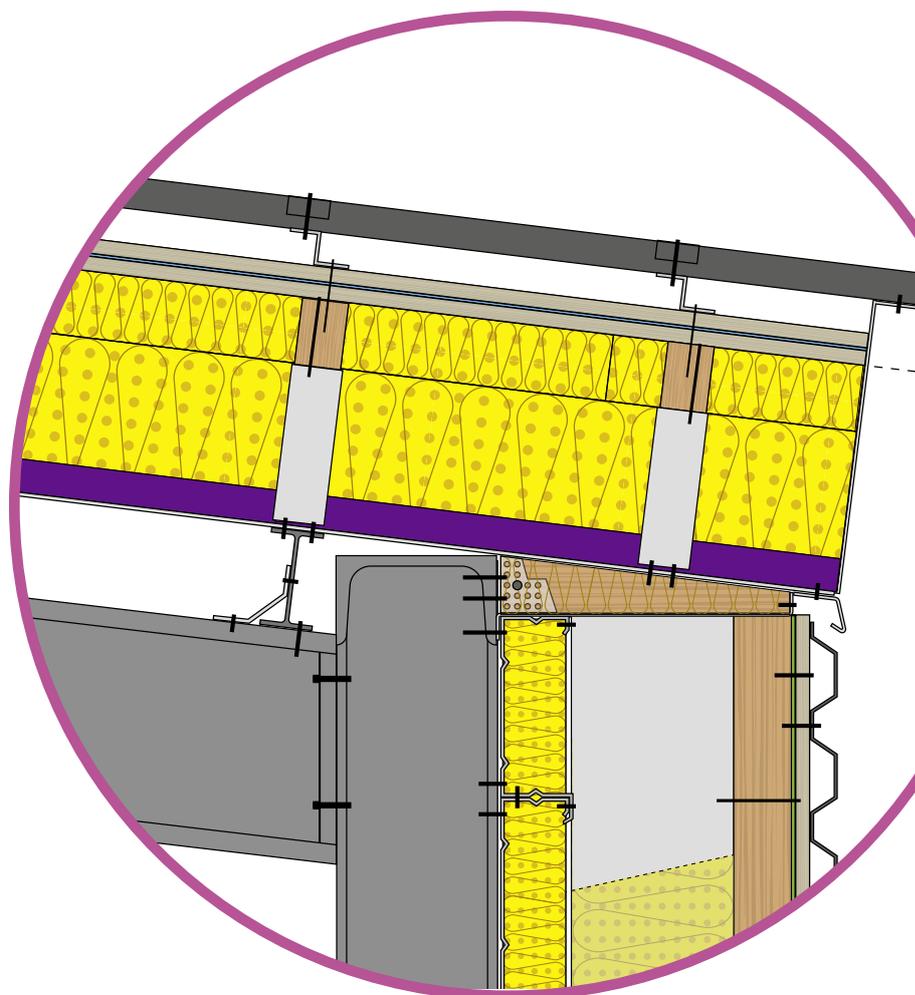


# SYSTÈMES D'ENVELOPPE ACIER DOUBLE PEAU AVEC ÉCARTEURS BOIS ET ISOLANT FIBRE DE BOIS

MARS 2024



# 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 8 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 RENO'BOX, un des 8 projets PROFEEL, 17 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



### Porteurs



### Financiers



### Filière Bâtiments

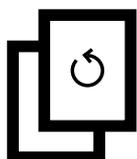


PROFEEL, un programme financé par le dispositif des certificats d'économie d'énergie (CEE)



# SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	4
2	OBJET DU RAPPORT DE SYNTHÈSE	5
3	ÉTAT DE L'ART	17
4	SYSTÈME DE BARDAGE DOUBLE PEAU AVEC ÉCARTEURS BOIS	18
5	SYSTÈME DE COUVERTURE DOUBLE PEAU AVEC FAUSSES PANNES BOIS	48
6	CONCLUSION	69



VERSION  
Initiale

DATE DE LA PUBLICATION  
Mars 2024

MODIFICATIONS

# 1

## INTRODUCTION

L'objectif de la neutralité carbone en 2050 nécessite, en plus de réduire les émissions de carbone des matériaux employés, de réduire la consommation d'énergie des bâtiments et notamment la consommation des bâtiments existants. Avec plus de 900 millions de m<sup>2</sup> de bâtiments tertiaires sur le territoire français, la rénovation énergétique de ces bâtiments représente un gisement considérable d'économie d'énergie.

La profession de l'enveloppe acier ayant une position très forte sur le secteur tertiaire (cf. tableau 1) est donc bien placée pour substituer des couvertures et des bardages acier vieillissants par des systèmes innovants, plus performants thermiquement et avec une empreinte carbone significativement plus faible.

**Tableau 1** Part de marché du bardage et de la couverture acier (Source BATIETUDE - Construiracier, septembre 2019)

Catégories de bâtiments tertiaires	Façade	Couverture
Commerces	42%	79%
Bureaux	31%	47%
Sports & loisirs & culture	25%	57%
Stockage/ logistique	82%	94%
Industrie	91%	96%

Souvent, la rénovation de l'enveloppe acier présente aussi l'avantage de pouvoir s'effectuer en milieu occupé (conservation du plateau acier, seuls l'isolant, les écarteurs et le parement extérieur sont remplacés). Dans ce cas, le maître d'ouvrage ne subit pas de perte d'exploitation et est donc plus enclin à substituer une couverture ou un bardage acier vieillissant par une nouvelle enveloppe acier plus performante énergétiquement mais aussi esthétiquement tout en assurant le maintien de l'ensemble des performances associées à ces techniques (mécanique en statique et dynamique, durabilité, thermique, acoustique, réaction au feu, développement durable).

C'est dans ce contexte que L'Enveloppe Métallique du Bâtiment (EMB) a développé, pour la rénovation énergétique des bâtiments tertiaires existants, deux systèmes innovants de bardage et de couverture double peau respectivement avec écarteurs ou fausses pannes bois, avec un isolant fibre de bois de la société Soprema.

Ce projet s'inscrit dans la suite du programme PROFEEL n° 1 <https://programmeprofeel.fr/>. Il reprend les acquis de PROFFEL 1 ainsi que les mêmes dispositions technologiques, mais étudie des performances supplémentaires pour la fibre de bois et ajoute l'utilisation innovante d'écarteurs /fausses pannes en bois rapportés sur les écarteurs/fausses pannes acier testés dans PROFEEL 1. <https://www.proreno.fr/documents/couverture-acier-avec-isolants-biosources-rapport-de-synthese>

# 2

## OBJET DU RAPPORT DE SYNTHÈSE

2

1

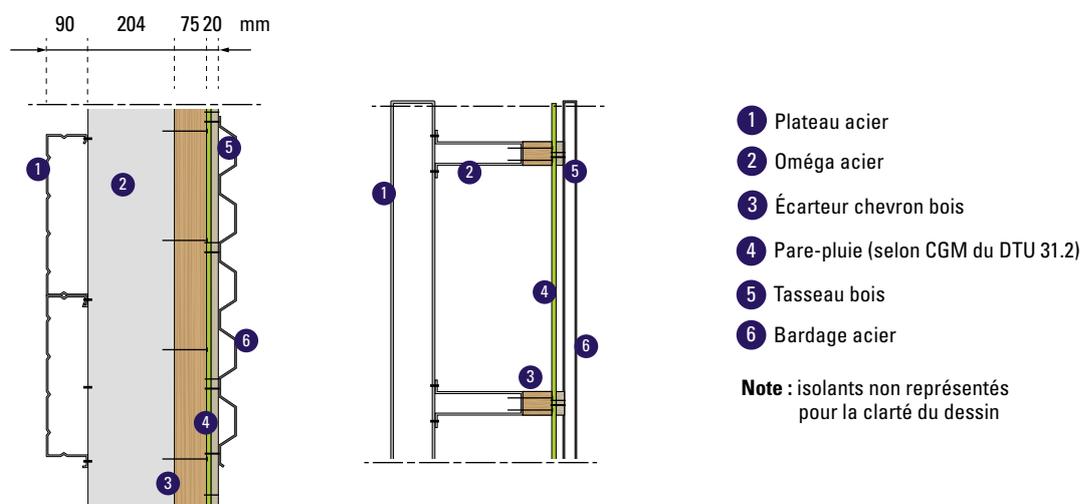
### SOLUTIONS INNOVANTES DÉVELOPPÉES ET MÉTHODOLOGIES DE DÉVELOPPEMENT ASSOCIÉES

#### 2.1.1 LES SOLUTIONS DÉVELOPPÉES

Le projet vise à développer deux nouvelles solutions bas carbone d'enveloppe acier dans la continuité de Profeel 1 avec les modifications suivantes :

- Un bardage double peau en acier avec écarteurs bois rajoutés sur les omégas en acier et isolant fibre de bois (Figure 1).
- Une couverture double peau en acier avec fausses pannes bois et isolant fibre de bois sur entretoises en acier (Figure 2).

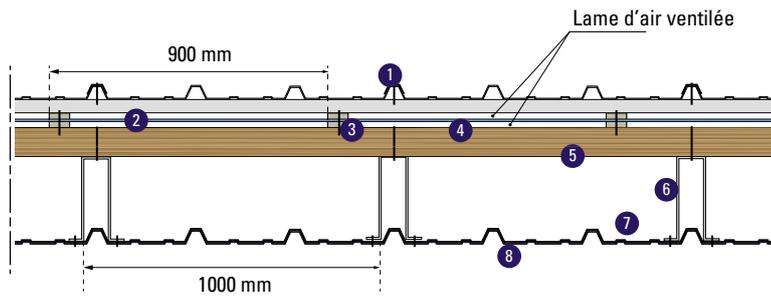
**Figure 1** Schéma de principe d'un bardage double peau acier avec écarteurs bois 63 x 75 mm sur oméga de 205 mm en acier tels que dans profeel 1 et isolant en fibre de bois (représenté sans isolant sur certaines figures pour des besoins de clarté)



La solution de couverture double peau avec fausses pannes bois est décrite ci-dessous.

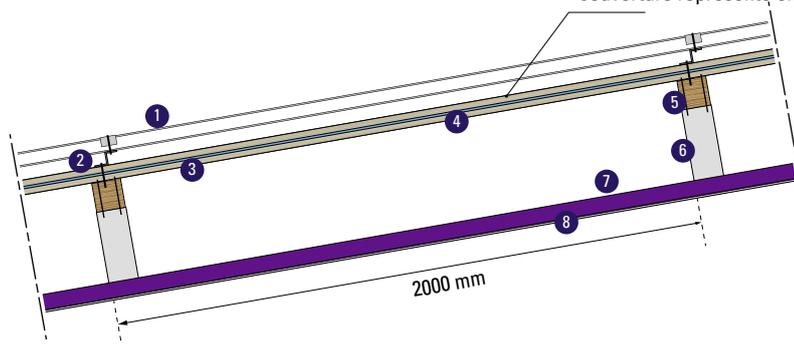
Coupe suivant rampant

**Figure 2** Couverture double peau acier avec fausses pannes bois 63 x 75 mm sur entretoises acier de 250 mm et isolant fibre de bois (représenté sans isolant sur certaines figures pour des besoins de clarté)



**Note :** isolants non représentés pour la clarté du dessin

Lame d'air ventilée au dessus et au dessous de l'écran souple de couverture représenté en vert



- |   |   |
|---|---|
| ① Profil 39T                                | ⑤ Fausse panne bois 63 x 75 mm                          |
| ② Z 40 x 40 x 40 mm                         | ⑥ Entretoise omega ponctuel 40 x 250 x 72 x 250 x 40 mm |
| ③ Support bois 60 x 20 mm                   | ⑦ Pare-vapeur   |
| ④ Écran sous toiture selon CGM du DTU 40.29 | ⑧ Profil 39T  |

## 2.1.2 MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DU BARDAGE DOUBLE PEAU AVEC ÉCARTEURS BOIS

### A) DE NOMBREUSES EXIGENCES À SATISFAIRE

Toute enveloppe doit simultanément satisfaire plusieurs exigences :

- Reprise du poids propre,
- Tenue au séisme sous les déplacements imposés dans le plan et accélération dynamique dans le plan,
- Tenue au vent en pression et dépression,
- Performance en réaction au feu,

- Performance de résistance au feu (étanchéité aux gaz chauds et fumée), isolation thermique (pas plus de 140° en moyenne et 180° ponctuellement),
- Confort acoustique (absorption acoustique, isolation acoustique, limitation de la réverbération)
- Performance thermique en partie courante et au droit des points singuliers, limitation des ponts thermiques intégrés,
- Stockage du carbone
- Démontabilité en vue d'un réemploi/réutilisation éventuel
- Durabilité dans le temps des composants
- Etanchéité à l'eau
- Perméabilité à l'air
- Ventilation de la lame d'air entre la peau extérieure et l'écran pare-pluie
- etc

L'objectif est de rechercher le meilleur compromis possible entre toutes ces exigences.

Dans le cadre de PROFEEL 1, la durabilité du bardage double peau avec lame d'air ventilée, où l'isolant en laine minérale avait été remplacé par de la fibre de bois, était positif. Il était donc intéressant de repartir de cette solution. PROFEEL 1 n'avait étudié que la tenue mécanique sous poids propre, la faisabilité d'exécution et de démontage de la solution (pour vérifier l'état des isolants après neuf mois d'exposition aux intempéries) et la durabilité de l'isolant fibre de bois.

Tous les autres critères de dimensionnement de l'enveloppe n'avaient pas été examinés, ce qui est donc l'objet du présent projet. S'ajoute aussi la nécessité de stocker du carbone (RE2020) d'une part, et d'améliorer la performance thermique de l'ensemble d'autre part pour tendre vers des coefficients de transmission surfacique  $U_p$  de 0.15 W/m<sup>2</sup>.K. L'ajout d'écarteurs bois en sapin de classe 2, déjà utilisé en bardage rapporté, a alors semblé une solution intéressante.

## B) TENUE MÉCANIQUE D'ENSEMBLE EN STATIQUE ET DYNAMIQUE

Les omégas en acier tels que mis en œuvre dans la solution PROFEEL 1 sont conservés, car ils apportent une bonne tenue mécanique (répartition des charges verticales sur l'ensemble des plateaux), une continuité des efforts de pression ou dépression au vent entre les plateaux intérieurs et la peau extérieure via les vis de fixations, une maîtrise de l'épaisseur d'isolant en plusieurs couches. Ils permettent aussi, plutôt que de fixer des écarteurs bois directement sur les lèvres de plateaux qui se prêtent mal à cette fixation, de fixer directement sur la semelle de l'écarteur qui présente un appui meilleur. Ce système permet également de rattraper en partie la tolérance de fabrication du bois.

Les écarteurs bois ne font pas toute l'épaisseur de la paroi car ils sont trop lourds et nécessitent des reprises de charges de poids propre soit par suspente en partie haute soit par appui sur longrine en partie basse.

L'écarteur oméga présente aussi l'avantage de pouvoir servir de support à l'écarteur bois sans avoir recours à des solutions alternatives comme des sabots de charpente ou cornière ou vis traversante si l'écarteur est de faible épaisseur.

De plus, l'écarteur oméga permet par ses doubles ailes d'assurer le maintien sismique sous effort dans le plan en décomposant les moments d'arrachement en des efforts maîtrisés, quantifiés.

## C) TENUE MÉCANIQUE AU VENT EN PRESSION ET DÉPRESSION

La peau extérieure est en appui sur les chevrons. Les profils, après une détermination des efforts agissants au vent selon l'Eurocode vent, sont établis à partir des fiches techniques Eurocodes. Les fixations sont adaptées au support bois comme cela est défini dans les Recommandations Professionnelles sur les bardages en acier protégé et en acier inoxydable [juillet 2014].

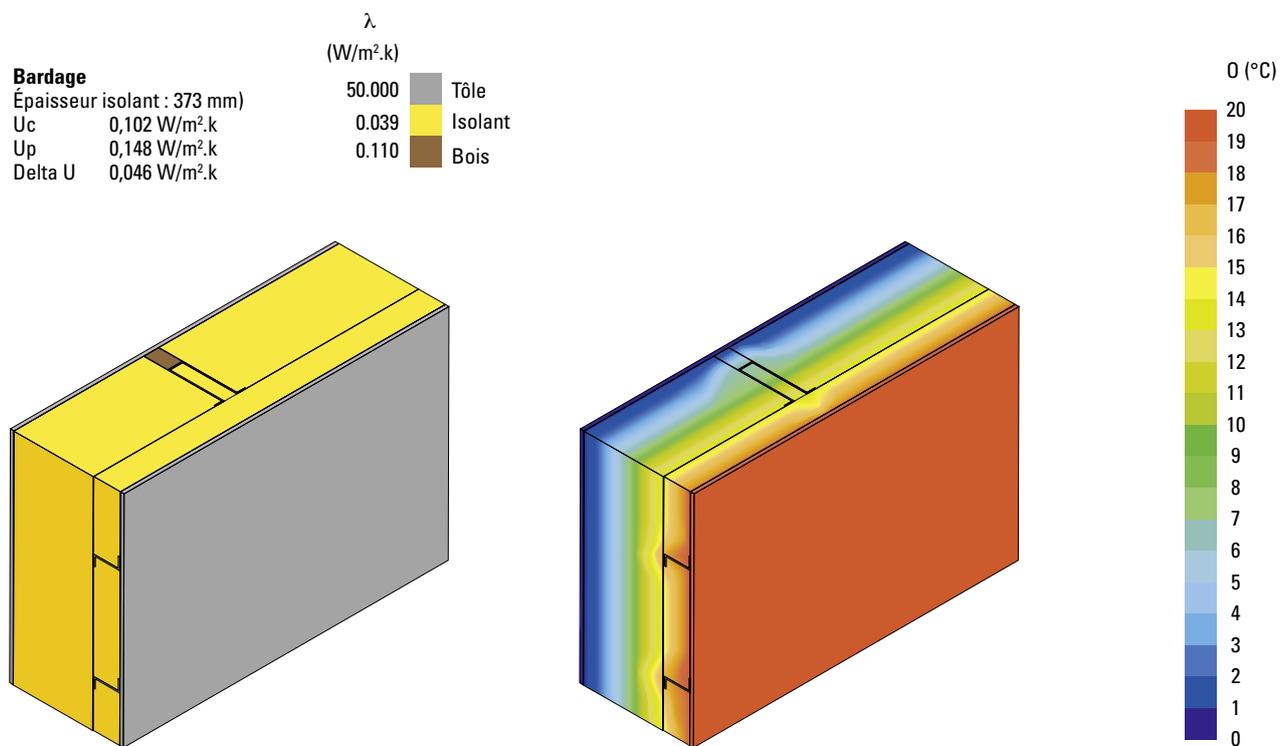
La peau intérieure (plateaux) est en appui sur la structure du bâtiment. Les plateaux, après une détermination des efforts agissants au vent selon les Recommandations Professionnelles sur les bardages en acier, sont établis à partir des fiches techniques Eurocodes. Les fixations sont adaptées au support bois ou béton avec inserts ou acier comme défini dans les Recommandations Professionnelles sur les bardages en acier.

#### D) DÉTERMINATION DE LA PERFORMANCE THERMIQUE

Le chevron bois permet de jouer le rôle de rupteur de pont thermique intégré en bloquant le flux de chaleur entre l'oméga acier et la paroi extérieure acier. Il améliore donc considérablement la performance de la paroi. Il permet aussi de stocker du carbone dans le système d'enveloppe en complément de l'isolant bio-sourcé.

Un pré-calcul a été effectué par le CTICM (Voir Figure 3) pour évaluer la performance thermique d'ensemble du bardage avant de lancer tous les essais. Le résultat est donné ci-dessous.

**Figure 3** Evaluation de la performance thermique d'un bardage double peau avec un écarteurs bois complémentaire de 63 x 75 mm sur oméga de 200 mm (Source AB CTICM)



#### NOTE



Valeur de 0,039 W/(m<sup>2</sup>.K) issue de la valeur forfaitaire et sécuritaire prise à défaut des valeurs exactes dans le cadre d'une pré-étude de faisabilité des solutions.

La performance U<sub>p</sub> de 0,148 W/m<sup>2</sup>.K est compatible avec les exigences de la RE2020

### E) PERFORMANCE CARBONE VALABLE POUR L'ISOLANT EN FIBRE DE BOIS DE SOPREMA

L'écarteur bois permet de stocker le carbone requis par la RE2020 (voir Tableau 2 ci-dessous).

Une pré-évaluation a été faite pour une performance thermique  $U_p$  d'environ  $0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

**Tableau 2** Évaluation du carbone pour le système de bardage double (kg eq.CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>)

		TOTAL sans Module D	Module D	TOTAL avec Module D
		kg eq. CO <sub>2</sub>	kg eq. CO <sub>2</sub>	kg eq. CO <sub>2</sub>
Plateau acier	HACIERBA 1.500.90BS ép. 0,75 mm	23,2	-10,4	12,8
Isolant en fibre de bois Soprema devant plateau de 2x100+80 mm	2,325x (isolant en fibre de bois Soprema 120 mm $\lambda = 0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	3,2	-4,4	-1,2
Pare-pluie 0,2 mm Sd 0,02	DED (Donnée environnementale par défaut)	1,2	0,0	1,2
Oméga 1,5 mm 40x205x60x205x40	Poutre en éléments minces	4,0	-1,4	2,6
Liteaux bois 63x20	Ossature Douglas	1,0	-0,3	0,6
Isolant en fibre de bois Soprema en fond de plateau de 90 mm	1,5x (isolant en fibre de bois Soprema 60 mm $\lambda = 0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	1,0	-1,4	-0,4
Bardage acier	TRAPEZA 6.175.25B/HB ép. 0,75 mm	18,9	-7,9	11,0
Ecarteur bois (sapin) 63x75	Ossature Douglas	0,4	-1,1	-0,7
<b>TOTAL</b>		<b>53,0</b>	<b>-27,0</b>	<b>26,0</b>

### F) DURABILITÉ/VENTILATION DU SYSTÈME DOUBLE PEAU AVEC ÉCARTEURS BOIS

La lame d'air ventilée de 20 mm minimum et le pare-pluie permettent d'assurer une ventilation des écarteurs bois, et de protéger l'isolant biosourcé de l'humidité et des attaques des insectes.

### G) PERFORMANCE ACOUSTIQUE

Le même principe que celui du programme Profeel 1 a été retenu : les plateaux sont perforés et remplis d'un premier feutre acoustique avec pare-vapeur, puis l'isolant biosourcé est mis en œuvre au-dessus.

### H) RÉACTION AU FEU

Elle est testée et quantifiée. La faible quantité de bois et la lame d'air évitent l'attaque directe du pare-pluie par l'incendie. Des essais SBI avec un feu venant de l'intérieur sont réalisés au CSTB.

### I) RÉSISTANCE AU FEU

Elle est à voir au cas par cas. Elle n'est pas testée dans le cadre de cette étude.

### J) ETANCHÉITÉ À L'EAU

Elle est assurée notamment par la peau extérieure, les fixations avec rondelles d'étanchéité, les conditions de recouvrement des profils et de traitement des points singuliers tels que spécifiés dans les Recommandations Professionnelles RAGE bardages en acier protégé et en acier inoxydable (juillet 2014).

### K) PERMÉABILITÉ À L'AIR

Elle est assurée dans les mêmes conditions que dans les Recommandations Professionnelles Rage bardages en acier (juillet 2014).

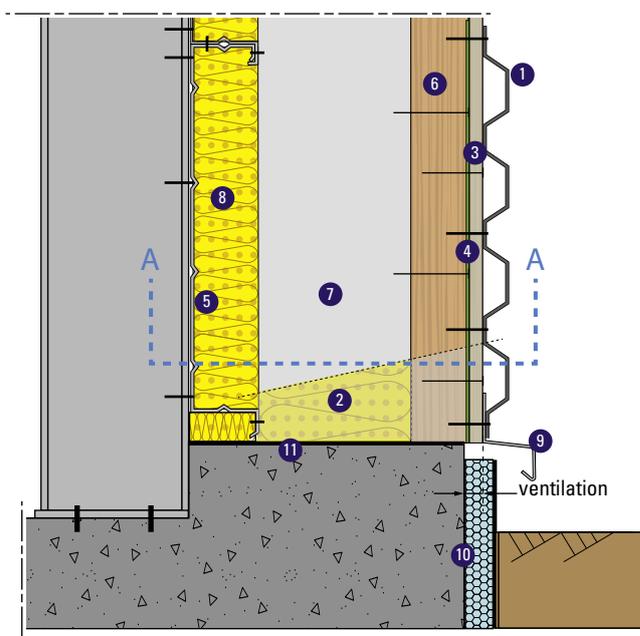
### L) RÉEMPLOI ET RÉUTILISATION

L'ensemble du système est assemblé par vis et est donc démontable. Il convient de se référer aux textes en cours de rédaction à la date du présent rapport définissant les conditions de réemploi des divers composants du bardage en fonction notamment des divers protocoles et diagnostics nécessaires pour la requalification des produits.

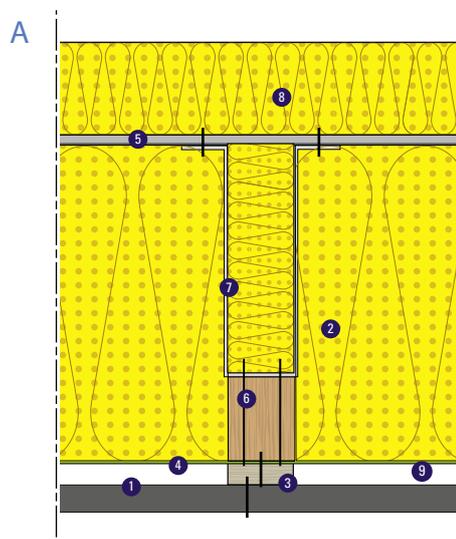
### CONCLUSION

La constitution du bardage double peau, de l'intérieur vers l'extérieur, est donnée à la figure 4 ci-dessous :

**Figure 4** Composition détaillée du bardage double peau avec écarteurs bois



- 1 Bardage en acier en pose horizontale d'épaisseur nominale 0,75mm
- 2 Isolation biosourcée en fibre de bois devant plateau : 2 couches de 100 mm et une couche de 80 mm de conductivité thermique égale à 0,038 W/(m.k)
- 3 Tasseaux bois en épicéa ou en pin, de classe d'emploi 2 et de classement mécanique C18 (63 × 20 mm) fixés sur l'écarteur chevron bois n° 6
- 4 Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm ( $S_d = 0,02$  m) / (Perméabilité à l'air < 0,10 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>) selon DTU 31.2
- 5 Plateau de bardage 500/90 en acier d'épaisseur 0,75 mm
- 6 Écarteur chevron bois en épicéa ou en pin de classe d'emploi 2 et de classement mécanique C18 (63 × 75 mm) fixé mécaniquement sur l'écarteur en acier n° 7
- 7 Écarteur oméga en acier (40 × 205 × 60 × 205 × 40 mm) d'épaisseur 2 mm
- 8 Isolant biosourcé en fibre de bois dans plateau de bardage dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.k)
- 9 Bavette rejet d'eau en acier d'épaisseur 0,63 mm
- 10 Complément d'isolation dont la conductivité thermique est égal à 0,038 W/(m.K)
- 11 Barrière d'étanchéité et anti-capillarité.



- ① Bardage acier en pose horizontale d'épaisseur nominale 0.75mm
- ② Isolation biosourcée en fibre de bois devant plateau, 2 couches de 100 mm et 1 couche de 80 mm de conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m. K)
- ③ Tasseaux bois (63 x 20 mm) fixé mécaniquement sur l'écarteur chevron bois n°6
- ④ Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm ( $S_d = 0,02$  m)/Perméabilité à l'air < 0,10 m³/h. m² selon DTU 31.2
- ⑤ Plateau de bardage 500/90 en acier d'épaisseur 0,75 mm
- ⑥ Écarteur chevron bois en épicéa ou en pin de classe d'emploi 2 et de classement mécanique C18 (63 x 75 mm) fixé mécaniquement sur l'écarteur oméga n° 7
- ⑦ Écarteur oméga en acier (40 x 205 x 60 x 205 x 40 mm) d'épaisseur 2 mm
- ⑧ Isolant biosourcé en fibre de bois dans plateau de bardage dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/m. K)
- ⑨ Lamé d'air ventilée

Précisions sur la partie métallique :

- Peau extérieure ep nominale 0,75 mm en pose horizontale et 0,63 mm en pose verticale ;
- Epaisseur nominale de la tôle (plateau 90 mm x 500 mm, plaque nervurée horizontale) : 0,75 mm ;
- Lamé d'air ventilée de 20 mm entre la peau extérieure et l'écran pare-pluie ;
- Ecarteurs Oméga acier : hauteur 205 mm et 40 mm de largeur de semelle ;
- Epaisseur nominale des écarteurs : 2,0 mm ;
- Ecarteurs oméga, complétés par un chevron en sapin 63 x 75 mm de classe d'emploi 2 et de classement mécanique C18 ;
- Film pare-pluie épaisseur 0,2 mm ( $S_d$  0,02 m) selon DTU 31.2 (dito Profeel 1), se référer à la QB38 pour choisir le pare-pluie disposant de ce  $S_d$  ;
- Profondeur de plateau : 90 mm ;
- Largeur de plateau : 500 mm ;
- Plateaux perforés ou non (perforés pour le test acoustique) ;
- Densité des vis de fixation des écarteurs = nombre de croisement écarteur/lèvre (vis acier de diamètre 6,3 mm) ;
- Densité de fixation de l'isolant = 2 fixations/m² (vis acier de diamètre 6,3 mm).

## POINT DE VIGILANCE



Une attention particulière doit être portée sur le choix du Sd du film pare-pluie retenu ici (issue dans ce rapport de la fiche technique de l'écran pare-pluie utilisé sur le programme Profeel 1). En effet, il est nécessaire d'avoir les rapports d'essais d'origine des écrans pour avoir le lien entre le Sd et la classe certifiée.

## 2.1.3 MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA COUVERTURE AVEC FAUSSES PANNES BOIS

### A) DE NOMBREUSES EXIGENCES À SATISFAIRE

La démarche de conception est identique à celle des bardages pour ce qui est de l'ajout de chevrons bois. A savoir :

- la nécessité d'une ventilation de la couverture et de l'écran de sous-toiture qui va récupérer les éventuels condensats en sous-face de bacs,
- la nécessité de protéger les fibres de bois en phase provisoire,
- la nécessité de limiter les pénétrations de vapeur d'eau venant de l'intérieur du bâtiment dans le complexe compte tenu de la nature de l'isolant biosourcé,
- nécessité de gérer les condensats sous la tôle de couverture.

### B) PERFORMANCE MÉCANIQUE

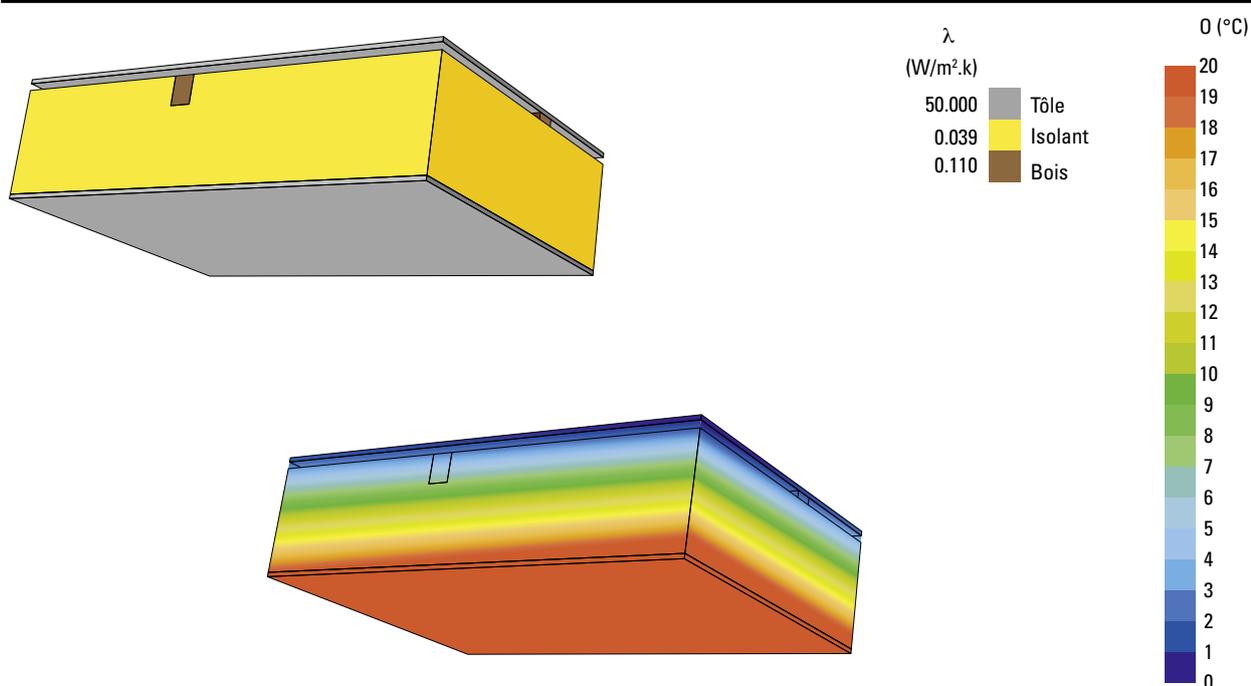
Les chevrons bois et litonnage doivent être dimensionnés selon les référentiels en vigueur pour reprendre les actions et combinaisons d'actions liées au poids propre, vent, neige, entretien de la couverture. Les bacs, entretoises et fausses pannes et les différents assemblages sont à dimensionner selon le DTU 40.35.

### C) PERFORMANCE THERMIQUE

Afin de limiter les ponts thermiques les chevrons bois sont mis en œuvre sur des entretoises ponctuelles.

Comme procédé pour la partie bardage, la performance thermique a été vérifiée par un calcul aux éléments finis par le CTICM avant de réaliser les essais (Voir Figure 5 ci-dessous).

La valeur obtenue est de :  $U_p = 0,143 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

**Figure 5** Évaluation de la performance thermique de la couverture [Source AB CTICM]**NOTE**

La valeur de 0,039 W/(m<sup>2</sup>.K) est une valeur forfaitaire de calcul utilisée dans le cadre de la pré-étude.

**D) PERFORMANCE CARBONE VALABLE POUR L'ISOLANT EN FIBRE DE BOIS SOPREMA**

La performance carbone est tout à fait correcte pour une performance thermique  $U_p$  estimée à 0,43 W/m<sup>2</sup>.K (voir tableau 3 ci-dessous) :

**Tableau 3** Évaluation du carbone pour le système de couverture double peau

		TOTAL sans Module D	Module D	TOTAL avec Module D
		kg eq. CO <sub>2</sub>	kg eq. CO <sub>2</sub>	kg eq. CO <sub>2</sub>
Peau extérieure 0,63 mm	TRAPEZA 3.333.39T	16,7	-7,2	9,5
Fausse panne Z 1,5 mm 40x40x40 tous les 2 m	Poutre en éléments minces	2,0	-0,7	1,3
Supports bois 60x20 X 2 tous les 90 cm	Ossature Douglas	0,1	-0,4	-0,2
Pare-pluie	DED (Donnée environnementale par défaut)	1,2	0,0	1,2
Ossature bois 63x75 tous les 2 m	Ossature Douglas	0,1	-0,3	-0,2
Oméga 2 mm (largeur 6 cm) 40x250x72x250x40	Poutre en éléments minces	1,7	-0,6	1,1
Isolant en fibre de bois Soprema total de 286 mm	286/120x (isolant en fibre de bois Soprema 120 mm R = 3,15 K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	3,3	-4,6	-1,2
Pare-vapeur	DED (Donnée environnementale par défaut)	1,5	0,0	1,5
Peau intérieure 0,63 mm	TRAPEZA 3.333.39T	16,7	-7,2	9,5
<b>TOTAL</b>		<b>43,3</b>	<b>-20,8</b>	<b>22,5</b>

### E) DURABILITÉ/VENTILATION

Une double lame d'air de part et d'autre de l'écran de sous toiture est nécessaire pour assurer la bonne ventilation des bois en sapin de catégorie 2.

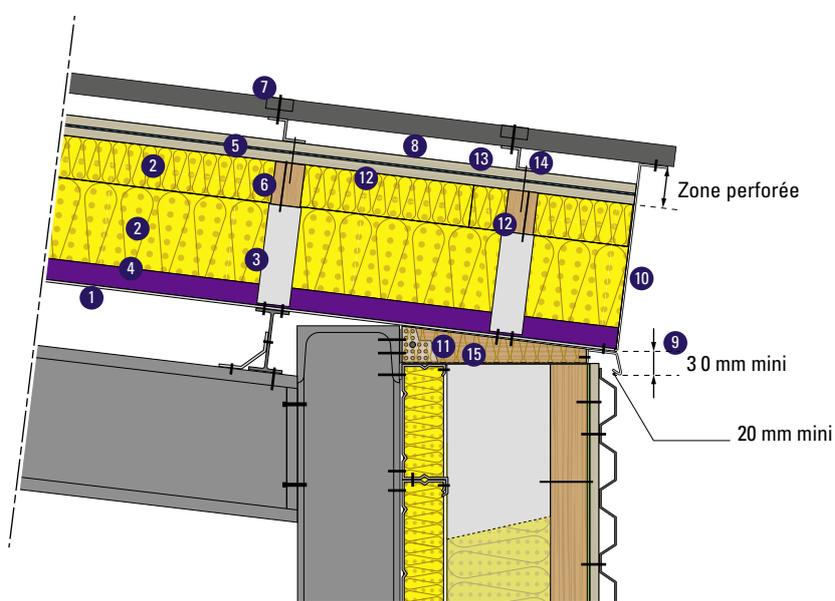
### F) AUTRES PERFORMANCES

Voir paragraphe 2.1.2 bardage.

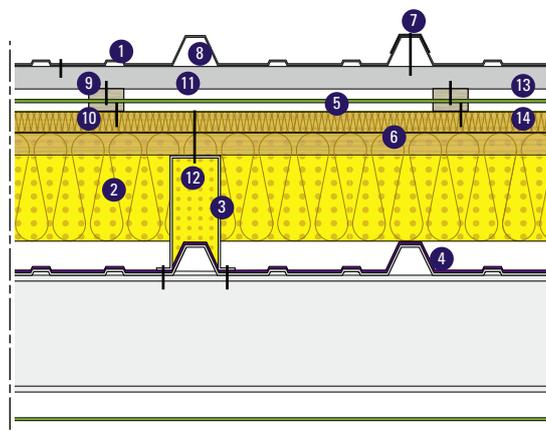
### CONCLUSION

La constitution de la couverture courante double peau avec fausses pannes en bois est donnée à la figure 6 ci-dessous.

**Figure 6** Vue détaillée de la constitution de la couverture double peau avec fausses pannes en bois



- 1 Profil de couverture acier (3 × 333 × 45 mm) d'épaisseur nominale 0,63 mm
- 2 Isolation biosourcée en fibre de bois : 2 couches d'isolant de 100 mm et 1 couche de 30 mm d'épaisseur dont la conductivité thermique est égale 0,038 W/(m.K)
- 3 Entretoise en acier (pontet de hauteur 250 mm) d'épaisseur 2 mm espacée tous les mètres
- 4 Pare-vapeur disposé avant les pontets
- 5 Écran de sous toiture répondant au CGM du DTU 40.29
- 6 Fausse panne bois chevron sapin (63 × 75 mm) tous les 2 m, de classe d'emploi 2, fixée mécaniquement sur les entretoises n° 3
- 7 Fixation acier de diamètre 6,3 mm avec cavalier et rondelle étanchéité
- 8 lame d'air semi-ventilée (ventilation par nervure)
- 9 Bavette rejet d'eau en acier d'épaisseur 0,63 mm
- 10 Pièce de fermeture en acier d'épaisseur 0,63 mm
- 11 Complément d'isolation dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)
- 12 Support bois (60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur la panne chevron bois n° 6
- 13 Support bois (60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur le support bois n° 12
- 14 Zed support en acier (40 × 40 × 40 mm) d'épaisseur 1,50 mm
- 15 Pièce bois en appui sur sabot à gauche et écarteur bois à droite



- 1 Profil de couverture acier (3 × 333 × 45 mm) d'épaisseur nominale 0,63 mm
- 2 Isolation biosourcée en fibre de bois : 2 couches de 100 mm et 1 couche de 30 mm d'épaisseur dont le lambda est égal à 0,038 W/(m.K)
- 3 Oméga support en acier (40 × 205 × 40 mm) d'épaisseur 2 mm
- 4 Pare-vapeur disposé avant le Zed support n° 3 et les entretoises
- 5 Écran de sous toiture répondant au CGM du DTU 40.29
- 6 Fausse panne bois, chevron sapin (63 × 75 mm) tous les 2 m, de classe d'emploi 2, fixée mécaniquement sur le Zed n° 3 et les entretoises
- 7 Fixation acier de diamètre 6,3 mm avec cavalier et rondelles d'étanchéité
- 8 Lame d'air semi ventilée (ventilation par nervure)
- 9 Support bois ((60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur la panne chevron bois n° 6.
- 10 Support bois (60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur la panne chevron bois n° 9
- 11 Zed support en acier (40 × 40 × 60 mm) d'épaisseur 1,50 mm
- 12 Complément d'isolation dont le lambda est égal à 0,038 W/mK)
- 13 Lame d'air ventilée
- 14 Lame d'air ventilée

### Pour la solution de couverture sans perforation de la peau intérieure

- Peau intérieure acier 3 x 333 mm x 45 mm de haut x 0,63 mm d'épaisseur nominale ;
- Pare-vapeur placé sur toute la peau intérieure ;
- Entretoises oméga acier 4 cm de large, 250 mm de haut, épaisseur 2 mm, (40 x 250 x 72 x 250 x 40) espacés tous les mètres ;

### POINT DE VIGILANCE



Attention à la réalisation car il y a interaction entre l'entretoise, la fibre de bois et le pare-vapeur qui doit rester continu.

- Remplissage en fibre de bois en plusieurs couches de 205 + 75 - 39 mm ;
- Fausse pannes bois en sapin en classe d'emploi 2 et de classement mécanique C18 : chevron 63 x 75 perpendiculaire au rampant ;
- Support écran de sous-toiture 60 x 20 mm (bois) tous les 90 cm ;
- Écran de sous-toiture T3 conforme au DTU 40.29 ;

- Support écran de sous-toiture 60 x 20 mm (bois) tous les 90 cm ;
- Fausses pannes acier Zed 40 x 40 x 40 ep 1,5 mm nominal tous les 2 m ;
- Peau extérieure acier: 3 x 333 mm x 45 mm de haut x 0,63 mm d'épaisseur nominale ;
- Vis acier diamètre 6,3 traversante chevron sur pontet et fausses pannes sur chevron bois ;
- Autre vis acier en diamètre 5,5.

#### Pour la solution acoustique

- Peau intérieure perforée acier 3 x 333 mm x 45 mm de haut x 0,63 mm d'épaisseur nominale,
- Isolant laine minérale 5 cm,
- Pare-vapeur,
- Entretoises oméga acier 6 cm de large, 20 cm de haut, épaisseur 2 mm, (40 x 250 x 72 x 250 x 40) espacés tous les mètres,
- Remplissage en fibre de bois en plusieurs couches de 205 + 75 - 45 mm,
- Fausses pannes bois : chevron 63 x 75 perpendiculaire au rampant,
- Support écran de sous-toiture 60 x 20 mm (bois) tous les 90 cm,
- Ecran de sous-toiture T3 conforme au DTU 40.29,
- Support écran de sous-toiture 60 x 20 mm (bois) tous les 90 cm,
- Fausses pannes acier Zed 40 x 40 x 40 ep 1,5 mm nominal tous les 2 m,
- Peau extérieure acier: 3 x 333 mm x 45 mm de haut x 0,63 mm d'épaisseur nominale,
- Vis acier diamètre 6,3 mm.



## PERTINENCE DE L'ACTION

Ce nouveau projet complète les résultats du programme PROFEEL 1 qui ne traitait que la question de la durabilité liée aux isolants biosourcés.

Le nouveau projet apporte les réponses aux questions restées en suspens, à savoir : les performances mécaniques (statiques et dynamiques), acoustiques, feu (réaction), environnementales (FDES) et la question des performances thermiques associées aux ponts thermiques intégrés (écarteurs, lèvres de plateaux, vis etc).

En supplément, l'utilisation innovante des écarteurs bois (non étudiée dans PROFEEL 1), permet de réduire significativement les ponts thermiques intégrés des systèmes double peau, d'augmenter la tenue des profils aux voilements locaux et d'améliorer la performance environnementale des systèmes (en émission et en stockage de carbone).

La performance thermique a également fait l'objet d'une évaluation et donne une performance correcte qui est compatible avec les niveaux généralement requis pour les bâtiments RE2020.

# 3

## ÉTAT DE L'ART

Il existe très peu d'état de l'art sur le sujet. Si la technique des ossatures bois est développée pour les bardages rapportés sur maçonnerie, elle est totalement innovante pour les systèmes double peau en acier.

On peut toutefois citer les documents et études ci-dessous.

- **Systèmes innovants de bardage et de couverture acier double peau avec isolant biosourcé** \_Programme PROFEEL\_2021 : Cinq types d'isolants biosourcés ont été étudiés, dont la fibre de bois. Tous les écarteurs de ces systèmes sont traditionnels (en acier). Les performances thermiques ont été évaluées par calcul. Une étude hygrothermique, de durabilité et de résistance thermique a été conduite en conditions réelles (construction d'un démonstrateur)
- **Ossature bois et isolation thermique des bardages rapportés faisant l'objet d'un Avis Technique ou d'un constat de traditionalité. Règles générales de conception et de mise en œuvre**\_ e-Cahier 3316\_V3 CSTB- Juin 2021
- **Assessment of the Usability of Some Bio-Based Insulation Materials in Double-Skin Steel Envelopes** by Dashnor Hoxha 1, Brahim Ismail, Ancuța Rotaru, David Izabel and Thibaut Renaux Sustainability **2022**, 14(17), 10797
- **Innovative bio-based steel envelope systems** David Izabel, Thibault Renaux, Tommy Gelders, Arritokieta Eizaguirre-Iribar, Jörg Lange, Eric Man Pradhan, Helena Gervásio, José Hector Soares, Claudio Martins, Daniel Spagni, Alexis Brutin, André Chi, Valérie Huet, Anna Palisson, Xabier Olano- Azkhune, Valérie Prudor (Euro steel 2023)

# 4

## SYSTÈME DE BARDAGE DOUBLE PEAU AVEC ÉCARTEURS BOIS

4

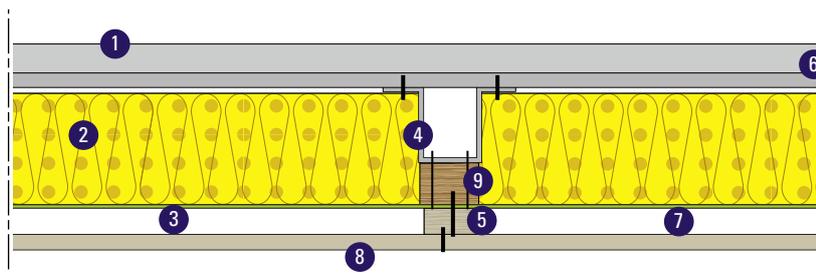
1

### DESCRIPTION TECHNOLOGIQUE

Le bardage retenu est identique à celui testé dans le cadre du programme PROFEEL 1. Les seuls changements sont (voir figure 7 ci-dessous) :

- L'ajout sur les écarteurs oméga acier des écarteurs bois de 63 mm de large par 75 mm de haut,
- Le remplacement du petit oméga acier de 20 mm pour la lame d'air par un tasseau bois (sapin) de 20 mm.

**Figure 7** Coupe type bardage double peau avec écarteurs bois



- |  |   |
|--|---|
| ① Plateau  | ⑥ Isolant biosourcé dans le plateau             |
| ② Isolant biosourcé  | ⑦ lame d'air ventilée 20 mm                     |
| ③ Écran pare-pluie (selon CGM DTU 31.2)  | ⑧ Bardage en pose horizontale                   |
| ④ Écarteur oméga de 205 mm   | ⑨ Écarteur bois chevron bois (sapin) 63 x 75 mm |
| ⑤ Tasseaux bois 63 x 20 mm de classe d'emploi 2 fixé mécaniquement sur chevron 9 |   |

Les fixations en acier du chevron sur l'écarteur se font par vis en acier traversantes.

Deux techniques seront visées, selon les Recommandations Professionnelles RAGE bardage de juillet 2014 :

- Le bardage « acoustique » (plateau perforé, laine minérale avec pare-vapeur et fibre de bois entre écarteurs bois, peau extérieure horizontale) – lame d'air ventilée 20 mm avec écran pare-pluie,
- Le bardage « non acoustique » (plateau non perforé, fibre de bois en fond de plateau et entre écarteurs bois, peau extérieure horizontale) – lame d'air ventilée 20 mm avec écran pare-pluie.

## 4

## 2

## PERFORMANCE EN RÉACTION AU FEU

### 4.2.1 DESCRIPTION DE LA MAQUETTE SBI

Les maquettes SBI ont été réalisées conformément à la norme NF EN 14782 et à la norme NF EN 13823. La performance a été établie à partir de 3 maquettes de 1,50 x 1,0 m x 1,50 m.

3 maquettes de différentes couleurs ont été réalisées (CF Tableau 4 ci-dessous) :

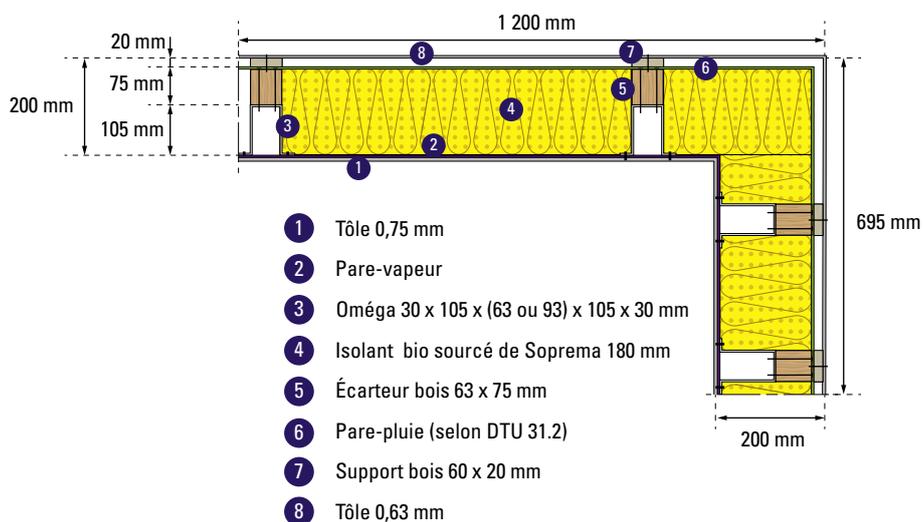
**Tableau 4** Définition des 3 maquettes testées (Source AMCF et Rapport d'essais CSTB n° DSSF-22-13008-A -)

N° essai	N° échantillon	Référence	Date essai	Opérateur	Epaisseur total mesurée (mm) (hors tout)	Joint sur grande aile	Lame d'air	Coloris Face exposée
1	1	Hairplus® (Profeel 2 Bardage)*	04/07/2023	V. MILLET	200	Vertical à 200 mm	Avec 20 mm entre l'écran souple et la tôle d'acier au dos]	Blanc
2	2				200			Rouge
3	3		11/07/2023	F. DUCASSE	200			Noir

\* Exposition au feu côté intérieur

Les Figures 8 et 9 illustrent lesdites maquettes.

**Figure 8** Maquette SBI du bardage avec écarteurs bois (Source AMCF)



**Figure 9** Réalisation de la Maquette SBI du bardage avec écarteurs bois (Source AMCF et Rapport d'essais CSTB n° DSSF-22-13008-A -)



Vue de dessus de la maquette



Vue de dos de la maquette  
avant pose de la tôle d'acier



Vue de dos de la maquette  
avant pose de la tôle d'acier

Mise en place de la Tôle d'acier au dos

- ① Couche n°1 : Tôle d'acier (face exposée au feu)
- ② Couche n°2 : Pare vapeur
- ③ Couche n°3 : Isolant fibre de bois
- ④ Couche n°4 : Écran souple
- ⑤ Couche n°5 : Tasseaux en position verticale
- ⑥ Couche n°6 : Tôle d'acier

**Note** : les tasseaux créent une lame d'air entre l'isolant et l'écran souple puis entre ce dernier et la tôle d'acier appliquée au dos

## 4.2.2 RÉSULTATS D'ESSAI SBI

Les photos de la maquette après essai sont données à la figure 10 ci-dessous :

**Figure 10** Comportement des 3 Maquettes SBI du bardage avec écarteurs bois durant le SBI  
(Source AMCF et Rapport d'essais CSTB n° DSSF-22-13008-A -)



Les résultats proprement dits sont les suivants :

- Le FIGRA à 0,2 W/s et 0,4 W/s obtenu était de 27,3
- Le SMOGRA obtenu était de 1,9 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>
- Le TSP 600s était de 26,6 m<sup>2</sup>

La synthèse des résultats est donnée dans le tableau 5 ci-dessous :

**Tableau 5 Synthèse des résultats de l'essai SBI pour le bardage (Source Rapport d'essais CSTB n° DSSF-22-13008-A -)**

#### Synthèse des résultats

Moyenne des différents paramètres sur 3 épreuves (essais 1-2-3)

DESIGNATION	FIGRA 0,2 W/s	FIGRA 0,4 W/s	THR <sub>600s</sub> MJ	FDP/LFS <sub>edge</sub>	SMOGRA m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	TSP <sub>600s</sub> m <sup>2</sup>
Hairplus® (Profeel 2 Couverture)*	27,3	27,3	2,8	Sans/Non atteint	1,9	26,6

\* Lors des essais réalisés, nous n'observons pas d'inflammation dans la lame d'air (dos de l'isolant)

### 4.2.3 CLASSEMENT EN RÉACTION AU FEU

Le rapport de classement en date du 20 juillet 2023 établi par le CSTB selon la norme NF EN 13501-1 est Bs1d0 selon le tableau 6 ci-dessous.

**Tableau 6 Rapport de Classement de réaction au feu (Source CSTB n° RA du 20 juillet 2023)**

Comportement au feu <i>Fire behaviour</i>		Production de fumées <i>Smoke production</i>		Gouttes ou particules enflammées <i>Flaming droplets or debris</i>
B	-	s1	,	d0

**Classement / Classification : B - s1, d0**

## CONCLUSION



Les performances de réaction au feu obtenues sont compatibles avec les exigences du marché.

## 4 3 PERFORMANCE THERMIQUE

### 4.3.1 GÉNÉRALITÉS – MOYENS DE CALCUL – MODÉLISATION

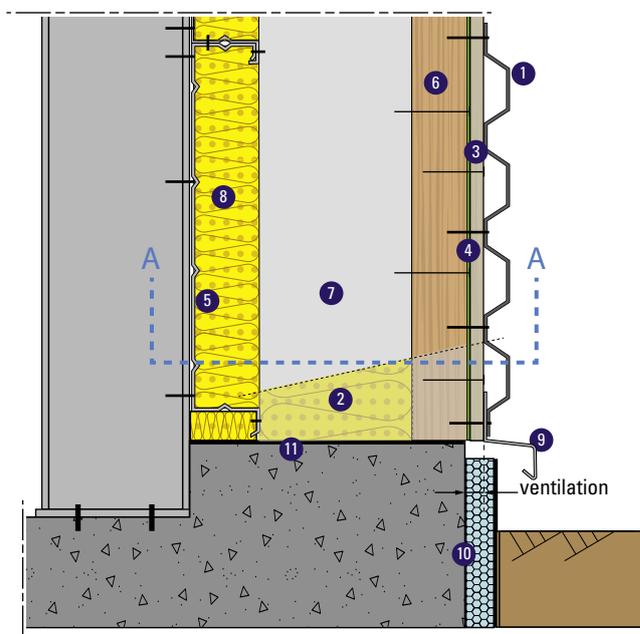
Les différentes solutions ont été modélisées à partir du logiciel de calcul thermique BISCO en 2 dimensions et Trisco en 3 dimensions par le CSTB.

### 4.3.2 PERFORMANCE EN PARTIE COURANTE

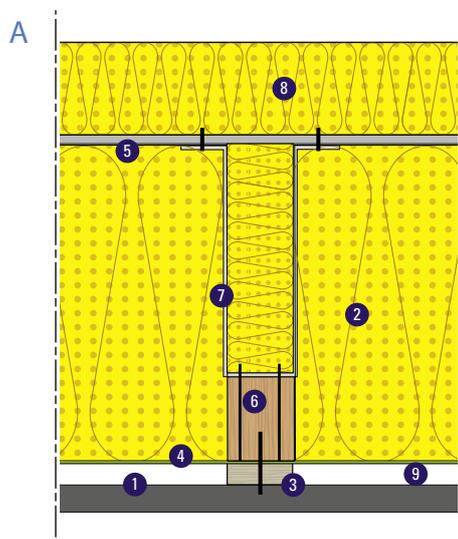
Le  $U_p$  du système visé est  $\leq 0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ponts thermiques intégrés compris.

Les écarteurs bois étant tous les 2 m d'entre-axes. Largeur 63 mm. Le détail de principe de la solution étudiée est donné à la figure 11 ci-dessous.

Les performances sont données dans le tableau 7 – ci-dessous.

**Figure 11** Détail de principe de la solution de bardage

- 1 Bardage en acier en pose horizontale d'épaisseur nominale 0,75 mm
- 2 Isolation biosourcée en fibre de bois devant plateau : 2 couches de 100 mm et une couche de 80 mm de conductivité thermique égale à 0,038 W/(m.k)
- 3 Tasseaux bois en épicéa ou en pin, de classe d'emploi 2 et de classement mécanique C18 (63 × 20 mm) fixés sur l'écarteur chevron bois n° 6
- 4 Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm ( $S_d = 0,02$  m) / (Perméabilité à l'air < 0,10 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>) selon DTU 31.2
- 5 Plateau de bardage 500/90 en acier d'épaisseur 0,75 mm
- 6 Écarteur chevron bois en épicéa ou en pin de classe d'emploi 2 et de classement mécanique C18 (63 × 75 mm) fixé mécaniquement sur l'écarteur en acier n° 7
- 7 Écarteur oméga en acier (40 × 205 × 60 × 205 × 40 mm) d'épaisseur 2 mm
- 8 Isolant biosourcé en fibre de bois dans plateau de bardage dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.k)
- 9 Bavette rejet d'eau en acier d'épaisseur 0,63 mm
- 10 Complément d'isolation dont la conductivité thermique est égal à 0,038 W/(m.K)
- 11 Barrière d'étanchéité et anti-capillarité.



- 1 Bardage en acier en pose d'épaisseur nominale 0,75 mm
- 2 Isolation biosourcée en fibre de bois devant plateau 2 couches de 100 mm et 1 couche de 80 mm de conductivité thermique égale à 0,038 W/(m.K)
- 3 Tasseaux bois (63 × 20 mm) de classe d'emploi 2 fixés mécaniquement sur l'écarteur chevron bois n° 6
- 4 Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm (Sd=0,02 m)/Perméabilité à l'air < 0,10 m³/h.m² selon DTU 31.2
- 5 Plateau de bardage 500/90 en acier d'épaisseur 0,75 mm
- 6 Écarteur chevron bois en épicéa ou en pin de classe d'emploi, 2 et de classement mécanique C18 (63 × 75 mm) fixé mécaniquement sur l'écarteur oméga n° 7
- 7 Écarteur oméga en acier (40 × 205 × 60 × 205 × 40 mm) d'épaisseur 2 mm
- 8 Isolant biosourcé en fibre de bois dans plateau de bardage dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)
- 9 Lamelle d'air ventilée

**Tableau 7** Exemple de performance thermique  $U_{pb}$  du bardage double peau avec écarteurs bois prenant en compte les ponts thermiques intégrés  $U_{pb} = U_{cb} + \Delta U_b$  avec écarteurs bois tous les 2 m

$U_{c,b}$	$\Psi_{1,b}$ (Aile de plateau)	$\Psi_{1,b}$ (Tasseau+Omega)	$\chi_{vis}$	$\chi_{1,b}$ (croisement)	$\Delta U_b$	$U_{p,b}^1$
W/(m².K)	W/(m.K)	W/(m.K)	W/K	W/K	W/(m².K)	W/(m².K)
0,099	0,004	0,032	0,000	0,020	0,041	0,14

## POINT DE VIGILANCE

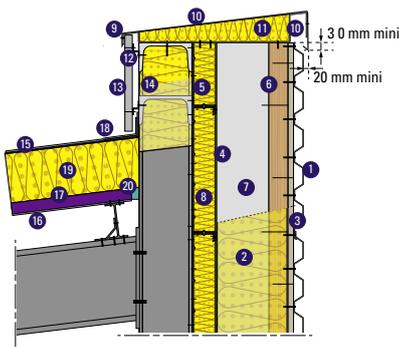


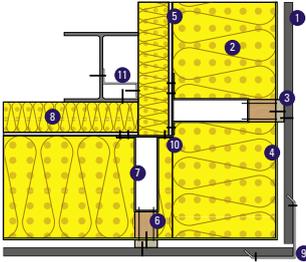
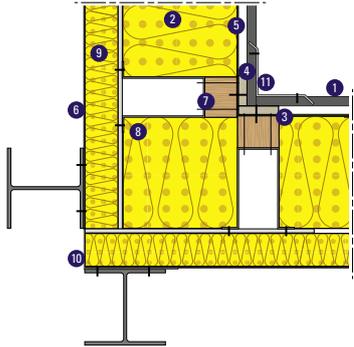
L'optimisation thermique et carbone nécessite des espacements d'écarteurs tous les 2000 mm. Cette dimension est antinomique avec les performances traditionnelles conformes au DTU 31.2 en bardage (645 mm). Des recherches /essais complémentaires sont nécessaires pour justifier les performances mécaniques des écrans pare-pluie jouant notamment le rôle de membranes de protection en phase provisoire à des portées supérieures à 645 mm.

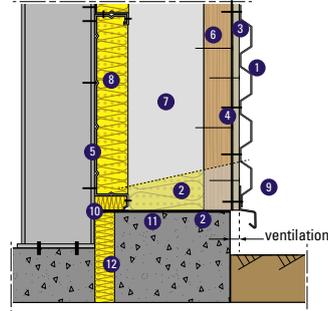
## 4.3.3 PERFORMANCE DES POINTS SINGULIERS

Les points singuliers qui ont été modélisés figurent au tableau 8 ci-dessous :

**Tableau 8** Valeurs des ponts thermiques au droit des points singuliers de bardage (Source rapport CSTB)

Performances thermiques	$U_p = 0,14$	W/ m <sup>2</sup> .K	Valeurs obtenues $\Psi$	EN ISO10211 EN ISO 10456
Ponts thermiques de liaisons		W/m.K	0,34	EN ISO 10211 EN ISO 10456
	<p>1 Bardage en acier</p> <p>2 Isolation biosourcée en fibre de bois devant plateau : 2 couches de 100 mm et 1 couche de 80 mm dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</p> <p>3 Tasseaux bois (63x20 mm) de classe d'emploi 2</p> <p>4 Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm (<math>S_d = 0,02</math> m) / (Perméabilité à l'air &lt; 0,10 m<sup>2</sup>/h. m<sup>2</sup>) selon DTU 31.2</p> <p>5 Plateau de bardage 500/90 en acier d'épaisseur nominale 0,75 mm</p> <p>6 Écarteur chevron bois (63 x 75 mm) de classe d'emploi 2</p> <p>7 Écarteur oméga en acier (40 x 205 x 60 x 205 x 40 mm) d'épaisseur 1,50 mm mini</p> <p>8 Isolant biosourcé en fibre de bois d'épaisseur 80 mm dans plateau de bardage</p> <p>9 Couronnement d'acrotère en acier d'épaisseur 0,63 mm</p> <p>10 Support d'acrotère en acier d'épaisseur 1,50 mm mini</p> <p>11 Complément d'isolation dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</p> <p>12 Zed support en acier d'épaisseur 1,50 mm mini</p> <p>13 Contre bardage en acier d'épaisseur 0,75 mm</p> <p>14 Pièce de calfeutrement d'épaisseur 0,63 mm</p> <p>15 Membrane d'étanchéité multicouche</p> <p>16 Support d'étanchéité en acier d'épaisseur 0,75 mm</p> <p>17 Pare-vapeur</p> <p>18 Costière</p> <p>19 Isolant biosourcé en fibre de bois</p> <p>20 Closoir mousse</p> <p><math>\Psi</math> acrotère de toiture</p>			

	 <ul style="list-style-type: none"> <li>1 Bardage en acier</li> <li>2 Isolation biosourcée fibre de bois devant plateau dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>3 Tasseaux bois (63 x 20 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>4 Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm (<math>S_d = 0,02</math> m) / (Perméabilité à l'air &lt;math&gt;&lt; 0,10 \text{ m}^2/\text{h} \cdot \text{m}^2&lt;/math&gt; selon DTU 31.2</li> <li>5 Plateau de bardage 500/90 en acier d'épaisseur nominale 0,75 mm</li> <li>6 Écarteur chevron bois (63 x 75) de classe d'emploi 2</li> <li>7 Écarteur oméga en acier (40 x 205 x 60 x 205 x 40 mm) d'épaisseur 2 mm</li> <li>8 Isolant biosourcé fibre de bois dans plateau de bardage dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>9 Façonné d'angle sortant cranté en acier d'épaisseur 0,63 mm</li> <li>10 Pièce support d'angle en acier d'épaisseur 1,50 mm mini</li> <li>11 Zed support en acier d'épaisseur 2 mm</li> </ul> <p><math>\psi</math> angle sortant</p>	W/m.K	0,12	EN ISO 10211 EN ISO 10456
	 <ul style="list-style-type: none"> <li>1 Bardage en acier</li> <li>2 Isolation biosourcée en fibre de bois devant plateau dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>3 Tasseaux bois (100 x 20 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>4 Tasseaux bois (75 x 20 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>5 Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm (<math>S_d = 0,02</math> m) - (Perméabilité à l'air &lt;math&gt;&lt; 0,10 \text{ m}^2/\text{h} \cdot \text{m}^2&lt;/math&gt; selon DTU 31.2</li> <li>6 Plateau de bardage 500 / 90 en acier d'épaisseur nominale 0,75 mm</li> <li>7 Écarteur chevron bois (100 x 75 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>8 Écarteur oméga en acier (40 x 205 x 100 x 205 x 40 mm) d'épaisseur 2 mm</li> <li>9 Isolant biosourcé en fibre de bois dans plateau de bardage dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>10 Pièce d'angle rentrant d'épaisseur 0,63 mm</li> <li>11 Zed support en acier d'épaisseur 2 mm</li> </ul> <p><math>\psi</math> angle rentrant</p>	W/m.K	0,12	EN ISO 10211 EN ISO 10456



- |  |   |
|--|---|
| 1 Bardage en acier   | 7 Écarteur oméga en acier (40 x 205 x 60 x 205 x 40 mm) d'épaisseur 2 mm  |
| 2 Isolation biosourcée en fibre de bois devant, de conductivité thermique égale à 0,038 W/(m.K)      | 8 Isolant biosourcé en fibre de bois dans plateau de bardage dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K) |
| 3 Tasseaux bois (63 x 20 mm)   | 9 Bavette rejet d'eau en acier d'épaisseur 0,063 mm   |
| 4 Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm (Sd = 0,02 m) / (Perméabilité à l'air < 0,10 m²/h.m²) selon DTU 31.2 | 10 Complément d'isolation de conductivité thermique égale à 0,038 W/(m.K)   |
| 5 Plateau de bardage 500/90 en acier d'épaisseur nominale 0,75 mm                                    | 11 Barrière d'étanchéité et anti-capillarité  |
| 6 Écarteur chevron bois (63 x 75 mm) de classe d'emploi 2  | 12 Isolation périphérique verticale intérieure de conductivité thermique égale à 0,035 W/(m.k)                        |

#### Travaux de correction de pont thermique :

- Mise en œuvre d'un complément d'isolation de conductivité thermique égale à 0,038 W/(m.K) au niveau de la jonction en bas de bardage (10)
- Mise en œuvre d'une isolation périphérique verticale intérieure (12) entre la longrine et le dallage de conductivité thermique égale à 0,035 W/(m.K).

#### Caractéristiques thermiques

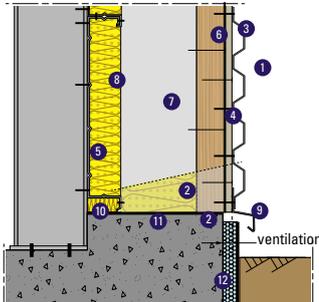
Épaisseur de l'isolation périphérique intérieure	$\Psi_0$ [W/(m.K)]	$\chi_{poteau}$ [W/K]	$\Psi_{liaison}$ [W/(m.K)](*)
0	0,66	0,120	0,69
6 cm	0,38	0,090	0,40
12 cm	0,32	0,084	0,33
	(*) Valable pour un entraxe entre poteau $\geq 5$ mètres		

$\psi$  pied de bardage (avec isolation dans la longrine)

W/m.K

0,69  
(0 mm)  
0,40  
(60 mm)  
0,33  
(120 mm)

EN ISO 10211  
EN ISO 10456

 <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Bardage en acier</li> <li>2 Isolation biosourcée en fibre de bois devant, de conductivité thermique égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>3 Tasseaux bois (63x20 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>4 Pare-pluie d'épaisseur 0,2 mm (<math>S_d = 0,02</math> m) / (Perméabilité à l'air &lt;math&gt;&lt; 0,10 \text{ m}^2/\text{h}\cdot\text{m}^2&lt;/math&gt; selon DTU 31.2</li> <li>5 Plateau de bardage 500/90 en acier d'épaisseur nominale 0,75 mm</li> <li>6 Écarteur chevron bois (63 x 75 mm)</li> <li>7 Écarteur oméga en acier (40 x 205 x 60 x 205 x 40 mm) d'épaisseur 2 mm</li> <li>8 Isolant biosourcé en fibre de bois dans plateau de bardage dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>9 Bavette rejet d'eau en acier d'épaisseur 0,63 mm</li> <li>10 Complément d'isolation de conductivité thermique égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>11 Barrière d'étanchéité et anti-capillarité</li> <li>12 Isolation périphérique verticale intérieure de conductivité thermique égale à 0,035 W/(m.k)</li> </ol> <p>ψ pied de bardage sans isolation dans la longrine mais avec isolation devant la longrine</p>	W/m.K	0,46	EN ISO 10211 EN ISO 10456
--	-------	------	------------------------------

*Nota : les « sections » (au sens dessin industriel) n'ont pas vocation à être la représentation de détails d'exécution tels qu'ils doivent être établis pour les ouvrages d'enveloppe*

Date : 19/06/2023 Réf. : DEB/R2EB 23096 – NA/EH  
N° SAP : 70086984

## CONCLUSION



Les performances thermiques obtenues sont compatibles avec la RE2020.

## 4

## 4

## PERFORMANCE ACOUSTIQUE

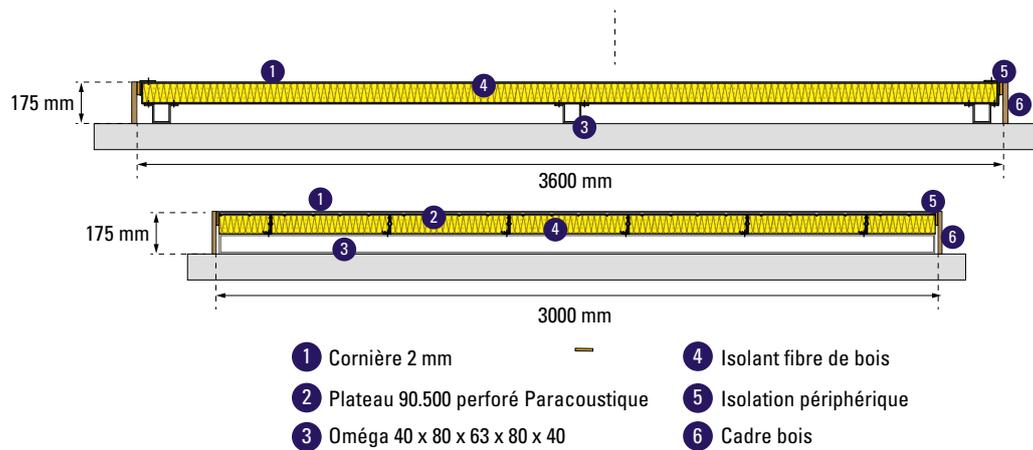
4.4.1 PERFORMANCE EN ABSORPTION  $\alpha_w$ 

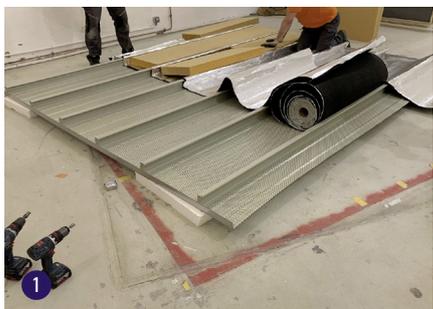
Les mesures ont été réalisées selon les normes NF EN 16487 (2014) et NF EN ISO 354 (2004) complétées par la norme NF EN ISO 11654 (1997) pour l'expression de la valeur  $\alpha_w$ .

## 4.4.1.1 DESCRIPTION DE LA MAQUETTE

L'essai d'absorption acoustique a été réalisé sur une maquette de dimension 3,0 m de haut sur 3,6 m de large. Le détail de la maquette est donné aux figures 12 et 13 ci-dessous.

**Figure 12** Maquette d'essai acoustique d'absorption en bardage [Source AMCF et Rapport d'essai CSTB AC23 13008-1]



**Figure 13** Montage de la Maquette d'essai acoustique d'absorption en bardage (Source Rapport d'essai CSTB AC23 13008-1)**Mise en œuvre du pare vapeur et des panneaux en fibres de bois dans les plateaux****Vue en coupe****Mise en œuvre des Omégas****Mise en œuvre des panneaux en fibres de bois****Vue en coupe de la maquette retournée****Maquette terminée**

#### 4.4.1.2 RÉSULTATS D'ESSAI

La courbe de performance est donnée à la figure 14 ci-dessous.

**Figure 14** Résultat d'essai pour le bardage en absorption (Source Rapport d'essai CSTB AC23 13008-1)

##### Bardage PROFEEL 2 (épaisseur 220 mm)

Coefficient d'absorption acoustique  $\alpha_s$

Numéro d'essai : 1

Date de l'essai : 05/06/2023

##### CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES

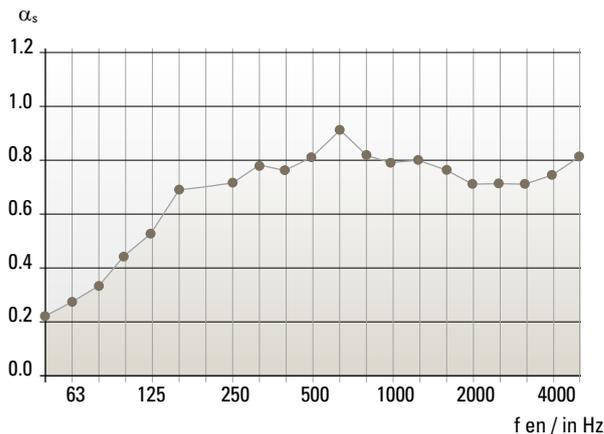
Dimensions en mm (L x l) : 3570 x 2990 Montage type : A-220

Surface en m<sup>2</sup> : 10,67

Masse surfacique en kg/m<sup>2</sup> : 30,43 (hors ossature)

Épaisseur en mm : 220

##### RÉSULTATS



##### CONDITIONS DE MESURES

Salle vide

Température : 21°C

Humidité relative : 57 %

pression atmosphérique :

101,4 kPa

Salle avec matériau

Température : 22°C

Humidité relative : 53 %

f	$\alpha_s$	$\alpha_p$
50	0,22	
63	0,27	0,25
80	0,33	
100	0,44	
125	0,52	0,55
160	0,69	
200	0,70	
250	0,72	0,75
315	0,78	
400	0,76	
500	0,81	0,85
630	0,91	
800	0,82	
1000	0,79	0,80
1250	0,80	
1600	0,76	
2000	0,71	0,75
2500	0,71	
3150	0,71	
4000	0,74	0,75
5000	0,81	
Hz		

$\alpha_w = 0,80$

Classement / class : B

NRC = 0,80

SAA = 0,77

#### 4.4.1.3 CLASSEMENT

La valeur de  $\alpha_w$  obtenue est de 0,8 (cf. Tableau 9 ci-dessous).

**Tableau 9** Résultats des essais d'absorption (Source rapport CSTB AC23-13008-1 du 20 octobre 2023)

##### 3 RÉCAPITULATIF DES ESSAIS RÉALISÉS

N° essais	Produits soumis aux essais	Hauteur total de construction (mm)	Résultat(s)	
			$\alpha_w$	Classement
1	Bardage : PROFEEL 2 (épaisseur 220 mm)	200	0,80	B

## CONCLUSION



La performance acoustique est compatible avec les exigences du marché.

#### 4.4.2 PERFORMANCE EN AFFAIBLISSEMENT $R_w$

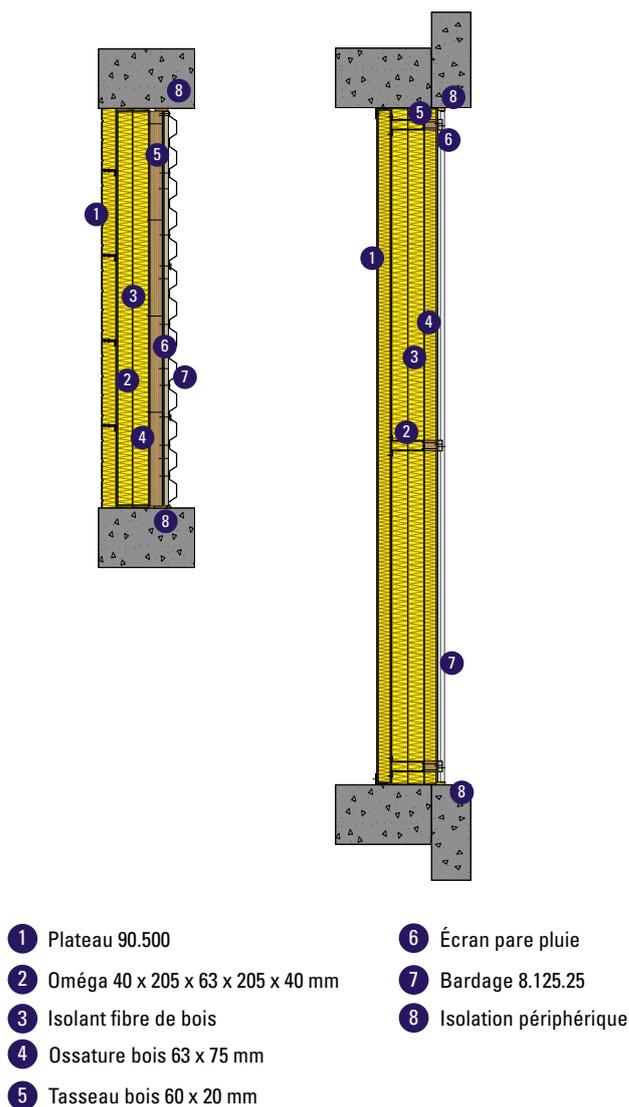
Les mesures ont été réalisées selon les normes NF EN ISO 10140-1 (2021), NF EN ISO 10140-2 (2021), NF EN ISO 10140-4 (2021), NF EN ISO 10140-5 (2021) et NF EN ISO 12999-1 (2020) complétées par la norme NF EN ISO 717/1 (2020) et amendements associés.

##### 4.4.2.1 DESCRIPTION DE LA MAQUETTE

L'essai d'affaiblissement a été réalisé sur une maquette de bardage de dimension 3 m de haut x 3,2 m de large.

La maquette est décrite aux figures 15 et 16 ci-dessous.

**Figure 15** Maquette d'essai pour la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique en bardage (Source AMCF et Rapport d'essai CSTB AC23 13008-3)



**Figure 16** Montage de la Maquette d'essai pour la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique en bardage (Source Rapport d'essai CSTB AC23 13008-3)



**1** Mise en œuvre des plateaux



**2** Mise en œuvre des plateaux



**3** Remplissage des Omégas avec la laine de verre



**4** Pose de la 1<sup>ère</sup> couche d'isolant d'ép. 80 mm dans les plateaux



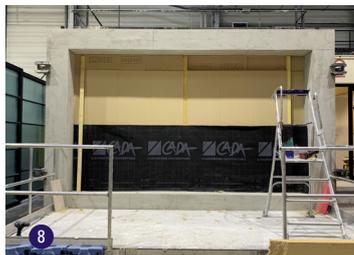
**5** Fixations des Omégas et pose de la 2<sup>ème</sup> couche d'isolant d'ép. 100 mm



**6** Pose de la 3<sup>ème</sup> couche d'isolant d'ép. 100 mm



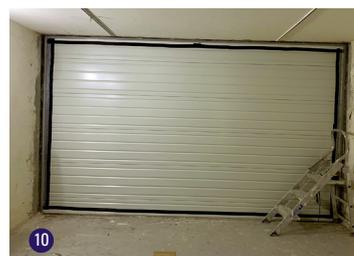
**7** Fixations des chevrons et pose de la 4<sup>ème</sup> couche d'isolant d'ép. 80 mm



**8** Mise en œuvre du pare-pluie



**9** Fixation du bardage



**10** Scotch en périphérie des plateaux, vue côté réception

#### 4.4.2.2 RÉSULTATS D'ESSAI

Les courbes de comportement aux différentes fréquences sont données à la figure 17 ci-dessous.

**Figure 17** Résultat d'essai pour le bardage en indice d'affaiblissement acoustique (Source Rapport d'essai CSTB AC23 13008-3)

##### Bardage PROFEEL 2 (épaisseur 420 mm)

Indice d'affaiblissement acoustique R

Numéro d'essai : 1

Date de l'essai : 16/06/2023

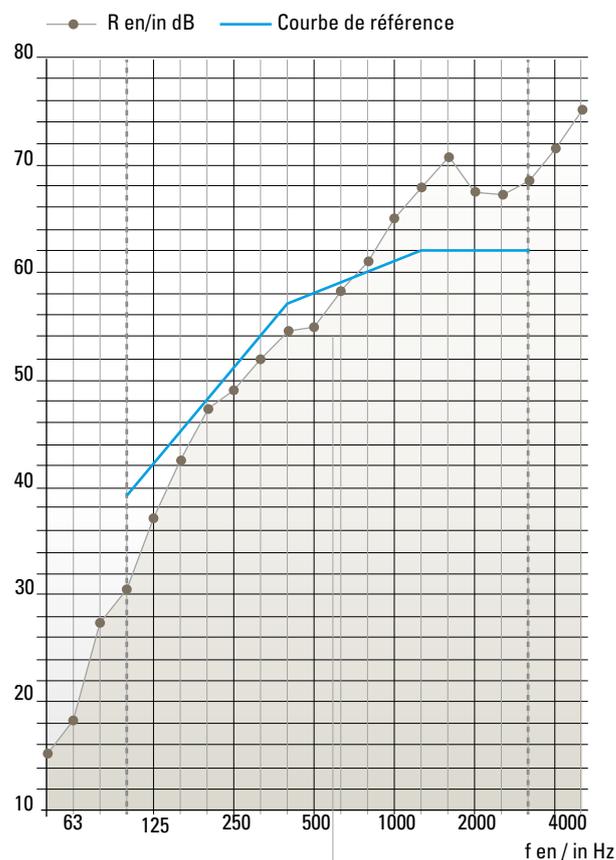
##### CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES

Dimensions en mm (L x l) : 2470 x 4180

Masse surfacique en kg/m<sup>2</sup> : 57,2 (hors ossature)

Épaisseur en mm : 420

##### RÉSULTATS



##### CONDITIONS DE MESURES

Salle émission

Température : 16,5°C

Humidité relative : 36,5 %

pression atmosphérique :

101 kPa

Salle de réception

Température : 17,5°C

Humidité relative : 45 %

f	P
50	15,3 <sup>+0</sup>
63	18,4 <sup>+0</sup>
80	27,3 <sup>+0</sup>
100	30,4 <sup>+0</sup>
125	37,1 <sup>+0</sup>
160	42,5 <sup>+0</sup>
200	47,3 <sup>+0</sup>
250	49,0 <sup>+0</sup>
315	51,9 <sup>+0</sup>
400	54,5 <sup>+0</sup>
500	54,9 <sup>+0</sup>
630	58,2 <sup>+0</sup>
800	61,0 <sup>+0</sup>
1000	65,0 <sup>+0</sup>
1250	67,9 <sup>+0</sup>
1600	70,7 <sup>+0</sup>
2000	67,4 <sup>+0</sup>
2500	67,2 <sup>+0</sup>
3150	68,5 <sup>+0</sup>
4000	71,6 <sup>+0</sup>
5000	75,1 <sup>+0</sup>
Hz	dB

(\*) : valeur corrigée

(+) : limite de poste

$R_w (C; C_{tr}) \geq 58 (-3 ; -9) \text{ dB}$

Pour information

$R_a = R_w + C \geq 55 \text{ dB}$

$R_{a,tr} = R_w + C_{tr} \geq 49 \text{ dB}$

#### 4.4.2.3 CLASSEMENT

La paroi a obtenu le classement  $R_w [C ; C_{tr}] = 58[-3 ; -9]$  dB. Cf tableau 10 ci-dessous.

Ce classement est tout à fait compatible avec les solutions habituelles de bardage double peau.

**Tableau 10** Résultats de l'indice d'affaiblissement acoustique R du bardage double peau avec écarteurs bois (Source Rapport d'essai CSTB AC23 13008-3)

N° essai	Cloisons soumises aux essais	Résultats $R_w [C ; C_{tr}]$ (dB)
1	Bardage : PROFEEL 2 (épaisseur 420 mm)	$\geq 58 [-3 ; -9]$

#### CONCLUSION



La performance acoustique du bardage est compatible avec les exigences du marché.

4

5

## PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE

### 4.5.1 RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SELON LA NF EN 15804+A1+CN DU SYSTÈME DE BARDAGE

**Tableau 11** Réchauffement climatique selon la NF EN 15804 + A1 +CA du système de bardage

		TOTAL sans Module D	Module D	TOTAL avec Module D
		kg eq. CO <sub>2</sub>	kg eq. CO <sub>2</sub>	kg eq. CO <sub>2</sub>
Plateau acier	HACIERBA 1.500.90BS ép. 0,75 mm	23,2	-10,4	12,8
Isolant en fibre de bois Soprema devant plateau de 2x100+80 mm	2,325x (isolant en fibre de bois Soprema 120 mm $\lambda = 0,038 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	3,2	-4,5	-1,2
Pare-pluie 0,2 mm Sd 0,02	DED (Donnée environnementale par défaut)	1,2	0,0	1,2
Oméga 2 mm 40x205x60x205x40 tous les 2 m	Poutre en éléments minces	12,0	-4,2	7,8
Tasseaux bois 60x20 tous les 2 m	Charpente résineux	0,04	-0,1	0,0
Isolant en fibre de bois Soprema en fond de plateau de 90 mm	0,75x (isolant en fibre de bois Soprema 120 mm $\lambda = 0,038 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	1,0	-1,4	-0,4
Bardage acier	TRAPEZA 6.175.25B/HB ép. 0,75 mm	18,9	-7,9	11,0
Ecarteur bois (sapin) 60x75 tous les 2 m	Charpente résineux	0,2	-0,3	-0,1
<b>TOTAL</b>		<b>59,8</b>	<b>-28,8</b>	<b>31,1</b>

## 4.5.2 PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE SELON LA NF EN 15804 + A2 + CN DU SYSTÈME DE BARDAGE

Pour le système de bardage, une FDES est réalisée selon la norme NF EN 15804 + A2 et son complément national. Elle sera vérifiée et publiée sur INIES.

Les inventaires des systèmes sont calculés à partir de données génériques Ecoinvent et à partir de données spécifiques pour la fabrication des profils en acier. Les modélisations sont effectuées avec le logiciel TEAM (Cf. Tableau 12).

**Tableau 12** Données utilisées pour calculer les impacts environnementaux du système de bardage

Système de bardage	Données	Données génériques : Ecoinvent v3.9.1
Plateau acier	Données spécifiques de fabrication du plateau + données génériques pour la bobine acier	steel production, converter, unalloyed - LCI - RER - CO hot rolling, steel - LCI - Europe without Austria - CO sheet rolling, steel + zinc coating, coils - LCI - RER - CO powder coating, steel - LCI - RER - CO
Isolant en fibre de bois Soprema devant plateau de 2x100+80 mm	Données génériques du panneau en fibre de bois	fibroboard production, soft, from wet & dry processes - fibroboard, soft - Europe without Switzerland - fibroboard, soft
Pare-pluie 0,2 mm Sd 0,02	Poutre en éléments minces	polypropylene production, granulate extrusion, plastic film
Oméga 2 mm 40x205x60x205x40 tous les 2 m	FDES Poutre en éléments minces en acier utilisée comme élément porteur horizontal (lisse, solive)	
Tasseaux bois 60x20 tous les 2 m	Données génériques du liteau bois	lath, softwood, raw, air drying to u = 20 % - Europe without Switzerland - sawnwood, lath, softwood, raw, dried (u = 20 %)
Isolant en fibre de bois Soprema en fond de plateau de 90 mm	Données génériques du panneau en fibre de bois	fibroboard production, soft, from wet & dry processes - fibroboard, soft - Europe without Switzerland - fibroboard, soft
Bardage acier	Données spécifiques de fabrication du bardage + données génériques pour la bobine acier	steel production, converter, unalloyed - LCI - RER - CO hot rolling, steel - LCI - Europe without Austria - CO sheet rolling, steel + zinc coating, coils - LCI - RER - CO powder coating, steel - LCI - RER - CO
Ecarteur bois (sapin) 60x75 tous les 2 m	Données génériques de l'écarteur bois	beam, softwood, raw, air drying to u = 20 % - Europe without Switzerland - sawnwood, beam, softwood, raw, dried (u = 20 %)

4

6

## DURABILITÉ/VENTILATION – RÉSULTATS PROFEEL 1

### 4.6.1 DESCRIPTION DES BARDAGES TESTÉS

Il s'agissait d'un bardage double peau avec écarteur oméga et lame d'air de 20 mm (cf. rapport profeel pour l'ensemble des dispositions technologiques mise en œuvre).

Cinq isolants biosourcés ont été testés dont la fibre de de bois.

Le lien décrivant les bardages testés ainsi que les résultats d'essais obtenus est donné ci-dessous :

<https://www.proreno.fr/documents/essais-de-bardage-en-acier-avec-isolants-biosources>

Cf article **Assessment of the Usability of Some Bio-Based Insulation Materials in Double-Skin Steel Envelopes Sustainability 2022, 14(17), 10797**

### 4.6.2 RÉSULTATS DES MESURES

Au terme de 9 mois, les bardages étant équipés d'une lame d'air de 20 mm, aucune dégradation des isolants biosourcés n'a été constatée.

Le présent projet garde les mêmes dispositions en remplaçant les écarteurs acier oméga par des écarteurs bois.

4

7

## COMPORTEMENT SISMIQUE

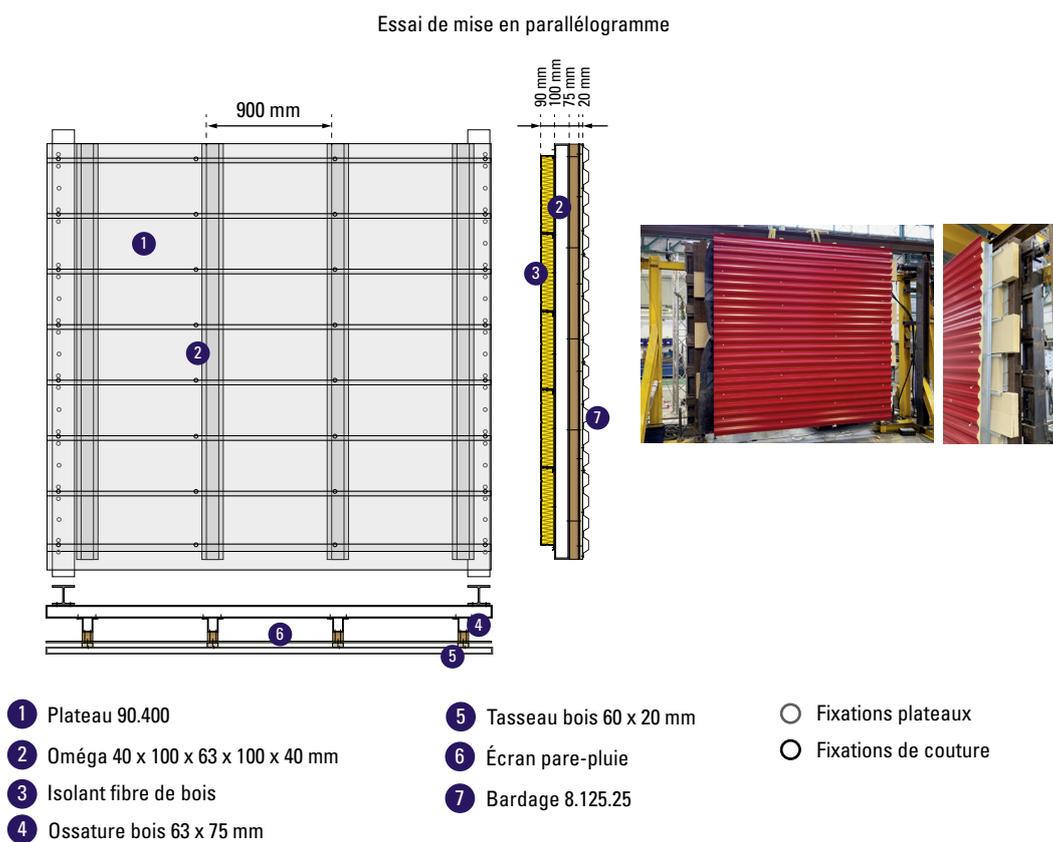
### 4.7.1 ESSAI DE MISE EN PARALLÉLOGRAMME

Les essais sont effectués selon les principes du e-cahier 3725 du CSTB. Les principes sont également détaillés en annexe C des Recommandations Professionnelle Rage Bardages en acier de 2014.

#### 4.7.1.1 DESCRIPTION DE LA MAQUETTE

La dimension de la maquette est de 3 m x 3 m. La figure 18 ci-dessous détaille le plan et montre la maquette testée.

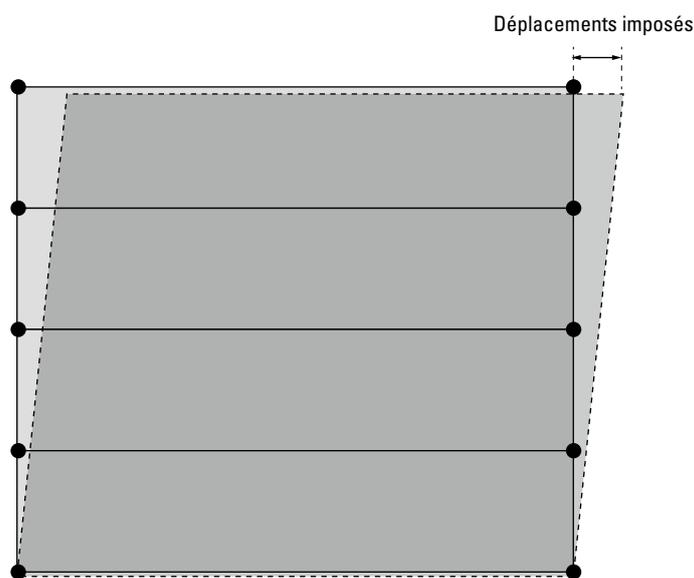
**Figure 18** Plan et vue de la maquette testée en parallélogramme



#### 4.7.1.2 DESCRIPTION DU PROTOCOLE D'ESSAI

Le Protocole d'essai suit les principes du cahier 3725 du CSTB. Les principes sont également détaillés en annexe C des Recommandations Professionnelles RAGE Bardages en acier de 2014. La figure 19 illustre le principe de l'essai de déplacements imposés dans le plan de la maquette. Le tableau 13 ci-dessous donne les différentes phases de déplacement qui ont été appliquées dans le plan de la façade.

**Figure 19** Principe de l'essai de déplacements imposés dans le plan de la maquette



**Tableau 13** Différentes phases de déplacement appliquées dans le plan de la maquette

Tableau : Sollicitations à appliquer lors de chaque phase

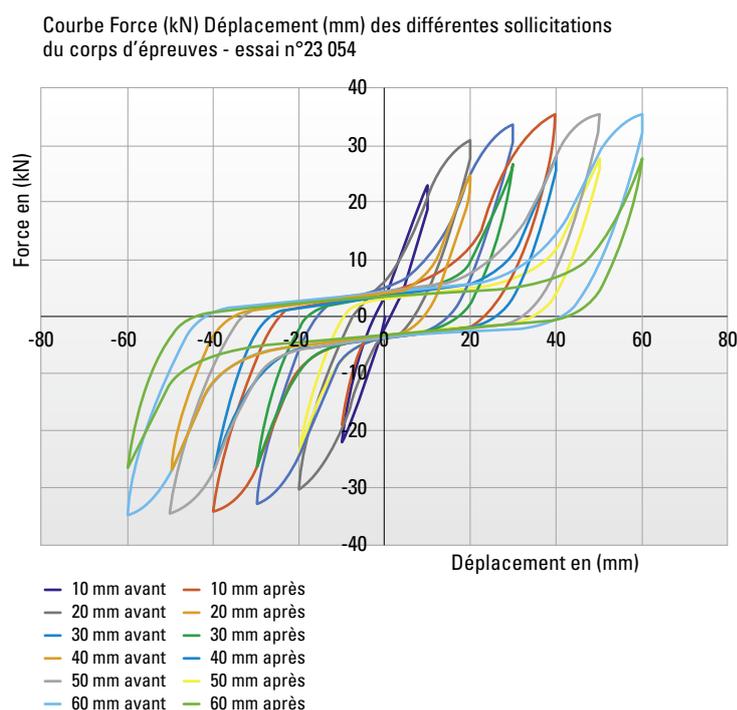
	PHASE 1	PHASE 2	PHASE 3	PHASE 4	PHASE 5	PHASE 6
Déplacement statique	± 10 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 20 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 30 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 40 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 50 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 60 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz
Déplacement dynamique	± 10 mm 20 cycles $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$	± 20 mm 20 cycles $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$	± 30 mm 20 cycles $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$	± 40 mm 20 cycles $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$	± 50 mm 20 cycles $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$	± 60 mm 20 cycles $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ Hz}$
Déplacement statique	± 10 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 20 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 30 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 40 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 50 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz	± 60 mm 1 cycle $f = 0,02$ Hz

### 4.7.1.3 RÉSULTATS D'ESSAI

Le système n'est pas tombé pendant les essais sous l'ensemble des déplacements imposés.

La maquette a supporté tous les cycles de déplacements (voir figure 20) imposés sans tomber (voir Tableau 14).

**Figure 20** Résultats des essais de mise en parallélogramme – courbe cyclique d'efforts/déplacements



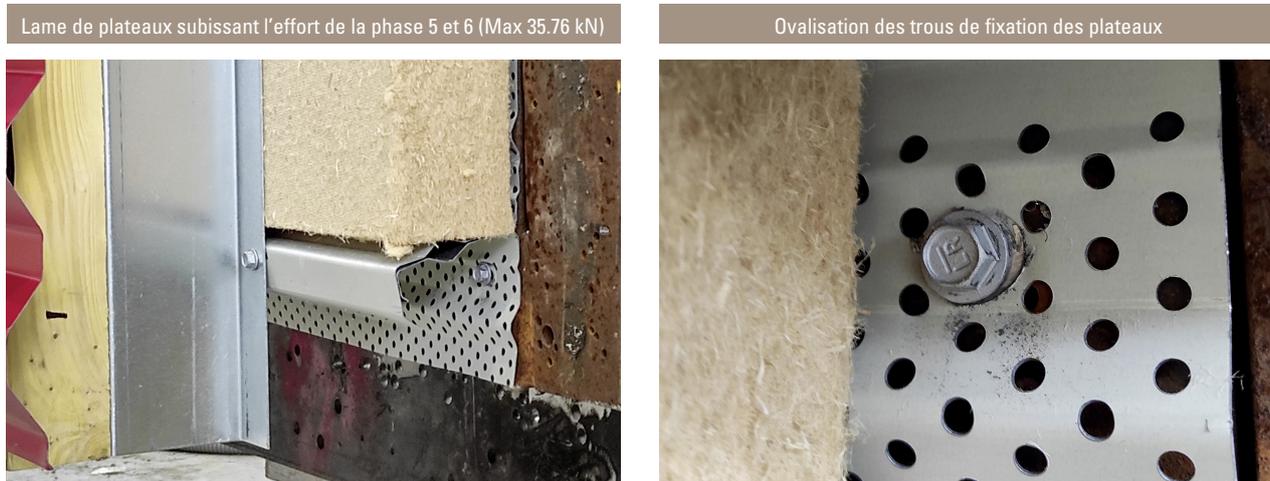
La maquette a subi au niveau des plateaux quelques déformations des lèvres (voir figure 21 ci-dessous) et de légères ovalisations au niveau des fixations plateau/structure support (voir figure 21 ci-dessous) sans conséquence pour la tenue mécanique de la maquette.

**Tableau 14** Résultats des essais de mise en parallélogramme – constats de la maquette lors des différents cycles

Tableau : Résultats de l'essai n° 23 054 – Mise en parallélogramme

N° DE PHASE	AMPLITUDE DES DÉPLACEMENTS IMPOSÉS	OBSERVATIONS
Phase 1	± 10 mm	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 2	± 20 mm	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 3	± 30 mm	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 4	± 40 mm	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 5	± 50 mm	- Pas de chute d'élément. - Ovalisation trou de fixation. - Lame de plateaux
Phase 6	± 60 mm	- Pas de chute d'élément. - Ovalisation trou de fixation. - Lame de plateaux

**Figure 21** Résultats des essais de mise en parallélogramme – vue des déformations locales non problématiques pour la résistance sismique (ductilité de la maquette)



## CONCLUSION



La maquette n'est pas tombée après avoir subi tous les cycles de déplacements imposés dans le plan.

## 4.7.2 ESSAI D'EXCITATION

Les essais sont effectués selon les principes du cahier 3725 du CSTB. Les principes sont également détaillés en annexe C des Recommandations Professionnelles Rage Bardages en acier de 2014.

### 4.7.2.1 DESCRIPTION DE LA MAQUETTE

La dimension de la maquette est de 3 m x 3 m.

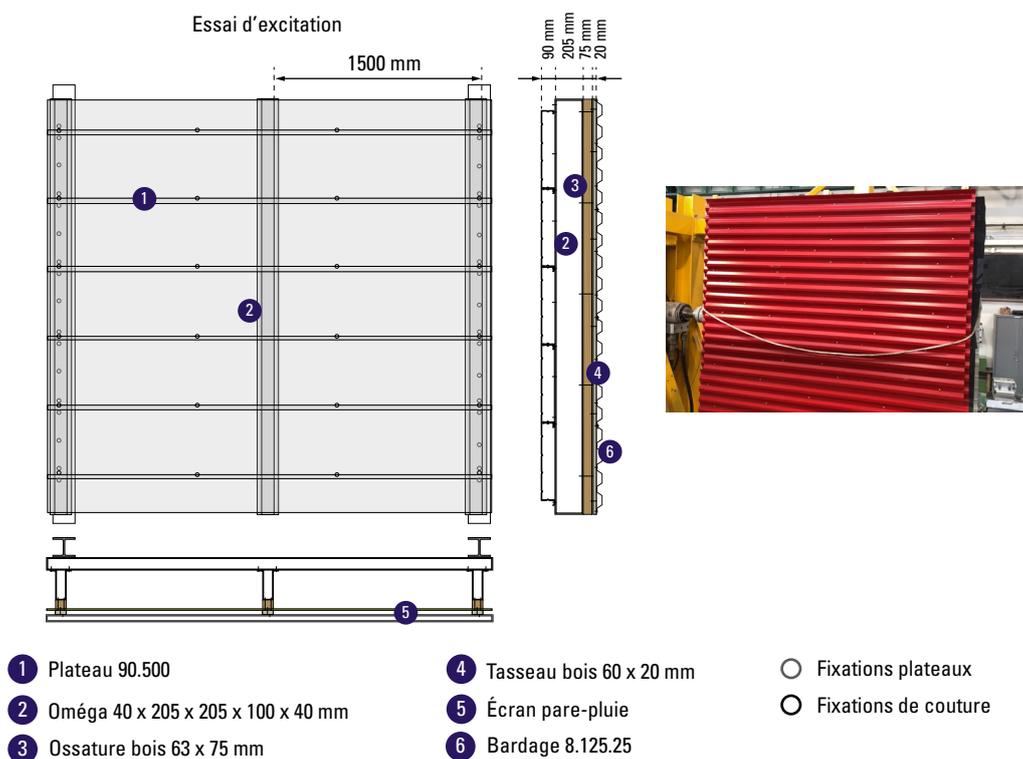
Les masses suivantes ont été ajoutées pour couvrir des portées de plateau de 6 m.

Chargement supplémentaire sur la structure de **1030 kg**

- Sur les plateaux = **800 kg**
- Sur les 3 omégas =  $3 \times 30$  kg = **90 kg**
- Sur le bardage = **140 kg**

La figure 22 ci-dessous illustre le plan et l'élévation de la maquette testée.

**Figure 22** Plan et vue de la maquette testée en excitation



#### 4.7.2.2 DESCRIPTION DU PROTOCOLE D'ESSAI

Le protocole d'essai suit les principes du cahier 3725 du CSTB. Les principes sont également détaillés en annexe C des Recommandations Professionnelles Rage Bardages en acier de 2014. La figure 23 ci-dessous illustre le principe de l'essai d'excitation dans le plan de la maquette. Le tableau 15 ci-dessous illustre les différentes phases d'excitation qu'a subies la maquette dans son plan.

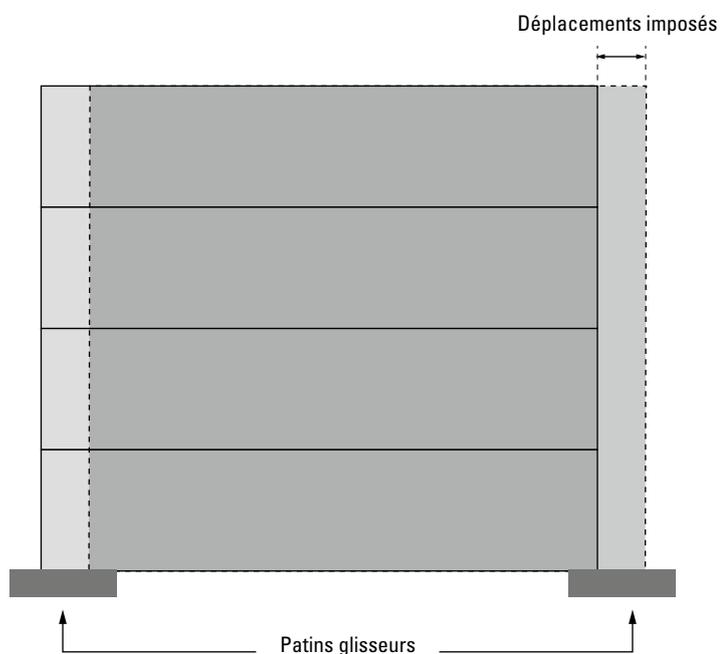
**Figure 23** Principe de l'essai d'excitation imposé dans le plan de la maquette**Tableau 15** Différentes phases d'excitation subies par la maquette

Tableau : Résultats de l'essai n° 23 053 – Sollicitations sismiques dans le plan du support

N° DE PHASE	ACCÉLÉRATIONS IMPOSÉES $\alpha_i$ en $m/s^2$	OBSERVATIONS
Phase 1	3,5	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 2	5	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 3	6,4	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 4	8	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 5	9,3	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 6	11,2	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 7	14	- Pas de chute d'élément. - Jeux entre vis de fixation et lame de plateau.
Phase 8	16,5	- Pas de chute d'élément. - Jeux entre vis de fixation et lame de plateau.

### 4.7.2.3 RÉSULTATS D'ESSAI

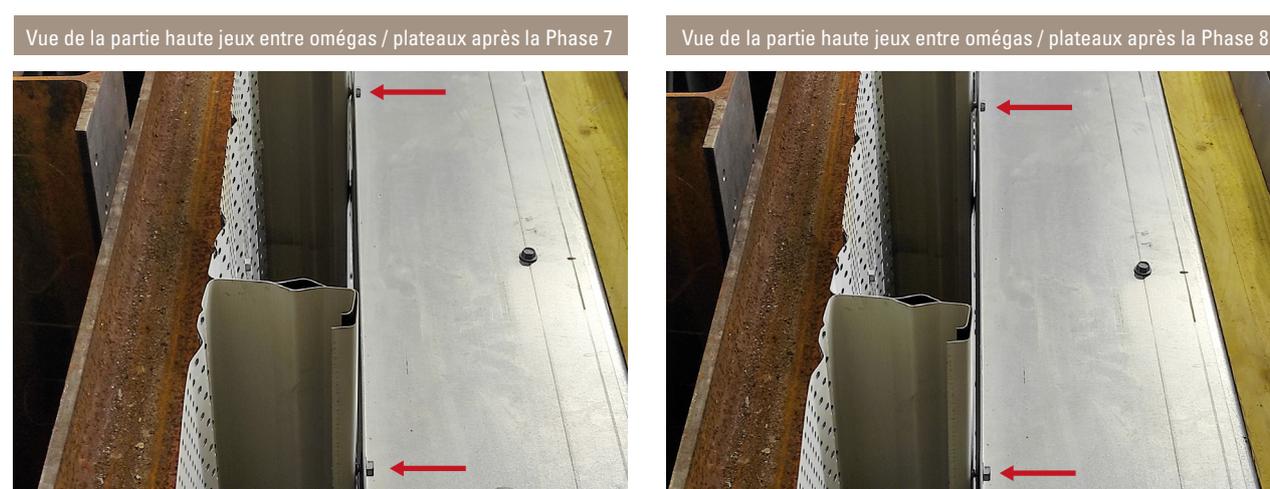
Le système n'est pas tombé pendant les essais sous l'ensemble des Accélération imposées (Voir tableau 16 ci-dessous).

Les omégas se sont légèrement déformés mais sans conséquences pour la tenue mécanique de la maquette. On peut ainsi voir la ductilité de la façade avec écarteurs bois (voir Figure 24 ci-dessous).

**Tableau 16** Résultats des essais de mise en excitation dans le plan

N° DE PHASE	ACCÉLÉRATIONS IMPOSÉES $\alpha_i$ en $m/s^2$	OBSERVATIONS
Phase 1	3,5	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 2	5	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 3	6,4	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 4	8	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 5	9,3	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 6	11,2	- Pas de chute d'élément. - Pas de dégradation observée.
Phase 7	14	- Pas de chute d'élément. - Jeux entre vis de fixation et lame de plateau.
Phase 8	16,5	- Pas de chute d'élément. - Jeux entre vis de fixation et lame de plateau.

**Figure 24** Vue des écarteurs omégas + chevrons après les 8 phases d'excitations



## CONCLUSION



La maquette n'est pas tombée après avoir subi tous les cycles d'excitation.

### 4.7.3 DOMAINE D'EMPLOI DU SYSTÈME DE BARDAGE AVEC ÉCARTEURS BOIS

Le domaine d'emploi du système de bardage double peau est donné dans le tableau 17 ci-dessous. Il est établi sur la base du rapport CSTB du 21 09 2023 Ref DEB-R2EB-2023-144-HB/EH N° SAP 70086984.

**Tableau 17** Domaine d'emploi des bardages double peau avec écarteurs bois tels que défini dans ce rapport  
[Source rapport CSTB du 21 09 2023 Ref DEB-R2EB-2023-144-HB/EH N° SAP 70086984]

		Catégorie d'importance du bâtiment			
		I	II	III	IV
Zone sismique	1	Validé	Validé	Validé	Validé
	2	Validé	Validé	Validé (*)	Validé (*)
	3	Validé	Validé (*)	Validé (*)	Validé (*)
	4	Validé	Validé (*)	Validé (*)	Validé (*)
	5	Validé	Non validé	Non validé	Non validé

(\*) sous réserve de respecter l'ensemble des dispositions constructives ci-après

Ensemble des dispositions constructives à respecter :

Les résultats de cette étude permettent de valider une mise en œuvre du procédé de bardage, en zones sismiques avec le domaine d'emploi suivant :

- bâtiments de catégorie d'importance I à IV,
- zones de sismicité 1 à 4,
- sols de classes A à E,

tels que définis par la réglementation sismique actuelle.

**Sous réserve de respecter les conditions ci-dessous :**

**Plateaux :**

- Profil conforme aux Recommandations Professionnelles
- Des plateaux perforés ou crevés de largeur maxi 500 mm, de hauteur maxi 90 mm, et d'épaisseur mini 0,75 mm, en aciers S 320 GD
- Portée maximale des plateaux entre appuis de 6 m
- Une mise en œuvre horizontale
- Des plateaux couturés tous les 1 m par vis autotaraudeuses de Ø 4,8 x 17 mm
- Une fixation des plateaux au support par vis de Ø 6 x 35 mm, avec 3 fixations par appui

**1<sup>er</sup> écarteur (Oméga) :**

- Ecarteur de type Oméga 40 x 205 x 63 x 205 x 40 en acier S 280 GD avec une largeur de semelle de 40 mm, une épaisseur de 2 mm et une hauteur maxi 205 mm
- Pose verticale
- Fixation de l'écarteur sur les plateaux par 2 fixations (1 fixation à chaque croisement de lèvres/écarteurs (fixation en quinconce des omégas exclue), la fixation est de type vis de diamètre Ø 6,3 mm, fixation GOLDDOTOLE 1.5 TH10 2C 6,3 x 22 ou équivalent
- Un entraxe entre écarteurs compris entre 900 mm et 1500 mm

**2<sup>e</sup> écarteur (chevron bois) :**

- Chevron sapin traité 63 x 75 mm, profondeur 75 mm de classe C18
- Le 2<sup>e</sup> écarteur est superposé au 1<sup>er</sup> écarteur
- Fixation du 2<sup>e</sup> écarteur sur le du 1<sup>er</sup> écarteur oméga par vis de diamètre 6,3 mm x 110 mm en acier cimenté zingué avec une fixation tous les 500 mm
- Un entraxe vertical identique à celui du 1<sup>er</sup> écarteur (Oméga)

**Tasseau bois :**

- Tasseau bois en sapin traité 18 x 63 mm, de profondeur 18 mm et de classe C18
- Pose verticale,
- Fixation du tasseau sur le chevron bois par vis de diamètre 6,3 x 50 mm en acier cimenté zingué, VBU PRO TF 6 x 50 ou équivalent, avec une fixation tous les 500 mm

**Parement extérieur :**

- Profil de bardage nervuré, plein, de type Trapéza 8.125.25 de chez AMCF, en pose horizontale, d'épaisseur 0,75 mm minimum et de largeur utile de 1 m
- de masse surfacique maxi de 15 kg/m<sup>2</sup> et un entraxe entre écarteurs de 1,5 m
- Fixation par vis en Acier supraccoat 2C, de diamètre 6,5 x 53 mm, (référence Zacrovis bois + VA14 ou équivalent) avec une densité de fixation de 3,5/m<sup>2</sup>

**Isolant thermique :**

- Nature : Fibre de bois
- Référence : isolant en fibres de bois de Soprema
- Masse volumique : 120 kg/m<sup>3</sup>
- Epaisseur totale : 80 mm en fond de plateau + 200 mm entre écarteurs

**Fixations :**

- Les fixations utilisées doivent être identiques aux fixations testées (diamètre mini, qualité, matériaux, performances mécaniques Pk traction. Pk cisaillement, flexion)

**Profondeur totale du complexe de bardage :**

- La distance totale entre la fixation du profil de bardage et les lèvres du plateau ne doit pas dépasser 300 mm

Conformément aux prescriptions du Cahier du CSTB 3725, un fractionnement du système doit être réalisé à chaque plancher lors de la mise en œuvre des procédés de bardage rapporté en zones sismiques.

Il est rappelé que le dimensionnement du procédé aux actions sismiques implique un dimensionnement préalable aux actions courantes (poids propre, charges d'exploitation, charges climatiques, ...)

Ce document ne traite pas des mesures préventives spécifiques, à définir par le maître d'ouvrage dans les documents particuliers du marché, qui peuvent être demandées notamment dans le cas de bâtiments de catégorie d'importance IV pour garantir la continuité de leur fonctionnement en cas de séisme.

**Les résultats de cette étude sont valables dans la limite des hypothèses définies dans le présent rapport.**

Ce document ne traite pas des mesures préventives spécifiques, à définir par le maître d'ouvrage dans les documents particuliers du marché, qui peuvent être demandées notamment dans le cas de bâtiments de catégorie d'importance IV pour garantir la continuité de leur fonctionnement en cas de séisme.

**Les résultats de cette étude sont valables dans la limite des hypothèses définies dans le présent rapport.**



# SYSTÈME DE COUVERTURE DOUBLE PEAU AVEC FAUSSES PANNES BOIS

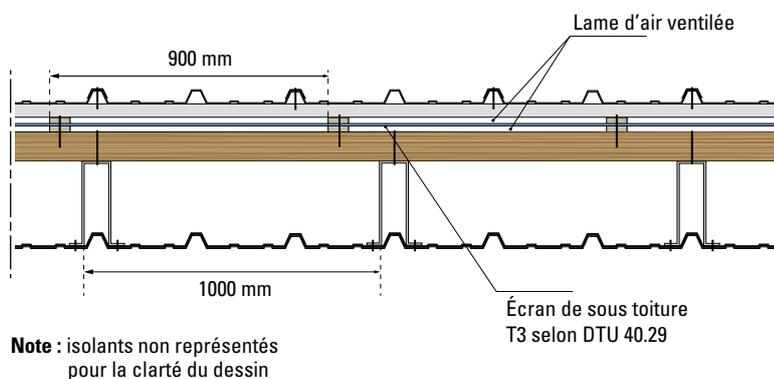
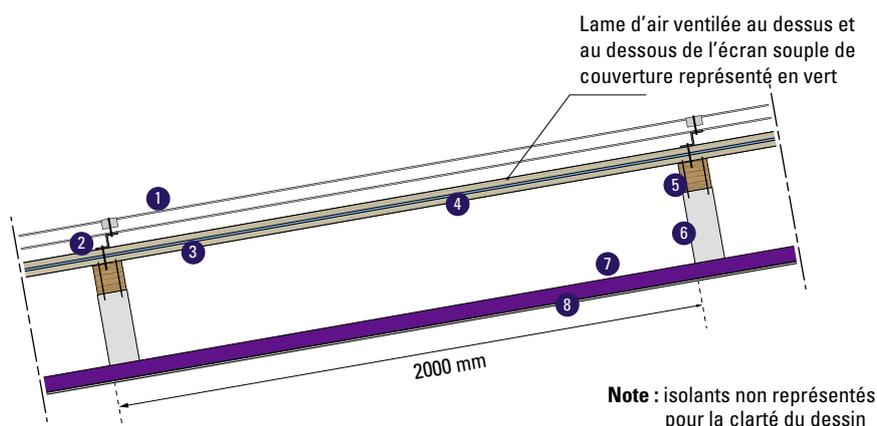
5

1

## DESCRIPTION TECHNOLOGIQUE

La couverture retenue (Voir figures 25 et 26) est une couverture froide qui permet une ventilation de la plaque de couverture, des bois et de l'écran de sous-toiture. Dans cette solution, les spécificités à noter par rapport à la technique traditionnelle du DTU 40.35 sont :

- l'ajout systématique d'un pare-vapeur en partie basse pour créer une barrière à la vapeur d'eau et protéger la fausse panne bois et la fibre bois,
- le remplacement de la fausse panne oméga acier par une fausse panne bois de 63 mm de largeur et de 75 mm de hauteur, (stockage carbone),
- un rehaussement des entretoises à 250 mm pour avoir les 250 mm d'isolant en fibre de bois,
- la mise en œuvre d'un système de contre-liteaux tous les 90 cm en dessous et au-dessus de l'écran de sous-toiture pour le maintenir en place d'une part et assurer une lame d'air ventilée suivant rampant sous le bac extérieur d'autre part,
- l'ajout d'un écran de sous-toiture et d'une lame d'air ventilée en partie supérieure et inférieure de l'écran (élimination des condensations éventuelles en sous-face de profil, protection de la fibre de bois de l'humidité).

**Figure 25** Vue de la couverture double peau avec fausses pannes bois**Figure 26** Fausses pannes bois sur entretoise

- |   |   |
|---|---|
| ① Profil 39T                                | ⑤ Fausse panne bois 63 x 75 mm                          |
| ② Z 40 x 40 x 40 mm                         | ⑥ Entretoise omega ponctuel 40 x 250 x 72 x 250 x 40 mm |
| ③ Support bois 60 x 20 mm                   | ⑦ Pare-vapeur   |
| ④ Écran sous-toiture selon CGM du DTU 40.29 | ⑧ Profil 39T  |

Deux techniques seront visées :

- Le couverture « acoustique » (profil 3 x 333 x 45 ep 0,63 mm nominale intérieur perforé, laine minérale avec pare-vapeur et fibre de bois entre fausses pannes bois, écran de sous-toiture, peau extérieure 3 x 333 x 45 ep 0,63 mm nominale),
- La couverture « non acoustique » (profil 3 x 333 x 45 ep 0,63 mm nominale intérieur non perforé, pare-vapeur en partie basse avant pose de la fibre de bois en fond de profil et fibre de bois entre fausses pannes bois, écran de sous-toiture, peau extérieure 3 x 333 x 45 ep 0,63 mm nominale).

## 5

## 2

## PERFORMANCE EN RÉACTION AU FEU

## 5.2.1 DESCRIPTION DE LA MAQUETTE SBI

Les maquettes SBI ont été réalisées conformément à la norme NF EN 14782 et à la norme NF EN 13823. La performance a été établie à partir de 3 maquettes de 1,50 x 1,0m x 1,50 m.

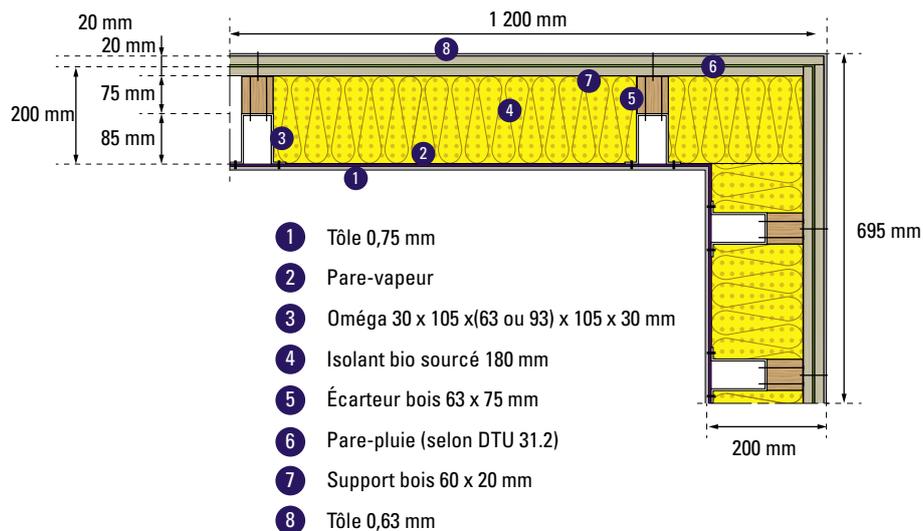
3 maquettes de différentes couleurs ont été réalisées (CF Tableau 18 ci-dessous) :

**Tableau 18** Définition des 3 maquettes testées (Source AMCF et Rapport d'essais CSTB n° DSSF-22-13008-B -)

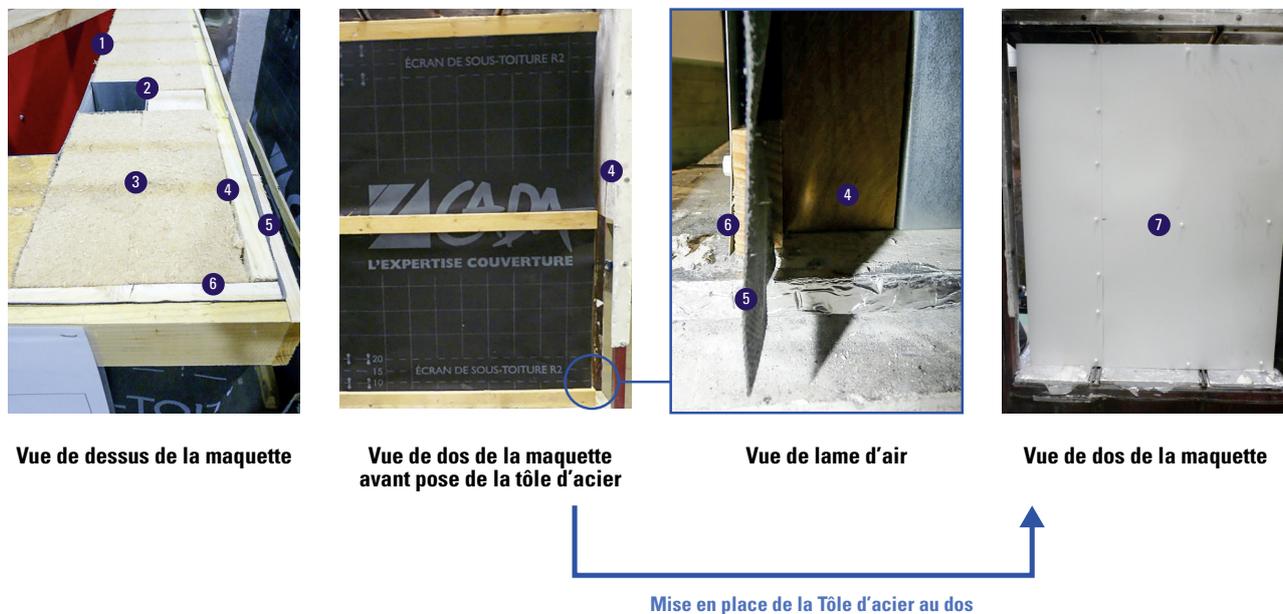
N° essai	N° échantillon	Référence	Date essai	Opérateur	Epaisseur total mesurée (mm) (hors tout)	Joint sur grande aile	Lame d'air	Coloris Face exposée
1	1	Hairplus® (Profeel 2 Couverture)	04/07/2023	V. MILLET	200	Vertical à 200 mm	Avec (20 mm entre l'isolant et le pare-vapeur, puis 20 mm entre le pare-vapeur et la tôle d'acier)	Noir
2	2				200			Blanc
3	3		11/07/2023	F. DUCASSE	200			Rouge

Les Figures 27 et 28 illustrent lesdites maquettes.

**Figure 27** Maquette SBI de couverture avec fausse panne bois (Source AMCF)



**Figure 28** Réalisation de la Maquette SBI de la couverture avec fausse panne bois (Source AMCF et Rapport d'essais CSTB n° DSSF-22-13008-B-)



- |   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| 1 | Couche n°1 : Tôle d'acier (face exposée au feu)                | 5 | Couche n°5 : Écran souple                   |
| 2 | Couche n°2 : Pare-vapeur                                       | 6 | Couche n°6 : Tasseaux en position verticale |
| 3 | Couche n°3 : Isolant fibre de bois                             | 7 | Couche n°7 : Tôle d'acier                   |
| 4 | Couche n°4 : Tasseau en position horizontale (épaisseur 20 mm) |   |   |

**Note** : les tasseaux créent une lame d'air entre l'isolant et l'écran souple puis entre ce dernier et la tôle d'acier appliqué au dos

## 5.2.2 RÉSULTATS D'ESSAI SBI

Les photos de la maquette après essai sont données à la figure 29 ci-dessous :

**Figure 29** Comportement des 3 Maquette SBI du bardage avec écarteurs bois durant le SBI  
(Source AMCF et Rapport d'essais CSTB n° DSSF-22-13008-B)



Les résultats proprement dit sont les suivants :

- Le figra à 0,2 W/s et 0,4 W/s obtenu était de 62,1
- Le smogra obtenu était de 8,2 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>
- Le TSP 600s était de 45,5 m<sup>2</sup>

La synthèse des résultats est donné dans le tableau 19 ci-dessous :

**Tableau 19 Synthèse des résultats de l'essai SBI pour le bardage (Source Rapport d'essais CSTB n° D n° DSSF-22-13008-B)**

#### Synthèse des résultats

Moyenne des différents paramètres sur 3 épreuves [essais 1-2-3]

DESIGNATION	FIGRA 0,2 W/s	FIGRA 0,4 W/s	THR <sub>600s</sub> MJ	FDP/LFS <sub>edge</sub>	SMOGRA m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	TSP <sub>600s</sub> m <sup>2</sup>
Hairplus® (Profeel 2 Couverture)*	62,1	62,1	4,9	Sans/Non atteint	8,2	45,5

\* Lors des essais réalisés, nous n'observons pas d'inflammation dans la lame d'aire (dos de l'isolant)

### 5.2.3 CLASSEMENT EN RÉACTION AU FEU

Le rapport de classement en date du 20 juillet 2023 établi par le CSTB selon la norme NF EN 13501-1 est Bs1d0 (Cf. tableau 20).

**Tableau 20 Rapport de Classement de réaction au feu (Source CSTB n° RA du 20 juillet 2023)**

Comportement au feu <i>Fire behaviour</i>		Production de fumées <i>Smoke production</i>		Gouttes ou particules enflammées <i>Flaming droplets or debris</i>
B	-	s1	,	d0

Classement / Classification : B - s1, d0

#### CONCLUSION



Les performances de réaction au feu obtenues sont compatibles avec les exigences du marché.

## 5 3 PERFORMANCE THERMIQUE

### 5.3.1 GÉNÉRALITÉS – MOYENS DE CALCUL – MODÉLISATION

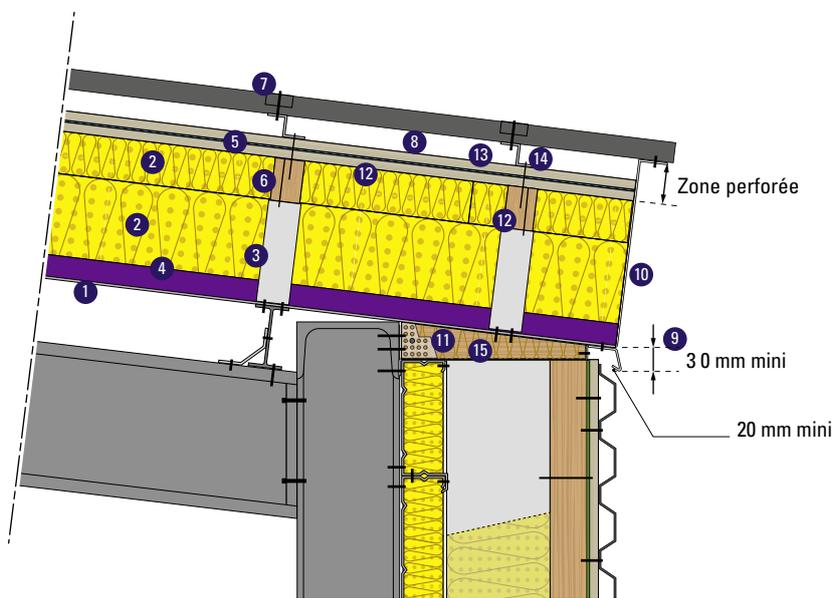
Les différentes solutions ont été modélisées à partir du logiciel de calcul thermique BISCO en 2 dimensions et Trisco en 3 dimensions par le CSTB.

### 5.3.2 PERFORMANCE EN PARTIE COURANTE

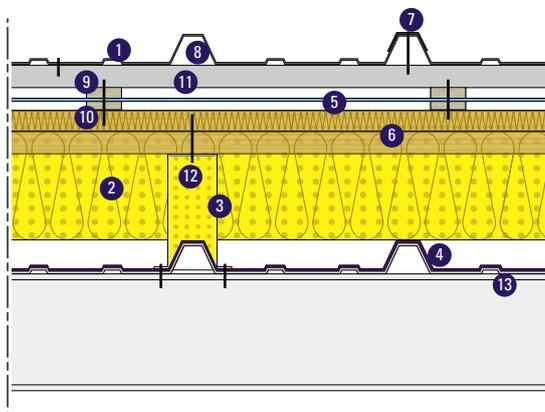
Le  $U_p$  du système visé est  $\leq 0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , ponts thermiques intégrés compris. Le détail de principe de la solution étudiée est donné à la figure 30 ci-dessous.

Les fausses pannes bois étant tous les 2 m d'entre-axes. Largeur 63 mm.

Les performances sont données dans le tableau 21 -ci-dessous.

**Figure 30** Détail de la solution de couverture avec fausse panne bois

- ① Profil de couverture acier (3 × 333 × 45 mm) d'épaisseur nominale 0,63 mm
- ② Isolation biosourcée en fibre de bois : 2 couches d'isolant de 100 mm et 1 couche de 30 mm d'épaisseur dont la conductivité thermique est égale 0,038 W/(m.K)
- ③ Entretoise en acier (pontet de hauteur 250 mm) d'épaisseur 2 mm espacée tous les mètres
- ④ Pare-vapeur disposé avant les pontets
- ⑤ Écran de sous toiture répondant au CGM du DTU 40.29
- ⑥ Fausse panne bois chevron sapin (63 × 75 mm) tous les 2 m, de classe d'emploi 2, fixée mécaniquement sur les entretoises n° 3
- ⑦ Fixation acier de diamètre 6,3 mm avec cavalier et rondelle étanchéité
- ⑧ lame d'air semi-ventilée (ventilation par nervure)
- ⑨ Bavette rejet d'eau en acier d'épaisseur 0,63 mm
- ⑩ Pièce de fermeture en acier d'épaisseur 0,63 mm
- ⑪ Complément d'isolation dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)
- ⑫ Support bois (60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur la panne chevron bois n° 6
- ⑬ Support bois (60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur le support bois n° 12
- ⑭ Zed support en acier (40 × 40 × 40 mm) d'épaisseur 1,50 mm
- ⑮ Pièce bois en appui sur sabot à gauche et écarteur bois à droite



- 1 Profil de couverture acier (3 × 333 × 45 mm) d'épaisseur nominale 0,63 mm
- 2 Isolation biosourcée en fibre de bois : 2 couches de 100 mm et 1 couche de 30 mm d'épaisseur dont le lambda est égal à 0,038 W/(m.K)
- 3 Oméga support en acier (40 × 205 × 40 mm) d'épaisseur 2 mm
- 4 Pare-vapeur disposé avant le Zed support n° 3 et les entretoises
- 5 Écran de sous toiture répondant au CGM du DTU 40.29
- 6 Fausse panne bois, chevron sapin (63 × 75 mm) tous les 2 m, de classe d'emploi 2, fixée mécaniquement sur le Zed n° 3 et les entretoises
- 7 Fixation acier de diamètre 6,3 mm avec cavalier et rondelles d'étanchéité
- 8 lame d'air semi ventilée (ventilation par nervure)
- 9 Support bois ((60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur la panne chevron bois n° 6.
- 10 Support bois (60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur la panne chevron bois n° 9
- 11 Zed support en acier (40 × 40 × 60 mm) d'épaisseur 1,50 mm
- 12 Complément d'isolation dont le lambda est égal à 0,038 W/mK)
- 13 Profil de couverture

**Tableau 21** Exemple de performance thermique  $U_{pb}$  d'une couverture double peau avec écarteurs bois prenant en compte les ponts thermiques intégrés  $U_{pb} = U_{cb} + \Delta U_{ub}$  avec fausses pannes bois tous les 2 m

$U_{c,c}$	$\Psi_{1,c}$ (Chevron bois)	$\chi_{1,c}$ (Entretoise pontet)	$\Delta U_c$	$U_{p,c^2}$
W/(m <sup>2</sup> .K)	W/(m.K)	W/K	W/(m <sup>2</sup> .K)	W/(m <sup>2</sup> .K)
0,132	0,002	0,013	0,018	0,15

## POINT DE VIGILANCE

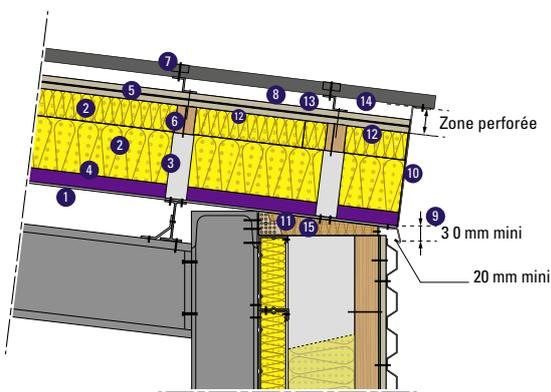


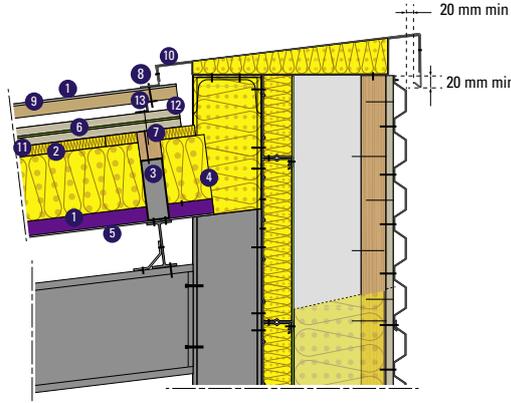
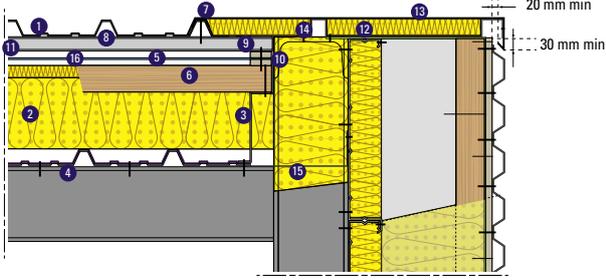
L'optimisation thermique et carbone nécessite des espacements des fausses pannes bois tous les 2000 mm. Cette dimension est antinomique avec les performances traditionnelles conformes au DTU 40.29 des écrans de sous toiture (900 mm). Des recherches /essais complémentaires sont nécessaires pour justifier les performances mécaniques des écrans de sous toiture jouant notamment le rôle de membranes de protection en phase provisoire à des portées supérieures à 900 mm.

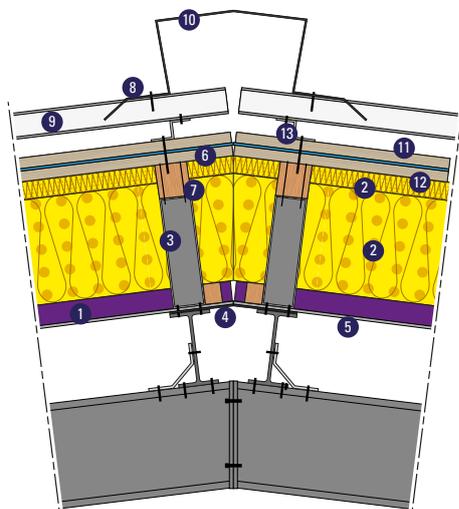
### 5.3.3 PERFORMANCE DES POINTS SINGULIERS

Les points singuliers qui ont été modélisés figurent au tableau 22 ci-dessous :

**Tableau 22** Valeurs des ponts thermiques = 0,15 au droit des points singuliers de couverture double peau avec fausse panne bois

Performances thermiques	$U_p$	W/m <sup>2</sup> .K	Valeurs obtenues $\psi$	EN ISO10211 EN ISO 10456
Ponts thermiques de liaison		W/m.K	0,28	EN ISO 10211 EN ISO 10456
	<ul style="list-style-type: none"> <li>① Profil de couverture acier (3 × 333 × 45 mm) d'épaisseur nominale 0,63 mm</li> <li>② Isolation biosourcée en fibre de bois dont la conductivité thermique est de 0,038 W/(m.K)</li> <li>③ Entretoise en acier (pontet de hauteur 205 mm) d'épaisseur 2 mm espacée tous les mètres</li> <li>④ Pare-vapeur disposé avant les pontets</li> <li>⑤ Écran de sous toiture répondant au CGM du DTU 40.29</li> <li>⑥ Fausse panne bois chevron sapin (63 × 75 mm) tous les 2 m, de classe d'emploi 2,</li> <li>⑦ Fixation acier de diamètre 6,3 mm avec cavalie et rondelle d'étanchéité</li> <li>⑧ Lame d'air semi-ventilée (ventilation par nervure)</li> <li>⑨ Bavette rejet d'eau en acier d'épaisseur 0,63 mm</li> <li>⑩ Pièce de fermeture en acier d'épaisseur 0,63 mm</li> <li>⑪ Complément d'isolation dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>⑫ Support bois (60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur la panne chevron bois n° 6</li> <li>⑬ Support bois (60 × 20 mm) fixé mécaniquement sur le support bois n° 12</li> <li>⑭ Zed support en acier (40 × 40 × 40 mm) d'épaisseur 1,50 mm</li> <li>⑮ Pièce bois en appui sur sabot à gauche et écarteur bois à droite</li> </ul> <p><math>\psi</math> égout</p>			

	 <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Profil acier (3 x 333 x 45 mm) d'épaisseur nominale 0,63 mm</li> <li>2 Isolation biosourcée fibre de bois : 2 couches de 100 mm et 1 couche de 30 mm dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)</li> <li>3 Entretoise en acier (pontet de hauteur 205 mm) d'épaisseur 2 mm, espacée tous les mètres</li> <li>4 Sous faitière en acier d'épaisseur nominale 0,63 mm</li> <li>5 Pare-vapeur disposé avant les pontets</li> <li>6 Écran type sous toiture répondant au CGM du DTU 40.29</li> <li>7 Fausse panne bois chevron sapin (60 x 75 mm) de classe d'emploi 2 tous les 2 m</li> <li>8 Fixation acier de diamètre 6.3 mm avec cavalier et rondelle d'étanchéité</li> <li>9 Lamé d'air semi ventilée (ventilation par nervure)</li> <li>10 Faitière simple crantée et ventilée en acier d'épaisseur 0,63 mm</li> <li>11 Support bois (60 x 20 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>12 Support bois (60 x 20 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>13 Zed support en acier (40 x 40 x 40 mm) d'épaisseur 1,50 mm</li> </ol> <p>ψ faitage simple</p>	W/m.K	0,29	EN ISO 10211 EN ISO 10456
	 <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Profil acier (3x333x45 mm) d'épaisseur nominale 0,63 mm</li> <li>2 Isolation biosourcée fibre de bois : 2 Couches de 100 mm et 1 couche de 30 mm</li> <li>3 Zed support en acier (40 x 205 x 40 mm) d'épaisseur 2 mm</li> <li>4 Pare-vapeur</li> <li>5 Écran type sous toiture répondant au CGM du DTU 40.29</li> <li>6 Fausse panne bois, chevron sapin (60 x 75 mm) tous les 2 m de classe d'emploi 2</li> <li>7 Fixation acier de diamètre 6,3 mm avec cavalier et rondelle d'étanchéité</li> <li>8 Lamé d'air semi-ventilée (ventilation par nervure)</li> <li>9 Support bois (60 x 20 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>10 Support bois (60 x 20 mm) de classe d'emploi 2</li> <li>11 Zed support en acier (40 x 40 x 40 mm) d'épaisseur 1,50 mm</li> <li>12 Complément d'isolation dont le lambda est égal 0,038 W/(m.K)</li> <li>13 Rive contre-pignon en acier d'épaisseur 0,63 mm</li> <li>14 Pièce support en acier d'épaisseur 1,50 mm mini</li> <li>15 Pièce de calfeutrement en acier d'épaisseur 0,63 mm</li> <li>16 Lamé d'air ventilée</li> </ol> <p>ψ bande de rive</p>	W/m.K	0,32	EN ISO 10211 EN ISO 10456



- 1 Profil acier (3 x 333 x 45 mm) d'épaisseur nominale 0,63 mm
- 2 Isolation biosourcée fibre de bois : 2 couches de 100 et 1 couche de 30 mm d'épaisseur dont la conductivité thermique est égale à 0,038 W/(m.K)
- 3 Entretoise en acier (pontet de hauteur 205 mm) d'épaisseur 2 mm espacée tous les mètres
- 4 Sous- faitière en acier d'épaisseur 0,63 mm
- 5 Pare-vapeur, disposé avant les pontets
- 6 Écran de sous toiture répondant au CGM du DTU 40.29
- 7 Fausse panne bois chevron sapin (60 x 75 mm) tous les 2 m, de classe d'emploi 2 fixée mécaniquement sur les entretoises n°3
- 8 Fixation acier de diamètre 6,3 mm avec rondelle d'étanchéité
- 9 lame d'air semi-ventilée (ventilation par nervure)
- 10 Faîtière double crantée et ventilée en acier d'épaisseur 0,63 mm
- 11 Support bois (60 x 20 mm) fixé mécaniquement sur la panne chevron bois de classe d'emploi 2 n°7
- 12 Support bois (60 x 20 mm) de classe d'emploi 2 fixé mécaniquement sur le support bois n°11
- 13 Zed support en acier (40 x 40 x 40 mm) d'épaisseur 1,50 mm

$\psi$  faitage double

W/m.K

0,0

EN ISO 10211  
EN ISO 10456

*Nota : les « sections » (au sens dessin industriel) n'ont pas vocation à être la représentation de détails d'exécution tels qu'ils doivent être établis pour les ouvrages d'enveloppe*

## CONCLUSION



La performance thermique est compatible avec la RE2020.

5

4

## PERFORMANCE ACOUSTIQUE

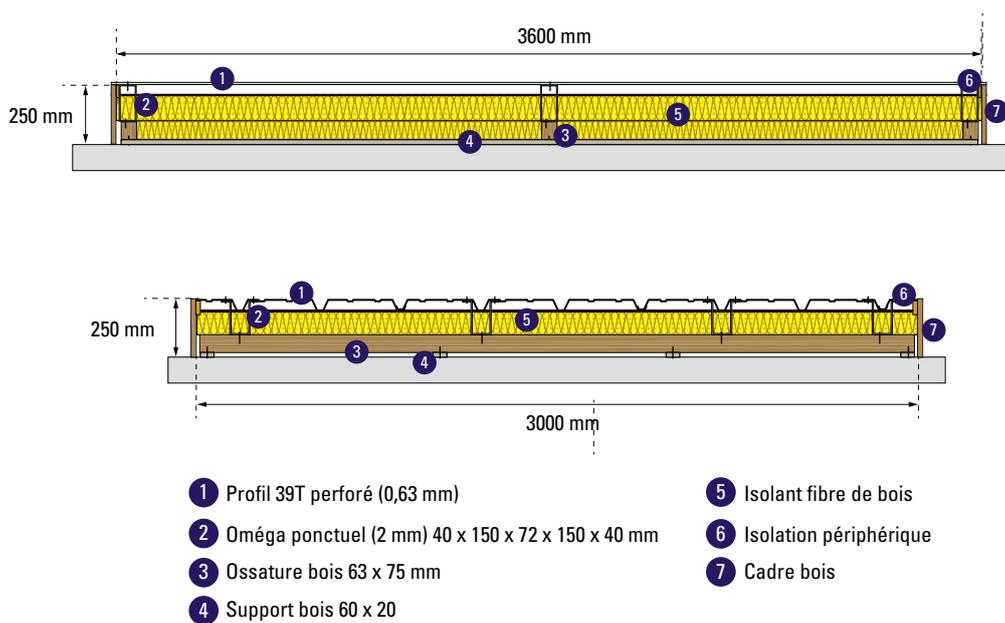
5.4.1 PERFORMANCE EN ABSORPTION  $\alpha_w$ 

Les mesures sont réalisées selon les normes NF EN 16487 (2014) et NF EN ISO 354 (2004) complétées par la norme NF EN ISO 11654 (1997) pour l'expression de la valeur  $\alpha_w$ .

## 5.4.1.1 DESCRIPTION DE LA MAQUETTE

L'essai acoustique d'absorption a été réalisé sur une maquette de dimension 3,0 m de haut x 3,6 m de large (Cf figures 31 et 32 ci-dessous)

**Figure 31** Maquette d'essai de couverture en absorption (Source AMCF)



**Figure 32** Montage de la Maquette d'essai acoustique d'absorption en couverture (Source Rapport d'essai CSTB AC23 13008-1)**Ossature en bois****Mise en œuvre des panneaux en fibres de bois ép. 80 mm****Mise en œuvre des panneaux en fibres de bois ép. 100 mm****Mise en œuvre des panneaux en laine de verre ép. 80 mm****Mise en œuvre de la tôle****Maquette terminée**

### 5.4.1.2 RÉSULTATS D'ESSAI

La courbe de comportement est donnée à la Figure 33 ci-dessous.

**Figure 33** Résultat d'essai pour la couverture en absorption [Source Rapport d'essai CSTB AC23 13008-1]

#### Bardage PROFEEL 2 (épaisseur 280 mm)

Coefficient d'absorption acoustique  $\alpha_s$

Numéro d'essai : 2

Date de l'essai : 05/06/2023

#### CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES

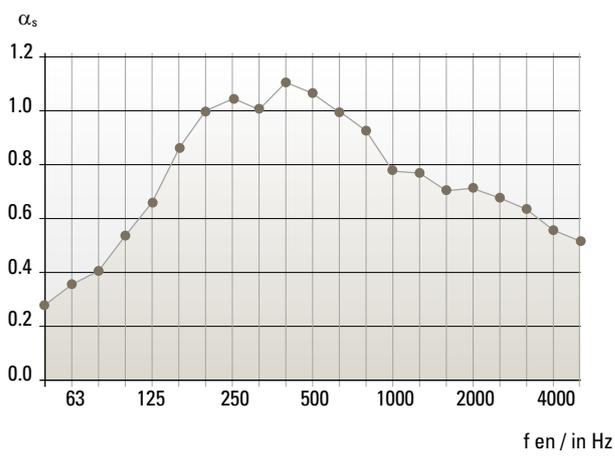
Dimensions en mm (L x l) : 3570 x 2990 Montage type : A-280

Surface en m<sup>2</sup> : 10.68

Masse surfacique en kg/m<sup>2</sup> : 27,96 (hors ossature)

Épaisseur en mm : 280

#### RÉSULTATS



f en / in Hz

**CSTB**  
le leader en construction

#### CONDITIONS DE MESURES

Salle vide

Température : 22°C

Humidité relative : 46 %

pression atmosphérique :

101,3 kPa

Salle avec matériau

Température : 22°C

Humidité relative : 50 %

f	$\alpha_s$	$\alpha_p$
50	0,27	
63	0,35	0,35
80	0,40	
100	0,53	
125	0,65	0,70
160	0,86	
200	0,99	
250	1,04	1,00
315	1,00	
400	1,10	
500	1,06	1,00
630	0,99	
800	0,92	
1000	0,77	0,80
1250	0,76	
1600	0,70	
2000	0,71	0,70
2500	0,67	
3150	0,63	
4000	0,55	0,55
5000	0,51	
Hz		

$\alpha_w = 0,70$  (LM)\*

Classement / class : B

NRC = 0,90

SAA = 0,89

### 5.4.1.3 CLASSEMENT

La valeur de  $\alpha_w$  obtenue est de 0,7 (Cf tableau 23 ci-dessous):

**Tableau 23** Résultats des essais d'absorption [Source rapport CSTB AC23-13008-1 du 20 octobre 2023]

N° essais	Produits soumis aux essais	Hauteur totale de construction (mm)	Résultat(s)	
			$\alpha_w$	Classement
2	Couverture : PROFEEL 2 (épaisseur 280 mm)	280	0,70 (LM)	C

## NOTE



La performance acoustique est compatible avec les exigences du marché.

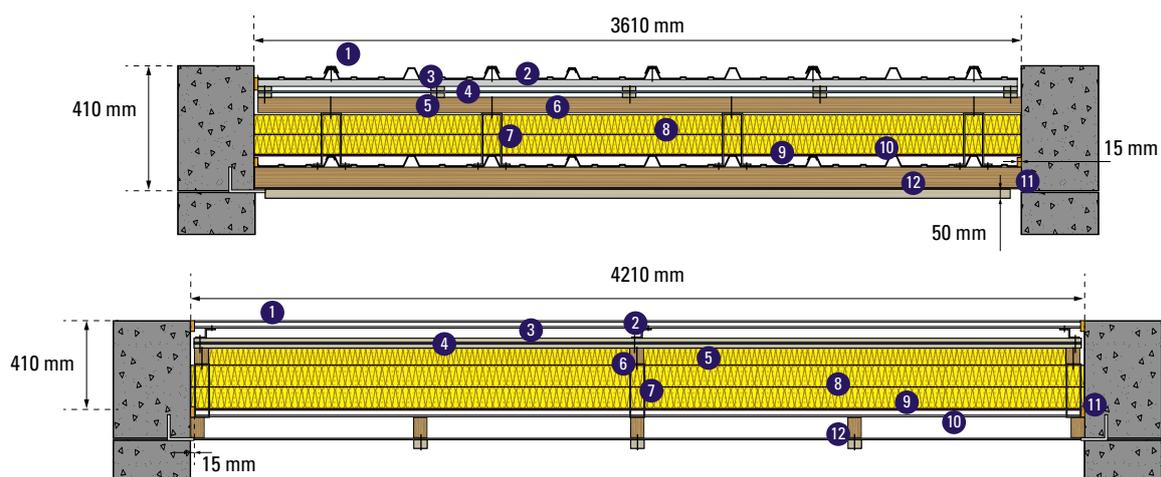
## 5.4.2 PERFORMANCE EN AFFAIBLISSEMENT $R_w$

Les mesures sont réalisées selon les normes NF EN ISO 10140-1 (2021), NF EN ISO 10140-2 (2021), NF EN ISO 10140-4 (2021), NF EN ISO 10140-5 (2021) et NF EN ISO 12999-1 (2020) complétées par la norme NF EN ISO 717/1 (2020) et amendements associés.

### 5.4.2.1 DESCRIPTION DE LA MAQUETTE

L'essai d'affaiblissement a été réalisé sur une maquette de bardage de dimension 3 m de haut x 3,2 m de large (Cf figures 34 et 35 ci-dessous).

**Figure 34** Maquette d'essai d'affaiblissement acoustique en couverture (Source AMCF)



- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| ① Profil 39T perforé (0,63 mm) | ⑦ Oméga ponctuel (2 mm) 40 x 150 x 72 x 150 x 40 mm |
| ② Z 40 x 40 x 40 (1,5 mm)      | ⑧ Isolant fibre de bois                             |
| ③ Support bois 60 x 20         | ⑨ Pare-vapeur $S_d > 18$                            |
| ④ Écran sous toiture HPV       | ⑩ Profil 39T perforé (0,63 mm)                      |
| ⑤ Support bois 60 x 20         | ⑪ Isolation périphérique                            |
| ⑥ Ossature bois 63 x 75 mm     | ⑫ Ossature bois 150 x 70 mm                         |

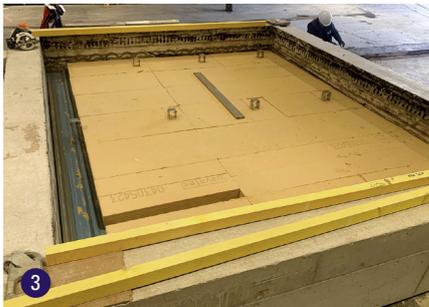
**Figure 35** Montage de la Maquette d'essai pour la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique en couverture  
 (Source Rapport d'essai CSTB AC13 13008-2)



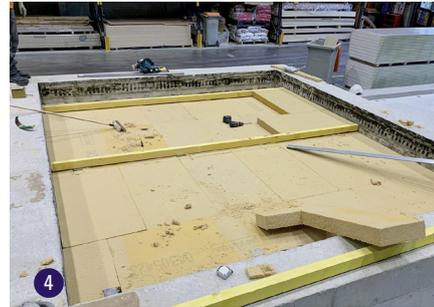
**1**  
 Fixation des plateaux pleins sur les bastaings dans le cadre d'essais



**2**  
 Fixation des profilés Omégas sur les plateaux



**3**  
 Mise en œuvre de la 1<sup>ère</sup> couche d'isolant



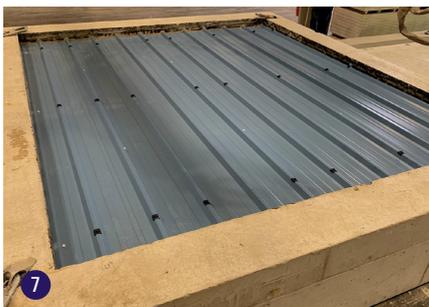
**4**  
 Vue de la 2<sup>ème</sup> couche d'isolant et mise en œuvre de la 3<sup>ème</sup> couche avec chevrons



**5**  
 Vue de la 3<sup>ème</sup> couche d'isolant et du 1<sup>er</sup> jeu de tasseaux



**6**  
 Vue du pare-pluie, du 2<sup>ème</sup> jeu de tasseaux et des rails en z



**7**  
 Vue de dessus de la maquette terminée



**8**  
 Vue de dessous de la maquette terminée

## 5.4.2.2 RÉSULTATS D'ESSAI

Les courbes de comportement aux différentes fréquences sont données à la figure 36 ci-dessous.

**Figure 36** Résultat d'essai pour la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique en couverture  
(Source Rapport d'essai CSTB AC13 13008-2)

### Complexe de couverture : PROFEEL 2 (épaisseur 439 mm)

Indice d'affaiblissement acoustique R

Numéro d'essai : 1

Date de l'essai : 12/06/2023

### CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES

Dimensions en mm (L x l) : 4200 x 3600

Masse surfacique en kg/m<sup>2</sup> : 52,2 (hors ossature)

Épaisseur en mm : 439

### CONDITIONS DE MESURES

Salle émission

Température : 35,9°C

Humidité relative : 57,7 %

pression atmosphérique :

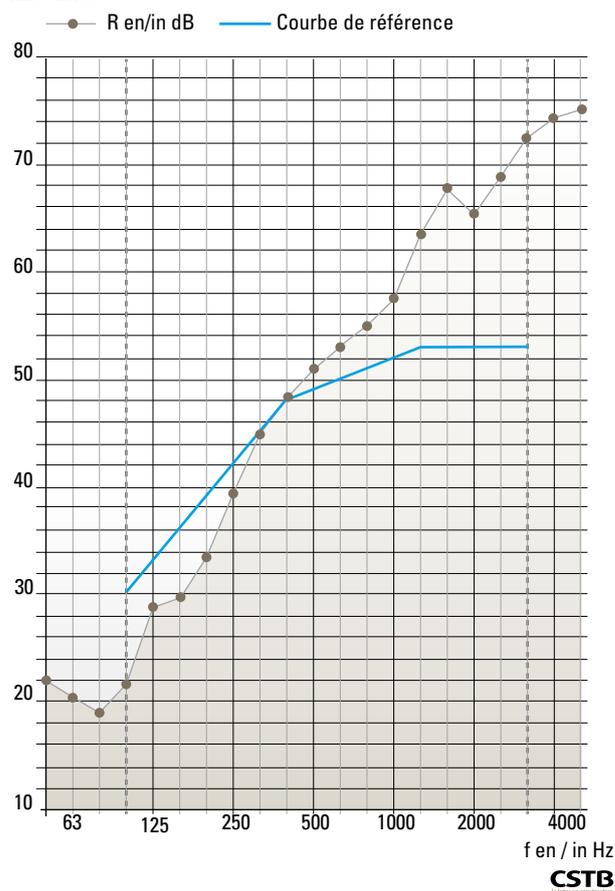
101 kPa

Salle de réception

Température : 24,4°C

Humidité relative : 72 %

### RÉSULTATS



f	P
50	21,9
63	20,3
80	18,9
100	21,5
125	28,8
160	29,7
200	33,4
250	39,3
315	45,0
400	48,4
500	51,0
630	53,1
800	55,1
1000	57,7
1250	63,5
1600	68,0
2000	65,6
2500	69,1
3150	72,6
4000	74,6
5000	75,3
Hz	dB

(\*) : valeur corrigée

(+) : limite de poste

$$R_w (C; C_{tr}) \geq 49 (-3; -9) \text{ dB}$$

Pour information

$$R_a = R_w + C - 46 \text{ dB}$$

$$R_{a,tr} = R_w + C_{tr} - 39 \text{ dB}$$

### 5.4.2.3 CLASSEMENT

La paroi a obtenu le classement suivant :

$$R_A = R_w + C = > 46 \text{ dB}$$

$$R_{A, \text{tr}} = R_w + C_{\text{tr}} = > 39 \text{ dB}$$

Le récapitulatif des résultats est donné dans le tableau 24 ci-dessous :

**Tableau 24** Résultats de l'indice d'affaiblissement acoustique R de la couverture avec fausses pannes bois  
(Source Rapport d'essai CSTB AC13 13008-2)

N° essai	Produits soumis aux essais	Résultats $R_w$ (C ; $C_{\text{tr}}$ ) (dB)
1	Complexe de couverture : PROFEEL 2 (épaisseur 439 mm)	49 [-3 ; -10]

### CONCLUSION



La performance acoustique est compatible avec les exigences du marché.

5

5

## PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE

## 5.5.1 RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SELON LA NF EN 15804 + A1 +CN DU SYSTÈME DE COUVERTURE

Tableau 25 Réchauffement climatique selon la NF EN 15804 + A1 + CN du système de couverture

		TOTAL sans Module D	Module D	TOTAL avec Module D
		kg eq. CO <sub>2</sub>	kg eq. CO <sub>2</sub>	kg eq. CO <sub>2</sub>
Peau extérieure 0,63 mm	TRAPEZA 3.333.39T	16,7	-7,2	9,5
Fausse panne Z 1,5 mm 40x40x40 tous les 2 m	Poutre en éléments minces	2,0	-0,7	1,3
Supports bois 60x20 X 2, tous les 90 cm	Charpente résineux	0,1	-0,2	-0,1
Pare-pluie 0,2 mm Sd 0,02	DED (Donnée environnementale par défaut)	1,2	0,0	1,2
Panne bois 60x75 tous les 2 m	Charpente résineux	0,2	-0,3	-0,1
Oméga 2 mm (largeur 4 cm) 40x250x72x250x40	Poutre en éléments minces	4,9	-1,7	3,2
Isolant en fibre de bois Soprema total de 241 mm	241/120x (isolant en fibre de bois Soprema 120mm $\lambda = 0,038 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	2,8	-3,8	-1,0
Pare-vapeur	DED (Donnée environnementale par défaut)	1,5	0,0	1,5
Peau intérieure 0,63 mm	TRAPEZA 3.333.39T	16,7	-7,2	9,5
TOTAL		46,0	-21,0	25,0

## 5.5.2 PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE SELON LA NF EN 15804 + A2 +CN DU SYSTÈME DE COUVERTURE

Pour le système de couverture, une FDES est réalisée selon la norme NF EN 15804 + A2 et son complément national. Elle sera vérifiée et publiée sur INIES.

Les inventaires des systèmes sont calculés à partir de données génériques Ecoinvent et à partir de données spécifiques pour la fabrication des profils en acier. Les modélisations sont effectuées avec le logiciel TEAM [Cf. Tableau 25].

**Tableau 26** Données utilisées pour calculer les impacts environnementaux du système de couverture

Système de couverture	Données	Données génériques : Ecoinvent v3.9.1
Peau extérieure couverture 0,63 mm	Données spécifiques de fabrication de la couverture + données génériques pour la bobine acier	steel production, converter, unalloyed - LCI - RER - CO hot rolling, steel - LCI - Europe without Austria - CO sheet rolling, steel + zinc coating, coils - LCI - RER - CO powder coating, steel - LCI - RER - CO
Fausse panne Z 1,5 mm 40x40x40 tous les 2 m	FDES Poutre en éléments minces en acier utilisée comme élément porteur horizontal (lisse, solive)	
Supports bois 60x20 X 2 tous les 90 cm	Données génériques du support bois	lath, softwood, raw, air drying to u = 20 % - Europe without Switzerland - sawnwood, lath, softwood, raw, dried (u = 20 %)
Pare-pluie	DED (Donnée environnementale par défaut)	polypropylene production, granulate extrusion, plastic film
Ossature bois 63x75 tous les 2 m	Données génériques du liteau bois	beam, softwood, raw, air drying to u = 20 % - Europe without Switzerland - sawnwood, beam, softwood, raw, dried (u = 20 %)
Oméga 2 mm (largeur 4 cm) 40x250x72x250x40	FDES Poutre en éléments minces en acier utilisée comme élément porteur horizontal (lisse, solive)	
Isolant en fibre de bois Soprema total de 286 mm	Données génériques du panneau en fibre de bois	fibreboard production, soft, from wet & dry processes - fibreboard, soft - Europe without Switzerland - fibreboard, soft
Pare-vapeur	DED (Donnée environnementale par défaut)	
Peau intérieure 0,63 mm	Données spécifiques de fabrication de la couverture + données génériques pour la bobine acier	steel production, converter, unalloyed - LCI - RER - CO hot rolling, steel - LCI - Europe without Austria - CO sheet rolling, steel + zinc coating, coils - LCI - RER - CO powder coating, steel - LCI - RER - CO

5

6

## DURABILITÉ – RÉSULTATS PROFEEL 1

### 5.6.1 DESCRIPTION DES COUVERTURES TESTÉES

Il s'agissait d'une couverture double peau avec fausses pannes.

Cinq isolants biosourcés ont été testés dont la fibre de de bois.

Le lien décrivant les couvertures testées, ainsi que les résultats d'essais obtenus, est donné ci-dessous :

Essais sur les couvertures double peau en acier équipées d'isolants biosourcés | Programme PACTE

### 5.6.2 RÉSULTATS DES MESURES

Au terme de 9 mois, les couvertures n'ont subi aucune dégradation. Les isolants biosourcés n'étaient pas dégradés.

Le présent projet garde les mêmes dispositions en remplaçant les fausses pannes acier oméga par des fausses pannes bois.

# 6

## CONCLUSION

Le présent rapport de synthèse présente pour l'isolant en fibre de bois de la société Soprema, en complément des rapports d'essais et de synthèse sur la durabilité établis dans le cadre du programme PROFEEL 1, les performances sismiques, incendie (réaction au feu), acoustiques, thermiques, de durabilité et environnementales des solutions de bardage double peau acier avec écarteurs bois et couverture double peau acier avec fausses pannes bois, tous deux équipés d'isolant en fibre de bois

Les performances en partie courantes sont résumées dans le tableau 27 de synthèse ci-après :

**Tableau 27** Synthèse des résultats obtenus et performances

Performances	Bardage double peau avec écarteurs bois	Couverture double peau avec fausses pannes bois
Sismique	Validé toutes zones france hexagonale, tout type de sol toute catégorie d'importance	Sans objet,
Réaction au feu	Bs1d0	Bs1d0
Acoustique affaiblissement $R_w$ (dB)	$R_w (C ; C_{tr}) = 58(-3 ; -9)$ dB	$R_{A} = R_w + C \Rightarrow 46$ dB $R_{A, tr} = R_w + C_{tr} \Rightarrow 39$ dB
Acoustique absorption $\alpha_w$	0,8	0,7
Thermique $U_p$ (W/m <sup>2</sup> .K)	0,14	0,15
Durabilité (à 9 mois)	Constaté lors de PROFEEL 1	Constaté PROFEEL 1
Environnementale	CF FDES	CF FDES

## POINTS FONDAMENTAUX DE VIGILANCE



### Points communs aux bardages et couvertures :

- En plus de sa performance thermique, le choix de l'isolant en fibre de bois doit intégrer sa sensibilité au développement fongique ainsi que reprise d'eau capillaire. Le fabricant d'isolant de fibre de bois doit impérativement être consulté afin qu'il préconise l'isolant adapté à l'usage final en double peau en bardage ou en couverture.
- Les éléments en bois sont ventilés. La conception retenue dans le cadre de ce rapport est sans rétention des eaux de condensation. Le bardage et la couverture sont étanches à l'eau, ce qui conduit à ce que les pièces de bois soient toutes en classe d'emploi 2.
- L'introduction d'écarteurs/fausses pannes bois implique la mise en place d'une lame d'air de 20 mm dans l'enveloppe ainsi constituée.
- L'optimisation de la performance thermique et de la performance carbone nécessite des espacements d'écarteurs ou des fausses pannes tous les 2000 mm. Cette dimension est antinomique avec les performances traditionnelles conformes au DTU 31.2 en bardage (645 mm) et au DTU 40.29 en couverture (900 mm). Des recherches /essais complémentaires sont nécessaires pour justifier les performances mécaniques des écrans pare-pluie ou de sous toiture jouant notamment le rôle de membranes de protection en phase provisoire à des portées supérieures à respectivement 645 mm et 900 mm.
- Une étude hygrothermique, réalisée selon les principes développés dans le guide SimHuBat, est indispensable à chaque chantier pour vérifier le bon comportement de la couverture ou du bardage.

### Points spécifiques à noter pour les ouvrages de bardage :

- La lame d'air et l'écran pare-pluie sont indispensables pour ventiler l'ossature bois et notamment protéger les isolants biosourcés, tant en phase provisoire qu'en phase définitive.
- Une ventilation de la lame d'air de 20 mm entre la peau extérieure de bardage et l'écran de parapluie est toujours nécessaire.

### Points spécifiques à noter pour les ouvrages de couverture :

- L'écran de sous-toiture devra être conforme au DTU 40.29 et devra être caractérisé en traction allongement sur le niveau le plus performant (espacement de 90 cm).
- Les entretoises doivent toujours être mises en œuvre à l'aplomb des pannes.
- Une double ventilation au-dessus et en dessous de l'écran de sous toiture est toujours nécessaire pour contribuer à une durabilité correcte des bois de classe 2.
- Un pare-vapeur est positionné en partie basse sur la peau intérieure. Les précautions de mise en œuvre sont nécessaires pour en assurer la continuité au droit des points singuliers.

Le présent document est un rapport constituant une première étape pour enrichir un état de l'art quasi inexistant sur le sujet. Dans tous les cas, pour passer au développement et à la phase chantier, ces techniques devront être considérées comme innovantes. En conséquence, elles devront faire l'objet d'ATEx, de DTA, etc.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>OBJET DU RAPPORT DE SYNTHÈSE</b>	<b>5</b>
2 1	Solutions innovantes développées et méthodologies de développement associées	5
2.1.1	Les solutions développées	5
2.1.2	Méthodologie de conception du bardage double peau avec écarteurs bois	6
2.1.3	Méthodologie de conception de la couverture avec fausses pannes bois	12
2 2	Pertinence de l'action	16
<b>3</b>	<b>ÉTAT DE L'ART</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>SYSTÈME DE BARDAGE DOUBLE PEAU AVEC ÉCARTEURS BOIS</b>	<b>18</b>
4 1	Description technologique	18
4.2.1	Description de la maquette SBI	19
4 2	Performance en réaction au feu	19
4.2.2	Résultats d'essai SBI	21
4.2.3	Classement en réaction au feu	22
4 3	Performance thermique	23
4.3.1	Généralités – moyens de calcul – modélisation	23
4.3.2	Performance en partie courante	23
4.3.3	Performance des points singuliers	26
4 4	Performance acoustique	30
4.4.1	Performance en absorption $\alpha_w$	30
4.4.2	Performance en affaiblissement $R_w$	33
4 5	Performance environnementale	36
4.5.1	Réchauffement climatique selon la NF EN 15804+A1+CN du système de bardage	36
4.5.2	Performance environnementale selon la NF EN 15804 + A2 + CN du système de bardage	37
4 6	Durabilité/ventilation – résultats Profeel 1	38
4.6.1	Description des bardages testés	38
4.6.2	Résultats des mesures	38
4 7	Comportement sismique	38
4.7.1	Essai de mise en parallélogramme	38
4.7.2	Essai d'excitation	42
4.7.3	Domaine d'emploi du système de bardage avec écarteurs bois	46

# TABLE DES MATIÈRES

<b>5</b>	<b>SYSTÈME DE COUVERTURE DOUBLE PEAU AVEC FAUSSES PANNES BOIS</b>	<b>48</b>
5 1	Description technologique	48
5 2	Performance en réaction au feu	50
5.2.1	Description de la maquette SBI	50
5.2.2	Résultats d'essai SBI	52
5.2.3	Classement en réaction au feu	53
5 3	Performance thermique	54
5.3.1	Généralités - moyens de calcul - modélisation	54
5.3.2	Performance en partie courante	54
5 4	Performance acoustique	60
5.4.1	Performance en absorption $\alpha_w$	60
5.4.2	Performance en affaiblissement $R_w$	63
5 5	Performance environnementale	67
5.5.1	Réchauffement climatique selon la NF EN 15804 + A1 +CN du système de couverture	67
5.5.2	Performance environnementale selon la NF EN 15804 + A2 +CN du système de couverture	67
5 6	Durabilité - résultats Profeel 1	68
5.6.1	Description des couvertures testées	68
5.6.2	Résultats des mesures	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>69</b>







---

Accéder gratuitement à l'ensemble des ressources et outils PROFEEL sur [www.proreno.fr](http://www.proreno.fr)

