



Étude de transfert Hygrothermique

Phase	DCE
Date	31 Janvier 2019
n° de pièce dossier	728
Auteur	Boris Bosdevigie - Influ
Indice	0

Collège Jean Rebier Construction d'une extension - 87 Isle

Maître d'ouvrage **Département de la Haute-Vienne**
Direction des bâtiments
11 rue François Chénieux - CS 83112
87031 Limoges Cedex 1

ADSC
ARCHITECTURE
ET DÉVELOPPEMENTS
SONIA CORTESSE

Équipe de Maîtrise d'oeuvre

Architecte mandataire **ADSC-Architecture et développement**
Sonia Cortesse
11 rue Neuve des Boulets
75011 Paris



Architecte sous-traitant **Matière à**
50, rue Elisée Reclus
87 000 Limoges
T 06 84 51 88 64



BET Structure **HEMERY**
21, rue de la Résistance Limousine
87 000 Limoges
T

B.E. STRUCTURE



BET fluides **Cité 4**
2, rue Thomas Edison
87 220 Feytiat
T 06 74 44 96 56



BET thermique **Influ**
Le Chalard Haut
87 470 Peyrat le château



BET VRD **VRD'EAU conseils**
50, avenue des Bénédictins
87 000 Limoges

Prestation d'ingénierie environnementale

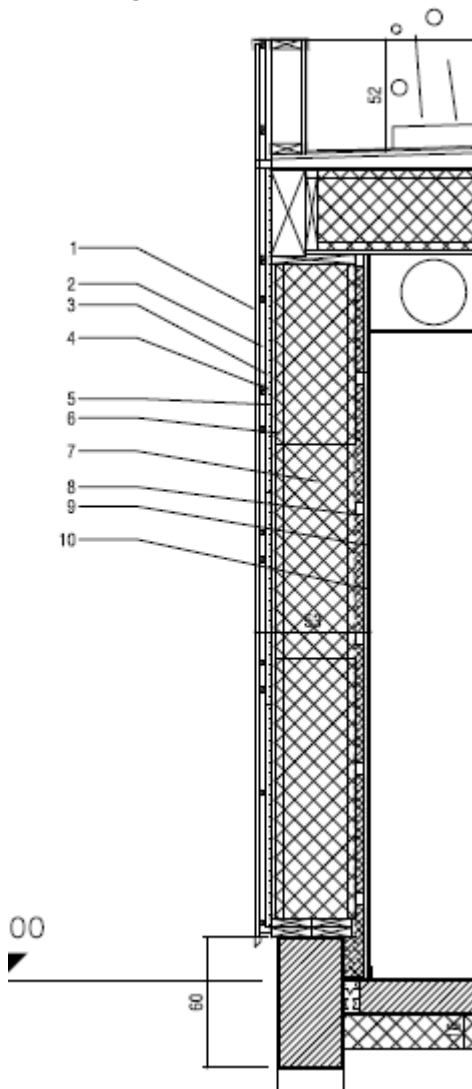
Etude du transfert hygrothermique à travers les parois du projet **d'Extension du collège Jean Rebier à ISLE**



Maître d'ouvrage : Conseil départemental de la Haute-Vienne

Synthèse de l'étude

ENV1 Murs de l'Enveloppe extérieur remplissage paille



Principales conclusions :

Dans les deux configurations étudiées (finition intérieure Fermacell et finition intérieure BTC), la composition ENV1 ne présente pas de risques avérés de détérioration de ces composants.

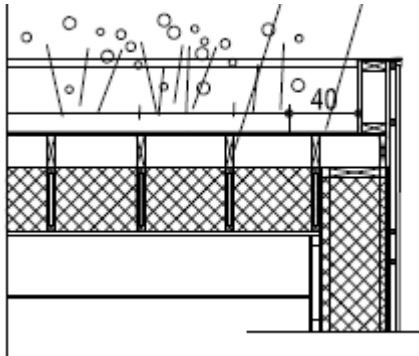
La teneur en eau des matériaux potentiellement exposés à un risque de moisissure tels que la paille, l'isolant intérieur ou bien encore le contreventement en OSB ne voit pas d'accumulation au cours du temps.

On peut cependant noter que l'humidité présente au sein de la paille lors de sa mise en œuvre ne décroît pas durant le premier mois après son installation. Le phénomène de séchage ne se produit qu'au bout du deuxième mois puis nécessite plusieurs années avant de se stabiliser. **De fait, il est primordial d'évaluer la teneur en eau des bottes lors de leur mise en place afin d'assurer que celle-ci ne soit pas supérieure à 20% (recommandations des règles de la construction paille), leur séchage étant relativement long au sein de la paroi, voire inexistant les premiers mois.**

A noter : ces observations sont obtenues en utilisant des pare-vapeur et pare-pluie extérieur présentant les propriétés suivantes :

	SD
Pare-vapeur intérieur	100 m
Pare-pluie	0,1 m

COUV2 Toiture terrasse



Principales conclusions :

De même qu'observé pour la composition ENV₁, le taux d'humidité de la paille dans la composition COUV₂ reste proche de l'humidité lors de la construction (80%) pendant les premiers mois avant de diminuer au bout de deux mois.

La teneur en haut de la paille lors de sa mise en œuvre est donc un paramètre très important à vérifier pour éviter le développement de la moisissure lors des premiers mois suites à sa mise en œuvre.

Cependant, la teneur en haut diminue ensuite fortement et se stabilise rapidement car les échanges via la lame d'air ventilée (considérée comme équivalente à l'air extérieur) sont importants au niveau de la surface externe de la composition.

La simulation via WUFI ne met pas en évidence le besoin de mettre en œuvre un pare-vapeur en sous-face de la composition. Cependant **il faut noter qu'en l'absence de frein vapeur, le DTU concernant la mise en œuvre des toitures froides ventilées recommande l'installation d'entrées d'air présentant une surface libre supérieure à 200cm² par m d'égout en entrée et sortie.**

Table des matières

1	Préambule	5
1.1	Méthode de calcul	5
1.2	Eléments pour l'interprétation des résultats	5
2	Données pour l'évaluation	7
2.1	Paramètres de simulation	7
2.1.1	Conditions climatiques extérieures	7
2.1.2	Conditions internes	7
2.1.3	Durée de l'étude	8
2.1.4	Conditions initiales lors de la mise en œuvre des matériaux	8
2.2	Propriétés physiques des matériaux mis en œuvre	8
2.2.1	Cas général	8
2.2.2	Propriétés hygrothermiques de la paille	8
2.2.3	Isolant Metisse	9
3	Les Parois étudiées	9
3.1	Murs Enveloppe extérieurs isolés en paille	9
3.1.1	ENV1 Doublage intérieur en Fermacell (double épaisseur)	9
3.1.2	ENV1 Doublage intérieur en BTC	10
3.2	Toiture terrasse végétalisée_COUV2	10
4	Etude des murs de l'enveloppe ENV1	11
4.1	Murs ENV1 Finition intérieure Fermacell	11
4.1.1	Paramètres de modélisation	11
4.1.2	Synthèse des résultats	12
4.1.3	Evolution de la teneur en haut dans les différentes couches	12
4.2	Murs ENV1 Finition intérieure BTC	14
4.2.1	Paramètres de modélisation	14
4.2.2	Synthèse des résultats	15
4.2.3	Evolution de la teneur en haut dans les différentes couches	16
4.3	Conclusion	16
5	Etude de la toiture terrasse végétalisée COUV2	17
5.1.1	Paramètres de modélisation	17
5.1.2	Synthèse des résultats	20
5.1.3	Evolution de la teneur en haut dans les différentes couches	21
5.1.4	Evolution de l'humidité relative dans la paille	21
5.1.5	Conclusion	22
6	Annexes : Rapports WUFI pour les compositions étudiées	23

1 Préambule

1.1 Méthode de calcul

L'étude suivante a été réalisée via le logiciel de simulation de transfert hygrothermique WUFI pro version 6. Il s'agit d'un logiciel de calcul développé par l'institut Fraunhofer de physique des bâtiments permettant la simulation dynamique des transferts de vapeur et d'eau liquide au sein d'une paroi.

Contrairement aux méthodes de calcul statique de type Glaser qui permettent uniquement d'évaluer le risque de condensation d'eau au sein d'une paroi lorsque le point de rosée est atteint, la simulation hygrothermique dynamique permet d'évaluer les transferts d'humidité à travers les différentes couches d'une paroi. Ce calcul réalisé sur une période plus ou moins longue permet d'évaluer la quantité de vapeur d'eau présente au sein des matériaux selon des conditions internes et externes définies.

Cette information permet de prévenir la dégradation des matériaux, notamment lorsque l'on utilise des matériaux biosourcés présentant des risques de développement de moisissure pour une humidité inférieure à 100% (configuration correspondant au point de rosée).

1.2 Eléments pour l'interprétation des résultats

Comme évoqué précédemment, les paramètres permettant d'évaluer la viabilité d'une paroi vis-à-vis des risques liés à la présence d'eau dépendent de plusieurs facteurs. Premièrement, de la sensibilité des matériaux à l'humidité : certains matériaux peuvent ne pas être affectés par la présence d'humidité au sein de la paroi et ne risquent pas de détérioration (ex : mousse polyuréthane, pierre, etc...). Pour d'autre, la présence d'eau peut altérer certaines de leurs propriétés physiques, par exemple les laines minérales voient leurs propriétés isolantes se dégrader en fonction de leur teneur en eau et peuvent d'autre part s'affaisser. Pour les matériaux d'origine végétale, une exposition à une humidité trop importante peut entraîner le développement de moisissures et entraîner à terme leur dégradation.

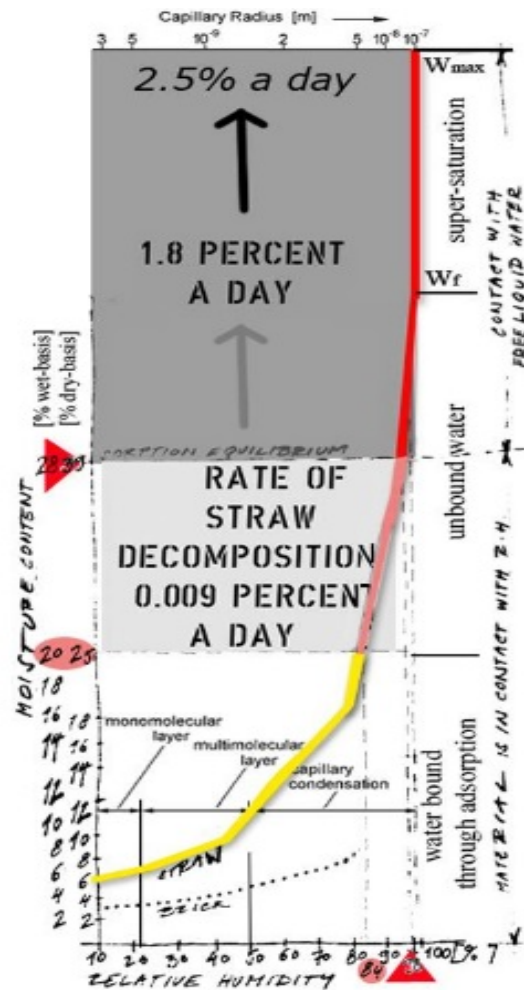
Nous évaluerons ici ces risques au travers des indicateurs suivants :

- La teneur en eau d'un matériaux : le rapport entre la quantité d'eau fixé par le matériaux sur la masse de ce matériaux (kg d'eau / kg de matériaux sec).
- L'humidité relative présente au sein du matériaux isolant (%) ainsi que sa température au cours d'une ou plusieurs années.

Ces deux informations nous permettent d'une part de vérifier qu'il n'y a pas de risque d'accumulation d'eau dans la paroi sur la période étudiée suite au chantier de construction et d'autre part de vérifier qu'il n'y a pas de risque dégradation des matériaux ou bien et développement de moisissures.

Pour la paille, nous vérifierons la teneur en eau en % de la botte. En référence à la courbe ci-contre, issue de la thèse de Jakub Wihan¹), les critères pris en compte sont les suivants :

- Que la paille ne présente **une teneur en eau comprise entre 25 et 39%** que pendant des **périodes limitées** (correspondance en HR selon la courbe de sorption de la paille : entre 84 et 98%)
- **Que la paille ne présente jamais une teneur en eau supérieure à 39%** (correspondance en HR selon la courbe de sorption de la paille : supérieure à 98%)



¹ « Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw » - Jakub Wihan – July 2017

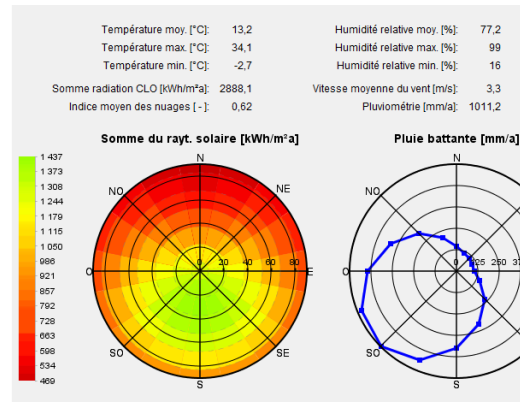
2 Données pour l'évaluation

2.1 Paramètres de simulation

2.1.1 Conditions climatiques extérieures

La base de donnée WUFI comporte six jeux de données climatiques pour la France :Trappe, Brest, Grenoble, Nancy, Marseille et Bordeaux

Le climat à Isle étant qualifié comme océanique, le climat de Bordeaux sera choisi comme étant le plus représentatif. Il s'agit d'autre part d'un climat défavorable car présentant des moyennes d'humidité et de pluviométrie élevées.



2.1.2 Conditions internes

Les valeurs de températures et d'humidité intérieures sont définis selon la norme EN 15026. Celle-ci sont calculées heure par heure en fonction des conditions climatiques externes.

Les conditions à l'intérieur du bâtiment varient entre 20 et 25 °C et 30 et 60% d'humidité relative, tel que présenté dans les graphiques ci-dessous :

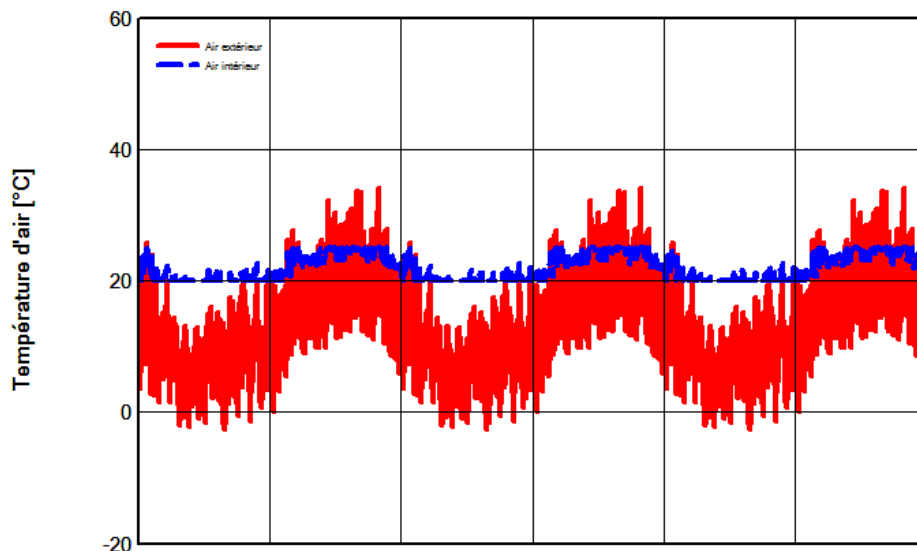


Figure 1 conditions de **température** à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment

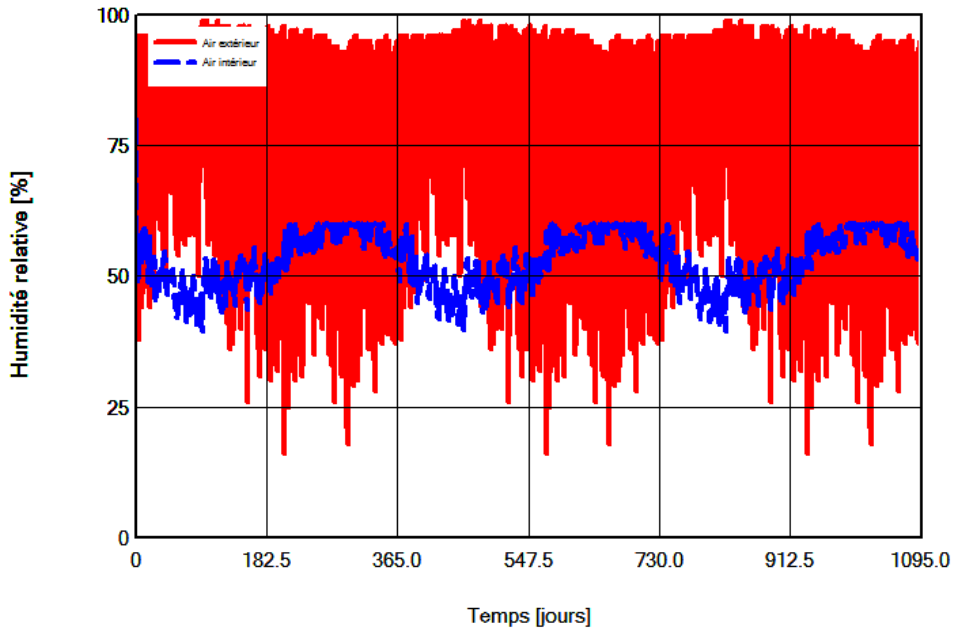


Figure 2 **Humidité relative** à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment

2.1.3 Durée de l'étude

L'évaluation est réalisée sur une période de trois ans, ceci afin de permettre une stabilisation des conditions d'humidité dans la paroi par rapport aux conditions initiales de mise en œuvre des matériaux. Dans certains cas, une période d'étude plus longue a été étudiée pour parvenir à observer une stabilisation de la teneur en eau dans les parois.

La simulation est effectuée selon un pas de temps horaire.

2.1.4 Conditions initiales lors de la mise en œuvre des matériaux

L'humidité typique de construction est utilisée lorsqu'elle est disponible dans les données matériaux de la bibliothèque WUFI.

En ce qui concerne les BTC, une hypothèse défavorable est considérée : l'humidité relative initiale lors de la mise en œuvre est fixée à 80%. Pour cette valeur le matériau voit une teneur en eau de 18,8 kg/m³.

En ce qui concerne la paille, la teneur en eau maximale recommandée pour la mise en œuvre des bottes d'après les règles professionnelles de la construction paille est de 20% (teneur en eau sur poids sec). Cette condition sera prise comme référence initiale (considérant la masse volumique de la botte de paille sèche égale à 100kg/m³ soit une valeur de 20kg d'eau/m³ de paille).

2.2 Propriétés physiques des matériaux mis en œuvre

2.2.1 Cas général

Des données représentatives pour les principaux matériaux évalués dans le cadre de cette étude sont fournies dans les bases de données mises à disposition par le logiciel WUFI.

2.2.2 Propriétés hygrothermiques de la paille

Aucune donnée n'est actuellement disponible dans les bases de données mises à disposition par WUFI pour modéliser les caractéristiques de la paille.

Les données saisies pour le matériaux paille sont issues du Vademecum Approche paille (flux perpendiculaire aux fibres).

La courbe de sorption du Vademecum s'arrêtant à 98% et présentant un pallier qui pose des erreurs de convergence dans Wufi. Ainsi, une courbe a été générée automatiquement dans Wufi sur la base de la sorption à 80% de 13.71 kg/m^3 et de la saturation en eau libre de 231 kg/m^3 .

L'humidité spécifique de construction a été fixée à 20 kg/m^3 (cf. paragraphe précédent sur les conditions initiales de mise œuvre des matériaux).

2.2.3 Isolant Metisse

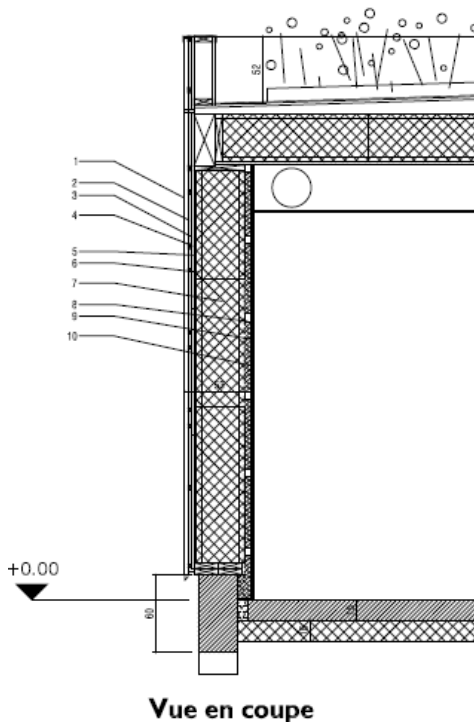
L'isolant Metisse est formulé principalement à partir de coton recyclé, à défaut de trouver les propriétés hygrothermiques détaillées de ce composant dans la base de données du logiciel WUFI le matériau de type Lin sera utilisé dans la modélisation.

3 Les Parois étudiées

3.1 Murs Enveloppe extérieurs isolés en paille

3.1.1 ENV1 Doublage intérieur en Fermacell (double épaisseur)

Finition intérieure double fermacell sur ossature bois



ENV1 - Murs enveloppe extérieurs isolés en paille

1. Bardage châtaigner pose verticale prégrésé, vieillissement naturel, ép 24 mm
2. Linteaux horizontaux pour fixation du bardage et ménagement d'une lame d'air ép 24 mm
3. Linteaux verticaux fixés au droit des poutres I pour support bardage et fixation pare-pluie ép 24 mm
4. Pare-pluie, Sd 5^* < Sd pare-vapeur Intérieur
5. fermeture extérieure du calsson par OSB 18 mm, ép 12mm*
6. Poutres I structurelles avec âmes isolées en laine de bois pour éviter les ponts thermiques,
7. remplissage isolant paille sous forme de bottes, ép 360mm
8. pare-vapeur, SD à régler selon test Wufi
9. Linteage bois horizontal support de fermacell, isolant médisse, ép 50mm
10. Double fermacell finition peinture, ép 25 mm

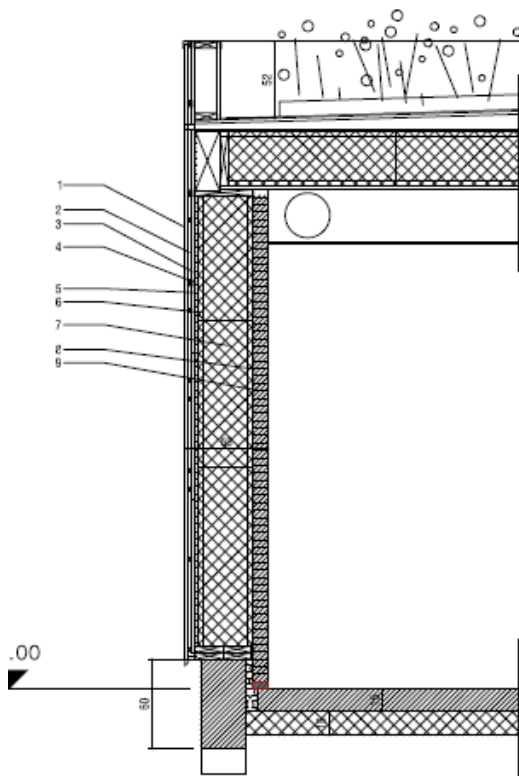
EPAISSEUR TOTALE 530 mm

- * Prévoir un rupteur de pont thermique entre dalle et fondation en intérieur pour assurer la continuité de l'isolant, dimensionnement à caler en épaisseur avec Influ, en technique avec Hemery
- * Seul me U des classes sera isolé en sous-face, voir la nécessité de rupteurs pour les cloisons entre locaux techniques et classes

Localisation : paroi de l'enveloppe thermique des salles de classe en contact avec l'extérieur

3.1.2 ENV1 Doublage intérieur en BTC

Finition intérieure brique de terre crue maçonnée



Vue en coupe

ENV1 - Murs enveloppe extérieurs isolés en paille

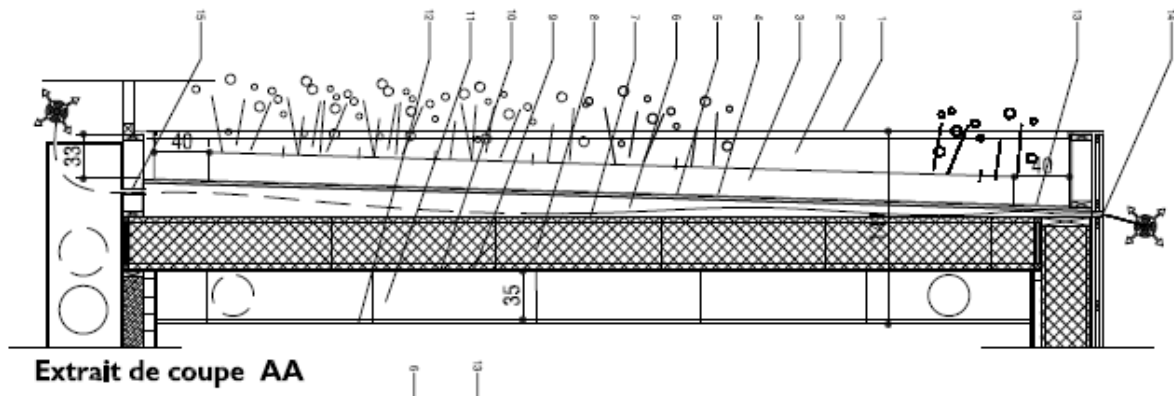
1. Bardage châtaigner pose verticale prégrésé, vieillissement naturel, ép 24 mm
2. Linteaux horizontaux pour fixation du bardage et ménagement d'une lame d'air ép 24 mm
3. Linteaux verticaux fixés au droit des poutres I pour support bardage et fixation pare-pluie ép 24 mm
4. Pare-pluie, Sd 5* < Sd pare-vapeur Intérieur
5. fermeture extérieure du calisson par OSB 18 mm, ép 12mm*
6. Poutres I structureles avec âmes isolées en laine de bois pour éviter les ponts thermiques,
7. remplissage isolant paille sous forme de bottes, ép 360mm
8. pare-vapeur, nécessité et SD au cas où à régler selon test Wufi
9. Doublage BTC maçonnée Idem CL1 sur zone enseignant

EPAISSEUR TOTALE 560 mm

- * Prévoir un rupteur de pont thermique entre dalle et fondation en Intérieur pour assurer la continuité de l'isolant, dimensionnement à caler en épaisseur avec Influ, en technique avec Hemery
- * Seul me U des classes sera isolé en sous-face, voir la nécessité de rupteurs pour les cloisons entre locaux techniques et classes

Localisation : paroi de l'enveloppe thermique des salles de classe en contact avec l'extérieur

3.2 Toiture terrasse végétalisée_COUV2



Extrait de coupe AA

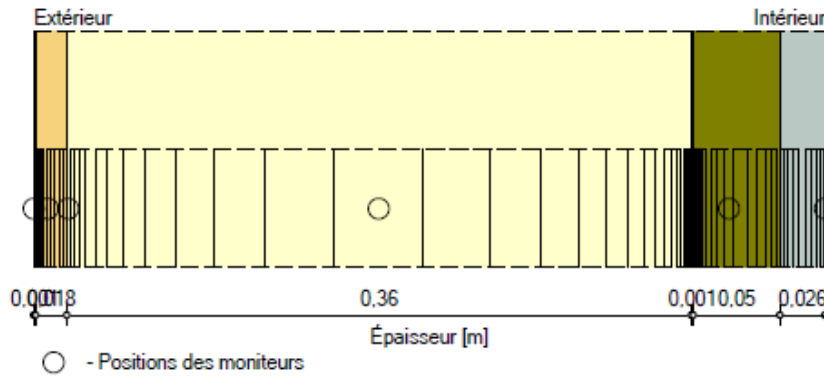
Localisation : couverture des salles de classe

4 Etude des murs de l'enveloppe ENV1







4.1 Murs ENV1 Finition intérieure Fermacell

4.1.1 Paramètres de modélisation

- **Modélisation des couches dans le logiciel WUFI**



Matériaux:

	- Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,001 m
	- OSB 3 (oriented strand board)	0,018 m
	- Paille - ref. Apropaille Custom / sens perpendiculaire	0,36 m
	- Freine vapeur (sd=100m)	0,001 m
	- Planneau isolant en lin	0,05 m
	- Plaque de plâtre FERMACELL	0,026 m

Épaisseur totale: 0,456 m
 Valeur de la résistance thermique R: 6,83 (m² K)/W
 Coefficient U: 0,143 W/(m² K)

- **Prise en compte de la lame d'air ventilée derrière le bardage**

D'après la littérature et notamment au sens de la norme NF EN ISO 6946, un espace d'air entre deux peaux est considéré comme fortement ventilé sur l'extérieur si les sections des orifices de ventilations en partie haute et basse de la façade sont supérieures à 15cm² par mètre de longueur horizontale.

Dans notre cas, la lame d'air présente une épaisseur de 24 cm²/ m linéaire de façade (litesaux verticaux fixés au droit des poutre en I de 24 mm d'épaisseur). **Cette lame d'air sera considérée comme fortement ventilée et les conditions hygrothermiques dans la lame d'air seront donc considérées comme étant celles extérieures.** De fait, le bardage et la lame d'air ne sont pas pris en compte comme couche de matériau dans la modélisation.

D'autre part, du fait de la présence du bardage, l'absorption de pluie sera considérée comme nulle au niveau de la surface extérieure de la composition de même que l'absorption du rayonnement sera nul.

- **Maillage**

Maillage par défaut : Automatique II.

- **Sources**

Le modèle ne comporte aucune source d'humidité ni de source de renouvellement d'air provenant de l'air extérieur.

- **Orientation / inclinaison**

Orientation Ouest, inclinaison 90°. Les parois étant protégées par un bardage bois, l'hypothèse considérée est que la pluie et le rayonnement solaire n'a pas d'influence sur les résultats de l'étude. L'orientation prise par défaut est l'ouest.

4.1.2 Synthèse des résultats

Teneur en eau [kg/m²]

	Début	Fin	Min.	Max.
Teneur en eau totale	9,57	4,29	4,25	9,57

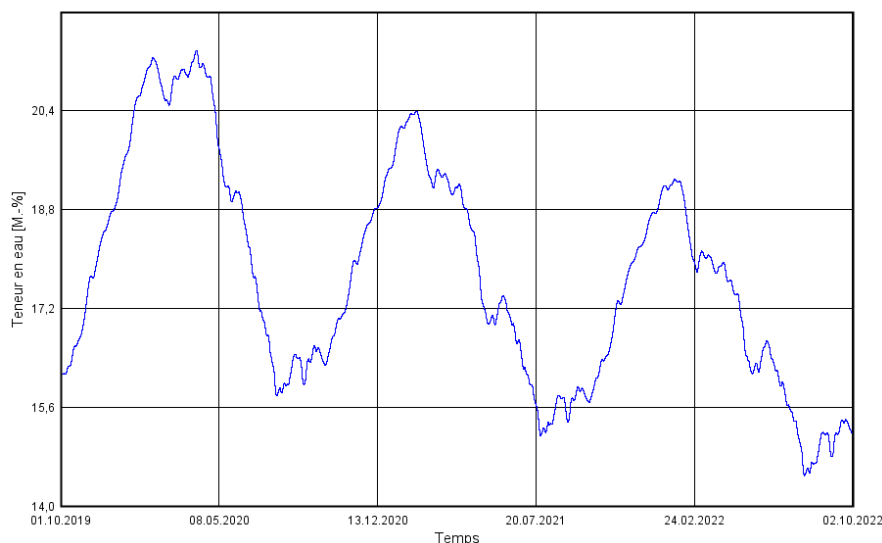
Teneur en eau [kg/m³]

Couche/Matériaux	Début	Fin	Min.	Max.
Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,04
OSB 3 (oriented strand board)	95,00	84,63	77,88	139,54
Paille - ref. Apropaille Custom / sens	20,00	6,46	6,30	20,00
Freine vapeur (sd=100m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Plaqueau isolant en lin	5,00	2,96	2,26	5,05
Plaque de plâtre FERMACELL	15,80	11,28	9,03	15,80

4.1.3 Evolution de la teneur en eau dans les différentes couches

4.1.3.1 OSB

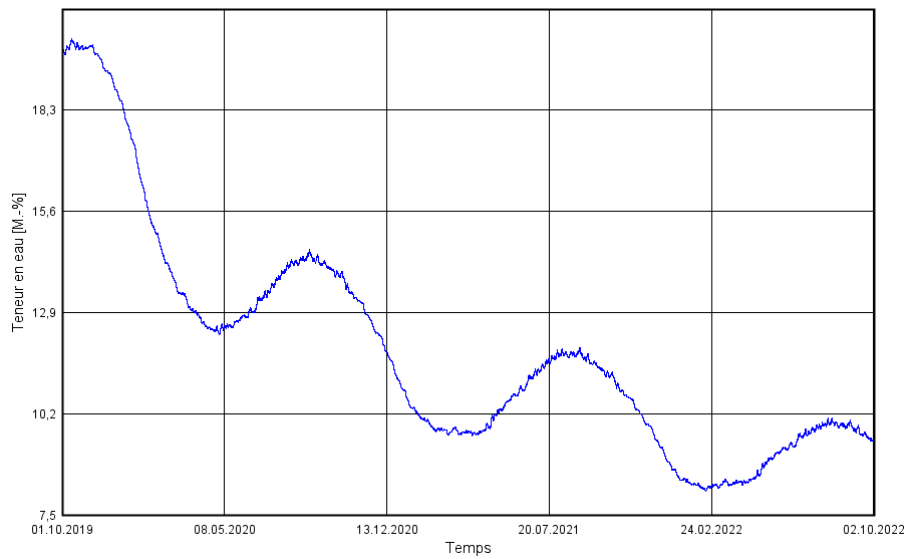
Teneur en eau OSB



La teneur en eau de l'OSB, en contact avec un pare pluie présentant une grande perméance à la vapeur d'eau, est largement influencée par l'humidité extérieure.

4.1.3.2 Paille

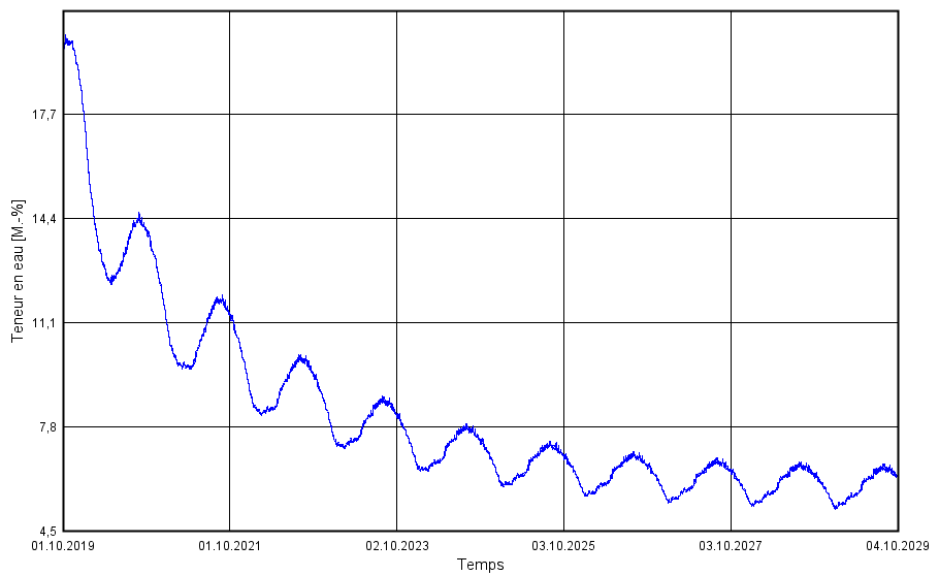
Evolution sur une période de 3 ans :



La teneur d'eau de la paille proche de 20% diminue afin de s'établir à une valeur inférieure à 10 % au bout de 3 ans mais ne semble pas se stabiliser.

Evolution sur une période de 10 ans :

Teneur en eau de la paille

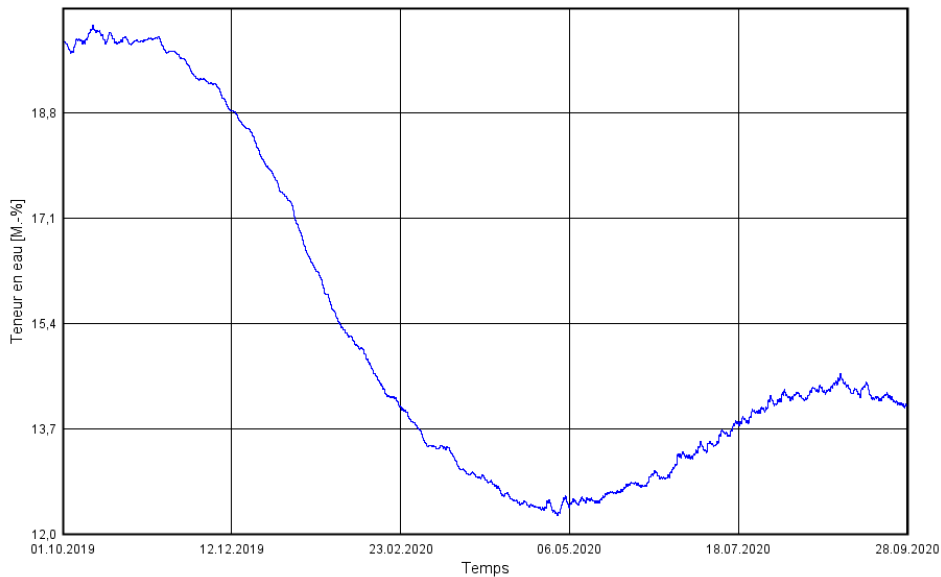


La stabilisation de l'humidité au sein de la paille n'est obtenue qu'au bout d'environ six ans suite à la construction du bâtiment.

Aucune accumulation d'eau dans la paille n'est relevée au bout de 10 ans.

Evolution lors des premiers mois suite à la mise en œuvre de la paille :

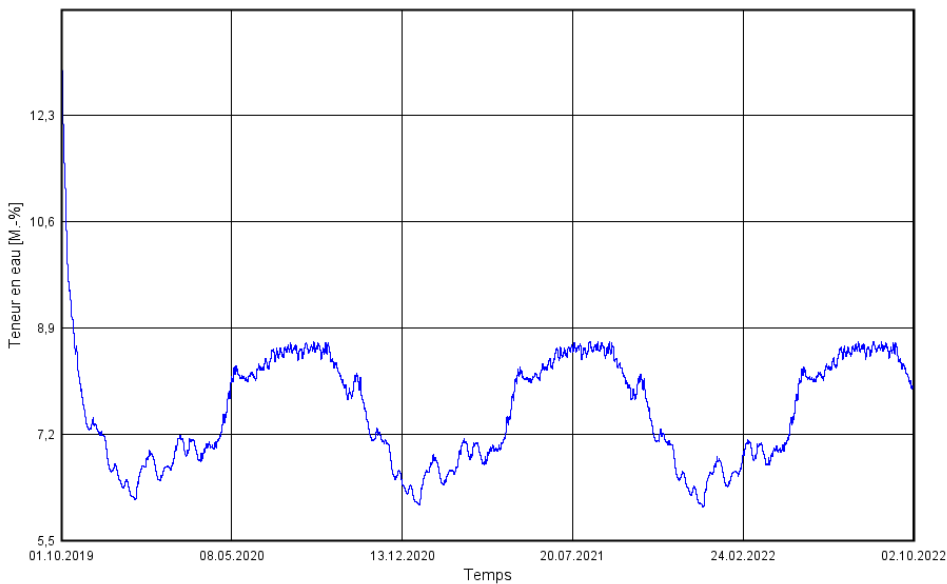
Teneur en eau



La teneur en eau au sein de la botte de paille semble rester stable durant le premier mois suivant son installation puis décroît ensuite pour atteindre une valeur inférieure à 15 % au bout de deux mois.

4.1.3.3 Isolant Métisse

Teneur en eau dans l'isolant intérieur

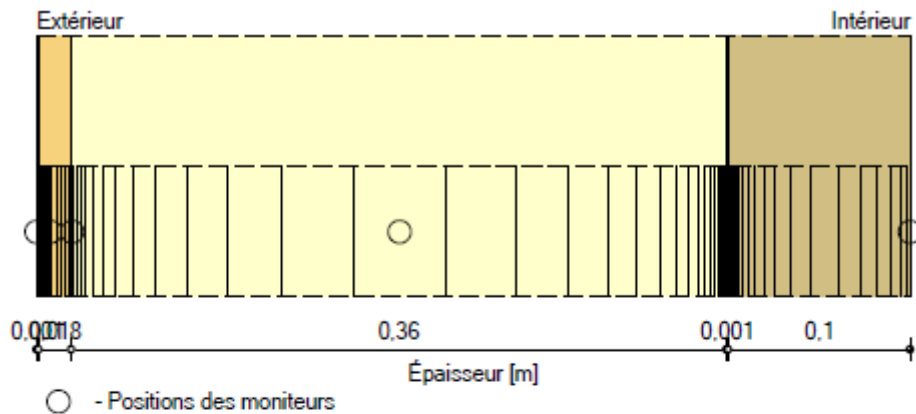


L'eau présente initialement dans l'isolant décroît rapidement les premiers mois pour s'établir à une valeur inférieure 9 % de la matière sèche.

4.2 Murs ENV1 Finition intérieure BTC

4.2.1 Paramètres de modélisation

- **Modélisation des couches dans le logiciel WUFI**



Matériaux:

- Pare vent / pare pluie (sd=0,1m) 0,001 m
- OSB 3 (oriented strand board) 0,018 m
- Paille - ref. Apropaille Custom / sens perpendiculaire 0,36 m
- Freine vapeur (sd=100m) 0,001 m
- BTC (Données issues de mud plaster bbd MASEA) 0,1 m

Épaisseur totale: 0,48 m
 Valeur de la résistance thermique R: 5,59 (m² K)/W
 Coefficient U: 0,173 W/(m² K)

Des paramètres de calcul identiques à ceux de la composition ENV1 Fermacell seront utilisés en ce qui concerne le maillage, l'orientation/inclinaison et les sources externes diverses.

4.2.2 Synthèse des résultats

Teneur en eau [kg/m³]

	Début	Fin	Min.	Max.
Teneur en eau totale	10,79	4,77	4,75	10,79

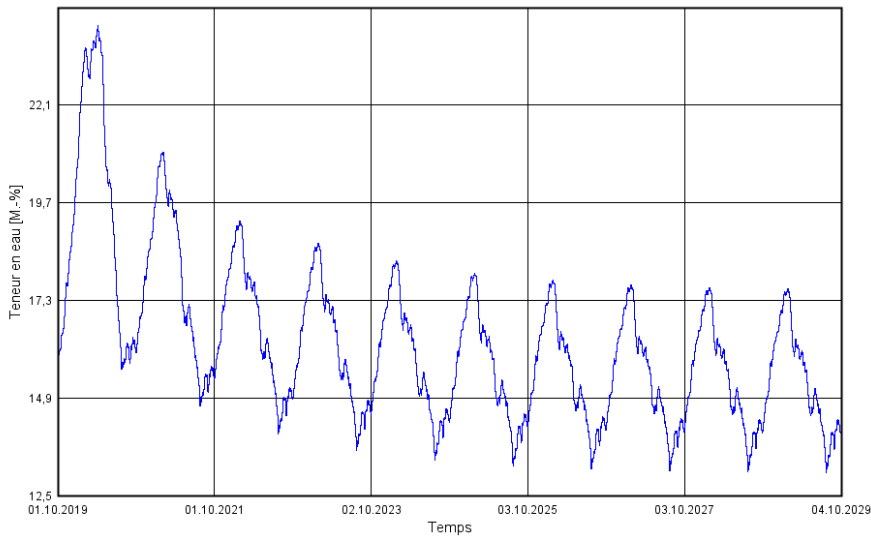
Teneur en eau [kg/m³]

Couche/Matériaux	Début	Fin	Min.	Max.
Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,04
OSB 3 (oriented strand board)	95,00	84,17	77,15	160,94
Paille - ref. Apropaille Custom / sens	20,00	5,89	5,65	20,00
Freine vapeur (sd=100m)	0,00	0,00	0,00	0,00
BTC (Données issues de mud plaster	18,80	11,33	9,32	18,80

4.2.3 Evolution de la teneur en haut dans les différentes couches

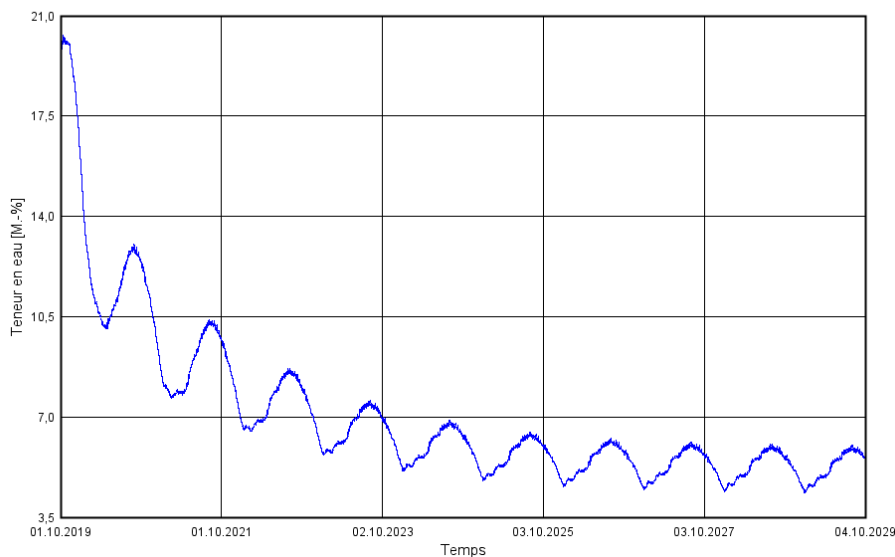
4.2.3.1 OSB

Teneur en eau OSB



4.2.3.2 Paille

Teneur en eau Paille



La teneur en eau dans la paille présente une évolution similaire à celle de la variante ENV1_Fermacell. Aucune accumulation n'est observée. D'autre part, la teneur en eau reste toujours inférieure au critère de détérioration de 25% de kg d'eau par kg de paille sèche.

4.3 Conclusion

Dans les deux configurations étudiées, la composition ENV1 ne présente pas de risques avérés de détérioration de ces composants. La teneur en eau dans les matériaux potentiellement exposés à un risque de moisissure tels que la paille, l'isolant intérieur ou bien encore le contreventement en OSB ne voit pas d'accumulation au cours du temps.

On peut cependant noter que l'humidité présente au sein de la paille lors de sa mise en œuvre ne décroît pas durant le premier mois après son installation. Le phénomène de séchage ne se produit

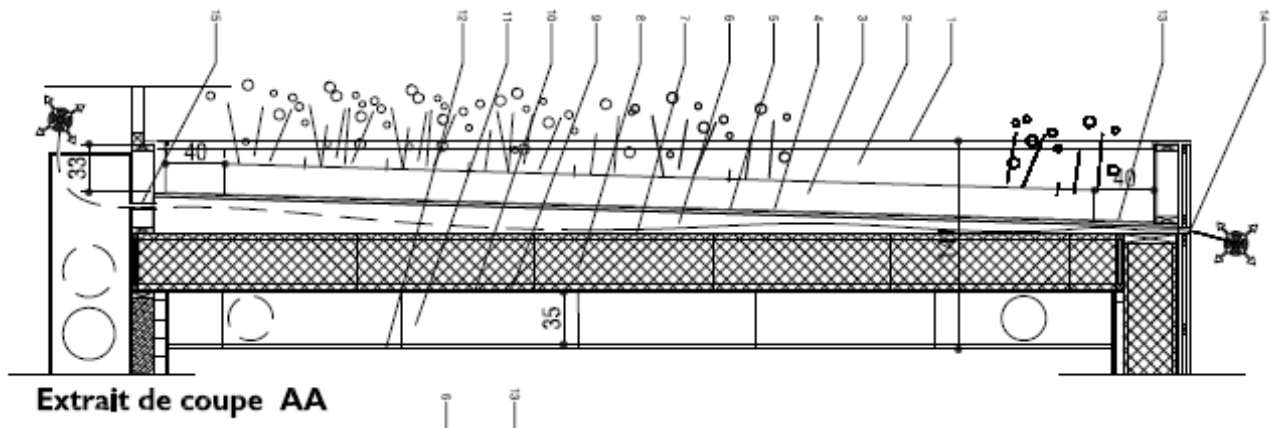
qu'au bout du deuxième mois. **De fait, il est primordial d'évaluer la teneur en eau des bottes lors de leur mise en place afin d'assurer que celle-ci ne soit pas supérieure à 20%** (leur séchage étant relativement long au sein de la paroi, voire inexistant les premiers mois).

A noter ces résultats sont obtenus en utilisant des pare-vapeur et pare-pluie extérieur présentant les propriétés suivantes :

	SD
Pare-vapeur intérieur	100 m
Pare-pluie	0,1 m

5 Etude de la toiture terrasse végétalisée COUV2

5.1.1 Paramètres de modélisation



COUV2 version PRO - toiture terrasse sur classes

1. Couvertine acier laqué, pente pour rejet d'eau Intérieur
2. Relevé d'étanchéité sur acrotère bois ép 145 mm
3. Complexe de végétalisation de la toiture
4. Complexe d'étanchéité
5. Support d'étanchéité
6. lame d'air ventilée par fourrure posées dans l'axe des poutres l et formant pente à 3,5% vers rives extérieures pour la toiture terrasse
7. Pare-pluie tissé pour fermeture des calssons paille
8. Poutres l structurelles avec âmes isolées en laine de bois pour éviter les ponts thermiques, remplissage isolant paille sous forme de bottes, ép 360mm
9. fermeture inférieure du calsson par OSB 18 mm, assurant la protection au feux du calsson, SD à coordonner avec SD pare-pluie, ép 18mm
10. Pare-vapeur complémentaire si nécessaire en fonction du test WUFI*
11. Vide faux-plafond 350 mm pour passage des gaines de ventilation soufflage et reprise
12. Faux-plafond suspendu en dalles acoustiques laine de bois organlc-twin
13. Bande stérile gravillonnée
14. Grille de ventilation en façade à dimensionner*
15. Grille de ventilation dans circulation ou sous préau à dimensionner*

EPAISSEUR TOTALE 1410 mm

Prise en compte de la lame ventilée horizontale de la toiture terrasse

D'après la littérature et notamment au sens de la norme NF EN ISO 6946 et de la réglementation thermique des bâtiment (Fascicule Th-U parois opaques) une couche d'air horizontale est considérée comme fortement ventilée lorsque la superficie totale des ouvertures de ventilation est supérieure à 1500mm² par m² de superficie de lame d'air. Le tableau suivant présente les sections minimales à retenir pour le projet afin d'obtenir une ventilation suffisante de la lame d'air :

Tableau 1: sections minimales aérations selon NF EN ISO 6946

	Longueur du pan de toiture	Surface utile d'aération pour obtenir une lame d'air fortement ventilée	
		Surface en entrée et en sortie par m d'égout	Surface en entrée et en sortie entre chaque solives (entraxe =50cm)
	m	cm ²	cm ²
Toiture terrasse NORD	7	53	26
Toiture terrasse OUEST et EST hors sanitaire	7	53	26
Toiture terrasse OUEST et EST pan comprenant les sanitaires	11	83	41

*Au sens de la norme NF EN ISO 6946 (NB : il s'agit de la surface de passage libre dans le cas de l'utilisation d'une grille d'aération).

D'autre part, la mise en œuvre d'une toiture froide ventilée selon le DTU 43.4-P1-1 impose une surface minimum d'entrée d'air utile défini selon le tableau suivant :

Tableau 2 — Détermination de la surface utile de ventilation de la lame d'air et de son épaisseur

Caractéristiques du bâtiment						
Classes d'hygrothermie du local sous-jacent						
	Faible $W/n \leq 2,5 \text{ g/m}^3$	Moyenne $2,5 < W/n \leq 5 \text{ g/m}^3$	Forte $5 < W/n \leq 7,5 \text{ g/m}^3$			
Perméance du plafond Π/e en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mm Hg}$						
	$\Pi/e \leq 0,02$	$0,02 < \Pi/e$	$\Pi/e \leq 0,02$	$0,02 < \Pi/e$	$\Pi/e \leq 0,02$	$0,02 < \Pi/e$
S	1/2500	1/500	1/1200	1/250	1/1000	non visé
E fonction de l	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	non visé
≤ 10 m				10 cm		
≤ 15 m						
NOTE L'annexe C donne quelques indications utiles au calcul de perméance de la paroi plafond.						

Les locaux scolaires étant considérés comme locaux d'hygrothermie moyenne et la longueur de rampant étant inférieure ou égale à 10 m, on obtient les résultats suivants :

	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau du plafond sous la lame d'air	Perméance	Surface utile* minimale des aérations de ventilation	
	Sd		S	Surface utile des aérations d'entrée et sortie ENTRE CHAQUE SOLIVES (cm ²)**
Sans Pare-vapeur				
OSB 4	4	0,28	1/250	100
OSB 3	3	0,34	1/250	100
Avec Pare-vapeur				
Pare Vapeur Sd 20	20	0,05	1/250	100
Pare Vapeur Sd 50	50	0,02	1/1200	21
Pare Vapeur Sd 100	100	0,01	1/1200	21

* surface de passage libre dans le cas de l'utilisation d'une grille d'aération

** Calculé pour un rampant d'une longueur de 10 m

En l'absence de pare-vapeur en sous-face de l'isolation de la toiture, le DTU 43.4-P1-1 recommande l'installation de grilles d'aération en entrée et en sortie présentant une surface libre supérieure à 100 cm², ce pour chacune des travées délimitées par les fourrures au droit des solives (c.a.d 200 cm² par m d'égout).

En présence d'un pare-vapeur avec un Sd supérieur à 50m les aérations devront, à minima, présenter les sections définies dans le tableau 1.

Le cas le plus défavorable sera modélisé dans la simulation, à savoir sans pare-vapeur.

Modélisation de la lame d'air ventilée

La modélisation considèrera l'installation de grilles d'air dont la surface libre est supérieure ou égale aux valeurs indiquées dans le tableau ci-dessus afin d'obtenir une couche d'air fortement ventilée. De fait, les éléments situés au-dessus de la lame d'air ne seront pas modélisés dans WUFI. La surface externe des caissons étant protégée par les éléments de couverture, l'absorption de pluie et le rayonnement solaire seront considérés comme nuls à cette interface.

Modélisation du faux plafond

L'épaisseur de la couche d'air étant supérieure à 300mm, il n'est pas possible modéliser cet espace comme une couche d'air dans le logiciel. Les conditions dans le faux-plafond seront considérées comme étant identiques à celles intérieure, la surface inférieure des caissons est modélisée comme étant en contact avec l'intérieur.

Maillage

Maillage par défaut : Automatique II.

Sources

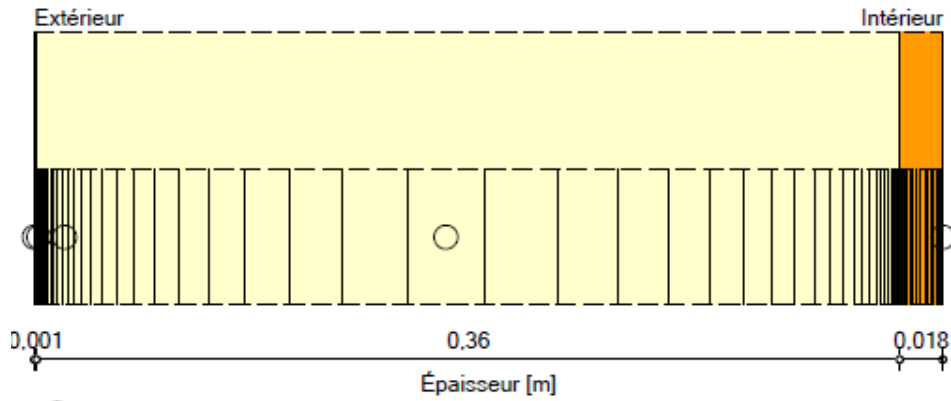
Le modèle ne comporte aucune source d'humidité ni de source de renouvellement d'air provenant de l'air extérieur.

Orientation / inclinaison

Orientation Nord (par défaut), inclinaison 0°.

Modélisation des couches dans le logiciel WUFI

Cas : COUV2



○ - Positions des moniteurs

Matériaux:

	- Pare vent / pare pluie (sd=0.1m)	0.001 m
	- Paille - ref. Apropaille Custom / sens perpendiculaire	0.36 m
	- AiF OSB 4	0.018 m

Épaisseur totale: 0.379 m
 Valeur de la résistance thermique R: 5.42 (m² K)/W
 Coefficient U: 0.179 W/(m² K)

5.1.2 Synthèse des résultats

Teneur en eau [kg/m²]

	Début	Fin	Min.	Max.
Teneur en eau totale	8,91	3,16	2,85	8,91

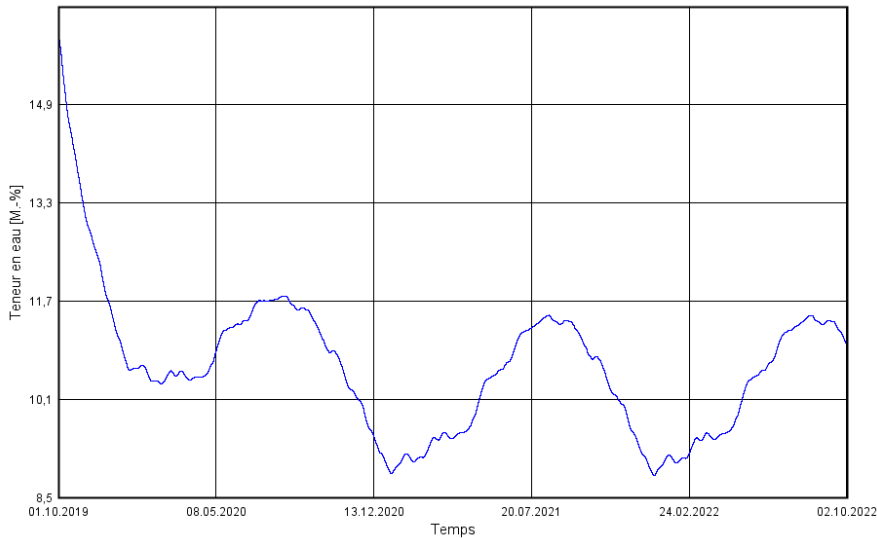
Teneur en eau [kg/m³]

Couche/Matériaux	Début	Fin	Min.	Max.
Pare vent / pare pluie (sd=0.1m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Paille - ref. Apropaille Custom / sens	20,00	5,55	4,78	20,00
OSB 3 (oriented strand board)	95,00	64,50	51,70	95,00

5.1.3 Evolution de la teneur en haut dans les différentes couches

5.1.3.1 OSB

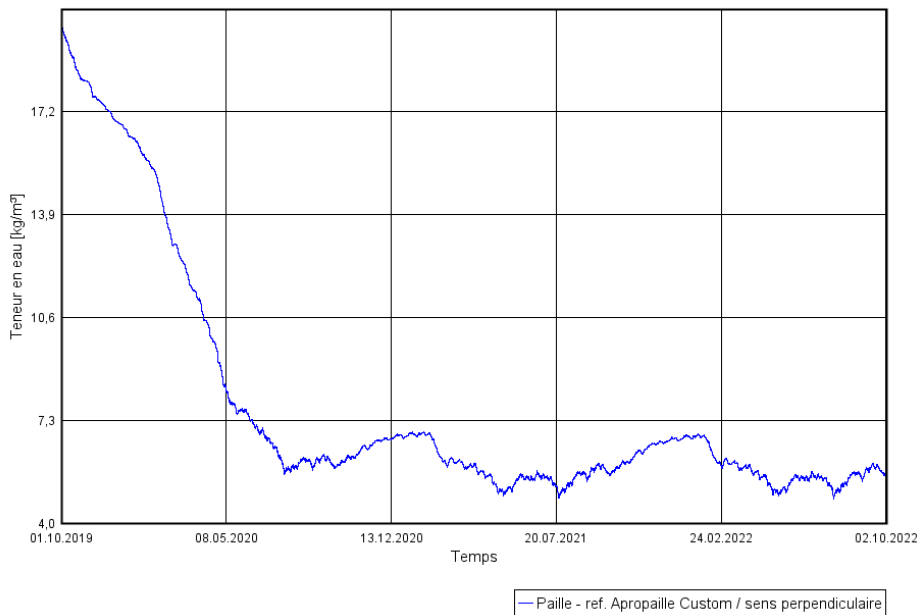
Teneur en eau de l'OSB



L'eau présente dans les conditions de mise en œuvre est rapidement relarguée. La teneur en eau évolue ensuite en fonction de l'humidité intérieure mais reste toujours inférieure à 11%.

5.1.3.2 Paille

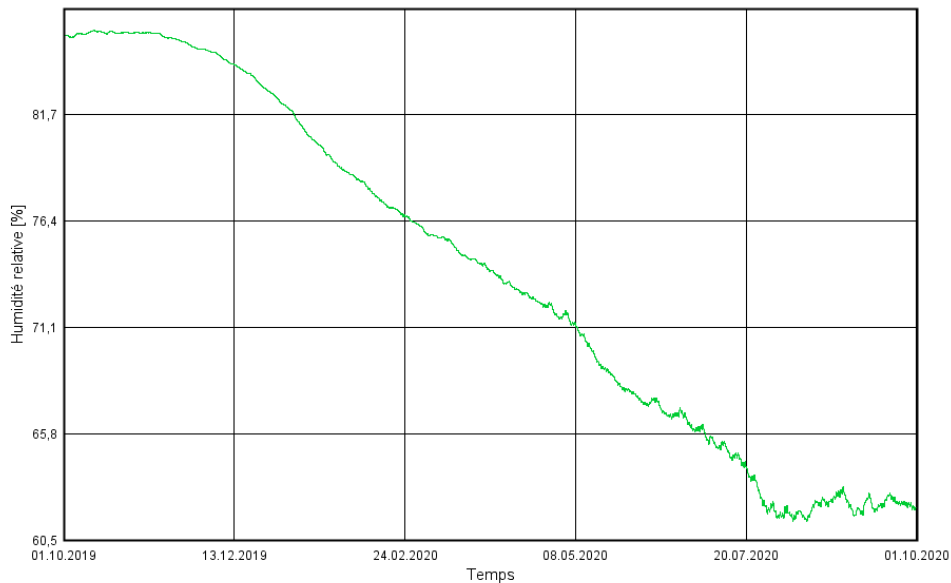
Paille - ref. Apropaille Custom / sens perpendiculaire



Contrairement à la composition dans les murs, la teneur en eau de la paille semble se stabiliser rapidement au bout d'une année. Ceci peut s'expliquer par l'absence de panneau OSB à la surface externe de la composition qui permet à la paille de sécher plus rapidement.

5.1.4 Evolution de l'humidité relative dans la paille

Humidité relative dans la paille



Les conditions d'humidité potentiellement critiques sont atteintes lors des premières semaines suivant la mise en œuvre de la paille. Comme on peut l'observer sur la courbe ci-dessous, il s'agit du temps nécessaire pour la paille d'évacuer l'eau présente à la construction (20% en kg d'eau par kg de matière sèche).

5.1.5 Conclusion

De même qu'observé pour la composition ENV1, le taux d'humidité de la paille dans la composition COUV2 reste proche de l'humidité lors de la construction (80%) pendant les premiers mois avant de diminuer au bout de deux mois.

La teneur en haut de la paille lors de sa mise en œuvre est donc un paramètre très important à vérifier pour éviter le développement de la moisissure lors des premiers mois suites à sa mise en œuvre.

Cependant, la teneur en haut diminue ensuite fortement et se stabilise rapidement car les échanges via la lame d'air ventilée (considérée comme équivalente à l'air extérieur) sont importants au niveau de la surface externe de la composition.

La simulation via WUFI ne met pas en évidence le besoin de mettre en œuvre un pare-vapeur en sous-face de la composition. Cependant il faut noter qu'en l'absence de frein vapeur, le DTU concernant la mise en œuvre des toitures froides ventilées recommande l'installation d'entrées d'air présentant une surface libre supérieure à 200cm² par m d'égout en entrée et sortie.

6 Annexes : Rapports WUFI pour les compositions étudiées

Données du projet

Nom du projet Extension Collège Jean Reber_Isle

Nombre de projet 1

Client Département de la haute vienne

Personne à contacter

Ville/Code postal

Rue

Téléphone

Fax

Courriel

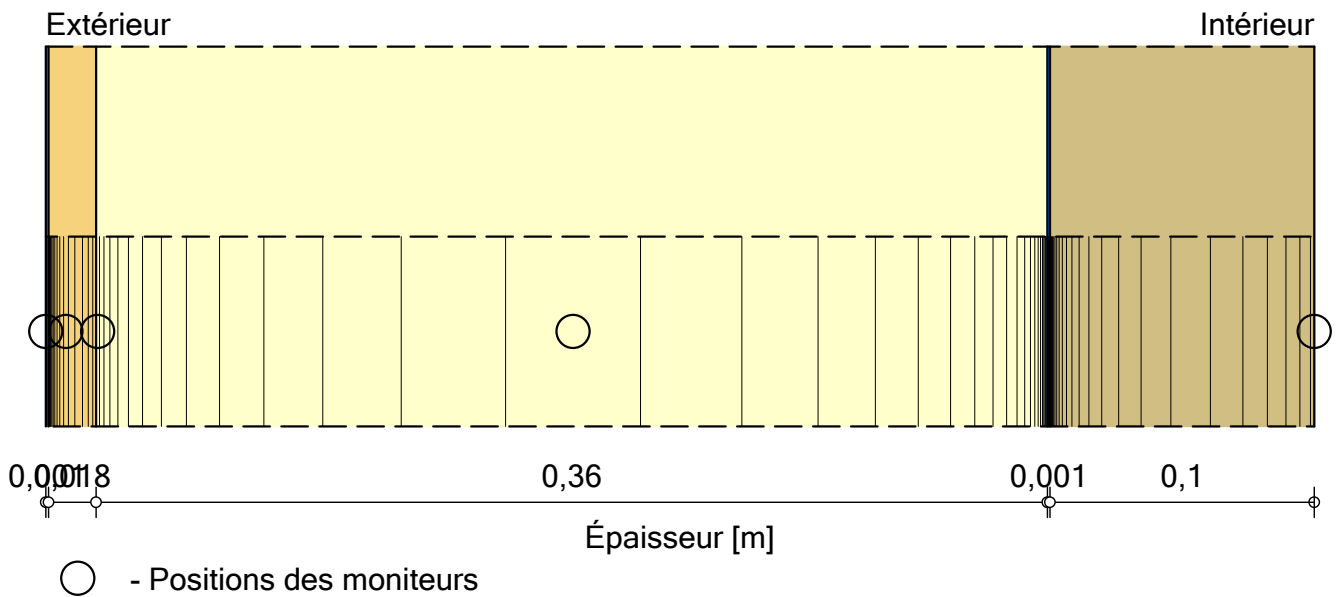
Responsable

Remarques



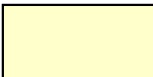


Date 10/01/2019

assemblage des composants

Cas : ENV1_BTC_10ans



Matériaux:

	- Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,001 m
	- OSB 3 (oriented strand board)	0,018 m
	- Paille - ref. Apropaille Custom / sens perpendiculaire	0,36 m
	- Freine vapeur (sd=100m)	0,001 m
	- BTC (Données issues de mud plaster bbd MASEA)	0,1 m

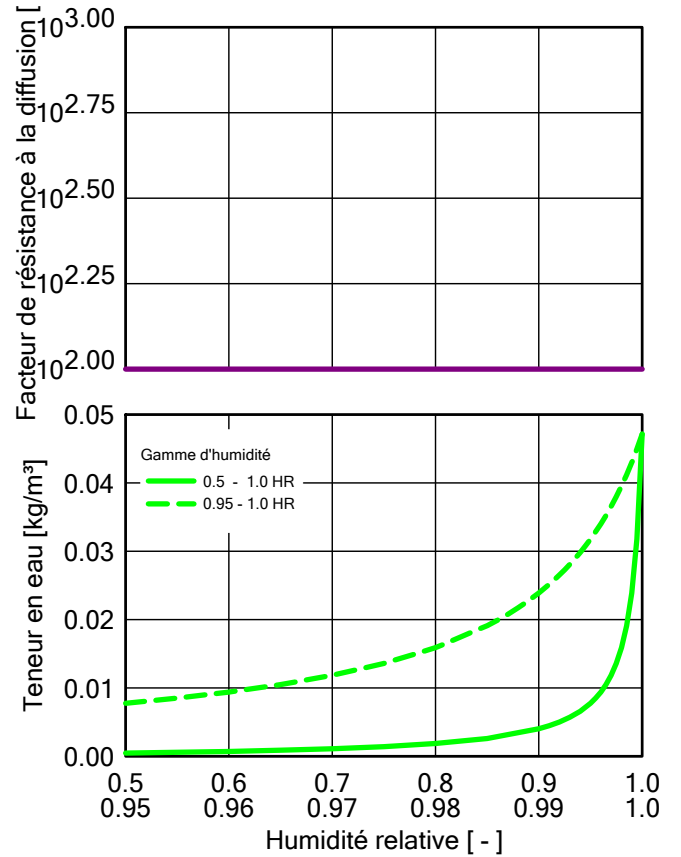
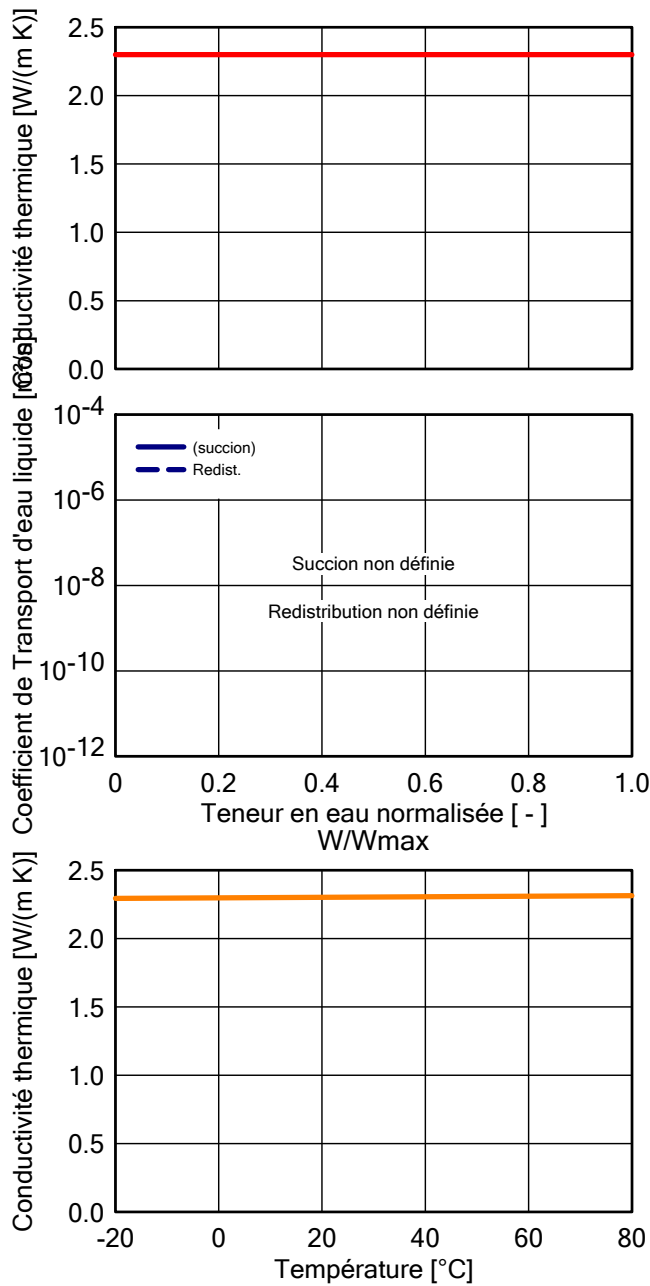
Épaisseur totale: 0,48 m

Valeur de la résistance thermique R: 5,59 (m² K)/W

Coefficient U: 0,173 W/(m² K)

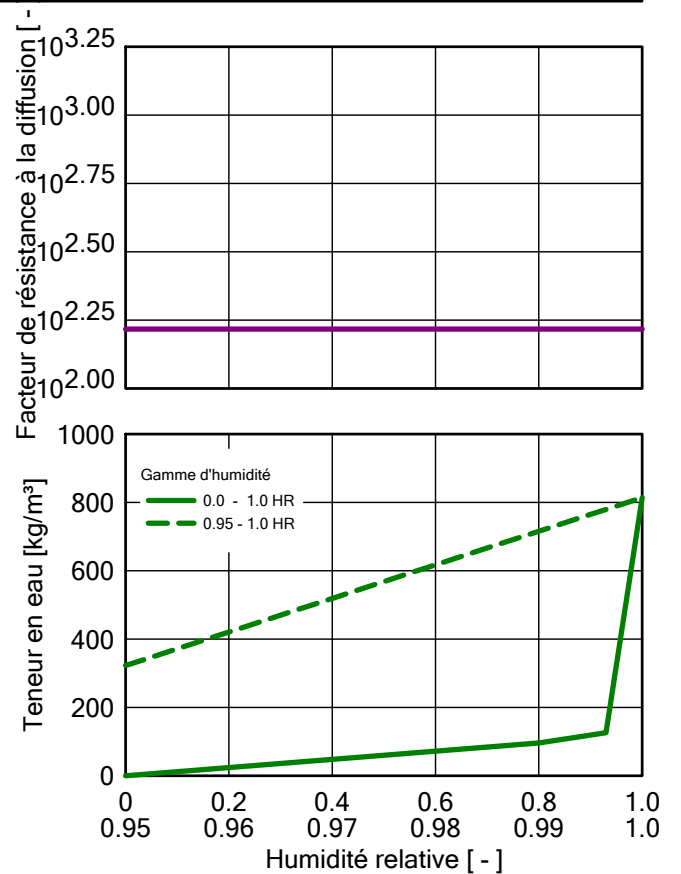
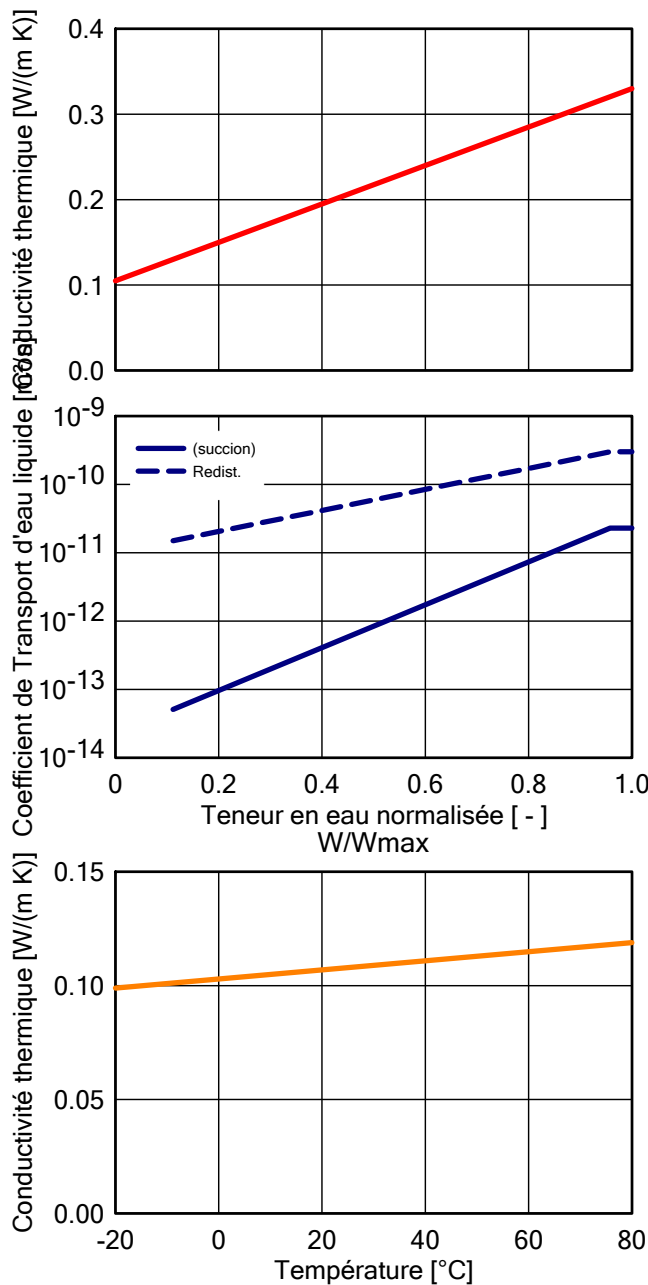
Matériaux: Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	130
Porosité	[m ³ /m ³]	0.001
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2300
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	100
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002



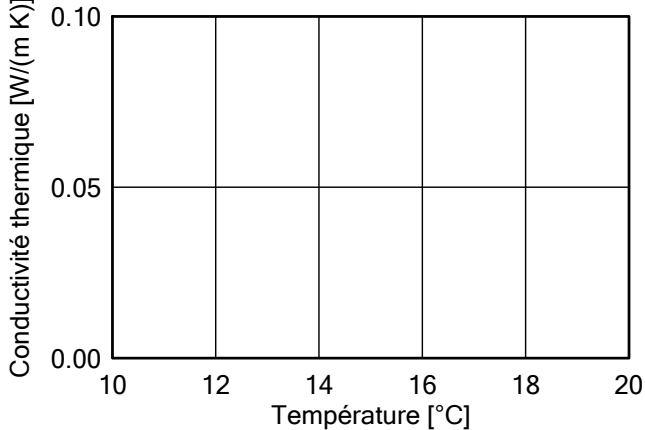
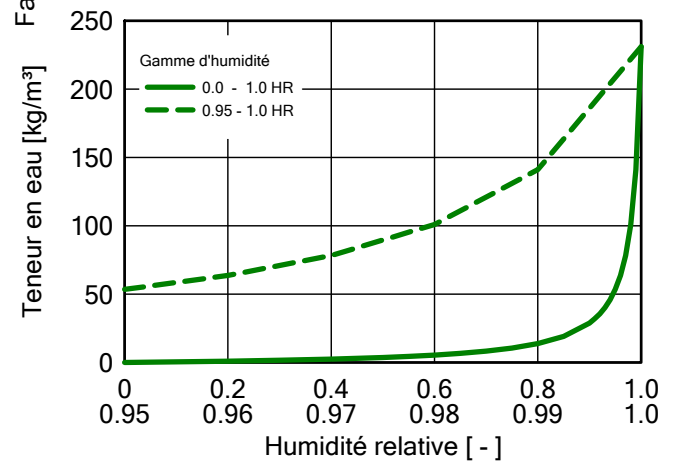
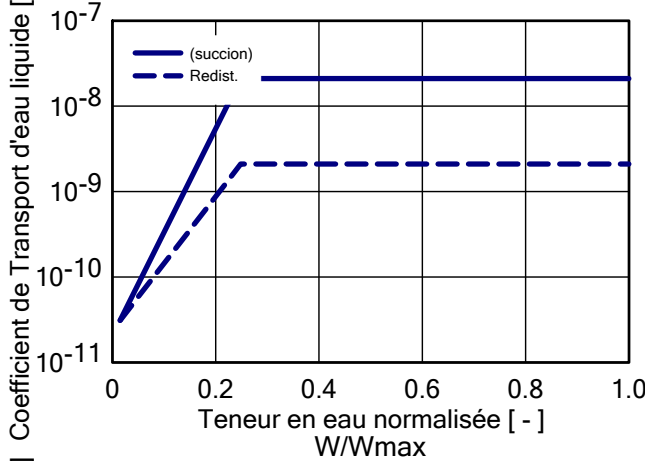
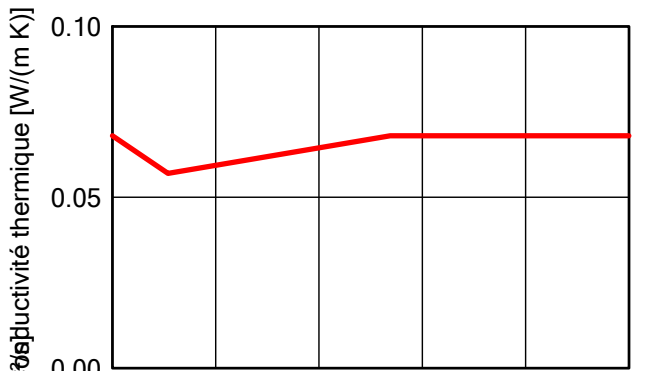
Matériaux: OSB 3 (oriented strand board)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	595
Porosité	[m ³ /m ³]	0.85
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1400
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.1049
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	165
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m ³]	95
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m ³]	814
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.002
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de	[%/M.-%]	1.5
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002



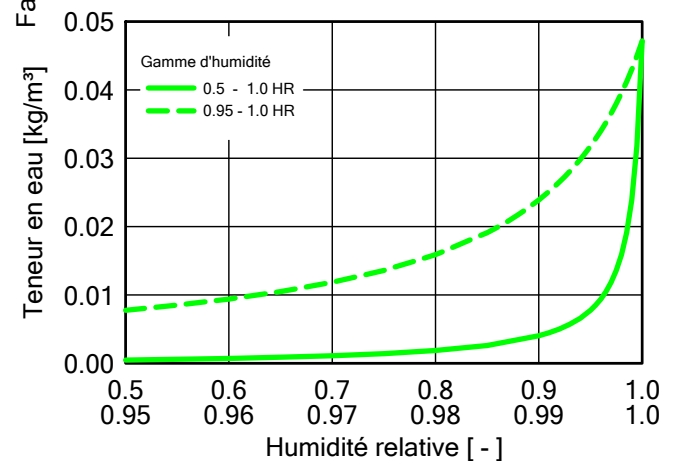
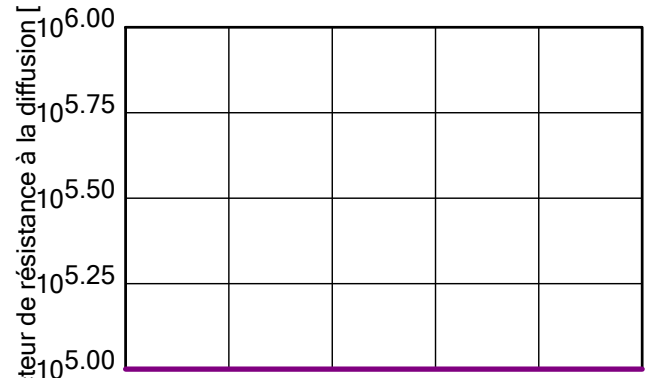
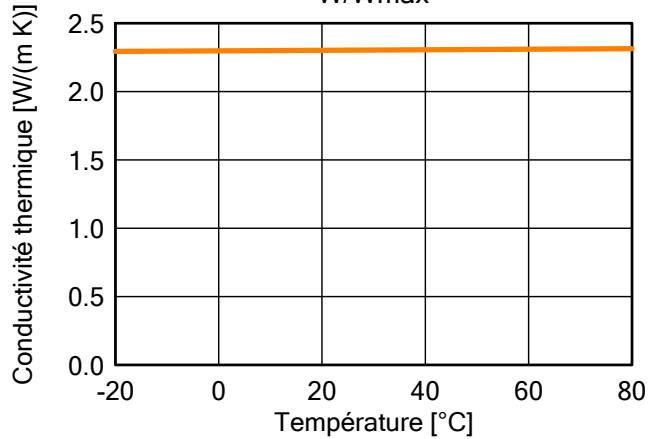
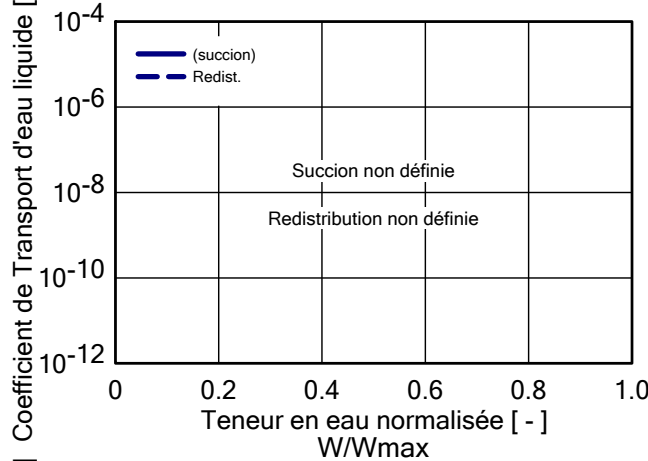
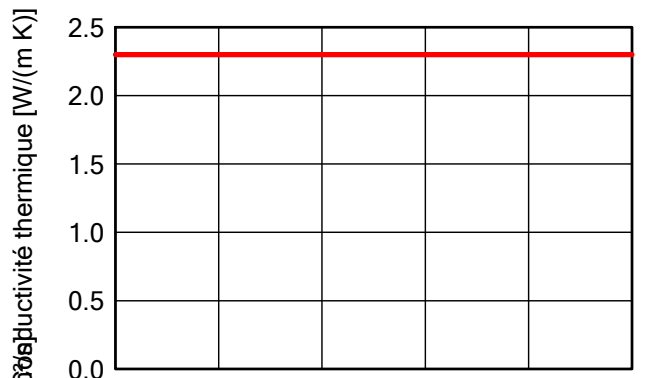
Matériaux: Paille - ref. Apropaille Custom / sens perpendiculaire

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	100
Porosité	[m ³ /m ³]	0.93
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2426
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.068
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	1.34
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m ³]	13.76
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m ³]	231
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.017
Conductivité Thermique - Valeur Utile	[W/(m K)]	0.068



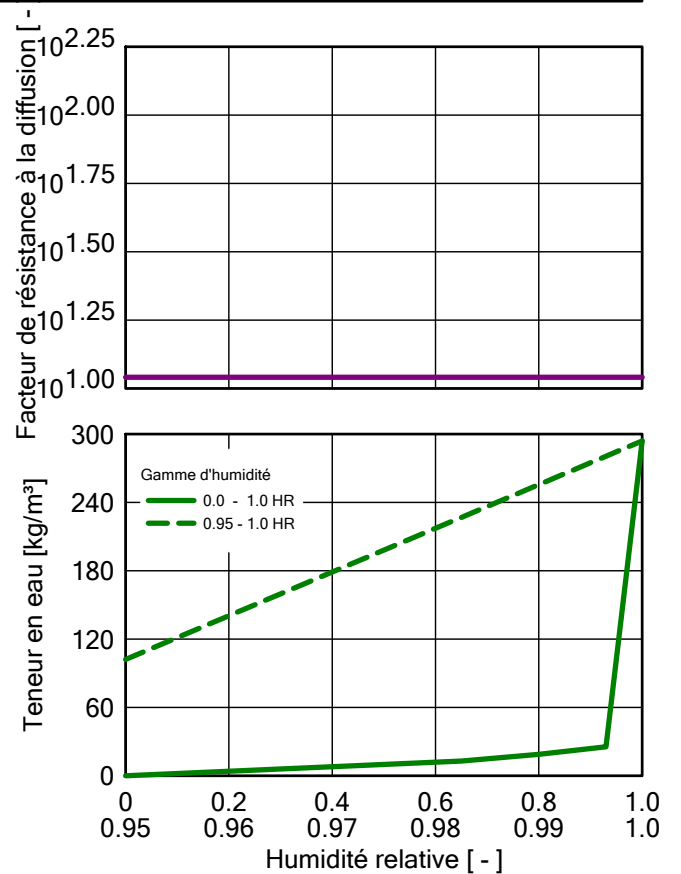
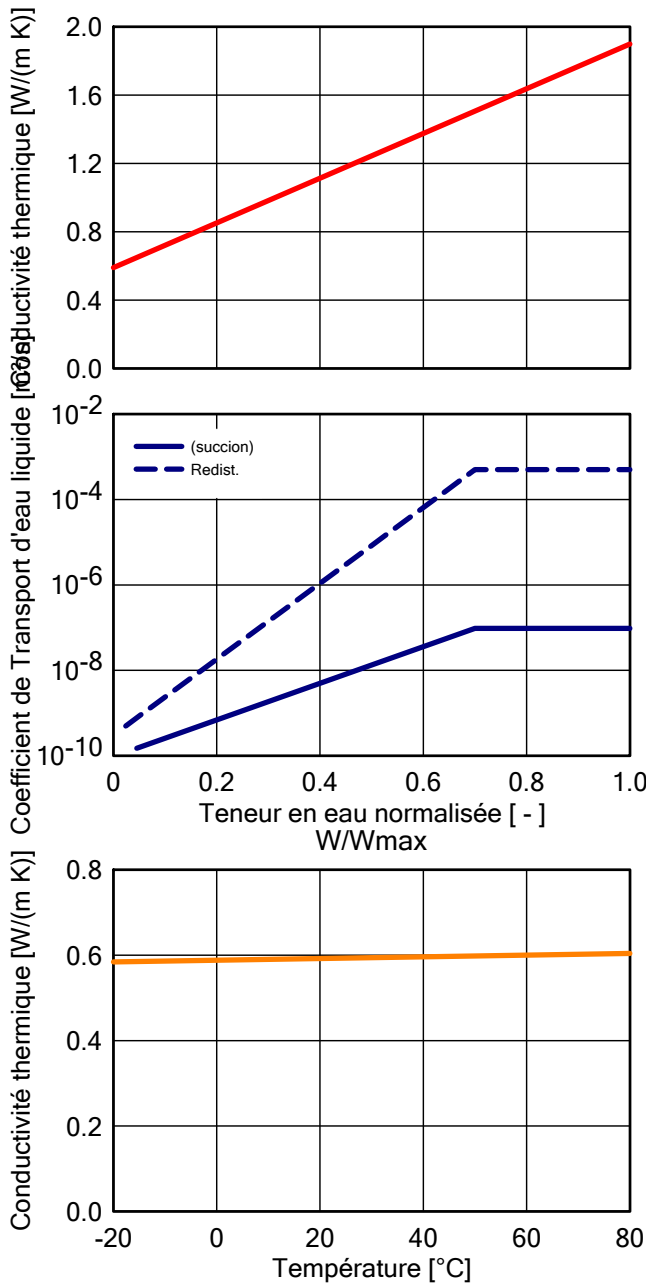
Matériaux: Freine vapeur (sd=100m)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	130
Porosité	[m ³ /m ³]	0.001
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2300
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	100000
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002



Matériaux: BTC (Données issues de mud plaster bbd MASEA)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	1514
Porosité	[m ³ /m ³]	0.42
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1000
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.59
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	11
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m ³]	19
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m ³]	294
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.0467
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de	[%/M.-%]	8
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002



Conditions aux limites

Extérieur (côté gauche)

Localisation: Bordeaux; Bordeaux-Mérignac, 2008 (Météo-France)
 Décalage de la température: 0.0 °C
 Orientation / Inclinaison: Ouest / 90 °
 refroidissement par rayonnement nocturne: Non

Intérieur (côté droit)

Climat intérieur: EN 15026
 Charge en Humidité Moyenne

Coefficients de transferts surfaciques

Extérieur (côté gauche)

Nom	Description	Unité	Valeur
Résistance thermique - inclut le rayt. grandes longueurs d'ondes	Mur extérieur	[(m ² K)/W]	0.0588 Oui
Épaisseur d'air équivalente Sd	Sans revêtement	[m]	----
Absorptivité (Courtes Longueurs d'Ondes)	Sans absorption/émission	[-]	----
Émissivité (Grandes Longueurs d'Ondes)	Sans absorption/émission	[-]	----
Fraction de la pluie restant à la surface	Sans absorption	[-]	----
Bilan explicite du rayonnement			Non

Intérieur (côté droit)

Nom	Description	Unité	Valeur
Résistance thermique	Mur extérieur	[(m ² K)/W]	0.125
Épaisseur d'air équivalente Sd	Sans revêtement	[m]	----

Résultats pour le dernier calcul

Statut du calcul

Date et heure du calcul	10/01/2019 20:04:59
Durée du calcul	6 min,22 sec.
Début/fin de calcul	01/10/2019 / 01/10/2029
Nb. d'erreurs de convergence	1

Vérification de la qualité numérique

Intégrale des flux, côté gauche (kl, dl)	[kg/m ²]	0,0 -5,34
Intégrale des flux, côté droit (kr, dr)	[kg/m ²]	-0,02 0,71
Balance 1	[kg/m ²]	-6,01
Balance 2	[kg/m ²]	-6,02

Teneur en eau [kg/m³]

	Début	Fin	Min.	Max.
Teneur en eau totale	10,79	4,77	4,75	10,79

Teneur en eau [kg/m³]

Couche/Matériaux	Début	Fin	Min.	Max.
Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,04
OSB 3 (oriented strand board)	95,00	84,17	77,15	160,94
Paille - ref. Apropaille Custom / sens	20,00	5,89	5,65	20,00
Freine vapeur (sd=100m)	0,00	0,00	0,00	0,00
BTC (Données issues de mud plaster)	18,80	11,33	9,32	18,80

Intégrale des flux par rapport au temps

Flux de chaleur, côté gauche	[MJ/m ²]	-466,1
Flux de chaleur, côté droit	[MJ/m ²]	-482,07
Flux d'humidité, côté gauche	[kg/m ²]	-5,31
Flux d'humidité, côté droit	[kg/m ²]	0,7

Sources hygrothermiques

Sources de chaleur	[MJ/m ²]	0,0
Sources d'humidité	[kg/m ²]	0,0
Sources d'humidité non injectée (limitation de la source)	[kg/m ²]	0,0

Données du projet

Nom du projet Extension Collège Jean Rebier_Isle

Nombre de projet 1

Client Département de la haute vienne

Personne à contacter

Ville/Code postal

Rue

Téléphone

Fax

Courriel

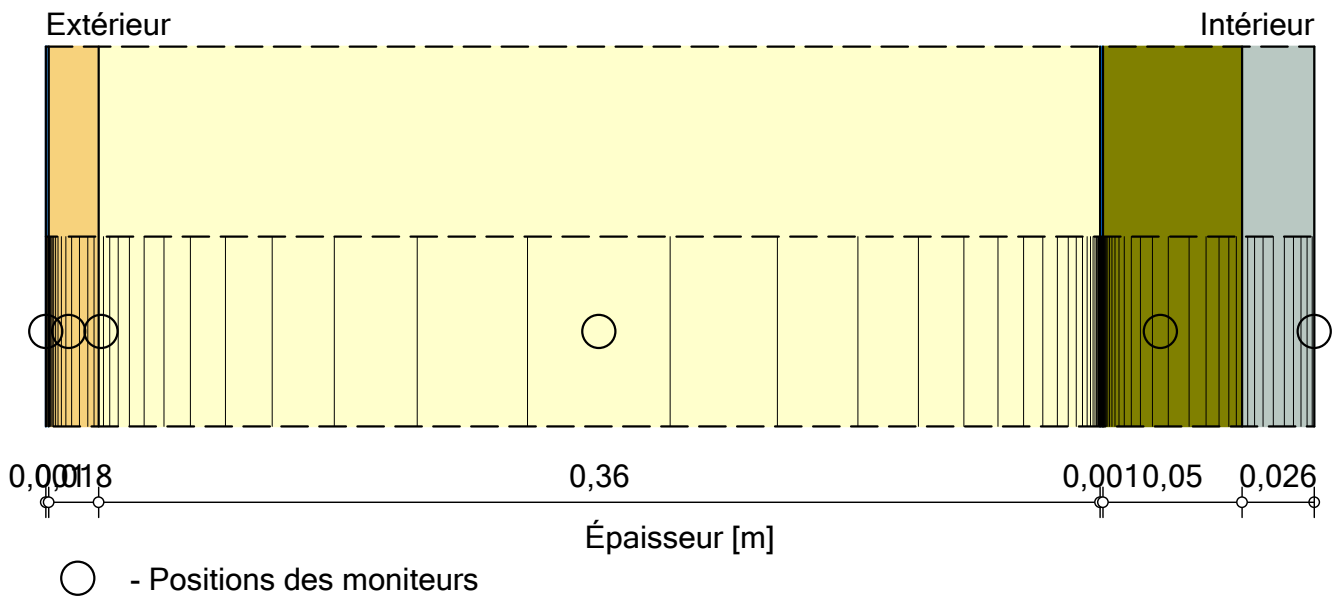
Responsable

Remarques

Date 10/01/2019

assemblage des composants

Cas : ENV1_Fermacell_10 ans



Matériaux:

	- Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,001 m
	- OSB 3 (oriented strand board)	0,018 m
	- Paille - ref. Apropaille Custom / sens perpendiculaire	0,36 m
	- Freine vapeur (sd=100m)	0,001 m
	- Planneau isolant en lin	0,05 m
	- Plaque de plâtre FERMACELL	0,026 m

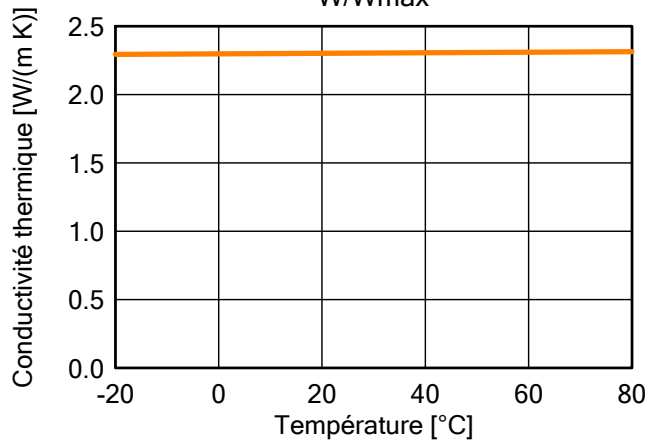
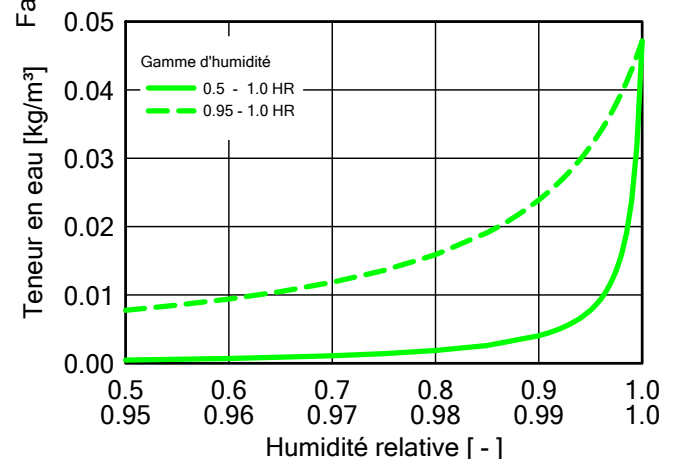
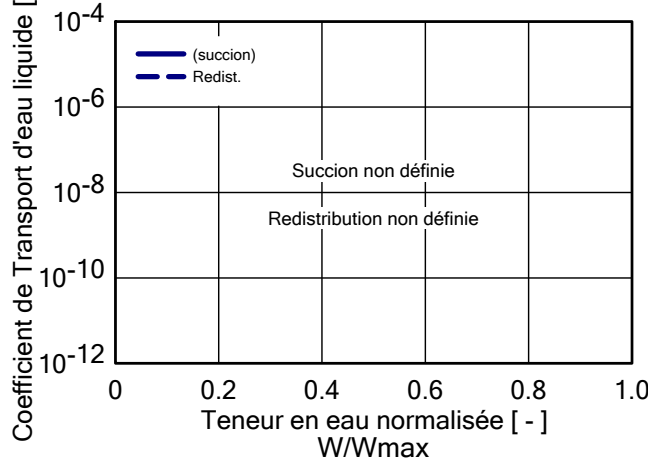
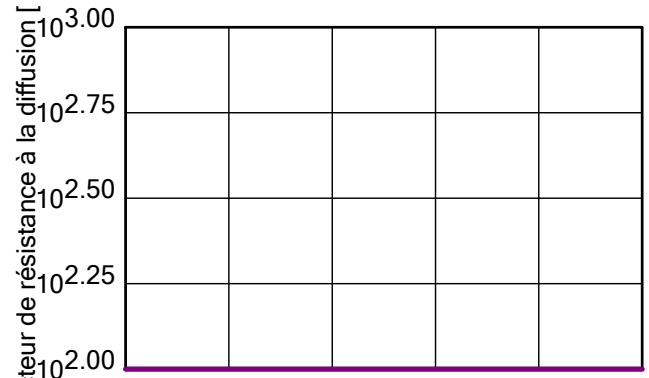
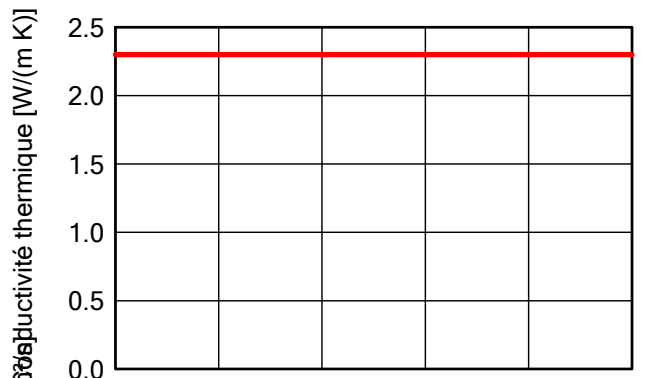
Épaisseur totale: 0,456 m

Valeur de la résistance thermique R: 6,83 (m² K)/W

Coefficient U: 0,143 W/(m² K)

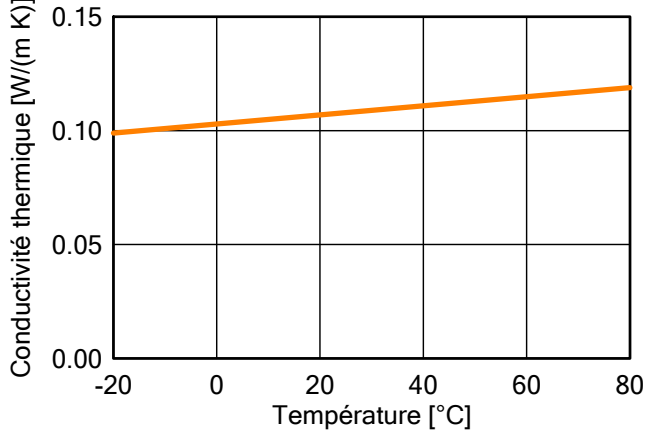
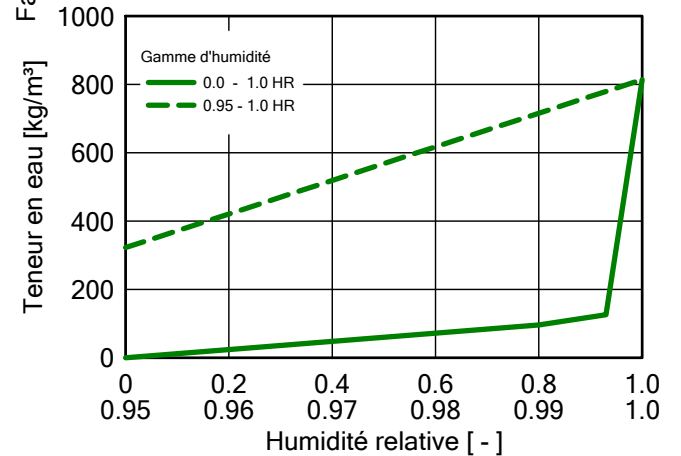
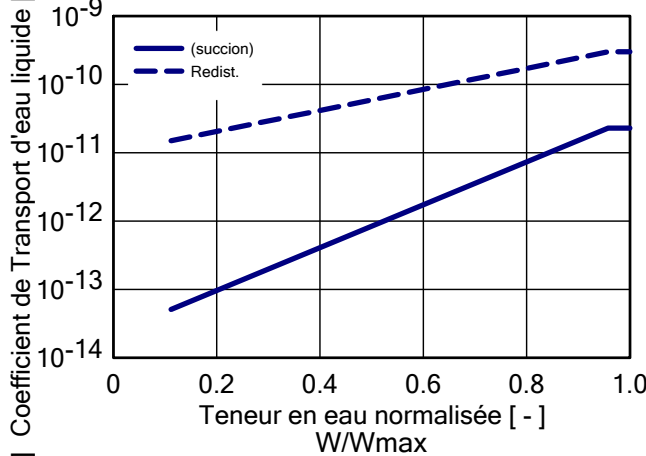
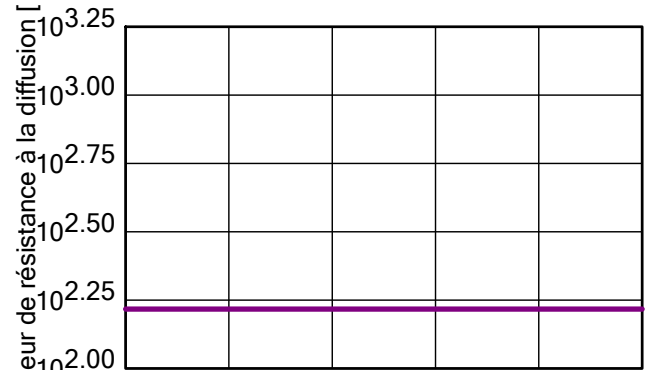
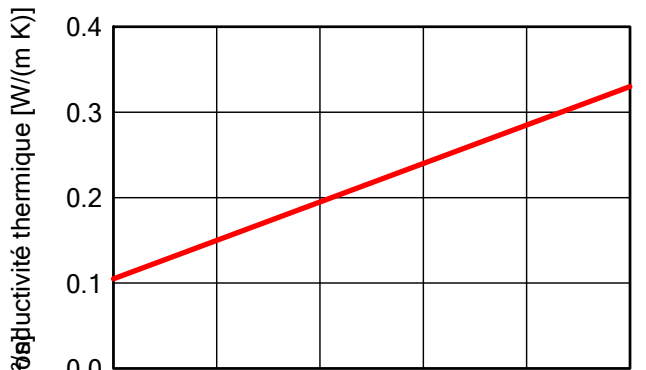
Matériaux: Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	130
Porosité	[m ³ /m ³]	0.001
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2300
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	100
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002



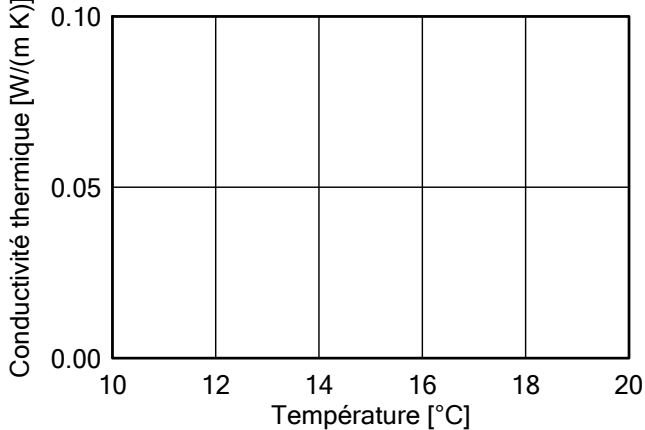
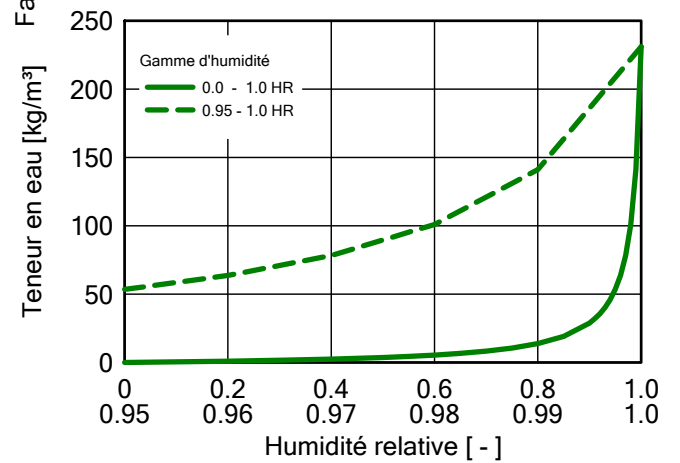
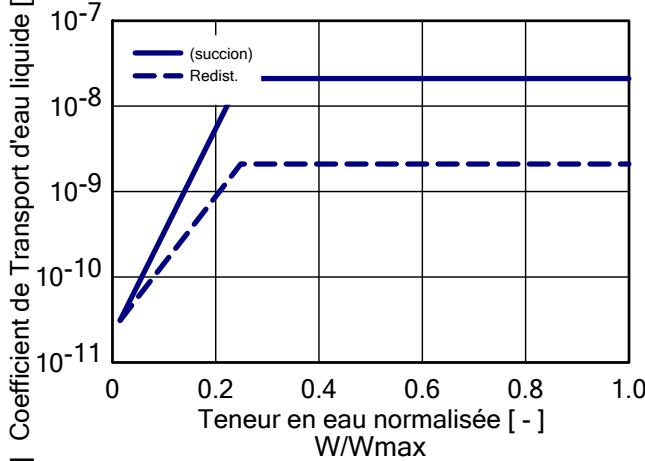
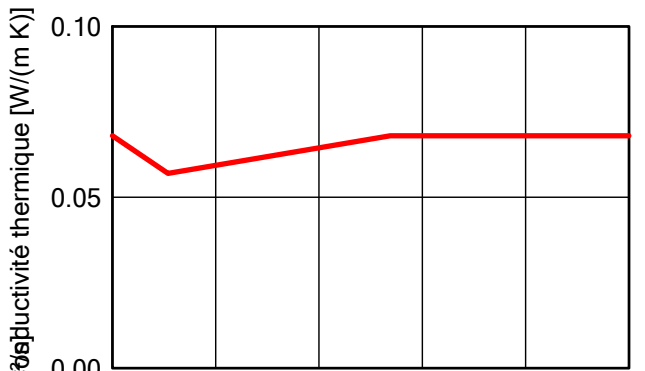
Matériaux: OSB 3 (oriented strand board)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	595
Porosité	[m ³ /m ³]	0.85
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1400
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.1049
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	165
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m ³]	95
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m ³]	814
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.002
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de	[%/M.-%]	1.5
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002



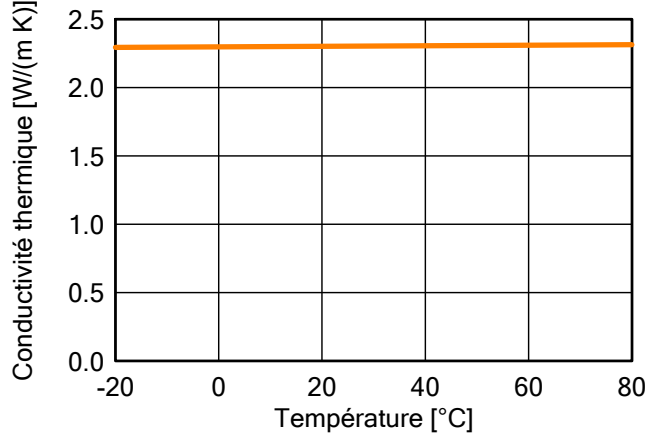
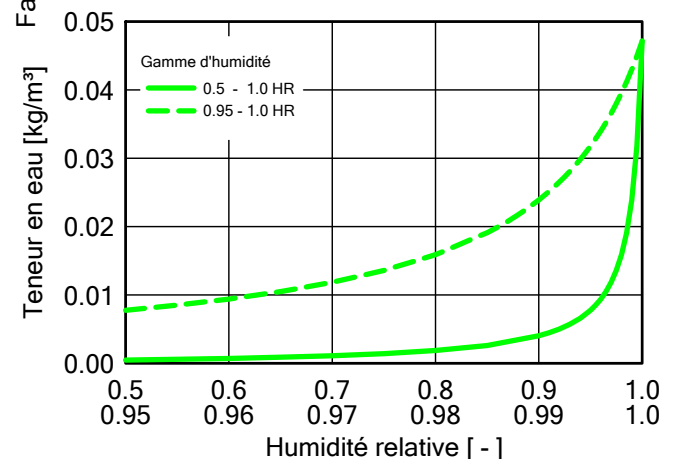
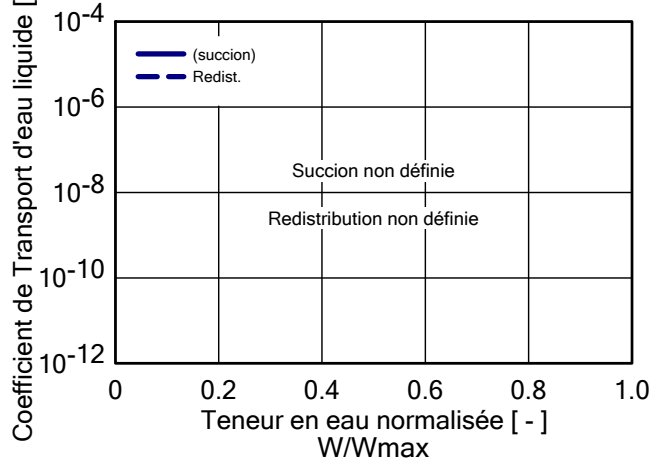
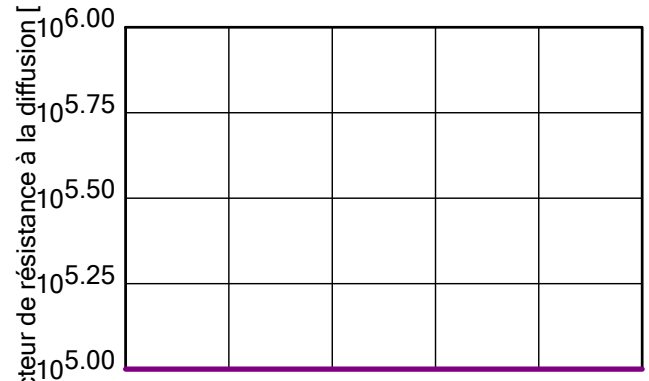
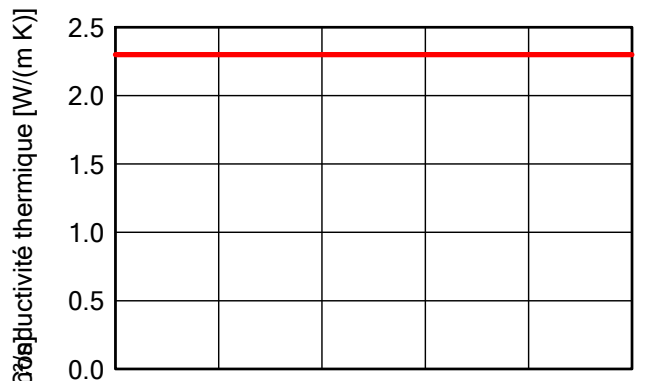
Matériaux: Paille - ref. Aproaille Custom / sens perpendiculaire

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	100
Porosité	[m ³ /m ³]	0.93
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2426
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.068
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	1.34
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m ³]	13.76
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m ³]	231
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.017
Conductivité Thermique - Valeur Utile	[W/(m K)]	0.068



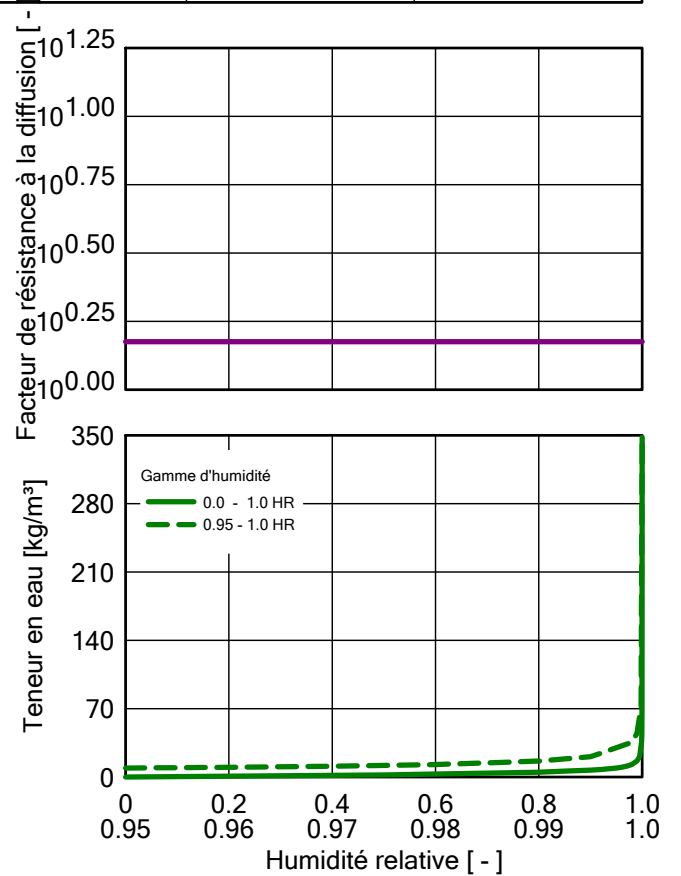
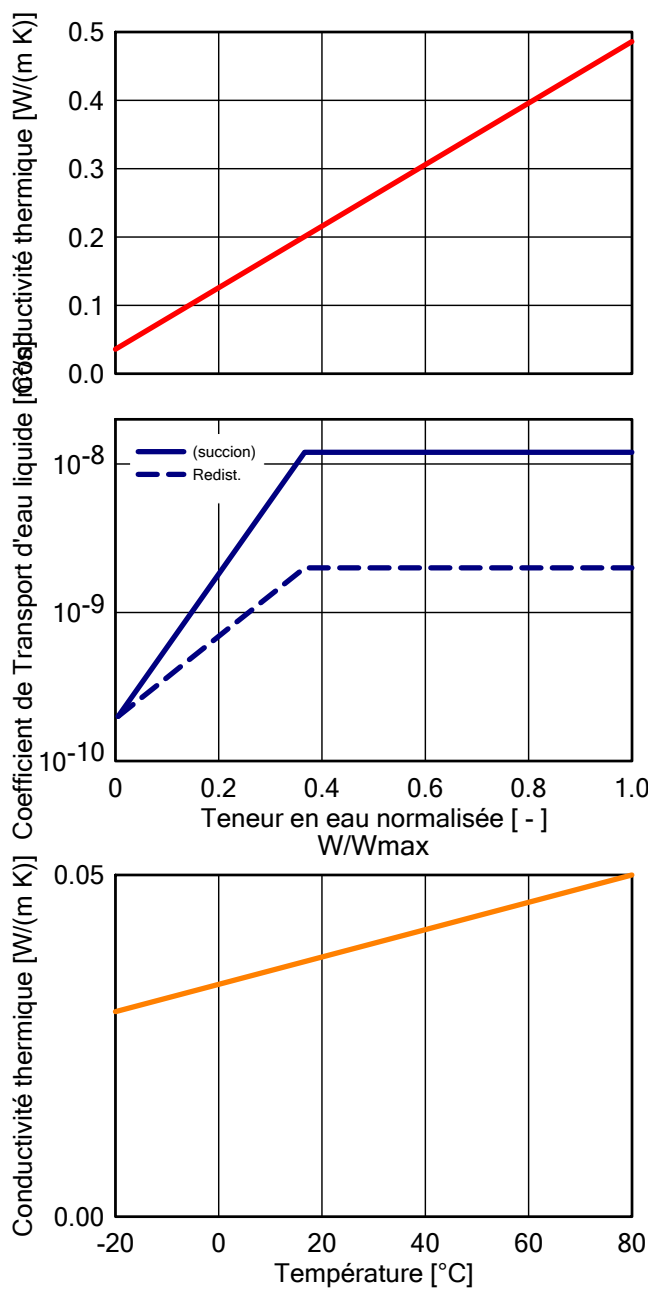
Matériaux: Freine vapeur (sd=100m)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	130
Porosité	[m ³ /m ³]	0.001
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2300
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	100000
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002



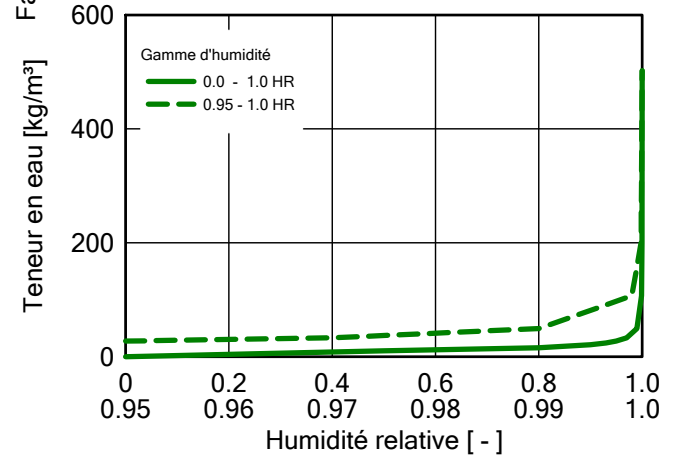
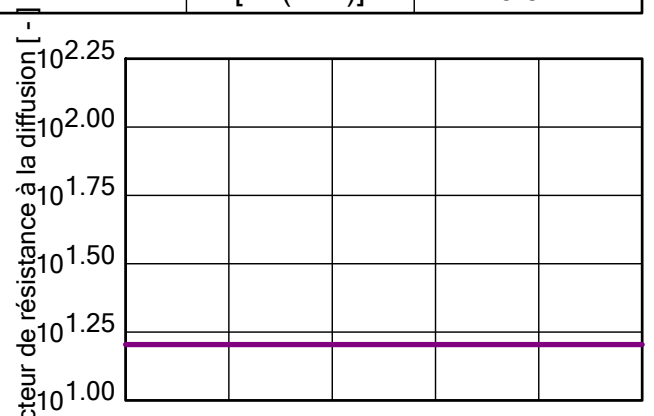
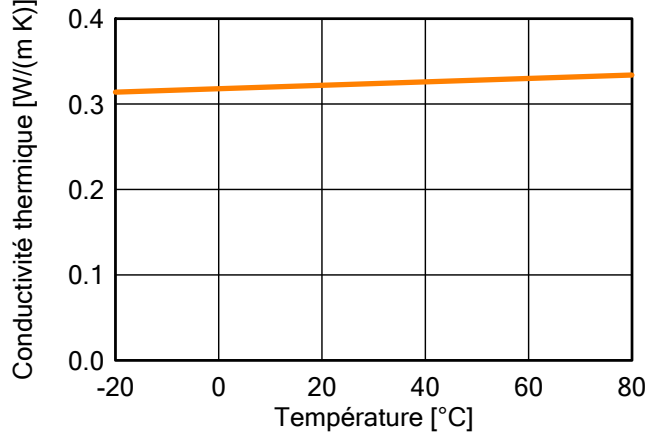
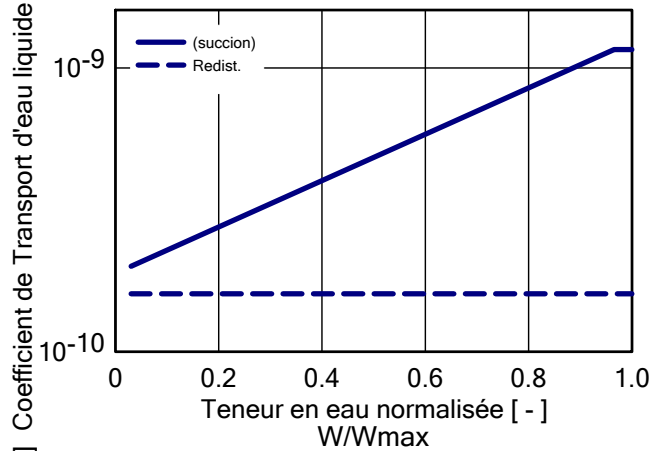
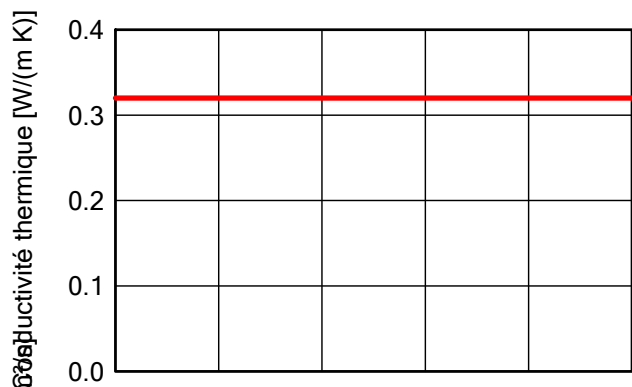
Matériaux: Plaque isolante en lin

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	38
Porosité	[m ³ /m ³]	0.95
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1660
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	1.5
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de	[%/M.-%]	0.5
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002
Conductivité Thermique - Valeur Utile	[W/(m K)]	0.038



Matériaux: Plaque de plâtre FERMACELL

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	1153
Porosité	[m ³ /m ³]	0.52
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1200
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.32
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	16
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002
Conductivité Thermique - Valeur Utile	[W/(m K)]	0.32



Conditions aux limites

Extérieur (côté gauche)

Localisation: Bordeaux; Bordeaux-Mérignac, 2008 (Météo-France)
 Décalage de la température: 0.0 °C
 Orientation / Inclinaison: Ouest / 90 °
 refroidissement par rayonnement nocturne: Non

Intérieur (côté droit)

Climat intérieur: EN 15026
 Charge en Humidité Moyenne

Coefficients de transferts surfaciques

Extérieur (côté gauche)

Nom	Description	Unité	Valeur
Résistance thermique - inclut le rayt. grandes longueurs d'ondes	Mur extérieur	[(m ² K)/W]	0.0588 Oui
Épaisseur d'air équivalente Sd	Sans revêtement	[m]	----
Absorptivité (Courtes Longueurs d'Ondes)	Sans absorption/émission	[-]	----
Émissivité (Grandes Longueurs d'Ondes)	Sans absorption/émission	[-]	----
Fraction de la pluie restant à la surface	Sans absorption	[-]	----
Bilan explicite du rayonnement			Non

Intérieur (côté droit)

Nom	Description	Unité	Valeur
Résistance thermique	Mur extérieur	[(m ² K)/W]	0.125
Épaisseur d'air équivalente Sd	Sans revêtement	[m]	----

Résultats pour le dernier calcul

Statut du calcul

Date et heure du calcul	10/01/2019 19:55:32
Durée du calcul	6 min,32 sec.
Début/fin de calcul	01/10/2019 / 01/10/2029
Nb. d'erreurs de convergence	1

Vérification de la qualité numérique

Intégrale des flux, côté gauche (kl, dl)	[kg/m ²]	0,0 -5,12
Intégrale des flux, côté droit (kr, dr)	[kg/m ²]	-0,0 0,17
Balance 1	[kg/m ²]	-5,28
Balance 2	[kg/m ²]	-5,3

Teneur en eau [kg/m²]

	Début	Fin	Min.	Max.
Teneur en eau totale	9,57	4,29	4,25	9,57

Teneur en eau [kg/m³]

Couche/Matériaux	Début	Fin	Min.	Max.
Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,04
OSB 3 (oriented strand board)	95,00	84,63	77,88	139,54
Paille - ref. Apropaille Custom / sens	20,00	6,46	6,30	20,00
Freine vapeur (sd=100m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Plaque isolant en lin	5,00	2,96	2,26	5,05
Plaque de plâtre FERMACELL	15,80	11,28	9,03	15,80

Intégrale des flux par rapport au temps

Flux de chaleur, côté gauche	[MJ/m ²]	-384,57
Flux de chaleur, côté droit	[MJ/m ²]	-398,42
Flux d'humidité, côté gauche	[kg/m ²]	-5,09
Flux d'humidité, côté droit	[kg/m ²]	0,18

Sources hygrothermiques

Sources de chaleur	[MJ/m ²]	0,0
Sources d'humidité	[kg/m ²]	0,0
Sources d'humidité non injectée (limitation de la source)	[kg/m ²]	0,0

Données du projet

Nom du projet Extension Collège Jean Reber_Isle

Nombre de projet 1

Client Département de la haute vienne

Personne à contacter

Ville/Code postal

Rue

Téléphone

Fax

Courriel

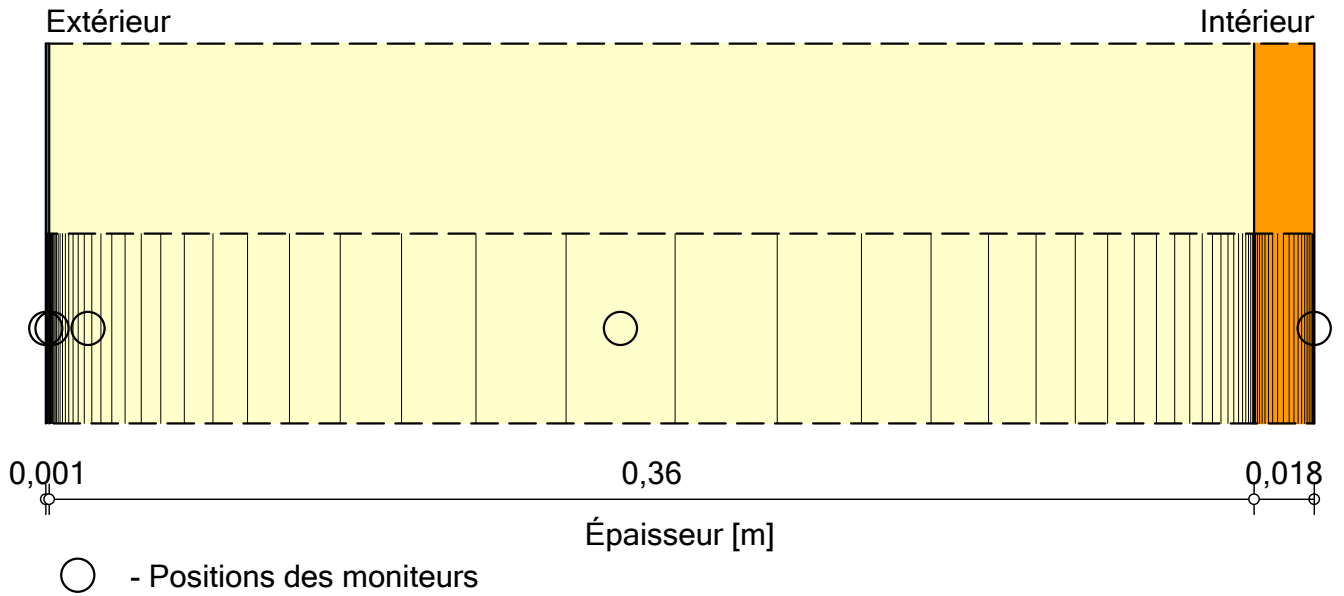
Responsable

Remarques




Date 10/01/2019

assemblage des composants

Cas : COUV2



Matériaux:

	- Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,001 m
	- Paille - ref. Apropaille Custom / sens perpendiculaire	0,36 m
	- AiF OSB 4	0,018 m

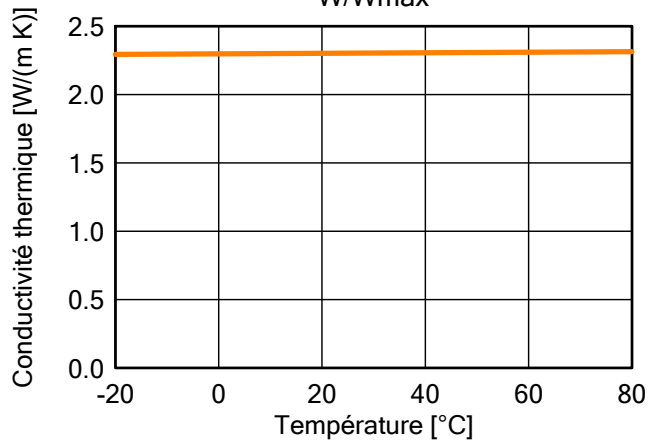
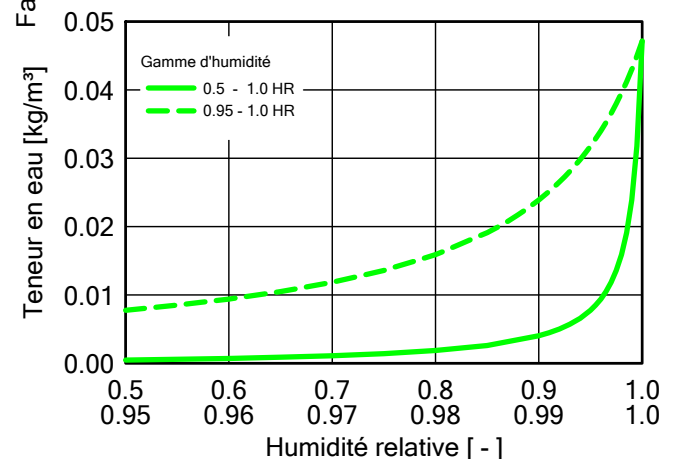
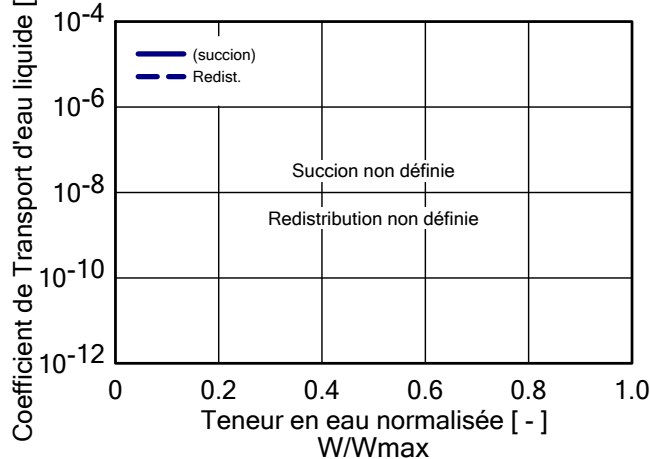
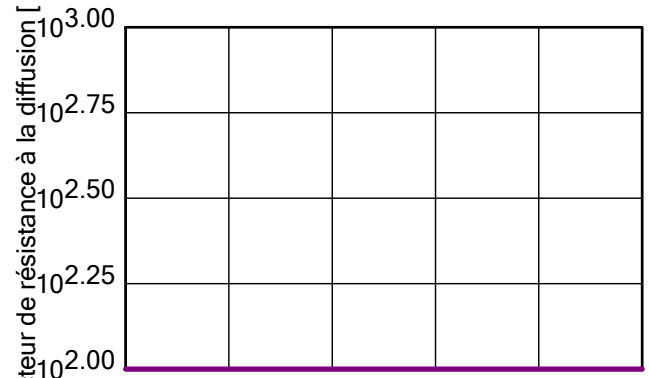
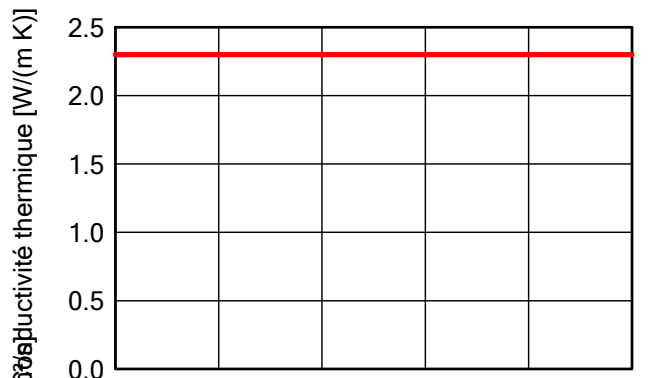
Épaisseur totale: 0,379 m

Valeur de la résistance thermique R: 5,42 (m² K)/W

Coefficient U: 0,179 W/(m² K)

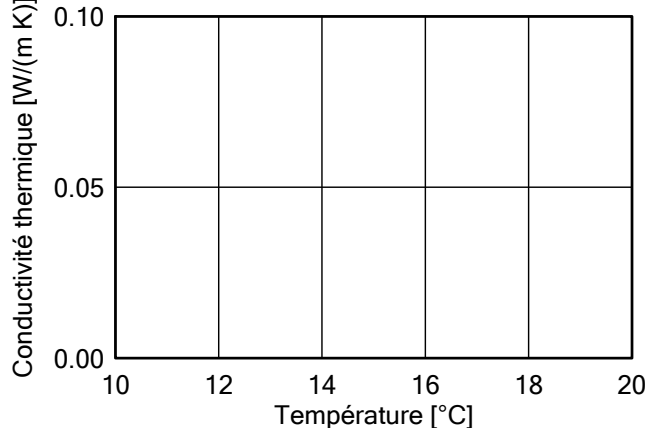
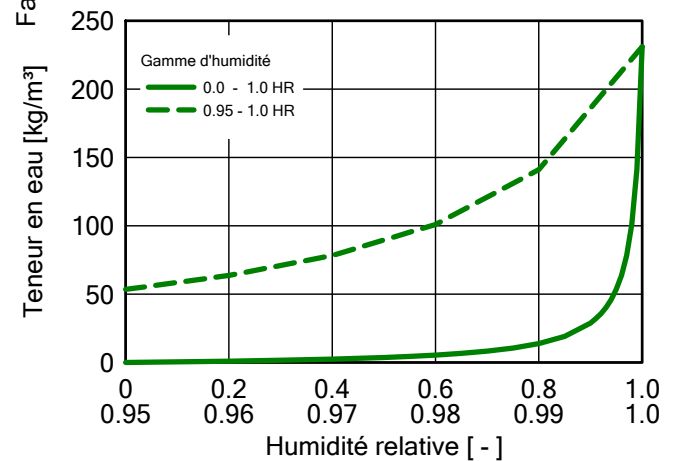
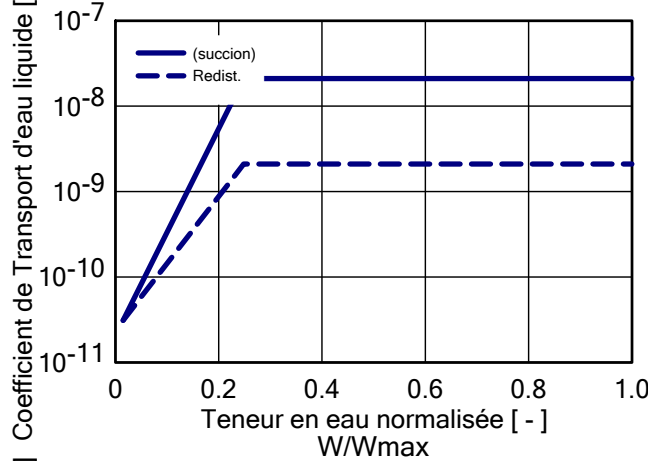
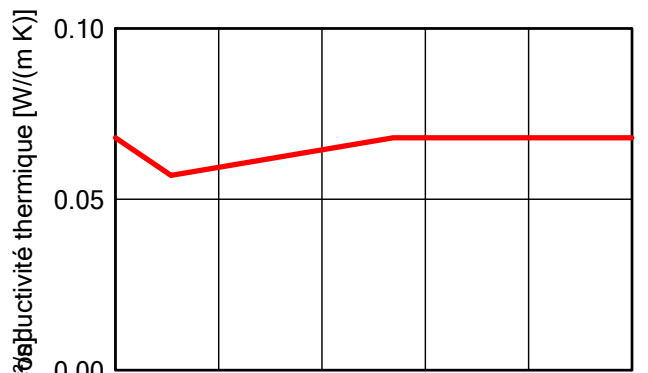
Matériaux: Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	130
Porosité	[m ³ /m ³]	0.001
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2300
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	2.3
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	100
Correction de la cond. th. selon la température	[W/(m K ²)]	0.0002



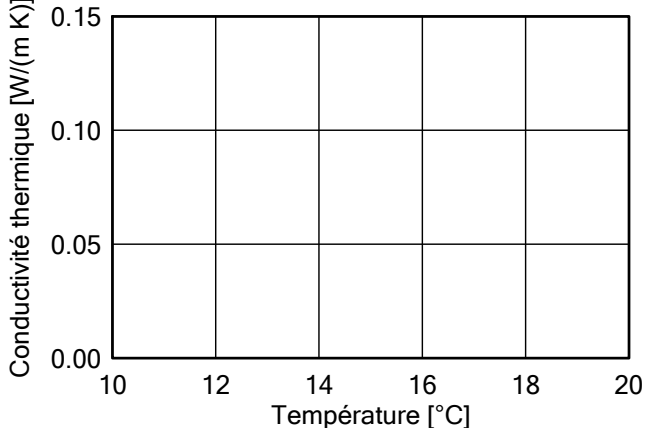
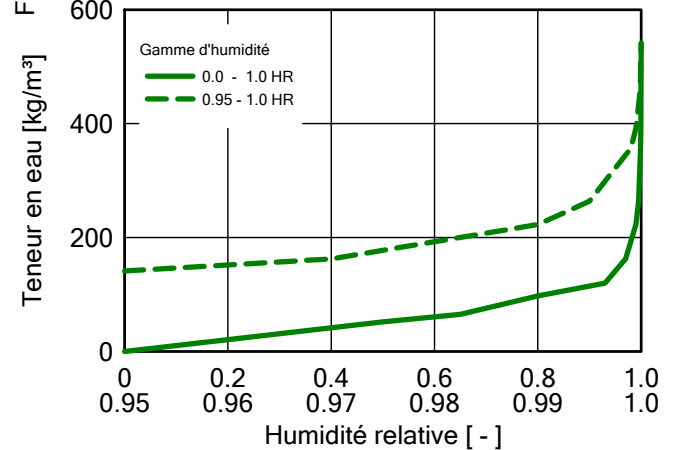
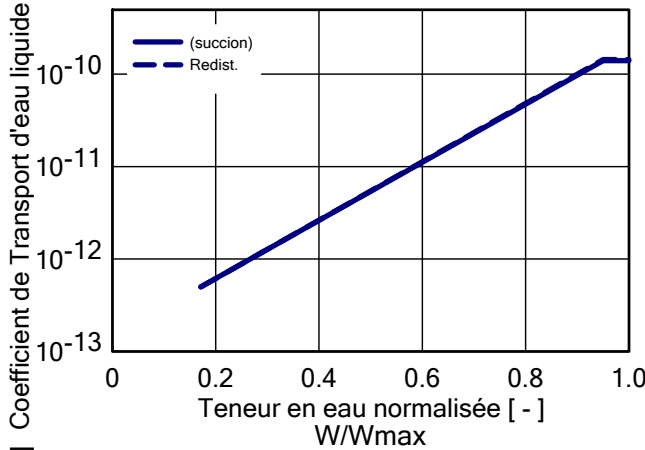
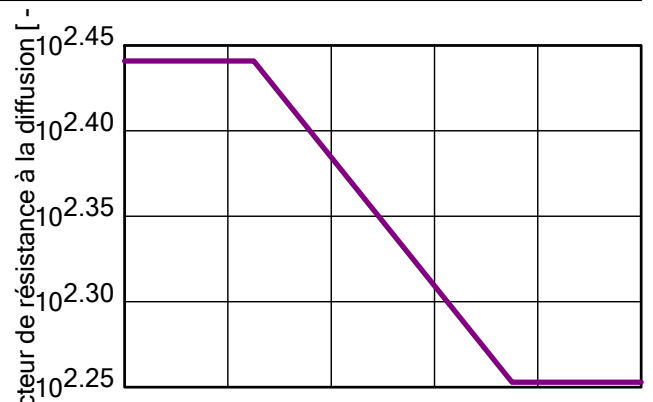
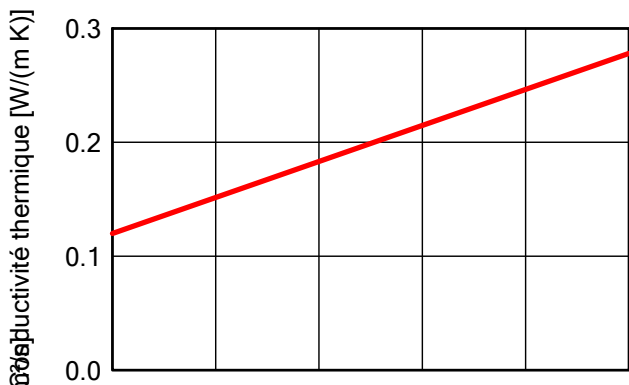
Matériaux: Paille - ref. Aproaille Custom / sens perpendiculaire

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	100
Porosité	[m ³ /m ³]	0.93
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	2426
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.068
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	1.34
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m ³]	13.76
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m ³]	231
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.017
Conductivité Thermique - Valeur Utile	[W/(m K)]	0.068



Matériaux: AiF OSB 4

Propriétés	Unité	Valeur
Densité volumique	[kg/m ³]	650
Porosité	[m ³ /m ³]	0.57
Chaleur spécifique, état sec	[J/(kg K)]	1400
Conductivité thermique sèche, 10°C	[W/(m K)]	0.12
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur	[-]	276
Teneur en eau de référence (à 80% HR)	[kg/m ³]	97.5
Teneur en eau libre à saturation capillaire	[kg/m ³]	541.5
Coefficient d'absorption d'eau	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.00333
Supplément pour la Conductivité thermique dépendante de	[%/M.-%]	1.5



Conditions aux limites

Extérieur (côté gauche)

Localisation: Bordeaux; Bordeaux-Mérignac, 2008 (Météo-France)
 Décalage de la température: 0.0 °C
 Orientation / Inclinaison: Nord / 0 °
 refroidissement par rayonnement nocturne: Non

Intérieur (côté droit)

Climat intérieur: EN 15026
 Charge en Humidité Moyenne

Coefficients de transferts surfaciques

Extérieur (côté gauche)

Nom	Description	Unité	Valeur
Résistance thermique - inclut le rayt. grandes longueurs d'ondes	Toiture	[(m ² K)/W]	0.0526 Oui
Épaisseur d'air équivalente Sd	Sans revêtement	[m]	----
Absorptivité (Courtes Longueurs d'Ondes)	Sans absorption/émission	[-]	----
Émissivité (Grandes Longueurs d'Ondes)	Sans absorption/émission	[-]	----
Fraction de la pluie restant à la surface	Sans absorption	[-]	----
Bilan explicite du rayonnement			Non

Intérieur (côté droit)

Nom	Description	Unité	Valeur
Résistance thermique	Toiture	[(m ² K)/W]	0.125
Épaisseur d'air équivalente Sd	Sans revêtement	[m]	----

Résultats pour le dernier calcul

Statut du calcul

Date et heure du calcul	12/01/2019 14:23:23
Durée du calcul	2 min,12 sec.
Début/fin de calcul	01/10/2019 / 01/10/2022
Nb. d'erreurs de convergence	0

Vérification de la qualité numérique

Intégrale des flux, côté gauche (kl, dl)	[kg/m ²]	0,0 -6,13
Intégrale des flux, côté droit (kr, dr)	[kg/m ²]	-0,02 -0,37
Balance 1	[kg/m ²]	-5,75
Balance 2	[kg/m ²]	-5,75

Teneur en eau [kg/m³]

	Début	Fin	Min.	Max.
Teneur en eau totale	8,91	3,16	2,85	8,91

Teneur en eau [kg/m³]

Couche/Matériaux	Début	Fin	Min.	Max.
Pare vent / pare pluie (sd=0,1m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Paille - ref. Apropaille Custom / sens	20,00	5,55	4,78	20,00
OSB 3 (oriented strand board)	95,00	64,50	51,70	95,00

Intégrale des flux par rapport au temps

Flux de chaleur, côté gauche	[MJ/m ²]	-139,42
Flux de chaleur, côté droit	[MJ/m ²]	-153,78
Flux d'humidité, côté gauche	[kg/m ²]	-6,13
Flux d'humidité, côté droit	[kg/m ²]	-0,38

Sources hygrothermiques

Sources de chaleur	[MJ/m ²]	0,0
Sources d'humidité	[kg/m ²]	0,0
Sources d'humidité non injectée (limitation de la source)	[kg/m ²]	0,0