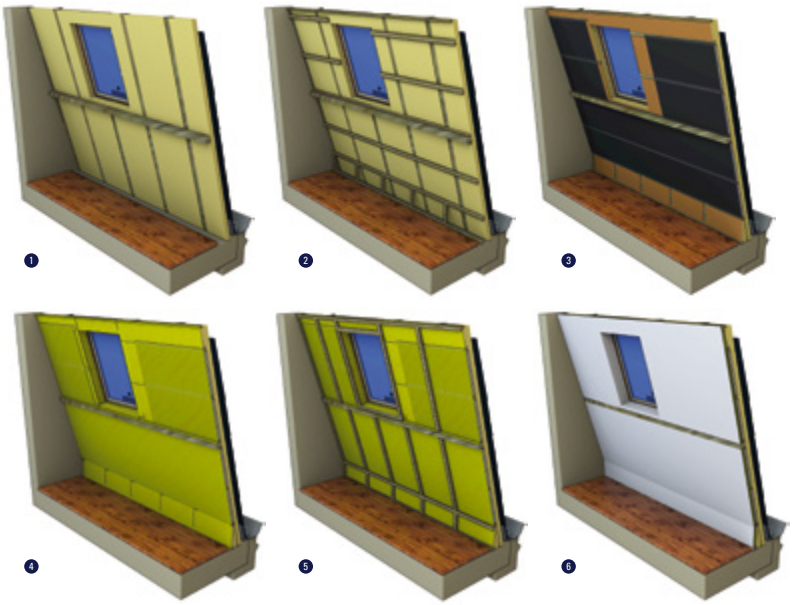


FIGURE 11 **Eléments de mise en œuvre de la solution 2**

0) Etapes préparatoires : Vérification de l'état de la charpente, réalisation du calepinage en fonction de la forme de la charpente, préparation des éléments structurels sur mesure et des panneaux, dépose des revêtements existants.
1) Pose de l'isolant entre chevrons
2) Fixation de l'armature en bois
3) Fixation des panneaux et de l'isolant complémentaire
4) Mise en place de la membrane pare-vapeur
5) Fixation du contre-lattage
6) Fixation des plaques de plâtre

2.2.3.1 DÉTAILS DES ÉLÉMENTS DE MISE EN ŒUVRE ET SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES :

- Les isolants en laines minérales ou en fibres biosourcées sont découpés avec un surplus d'1 à 2 cm selon la typologie de produit de chaque côté pour tenir entre les chevrons le temps que le reste du système soit installé. Les isolants en panneaux rigides sont vissés sur les liteaux et maintenus par des rondelles larges. Ce système de suspentes peut être utilisé avec les laines minérales si la typologie de la charpente ne permet pas leur maintien seul.
- L'épaisseur de l'isolant entre chevrons dépend de la profondeur de ces derniers. L'isolant doit arriver au ras des chevrons, et il faut laisser une lame d'air de 2 à 3 cm (4 cm dans le cas d'une couverture en zinc) entre la toiture et l'isolant en l'absence d'écran de sous toiture HPV.
- L'armature en bois est vissée directement dans les chevrons, perpendiculairement à ces derniers, en utilisant un panneau d'isolant sous vide comme calibrage. Elle offre deux avantages par rapport à la pose des panneaux PIV directement entre les chevrons : d'une part, elle permet de limiter la surface non isolée par des isolants sous-vides en passant par-dessus les chevrons, d'autre part, elle permet de s'adapter au mieux aux dimensions des panneaux et au calepinage. Cette armature est nécessaire car elle offre une prise entre les panneaux PIV pour fixer le reste des matériaux.

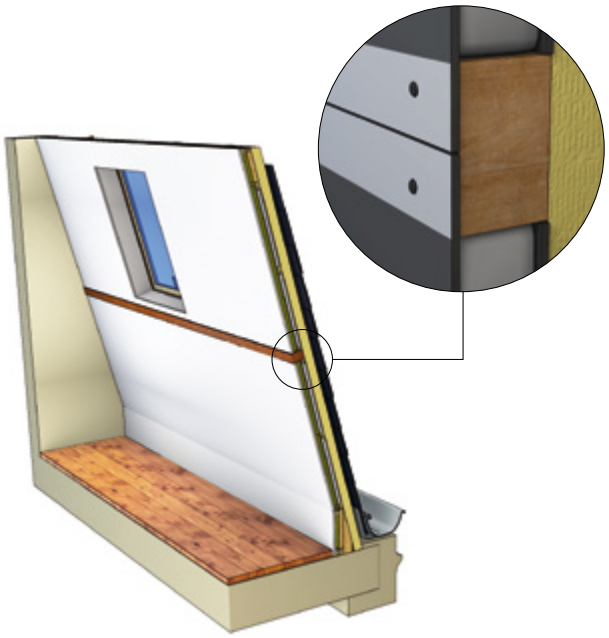


FIGURE 12 **Vue en coupe d'un tasseau de bois pour la fixation des panneaux PIV**

- Avant la pose, l'état de chaque panneau doit être vérifié pour ne pas poser de panneaux percés. La vérification est visuelle : la tranche des panneaux doit être irrégulière (signe que le panneau est bien sous-vide), et non lisse.
  Les panneaux PIV sont vissés dans les armatures en bois uniquement au niveau du surplus de plaque, car ils ne doivent pas être percés (un percement entraine une réduction significative des performances de l'isolant, qui n'est alors plus « sous-vide »). A voir avec le fabricant des panneaux choisis si la pose d'une bandelette de protection est nécessaire le long des armatures en bois pour protéger la tranche des panneaux de ce contact. L'isolant complémentaire est découpé avec 1 cm de surplus pour les isolants laine, et 1 à 2 mm de surplus pour les panneaux rigides, puis il est posé dans les interstices, et aux endroits où sortent les gaines techniques. L'isolant complémentaire est percé pour laisser passer ces gaines.
- Le pare-vapeur ou la membrane hygrorégulante doit être installé selon les règles de l'art, avec un recouvrement des lés de membrane d'au moins 10 cm et adhésivage de toutes les liaisons (DTU 31.2). Des surplus d'au moins 5 cm sont laissés contre le plafond, le plancher, les parois latérales et les obstacles (charpente, menuiseries…). La membrane peut être maintenue en place soit par adhésivage, agrafage ou clouage. Dans les deux derniers cas, il est recommandé de recouvrir chaque agrafe ou clou d'un morceau d'adhésif compatible.
- Le contre-lattage et la création d'un vide technique sont des exigences détaillées dans l'annexe B du DTU 31.2, dans le cas où les tasseaux servent à la fois de maintien en position du pare-vapeur, et de support aux plaques de plâtre. S'il n'y a pas de boîtiers et que les gaines sont petites, l'espace minimal du vide technique doit être de 25 mm. Autrement, il faut adapter le vide à des gaines plus volumineuses, et créer des passages dans les tasseaux. D'autre part, la largeur des tasseaux dans le cas où ils servent de fixation à des plaques de plâtre doit être d'au moins 45 mm, et espacés d'au maximum 60 cm.
- Les plaques de plâtre sont vissées dans le contre lattage, dans les règles de l'art fixées par le DTU 25.41.

2.2.3.2 VENTILATION DE LA TOITURE SUR COMBLES AMÉNAGÉS

La ventilation des toitures des bâtiments anciens se fait en pied et en sommet de versant par des ouvertures au niveau des gouttières et de la panne faîtière.

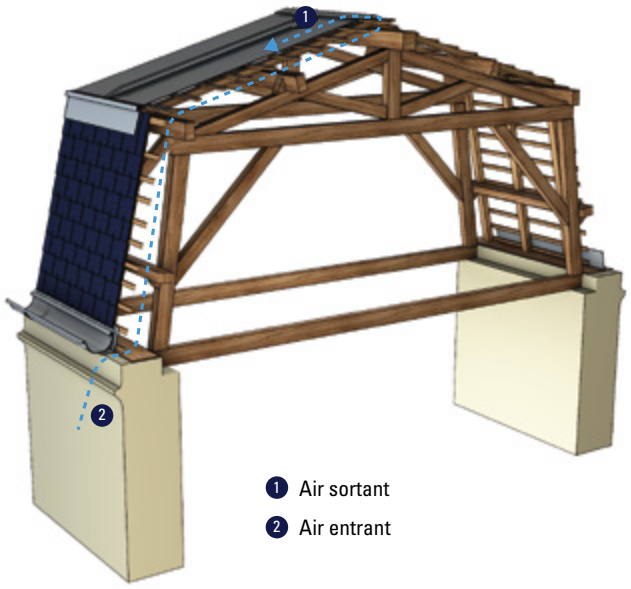


FIGURE 13 Circulation de l'air au niveau d'une toiture ventilée

Au niveau des faîtières et des arêtiers, on retrouve souvent des closoirs ventilés. En partie courante, on retrouve des chatières.
La ventilation de l'espace sous couverture doit permettre de maintenir les bois de charpente et support de couverture à un taux d'humidité convenable pour assurer la conservation et le maintien des caractéristiques d'utilisation ainsi que d'éviter la présence permanente d'eau de condensation entre le support et la sous face de la couverture.
Les chatières sont destinées à être posées pour des pentes supérieures ou égales à 5 %. Le relevé intérieur derrière la grille de la chatière doit être positionné de façon à éviter que la pluie ne pénètre directement dans le comble. (DTU 40.41)

2 3 CONCLUSION

L'isolation des pans inclinés en toiture peut aujourd'hui être réalisée avec différents produits isolants dont des laines minérales, qui représentent les solutions « traditionnelles ». Dans le but de limiter la perte de surface habitable et la perte de volume, notamment pour les typologies de logements très contraintes en termes d'espace comme les chambres de service, l'utilisation d'isolants sous vides est une alternative intéressante. L'utilisation de ce type d'isolants en pans inclinés ne bénéficie pas d'avis technique en France mais est utilisée à l'étranger. Ce chapitre a mis en avant quelques propositions de solutions techniques à base d'isolant traditionnel entre chevrons et d'isolant sous vide, le chapitre suivant étudie le risque que pourraient présenter ces configurations face à des pathologies liées à l'humidité. Les solutions d'isolation à base de PIV en pans inclinés ne bénéficiant pas d'avis technique actuellement en France leur utilisation est soumise à la responsabilité du poseur.

3 LIMITATION DES RISQUES LIES À L'HUMIDITÉ SUR LES PAROIS ANCIENNES

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les risques causés par des désordres liés à l'humidité lors de l'isolation par l'intérieur d'une façade ancienne avec des panneaux isolants sous-vide et de fournir des recommandations particulières pour une mise en œuvre la moins risquée possible. Cette étude se fera au moyen de simulations hygrothermiques dynamiques.
Pour des raisons socio-économiques énoncées dans le chapitre précédent, nous nous limiterons aux immeubles anciens situés dans les grandes métropoles françaises, comme Paris et Bordeaux. Ces immeubles peuvent abriter aussi bien des appartements que des bureaux, aussi ces derniers seront-ils désignés de manière générique par le terme « les locaux ». D'autre part, les locaux étudiés se situeront dans les étages supérieurs d'un immeuble (en partie courante et dans les combles), mais pas en rez-de-chaussée et la problématique des remontées capillaires ne sera donc pas abordée. Enfin, les risques seront évalués à la fois sur les murs anciens, mais aussi sur les planchers qu'ils supportent.
Dans ce qui suit, le terme « système d'isolation » désigne plusieurs éléments : le ou les isolants (panneaux isolants sous-vide ou laine minérale, isolation complémentaire si panneaux isolants sous-vide) mais également l'éventuelle membrane pare-vapeur (pare-vapeur, frein-vapeur ou frein-vapeur hygrovariable).

3 1 DÉSORDRES LIÉS À L'HUMIDITÉ

3.1.1 INVENTAIRE

Le Tableau 5 présente une liste des désordres liés à l'humidité possibles lors de l'isolation par l'intérieur d'un local situé dans les étages supérieurs d'un immeuble ancien. Il met également en avant leurs principaux risques, leurs origines et les recommandations générales à mettre en œuvre pour les éviter.
Tous ces éléments sont repris dans la Figure 14.

CONSEILS

A noter qu'il n'est pas certain que ces désordres liés à l'humidité surviendront systématiquement. Cela dépendra fortement de la composition de la façade et de la mise en œuvre.
D'autre part, même si cette étude se limite aux façades anciennes, le tableau et le schéma suivants sont valables pour des façades plus récentes.

Désordres liés à l'humidité	Principaux risques	Causes	Recommandations générales
Condensation de surface	Développement de moisissures sur la paroi intérieure du mur	En phase diagnostic/conception : > Système de ventilation absent ou débit de ventilation insuffisant > Présence de ponts thermiques importants	En phase diagnostic/conception : > Prévoir un système de ventilation correctement dimensionné si l'étanchéité à l'air des parois a été fortement diminuée (changement de fenêtres, isolation des murs). > Prévoir des retours d'isolants sur les murs de refends et sur les ébrasements des fenêtres. En phase chantier ou en fonctionnement : > S'assurer auprès des occupants que le système de ventilation fonctionne dans de bonnes conditions (système allumé, entrées d'air non obstruées, etc.)
Condensation interne (atteinte du point de rosée)	Dégradation structurelle à l'intérieur du mur Dégradation thermique des isolants Développement de moisissures à l'intérieur du mur	En phase diagnostic/conception : > Côté intérieur du mur trop peu étanche à la vapeur > Système de ventilation absent ou débit de ventilation insuffisant En phase chantier ou en fonctionnement : > Etanchéité à l'air défaillante du système d'isolation	En phase diagnostic/conception : > Vérifier, avec un diagramme de GLASER voire une simulation hygrothermique dynamique, que le point de rosée n'est pas atteint du côté intérieur du mur. Si oui, modifier le système d'isolation pour le rendre plus étanche à la vapeur. > Prévoir un système de ventilation correctement dimensionné si l'étanchéité à l'air des parois a été fortement diminuée (changement de fenêtres, isolation des murs). En phase chantier ou en fonctionnement : > S'assurer, auprès de tous les professionnels intervenant sur le chantier, mais aussi auprès des occupants, que l'étanchéité à l'air du système d'isolation sera au moins « normale » (voir 3.2.6.2 pour une définition), sinon parfaite (éviter percements, gérer les passages de gaines, etc.).
Infiltration d'eau de pluie par la paroi extérieure du mur	Dégradation mécanique de l'enduit extérieur Dégradation mécanique de la paroi extérieure de mur Dégradation structurelle à l'intérieur du mur	En phase diagnostic/conception : > Fissuration de l'enduit extérieur > Enduit extérieur ou mur non enduit trop capillaire	En phase diagnostic/conception : > Vérifier l'intégrité de l'enduit extérieur. Le réparer au besoin. > Appliquer une peinture hydrofuge perméable à la vapeur.
Infiltration d'eau de pluie par la couverture	Dégradation mécanique des éléments en bois de la toiture Dégradation thermique des isolants de la toiture	En phase diagnostic/conception : > Absence de pare-pluie de type HPV > Etanchéité à l'eau défaillante de la couverture	En phase diagnostic/conception : > Prévoir l'installation d'un pare-pluie de type HPV lorsqu'il est exigé par les DTU. > Vérifier l'intégrité de la couverture. La réparer au besoin.

TABLEAU 5 **Liste des désordres liés à l'humidité possibles et des recommandations générales pour les éviter lors de l'isolation par l'intérieur d'un local situé dans les étages supérieurs d'un immeuble**

Source. Cerema.

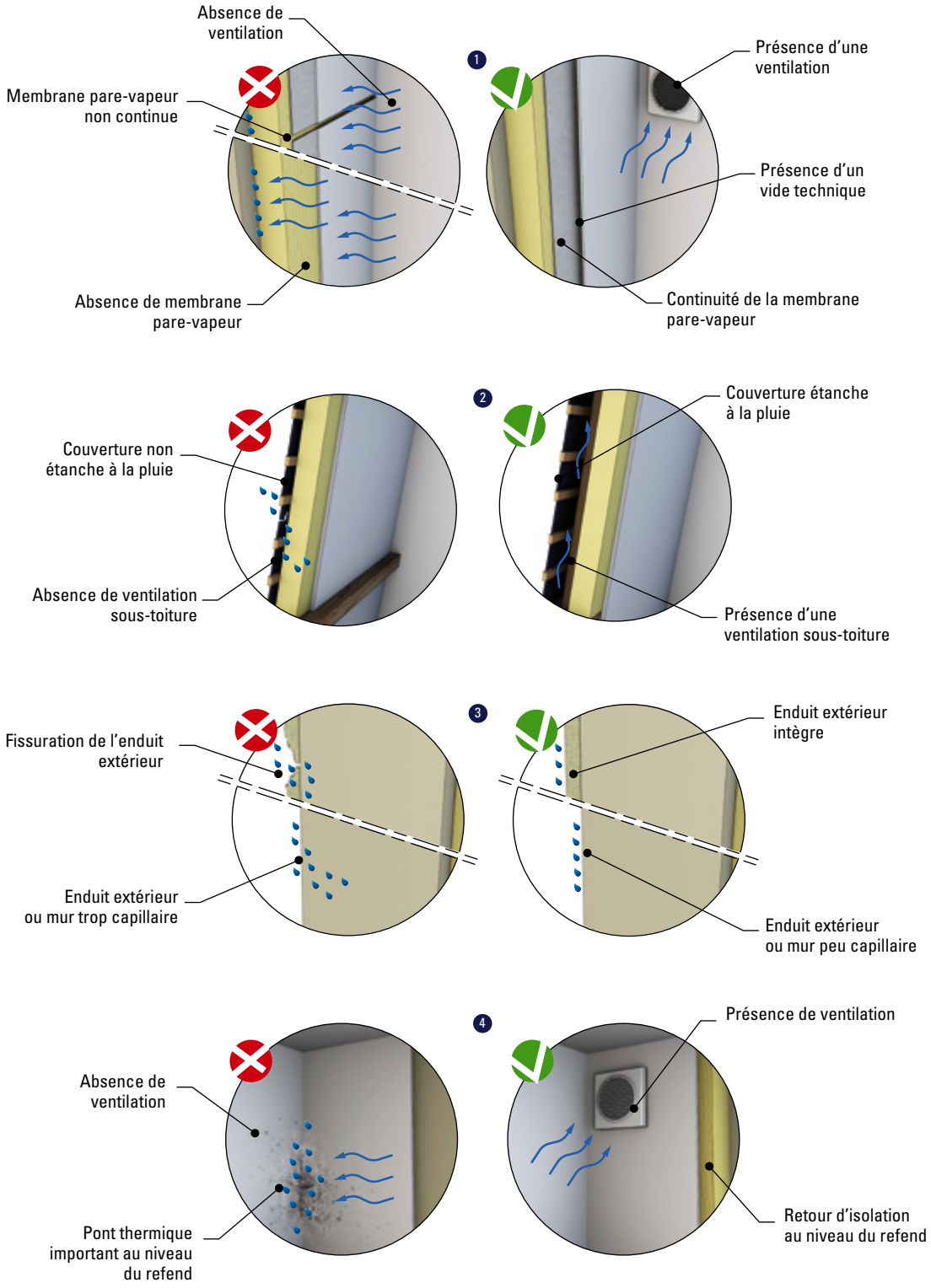


FIGURE 14 Schéma des désordres liés à l'humidité possibles et des recommandations générales pour les éviter lors de l'isolation par l'intérieur d'un local situé dans les étages supérieurs d'un immeuble

Source. Cerema.

3.1.2 CHOIX DES DÉSORDRES À ÉTUDIER

Nous considérons que la plupart des désordres dus à des erreurs en phase diagnostic/conception sont facilement évitables : Ils ne feront pas l'objet de développement dans cette partie.

CONSEILS

La visite préalable, telle que décrite dans le chapitre précédent, a pour objet d'éviter la plupart des désordres dus à des erreurs en phase diagnostic/conception : elle est donc indispensable pour tout projet d'isolation par l'intérieur, et pas seulement pour les façades anciennes et un système d'isolation PIV.

Cependant, deux désordres semblent particulièrement intéressants à étudier :

- **Infiltration d'eau de pluie par la paroi extérieure du mur à cause d'un enduit extérieur ou d'un mur non enduit trop capillaire**

Ce désordre est souvent difficile à anticiper lors du diagnostic, car la mesure de la grandeur associée à la capillarité des parois extérieures (le coefficient d'absorption capillaire A en $kg/(m^2.h^{1/2})$) est peu connue et pratiquée. Elle est pourtant simple et peut être d'une grande aide pour anticiper ce désordre. Voir à ce propos l'annexe 4 de Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien (Enertech, 2019).

- **Condensation interne (atteinte du point de rosée) à cause d'étanchéité à l'air défaillante du système d'isolation**

Ce désordre est difficile à maîtriser, car il a des origines multiples et est parfois indépendant de la qualité du travail fourni par le professionnel mettant en œuvre le système d'isolation. L'étanchéité à l'air du système d'isolation peut en effet être compromise par d'autres professionnels intervenants sur le chantier (électricien, poseur de fenêtres, etc.), mais aussi par les occupants du local, du fait de leur méconnaissance des bonnes pratiques en matière de fixation d'éléments muraux sur un système d'isolation par l'intérieur.

CONSEILS

Le danger d'une étanchéité à l'air défaillante du système d'isolation est qu'elle introduit une quantité non maîtrisée d'air humide provenant de l'intérieur du local dans ou entre les éléments du système d'isolation. Cet air humide peut se retrouver emprisonné entre le mur et le système d'isolation si ces derniers ne sont pas suffisamment perméables à la vapeur et condenser en hiver. C'est cette eau de condensation qui peut être à l'origine d'une dégradation structurelle à l'intérieur du mur, d'une dégradation thermique des isolants ou d'un développement de moisissures à l'intérieur du mur.

3.2 PARAMÈTRES ET HYPOTHÈSES DE SIMULATION DES FAÇADES ANCIENNES ÉTUDIÉES

3.2.1 LOGICIEL UTILISÉ

Le logiciel utilisé est le logiciel de simulation hygrothermique dynamique WUFI 2D.
Il permet de calculer les transferts d'humidité au travers des éléments d'un bâtiment, et donc d'évaluer les risques causés par des désordres liés à l'humidité dans ces éléments. Pour effectuer ces calculs, le logiciel a besoin de paramètres de calcul et des paramètres des éléments étudiés.
Les paragraphes qui suivent sont destinés à définir les paramètres des façades anciennes étudiées. Les paramètres de calcul sont fournis en annexe 6.1.

3.2.2 DONNÉES CLIMATIQUES

3.2.2.1 LOCALISATION

Paris et Bordeaux sont les deux villes étudiées. Le choix de ces deux villes permet également d'étudier un climat plutôt continental (Paris) et un climat océanique (Bordeaux).

3.2.2.2 CLIMAT INTÉRIEUR

Le climat intérieur étudié correspond à une classe d'hygrométrie moyenne (W/n = 5 g/m^3), ce qui correspond à un **local correctement chauffé et ventilé, sans sur-occupation**. En effet, on se place ici dans le cas d'une ventilation dont le fonctionnement permet de maintenir l'hygrométrie à ce niveau.

3.2.2.3 ORIENTATION

Les orientations étudiées sont **l'orientation nord et l'orientation la plus exposée à la pluie battante**. Pour Paris, il s'agit de l'orientation nord-est-est et pour Bordeaux, de l'orientation nord-nord-est, assimilé à l'orientation nord.

3.2.3 TYPOLOGIE DE FAÇADE ANCIENNE

Les caractéristiques hygrothermiques des matériaux utilisés dans cette étude sont présentés en annexe 6.2.

3.2.3.1 HYPOTHÈSES GÉNÉRALES

Dans tous les cas, :

- Le local étudié se situe dans les étages supérieurs d'un immeuble.
- Le local du dessous est considéré comme isolé avec un système d'isolation d'une épaisseur de 15 cm, constitué de laine minérale et d'un frein-vapeur hygrovariable indépendant, dont l'étanchéité à l'air est « normale » (voir 3.2.6.2 pour une définition).

Cette configuration apparaît en effet comme plus problématique qu'une configuration où le local du dessous ne serait pas isolé. En effet, cette isolation ainsi que celle du local étudié conduit à la création d'un pont thermique important dans le plancher, entraînant une baisse de température dans celui-ci. D'autre part, l'étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation du local du dessous introduit une quantité non maîtrisée d'air humide.

Ces deux phénomènes peuvent aboutir à la formation de condensation interne dans la poutre, ce qui peut être à l'origine des risques présentés en 3.1.1.

- Avant isolation, le mur du local étudié :
  - Est recouvert d'un enduit intérieur au plâtre non revêtu (ni carrelage, ni papier-peint, ni peinture étanche à la vapeur). Cette hypothèse illustre une situation courante, où l'enduit intérieur n'est pas piqué afin d'éviter certains désagréments en site occupé (comme le bruit et la poussière), mais aussi pour gagner du temps lors de la mise en œuvre du système d'isolation.
  - Ne comporte aucune d'isolation préexistante.

3.2.3.2 PAN DE BOIS/GRAVATS, PLANCHER BOIS ET AUGETS EN PLÂTRE

La Figure 15 présente une façade ancienne en pan de bois/gravats, plancher bois et augets en plâtre. **Cette typologie de façade ancienne n'est présente qu'à Paris et caractérise des immeubles majoritairement construits avant 1800**.

Les dimensions des murs en pan de bois sont dictées par les dimensions des pièces de bois. Les poteaux de fond font en général **22 cm * 22 cm, ce qui donne l'épaisseur totale du mur**. La sablière haute fait 22 cm * 16 cm, les solives 16 cm * 8 cm et la sablière basse 16 cm * 16 cm, tout comme les poteaux de remplissage. Il est donc courant de trouver des épaisseurs de l'ordre de 6 cm d'enduit au plâtre à l'intérieur, afin de combler l'espace entre les poteaux de remplissage et les poteaux de fond[1].

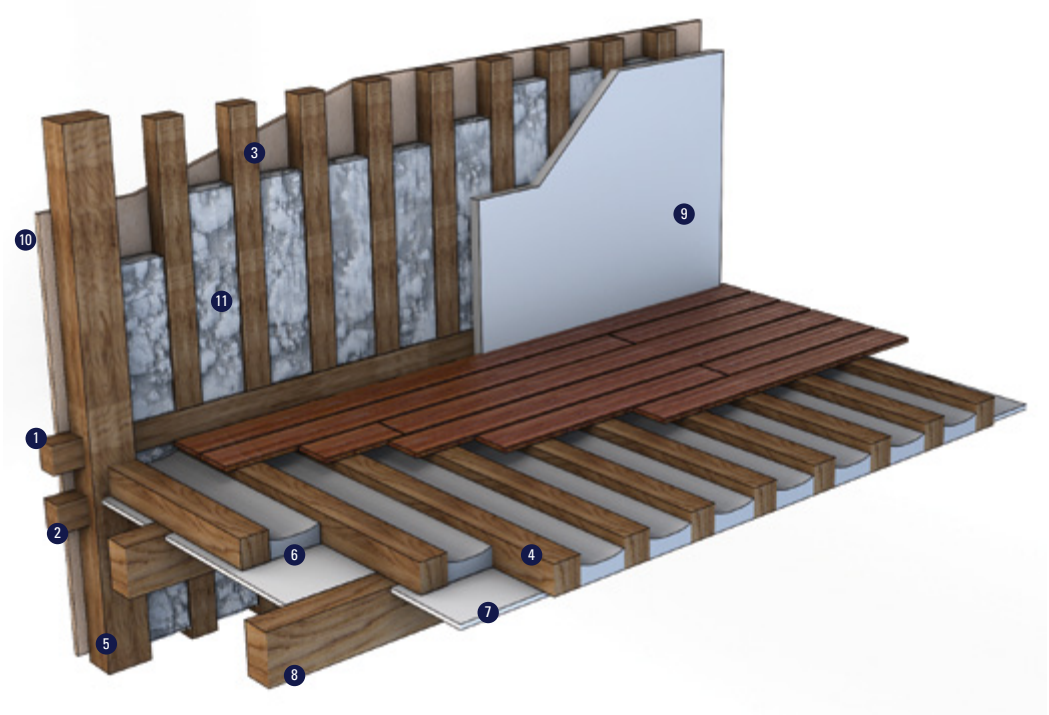
La partie courante est composée de **pan de bois/gravats, composés de moellons grossiers, caillasses et de mortier de plâtre** : les moellons grossiers sont encastrés dans le mur, les caillasses servent de blocage et le plâtre lie le tout sur chaque face. De nombreux vides d'air sont donc présents. Pour les besoins des simulations, nous ferons les hypothèses suivantes :

- Les moellons grossiers et les caillasses sont du calcaire ferme.
- Le mortier de plâtre ne se trouve que sur les faces de la paroi (et non à l'intérieur du remplissage).
- Il existe un chemin de part et d'autre du remplissage pour le passage de l'air.
- La répartition des différents matériaux se fait de la manière suivante :
  - Moellons grossiers : 65 %
  - Mortier de plâtre : 25 %
  - Caillasses : 5 %
  - Vide d'air : 5 %

Un **enduit plâtre-chaux recouvre habituellement le côté extérieur de ces façades**[2]. Cependant, aucune référence de cet enduit n'est disponible dans la base de données du logiciel de simulation hygrothermique utilisé. Nous utiliserons donc un enduit perméable à la vapeur et capillaire, de type enduit à la chaux aérienne.

Les planchers sont en bois et augets en plâtre et le plafonnage est réalisé à l'enduit de plâtre sur lattis. Afin de simplifier la manipulation des simulations, nous ferons l'hypothèse que la hauteur des solives en bois est identique à celle des poutrelles métalliques double T (voir 3.2.3.4), soit 20 cm.

1 Traité de constructions civiles, (E. Barberot, 1912)
2 https://www.fr.weber/renovation-de-facade/restaurer-dans-la-tradition-les-facades-hourdees-et-enduites-au-mortier-de-platre



1. Poutre sablière haute
2. Poutre sablière basse
3. Poteau de remplissage
4. Solive
5. Poteau de fond
6. Auget en plâtre
7. Enduit de plafond en plâtre
8. Poutre maîtresse
9. Enduit intérieur au plâtre (entre 3 et 8 cm)
10. Enduit extérieur plâtre chaux (3 cm) pas de peinture hydrofuge
11. Remplissage de gravats : mœllons grossiers, mortier de plâtre, caillasses, vides d'air (16 cm)

FIGURE 15 **Façade ancienne en pan de bois/gravats, plancher bois et augets en plâtre**

Source. D'après Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits avant 1800 (APUR, 2010) [3].

3.2.3.3 PIERRE DE TAILLE, PLANCHER BOIS ET AUGETS PLÂTRE

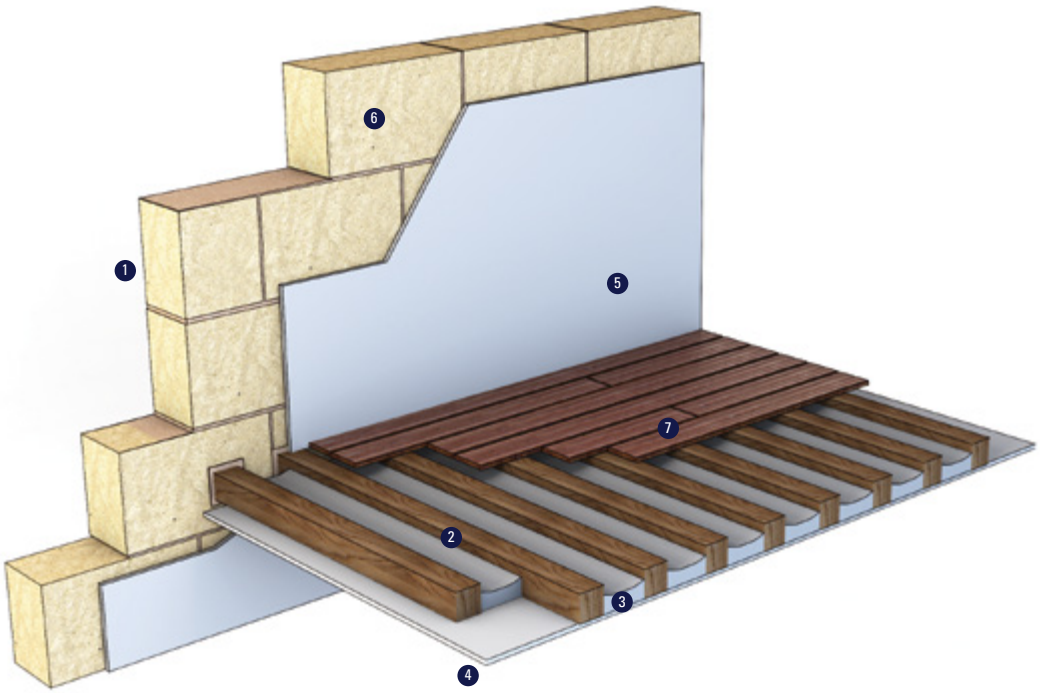
La Figure 16 présente une façade ancienne en pierre de taille, plancher bois et augets en plâtre. **Cette typologie de façade ancienne est présente à la fois à Paris et à Bordeaux**. Elle caractérise des immeubles de type pré-haussmannien, construits entre 1800 et 1850.

Les blocs de calcaire taillés font en général 50 cm d'épaisseur. La longueur et la hauteur des blocs étant très variables d'un bâtiment à un autre, nous prendrons donc une longueur de 81 cm et une hauteur de 31 cm.

La partie courante est composée de **pierre de taille et de mortier fin à la chaux**.

Les planchers en métal apparaissent à partir de 1840. Avant cette date, **les planchers sont donc en bois et auget de plâtre**, tout comme pour la typologie de façade précédente. Le plafonnage est réalisé à l'enduit de plâtre sur lattis.

3 https://www.apur.org/fr/nos-travaux/analyse-performance-thermique-logements-parisiens



1. Pas d'enduit extérieur, pas de peinture hydrofuge
2. Solive
3. Auget en plâtre
4. Enduit de plafond en plâtre
5. Enduit intérieur au plâtre (2 cm)
6. Pierre de taille calcaire (50 cm)
7. Parquet

FIGURE 16 **Façade ancienne en pierre de taille, plancher bois et augets en plâtre**

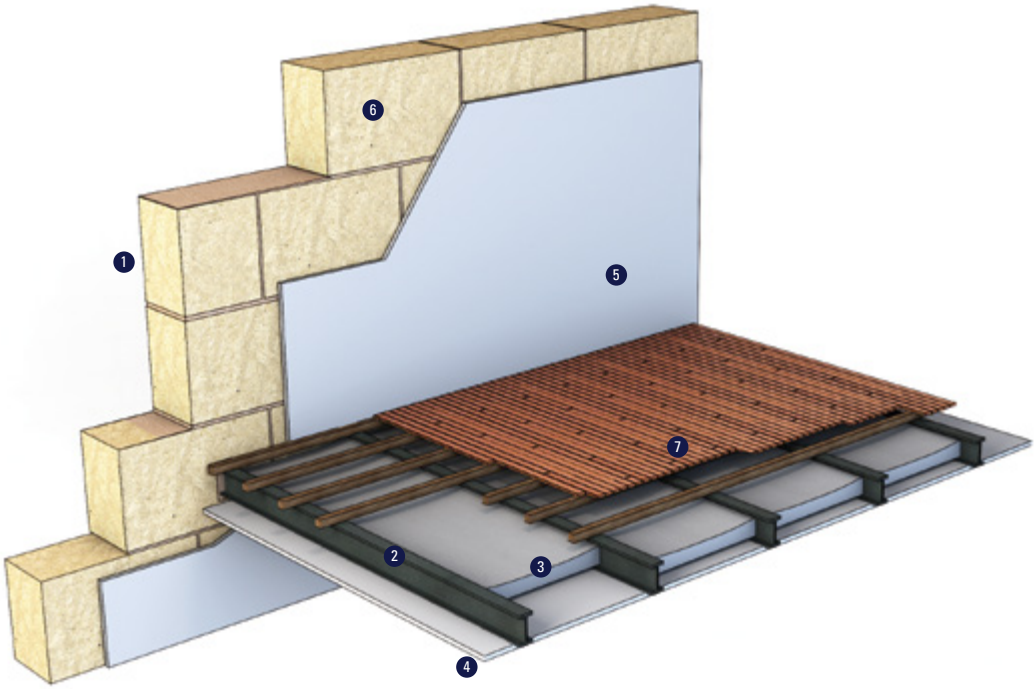
Source. D'après Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1800 et 1850 (APUR, 2010).

3.2.3.4 PIERRE DE TAILLE, PLANCHER MÉTAL ET AUGETS EN PLÂTRE

La Figure 17 présente une façade ancienne en pierre de taille, plancher métal et augets en plâtre. **Cette typologie de façade ancienne est présente à la fois à Paris et à Bordeaux**. Elle caractérise des immeubles de type haussmannien, construits entre 1850 et 1914. **Elle est identique à la typologie de façade précédente, si ce n'est que le plancher est en métal au lieu d'être en bois**.

La hauteur des poutrelles métalliques double T est fixée à 20 cm[4].

4 Traité de constructions civiles, (E. Barberot, 1912)



1. Pas d'enduit extérieur, pas de peinture hydrofuge
2. Poutre acier
3. Auget en plâtre
4. Enduit de plafond en plâtre
5. Enduit intérieur au plâtre (2 cm)
6. Pierre de taille calcaire (50 cm)
7. Parquet

FIGURE 17 **Façade ancienne en pierre de taille, plancher métal et auget en plâtre**

Source. D'après Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1850 et 1914 (APUR, 2010).

3.2.3.5 BRIQUE ANCIENNE, PLANCHER MÉTAL ET HOURDIS EN BRIQUE PERFORÉE

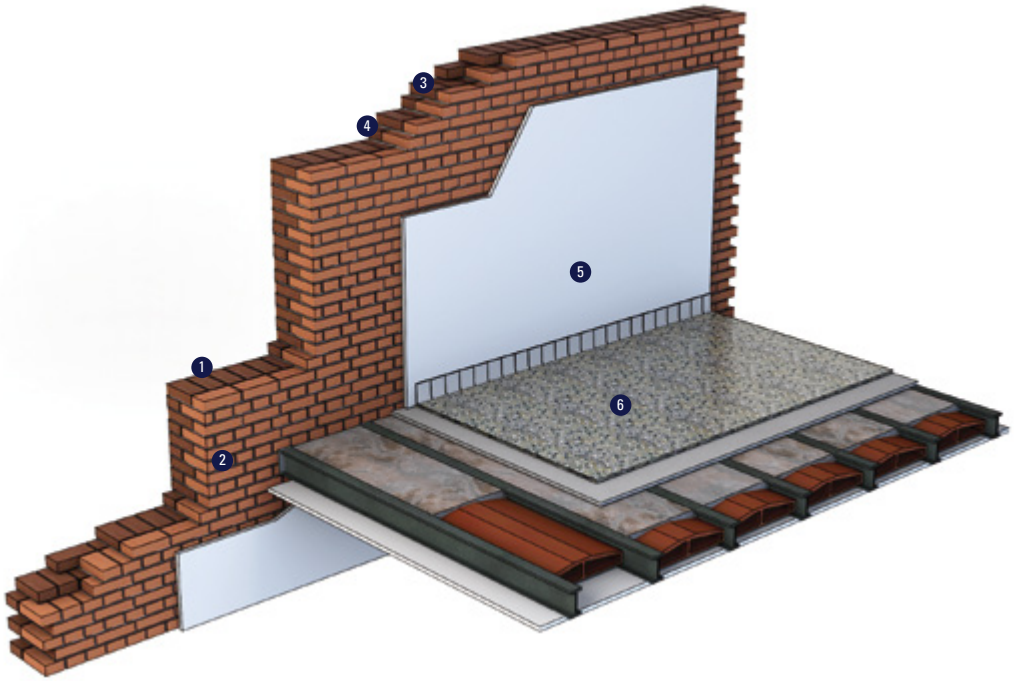
La Figure 18 présente une façade ancienne en brique ancienne, plancher métal et hourdis en brique perforée. **Cette typologie de façade ancienne a la particularité**, tout comme le pan de bois/gravats, **de n'être présente qu'à Paris**. Elle caractérise des immeubles construits entre 1918 et 1939, communément appelés immeubles Habitats Bon Marché (HBM).

La partie courante est composée de **deux types de brique rouge, celles du côté extérieur du mur étant généralement perforée et moins poreuse que celles du côté intérieur. Les briques sont hourdées au mortier bâtard**.

Les murs en brique de type HBM font généralement 33 cm d'épaisseur et sont recouverts de 2 cm d'enduit au plâtre à l'intérieur. Les dimensions d'une brique ancienne standard sont 21.5 * 11 * 5.5

Les immeubles HBM ne sont habituellement pas enduits à l'extérieur et présentent du ciment Portland sur les joints de mortier extérieurs.

Les planchers sont ici exclusivement en métal. Cependant, les techniques ayant évolué au cours des années, ils sont construits selon le principe **poutrelle-hourdis, avec un hourdis en brique perforée**, recouvert d'une dalle de compression en béton d'environ 4 cm. Le plafonnage est réalisé à l'enduit de plâtre sur lattis.



1. Brique extérieure, perforée et peu poreuse (11 à 22 cm)
2. Brique intérieure, pleine et poreuse (11 à 22 cm)
3. Mortier bâtard
4. Joint extérieurs en ciment Portland
5. Enduit intérieur au plâtre (2 cm)
6. Terrazzo

FIGURE 18 **Façade ancienne en brique ancienne, plancher métal et hourdis en brique perforée**

Source. D'après Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1800 et 1850 (APUR, 2010).

3.2.4 SYSTÈME D'ISOLATION PIV

Le système d'isolation PIV est composé des panneaux isolants sous vides, d'une isolation complémentaire pour le traitement des points singuliers, d'une membrane pare-vapeur le cas échéant et d'une plaque de plâtre.

3.2.4.1 PANNEAUX ISOLANTS SOUS-VIDE

Les caractéristiques hygrothermiques des panneaux isolants sous-vide présents dans la base de données du logiciel de simulation hygrothermique utilisé sont cohérentes avec ce que l'on retrouve dans la littérature scientifique (voir annexe 6.3), notamment l'annexe 39 du programme « Energy in Buildings and Communities Programme » de l'Agence Internationale de l'Energie[5].

Elles ont également été comparées avec celles (parcellaires) fournies pour deux références commerciales. On constate que les différences les plus significatives concernent la conductivité thermique et le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur. **La conductivité thermique est prise égale à la moyenne de celles des deux références commerciales, soit 0,0055 W/m.K**. Rappelons que la conductivité thermique d'un isolant classique se situe aux alentours de 0,04 W/m.K. Toutes les autres caractéristiques seront prises égales à celles des panneaux isolants sous-vide du logiciel de simulation thermique dynamique.

L'épaisseur retenue est celle permettant d'atteindre une résistance thermique de 4,55 m^2.K/W, soit 25 mm. Cette résistance thermique correspond à une performance BBC-compatible pour les murs d'après le Guide Bâtiment Basse Consommation en rénovation (Effinergie, 2011)[6].

5 https://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=39
6 https://www.effinergie.org/web/images/divers/guides/reno/Guide%20Renovation.pdf

CONSEILS

L'influence du percement des panneaux isolants sous-vide (et donc de la perte d'une partie de leur pouvoir isolant) ne sera pas étudiée dans cette étude. Le logiciel indique cependant qu'en cas de détérioration du panneau conduisant à la perte du vide, une conductivité thermique de 0,02 W/m.K est à prendre en compte, ce qui ramène la résistance thermique à 1,25 m^2.K/W.

3.2.4.2 ISOLATION COMPLÉMENTAIRE

Deux grands types d'isolation complémentaire sont possibles : les isolants fibreux mis en œuvre avec une membrane pare-vapeur et les isolants en plaque rigide collé. Les mises en œuvre décrites ci-dessous sont inspirées des documentations techniques des deux références commerciales :

- **Isolant fibreux non hygroscopique avec un frein-vapeur hygrovariable indépendant, Sd de 0,04 à 27 m**
  L'isolant fibreux non hygroscopique (laine minérale) est mis en œuvre avec un frein-vapeur hygrovariable disposant d'une épaisseur d'air équivalente Sd allant de 0,04 à 27 m.
  L'étanchéité à l'air au niveau de la membrane est assurée par les adhésifs et accessoires dédiés et est considérée comme « normale » (voir 3.2.6.2 pour une définition).
  Un vide technique est ménagé entre la membrane et la plaque de plâtre afin d'éviter le percement de la membrane et des panneaux isolants sous-vide. Cette dernière n'ayant pas d'incidence sur les transferts hygrothermiques, elle ne sera pas modélisée.
- **Isolant fibreux non hygroscopique avec un pare-vapeur indépendant, Sd de 18 m**.
  L'isolant fibreux non hygroscopique (laine minérale) est mis en œuvre avec un pare-vapeur disposant d'une épaisseur d'air équivalente Sd de 18 m.
  L'étanchéité à l'air au niveau de la membrane est assurée par les adhésifs et accessoires dédiés et est considérée comme « normale ».
  Un vide technique est ménagé entre la membrane et la plaque de plâtre afin d'éviter le percement de la membrane et des panneaux isolants sous-vide. Ce dernier n'ayant pas d'incidence sur les transferts hygrothermiques, il ne sera pas modélisé.
- **Isolant en plaque rigide collée**
  Aucun dispositif particulier n'est mis en œuvre pour assurer l'étanchéité à l'air de l'isolant en plaque rigide collée (polyuréthane). Cependant, elle est considérée comme « normale », ce qu'une mise en œuvre soignée permet d'atteindre.
  Des panneaux de protection sont fixés entre les isolants (panneaux isolants sous-vide et isolant en plaque rigide collée) et la plaque de plâtre. Ces derniers n'ayant pas d'incidence sur les transferts hygrothermiques, ils ne seront pas modélisés.

3.2.5 POSITION DE LA COUPE DANS LA FAÇADE

Le logiciel utilisé étant un logiciel travaillant en deux dimensions, il est nécessaire de définir la position de la coupe dans la façade en fonction des risques liés à l'humidité que l'on souhaite évaluer.
Les planchers, qu'ils soient en bois ou en métal, étant constitués de plusieurs matériaux, il nous a semblé intéressant d'étudier une coupe dans le matériau porteur (la solive en bois et la poutrelle métallique), mais également dans le matériau de remplissage (l'auget en plâtre et l'hourdis en brique perforée).

Pour cette étude, il y a donc quatre coupes possibles :

- La coupe dans une solive en bois pour le plancher bois ;
- La coupe dans un auget en plâtre pour le plancher bois ou le plancher métal ;
- La coupe dans une poutrelle métallique pour le plancher métal ;
- La coupe dans l'hourdis en brique perforée pour le plancher métal.

3.2.6 MODÉLISATION DES CAUSES DES DÉSORDRES ET DES RECOMMANDATIONS POUR LES ÉVITER

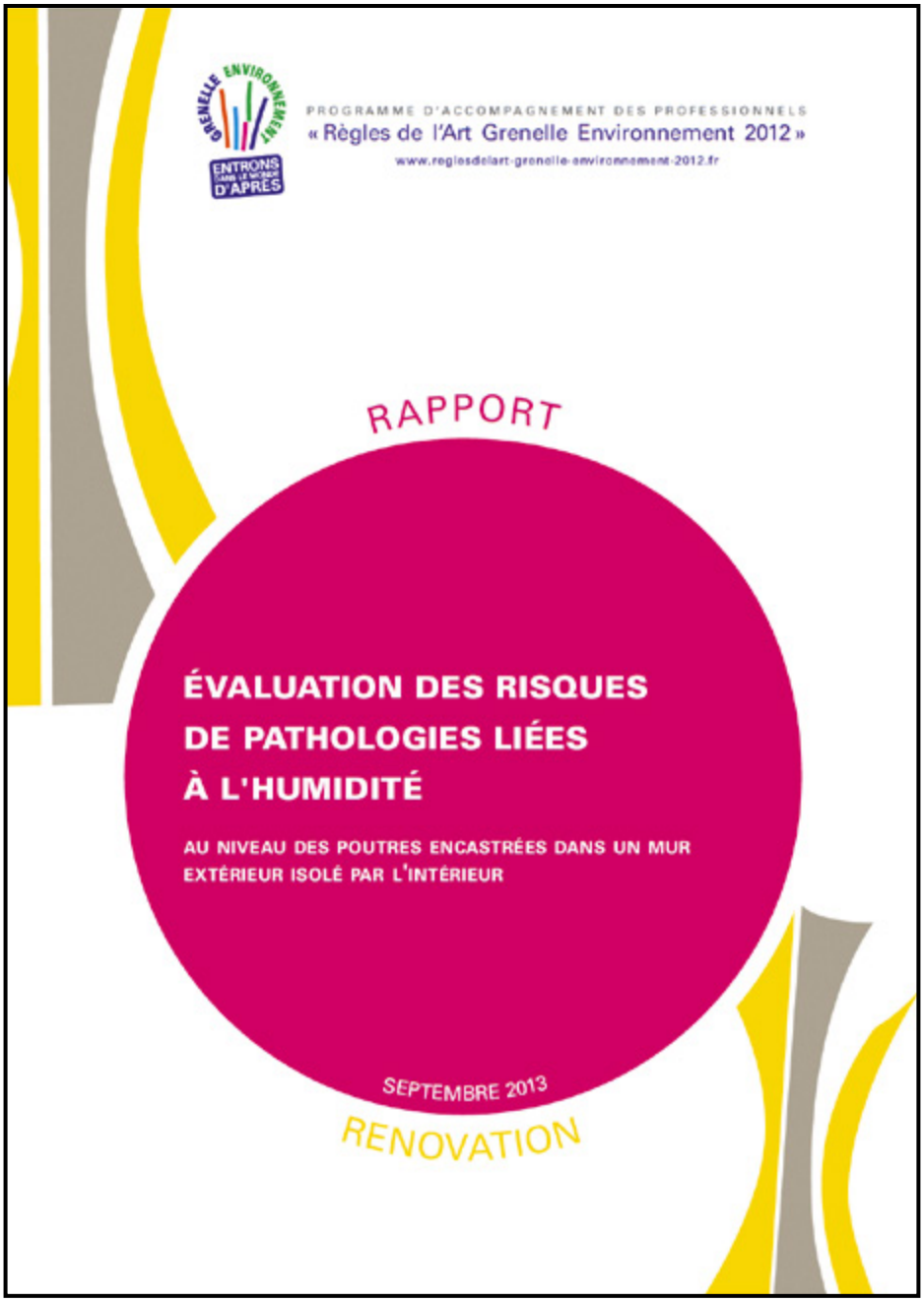
En 3.1.2, nous avons choisi d'étudier deux désordres en particulier :

- Infiltration d'eau de pluie par la paroi extérieure du mur à cause d'un enduit extérieur ou d'un mur non enduit trop capillaire.
- Condensation interne (atteinte du point de rosée) à cause d'étanchéité à l'air défaillante du système d'isolation

Pour les étudier, il est nécessaire de modéliser les causes de ces désordres et les recommandations pour les éviter.

3.2.6.1 INFILTRATION D'EAU DE PLUIE PAR LA PAROI EXTÉRIEURE DU MUR À CAUSE D'UN ENDUIT EXTÉRIEUR OU D'UN MUR NON ENDUIT TROP CAPILLAIRE

Lorsqu'un enduit extérieur ou un mur non enduit est trop capillaire, une infiltration d'eau de pluie par la paroi extérieure du mur peut survenir. Il est donc nécessaire de définir ce que « trop capillaire » veut dire. Rappelons que la grandeur associée à la capillarité des matériaux est le coefficient d'absorption capillaire A en kg/(m^2.$h^{1/2}$).



COMMENT FAIRE

Dans Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité au niveau de poutres encastrées dans un mur extérieur isolé par l'intérieur (Programme RAGE, 2013) [7], la nécessité d'un coefficient d'absorption capillaire A faible pour les parois extérieures de façades anciennes a été mise en avant.
Il s'agissait d'étudier le risque de pathologies au niveau des têtes de solives pour des façades en pierre calcaire ferme et en brique apparente isolées par l'intérieur.
Les résultats montrent qu'il est possible de mettre en œuvre une isolation par l'intérieur parfaite (R = 5 m^2.K/W) sans déclencher de pathologies au niveau des têtes de solives, à condition notamment de réduire la porosité des surfaces extérieures afin d'assurer un coefficient d'absorption capillaire A inférieur ou égal en moyenne à 0,5 kg/(m^2.$h^{1/2}$) (0,2 kg/(m^2.$h^{1/2}$) pour des façades très exposées.

Pour éviter ce désordre, une recommandation courante est donc d'appliquer une peinture hydrofuge sur la paroi extérieure. Ici aussi, il importe de définir ce que veut dire « hydrofuge » au regard du coefficient d'absorption capillaire.
Nous étudierons ainsi des configurations « sans peinture hydrofuge », où seuls les coefficients d'absorption capillaire de l'enduit extérieur ou du mur non enduit sont prises en compte et d'autres « avec peinture parfaitement hydrofuge », où le coefficient d'absorption capillaire de la paroi extérieure est celui de la peinture hydrofuge. Ces deux configurations sont définies dans le Tableau 6.

	Sans peinture hydrofuge	Avec peinture parfaitement hydrofuge
Pan de bois/ gravats et plancher bois	Le coefficient d'absorption de l'enduit extérieur à la chaux aérienne utilisé est de 3 kg/(m^2.$h^{1/2}$). Il est largement supérieur aux valeurs recommandées ci-dessus. L'enduit plâtre-chaux qu'il modélise est probablement encore plus capillaire puisqu'il contient du plâtre, lui-même plus capillaire que la chaux. On peut donc tabler sur un coefficient d'absorption réel de plus de 3 kg/(m^2.$h^{1/2}$). Or, cet enduit plâtre-chaux est généralement considéré comme une protection suffisante contre la pluie battante. Il est à noter que cet apparent paradoxe est déjà discuté dans Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien (Enertech, 2019) et montre les limites des simulations hygrothermiques dynamiques pour les bâtiments anciens.	Le rapport Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité au niveau de poutres encastrées dans un mur extérieur isolé par l'intérieur (Programme RAGE, 2013) ne présente pas clairement la manière de modéliser une peinture hydrofuge, qui ne se modélise pas directement par le coefficient d'absorption A dans le logiciel de simulation hygrothermique utilisé. Par contre, une autre référence sur le sujet des transferts d'humidité au travers de murs isolés par l'intérieur, Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines (Architecture et Climat pour le compte du Service Public de Wallonie, 2010) [8] propose de modéliser une peinture hydrofuge en considérant un coefficient d'absorption nul et une diminution de la perméabilité à la vapeur du premier centimètre de 25 %. C'est ce qui a été fait dans cette étude. Cela représente donc une situation idéale puisque l'on modélise une peinture parfaitement hydrofuge, mais qui donne un bon aperçu de la situation réelle.
Pierre de taille et plancher bois	Le coefficient d'absorption du calcaire ferme est de 0,16 kg/(m^2.$h^{1/2}$), ce qui correspond à une bonne protection pour les murs en pierre d'après les valeurs recommandées.	
Pierre de taille et plancher métal	Cependant, celui du mortier fin à la chaux est de 3 kg/(m^2.$h^{1/2}$), ce qui est par contre largement supérieur aux valeurs recommandées.	
Brique ancienne et plancher métal	Les coefficients d'absorption des briques du côté extérieur du mur et du ciment Portland présent sur les joints de mortier extérieurs valent respectivement 3,36 et 0,51 kg/(m^2.$h^{1/2}$), ce qui pour les murs en brique correspond à une protection moyenne. Cependant, ils sont généralement considérés comme une protection suffisante contre la pluie battante.	

TABLEAU 6 **Hypothèses de modélisation des configurations « sans peinture hydrofuge » et « avec peinture parfaitement hydrofuge »**

Source. Cerema.

7 https://www.programmepacte.fr/rapport-rage-evaluation-risques-pathologie-humidite-poutres-encastrees-2013-09
8 https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide_isolin_oct2010_web.pdf?ID=16005

3.2.6.2 CONDENSATION INTERNE (ATTEINTE DU POINT DE ROSÉE) À CAUSE D'UNE ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DÉFAILLANTE DU SYSTÈME D'ISOLATION

Lorsque l'étanchéité à l'air du système d'isolation est défaillante, il y a un risque de condensation interne (atteinte du point de rosée). Il est donc nécessaire de définir ce que « défaillante » veut dire. Rappelons que la grandeur permettant d'évaluer l'étanchéité à l'air d'un local est en France le débit de fuite sous 4 Pa $Q_{4\,Pa,surf}$.

WTA

Simulation of Heat and Moisture Transfer

Guideline 6-2
Edition: 12.2014/E

Simulation du transfert de chaleur et d'humidité

Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse

Key Words

hygrothermal simulation, moisture transport calculation, material properties, outdoor climate, indoor climate, condensation, drying, construction moisture

Mots-Clés

simulation hygrothermique, calcul du transport d'humidité, caractéristiques des matériaux, climat extérieur, climat intérieur, point de rosée, condensation estivale, séchage, humidité des matériaux

Deskriptoren

hygrothermische Simulation, Feuchtetransportberechnung, Materialkennwerte, Außenklima, Raumklima, Tauwasser, Sommerkondensation, Austrocknung, Baufeuchte

Notes on the Guideline

This Guideline lays down the non steady simulation of heat and moisture transport processes in multi-layer building components exposed to natural climate conditions.

Additionally to be taken into account are the following WTA Guidelines in their respective latest German version:

6-1 "Guideline for Hygrothermal Simulation Calculations"
6-3 "Computational Prognosis of Mould Risk"
6-4 "Internal Insulation in Compliance with WTA I: Planning Guide"
6-5 "Internal Insulation in Compliance with WTA II: Verification of Internal Insulation Systems by Means of Numerical Calculation Methods"
6-8 "Assessment of humidity in timer constructions – simplified verifications and simulation"

Contents

		Page
1	Content and Objective	5
1.1	Objective	5
1.2	Possibilities and Limits	5
1.3	Outlook	6
2	Physical fundamentals	6
2.1	Balance equations	6
2.2	Transport equations	8
3	Material parameters	11
3.1	Basic parameters	11
3.2	Material-related model boundaries	15
4	Boundary and initial conditions	16
4.1	External climate	16
4.2	Internal climate	17
4.3	Heat and moisture transmission on the building component boundaries	18
4.4	Initial conditions	18
5	Auxiliary models for the simplified inclusion of special effects	19
5.1	Rear ventilation and venting of building components	19
5.2	Condensation caused by air flow through building components	19
5.3	Wind driven rain penetration	20
6	Numeric simulation	21
6.1	Fundamentals of the numeric solution	21
6.2	Controlling and limiting numeric errors	22
6.3	Verification of the calculation soft-ware	23
6.4	Model generation simplifications	24
7	Assessment of the calculation results	24
8	Documentation of numeric simulation calculations	25
8.1	Description of the problem addressed	25
8.2	Description of the utilised calculation tool	25
8.3	Typical summary of the results	25
9	References	26

© Copyright by Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.
Vertrieb: WTA Publications, Tel. +49-89-578 697 27, Fax +49-89-578 697 29, email: wta@wta.de

Fraunhofer IRB Verlag

COMMENT FAIRE

Le guide de référence 6-2 Simulation of heat and moisture transfer (WTA, 2014) [9] a été édité par une association internationale pour la science et la technologie de la maintenance des bâtiments et la préservation du patrimoine, composé des plus grands spécialistes, notamment allemands, sur le sujet. Il détaille la manière de prendre en compte certains phénomènes dans les modélisations hygrothermiques dynamiques.
Il y est conseillé de prendre en compte dans ces dernières une étanchéité à l'air dite « normale » du système d'isolation. Cela équivaut dans notre cas et pour l'ensemble du local étudié à un débit de fuite $Q_{4\ Pa,surf}$ de 1 $m^3/(h.m^2)$, ce qui correspond au débit de fuite exigible pour le logement collectif en neuf. Rappelons qu'en France, la réglementation thermique des bâtiments existants ne définit pas d'objectif en termes de $Q_{4\ Pa,surf}$.

Pour éviter ce désordre, une étanchéité à l'air « normale » est souvent suffisante. Ici aussi, il importe de définir ce que « normale » veut dire en terme de débit de fuite sous 4 Pa.

Nous étudierons ainsi des configurations où l'étanchéité à l'air du système d'isolation est « normale », mais aussi parfaite. Ces deux configurations sont définies dans le Tableau 7.

	Etanchéité à l'air « normale » du système d'isolation	Etanchéité à l'air parfaite du système d'isolation
Pan de bois/gravats et plancher bois	L'étanchéité à l'air dite « normale » du système d'isolation est modélisée selon la méthode décrite dans le guide de référence 6-2 Simulation of heat and moisture transfer (WTA, 2014). Il s'agit de calculer la quantité d'eau de condensation susceptible de se former à l'interface entre le mur et les isolants et de l'intégrer à un endroit du mur. Dans notre cas, celle-ci sera intégrée à l'enduit intérieur au plâtre, puisqu'il s'agit du matériau du mur en contact avec l'isolant.	Dans cette étude, nous modélisons une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation par l'absence de source d'humidité additionnelle. Cela revient à négliger les transferts d'air au sein de la façade, c'est-à-dire considérer un débit de fuite $Q_{4\ Pa,surf}$ nul. Même si cette hypothèse semble peu réaliste, elle est cependant très fréquente dans les simulations hygrothermiques dynamiques : c'est par exemple l'hypothèse qui est faite dans Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité au niveau de poutres encastrées dans un mur extérieur isolé par l'intérieur (Programme RAGE, 2013).
Pierre de taille et plancher bois		
Pierre de taille et plancher métal		
Brique ancienne et plancher métal		

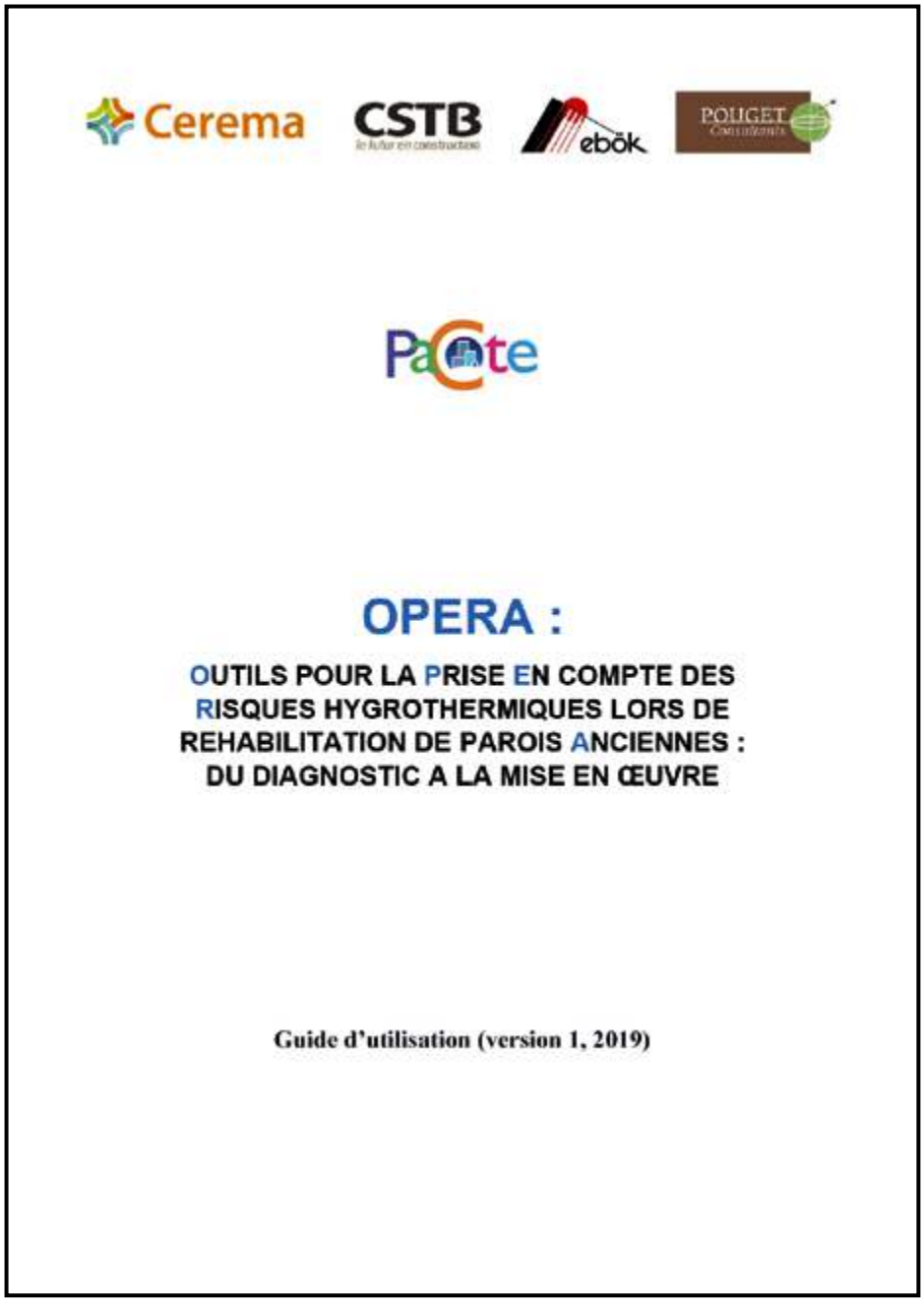
TABLEAU 7 **Hypothèses de modélisation des configurations « étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation » et « étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation »**

Source. Cerema.

9 https://www.wta-international.org/en/service/wta-recommendations/

3.3 DÉFINITION DES INDICATEURS DE RISQUES

Afin de traduire les résultats des simulations hygrothermiques dynamiques, il est nécessaire de caractériser le niveau de risques identifiés en 3.1.1. Pour ce faire, des indicateurs de risque ont été définis. Ils s'inspirent de ceux définis dans le projet OPERA (2018)[10].



10 http://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/fr/espace-documentaire/outils-opera

COMMENT FAIRE

Le projet OPERA («Outils pour la prise en compte des risques hygrothermiques lors de réhabilitation de parois anciennes») se déclinent en trois outils :
- un outil d'aide au diagnostic, qui permet au professionnel, lors de la visite initiale du bâtiment ancien, de réaliser un diagnostic hygrothermique global à partir d'une grille d'inspection visuelle.
- un outil d'aide à la conception, qui permet au professionnel d'évaluer différentes solutions d'isolation par l'intérieur au regard des risques hygrothermiques.
- un outil d'aide à la mise en œuvre, qui rappelle les techniques de pose et les précautions de mises en œuvre associées aux différentes solutions d'isolation par l'intérieur sélectionnées.

Ces outils sont d'une prise en main facile, mais il est conseillé de lire le guide d'utilisation pour bien comprendre leurs fonctionnements respectifs.

Les indicateurs de risque caractérisent chacun un risque causé par un désordre lié à l'humidité et sont présentés dans la **FIGURE 19**. Ils sont mesurés en certains points d'observation, pour des grandeurs données et des conditions définissant le niveau de risque. Chacun de ces risques est évalué par simulation sur une période de 10 ans.

Pour les rendre encore plus facilement compréhensibles, des exemples de conséquences finales, si les conditions des indicateurs ne sont pas respectées, sont présentées dans le Tableau 8.

	Type de risque	Grandeurs et points d'observation	Conditions	Exemple de conséquence finale si la condition n'est pas respectée
Indicateur A	Risque général en partie courante du mur ancien (A1) et au droit du plancher (A2)	> Teneur en eau et humidité relative en partie courante du mur ancien (A1) > Teneur en eau et humidité relative au droit du plancher (A2)	> L'augmentation de la teneur en eau ne doit pas dépasser 2 % pendant la dernière année de simulation. > L'humidité relative ne doit pas être dépasser 95 % pendant 24 h.	Au bout de quelques mois, en façade, on constate que les briques sont plus foncées et se désagrègent, notamment au droit des planchers car elles ont été soumises à une humidité prolongée qu'elles n'ont pas été faites pour supporter. Pour régler ce problème, il faut en trouver la cause et la régler, assécher les murs et mettre en place un échafaudage pour remplacer les briques endommagées car elles compromettent l'étanchéité à l'eau de la façade.
Indicateur B	Risque thermique dans les isolants	> Humidité relative dans les isolants	> L'humidité relative ne doit pas dépasser 99 % pendant toute la durée de la simulation.	Au bout de quelques années, on se rend compte que les gains énergétiques obtenus sont plus faibles que ceux attendus. L'une des raisons peut être que la laine minérale est moins isolante que prévu, car elle est humide et qu'un isolant humide perd une partie de son pouvoir isolant. Pour régler ce problème, il faut en trouver la cause et la régler et trouver un moyen d'assécher la laine minérale ou la remplacer, ou alors accepter un gain énergétique plus faible que prévu.
Indicateur C	Risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre (Cp) ou à l'interface entre le mur ancien et les isolants (Ci)	> Humidité relative et température dans la première maille de l'enduit intérieur au plâtre, côté isolant (Cp) > Humidité relative dans la première maille des isolants, côté enduit intérieur au plâtre (Ci) > Humidité relative dans la première maille des isolants, côté membrane pare-vapeur ou ambiance intérieure (Ci)	> L'humidité relative ne doit pas dépasser 0,033 T^2 – 1,5 T + 96 pendant 8 semaines par an, avec a minima 1 semaine en continu (Cp). > L'humidité relative ne doit pas dépasser 98 % sur une durée supérieure à 6 h (Ci).	Au bout de quelques années, les habitants développent des soucis de santé liés à la prolifération de moisissures dans leur logement. Un examen minutieux conduit à arracher l'isolation intérieure et révèle qu'en plus des papiers peints, l'interface entre le mur et l'isolation est couverte de moisissures. Pour régler ce problème, il faut en trouver la cause et la régler, assainir la paroi et mettre en œuvre une nouvelle isolation.
Indicateur D	Risque mécanique sur la façade extérieure	> Humidité relative dans la première maille de la façade extérieure > Température dans la première maille de la façade extérieure	> L'humidité relative ne doit pas dépasser 98 % lorsque la température est négative.	Au premier hiver, l'enduit extérieur présente des fissures en façade, voire tombe par plaque en contrebas. Pour régler ce problème, il faut en trouver la cause et la régler et mettre en place un échafaudage pour refaire l'enduit extérieur endommagé car il compromet l'étanchéité à l'eau de la façade.
Indicateur E	Risque structurel pour les éléments porteurs du plancher	> Teneur en eau dans la première maille reposant sur le mur de l'élément porteur du plancher partie	> La teneur en eau en masse de la solive en bois ne doit pas dépasser 20 % pendant plus de 8 semaines la dernière année de simulation. > L'humidité relative doit être inférieure à 80 % à la surface de la poutrelle métallique.	Au bout de quelques années, à l'occasion de la pose d'un nouveau parquet, le dépose des lames de l'ancien parquet révèle des solives en bois dont les têtes enfoncées dans le mur sont plus foncées et pourries par endroits. Pour régler ce problème, il faut en trouver la cause et la régler, en évaluer la gravité et le cas échéant, prévoir le remplacement des têtes de poutres ou leur consolidation.

TABLEAU 8 **Liste des indicateurs de risque utilisés dans cette étude**

Source. Cerema.

1. Enduit extérieur (2 cm)
2. Mur ancien
3. Enduit intérieur en plâtre (3 cm)
4. Plaque de plâtre
5. Membrane pare-vapeur
6. Panneau isolant sous-vide (2,5 cm)
7. Isolation complémentaire (2,5 cm)
8. Vide technique

(A1) Risque général en partie courante du mur ancien.

(A2) Risque général au droit du plancher .

(B) Risque thermique dans les isolants.

(Cp) Risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre.

(Ci) Risque fongique à l'interface entre le mur ancien et les isolants.

(D) Risque mécanique sur la façade extérieure.

(E) Risque structurel pour les éléments porteurs du plancher.

FIGURE 19 Schémas des indicateurs de risque utilisés dans cette étude

Source. Cerema

3 4 RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS PARTICULIERES

Cette étude a été rédigée dans un but opérationnel. Aussi les résultats et recommandations particulières sont-ils présentés par façade ancienne, mais aussi par localisation, sachant que les résultats pour Paris n'intéresse pas forcément un professionnel travaillant à Bordeaux, ce qui explique une certaine redondance entre les parties.

3.4.1 RAPPEL DES CONFIGURATIONS ÉTUDIÉES

Le Tableau 9 présente la synthèse de tous les paramètres pris en compte par les différentes configurations étudiées.

	Localisation, orientation	Climat intérieur	Système d'isolation	Position de la coupe dans la façade	Infiltration d'eau de pluie par la paroi extérieure du mur	Condensation interne (atteinte du point de rosée)
Pan de bois/ gravats et plancher bois	> Paris, orientations nord et la plus exposée à la pluie battante	> Local correctement chauffé et ventilé, sans sur-occupation	> Panneaux isolants sous-vide de 25 mm et isolant complémentaire en laine minérale et frein-vapeur hygrovariable indépendant > Panneaux isolants sous-vide de 25 mm et isolant complémentaire en laine minérale et pare-vapeur indépendant avec un Sd de 18 m > Panneaux isolants sous-vide de 25 mm et isolant complémentaire en polyuréthane	> Solive en bois > Auget en plâtre	> Sans peinture hydrofuge > Avec peinture parfaitement hydrofuge	> Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV
Pierre de taille et plancher bois	> Paris, orientations nord et la plus exposée à la pluie battante > Bordeaux, orientation nord					
Pierre de taille et plancher métal	> Paris, orientations nord et la plus exposée à la pluie battante > Bordeaux, orientation nord			> Poutrelle métallique > Auget en plâtre		
Brique ancienne et plancher métal	> Paris, orientations nord et la plus exposée à la pluie battante			> Poutrelle métallique > Hourdis en brique perforée		

TABLEAU 9 **Synthèse de tous paramètres pris en compte par les différentes configurations étudiées.**

Source. Cerema.

3.4.2 PAN DE BOIS/GRAVATS, PLANCHER BOIS ET AUGETS EN PLÂTRE À PARIS

3.4.2.1 RESULTATS

	A1 (risque général en partie courante du mur ancien)	A2 (risque général au droit du plancher)	B (risque thermique dans les isolants)	Cp (risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre)	Ci (risque fongique à l'interface entre le mur ancien et les isolants)	D (risque mécanique sur la façade extérieure)	E (risque structurel pour les solives en bois)
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Proche d'être faible pour toutes les configurations	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV				Faible pour toutes les configurations.			
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV							
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV							

TABLEAU 10 **Résultats pour la façade ancienne en pan de bois/gravats, plancher bois et augets en plâtre à Paris**

Source. Cerema.

3.4.2.2 ANALYSE

Sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, :

- Toutes les configurations présentent des risques faibles, sauf pour le risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre, qui est moyen, mais proche d'être faible.

Sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, :

- Toutes les configurations présentent des risques faibles.

Avec peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, :

- Toutes les configurations présentent des risques faibles.

Avec peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, :

- Toutes les configurations présentent des risques faibles.

3.4.2.3 CONCLUSIONS

La mise en œuvre d'un système d'isolation PIV sur une façade en pan de bois/gravats et plancher bois à Paris ne semble pas présenter de risques particuliers.

CONSEILS

Notons ici que l'on parle bien d'un remplissage en gravats, et non en brique et encore moins en torchis, remplissages qui auraient pu conduire à des résultats bien différents. Rappelons également que l'enduit extérieur a été modélisé avec un enduit à la chaux et non un enduit chaux-plâtre, ce qui entraîne des résultats un peu plus favorables.

Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que ce mur dispose d'une capacité de séchage importante vers l'extérieur, car il est peu épais et plus perméable à la vapeur que le système d'isolation PIV. Ce qui permet à l'air humide emprisonné entre le mur et le système d'isolation PIV de s'échapper vers l'extérieur.

L'application d'une peinture parfaitement hydrofuge ne semble donc pas nécessaire. Une mise en œuvre « normale » de l'étanchéité à l'air semble suffisante. Tout type d'isolation complémentaire convient et le cas échéant, tout type de membrane pare-vapeur convient également.

CONSEILS

En pratique et particulièrement en rénovation, il est parfois difficile d'arriver à une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation, c'est-à-dire à un débit de fuite $Q_{4\,Pa,surf}$ de 1 $m^3/(h.m^2)$. En effet, la notion d'étanchéité à l'air est moins familière des professionnels de la rénovation que des professionnels de la construction neuve. Mais il est aussi techniquement plus difficile de garantir une bonne étanchéité à l'air autour d'éléments pour lesquels l'étanchéité à l'air n'a pas été prise en compte dès la conception, comme un plancher ou des fenêtres existantes. Par conséquent, les résultats obtenus dans cette étude sont bien plus cléments que dans la réalité, où l'étanchéité à l'air du système d'isolation est souvent défaillante.

3.4.2.4 RECOMMANDATIONS PARTICULIÈRES

L'entretien et le ravalement réguliers de l'enduit extérieur est primordial pour qu'il assure son rôle de protection contre la pluie battante et l'origine des fissures et décollements doit être identifiées (mauvais dosage de l'un des constituants, matériau inadapté, épaisseur insuffisante, passes insuffisantes, etc.) avant que ces derniers puissent être réparés. Notons également à ce propos la notion « d'enduit sacrificiel » dans le bâti ancien : la fonction de l'enduit extérieur, ou du moins de sa couche externe, est de se sacrifier pour assurer la protection de la façade ancienne contre la pluie battante. Devoir l'entretenir et le ravaler régulièrement est donc une opération de maintenance courante et normale et ne devrait donc pas être déclenchée par l'apparition de désordres, c'est-à-dire lorsqu'il est trop tard.

Enfin, toute modification de l'enduit extérieur peut modifier les résultats. On peut en effet imaginer qu'au cours d'un ravalement de façade, l'enduit chaux-plâtre soit remplacé par un enduit ciment, beaucoup moins capillaire et moins perméable à la vapeur. S'en suit une capacité de séchage vers l'extérieur amoindrie.

CONSEILS

Par rapport aux résultats des façades en pierre de taille, ceux des façades en pan de bois/gravats et en brique ancienne de type HBM semblent particulièrement cléments et les écarts sont grands. Les causes de ces écarts sont à rechercher à la fois dans la composition des murs que dans la modélisation de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV.
En ce qui concerne la composition des murs, le mur en pierre est plus sensible que les deux autres murs aux infiltrations d'eau de pluie par la paroi extérieure du mur. En effet, :

- Le mur en pan de bois est enduit, ce qui le protège de la pluie battante.
- Le mur en brique n'est pas enduit mais ses joints au mortier bâtard sont protégés par du ciment Portland et les briques extérieures qui le compose sont peu capillaires.
- Le mur en pierre de taille n'est pas enduit et ses joints au mortier de chaux ne sont pas protégés de la pluie battante.

D'autre part, la modélisation de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV fait que la quantité d'eau de condensation susceptible de se former à l'interface entre le mur et l'isolant n'est pas la même d'un mur à l'autre. En effet, cette quantité d'eau est quasiment quatre fois plus élevée pour le mur en pierre de taille que pour le mur en pan de bois. Ceci s'explique par le fait que le mur en pan de bois est peu épais et plus perméable à la vapeur que le mur en pierre : il est donc moins susceptible de faire condenser l'air humide provenant de l'intérieur du local et introduit dans ou entre les éléments du système d'isolation PIV par une étanchéité à l'air défaillante. La même chose est vrai pour le mur en brique, dans une moindre mesure cependant.

3.4.3 PIERRE DE TAILLE, PLANCHER BOIS ET AUGETS EN PLÂTRE À PARIS

3.4.3.1 RÉSULTATS

	A1 (risque général en partie courante du mur ancien)	A2 (risque général au droit du plancher)	B (risque thermique dans les isolants)	Cp (risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre)	Ci (risque fongique à l'interface entre le mur ancien et les isolants)	D (risque mécanique sur la façade extérieure)	E (risque structurel pour les éléments porteurs du plancher)
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Moyen pour une seule configuration (avec l'isolant complémentaire en polyuréthane, pour l'orientation nord et au-dessus des solives en bois), mais faible pour toutes les autres.	Faible au droit des solives en bois, mais moyen au droit des augets en plâtre (mais proche d'être faible).	Faible pour toutes les configurations.	Systématiquement élevé, surtout pour l'orientation nord et au-dessus des solives en bois	Elevé pour toutes les configurations, sauf au-dessus des augets en plâtre avec l'isolant complémentaire en laine minérale, où il est moyen.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé.
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible au droit des solives en bois, mais moyen au droit des augets en plâtre (mais proche d'être faible).	Faible pour toutes les configurations.	Très fortement réduit pour toutes les configurations et devient moyen (mais proche d'être faible).	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, sauf pour l'orientation la plus soumise à la pluie battante, où il est faible. Mais très fortement réduit.
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Systématiquement élevé, surtout pour l'orientation nord et au-dessus des solives en bois	Elevé pour toutes les configurations, sauf au-dessus des augets en plâtre avec l'isolant complémentaire en laine minérale, où il est moyen.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, sauf pour l'orientation la plus soumise à la pluie battante, où il est faible. Mais fortement réduit.
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Très fortement réduit pour toutes les configurations et devient moyen (mais proche d'être faible).	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.

TABLEAU 11 **Résultats pour la façade ancienne en pierre de taille, plancher bois et augets en plâtre à Paris**

Source. Cerema.

3.4.3.2 ANALYSE

Sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, :

- La configuration la plus défavorable est celle avec l'isolant complémentaire en polyuréthane, pour l'orientation nord et au-dessus des solives en bois. Le risque général y est plutôt moyen, mais le risque fongique et le risque structurel y sont élevés. Il y a plusieurs raisons à cela :
  - L'orientation nord est la plus froide et donc la plus susceptible de faire condenser l'air humide provenant de l'intérieur du local et introduit dans ou entre les éléments du système d'isolation PIV par une étanchéité à l'air « normale ». D'autre part, à Paris, l'analyse des données climatiques a montré que la quantité de pluie battante qui atteint la façade extérieure est faible (par rapport à Bordeaux par exemple), même pour l'orientation la plus exposée à la pluie battante. Tout ceci fait que l'orientation nord est plus risquée que celle la plus exposée à la pluie battante.
  - Le polyuréthane est l'isolant complémentaire le moins perméable à la vapeur : une fois que l'air humide est introduit dans ou entre les éléments du système d'isolation PIV par une étanchéité à l'air « normale », il n'a plus la capacité de sécher vers l'intérieur du local.
  - Les augets en plâtre ont la capacité de répartir une partie de l'humidité en excès en leur sein, grâce aux propriétés hygroscopiques et capillaires du plâtre. Le risque général au droit de ces derniers est donc plus élevé qu'au droit des solives en bois mais en contrepartie, ils atténuent le risque général en partie courante et le risque fongique à l'interface entre le mur ancien et les isolants. Ce phénomène n'est pas possible avec les solives en bois, qui sont peu hygroscopiques et peu capillaires longitudinalement (c'est-à-dire perpendiculairement au sens des fibres du bois).
- Il existe un risque structurel élevé au niveau des planchers en bois.

Sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, :

- Le risque général en partie courante s'affaiblit par rapport aux configurations avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.
- Les risques fongiques dans l'enduit intérieur au plâtre et à l'interface entre le mur ancien et les isolants s'affaiblissent très fortement par rapport aux configurations avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV. En effet, avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, il y a peu de risque de condensation interne et donc peu de risque de développement de moisissures à l'intérieur du mur.
- Le risque structurel reste élevé, mais s'affaiblit très fortement par rapport aux configurations avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.

Avec peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, :

- Le risque général en partie courante et au droit du plancher devient faible par rapport aux configurations sans peinture hydrofuge. Ceci s'explique par le fait que la peinture parfaitement hydrofuge protège la façade ancienne de la pluie battante et empêche donc cette dernière de faire augmenter la teneur en eau à l'intérieur de la façade.
- Les risques fongiques dans l'enduit intérieur au plâtre et à l'interface entre le mur ancien et les isolants sont quasiment identiques aux configurations sans peinture hydrofuge. C'est assez compréhensible puisque la peinture parfaitement hydrofuge a surtout une influence sur la moitié extérieure de la façade ancienne.
- Le risque structurel reste élevé. Il s'affaiblit fortement par rapport aux configurations sans peinture hydrofuge mais reste cependant plus élevé que pour les configurations avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV. L'application d'une peinture parfaitement hydrofuge a donc une influence particulièrement positive sur ce risque.

Avec peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, :

- Quelle que soit la configuration, le seul risque qui subsiste est le risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre. De plus, ce risque moyen est très proche d'être faible.

3.4.3.3 CONCLUSION

La mise en œuvre d'un système d'isolation PIV sur une façade en pierre de taille et plancher bois à Paris présente des risques importants sans application d'une peinture hydrofuge et avec une mise en œuvre de l'étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.

L'intérêt principal de l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge est qu'elle diminue fortement le risque structurel. Elle affaiblit également le risque général : elle protège donc le côté extérieur de la façade ancienne.

L'intérêt principal d'une mise en œuvre parfaite de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV est une réduction très forte du risque fongique, mais aussi du risque structurel : elle protège donc le côté intérieur de la façade ancienne.

Selon les configurations, l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge et/ou une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV diminuent très fortement les risques. Tant que les risques liés à l'humidité ne sont pas

limités par l'une, l'autre ou ces deux solutions, le choix de l'isolant complémentaire et de la membrane pare-vapeur et l'orientation n'ont quasiment aucune influence sur les résultats et la façade est exposée à de nombreux risques.

Enfin, rappelons qu'il est sous-entendu que cette peinture parfaitement hydrofuge soit également perméable à la vapeur, afin de ne pas mettre en péril la capacité de séchage du mur vers l'extérieur.

CONSEILS

En pratique et particulièrement en rénovation, il est parfois difficile d'arriver à une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation, c'est-à-dire à un débit de fuite $Q_{4\ Pa,surf}$ de 1 $m^3/(h.m^2)$. En effet, la notion d'étanchéité à l'air est moins familière des professionnels de la rénovation que des professionnels de la construction neuve. Mais il est aussi techniquement plus difficile de garantir une bonne étanchéité à l'air autour d'éléments pour lesquels l'étanchéité à l'air n'a pas été prise en compte dès la conception, comme un plancher ou des fenêtres existantes. Par conséquent, les résultats obtenus dans cette étude sont bien plus cléments que dans la réalité, où l'étanchéité à l'air du système d'isolation est souvent défaillante.

3.4.3.4 QUELQUES SIMULATIONS COMPLÉMENTAIRES

Ces simulations complémentaires ont été réalisées pour la configuration la plus défavorable (isolant complémentaire en polyuréthane, pour l'orientation nord et au-dessus des solives en bois) et la configuration la plus défavorable (sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation). Elles répondent à plusieurs questions soulevées par ces résultats.

ET SI L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DU SYSTÈME ISOLANT DU LOCAL DU DESSOUS AVAIT ÉTÉ PARFAITE ?

Cette étude introduit un biais concernant la qualité de l'étanchéité à l'air du système d'isolation du local du dessous, qui est un paramètre quasiment invérifiable en pratique.

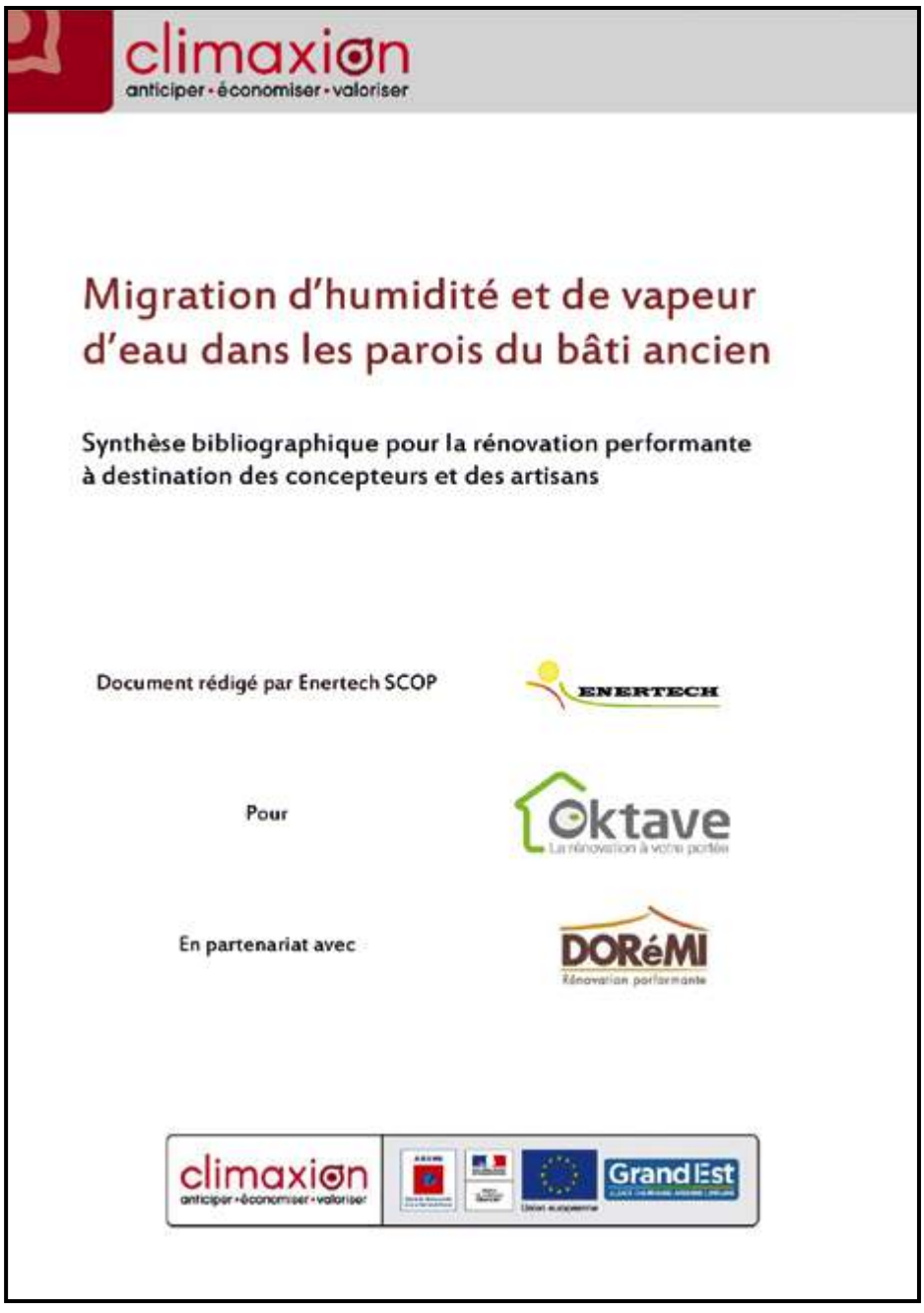
Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation du local du dessous, seul le risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre est moyen. Le risque structurel passe d'élevé à faible par rapport à la configuration où l'étanchéité est seulement « normale ». Cela signifie que, quelle que soit la qualité de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV pour le local étudié, celle du local du dessous a une influence non négligeable sur le risque structurel.

A noter que même dans cette configuration idéale (étanchéité à l'air parfaite de tous les systèmes d'isolation), un risque fongique subsiste. Il pourrait cependant être facilement affaibli par l'application d'un enduit hydrofuge.

ET SI L'ENDUIT INTÉRIEUR AU PLÂTRE AVAIT ÉTÉ PIQUÉ AVANT LA MISE EN ŒUVRE DU SYSTÈME D'ISOLATION PIV?

Etant donné que le risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre est élevé, on pourrait envisager de piquer cet enduit afin d'éviter la prolifération de moisissures.

Cependant, en plaçant le système d'isolation PIV directement en contact avec le mur en pierre, les simulations ont montré un risque général et un risque structurel élevés, alors qu'ils étaient moyens à faibles dans toutes les configurations précédentes. Ce résultat est cohérent avec la notion d'enduit de redistribution, développée dans Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien (Enertech, 2019).


climaxion
anticiper • économiser • valoriser
Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien
Synthèse bibliographique pour la rénovation performante à destination des concepteurs et des artisans
Document rédigé par Enertech SCOP
ENERTECH
Pour
Oktave
La rénovation à votre portée
En partenariat avec
DORéMI
Rénovation performante
climaxion
anticiper • économiser • valoriser
Grand Est

COMMENT FAIRE

Dans Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien (Enertech, 2019)[11], l'isolation par l'intérieur d'un mur ancien en pierre fermée à la vapeur a notamment été étudiée par simulation hygrothermique dynamique.
Une humidité très importante a été observée dans l'isolant lorsque celui-ci est placé directement en contact avec le mur. Deux solutions ont donc été proposées :
– La première consiste à ménager une lame d'air ventilée vers l'extérieur entre l'isolant et le mur afin d'évacuer l'humidité excessive. Cette solution est difficile à mettre en œuvre en pratique, qui plus est lorsque l'on travaille à l'échelle d'un immeuble.
– La seconde consiste à interposer entre l'isolant et le mur un enduit dit de « redistribution », dont l'objectif est d'accumuler de l'eau liquide au niveau du mur où se produit de la condensation superficielle et de redistribuer cette eau. Des enduits à la chaux ou à l'argile ont été choisis pour leurs bonnes capacités d'accumulation et de redistribution.
Pour cette seconde solution, les simulations montrent que la teneur en eau et l'humidité relative dans l'isolant sont réduites et lissées par rapport à la situation de départ.
Les auteurs concluent donc sur l'efficacité d'un tel enduit pour limiter l'humidité dans l'isolant.

On se situe donc devant un dilemme, puisque les deux solutions (piquer l'enduit intérieur plâtre ou le laisser en place) présentent des risques élevés.
Des considérations pratiques incitent cependant à le laisser en place. En effet, :

- L'enduit intérieur est parfois encore en excellent état. Un ponçage minutieux en fait une surface propre et plane tout à fait adaptée à la fixation des panneaux.
- En cas de piquage de l'enduit, la surface du mur risque de ne pas être plane, simplement du fait de la nature du mur (alternance de brique et de mortier), mais également du fait du piquage qui ne laisse pas une surface plane. Les cavités créées sur cette surface sont autant d'endroits où l'humidité peut s'accumuler si l'étanchéité à l'air du système d'isolation est défaillant.
- La poussière générée par le piquage de l'enduit, ainsi que le temps passé et la main d'œuvre demandés par ce genre d'opérations viennent annuler une partie des bénéfices liés à l'utilisation des panneaux isolants sous-vide (rapidité et facilité de mise en œuvre grâce au calepinage, chantier propre en site occupé, etc.).

ET SI UN SYSTÈME D'ISOLATION PLUS CLASSIQUE AVAIT ÉTÉ MISE EN ŒUVRE À LA PLACE DU SYSTÈME D'ISOLATION PIV ?

Les différents risques mis en lumière dans les paragraphes précédents pourraient faire croire que le système d'isolation PIV est un mauvais choix d'isolant. C'est pourquoi deux simulations ont été réalisées avec un système d'isolation plus classique, à savoir de la laine minérale et un frein-vapeur à Sd variable. Des épaisseurs de 2,5 cm (épaisseur des panneaux isolants sous-vides) et de 15 cm (épaisseur plus réaliste) ont été testées.
Pour l'épaisseur de 2,5 cm, le risque général disparaît et les risques fongiques diminuent très fortement, tout en restant élevé pour l'enduit intérieur au plâtre et en passant à moyen pour l'isolant. Ceci s'explique par la très faible épaisseur de la laine minérale, très perméable à la vapeur et à la présence d'un frein-vapeur hygrovariable, qui, quand les conditions le permettent, laisse sécher l'air humide vers l'intérieur. Le risque structurel n'est que peu diminué.
Pour l'épaisseur de 15 cm, le risque général disparaît et les risques fongiques diminuent, tout en restant proche des valeurs du système d'isolation PIV. Ici, l'épaisseur est beaucoup plus grande mais le séchage vers l'intérieur est favorisé par la présence d'un frein-vapeur hygrovariable.
Pourtant, il n'est pas suffisant pour affaiblir très fortement les risques fongiques. Le risque structurel est quant à lui diminué, mais reste élevé. Ceci est probablement dû au fait que l'augmentation de l'humidité dans la solive en bois est plus progressive et distribuée que dans le cas d'une épaisseur d'isolant de 2,5 cm. Il est à noter que cette simulation est la seule qui fait apparaître un risque thermique moyen. En effet, la laine minérale étant plus hygroscopique et capillaire (même si elle l'est relativement peu) que le panneau isolant sous-vide, elle est plus susceptible d'absorber l'humidité, ce qui peut la faire saturer à certains moments.
Dans tous les cas, les risques sont donc plus élevés pour les panneaux isolants sous-vide que pour la laine minérale. Pour autant, les risques restent élevés pour la laine minérale. Ce n'est donc pas le choix de l'isolant, mais bien le choix de la technique et en particulier de l'isolation par l'intérieur qui génèrent ces risques. Dans le cadre de la réhabilitation de bâtiments anciens à caractère patrimonial, l'isolation par l'intérieur est cependant souvent incontournable et il est donc indispensable de gérer ces risques.

11 https://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/45/171221_Etude%20humidite%20b%C3%A2ti%20ancien_vfinale.pdf

ET SI LE LOCAL ÉTUDIÉ N'AVAIT PAS ÉTÉ ISOLÉ DU TOUT ?

On pourrait également supposer que la configuration sans isolation était de toute façon déjà problématique et, par exemple, qu'elle aurait nécessité avant toute isolation l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge sur la façade extérieure.
Or, sans isolation, le seul risque est un risque structurel moyen, qui peut très probablement être imputé à l'étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation du local du dessous.
Ainsi, ne pas isoler le mur apparaît comme la solution la plus radicale pour éviter les désordres liés à l'humidité. Cependant, elle devra être mise en balance avec les bénéfices en termes d'économie d'énergie obtenu par l'amélioration thermique des murs.

3.4.3.5 RECOMMANDATIONS PARTICULIERES

Les simulations complémentaires ont montré que :

- L'un des paramètres influençant le risque structurel est la qualité de l'étanchéité à l'air du système d'isolation du local du dessous. Ces résultats plaident en faveur d'une isolation de la totalité des murs de l'immeuble lorsque c'est possible (bailleurs sociaux, propriétaires d'immeubles entiers de bureaux, etc.), avec une étanchéité à l'air des systèmes d'isolation parfaite dans chaque local.
  Des solutions encore plus radicales existent pour limiter le risque structurel, mais sont difficiles à mettre en pratique, surtout dans un immeuble : il s'agit de couper les têtes de solives encastrées dans le mur afin de permettre la continuité de l'isolation et de l'étanchéité à l'air d'un étage à l'autre. Cette solution demande donc d'assurer le soutènement du plancher par un autre moyen que l'ancrage des solives dans le mur, ce qui peut s'avérer particulièrement complexe (mise en place de tirants métalliques dans les solives et le mur ou de corbeaux sur lesquels reposeront les solives).
- Le piquage de l'enduit intérieur plâtre n'est ni nécessaire ni enviable et peut même s'avérer contre-productif en créant un risque général pour la façade ancienne qui n'existait pas jusqu'alors. Cependant, le risque fongique y est réel et tout devra être mis en œuvre pour le limiter.
- Le choix d'un autre système d'isolation, par exemple la laine minérale et un frein-vapeur hygrovariable, ne limite que peu les risques liés à l'humidité par rapport à un système d'isolation PIV. Ces risques sont liés à la technique de l'isolation par l'intérieur et ne sont qu'exacerbés par le choix d'un isolant très étanche à la vapeur comme les panneaux isolants sous-vide.
- L'absence d'isolation par l'intérieur préserve la façade ancienne contre les désordres liés à l'humidité. Cependant, l'amélioration thermique des murs est nécessaire pour diminuer très fortement les consommations énergétiques mais également pour contrecarrer l'effet de paroi froide ressenti par les occupants aux abords de murs non isolés. Si, pour diverses raisons, les risques dus aux désordres liés à l'humidité s'avèrent difficiles à gérer pour certains systèmes d'isolation, des solutions telles que les enduits correctifs (béton de chanvre ou enduit chaux-chanvre par exemple) ou des enduits isolants perméables à la vapeur (enduits à base de chaux auxquels l'ajout d'adjuvants permet de se rapprocher de la conductivité thermique d'un isolant classique) sont à envisager.

Dans tous les cas, les résultats sur les façades en pierre de taille calcaire et plancher en bois apparaissent difficilement généralisables, ce qui incite à la prudence et à faire réaliser des simulations hygrothermiques dynamiques au cas par cas, c'est-à-dire en restant au plus proche des paramètres réels de la façade (composition des murs et des planchers, etc.) et des conditions réelles en phase chantier et en phase de fonctionnement du local (qualité de l'étanchéité à l'air des systèmes d'isolation, présence d'un système de ventilation correctement dimensionné et fonctionnant dans de bonnes conditions).
Pour rappel, des exemples de conséquences finales de la non-gestion des risques liés à l'humidité sont présentées dans le Tableau 8.

3.4.4 PIERRE DE TAILLE, PLANCHER BOIS ET AUGETS EN PLÂTRE À BORDEAUX

3.4.4.1 RÉSULTATS

	A1 (risque général en partie courante du mur ancien)	A2 (risque général au droit du plancher)	B (risque thermique dans les isolants)	Cp (risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre)	Ci (risque fongique à l'interface entre le mur ancien et les isolants)	D (risque mécanique sur la façade extérieure)	E (risque structurel pour les éléments porteurs du plancher)
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Elevé pour une seule configuration (avec l'isolant complémentaire en polyuréthane et au-dessus des solives en bois), mais moyen pour toutes les autres.	Faible au droit des solives en bois, mais élevé au droit des augets en plâtre.	Faible pour toutes les configurations.	Systématiquement élevé, surtout au-dessus des solives en bois	Elevé pour toutes les configurations sauf au-dessus des augets en plâtre avec l'isolant complémentaire en laine minérale, où il est moyen.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé pour toutes les configurations.
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible au droit des solives en bois, mais élevé au droit des augets en plâtre.	Faible pour toutes les configurations.	Très fortement réduit pour toutes les configurations mais reste élevé.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Réduit, mais reste élevé.
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Systématiquement élevé, surtout au-dessus des solives en bois	Elevé pour toutes les configurations sauf au-dessus des augets en plâtre avec l'isolant complémentaire en laine minérale, où il est moyen.	Faible pour toutes les configurations.	Très fortement réduit, mais reste élevé
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Moyen pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.

TABLEAU 12 **Résultats pour la façade ancienne en pierre de taille, plancher bois et augets en plâtre à Bordeaux**

Source. Cerema.

3.4.4.2 ANALYSE

De manière générale, on retrouve les mêmes résultats qu'à Paris, mais avec des risques accrus.

Sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, :

- La configuration la plus défavorable est celle avec l'isolant complémentaire en polyuréthane et au-dessus des solives en bois. Le risque général y est plutôt élevé tout comme le risque fongique et le risque structurel. Il y a plusieurs raisons à cela :
  - A Bordeaux et contrairement à Paris, l'orientation nord est également l'orientation la plus exposée à la pluie battante. De plus, toujours en comparaison de Paris, l'analyse des données climatiques a montré que Bordeaux est un climat plus humide que Paris et que la quantité de pluie battante qui atteint la façade extérieure est plus élevée. Tout ceci conduit à rendre cette orientation particulièrement susceptible de faire condenser l'air humide provenant de l'intérieur du local et introduit dans ou entre les éléments du système d'isolation PIV par une étanchéité à l'air « normale ».
  - Le polyuréthane est l'isolant complémentaire le moins perméable à la vapeur : une fois que l'air humide est introduit dans ou entre les éléments du système d'isolation PIV par une étanchéité à l'air « normale », il n'a plus la capacité de sécher vers l'intérieur du local.
  - Les augets en plâtre ont la capacité de répartir une partie de l'humidité en excès en leur sein, grâce aux propriétés hygroscopiques et capillaires du plâtre. Le risque général au droit de ces derniers est donc plus élevé qu'au droit des solives en bois mais en contrepartie, ils atténuent le risque général en partie courante et le risque fongique à l'interface avec les isolants. Ce phénomène n'est pas possible avec les solives en bois, qui sont peu hygroscopiques et peu capillaires longitudinalement (c'est-à-dire perpendiculairement au sens des fibres du bois).
- Il existe un risque structurel élevé au niveau des planchers en bois.

Sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, :

- Le risque général en partie courante s'affaiblit par rapport aux configurations avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.
- Les risques fongiques dans l'enduit intérieur au plâtre et à l'interface entre le mur ancien et les isolants s'affaiblissent très fortement par rapport aux configurations avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, mais reste élevés. En effet, avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, il y a moins de risque de condensation interne et donc moins de risque de développement de moisissures à l'intérieur du mur. Cependant, en comparaison de Paris, les résultats sont moins bons puisque le climat de Bordeaux est plus humide.
- Le risque structurel reste élevé, mais s'affaiblit par rapport aux configurations avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.

Avec peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, :

- Le risque général en partie courante et au droit du plancher devient faible par rapport aux configurations sans peinture hydrofuge. Ceci s'explique par le fait que la peinture parfaitement hydrofuge protège la façade ancienne de la pluie battante et empêche donc cette dernière de faire augmenter la teneur en eau à l'intérieur de la façade.
- Les risques fongiques dans l'enduit intérieur au plâtre et à l'interface entre le mur ancien et les isolants sont quasiment identiques aux configurations sans peinture hydrofuge. C'est assez compréhensible puisque la peinture parfaitement hydrofuge a surtout une influence sur la moitié extérieure de la façade ancienne.
- Le risque structurel reste élevé. Il s'affaiblit très fortement par rapport aux configurations sans peinture hydrofuge mais reste cependant plus élevé que pour les configurations avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV. L'application d'une peinture parfaitement hydrofuge a donc une influence particulièrement positive sur ce risque.

Avec peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, :

- Quelle que soit la configuration, le seul risque qui subsiste est un risque fongique moyen dans l'enduit intérieur au plâtre.

3.4.4.3 CONCLUSION

La mise en œuvre d'un système d'isolation PIV sur une façade en pierre de taille et plancher bois à Bordeaux présente des risques importants sans application d'une peinture hydrofuge et avec une mise en œuvre de l'étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.

L'intérêt principal de l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge est qu'elle diminue fortement le risque structurel. Elle affaiblit également le risque général : elle protège donc le côté extérieur de la façade ancienne. L'intérêt principal d'une mise en œuvre parfaite de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV est une réduction très forte du risque fongique, mais aussi du risque structurel : elle protège donc le côté intérieur de la façade ancienne.

Selon les configurations, l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge et/ou une étanchéité à l'air parfaite

du système d'isolation PIV diminuent très fortement les risques. Tant que les risques liés à l'humidité ne sont pas limités par l'une, l'autre ou ces deux solutions, le choix de l'isolant complémentaire et de la membrane pare-vapeur et l'orientation n'ont quasiment aucune influence sur les résultats et la façade est exposée à de nombreux risques.

Enfin, rappelons qu'il est sous-entendu que cette peinture parfaitement hydrofuge soit également perméable à la vapeur, afin de ne pas mettre en péril la capacité de séchage du mur vers l'extérieur.

CONSEILS

En pratique et particulièrement en rénovation, il est parfois difficile d'arriver à une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation, c'est-à-dire à un débit de fuite $Q_{4\,Pa,surf}$ de 1 $m^3/(h.m^2)$. En effet, la notion d'étanchéité à l'air est moins familière des professionnels de la rénovation que des professionnels de la construction neuve. Mais il est aussi techniquement plus difficile de garantir une bonne étanchéité à l'air autour d'éléments pour lesquels l'étanchéité à l'air n'a pas été prise en compte dès la conception, comme un plancher ou des fenêtres existantes. Par conséquent, les résultats obtenus dans cette étude sont bien plus cléments que dans la réalité, où l'étanchéité à l'air du système d'isolation est souvent défaillante.

3.4.4.4 RECOMMANDATIONS PARTICULIERES

Le détail des simulations complémentaires n'est pas présenté ici, car les résultats sont très similaires à ceux obtenus pour Paris (voir 3.4.3.4), avec cependant des risques accrus. Les simulations complémentaires ont en effet montré que :

- L'un des paramètres influençant le risque structurel est la qualité de l'étanchéité à l'air du système d'isolation du local du dessous. Ces résultats plaident en faveur d'une isolation de la totalité des murs de l'immeuble lorsque c'est possible (bailleurs sociaux, propriétaires d'immeubles entiers de bureaux, etc.), avec une étanchéité à l'air des systèmes d'isolation parfaite dans chaque local.
  Des solutions encore plus radicales existent pour limiter le risque structurel, mais sont difficiles à mettre en pratique, surtout dans un immeuble : il s'agit de couper les têtes de solives encastrées dans le mur et de les remplacer par de l'isolation. Cette solution demande donc d'assurer le soutènement du plancher par un autre moyen que l'ancrage des solives dans le mur, ce qui peut s'avérer particulièrement complexe (mise en place de tirants métalliques dans les solives et le mur ou de corbeaux sur lesquels reposeront les solives).
- Le piquage de l'enduit intérieur plâtre n'est ni nécessaire ni enviable et peut même s'avérer contre-productif en créant un risque général pour la façade ancienne qui n'existait pas jusqu'alors. Cependant, le risque fongique y est réel et tout devra être mis en œuvre pour le limiter.
- Le choix d'un autre système d'isolation, par exemple la laine minérale et un frein-vapeur hygrovariable, ne limite que peu les risques liés à l'humidité par rapport à un système d'isolation PIV. Ces risques sont liés à la technique de l'isolation par l'intérieur et ne sont qu'exacerbés par le choix d'un isolant très étanche à la vapeur comme les panneaux isolants sous-vide.
- L'absence d'isolation par l'intérieur préserve le mur contre les désordres liés à l'humidité. Cependant, l'amélioration thermique des murs est nécessaire pour diminuer très fortement les consommations énergétiques mais également pour contrecarrer l'effet de paroi froide ressenti par les occupants aux abords de murs non isolés. Si, pour diverses raisons, les risques dus aux désordres liés à l'humidité s'avèrent difficiles à gérer pour certains systèmes d'isolation, des solutions telles que les enduits correctifs (béton de chanvre ou enduit chaux-chanvre par exemple) ou des enduits isolants perméables à la vapeur (enduits à base de chaux auxquels l'ajout d'adjuvants permet de se rapprocher de la conductivité thermique d'un isolant classique) sont à envisager.

Dans tous les cas, les résultats sur les façades en pierre de taille calcaire et plancher en bois apparaissent difficilement généralisables, ce qui incite à la prudence et à faire réaliser des simulations hygrothermiques dynamiques au cas par cas, c'est-à-dire en restant au plus proche des paramètres réels de la façade (composition des murs et des planchers, etc.) et des conditions réelles en phase chantier et en phase de fonctionnement du local (qualité de l'étanchéité à l'air des systèmes d'isolation, présence d'un système de ventilation correctement dimensionné et fonctionnant dans de bonnes conditions).

Pour rappel, des exemples de conséquences finales de la non-gestion des risques liés à l'humidité sont présentées dans le Tableau 8.

3.4.5 PIERRE DE TAILLE, PLANCHER MÉTAL ET AUGETS EN PLÂTRE À PARIS

3.4.5.1 RÉSULTATS

	A1 (risque général en partie courante du mur ancien)	A2 (risque général au droit du plancher)	B (risque thermique dans les isolants)	Cp (risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre)	Ci (risque fongique à l'interface entre le mur ancien et les isolants)	D (risque mécanique sur la façade extérieure)	E (risque structurel pour les éléments porteurs du plancher)
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Moyen au-dessus des poutrelles métalliques, mais faible au-dessus des augets en plâtre.	Faible au droit des poutrelles métalliques, mais moyen au droit des augets en plâtre (mais proche d'être faible).	Faible pour toutes les configurations.	Systématiquement élevé, surtout pour l'orientation nord et au-dessus des poutrelles métalliques.	Elevé pour toutes les configurations, sauf au-dessus des poutrelles métalliques où il est moyen.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé.
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible au droit des poutrelles métalliques, mais moyen au droit des augets en plâtre (mais proche d'être faible).	Faible pour toutes les configurations.	Très fortement réduit pour toutes les configurations. Devient moyen (mais proche d'être faible) et même faible au-dessus des poutrelles métalliques.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, mais fortement réduit.
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Systématiquement élevé, surtout pour l'orientation nord et au-dessus des poutrelles métalliques.	Elevé pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, mais fortement réduit.
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Très fortement réduit pour toutes les configurations et devient moyen (mais proche d'être faible).	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, mais très fortement réduit

TABLEAU 13 **Résultats pour la façade ancienne en pierre de taille, plancher métal et augets en plâtre à Paris**

Source. Cerema.

3.4.5.2 ANALYSE

Les résultats sont quasiment identiques à ceux pour le plancher bois (voir 3.4.3.2).
Seul le risque structurel pour les poutrelles métalliques reste élevé, même avec une peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV. Ceci s'explique notamment par le fait que le risque structurel pour les poutrelles métalliques arrive plus vite que pour les solives en bois. En effet, il y a un risque de corrosion pour les poutrelles métalliques à partir de 80 % d'humidité relative en surface, tandis que le risque de développement de moisissures n'intervient qu'à 95 % d'humidité relative pour les solives en bois.

3.4.5.3 CONCLUSION

La mise en œuvre d'un système d'isolation PIV sur une façade en pierre de taille et plancher métal à Paris présente des risques importants sans application d'une peinture hydrofuge et avec une mise en œuvre de l'étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.
L'intérêt principal de l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge est qu'elle diminue fortement le risque structurel. Elle affaiblit également le risque général : elle protège donc le côté extérieur de la façade ancienne. L'intérêt principal d'une mise en œuvre parfaite de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV est une réduction très forte du risque fongique, mais aussi du risque structurel : elle protège donc le côté intérieur de la façade ancienne. Cependant, dans le cas d'un plancher métal, le risque structurel reste encore élevé.
Selon les configurations, l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge et/ou une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV diminuent très fortement les risques. Tant que les risques liés à l'humidité ne sont pas limités par l'une, l'autre ou ces deux solutions, le choix de l'isolant complémentaire et de la membrane pare-vapeur et l'orientation n'ont quasiment aucune influence sur les résultats et la façade est exposée à de nombreux risques.
Enfin, rappelons qu'il est sous-entendu que cette peinture parfaitement hydrofuge soit également perméable à la vapeur, afin de ne pas mettre en péril la capacité de séchage du mur vers l'extérieur.

CONSEILS

En pratique et particulièrement en rénovation, il est parfois difficile d'arriver à une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation, c'est-à-dire à un débit de fuite $Q_{4\,Pa,surf}$ de 1 $m^3/(h.m^2)$. En effet, la notion d'étanchéité à l'air est moins familière des professionnels de la rénovation que des professionnels de la construction neuve. Mais il est aussi techniquement plus difficile de garantir une bonne étanchéité à l'air autour d'éléments pour lesquels l'étanchéité à l'air n'a pas été prise en compte dès la conception, comme un plancher ou des fenêtres existantes. Par conséquent, les résultats obtenus dans cette étude sont bien plus cléments que dans la réalité, où l'étanchéité à l'air du système d'isolation est souvent défaillante.

3.4.5.4 RECOMMANDATIONS PARTICULIÈRES

Les résultats des simulations complémentaires sont également quasiment identiques à ceux pour le plancher bois (voir 3.4.3.5).
En particulier, l'un des paramètres influençant le risque structurel est la qualité de l'étanchéité à l'air du système d'isolation du local du dessous. Cette influence est encore plus cruciale pour un plancher métal que pour un plancher bois, puisqu'on a vu que même l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge et une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV ne venaient pas à bout du risque structurel. Ces résultats plaident en faveur d'une isolation de la totalité des murs de l'immeuble lorsque c'est possible (bailleurs sociaux, propriétaires d'immeubles entiers de bureaux, etc.), avec une étanchéité à l'air des systèmes d'isolation parfaite dans chaque local. Des solutions encore plus radicales existent pour limiter le risque structurel, mais sont difficiles à mettre en pratique, surtout dans un immeuble : il s'agit de couper les têtes de poutrelles encastrées dans le mur afin de permettre la continuité de l'isolation et de l'étanchéité à l'air d'un étage à l'autre. Cette solution demande donc d'assurer le soutènement du plancher par un autre moyen que l'ancrage des poutrelles dans le mur, ce qui peut s'avérer particulièrement complexe (mise en place de tirants métalliques dans les poutrelles et le mur ou de corbeaux sur lesquels reposeront les poutrelles).
Pour rappel, des exemples de conséquences finales de la non-gestion des risques liés à l'humidité sont présentées dans le Tableau 8.

3.4.6 PIERRE DE TAILLE, PLANCHER MÉTAL ET AUGETS EN PLÂTRE À BORDEAUX

3.4.6.1 RÉSULTATS

	A1 (risque général en partie courante du mur ancien)	A2 (risque général au droit du plancher)	B (risque thermique dans les isolants)	Cp (risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre)	Ci (risque fongique à l'interface entre le mur ancien et les isolants)	D (risque mécanique sur la façade extérieure)	E (risque structurel pour les éléments porteurs du plancher)
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Moyen pour toutes les configurations.	Faible au droit des poutrelles métalliques, mais élevé au droit des augets en plâtre.	Faible pour toutes les configurations.	Systématiquement élevé.	Elevé pour toutes les configurations, sauf au-dessus des poutrelles métalliques où il est moyen.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé.
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible au droit des poutrelles métalliques, mais élevé au droit des augets en plâtre.	Faible pour toutes les configurations.	Très fortement réduit pour toutes les configurations mais reste élevé.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, mais fortement réduit.
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Systématiquement élevé.	Elevé pour toutes les configurations	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, mais fortement réduit
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Très fortement réduit pour toutes les configurations et devient moyen (mais proche d'être faible).	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, mais très fortement réduit

TABLEAU 14 **Résultats pour la façade ancienne en pierre de taille, plancher métal et augets en plâtre à Bordeaux**

Source. Cerema.

3.4.6.2 ANALYSE

Les résultats sont quasiment identiques à ceux pour le plancher bois (voir 3.4.3.2).
Le risque structurel pour les poutrelles métalliques reste élevé, même avec une peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV. Ceci s'explique notamment par le fait que le risque structurel pour les poutrelles métalliques arrive plus vite que pour les solives en bois. En effet, il y a un risque de corrosion pour les poutrelles métalliques à partir de 80 % d'humidité relative en surface, tandis que le risque de développement de moisissures n'intervient qu'à 95 % d'humidité relative pour les solives en bois.

D'autre part, on observe que le risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre devient faible avec une peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV pour un plancher métal, ce qui n'est pas le cas pour un plancher bois. Ceci s'explique probablement par le fait que le bois reste tout de même plus hygroscopique (même s'il l'est peu longitudinalement, c'est-à-dire perpendiculairement au sens des fibres du bois) que le métal. A humidité relative égale, 1 m^3 de bois contient donc plus d'eau qu'1 m^3 de métal, et cette eau est susceptible d'atteindre l'enduit intérieur.

3.4.6.3 CONCLUSION

La mise en œuvre d'un système d'isolation PIV sur une façade en pierre de taille et plancher métal à Bordeaux présente des risques importants sans application d'une peinture hydrofuge et avec une mise en œuvre de l'étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.
L'intérêt principal de l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge est qu'elle diminue fortement le risque structurel. Elle affaiblit également le risque général : elle protège donc le côté extérieur de la façade ancienne.
L'intérêt principal d'une mise en œuvre parfaite de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV est une réduction très forte du risque fongique, mais aussi du risque structurel : elle protège donc le côté intérieur de la façade ancienne. Cependant, dans le cas d'un plancher métal, le risque structurel reste encore élevé.

Selon les configurations, l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge et/ou une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV diminuent très fortement les risques. Tant que les risques liés à l'humidité ne sont pas limités par l'une, l'autre ou ces deux solutions, le choix de l'isolant complémentaire et de la membrane pare-vapeur et l'orientation n'ont quasiment aucune influence sur les résultats et la façade est exposée à de nombreux risques.
Enfin, rappelons qu'il est sous-entendu que cette peinture parfaitement hydrofuge soit également perméable à la vapeur, afin de ne pas mettre en péril la capacité de séchage du mur vers l'extérieur.

CONSEILS

En pratique et particulièrement en rénovation, il est parfois difficile d'arriver à une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation, c'est-à-dire à un débit de fuite $Q_{4\ Pa,surf}$ de 1 $m^3/(h.m^2)$. En effet, la notion d'étanchéité à l'air est moins familière des professionnels de la rénovation que des professionnels de la construction neuve. Mais il est aussi techniquement plus difficile de garantir une bonne étanchéité à l'air autour d'éléments pour lesquels l'étanchéité à l'air n'a pas été prise en compte dès la conception, comme un plancher ou des fenêtres existantes. Par conséquent, les résultats obtenus dans cette étude sont bien plus cléments que dans la réalité, où l'étanchéité à l'air du système d'isolation est souvent défaillante.

3.4.6.4 RECOMMANDATIONS PARTICULIERES

Les résultats des simulations complémentaires sont également quasiment identiques à ceux pour le plancher bois (voir 3.4.3.4).
En particulier, l'un des paramètres influençant le risque structurel est la qualité de l'étanchéité à l'air du système d'isolation du local du dessous. Cette influence est encore plus cruciale pour un plancher métal que pour un plancher bois, puisqu'on a vu que même l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge et une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV ne venaient pas à bout du risque structurel. Ces résultats plaident en faveur d'une isolation de la totalité des murs de l'immeuble lorsque c'est possible (bailleurs sociaux, propriétaires d'immeubles entiers de bureaux, etc.), avec une étanchéité à l'air des systèmes d'isolation parfaite dans chaque local. Des solutions encore plus radicales existent pour limiter le risque structurel, mais sont difficiles à mettre en pratique, surtout dans un immeuble : il s'agit de couper les têtes de poutrelles encastrées dans le mur afin de permettre la continuité de l'isolation et de l'étanchéité à l'air d'un étage à l'autre. Cette solution demande donc d'assurer le soutènement du plancher par un autre moyen que l'ancrage des poutrelles dans le mur, ce qui peut s'avérer particulièrement complexe (mise en place de tirants métalliques dans les poutrelles et le mur ou de corbeaux sur lesquels reposeront les poutrelles).
Pour rappel, des exemples de conséquences finales de la non-gestion des risques liés à l'humidité sont présentées dans le Tableau 8.

3.4.7 BRIQUE ANCIENNE, PLANCHER MÉTAL ET HOURDIS EN BRIQUE PERFORÉE À PARIS

3.4.7.1 RÉSULTATS

	A1 (risque général en partie courante du mur ancien)	A2 (risque général au droit du plancher)	B (risque thermique dans les isolants)	Cp (risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre)	Ci (risque fongique à l'interface entre le mur ancien et les isolants)	D (risque mécanique sur la façade extérieure)	E (risque structurel pour les éléments porteurs du plancher)
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Proche d'être faible pour toutes les configurations	Faible pour toutes les configurations.	Faible pour toutes les configurations.	Elevé, mais proche d'être faible
> Sans peinture hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV				Faible pour toutes les configurations.			Faible pour toutes les configurations.
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV							
> Avec peinture parfaitement hydrofuge > Avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV							

TABLEAU 15 **Résultats pour la façade ancienne en brique ancienne, plancher métal et hourdis en brique perforée à Paris**

Source. Cerema.

3.4.7.2 ANALYSE

Sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, :

- Toutes les configurations présentent des risques faibles, sauf pour le risque fongique dans l'enduit intérieur au plâtre et pour le risque structurel, tous deux moyens mais proches d'être faibles.

Sans peinture hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, :

- Toutes les configurations présentent des risques faibles.

Avec peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV, :

- Toutes les configurations présentent des risques faibles.

Avec peinture parfaitement hydrofuge et avec une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV, :

- Toutes les configurations présentent des risques faibles.

3.4.7.3 CONCLUSION

La mise en œuvre d'un système d'isolation PIV sur une façade en brique ancienne, plancher métal et hourdis en brique perforée à Paris présente des risques moyens sans application d'une peinture hydrofuge et avec une mise en œuvre de l'étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation PIV.
L'intérêt principal de l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge est qu'elle diminue le risque structurel. L'intérêt principal d'une mise en œuvre parfaite de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV est une réduction très forte du risque fongique, mais aussi du risque structurel : elle protège donc le côté intérieur de la façade ancienne.
Selon les configurations, l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge et/ou une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation PIV permet d'atténuer complètement les risques. Tout type d'isolation complémentaire convient et le cas échéant, tout type de membrane pare-vapeur convient également.
Enfin, rappelons qu'il est sous-entendu que cette peinture parfaitement hydrofuge soit également perméable à la vapeur, afin de ne pas mettre en péril la capacité de séchage du mur vers l'extérieur.

CONSEILS

En pratique et particulièrement en rénovation, il est parfois difficile d'arriver à une étanchéité à l'air « normale » du système d'isolation, c'est-à-dire à un débit de fuite $Q_{4\ Pa,surf}$ de 1 $m^3/(h.m^2)$. En effet, la notion d'étanchéité à l'air est moins familière des professionnels de la rénovation que des professionnels de la construction neuve. Mais il est aussi techniquement plus difficile de garantir une bonne étanchéité à l'air autour d'éléments pour lesquels l'étanchéité à l'air n'a pas été prise en compte dès la conception, comme un plancher ou des fenêtres existantes. Par conséquent, les résultats obtenus dans cette étude sont bien plus cléments que dans la réalité, où l'étanchéité à l'air est souvent défaillante.

3.4.7.4 RECOMMANDATIONS PARTICULIERES

Il convient également d'entretenir correctement les joints au ciment Portland, car s'ils se délitent, la protection de la façade par rapport à la pluie sera très fortement amoindrie.
Les résultats des simulations complémentaires sont également quasiment identiques à ceux pour le plancher bois (voir 3.4.3.4).
En particulier, l'un des paramètres influençant le risque structurel est la qualité de l'étanchéité à l'air du système d'isolation du local du dessous. Cette influence est encore plus cruciale pour un plancher métal que pour un plancher bois. Ces résultats plaident en faveur d'une isolation de la totalité des murs de l'immeuble lorsque c'est possible (bailleurs sociaux, propriétaires d'immeubles entiers de bureaux, etc.), avec une étanchéité à l'air des systèmes d'isolation parfaite dans chaque local. Des solutions encore plus radicales existent pour limiter le risque structurel, mais sont difficiles à mettre en pratique, surtout dans un immeuble : il s'agit de couper les têtes de poutrelles encastrées dans le mur afin de permettre la continuité de l'isolation et de l'étanchéité à l'air d'un étage à l'autre. Cette solution demande donc d'assurer le soutènement du plancher par un autre moyen que l'ancrage des poutrelles dans le mur, ce qui peut s'avérer particulièrement complexe (mise en place de tirants métalliques dans les poutrelles et le mur ou de corbeaux sur lesquels reposeront les poutrelles).
Pour rappel, des exemples de conséquences finales de la non-gestion des risques liés à l'humidité sont présentées dans le Tableau 8.

CONSEILS

Par rapport aux résultats des façades en pierre de taille, ceux des façades en pan de bois/gravats et en brique ancienne semblent particulièrement cléments et les écarts sont grands. Les causes de ces écarts sont à rechercher à la fois dans la composition des murs que dans la modélisation de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV.

En ce qui concerne la composition des murs, le mur en pierre est plus sensible que les deux autres murs aux infiltrations d'eau de pluie par la paroi extérieure du mur. En effet, :

- Le mur en pan de bois est enduit, ce qui le protège de la pluie battante.
- Le mur en brique n'est pas enduit mais ses joints au mortier bâtard sont protégés par du ciment Portland et les briques extérieures qui le compose sont peu capillaires.
- Le mur en pierre de taille n'est pas enduit et ses joints au mortier de chaux ne sont pas protégés de la pluie battante.

D'autre part, la modélisation de l'étanchéité à l'air du système d'isolation PIV fait que la quantité d'eau de condensation susceptible de se former à l'interface entre le mur et l'isolant n'est pas la même d'un mur à l'autre. En effet, cette quantité d'eau est quasiment quatre fois plus élevée pour le mur en pierre de taille que pour le mur en pan de bois. Ceci s'explique par le fait que le mur en pan de bois est peu épais et plus perméable à la vapeur que le mur en pierre : il est donc moins susceptible de faire condenser l'air humide provenant de l'intérieur du local et introduit dans ou entre les éléments du système d'isolation PIV par une étanchéité à l'air défaillante. La même chose est vrai pour le mur en brique, dans une moindre mesure cependant.

CONSEILS

Dans Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien (Enertech, 2019), une alerte avait été émise concernant l'isolation par l'intérieur en présence de plancher intermédiaire en poutrelle-hourdis. L'argument avancé était que l'air et donc la vapeur circule très facilement dans les hourdis. De plus, il est quasiment impossible d'assurer une continuité d'isolation et d'étanchéité à l'air dans l'épaisseur du plancher. Cette humidité entrera donc en contact avec le mur froid et condensera, avec un risque de pathologie élevé.
Pour pallier ce problème, trois conditions sont avancées par Enertech :

- L'étanchéité à l'air du logement doit être performante, c'est-à-dire inférieure à un débit de fuite sous 50 Pa n50 de 3 vol/h (ce qui équivaut à peu près à un débit de fuite Q4 de 0,6 $m^3/(h.m^2)$).
- L'enduit extérieur doit protéger la paroi extérieure de la pluie battante et une valeur de coefficient d'absorption A inférieur à 0,2 $kg/(m^2.h^{1/2})$ est avancé.
- L'enduit extérieur doit être ouvert à la vapeur, avec un Sd inférieur à 0,5 m.

Parmi ces conditions, la première est considérée comme quasiment impossible à satisfaire car elle signifie traiter toutes les traversées de plancher, que ce soit pour les réseaux d'eau de chauffage, d'évacuations, d'électricité, ou encore toutes les gaines techniques, qui sont autant d'entrées d'air qui débouchent sur la liaison hourdis – mur.

Dans cette étude, nous avons négligé l'étanchéité à l'air des planchers et ce pour toutes les typologies de façade ancienne, afin de nous concentrer sur celle, encore peu maîtrisée en réhabilitation, des systèmes d'isolation. L'alerte d'Enertech peut toutefois être nuancer dans notre cas, puisque les plafonds des bâtiments anciens sont très souvent enduits au plâtre, alors que les plafonds plus récents privilégient les faux-plafonds ou les plaques de plâtre. L'enduit est en effet plus sûrement étanche à l'air que ces deux dernières techniques, ce qui réduit le risque d'introduire dans le plancher une quantité non maîtrisée d'air humide provenant de l'intérieur du local dans ou entre les éléments du système d'isolation PIV.

Cependant, cette alerte incite à la prudence et met en avant le fait que l'étanchéité à l'air des planchers semblent tout aussi importante que celles des systèmes d'isolation.

3 5 SYNTHÈSE

La mise en œuvre d'un système d'isolation PIV sur des façades anciennes présente des risques très divers selon les façades anciennes, leurs localisations et leurs orientations.

- Les façades anciennes en pierre de taille sont plus à risque que celles en pan de bois/gravats et brique ancienne.
- Les planchers métal sont plus à risque que les planchers bois.
- Le climat bordelais est plus à risque que le climat parisien.
- L'orientation nord est plus risquée pour Paris que l'orientation la plus exposée à la pluie battante. A Bordeaux, l'orientation nord est également la plus exposée à la pluie battante et cumule donc les risques.
- L'isolant complémentaire en polyuréthane est souvent plus risqué que la laine minérale, sans que ce risque soit cependant très différenciant.

Deux recommandations générales permettant de réduire les risques dus aux désordres liés à l'humidité ont été modélisées et ont démontré leur efficacité : il s'agit de l'application d'une peinture parfaitement hydrofuge et d'une étanchéité à l'air parfaite du système d'isolation.

Dans la réalité cependant, un enduit n'est jamais parfaitement hydrofuge et l'étanchéité à l'air d'un système d'isolation n'est jamais parfaite. Les différentes études produites ces dernières années sur le sujet incitent donc à viser, si nécessaire, :

- Un coefficient d'absorption capillaire A inférieur ou égal à 0,5 kg/(m^2.$h^{1/2}$) (voire 0,2 kg/(m^2.$h^{1/2}$) pour des façades très exposées) pour la peinture hydrofuge, comme indiqué dans Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité au niveau de poutres encastrées dans un mur extérieur isolé par l'intérieur (Programme RAGE, 2013). Il est impératif que cette peinture soit également perméable à la vapeur, afin de ne pas mettre en péril la capacité de séchage du mur vers l'extérieur.
- Un débit de fuite sous 4 Pa de $Q_{4\ Pa,surf}$ de 0,6 m^3/(h.m^2), comme indiqué dans Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien (Enertech, 2019). Pour l'atteindre, différents leviers doivent être actionnés :
  - Une réflexion poussée en phase conception sur la gestion de l'étanchéité à l'air autour d'éléments existants et dans les planchers sera nécessaire pour atteindre une valeur aussi performante.
  - L'effort de formation actuellement fourni par les fabricants de panneaux isolants sous vide doit se poursuivre pour permettre d'atteindre, en rénovation, des niveaux de débit de fuite quasi-équivalents au neuf.
  - Il apparaît nécessaire de sensibiliser les occupants aux bonnes pratiques en matière de fixation d'éléments muraux sur un système d'isolation par l'intérieur, a fortiori s'il s'agit d'un système d'isolation PIV. Cette sensibilisation pourrait prendre la forme d'un chapitre dans un carnet de logement, permettant d'assurer un suivi du système dans le temps.

4 CARACTÉRISATION ET BONNE UTILISATION DES PRODUITS À BASE D'AÉROGELS

Le dernier chapitre de cette étude se focalise sur la caractérisation de deux produits. Ces deux produits sont à base d'aérogel de silice. Ces produits sont amenés à se développer.
L'aérogel de silice est sensible à l'humidité.

Dans les bâtiments les produits isolants sont souvent en contact avec des structures contenant de l'eau. Pour déterminer la pérennité de ces produits en œuvre, les tests suivants ont été effectués.

4.1 DIFFÉRENTES ÉVALUATIONS EXISTANTES

Les produits à base d'aérogel commencent à être encadrés par des normes et des évaluations mais ne sont pas généralisées.
Cette partie décrit les différentes évaluations observables en France.

4.1.1 NORMES D'ESSAIS

Deux normes d'essais existent actuellement :
- une norme ASTM
- une norme ISO en cours d'élaboration.

Ces normes n'ont pas encore été adoptées en Europe et il n'existe pas pour le moment de norme produit associée à ce type de produit.

4.1.1.1 ASTM C1728-21

Titre : Isolation flexible aérogel
- Domaine d'emploi : –196°C à 649°C ;
- Produit : isolation flexible fibreuse à base d'aérogel de silice ;
- Caractéristiques mesurées :
  - Longueur, largeur, épaisseur, masse volumique ;
  - Température maximale d'utilisation ;
  - Conductivité thermique apparente ;
  - Sorption de vapeur d'eau ;
  - Résistance aux développements fongiques ;
  - Absorption d'eau ;
  - Compression.

4.1.1.2 ISO/DIS 22482 (PROJET DE NORME)

Titre : Produits d'isolation thermique – Matelas d'aérogel pour le bâtiment – Détermination des caractéristiques
- Domaine d'emploi : bâtiment ;
- Produit : matelas d'aérogel isolant ;
- Caractéristiques mesurées :
  - Longueur, largeur, épaisseur, masse volumique ;
  - Conductivité thermique apparente ;
  - Réaction au feu
  - Perméabilité à la vapeur d'eau ;
  - Résistance aux développements fongiques ;
  - Absorption d'eau ;
  - Compression à 10 % ;
  - Flexibilité ;
  - Sorption de vapeur d'eau.

4.1.2 CERTIFICATION

En France il n'existe pas de Référentiel de Certification proposé pour ce type de produit.

4.1.3 AVIS TECHNIQUE

Aujourd'hui il n'existe qu'un Avis Technique qui fait référence à des aérogels. Cet Avis Technique a été obtenu pour des panneaux alvéolaire translucide comportant des billes d'aérogel de silice dans les cavités.

La caractéristique thermique de ce procédé n'est pas stipulée dans cet Avis Technique.

4.1.4 APPRÉCIATION TECHNIQUE D'EXPÉRIMENTATION (ATEX)

Aujourd'hui il n'existe qu'une seule ATEx qui fait référence à des aérogels. Cette ATEx a été délivrée pour un procédé d'enduit isolant contenant des aérogels de silice.

Cette fois, la caractéristique thermique de ce procédé a été indiquée dans cette ATEx.

4.2 DESCRIPTION DES DEUX PRODUITS CHOISIS

Les deux produits à base d'aérogel choisis et disponibles sur le marché Français ont été d'une part un produit dit « Blanket » (produit fibreux trempé dans un gel d'aérogel) et un enduit extérieur comportant essentiellement des grains d'aérogel de silice.

Le premier produit est constitué de fibres de verre associées à des billes de silice amorphe. Ce produit est fabriqué en faibles épaisseurs (de 3 à 10 mm d'épaisseur). Il se présente sous forme de rouleau de 20 à 50 m suivant l'épaisseur. Ce produit peut être utilisé dans le bâtiment mais plus fréquemment dans l'industrie Oil Gas et dans les transports.

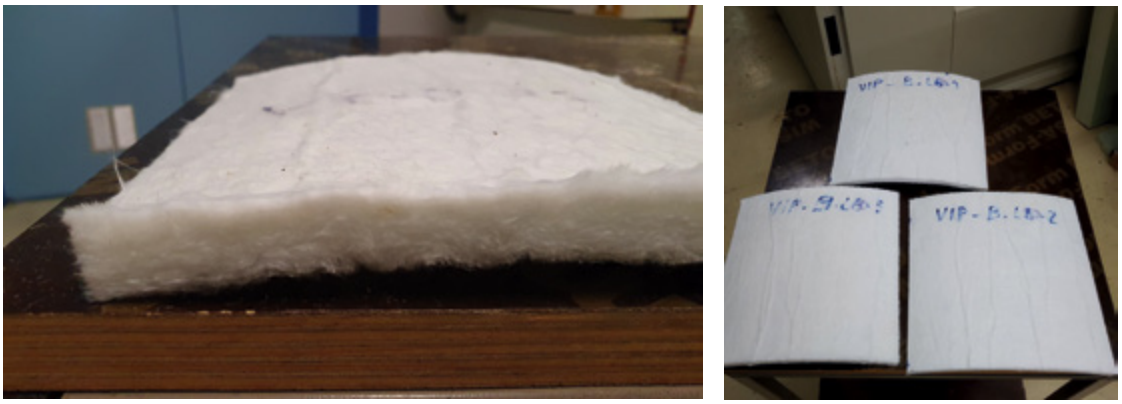


FIGURE 20 Présentation des éprouvettes et de la texture du produit « Blanket »

Le second produit est un enduit thermo-isolant qui peut être utilisé dans le bâtiment aussi bien en enduit intérieur qu'en extérieur. Il est constitué de chaux, de granules d'aérogel et d'additifs pour la rétention d'eau et agent hydrofuge. Il peut être appliqué sur des murs supports en briques, en parpaing, en pierre naturelle, des pans de bois ou des bétons mais suffisamment rugueux pour une bonne tenue. Cet enduit est appliqué à la machine sur des épaisseurs allant de 30 à 150 mm. Après séchage ce produit doit être recouvert d'un durcisseur ou d'un mortier + un treillis avant l'application d'un crépi de finition. Ce produit est fragile s'il n'est pas recouvert avec un crépi de finition.

FIGURE 21 **Présentation des éprouvettes et de la texture du produit Enduit**

4 3 DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS ESSAIS

Des essais ont été réalisés sur ces deux produits. Les trois caractéristiques principales permettant de vérifier le comportement de ces deux produits en œuvre dans le bâtiment sont :

- La variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du produit,
- L'incidence d'un vieillissement artificiel sur la caractéristique thermique des produits,
- La quantité d'eau absorbable par les produits.

4.3.1 DISTES DES ESSAIS REALISES

Les essais peuvent être séparés en trois catégories :

- Essais d'identification (mesures dimensionnelles et pondérales et détermination de la masse volumique du produit),
- Essais thermiques (conductivité thermique à l'état sec et à l'état humide et vérification après vieillissement)
- Essais hydriques (perméabilité à la vapeur d'eau, isotherme de sorption, absorption d'eau).

4 4 ESSAIS D'IDENTIFICATION

Les essais sont réalisés conformément à la norme NF EN 1602. Les paragraphes ci-dessous présentent les résultats de masse volumique des produits à réception et après séchage à 70°C jusqu'à masse constante.

4.4.1 « BLANKET »

Les résultats sont indiqués dans le Tableau 16 suivant.

Référence de l'éprouvette	Masse volumique en kg/m^3	
	Etat initial	Après séchage
AERO-B-1	180.0	177.0
AERO-B-2	173.7	171.0
AERO-B-3	181.5	179.0

TABLEAU 16 Détermination des masses volumiques du produit « BLANKET » à réception et après séchage

4.4.2 « ENDUIT »

Les résultats sont indiqués dans le Tableau 17 suivant.

Référence de l'éprouvette	Masse volumique en kg/m^3	
	Etat initial	Après séchage
AERO-E-1	248.2	150.6
AERO-E-2	259.0	159.4
AERO-E-3	269.1	156.7

TABLEAU 17 Détermination des masses volumiques du produit Enduit à réception et après séchage

4.4.3 REMARQUES

Le produit « Blanket » à l'initial n'étaient pas très humide. L'écart entre l'initial et le séchage est de l'ordre de 2 %.
Par contre pour le produit « Enduit », les éprouvettes sont très humides même après 6 semaines après l'application. Ces dernières éprouvettes comportées une teneur en eau en masse de plus de 80 % ce qui est énorme dans le milieu du bâtiment.

4 5 ESSAIS THERMIQUES

Les essais thermiques ont été réalisés sur les produits à l'état sec conventionnel (séchage à 70°C avec de l'air pris à 23°C et 50 %HR soit une humidité relative de 2 %) à environ 50 %HR et à 80 %HR. Ceci permet de définir l'évolution de cette caractéristique thermique en fonction de la teneur en eau du produit.

Les essais ont été réalisés suivant la norme NF EN 12667. La conductivité thermique a été déterminée à 23°C de température moyenne par la méthode fluxmètrique à deux capteurs.

4.5.1 « BLANKET »

Le Tableau 18 ci-dessous présente les résultats de mesures obtenus sur les éprouvettes « Blanket ».
La Figure 22 représente graphiquement cette évolution.

Référence des éprouvettes	A l'état sec		A réception		Après stabilisation à 23°C et 80 %HR	
	Teneur en eau en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)	Teneur en eau en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)	Teneur en eau en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)
AERO-B-1			3.1	0.017		
AERO-B-2			2.9	0.018		
AERO-B-3			2.8	0.017		
AERO-B-4	_	0.016	2.7	0.018	4.2	0.018
AERO-B-5	_	0.017	2.6	0.018	3.5	0.018
AERO-B-6	_	0.018	2.6	0.018	3.4	0.018
Moyenne	**0**	**0.017**	**2.8**	**0.018**	**3.7**	**0.018**

TABLEAU 18 Synthèse des résultats de mesures thermiques en fonction de la teneur en eau du produit avant vieillissement

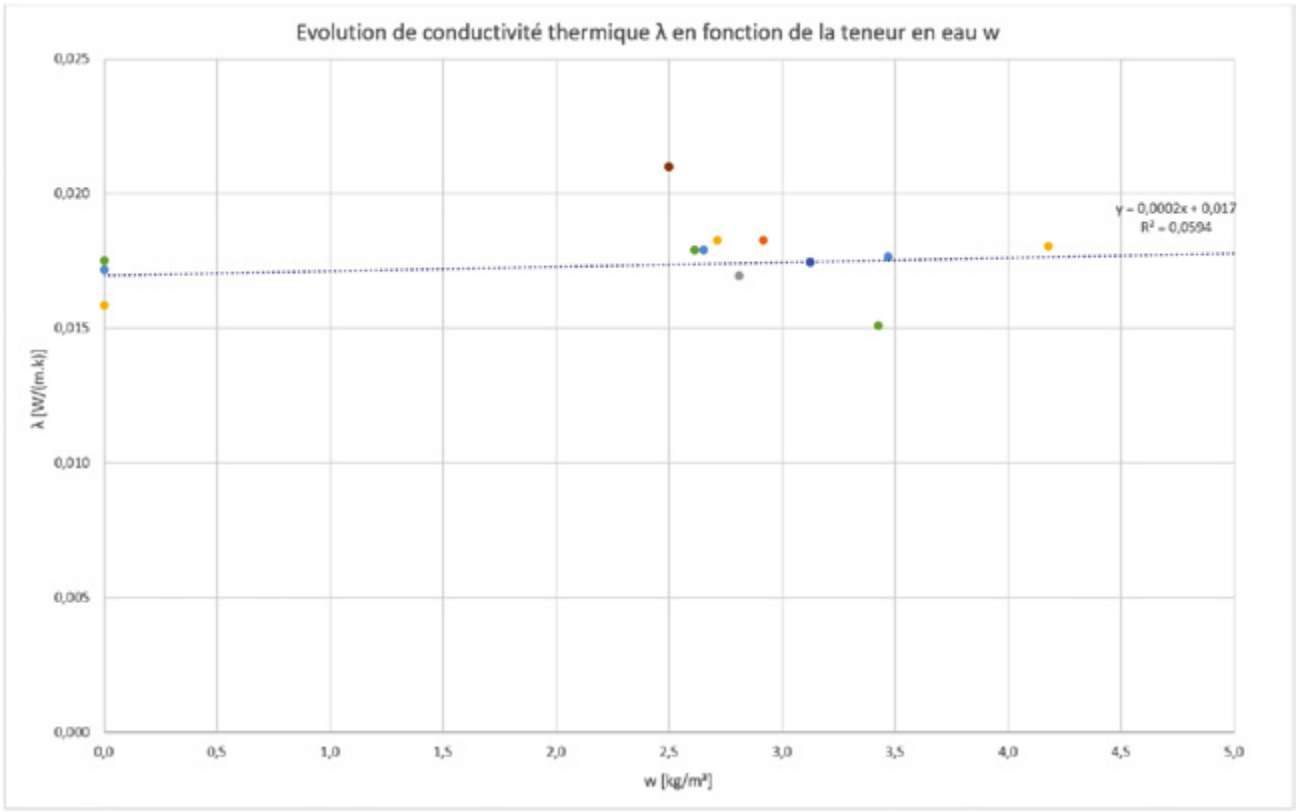


FIGURE 22 Courbe de variation de la conductivité thermique du produit « Blanket » en fonction de la teneur en eau

4.5.2 ENDUIT

Le Tableau 19 ci-dessous présente les résultats de mesures obtenus sur les éprouvettes d'Enduit.
La Figure 23 représente graphiquement cette évolution.

Référence des éprouvettes	A l'état sec		A réception		Après stabilisation à 23°C et 80 %HR	
	Teneur en eau en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)	Teneur en eau en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)	Teneur en eau en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)
AERO-E-1			109	0.101		
AERO-E-2			112	0.085		
AERO-E-3			124.3	0.081		
AERO-E-4	_	0.028	98.4	0.055	20.8	0.034
AERO-E-5	_	0.030	71.1	0.050	22.0	0.036
AERO-E-6	_	0.028	85.2	0.050	19.2	0.034
Moyenne	0	0.029	100.0	0.07	20.7	0.035

TABLEAU 19 Synthèse des résultats de mesures thermiques en fonction de la teneur en eau du produit avant vieillissement

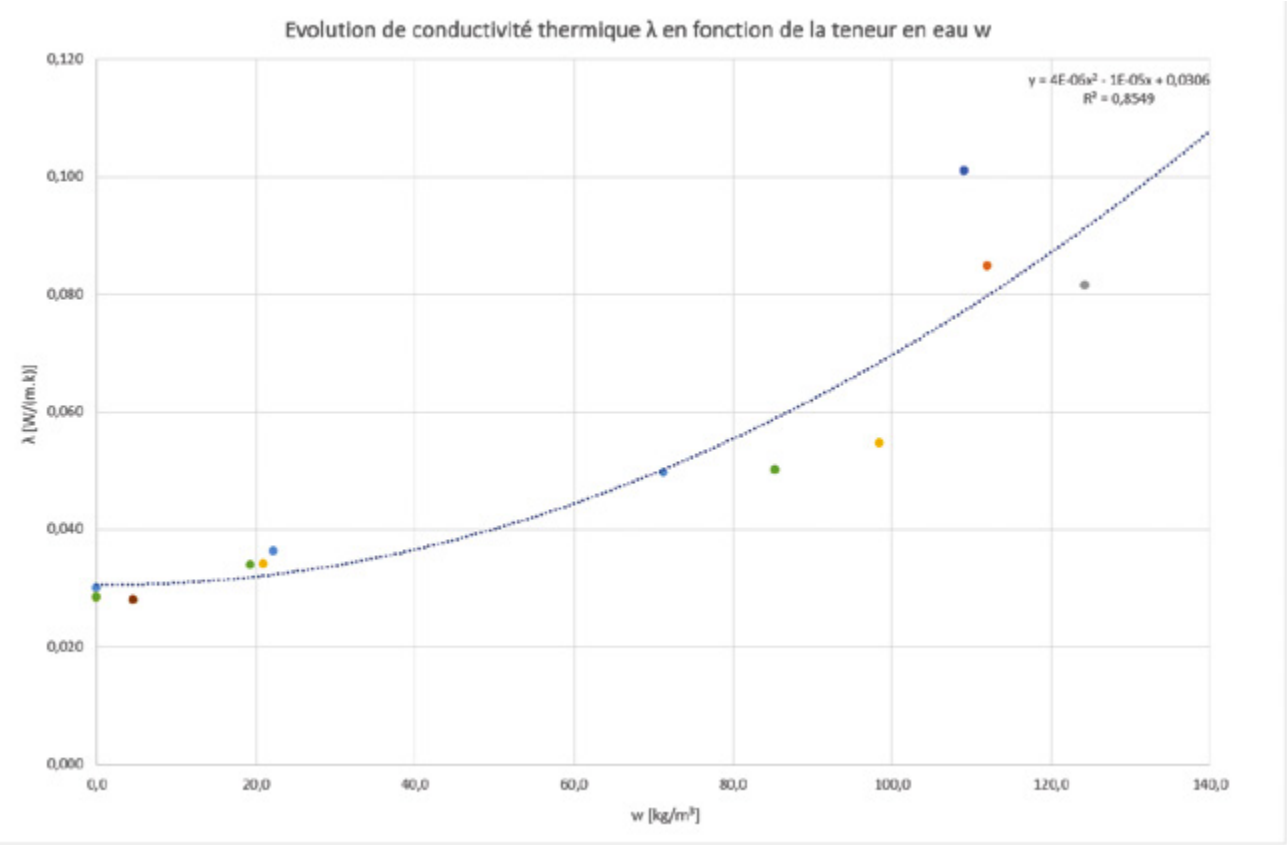


FIGURE 23 Courbe de variation de la conductivité thermique du produit Enduit en fonction de la teneur en eau

4.5.3 VIEILLISSEMENT DES PRODUITS

Une mesure thermique a été réalisée sur trois éprouvettes de chacun des produits avant et après vieillissement. Les éprouvettes ont été préalablement séchées. Après séchage elles ont été mesurées et ensuite conditionnées dans une étuve régulée à 70°C et 70 %HR à partir du 15 février 2021. Les éprouvettes ont été ensuite retirées de l'étuve le 31 mai puis le 21 juillet 2021 pour effectuer des essais thermiques après ce vieillissement.
Le Tableau 20 ci-dessous présente ces résultats.

Référence des éprouvettes	A l'état sec avant vieillissement		Après vieillissement à 70°C et 70 %HR pendant 120 jours		Après vieillissement à 70°C et 70 %HR pendant 172 jours	
	Masse volumique en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)	Masse volumique en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)	Masse volumique en kg/m^3	Conductivité thermique en W/(m.K)
AERO-B-1	180	0.018	177	0.018	178.2	0.023
AERO-B-2	173.7	0.018	173.3	0.019	171.8	0.023
AERO-B-3	181.5	0.017	180.4	0.018	180.2	0.022
AERO-E-4	153.7	0.028	159	0.028	158	0.029
AERO-E-5	160	0.030	167.6	0.029	164.3	0.028
AERO-E-6	151.1	0.028	162	0.029	165.4	0.028

TABLEAU 20 Synthèse des résultats de mesures thermiques avant et après vieillissement

4.5.4 REMARQUES

Le produit « Blanket » n'ayant pas d'évolution significative de sa teneur en eau, la conductivité de ce produit n'évolue que très peu avant 150 jours lorsqu'il subit un vieillissement dans une ambiance à 70°C et 70 %HR. Par contre après 150 jours il se produirait une dégradation non pas liée à l'évolution de la masse volumique car elle est identique où faiblement variable mais il est probable que cela soit liée à la dégradation des adjuvants complémentaires et notamment ceux concernant la protection de l'aérogel.
Avant 120 jours à 70°C et 70 %HR l'écart de teneur en eau est de 2 % environ et la variation de la conductivité thermique est de l'ordre de 8 %.
Après 170 jours, la conductivité thermique évolue significativement passant de 0.018 à 0.023, soit 5mW/(m.K) d'écart soit plus de 25 %.
Cela montre que les adjuvants qui peuvent être rajoutés ont une durée de vie limitée. Cette durée de vie est liée à la température et à l'humidité auxquelles le produit est exposé.
Des études complémentaires seraient nécessaires pour bien qualifier cette dégradation.
L'évolution de la teneur en eau du produit « Enduit » est beaucoup plus importante. Entre 0 et 80 %HR la variation de la teneur en eau est de l'ordre de 12 % ce qui conduit à une variation de la conductivité thermique de plus de 20 %.
Le vieillissement entrepris sur les éprouvettes d' « Enduit » n'entraine pas de modification sur les caractéristiques thermiques.

4.6 ESSAIS HYDRIQUES

Les essais hydriques sont de plusieurs natures. Ces essais sont destinés à identifier les effets de l'humidité sous forme liquide et vapeur sur le produit.
Ainsi ont été réalisés des essais de transferts de vapeur d'eau au travers des produits, pour :

- la détermination de la courbe de sorption pour quantifier la quantité d'eau absorbée par le produit stabilisé dans une ambiance
- la détermination de l'absorption d'eau liquide par capillarité pour évaluer la capacité des produits à absorber et à redistribuer de l'eau sous forme liquide.

Ces caractéristiques permettent d'évaluer un produit et peuvent être rajoutées dans la base de données des matériaux pour les prochaines simulations hygrothermiques.
La mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau est réalisée conformément à la norme NF EN ISO 12572. Les essais sont

réalisés sur 5 éprouvettes par la méthode de la coupelle. La température lors de la mesure est de 23°C. Le gradient d'humidité est réalisé avec d'une part une humidité de 0 %HR (chlorure de calcium) et d'autre part une humidité de 90 %HR. La différence de pression partielle est ainsi de 2528 Pa.
La détermination de la courbe de sorption est effectuée conformément à la norme NF EN ISO 12571. 3 éprouvettes sont nécessaires pour évaluer cette courbe de sorption. Les essais ont été réalisés à 23°C et pour des humidités de 0 %HR ; 50 %HR ; 80 %HR ; 90 %HR et 95 %HR. Les éprouvettes sont mises en étuves pour chacun des paliers jusqu'à masse constante.
Le coefficient d'absorption liquide est déterminé conformément à la norme NF EN ISO 15148. Ce coefficient est déterminé à partir de 3 éprouvettes par la méthode de l'immersion partielle. Les 3 éprouvettes sont placées dans un bac contenant de l'eau. Les éprouvettes sont maintenues dans 2 mm d'eau au maximum. La quantité d'eau absorbée est obtenue en pesant à intervalle de temps variable entre le début de l'essai et 96h.

4.6.1 PERMÉABILITÉ À LA VAPEUR D'EAU

Pour chacun des produits les paragraphes suivants présentent les résultats de mesure et la détermination des coefficients utiles pour évaluer la perméabilité à la vapeur d'eau.

FIGURE 24 Visualisation des coupelles utilisées pour les essais de perméabilité à la vapeur d'eau

4.6.1.1 « BLANKET »

Ci-dessous sont indiqués l'ensemble des résultats obtenus et les différentes caractéristiques permettant de qualifier la perméabilité à la vapeur d'eau.

Le Tableau 21 présente les différentes valeurs obtenues et la Figure 25 illustre l'évolution de la masse en fonction du temps permettant de déterminer les différentes valeurs.

Grandeur	Unité	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
Flux de transmission G	Kg/s	5^{E-8}	4^{E-8}	5^{E-8}
Facteur de correction de l'effet de bord masqué	_	1.07	1.04	1.09
Flux de transmission G corrigé	Kg/s	4^{E-8}	4^{E-8}	4^{E-8}
Correction de la résistance des	$(m^2.s.Pa)/kg$	1^{E11}	1^{E11}	1^{E11}
Résistance à la vapeur d'eau Z	$(m^2.s.Pa)/kg$	4^{E11}	4^{E11}	4^{E11}
Perméance à la vapeur d'eau W	$Kg/(m^2.s.Pa)$	3^{E-12}	3^{E-12}	3^{E-12}
Perméabilité à la vapeur d'eau μ	Kg/(m.s.Pa)	3^{E-11}	3^{E-11}	3^{E-11}
Epaisseur	mm	11	10.6	11.3
Coefficient de résistance au transfert de la vapeur d'eau μ (corrigé de la pression barométrique)	_	7	7	6
Coefficient de résistance équivalente de l'air Sd	m	0.07	0.07	0.07

TABLEAU 21 Synthèse des résultats de mesures de perméabilité à la vapeur d'eau et coefficients hydriques utiles pour le produit « Blanket »

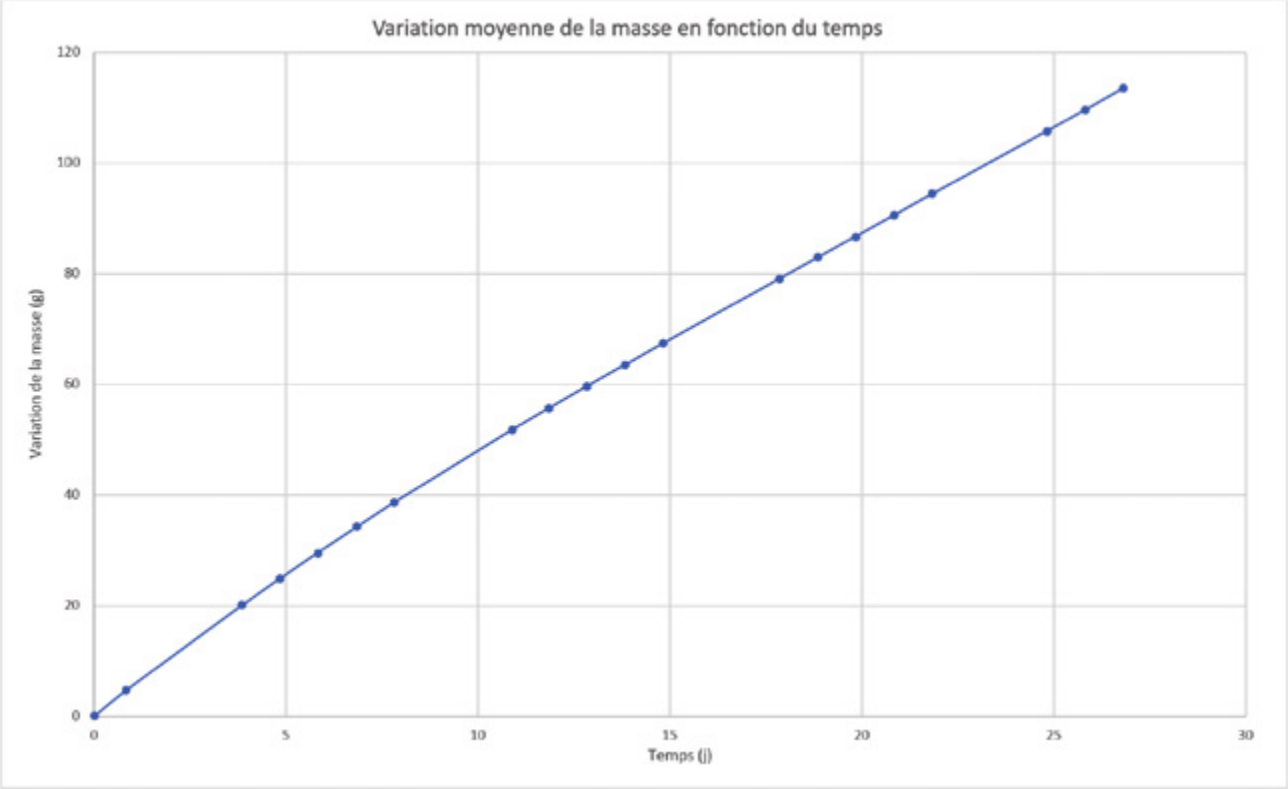


FIGURE 25 Courbe de variation de la masse moyenne des coupelles en fonction du temps du produit « Blanket ».

4.6.1.2 ENDUIT

Ci-dessous sont indiqués l'ensemble des résultats obtenus et les différentes caractéristiques permettant de qualifier la perméabilité à la vapeur d'eau.

Le Tableau 22 présente les différentes valeurs obtenues et la Figure 26 illustre l'évolution de la masse en fonction du temps permettant de déterminer les différentes valeurs.

Grandeur	Unité	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
Flux de transmission G	Kg/s	2^{E-8}	2^{E-8}	4^{E-8}
Facteur de correction de l'effet de bord masqué	_	1.09	1.04	1.13
Flux de transmission G corrigé	Kg/s	2^{E-8}	2^{E-8}	4^{E-8}
Correction de la résistance des	$(m^2.s.Pa)/kg$	1^{E11}	1^{E11}	1^{E11}
Résistance à la vapeur d'eau Z	$(m^2.s.Pa)/kg$	1^{E12}	1^{E12}	1^{E12}
Perméance à la vapeur d'eau W	$Kg/(m^2.s.Pa)$	9^{E-13}	7^{E-13}	9^{E-13}
Perméabilité à la vapeur d'eau δ	Kg/(m.s.Pa)	4^{E-11}	3^{E-11}	4^{E-11}
Epaisseur	mm	41.8	40.1	42.53
Coefficient de résistance au transfert de la vapeur d'eau μ (corrigé de la pression barométrique)	_	5	7	5
Coefficient de résistance équivalente de l'air Sd	m	0.23	0.29	0.21

TABLEAU 22 **Synthèse des résultats de mesures de perméabilité à la vapeur d'eau et coefficients hydriques utiles pour le produit Enduit**

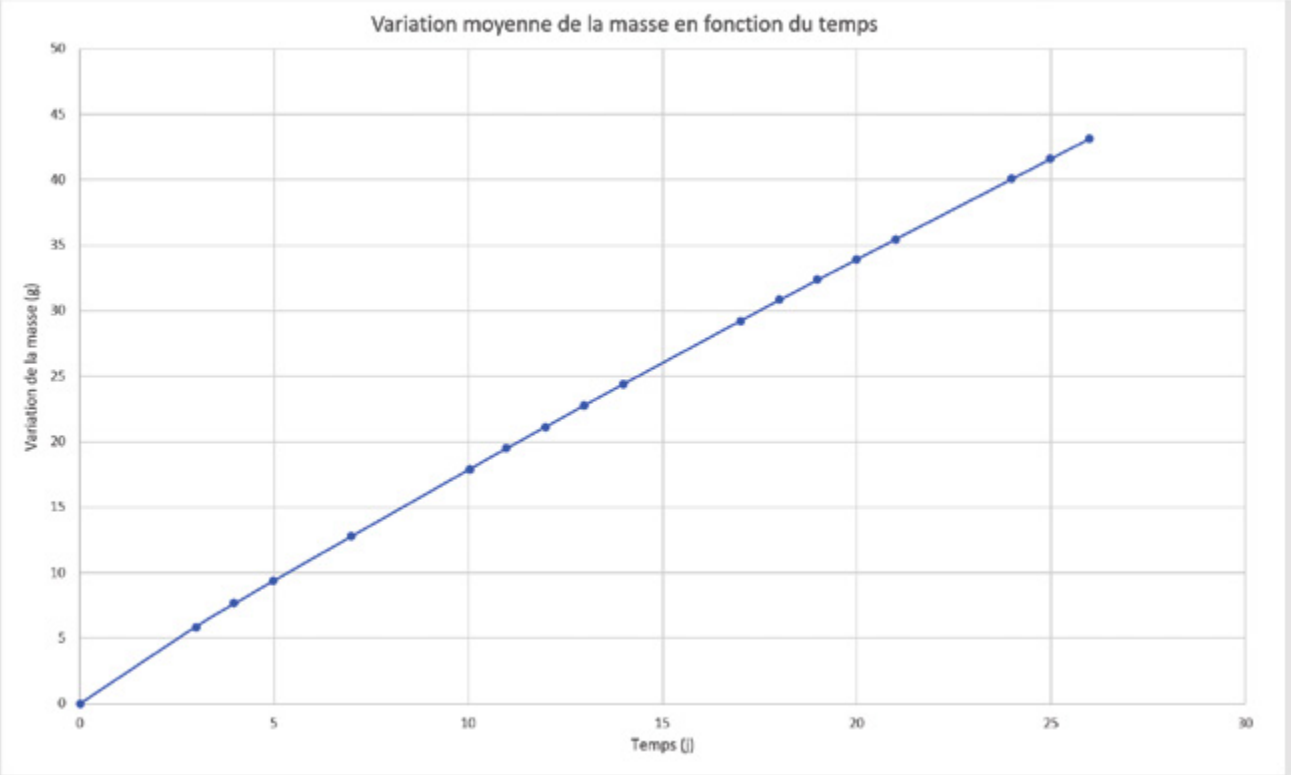


FIGURE 26 **Courbe de variation de la masse moyenne des coupelles en fonction du temps du produit Enduit.**

4.6.1.3 REMARQUES

Les deux produits obtiennent des valeurs μ et δ très proches. Ce sont des valeurs faibles équivalentes à celles d'un isolant fibreux de forte densité (150 kg/m^3).

4.6.2 ISOTHERME DE SORPTION

Pour chacun des produits les paragraphes suivants présentent les résultats de mesure permettant de définir la courbe de sorption (évolution de la teneur en eau dans le produit en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle les produits se trouvent).

4.6.2.1 « BLANKET »

Ci-dessous sont indiqués l'ensemble des résultats de teneur en eau en % en masse en fonction de l'humidité relative.
Le Tableau 23 présente les différentes valeurs obtenues et la Figure 27 illustre l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative permettant de tracer la courbe de sorption.

Humidité relative	Teneur en eau en % en masse en kg/m^3			
	AERO-B-12	AERO-B-13	AERO-B-14	moyenne
0 %HR	0	0	0	0
50 %HR	1.4	1.4	1.3	1.4
80 %HR	2.2	2.2	2.0	2.1
90 %HR	2.5	2.5	2.3	2.5
95 %HR	2.7	2.7	2.6	2.7

TABLEAU 23 Synthèse des résultats de mesures de reprise de masse en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle se trouve le produit « Blanket »

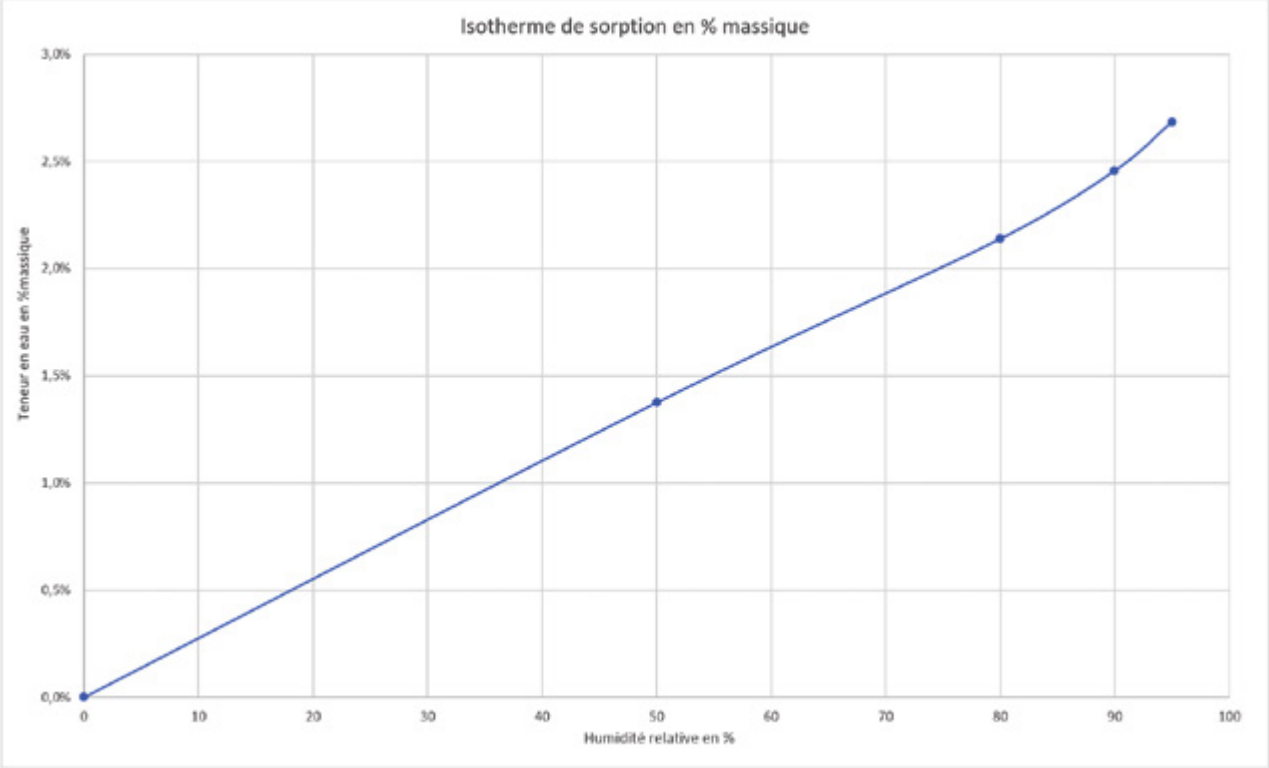


FIGURE 27 Courbe de variation de la masse moyenne des coupelles en fonction du temps du produit « Blanket ».

4.6.2.2 ENDUIT

Ci-dessous sont indiqués l'ensemble des résultats de teneur en eau en % en masse en fonction de l'humidité relative. Le Tableau 24 présente les différentes valeurs obtenues et la Figure 28 illustre l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative permettant de tracer la courbe de sorption.

Humidité relative	Teneur en eau en % en masse en kg/m^3			
	AERO-E-12	AERO-E-13	AERO-E-14	moyenne
0 %HR	0	0	0	0
50 %HR	3.0	2.9	3.0	2.9
80 %HR	11.9	11.2	11.7	11.6
90 %HR	14.2	13.3	13.9	13.8
95 %HR	15.3	14.3	14.9	14.8

TABLEAU 24 Synthèse des résultats de mesures de reprise de masse en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle se trouve le produit Enduit

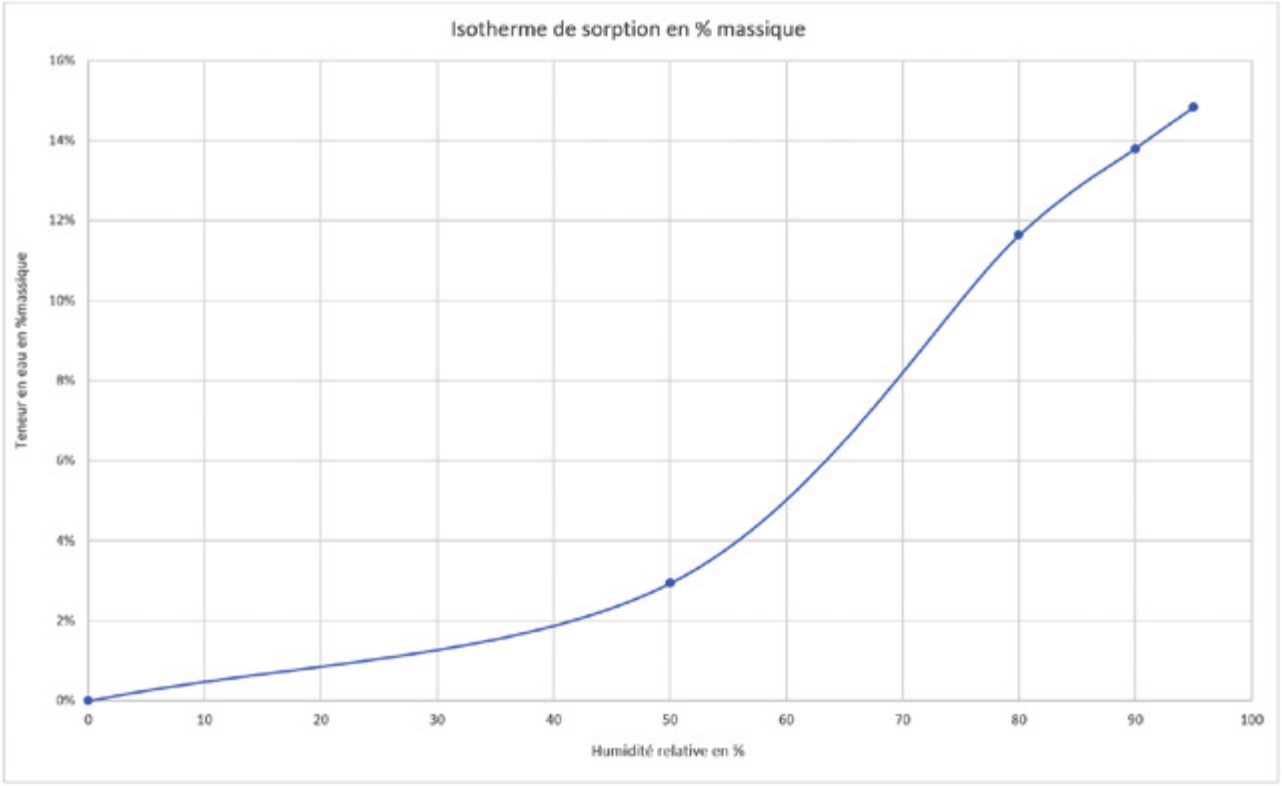


FIGURE 28 Courbe de variation de la masse moyenne des coupelles en fonction du temps du produit Enduit.

4.6.2.3 REMARQUES

Les courbes de sorption sont différentes entre les deux produits. Comme indiqué au début de la partie 4 le produit « Blanket » absorbe peu de vapeur d'eau contrairement au produit Enduit.
La courbe de sorption est presque linéaire pour le produit « Blanket ».

Pour le produit « Enduit » la courbe évolue plus rapidement à partir de 50 %HR. Il faudra faire attention lorsque le produit sera soumis à des humidités importantes.

4.6.3 ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITÉ

Pour chacun des produits les paragraphes suivants présentent les résultats de mesure permettant de définir le coefficient $A_{w,24}$ (coefficient d'absorption liquide par capillarité). Ce coefficient est obtenu à partir de la variation de l'évolution de masse en fonction de la racine carrée du temps.

4.6.3.1 « BLANKET »

Ci-dessous sont indiqués l'ensemble des résultats permettant de calculer le coefficient $A_{w,24}$.

La Figure 29 illustre l'évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carré du temps qui permet de déterminer le coefficient $A_{w,24}$ indiqué dans le Tableau 25 situé en dessous de la courbe.

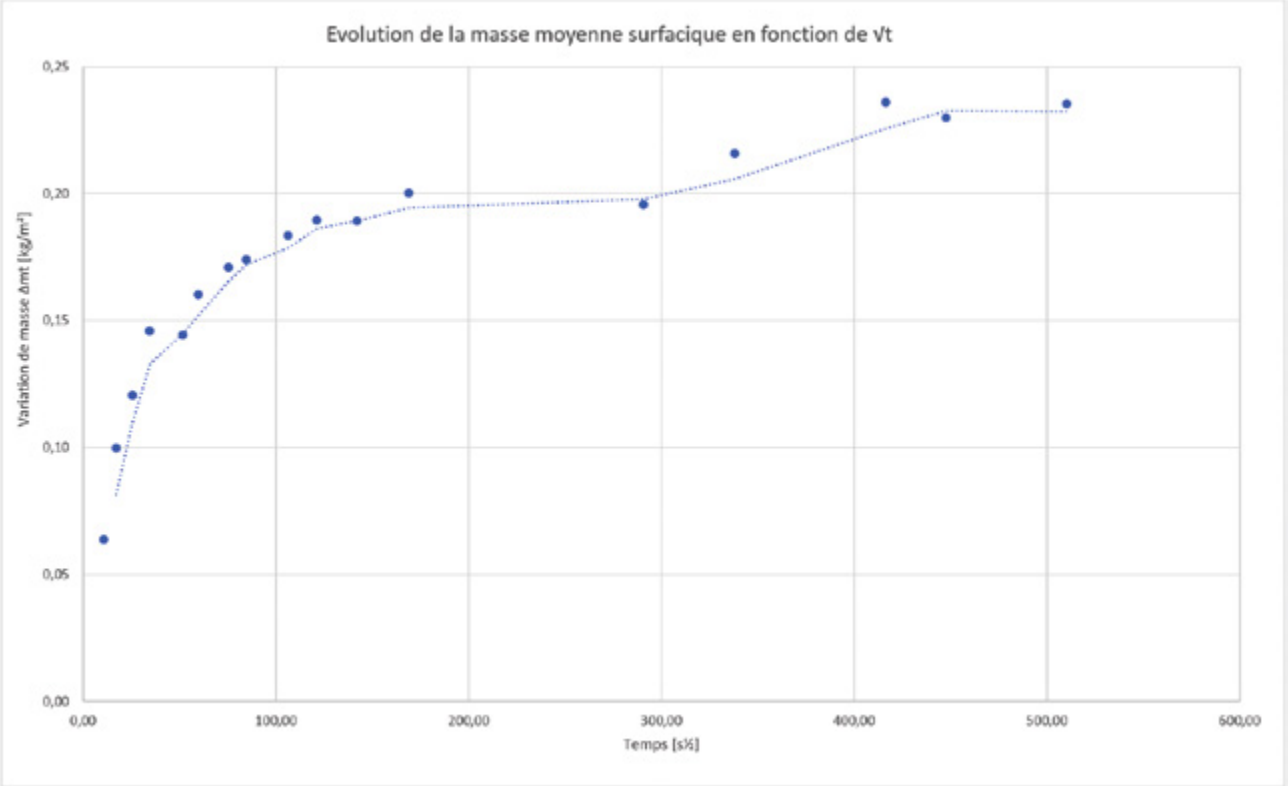


FIGURE 29 Courbe de variation de l'absorption d'eau moyenne des éprouvettes en fonction de la racine carré du temps du produit « Blanket ».

Référence des éprouvettes	Coefficient $A_{w,24}$ en kg/(m².s$^{1/2}$)
AERO-B-15	0.016
AERO-B-16	0.013
AERO-B-17	0.014
Moyenne	0.015

TABLEAU 25 Coefficients d'absorption d'eau liquide par capillarité des éprouvettes de « Blanket »

4.6.3.2 « ENDUIT »

Ci-dessous sont indiqués l'ensemble des résultats permettant de calculer le coefficient $A_{w,24}$.

La Figure 30 illustre l'évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carré du temps qui permet de déterminer le coefficient Aw,24 indiqué dans le Tableau 26 situé en dessous de la courbe.

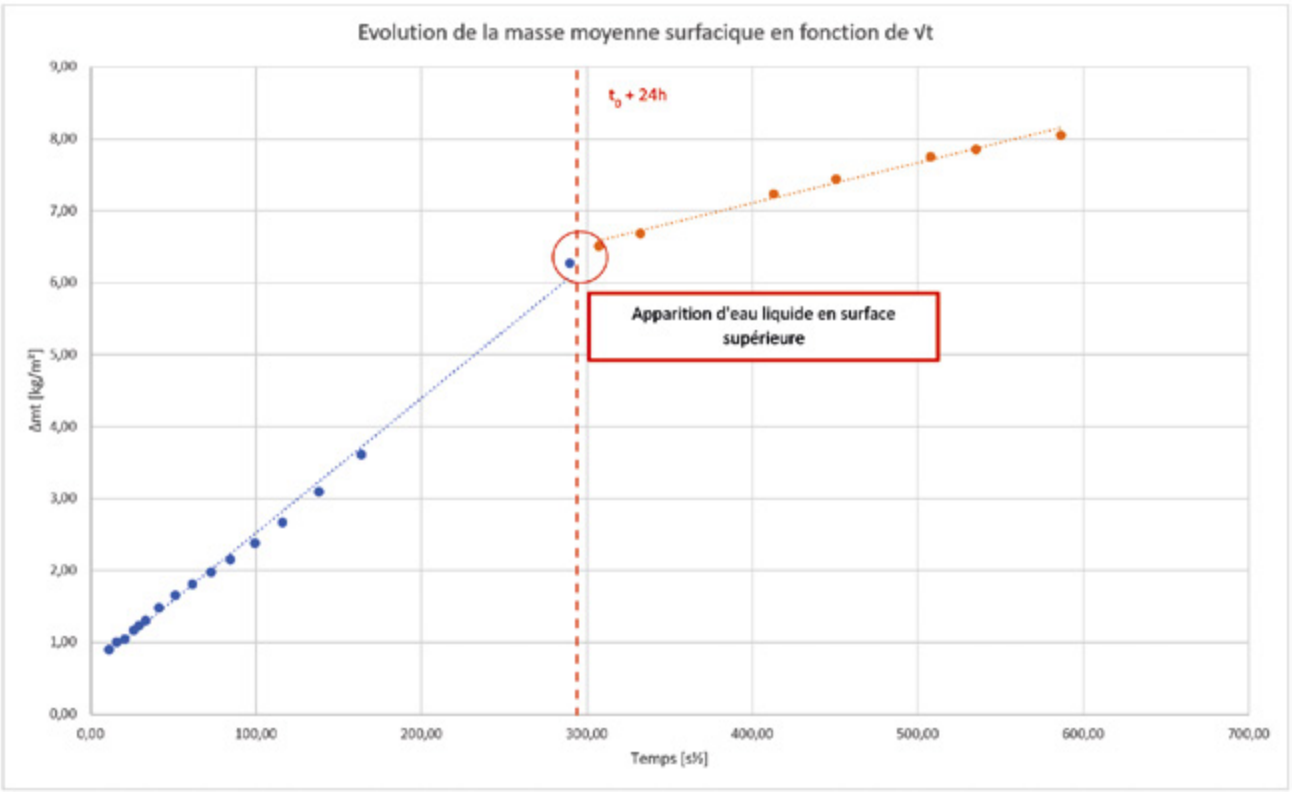


FIGURE 30 Courbe de variation de l'absorption d'eau moyenne des éprouvettes en fonction de la racine carré du temps du produit Enduit.

Référence des éprouvettes	Coefficient $A_{w,24}$ en kg/(m².s$^{1/2}$)
AERO-E-15	6.95
AERO-E-16	7.46
AERO-E-17	7.32
Moyenne	7.24

TABLEAU 26 Coefficients d'absorption d'eau liquide par capillarité des éprouvettes d'Enduit

4.6.3.3 REMARQUES

Le produit « Enduit » absorbe beaucoup plus d'eau par capillarité que le produit « Blanket ».
Le produit « Enduit » est très capillaire. Des tâches d'eau ont été observée sur la face supérieure des éprouvettes au bout de 24h ce qui prouve que le produit peut dans certaines circonstances absorber et redistribuer beaucoup d'eau. Les produits en contact avec ce produit dans une paroi doivent être non capillaire pour éviter toute accumulation d'eau.
La Figure 31 suivante illustre les remontées capillaires dans les éprouvettes.

FIGURE 31 **Photographies des éprouvettes lors des essais d'absorption capillaire.**

4.7 SYNTHÈSE

Le produit « Blanket » à l'initial n'était pas très humide. L'écart entre l'initial et le séchage est de l'ordre de 2 %.
Les éprouvettes du produit Enduit, en revanche, étaient très humides même sur des éprouvettes ayant 6 semaines après l'application. Ces dernières éprouvettes comportaient une teneur en eau en masse de plus de 80 % ce qui est énorme dans le milieu du bâtiment.
Le produit « Blanket » n'ayant pas d'évolution significative de sa teneur en eau, la conductivité de ce produit n'évolue que très peu. L'écart de teneur en eau étant de 2 % environ la variation de la conductivité thermique est de l'ordre de 8 %.
Le produit « Enduit » montre une évolution de la teneur en eau beaucoup plus importante. Entre 0 et 80 %HR la variation de la teneur en eau est de l'ordre de 12 % ce qui conduit à une variation de la conductivité thermique de plus de 20 %.
Le vieillissement n'entraine pas de modification sur les caractéristiques thermiques du produit « Enduit ».
En revanche lors du vieillissement du produit « Blanket » l'évolution de la conductivité thermique est très faible jusqu'à environ 150 jours d'exposition à 70°C et 70 %HR. Ensuite une dégradation significative est observée. Une évolution de plus de 25 % se produit à 175 jours.
L'absorption d'eau par capillarité est nettement plus importante dans le produit « Enduit » que dans le produit « Blanket ».
Le produit « Enduit » est très capillaire. Des tâches d'eau ont été observées sur la face supérieure des éprouvettes au bout de 24h ce qui prouve que le produit peut dans certaines circonstances absorber et redistribuer beaucoup d'eau. Les constituants en contact avec ce produit dans une paroi doivent être non-capillaires pour éviter toute accumulation d'eau.
Comme préconisé dans la description de la mise en œuvre du produit « Enduit », une couche étanche à l'eau liquide est à appliquer entre le produit « Enduit » et l'extérieur. Cette couche étanche à l'eau liquide doivent être bien appliquée et les caractéristiques de cette couche extérieure doit être en cohérence avec les caractéristiques de l'enduit, notamment l'accroche et les variations dimensionnelles.
Les caractéristiques thermiques à l'état sec sont en concordance avec les documentations commerciales des deux fabricants lorsqu'il n'y a pas de vieillissement.
En revanche il serait important de vérifier l'évolution des adjuvants insérés dans les différents produits isolants (aérogel ; produits biosourcés ; les laines minérales et les plastiques alvéolaires) et notamment dans les produits à base d'aérogel. Comme il est indiqué dans les paragraphes 4.5.4 et 4.5.5 le vieillissement de la caractéristique thermique entre 120 et 170 jours à 70°C et 70 %HR du produit « Blanket » change de pente comme s'il y avait un déclencheur. De plus en plus de composants annexes sont implantés dans les isolants pour améliorer leurs performances sans jamais avoir vérifié que ces produits complémentaires étaient durables.
L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau est faible pour le produit « Blanket » (0.3 mW/(m.K) par kg/m^3 de teneur en eau en masse). L'évolution de la conductivité thermique est plus importante pour le produit « Enduit ». Le produit « Enduit » absorbe beaucoup plus d'eau que le produit « Blanket ». La conductivité thermique évolue avec l'augmentation de la quantité d'eau contenue dans le produit. Les résultats montrent qu'à réception le produit Enduit contenait une énorme quantité d'eau (80 % d'augmentation d'eau en masse) ce qui a conduit à une augmentation de la conductivité thermique de 240 %. La variation de la conductivité thermique de l' « Enduit » en fonction de la teneur en eau est de 0.23 mW/(m.K) par kg/m^3 pour une teneur en eau comprise entre 0 et 90 kg/m^3 et de 2 mW/(m.K).

Le vieillissement ne dégrade que très peu la conductivité thermique des deux produits. Le produit « Enduit » est stable entre avant et après vieillissement. L'augmentation de masse est faible pour ce type de produit (4.5 % en masse). Le produit « Blanket » augmente d'environ 1 mW/(m.K) pour une stabilisation de la masse.
Le Tableau 27 ci-dessous rassemble les principaux résultats pour les deux produits :

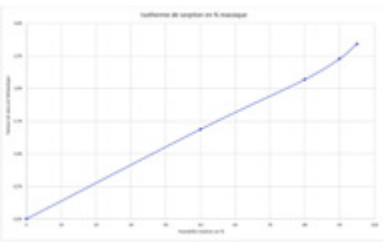
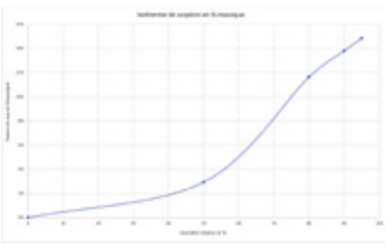
Caractéristiques	Unité	BLANKET	ENDUIT	
Masse volumique sèche	kg/m^3	175	155	
Masse volumique à 23°C et 80 %HR	kg/m3	178	159	
Conductivité thermique à l'état sec	W/(m.K)	0.017	0.029	
Conductivité thermique à l'état initial	W/(m.K)	0.018	0.07	Mv à 250kg/m^3
Conductivité thermique à l'état humide 23°C et 80 %HR	W/(m.K)	0.018	0.035	
Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau	W/(m.K)	λh = 0.0003w + 0.0169	λh = 0.000006w2 - 0.00001w + 0.0306	
Evolution de la conductivité thermique vieillie à 70°C et 70 %HR pendant 120j	W/(m.K)	0.001	Proche de 0	
Evolution de la conductivité thermique vieillie à 70°C et 70 %HR pendant 172j	W/(m.K)	0.005	Proche de 0	
Résistance au transfert de vapeur d'eau équivalente de l'air	m	0.07	0.23	
Facteur de résistance au transfert de vapeur d'eau	-	7	5	
Coefficient $A_{w,24}$	Kg/(m^2.s$^{1/2}$)	0.015	7.24	
Isotherme de Sorption				

TABLEAU 27 Synthèse des caractéristiques des deux produits

5 CONCLUSION GÉNÉRALE

Les produits d'isolation que l'on peut qualifier de « super isolants » sont une réalité et peuvent prétendre à être positionnés sur le marché de la rénovation d'immeubles et d'appartements en zone dense avec des prix de l'immobilier importants qui justifient le cout élevé du déploiement de ces solutions par rapport au gain de surface. En effet, l'excellente résistance thermique permet la mise en œuvre d'un complexe à moindre épaisseur. Cette étude s'est penchée sur les possibilités de solutions à base d'isolants sous vide pour des immeubles anciens de centre urbain tel que Paris ou Bordeaux et également de solutions à base d'aérogel fibreux et d'enduit contenant de l'aérogel. Plusieurs points ont fait l'objet d'attention particulière : l'utilisation de panneaux sous vide en rampants, les risques liés aux transferts hygrothermiques dans les appartements anciens isolés avec des complexes à base de PIV (Panneaux d'Isolants sous Vide) et les propriétés des produits aérogel fibreux et enduit aérogel sous diverses sollicitations d'humidité.

L'isolation par l'intérieur d'appartements à l'aide d'un complexe isolant composé de PIV et d'un isolant complémentaire pour terminer le calepinage, le tout recouvert d'une membrane pare vapeur dans la plupart des cas doit faire l'objet des mêmes recommandations que pour toute isolation par l'intérieur avec de points de vigilance supplémentaires. Retenons sans exhaustivité :

- Vigilance sur la présence d'un système de ventilation fonctionnel,
- Vigilance vis-à-vis de l'état des menuiseries et du liaisonnement avec le complexe isolant,
- Vigilance par rapport aux ponts thermiques qui peuvent être plus marqués avec un super isolant qu'avec un isolant classique de plus forte épaisseur. Attention dans l'ancien aux passages de planchers non traités qui diminueront l'efficacité de l'isolation et pourront générer des problèmes d'humidité.

La conductivité thermique certifiée pour les PIV varie essentiellement de 0,0027 à 0,0059 W/(m.K) suivant les technologies. Cela permet de mettre en œuvre un complexe isolant avec une très bonne résistance thermique et une épaisseur inférieure à 70 mm. Dans le cas de l'isolation en « chambre de bonne » au dernier niveau des immeubles anciens, en rampant ou en terrasson, une épaisseur de PIV seule ne suffit pas et doit être complétée par une couche supplémentaire d'isolant, entre chevrons par exemple. Ainsi deux configurations possibles sont proposées à la discussion avec les recommandations associées tel que la ventilation de la sous-toiture. Il s'agit de mettre en œuvre un isolant fibreux entre chevrons, de fixer une ossature bois ou métallique en sous face des chevrons pour supporter le calepinage PIV et isolant complémentaire, le tout recouvert d'une membrane pare vapeur, suivi d'un espace technique et de la finition en plaque de plâtre. Il est alors possible d'obtenir une quasi-continuité de l'isolation dans le plan des panneaux PIV, ce qui est l'objectif principal. L'épaisseur sous chevrons est limitée à 8 cm tout compris ce qui est évidement l'intérêt principal de cette solution.

La mise en œuvre de solutions hétérogènes en termes de propriété hygrothermique sur des parois anciennes qui peuvent être sujettes à la pluie battante et qui sont globalement perméables aux transferts de vapeur d'eau, peut présenter théoriquement un certain nombre de risques de pathologies liées à l'humidité. Tandis qu'en rampants, donc en sous toiture, la question sera liée à l'effectivité du renouvellement d'air entre la couverture et la face supérieure de l'isolant, en façade il y a, à priori, deux points qu'il apparait nécessaire de creuser. Le premier est le comportement de la paroi ancienne isolée par complexe PIV en cas de pénétration d'eau de pluie, le second est la condensation interne du fait de points singuliers qui sont des faiblesses d'étanchéité à l'air. Il s'avère que ces risques potentiels apparaissent à des fréquences très diverses après simulations hygrothermiques dynamiques sur différentes configurations et type de murs anciens. Globalement les façades en pierres de taille sont plus à risques que celles en pan de bois ou en briques. Les planchers métalliques sont plus à risques que les planchers bois. Le climat Bordelais est plus sévère que le climat Parisien et l'orientation nord dans le climat Bordelais présente le plus de risque. Pour réduire les risques hygrothermiques il est particulièrement recommandé de traiter les façades capillaires qui laissent entrer la pluie battante, celle-ci posant des difficultés dans les parois isolées avec un complexe étanche à la vapeur d'eau tel que les PIV. Enfin l'étanchéité à l'air doit être particulièrement soignée et les points singuliers que sont les traversées de plancher et les menuiseries doivent faire l'objet de travaux soignés et appropriés car ce sont les emplacements les plus sensibles identifiés.

Cette isolation de parois anciennes amène possiblement les produits isolants à être en contact de matériaux plus ou moins humides, notamment dans les situations les plus à risques identifiées précédemment. Pour cette raison, des mesures de propriétés de super isolant à base d'aérogel de silice ont été réalisées pour amener la discussion de leur utilisation dans ce type de situation.

Les deux produits testés présentent des conclusions différentes.

Ainsi l'enduit isolant à base de chaux et d'aérogel de silice confirme son statut de très bon isolant thermique et a bien répondu au test de vieillissement mais il est relevé que la conductivité thermique peut évoluer défavorablement de 20 % en situation d'humidité forte et il est donc recommandé de protéger cet enduit de la pluie par un enduit de finition approprié et faisant barrière à la pluie battante.

Concernant le produit « blanket » qui se présente comme une couche fibreuse d'aérogel de silice, le produit absorbe peu d'eau mais semble le faire davantage après vieillissement. Il est donc à priori nécessaire de ne pas trop l'exposer.

6 ANNEXES

6.1 PARAMÈTRES DE CALCUL WUFI 2D

Les paramètres de calcul présentés ci-dessous sont relativement classiques pour le logiciel WUFI 2D.

6.1.1 VERSION

La version utilisée est la 3.4.2.181.DB.24.77.

6.1.2 MAILLAGE

Un maillage intermédiaire a été utilisé. Ce maillage permet d'avoir une précision suffisante en préservant un temps de calcul raisonnable. Ce temps de calcul varie de 20 min pour des typologies simples (pierre de taille) à 2 h pour des typologies plus complexes (brique ancienne).

6.1.3 CONDITIONS INITIALES

L'humidité relative et la température initiales de tous les matériaux sont respectivement fixés à 80 % et 20°C.

6.1.4 CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions aux limites sont définies par les données climatiques, auxquelles s'ajoutent des coefficients de surface permettant de calculer les transferts de chaleur par radiation et par convection, ainsi que la pénétration de la pluie dans la paroi.

	Paroi extérieure	Paroi intérieure	Paroi adiabatique
Adiabatic/System Border	Non	Non	Oui
Treat as Indoor Surface	Non	Oui	Non
Heat Transfer Coefficient [W/m^2.K]	Calculé automatiquement	8	S.O.
Wind Dependent	Oui	Non	S.O.
Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	0,4	S.O.	S.O.
Long-Wave Radiation Emissivity [-]	0,9	S.O.	S.O.
Adhering Fraction of Rain	0,7	S.O.	S.O

TABLEAU 28 **Coefficients de surface utilisés**

Source. Cerema

6.1.5 DURÉE DE SIMULATION

La simulation est effectuée sur 10 ans.

6 2 CARACTÉRISTIQUES HYGROTHERMIQUES DES MATÉRIAUX

	Masse volumique ρ (kg/m^3)	Porosité e (m^3/m^3)	Chaleur massique sèche c (J/kg.K)	Conductivité thermique sèche à 10°C λ (W/m.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ (-)	Coefficient d'absorption d'eau A (kg/m^{2}s$^{0.5}$)	Coefficient d'absorption d'eau A (kg/m^{2}h$^{0.5}$)	Sources
Pan de bois, solive en bois	680	0,72	1400	0,14	190	0,0007	0,042	Bois dur, Règles de l'art – Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés Température/ Humidité dans les parois de Bâtiment, (CSTB, 2019)
Calcaire ferme	2350	0,1	850	2,2	80	0,0027	0,16	Pierre dure, idem
Brique perforée et peu poreuse, hourdis en brique	1745	0,33	1000	0,7	13	0,056	3,36	Brique ancienne peu capillaire, idem
Brique pleine et poreuse	1745	0,33	1000	0,7	13	0,307	18,42	Brique ancienne très capillaire, idem
Enduit plâtre, augets en plâtre	1 721	0,305	850	0,2	13	0,303	18,18	Plafonnage de plâtre, WUFI 2D
Enduit chaux, mortier fin à la chaux, enduit plâtre-chaux,	1 600	0,3	850	0,7	7	0,05	3	Enduit à la chaux, WUFI 2D
Enduit bâtard	1900	0,24	850	0,8	19	0,017	1,02	Enduit bâtard, WUFI 2D
Ciment Portland	2000	0,3	850	1,2	25	0,0085	0,51	Enduit au ciment, WUFI 2D
Poutrelle métallique	7800	1*10^{-8}	450	60	10^7	0	0	Acier, idem
Panneaux isolants sous-vide	200	0,001	800	0,0055	24000	0	0	AEROVIP
Laine de verre	30	0,95	840	0,035	1	0,083	4,98	Laine de verre, idem
Polyuréthane	40	0,95	1500	0,03	80	0	0	PUR, , idem
Frein-vapeur	130	0,001	2300	2,3	20000	0	0	Freine-vapeur (sd=20m), WUFI 2D
Frein-vapeur hygrovariable	130	0,001	2300	2,3	De 40 à 27000	0	0	ISOVER Vario XtraSafe, WUFI 2D

TABLEAU 29 Caractéristiques hygrothermiques des matériaux utilisés

Source. Cerema

6.3 COMPARAISONS DES CARACTÉRISTIQUES HYGROTHERMIQUES DES PANNEAUX ISOLANTS SOUS-VIDE

	WUFI 2D	Produit 1	Produit 2
Masse volumique ρ (kg/m^3)	200	Entre 170 et 210	Entre 160 et 210
Porosité e (-)	0,001	/	/
Capacité thermique spécifique, sec c (J/kg.K)	800	/	/
Conductivité thermique, sec λ (mW/m.K)	7	5.2	5.87
Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur μ (-)	1500*10^3	Entre 24*10^3 et 58*10^3 (Sd entre 1450 et 1200 m pour des panneaux de 25 à 50 mm, selon la norme EN 1931 état initial et vieilli)	Entre 100*10^3 et 520*10^3 (Sd du film de 4700 pour des panneaux de 9 à 47 mm selon la norme EN12572 :2014. (Condition B selon la norme EN12086 :2013))
Teneur en eau de référence w_{ref} (kg/m^3)	/	/	/
Teneur en eau à saturation libre w_{sat} (kg/m^3)	/	/	/
Coefficient d'absorption d'eau A (kg/m^{2}s^{-1})	/	/	/

TABLEAU 30 Comparaisons des caractéristiques hygrothermiques des panneaux isolants sous-vide

Source. Cerema

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION 4

2 POSSIBILITÉS DE MISE EN ŒUVRE 5

2.1 Mise en œuvre des isolants sous vide en site occupé 5
2.1.1 Typologies concernées 5
2.1.2 Diagnostic du site, visite de site en amont 5
2.1.3 Produits existants en parois verticales 11
2.1.4 Comparaison des méthodes de mise en œuvre 12
2.2 Méthode de mise en œuvre en parois inclinées – chambres de service 14
2.2.1 Mise en œuvre en chambre de service : spécificités et contraintes 15
2.2.2 Mise en œuvre sous brisis 16
2.2.3 Spécifications techniques et étapes de pose de la solution 2 21
2.3 Conclusion 23

3 LIMITATION DES RISQUES LIES À L'HUMIDITÉ SUR LES PAROIS ANCIENNES 24

3.1 Désordres liés à l'humidité 24
3.1.1 Inventaire 24
3.1.2 Choix des désordres à étudier 27
3.2 Paramètres et hypothèses de simulation des façades anciennes étudiées 27
3.2.1 Logiciel utilisé 27
3.2.2 Données climatiques 27
3.2.3 Typologie de façade ancienne 28
3.2.4 Système d'isolation PIV 32
3.2.5 Position de la coupe dans la façade 33
3.2.6 Modélisation des causes des désordres et des recommandations pour les éviter 33
3.3 Définition des indicateurs de risques 38
3.4 Résultats et recommandations particulieres 42
3.4.1 RappeL des configurations étudiées 42
3.4.2 Pan de bois/gravats, plancher bois et augets en plâtre à Paris 43
3.4.3 Pierre de taille, plancher bois et augets en plâtre à Paris 46
3.4.4 Pierre de taille, plancher bois et augets en plâtre à Bordeaux 52
3.4.5 Pierre de taille, plancher métal et augets en plâtre à Paris 55
3.4.6 Pierre de taille, plancher métal et augets en plâtre à Bordeaux 57
3.4.7 Brique ancienne, plancher métal et hourdis en brique perforée à Paris 59
3.5 Synthèse 62

TABLE DES MATIÈRES

4 CARACTÉRISATION ET BONNE UTILISATION DES PRODUITS À BASE D'AÉROGELS 63

4.1 Différentes évaluations existantes 63
4.1.1 Normes d'essais 63
4.2 Description des deux produits choisis 64
4.1.2 Certification 64
4.1.3 Avis technique 64
4.1.4 Appréciation technique d'expérimentation (ATEx) 64
4.3 Description des différents essais 65
4.3.1 Listes des essais realises 65
4.4 Essais d'identification 65
4.4.1 « Blanket » 66
4.4.2 « Enduit » 66
4.4.3 Remarques 66
4.5 Essais thermiques 66
4.5.1 « Blanket » 67
4.5.2 Enduit 68
4.5.3 Vieillissement des produits 69
4.5.4 Remarques 69
4.6 Essais hydriques 69
4.6.1 Perméabilité à la vapeur d'eau 70
4.6.2 Isotherme de sorption 73
4.6.3 Absorption d'eau par capillarité 75
4.7 Synthèse 77

5 CONCLUSION GÉNÉRALE 79

6 ANNEXES 81

6.1 Paramètres de calcul WUFI 2D 81
6.1.1 Version 81
6.1.2 Maillage 81
6.1.3 Conditions initiales 81
6.1.4 conditions aux limites 81
6.1.5 Durée de simulation 82
6.2 Caractéristiques hygrothermiques des matériaux 83
6.3 Comparaisons des caractéristiques hygrothermiques des panneaux isolants sous-vide 84

NOTES

RÉSUMÉ

Pour créer des logements plus confortables et avec une consommation d'énergie maitrisée dans des zones urbaines très tendues au niveau de l'immobilier tel que Paris ou les centres-villes des grandes métropoles, le traitement de certains appartements anciens avec des solutions innovantes hautes performances pour le traitement des parois semble une solution intéressante et à fort potentiel de développement. Les techniques à base de panneaux d'isolants sous vide, d'aérogel de silices incorporée dans des enduits ou en couche isolante fibreuse souple sont disponibles sur le marché mais encore rares et couteuses. Celles-ci ont l'immense avantage de permettre une résistance thermique performante avec une épaisseur ou surépaisseur réduite pour la paroi existante. Ce rapport explore les possibilités et investigue le comportement face à l'humidité de ces solutions en les imaginant utilisées dans des configurations d'appartements anciens, en partie courante, ou avec un focus sur les chambres de bonnes qui représentent un cas d'étude particulier où l'épaisseur de l'isolation est un facteur prépondérant.

Des possibilités de mise en œuvre d'isolants sous vide sont présentées pour des appartements occupés, pour des étages courants ou sous rampants. Pour les configurations sous rampants, une réflexion est présentée pour des configurations d'isolation efficaces avec épaisseur minimale pour essayer d'apporter des réponses aux problématiques de chambres de bonnes dans des immeubles traditionnels Haussmanniens ou assimilés, présents par exemple sur Paris. Un focus est fait sur les interventions à mener avec les points de vigilance vis-à-vis de travaux en site occupé.

Dans un second temps, à l'aide de simulations hygrothermiques dynamiques en 1 et 2 dimensions, différentes configurations de bâti anciens correspondant au cadre précédent sont étudiées pour analyser et prévenir d'éventuels risques liés à l'humidité dans les configurations d'isolation avec des panneaux d'isolants sous vide. Différents paramètres sont étudiés dans des climats type « Bordeaux » ou « Paris » et différents matériaux. Ceci conduit à formuler des mises en garde, des conseils et des perspectives d'études complémentaires.

Enfin, les résultats de deux campagnes d'essais en laboratoire sur deux familles de solutions d'isolation innovantes à faibles épaisseurs sont présentés :

- pour un matériau fibreux à base d'aérogel de silice « blanket » à haute résistance thermique
- pour un enduit épais à base de chaux augmenté d'aérogel de silice également afin d'obtenir une conductivité thermique de l'ensemble très performante.

Ces résultats donnent des indications sur les propriétés de ces types de produits, notamment vis-à-vis de l'humidité, ce qui comme vu dans la seconde partie est un enjeu majeur sur du bâti ancien..