

N° affaire : 24-029

Date : 27/05/2024

Réf. : DEB/R2EB-2024-087-NP/EH

N° SAP : 70095746

Recherche par simulation hygrothermique des risques de condensation et de développement fongique complémentaire au rapport DEB/R2EB-2023-179 – RG/NP/EH

Version 1

Demandeur de l'étude :

IELO SA
2 Lieu-dit La Forêt
86210 BONNEUIL-MATOURS

Auteur¹

Approbateur

N. PLACE

G. GARNIER



1. Tél. : 04.56.14.72.59

La reproduction de ce rapport d'étude n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral, sauf accord particulier du CSTB.

Ce rapport d'étude comporte **94** pages dont **79** pages d'annexes.

CONTENU

1. OBJECTIF DE L'ETUDE	3
2. PRESENTATION DES MOYENS DE CALCULS	3
3. HYPOTHESES	3
4. DONNEES NECESSAIRES AUX MODELES	4
5. CAHIER DES CHARGES	4
5.1. Présentation de la paroi objet de la simulation	4
5.2. Caractéristiques des produits composant les parois	5
5.3. Ambiances extérieures et intérieures	6
6. SYNTHESE DES CONFIGURATIONS CALCULEES	6
7. RESULTATS DES CALCULS	8
8. CONCLUSION	11
ANNEXE 1 : REGLES D'INTERPRETATION DES RESULTATS	16
ANNEXE 2 : PRESENTATION DES CONDITIONS AUX LIMITES EXTERIEURES ET INTERIEURES	18
ANNEXE 3 : RESULTATS DES SIMULATIONS	23

RAPPORT D'EXPERTISE

1. OBJECTIF DE L'ETUDE

L'étude consiste à effectuer des calculs de transferts couplés chaleur-humidité complémentaire à l'étude DEB/R2EB-2023-179 – RG/NP/EH afin d'étudier l'impact de différentes épaisseurs de paille hachée soufflée.

Les conditions d'humidité et de température ainsi que l'évaluation des transferts de vapeur d'eau et d'eau liquide des différents matériaux sont obtenues à partir de calculs effectués avec le logiciel WUFI® (*Wärme Und Feuchte Instationär*) édité par l'IBP Fraunhofer dans sa déclinaison monodimensionnelle (WUFI® Pro) ou bidimensionnelle (WUFI® 2D).

Les différents paramètres d'entrée sont préalablement définis avec le demandeur lors de l'offre commerciale. Un avis critique sur les résultats des simulations est formulé en fin de rapport.

2. PRESENTATION DES MOYENS DE CALCULS

A partir des paramètres d'entrée fournis par le client, le logiciel WUFI® permet de déterminer les champs de température, d'humidité relative et de teneur en eau, en tous points des composants de la paroi.

Les simulations seront réalisées sur une période de 10 ans pour un local situé à Nancy (plaine continentale sévère, H1) et La Chaux-de-Fonds (climat de montagne, jusqu'à 1100 m).

3. HYPOTHESES

Les hypothèses prises en compte dans le cadre de cette étude émanent du [guide technique SimHuBat – Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiments](#). Les hypothèses sont définies dans le rapport DEB/R2EB-2023-179 – RG/NP/EH et détaillées à nouveau ci-après :

- Les modélisations seront réalisées en monodimensionnel (1D) représentant la partie courante de la paroi ;
- Les effets du rayonnement courtes longueurs d'onde (solaire) sont pris en compte sans ombrage. On considère un coefficient d'absorption solaire $\alpha_e=0,21$ (cas défavorable) ;
- Pour les cas disposant d'un bardage ventilé, un taux de renouvellement de 20 vol.h⁻¹ est appliqué à la lame d'air.

Les hypothèses complémentaires au guide sont les suivantes :

- Les propriétés hygrothermiques du panneau OSB « fermé » provient de l'étude CODIFAB sur le Village des Athlètes des Jeux Olympiques et Paralympiques 2024 ([lien des guides](#)) ;

RAPPORT D'EXPERTISE

- Les propriétés du panneau OSB « ouvert » sont majoritairement issue de la certification CTB n° 527 de l'Institut Technologie FCBA (panneau très perméable à la vapeur d'eau) ;
- Les propriétés de l'isolant en paille hachée ont été communiquées par le demandeur. L'isotherme de sorption réalisé par DVS n'était pas l'objet d'un rapport indépendant mais de mesures internes IELO. La capillarité (coef. A_w selon NF EN ISO 15148) a été prise comme générique ;
- La surisolation intérieure (si considérée, voir Tableau 2) est prise en laine minérale sans papier kraft, représentant la configuration la plus défavorable pour ce type d'assemblage (hors biosourcés).

4. DONNEES NECESSAIRES AUX MODELES

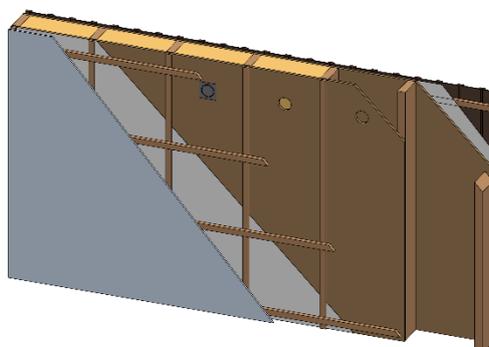
Les paramètres d'entrée nécessaires pour chaque constituant sont les suivants :

- La résistance à la diffusion de vapeur d'eau, notée $\mu = Sd/e[-]$;
- L'isotherme de sorption (variation de la teneur en eau d'un produit en équilibre dans une ambiance à différents taux d'humidité), tel que $w [kg.m^{-3}] = f(HR)$;
- La conductivité thermique, notée $\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$;
- La chaleur spécifique, notée $Cp [J.kg^{-1}.K^{-1}]$;
- La porosité, notée $\varepsilon [-]$;
- La masse volumique, notée $\rho [kg.m^{-3}]$.

5. CAHIER DES CHARGES

5.1. Présentation de la paroi objet de la simulation

Figure 1 : Schéma du procédé (exemple d'insufflation derrière un parement)



RAPPORT D'EXPERTISE

5.2. Caractéristiques des produits composant les parois

La paroi définie ci-avant comportent les produits suivants (partie modélisée uniquement, de l'interface extérieure vers l'interface intérieure) :

COB bardage ventilé avec panneau bois côté intérieur & extérieur :

- Bardage bois tendre de 20 mm ;
- Lamé d'air ventilée de 20 mm ;
- Panneau pare-pluie rigide en fibre de bois de 20 mm avec $S_d = 3.6$ m ;
- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Panneau OSB 3 de 12 mm ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 en plaine et 3/4 – 1/4 en montagne).

La description exacte des parois est précisée en Tableau 2.

Les caractéristiques générales des constituants ont été validées par le demandeur lors de l'offre commerciale. Le tableau ci-après reprend les caractéristiques générales de ces matériaux :

Tableau 1 : Caractéristiques des constituants de la paroi

Matériau	Masse volumique	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique sèche	Facteur de rés. à la diff. de vap. d'eau μ OU S_d sec
	[kg/m ³]	[-]	[j/(kg.K)]	[W/(m.K)]	[-] OU [m]
Pare-pluie souple	130	0.001	2300	2.3	$S_d = 0.18$ m
Paille hachée	105	0.9	1512	0.045 ¹ (23°C / 50%)	$\mu = 2.8$
Panneau OSB 3 « ouvert »	650	0.6	1400	0.13	$\mu = 86$
Panneau OSB 3 « fermé »	630	0.72	1600	0.13	$\mu = 650$
Membrane pare-vapeur 18 m	130	0.001	2300	2.3	$S_d = 18$ m
Membrane pare-vapeur 57 m	130	0.001	2300	2.3	$S_d = 57$ m
Membrane pare-vapeur 90 m	130	0.001	2300	2.3	$S_d = 90$ m
Membrane hygrovariable	130	0.001	2300	2.3	$S_d = f(HR)$ de 34 à 0.3 m
Brique pleine	1745	0.33	1000	0.7	$\mu = 13$
Laine minérale (surisolation int.)	30	0.95	850	0.035	$\mu = 1.5$

 Valeur générique
 Valeur issue du certificat CTB N° 527

 Valeur provenant des études SOLIDEO (JOP)
 Valeur fournie par le demandeur

¹ La conductivité thermique utilisée dans la modélisation correspond à l'évolution de cette dernière en fonction de la teneur en eau (cf. rapports RE0722FB-001, RE0722FB-002 & RE0722FB-003)

5.3. Ambiances extérieures et intérieures

Les conditions aux limites des températures et humidités des différentes simulations correspondent à une zone climatique de plaine continentale (Nancy) et une zone de climat de montagne (La Chaux-de-Fonds).

Le climat de Nancy est froid et humide, représentant des conditions sévères pour un climat de plaine.

Le climat de La Chaux-de-Fonds présente un climat montagnard sévère, allant jusqu'à 1100 m.

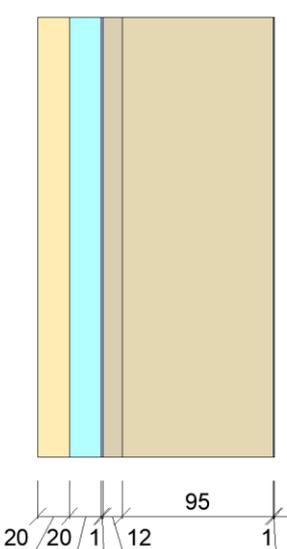
Les règles d'interprétation des résultats obtenus sont précisées en Annexe 1.

La méthode de détermination des ambiances intérieures ainsi que les figures montrant l'évolution des températures et humidités intérieures et extérieures au cours d'une année sont présentées dans l'Annexe 2 à ce rapport.

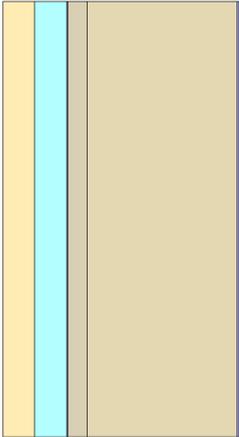
6. SYNTHÈSE DES CONFIGURATIONS CALCULÉES

Le tableau ci-après présente la synthèse des différentes configurations simulées.

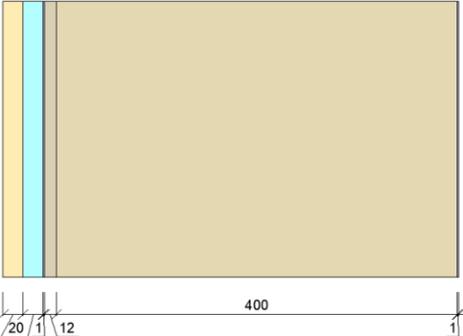
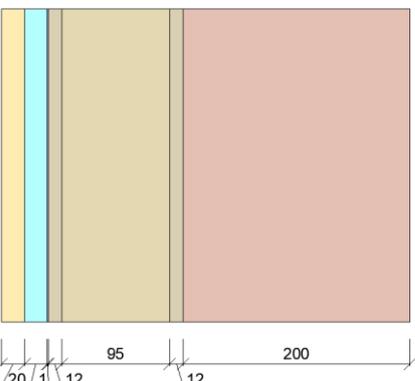
Tableau 2 : Synthèse des cas de figure calculés

N°	Schéma de la paroi	Climat intérieur, extérieur & orientation	Spécificité & dimension
1	<p style="text-align: center;"><u>De l'extérieur vers l'intérieur</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> ● Bardage bois ● Lame d'air ventilée ● Pare-pluie souple ● Panneau OSB "fermé" ● Isolant paille hachée ● Pare-vapeur Sd=18m 	<p>Hygrométrie moyenne</p> <p>Nancy Orientation N</p>	<p>Reprise du cas 6*</p> <p>Épaisseur minimale d'isolant</p>

RAPPORT D'EXPERTISE

N°	Schéma de la paroi	Climat intérieur, extérieur & orientation	Spécificité & dimension
2	<p style="text-align: center;"><u>De l'extérieur vers l'intérieur</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> ● Bardage bois ● Lame d'air ventilée ● Pare-pluie souple ● Panneau OSB "fermé" ● Isolant paille hachée ● Pare-vapeur Sd=18m <p style="text-align: center;">400</p> <p style="text-align: center;">20 / 20 / 1 / 12 / 1</p>	<p>Hygrométrie moyenne</p> <p>Nancy Orientation N</p>	<p>Reprise du cas 6*</p> <p>Epaisseur maximale d'isolant</p>
3	<p style="text-align: center;"><i>Cas le plus défavorable des cas 1 à 2</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Voir colonne « n° » du tableau 3</i></p>	<p>Hygrométrie moyenne</p> <p>Nancy Orientation N</p>	<p>Membrane Sd = 57 m</p>
4	<p style="text-align: center;"><i>Cas le plus défavorable des cas 1 à 2</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Voir colonne « n° » du tableau 3</i></p>	<p>Hygrométrie moyenne</p> <p>Montagne Orientation N</p>	<p>Membrane Sd = 90 m</p>
5	<p style="text-align: center;"><i>Cas le plus défavorable des cas 1 à 4</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Voir colonne « n° » du tableau 3</i></p>	<p>Le plus défavorable</p>	<p>Surisolation intérieure laine minérale</p>
6	<p style="text-align: center;"><u>De l'extérieur vers l'intérieur</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> ● Bardage bois ● Lame d'air ventilée ● Pare-pluie souple ● Panneau OSB "fermé" ● Isolant paille hachée ● Pare-vapeur hygrovariable <p style="text-align: center;">95</p> <p style="text-align: center;">20 / 20 / 1 / 12 / 1</p>	<p>Hygrométrie moyenne</p> <p>Nancy Orientation N</p>	<p>Reprise du cas 15*</p> <p>Epaisseur minimale d'isolant</p>

RAPPORT D'EXPERTISE

N°	Schéma de la paroi	Climat intérieur, extérieur & orientation	Spécificité & dimension
7	<p style="text-align: right;">De l'extérieur vers l'intérieur</p>  <ul style="list-style-type: none"> ● Bardage bois ● lame d'air ventilée ● Pare-pluie souple ● Panneau OSB "fermé" ● Isolant paille hachée ● Pare-vapeur hygrovariable 	<p>Hygrométrie moyenne</p> <p>Nancy Orientation N</p>	<p>Reprise du cas 15*</p> <p>Epaisseur maximale d'isolant</p>
8	<p style="text-align: center;"><i>Cas le plus défavorable des cas 6 et 7</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Voir colonne n° du tableau 3</i></p>	<p>Hygrométrie moyenne</p> <p>Nancy Orientation N</p>	<p>Le plus défavorable des cas 6 et 7*</p> <p>Surisolation intérieure laine minérale</p>
9	<p style="text-align: right;">De l'extérieur vers l'intérieur</p>  <ul style="list-style-type: none"> ● Bardage bois ● lame d'air ventilée ● Pare-pluie souple ● Panneau OSB "fermé" ● Isolant paille hachée ● Panneau OSB "ouvert" ● Brique 	<p>Hygrométrie moyenne</p> <p>Nancy Orientation N</p>	<p>Reprise du cas 24*</p> <p>Ajout d'un panneau OSB contre la structure</p>

* cas de l'ancienne étude – voir rapport DEB/R2EB-2023-179 – RG/NP/EH

7. RESULTATS DES CALCULS

Les résultats des simulations sont présentés sous forme graphique en Annexe 3, page 23.

Le tableau ci-après regroupe l'ensemble des résultats obtenus pour la teneur en eau et l'humidité relative de la paroi globale, mais aussi des constituants principaux de cette paroi lors de la dernière année de calcul.

La colonne « tendance » indique l'évolution de la teneur en eau entre les deux dernières années de modélisation. Cette dernière peut être en hausse, en baisse ou stable.

RAPPORT D'EXPERTISE

Tableau 3 : Synthèse des résultats des simulations suivant les cas de figure la dernière année de calcul

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m ⁻³]	[%.-M]	[%]	[-]
1	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	4.2	-	-	Stable
	Panneau OSB	90.4	14.3	76.6	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	87.2	13.8	74.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	95.8	15.2	79.2	Stable
	Paille	11.8	11.2	58.8	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	21.6	20.6	83.5	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	11.4	10.8	57.4	Stable
2	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	8.2	-	-	Stable
	Panneau OSB	99.8	15.8	80.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	94.6	15	79.7	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	106.9	17	82.7	Stable
	Paille	12.1	11.5	60	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	23.9	22.8	86.3	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	10.4	9.9	53.6	Stable
3 (reprise cas 2)	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	8.1	-	-	Stable
	Panneau OSB	97.9	15.5	80.4	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	94.1	14.9	79.4	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	103.4	16.5	81.9	Stable
	Paille	11.7	11.1	58.6	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	23	21.9	85.5	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	10	9.5	52.3	Stable
4 (reprise cas 2)	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	7.9	-	-	Stable
	Panneau OSB	101.4	16.1	80.7	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	91.8	14.6	77.9	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	111	17.6	83.6	Stable
	Paille	11.4	10.8	57.3	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	26.6	25.4 4 semaines	88.6	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	9	8.6	47.9	Stable

RAPPORT D'EXPERTISE

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m ⁻³]	[%.-M]	[%]	[-]
5 (reprise cas 4)	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	8.7	-	-	Stable
	Panneau OSB	99.5	15.8	80.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	92.1	14.6	78.1	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	107.4	17.1	82.8	Stable
	Paille	12.5	11.9	61.6	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	24.7	23.5 traces	87	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	10.2	9.8	53.2	Stable
6	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	4.4	-	-	Stable
	Panneau OSB	96.5	15.3	79	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	89.5	14.2	76.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	105.5	16.7	82.2	Stable
	Paille	12.7	12.1	62.2	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	25.2	24 traces	87.4	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	12.2	11.6	60.3	Stable
7	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	8.6	-	-	Stable
	Panneau OSB	104.1	16.5	81.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	95.4	15.2	80.1	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	114.1	18.1	84.2	Stable
	Paille	12.9	12.3	63.2	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	26.4	25.1 3 semaines	88.4	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	11.1	10.6	56.3	Stable
8 (reprise cas 7)	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	10.2	-	-	Stable
	Panneau OSB	106.9	17	82.6	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	98.6	15.7	80.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	117.5	18.7	85	Stable
	Paille	16	15.2	72.5	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	26.6	25.3 6 semaines	88.6	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	13.7	13.1	66	Stable
9	Paroi globale (en kg.m ⁻²)	6.1	-	-	Stable

RAPPORT D'EXPERTISE

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m ⁻³]	[%.-M]	[%]	[-]
	Panneau OSB ext	105.9	16.8	81.6	Stable
	Panneau OSB ext. à l'interface avec le pare-pluie	91.3	14.5	77.5	Stable
	Panneau OSB ext. à l'interface avec la paille	121.4	19.3	85.9	Stable
	Paille	14.1	13.5	66.9	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB ext.	30.5	29.1 7.5 semaines	91.8	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB int.	12.8	12.2	62.6	Stable

8. CONCLUSION

Pour rappel, cette étude fait suite au rapport DEB/R2EB-2023-179 – RG/NP/EH et au passage du dossier en comité d'ATEX, ayant alors entraîné des remarques diverses sur le comportement des assemblages avec des variations de constituants. Cette étude a pour but de répondre à ces remarques.

Les variations apportées se concentrent principalement sur l'épaisseur de mise en œuvre de l'isolant en paille hachée. Les cas pertinents les plus défavorable de la précédente étude ont été utilisés comme base pour ces variations.

Cas 1 & 2 – COB avec contreventement extérieur « fermé » et pare-vapeur intérieur Sd = 18 m.

Les deux premiers cas se concentrent sur un cas classique correspondant au cas 6 de l'étude précédente.

Dans les deux cas, les résultats montrent des valeurs en dessous des limites admissibles pour l'apparition d'eau liquide (HR < 98 % en tout point de la paroi) avec un maximal relevé dans le cas 2 à 86.3 % dans la paille à l'interface avec le panneau OSB.

La teneur en eau reste elle aussi en dessous des limites de 20 % de teneur en eau en masse (éléments structurels) ou 23 %.-M (éléments non structurels). Le maximum relevé est de 22.8 %.-M aussi dans la paille à l'interface avec le panneau OSB du cas 2.

De ce fait, ces configurations sont viables au regard des indicateurs.

Cas 3 & 4 – COB avec contreventement extérieur « fermé » et variations membrane / climat.

Afin de conserver une logique défavorable permettant d'englober le plus de cas possible, ces deux cas repartent du calcul le plus défavorable entre les deux premiers ci-avant. Le cas choisi est donc le 2, avec 400 mm d'isolant en paille hachée.

RAPPORT D'EXPERTISE

Le cas 3 reste en climat de plaine continentale (Nancy, zone très froide) mais adopte une membrane $S_d = 57$ m. Il est possible d'observer que la mise en place d'une membrane plus fermée baisse légèrement la teneur en eau en tout point de la paroi, abaissant par exemple la teneur en eau maximale de 1 %.

Le cas 4 passe en climat de montagne avec cette fois-ci une membrane $S_d = 90$ m. Malgré la hausse de la valeur S_d de la membrane qui semble généralement favorable à la paroi, on observe une augmentation de la teneur en eau dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB jusqu'à 25.4 % -M sur 4 semaines en continu. Cette augmentation est notamment entraînée par une température plus faible à cette interface. Néanmoins, la durée de dépassement reste inférieure à 8 semaines la dernière année.

De ce fait, ces configurations sont viables au regard des indicateurs.

Cas 5 – COB avec contreventement extérieur « fermé » en montagne et surisolation intérieure.

Le cas 5 reprend les bases du cas 4 (plus défavorable entre les cas 1 à 4), pour lequel une surisolation intérieure de 100 mm de laine de verre Th35 sont ajoutés (respectant la règle du 3/4 - 1/4).

Dans l'ensemble, l'ajout de la surisolation intérieure ne modifie pas la dynamique des transferts hygrothermiques et la teneur en eau en tout point de la paroi reste proche du cas 4. La valeur maximale relevée se situe encore dans la paille à l'interface avec le panneau OSB mais diminue de 2 % et la durée de dépassement ne représente alors que quelques heures.

De ce fait, cette configuration est viable au regard des indicateurs.

Cas 6 & 7 – COB avec contreventement extérieur « fermé » et membrane hygrovariable type *Intello*.

Ces deux cas sont semblables aux cas 1 et 2, cependant la membrane pare-vapeur à S_d fixe est remplacée par une membrane hygrovariable avec $S_d = f(HR)$ correspondant à la membrane *Intello* de marque *Pro Clima* (nb : les valeurs de la variation de la courbe de S_d proviennent de la BdD WUFI).

En comparant les cas 6 et 7 aux cas 1 et 2, il est possible de définir l'impact de cette membrane hygrovariable sur la paroi. En effet, la teneur en eau globalement plus élevée semble entraînée par une résistance à la diffusion de vapeur d'eau plus faible, avec un S_d oscillant de 10 m à 2 m en fonction du climat intérieur.

Pour ces deux cas modélisés, les critères définis en annexe 1 reste en dessous des valeurs limite, rendant alors ces parois viables au regard des indicateurs.

De ce fait, cette configuration est viable au regard des indicateurs.

RAPPORT D'EXPERTISE

Cas 8 – COB avec contreventement extérieur « fermé » en plaine et surisolation intérieure.

Le cas 8 reprend le cas 7 avec la mise en place de 160 mm d'isolation complémentaire intérieure respectant la règle des 2/3 – 1/3.

L'ajout de cet isolant entraîne une légère augmentation de la teneur en eau globale dans la paroi, notamment au niveau de l'interface sensible au niveau de la paille, à l'interface avec le panneau OSB extérieur.

La durée de dépassement de la teneur en eau en masse reste acceptable bien que cette dernière passe alors à 6 semaines au lieu de 3 semaines.

De ce fait, cette configuration est viable au regard des indicateurs.

Cas 9 – Caisson bois avec panneau OSB ext. « fermé » disposé sur une paroi en brique

Cette dernière configuration vise à analyser le risque hygrothermique de la mise en place d'un caisson fermé sur la face extérieure d'une paroi maçonnée.

Quelques itérations ont été réalisées afin de trouver le cas le plus défavorable à présenter dans ce rapport, en concentrant l'analyse sur l'interface la plus critique tout au long de l'étude, à savoir la zone en contact entre le panneau OSB extérieur et l'isolant en paille insufflée. Le Tableau 4 synthétise ces résultats.

Tableau 4 : résumé des variantes complémentaires

Structure / spécificités	Epaisseur d'isolant [mm]	Zone	Wc max [%]	Temps de dépassement [h / s]
Béton	95	OSB inter paille	17	0
		Paille inter OSB	24.9	0
	400	OSB inter paille	18.7	0
		Paille inter OSB	25.4	815 / 4.9
Brique	95	OSB inter paille	19.3	0
		Paille inter OSB	29.1	1252 / 7.5
	400	OSB inter paille	19.1	0
		Paille inter OSB	26	1252 / 7.5
Brique Panneaux OSB int. et ext. « ouverts »	95	OSB inter paille	16.6	0
		Paille inter OSB	25.6	189 / 1.1
Brique Panneaux OSB int. et ext. « fermés »	95	OSB inter paille	17	0
		Paille inter OSB	24.7	0
Brique Sans panneau OSB côté int. Panneau OSB ext « fermé »	95	OSB inter paille	19.6	0
		Paille inter OSB	28.8	1285 / 7.6

RAPPORT D'EXPERTISE

Les résultats présentés dans le tableau 3 concerne la variante la plus défavorable, à savoir une paroi en brique de 200 mm (perméable, forte capacité de sorption d'eau et capillaire) sur laquelle est disposée en ITE un caisson préfabriqué constitué d'un panneau OSB 3 de 12 mm en contact avec la brique dit « ouvert » (avec une faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau), 95 mm d'isolant en paille insufflée, un panneau OSB 3 de 12 mm dit « fermé » (avec une forte résistance à la diffusion de vapeur d'eau), un pare-pluie HPV le tout sous un bardage ventilé.

Dans ce cas précis, considéré comme le plus défavorable en se basant notamment sur le tableau 4, on observe une valeur maximale de 29 % -M dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB pendant 7.5 semaines la dernière année de calcul. Cette valeur, très élevée et proche de la limite de 8 semaines et de 30 % -M, reste cependant acceptable au regard des règles d'interprétation des résultats.

Il est à noter que cette configuration dispose de valeurs proches à la configuration sans panneau OSB intérieur. Ainsi, les conclusions du cas cité ci-avant sont aussi extrapolable à un cas ne disposant pas d'un panneau OSB en contact contre la paroi.

De ce fait, cette configuration reste viable au regard des indicateurs, mais proche de la limite.

De manière générale, l'ensemble des calculs de cette étude ne dépassent pas les règles définies dans le guide Simhubat et reprise en Annexe 1. Cependant, les valeurs obtenues dans le cas 9 restent très élevées dans cette configuration voulue la plus défavorable possible. Une mise en œuvre soignée permettra alors de limiter le risque hygrothermique.

FIN DE RAPPORT

ANNEXES

ANNEXE 1 : REGLES D'INTERPRETATION DES RESULTATS

La signification pratique des résultats peut être interprétée suivant différentes méthodes :

- En comparant les conditions hygrothermiques obtenues avec les limites spécifiées ;
- En contrôlant le risque d'accumulation d'humidité. L'évolution de la teneur totale en eau dans la construction sera évaluée en comparant la valeur à l'initiale à celle après un cycle ;
- En évaluant la tolérance à l'humidité de la construction (potentiel de séchage) ;
- En traitant les résultats transitoires à l'aide d'un modèle de post-traitement (e.g. développement des moisissures ou des algues, la pourriture, la corrosion, etc.).

Les risques sont évalués à partir des teneurs en eau et humidités relatives des produits et de leurs évolutions au cours de la dernière année de simulation.

Le premier élément à vérifier est la teneur en eau de la paroi dans sa globalité. Si celle-ci augmente significativement d'une année sur l'autre, cela signifie que les transferts hygrothermiques dans la paroi ne sont pas stables. La teneur en eau de la paroi pourrait augmenter au-delà de la durée de la simulation et conduire à des condensations importantes.

Une paroi, pour être jugée satisfaisante, ne pourra pas contenir des éléments dont l'humidité relative est supérieure à 98 %, même en des endroits particuliers de la paroi. En effet les tolérances du logiciel font qu'au-delà de 98 %, le risque de condensation peut être considéré comme très probable.

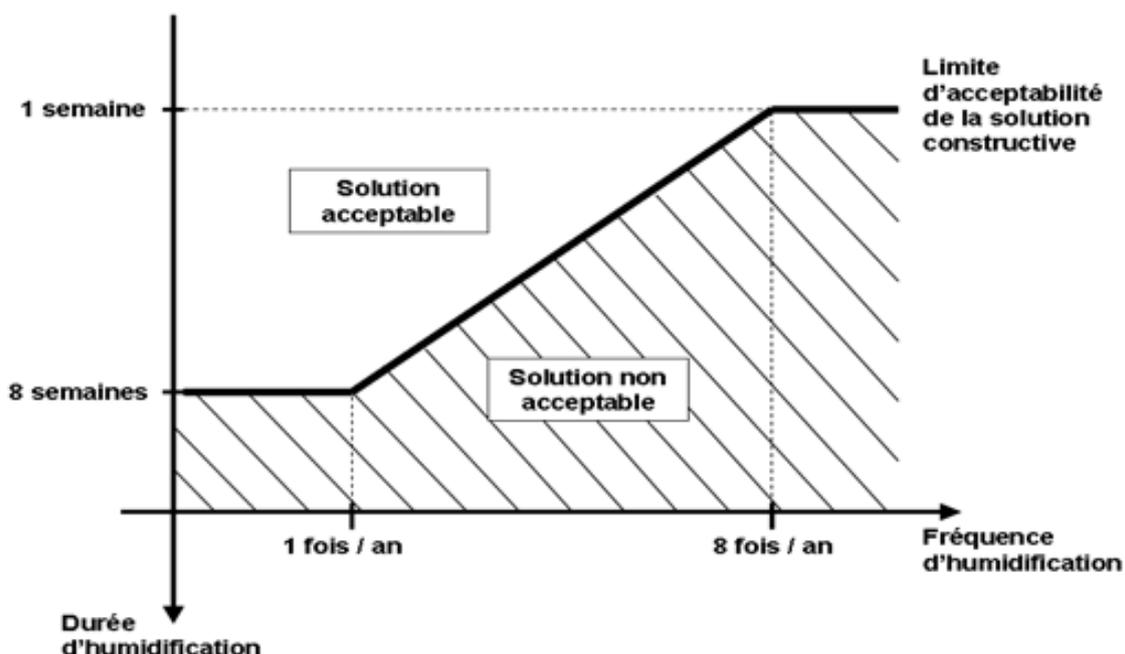
Tous les éléments en bois ou à base de bois intervenant dans la stabilité de l'ouvrage (panneaux de contreventement, montants et traverses d'ossature, etc.) sont dimensionnés en classe de service 2 (pour limiter le fluage). Les teneurs en eau en masse en tout point de ces éléments ne doivent pas être supérieures à 20 % pendant plus de 8 semaines par an, en ne comptabilisant que les périodes supérieures à une semaine.

De même, la teneur en eau d'un élément de la paroi contenant des produits biosourcés n'intervenant pas dans la stabilité de l'ouvrage (tasseaux, isolants, panneaux à usage non structuraux, etc.) ne pourra être qu'occasionnellement (moins de 8 semaines par an) supérieure à 23 % en masse. Cette limite de 23 % est basée sur des travaux en laboratoire et sur des expériences reconnues et réussies, prenant en compte les diverses conditions de germination des spores. Il est à noter que la durée de 8 semaines au-delà de 23 % est défavorable, même si elle est atteinte de manière discontinue. Les périodes au-delà de 23 % inférieures à une semaine ne seront pas comptabilisées, n'étant pas suffisamment longues pour provoquer le développement fongique.

Le graphique ci-après montre l'acceptabilité d'une solution constructive en fonction des éléments exposés ci-avant.

Figure 2 : Représentation des limites d'humidification des matériaux

Périodes d'humidification supérieures à 20% et à 23%



Une autre propriété influant le comportement du matériau biosourcé à l'humidité est sa capacité à pouvoir contenir à la fois de l'eau libre et/ou de l'eau liée.

L'eau est dite liée ou hygroscopique quand elle est « retenue » chimiquement (liaisons hydrogènes) par les fibres de bois. Les molécules d'eau sont alors fixées dans le matériau lui-même.

L'eau libre ou capillaire, donc liquide, apparaît dans le bois lorsque son taux d'humidité (en pourcentage en masse) dépasse le point de saturation des fibres. Pour les principales essences résineuses utilisées en structure, le point de saturation des fibres est atteint lorsque l'humidité du bois dépasse 30 % en masse.

Les cas de calcul où l'humidité du bois ou des matériaux à base de bois (panneaux, isolants) dépasse 30 % sera donc également un critère rédhibitoire, l'eau liquide présente dans une paroi fermée étant très difficile à évacuer.

ANNEXE 2 : PRESENTATION DES CONDITIONS AUX LIMITES EXTERIEURES ET INTERIEURES

A2.1 Ambiances extérieures

Les conditions aux limites des températures et humidités des différentes simulations correspondent à une zone climatique de plaine continentale (Nancy) et une zone de climat de montagne (La Chaux-de-Fonds). Les deux figures suivantes présentent l'évolution des températures et humidités en fonction du temps pour ces climats.

Figure 3 : Variation de la température et de l'humidité relative au cours d'une année à Nancy

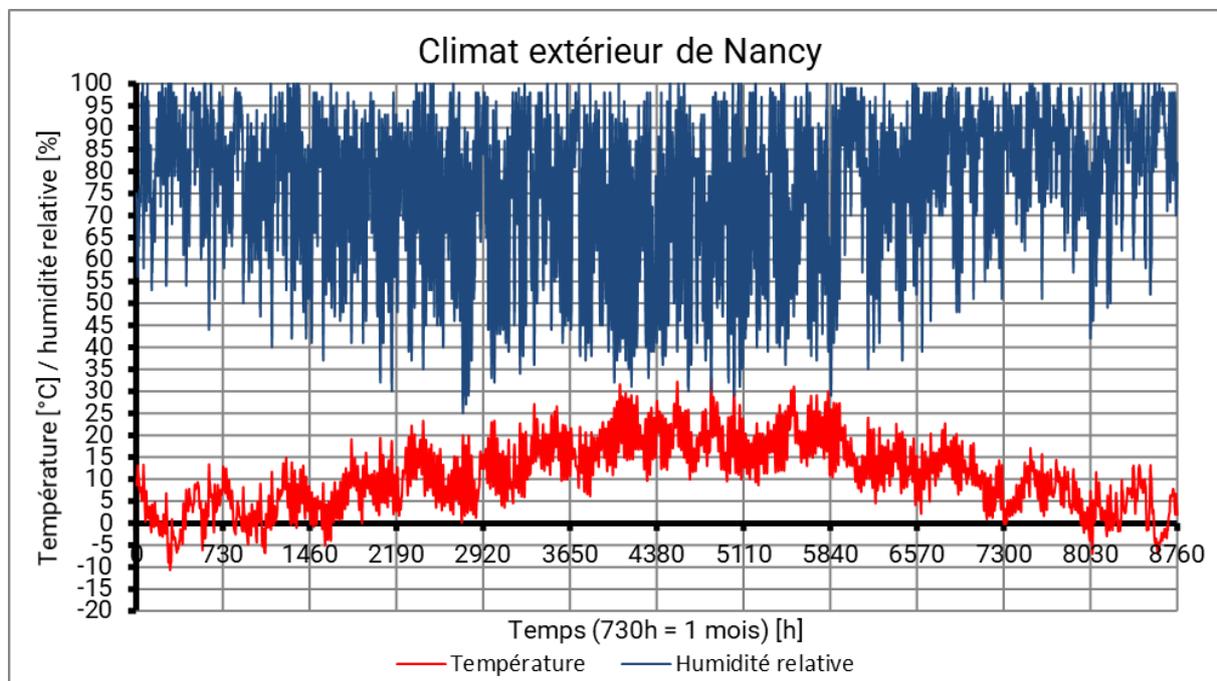
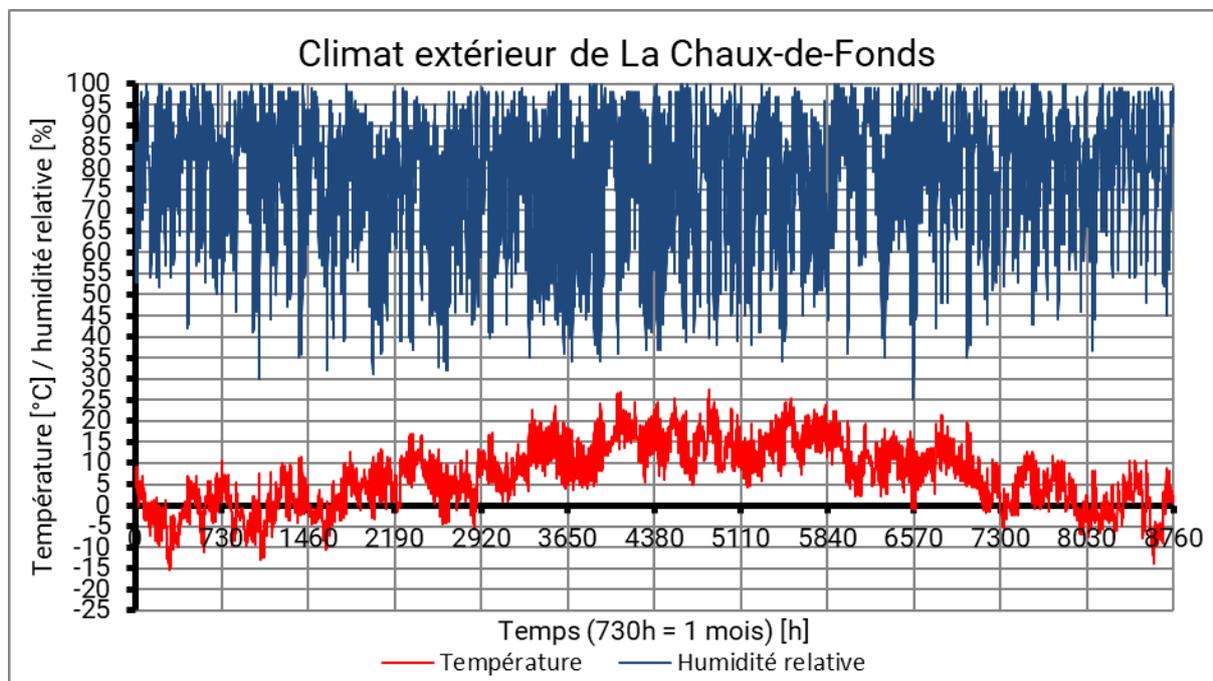


Figure 4 : Variation de la température et de l'humidité relative au cours d'une année à La Chaux-de-Fonds



A2.2 Ambiances intérieures

Dans les documents DTU 20.1, DTU 40.1, 40.2, 40.3, 40.4 et 43.3, quatre types de locaux sont définis :

- Local à faible hygrométrie : $W/n \leq 2,5 \text{ g/m}^3$;
- Local à hygrométrie moyenne : $2,5 < W/n \leq 5 \text{ g/m}^3$;
- Local à forte hygrométrie : $5 < W/n \leq 7,5 \text{ g/m}^3$;
- Local à très forte hygrométrie : $W/n > 7,5 \text{ g/m}^3$.

Avec :

W : quantité de vapeur d'eau produite à l'intérieur d'un local par heure, exprimée en grammes par heure (g/h),

n : le taux horaire de renouvellement d'air exprimé en mètre cube par heure (m^3/h).

En règle générale :

- Local à faible hygrométrie : les locaux équipés de ventilations mécaniques contrôlées et de systèmes propres à évacuer les pointes de production de vapeur d'eau dès qu'elles se produisent (par exemple : hottes, ...) sont des locaux à faible hygrométrie.
- Local à hygrométrie moyenne : les locaux correctement chauffés et ventilés, sans sur-occupation, et les locaux de production dont le process ne génère pas de vapeur d'eau sont des locaux à hygrométrie moyenne.

RAPPORT D'EXPERTISE

- Local à forte hygrométrie : les locaux médiocrement ventilés et les locaux avec forte concentration humaine sont des locaux à forte hygrométrie.
- Local à très forte hygrométrie : les locaux spéciaux où l'activité maintient une humidité relative élevée sont des locaux à très forte hygrométrie.

De plus, il existe également dans ces documents DTU un classement des locaux à exposition à l'eau liquide projetée sur les parois. Ce classement comporte les cinq niveaux ci-dessous :

- EA : locaux secs ou faiblement humides ;
- EB : locaux moyennement humides ;
- EB+ : locaux privés : locaux humides à usage privé ;
- EB+ : locaux collectifs : locaux humides à usage collectif ;
- EC : locaux très humides en ambiance non agressive.

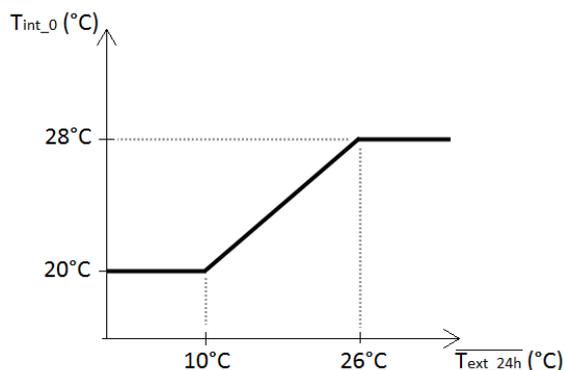
Les locaux à hygrométrie moyenne ($2.5 < W/n \leq 5g/m^3$) peuvent être associés aux locaux à exposition à l'eau liquide projetée EB et EB+ pour les locaux privés.

Les locaux à forte hygrométrie ($5 < W/n \leq 7,5g/m^3$) peuvent être associés aux locaux à exposition à l'eau liquide projetée EB et EB+ pour les locaux privés et pour les locaux à usage collectif.

Les ambiances intérieures prises en compte pour les simulations de cette étude sont à hygrométrie moyenne avec un W/n maximum de $5 g/m^3$.

Durant la période hivernale, la température minimale possible dans le local est fixée à 20 °C. Cette température est néanmoins directement influencée par la température extérieure. De ce fait, la température intérieure est définie comme fonction de la moyenne glissante de la température extérieure sur 24 heures, telle que :

$$\overline{T_{ext_{24h}}}(h) = \int_{h-23}^h T_{ext}(h)$$



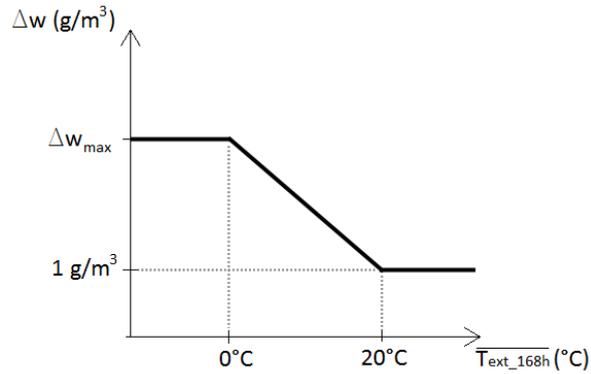
Abaque de détermination de la température intérieure

RAPPORT D'EXPERTISE

L'humidité absolue de l'air intérieur est définie à l'aide de la moyenne glissante de la température extérieure sur une semaine, telle que représentée sur l'abaque ci-dessous. La valeur de cet excès est au minimum égale à 1g/m³ allant jusqu'à la valeur limite du climat.

$$\overline{T_{ext_{168h}}}(h) = \int_{h-167}^h T_{ext}(h)$$

$$w_{int_0}(h) = \overline{w_{ext_{168}}}(h) + \Delta w(h)$$



Abaque de détermination de l'excès d'humidité intérieure

L'humidité relative de l'air intérieur est déterminée par le calcul suivant :

$$HR_{int_0}(h) = \frac{w_{int_0}(h) \cdot R \cdot T_{int}(h)}{M_{eau} \cdot p v_{sat}(T_{int}(h))}$$

Où :

- HR : humidité relative en % ;
- W : humidité absolue en kg_{eau}/kg_{air sec} ;
- T : température en K ;
- Pv : pression de vapeur d'eau en Pa ;
- M : masse molaire en kg/mol ;
- R : constante des gaz parfaits en J/mol.K ;
- Le suffixe *int* pour intérieur ; le suffixe *int_0* pour intérieur en évolution libre ; le suffixe *sat* pour saturante.

RAPPORT D'EXPERTISE

Pour les zones climatiques retenues, les ambiances intérieures sont représentées par les graphiques suivants :

Figure 5 : Variation de la température et de l'humidité relative intérieure pour un local à hygrométrie moyenne à Nancy

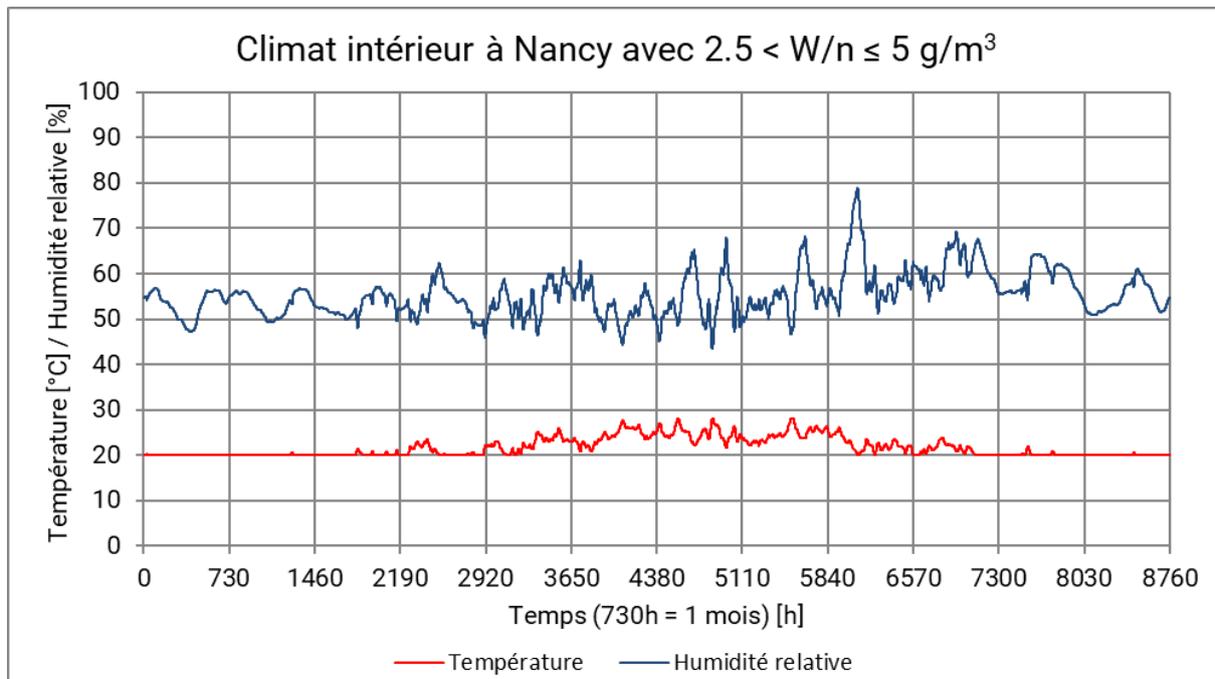
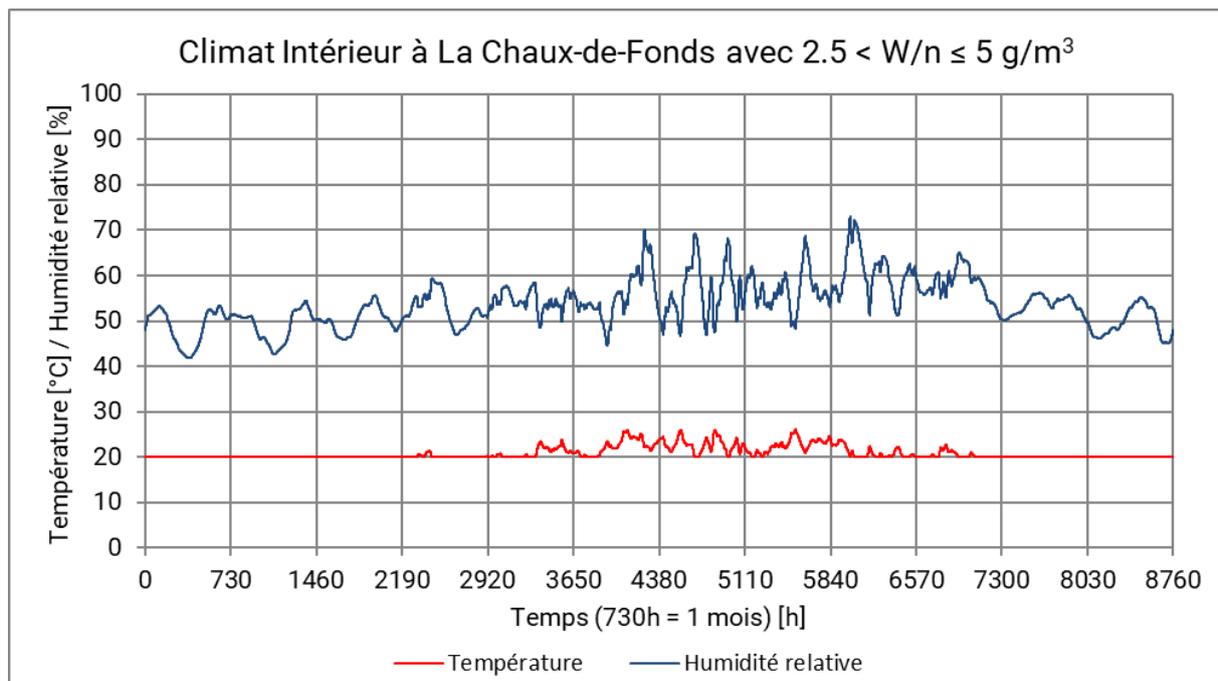


Figure 6 : Variation de la température et de l'humidité relative intérieure pour un local à hygrométrie moyenne à La Chaux-de-Fonds



ANNEXE 3 : RESULTATS DES SIMULATIONS

Cas 1

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 1-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 1-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB (figure 1-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie (figure 1-d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille hachée (figure 1-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 1-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB (figure 1 g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le pare-vapeur (figure 1-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 1-a : Rappel du schéma de la paroi 1

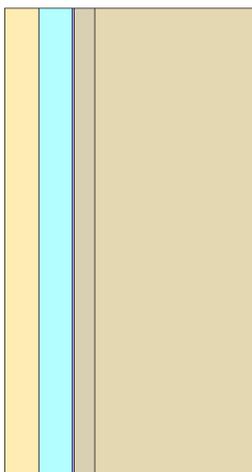


Figure 1-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

Teneur en eau totale

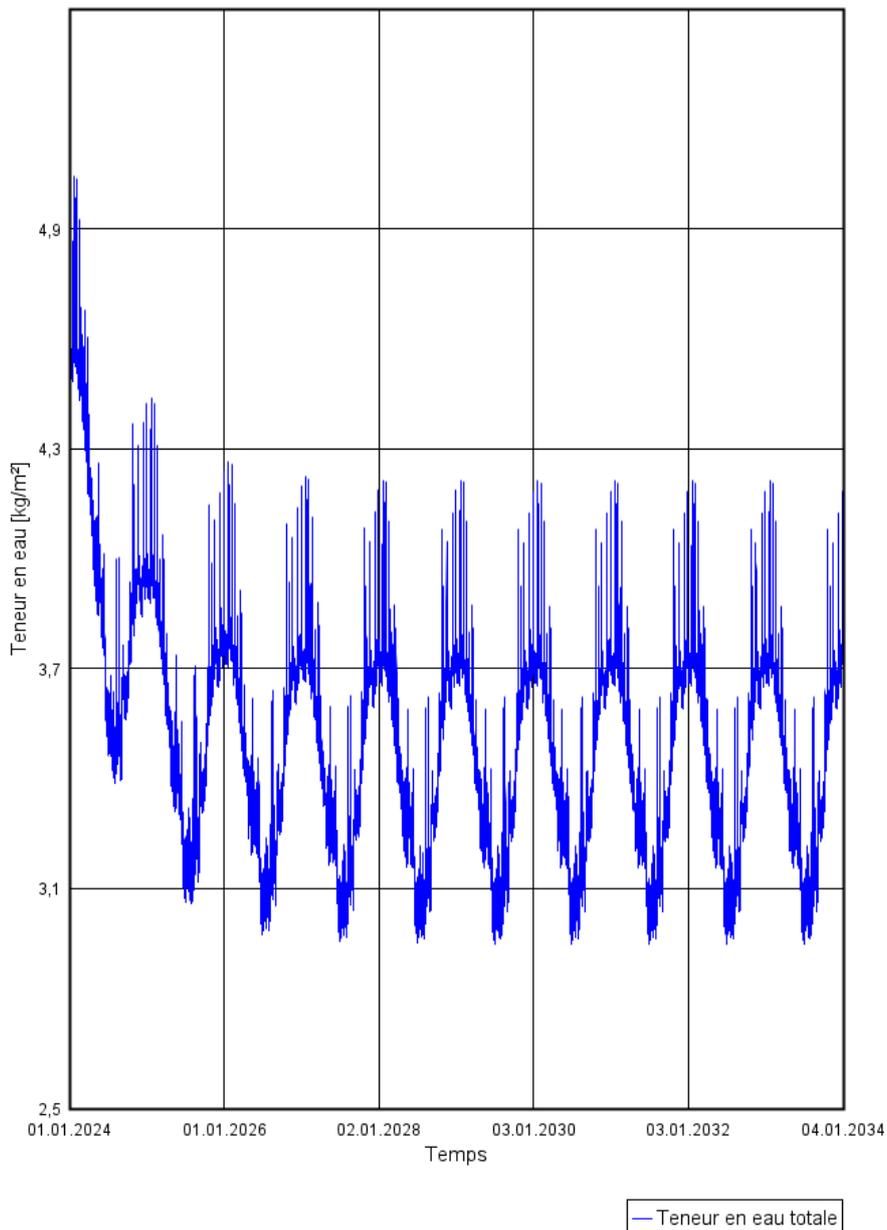
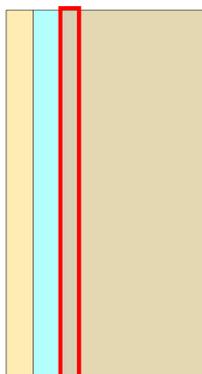
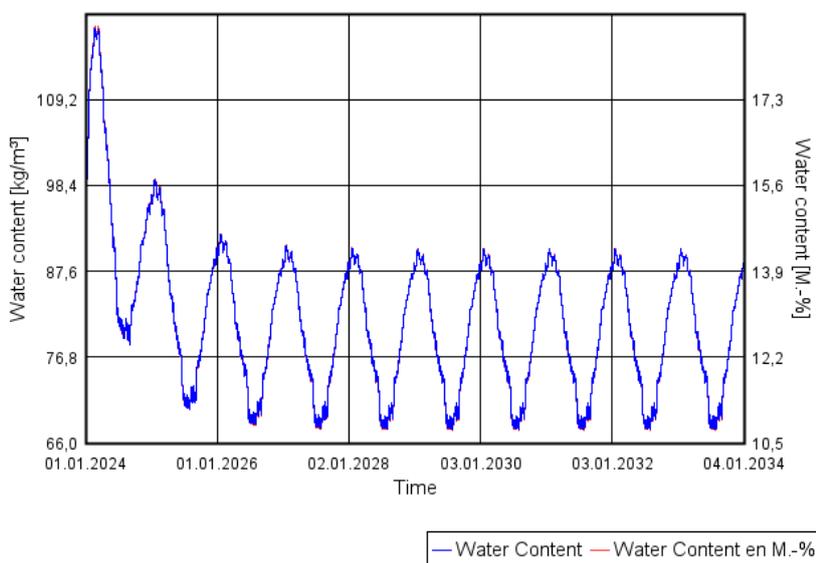


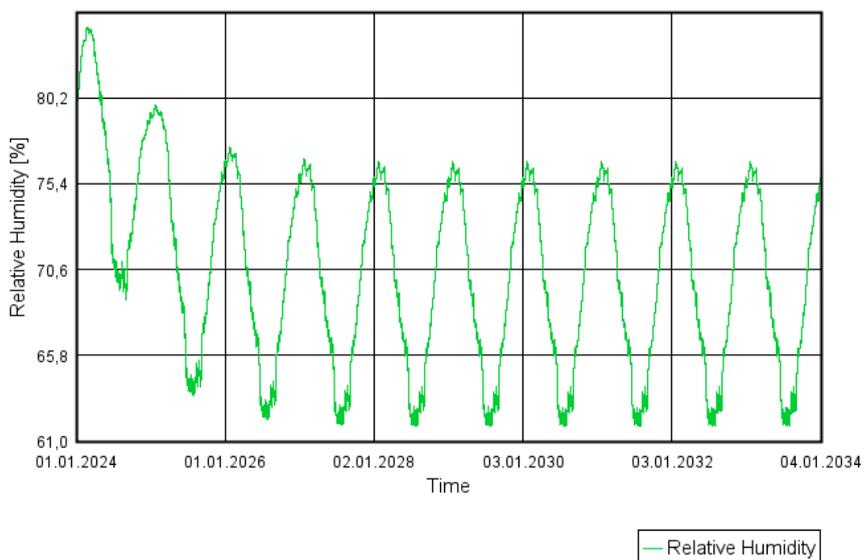
Figure 1-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB



Water Content OSB

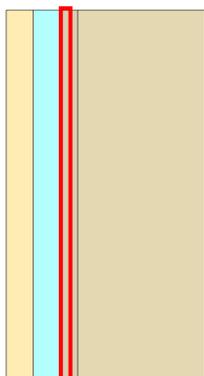


Relative Humidity

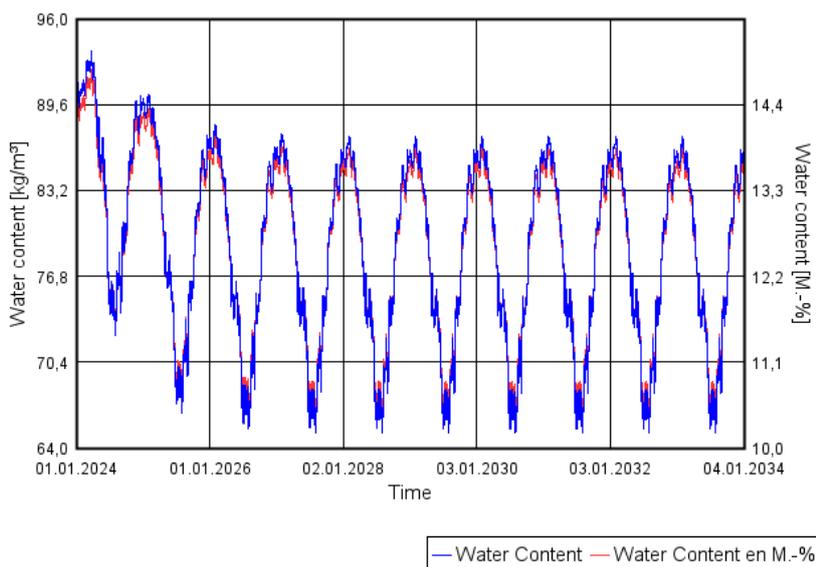


RAPPORT D'EXPERTISE

Figure 1-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie



Water Content OSB inter HPV



Relative Humidity

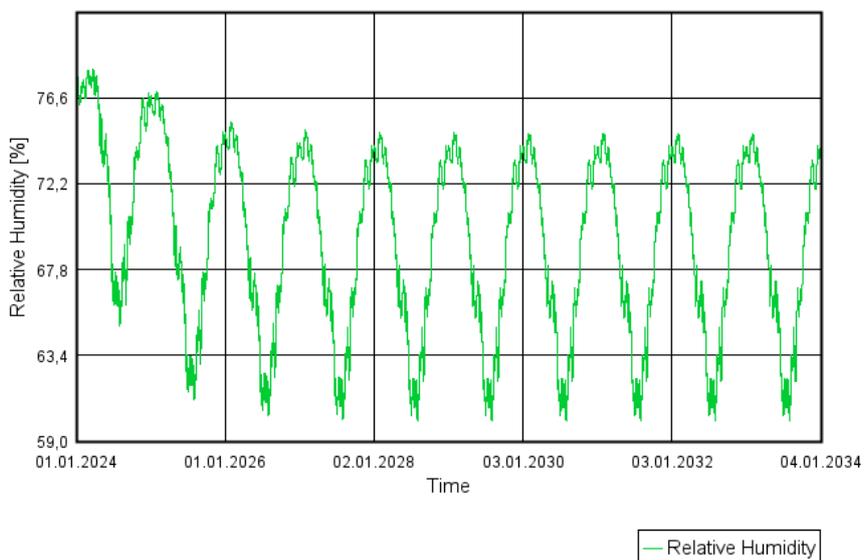
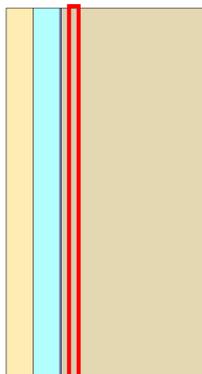
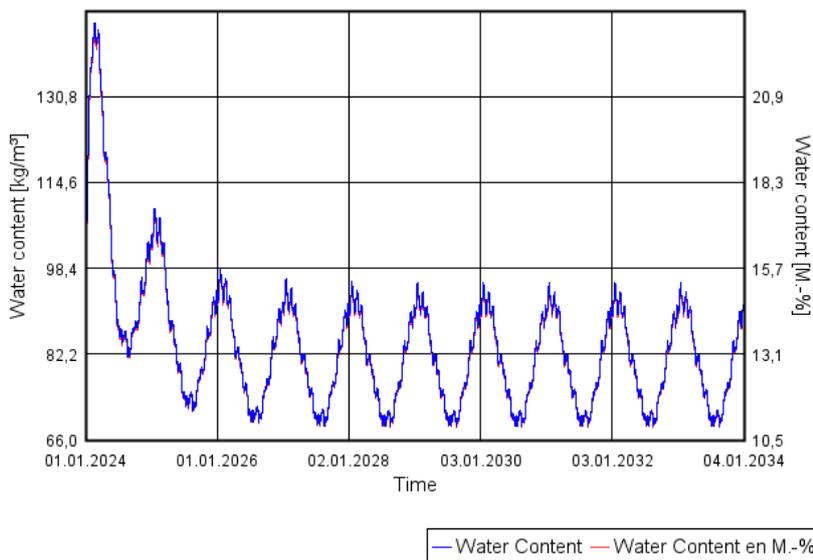


Figure 1-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille



Water Content OSB inter paille



Relative Humidity

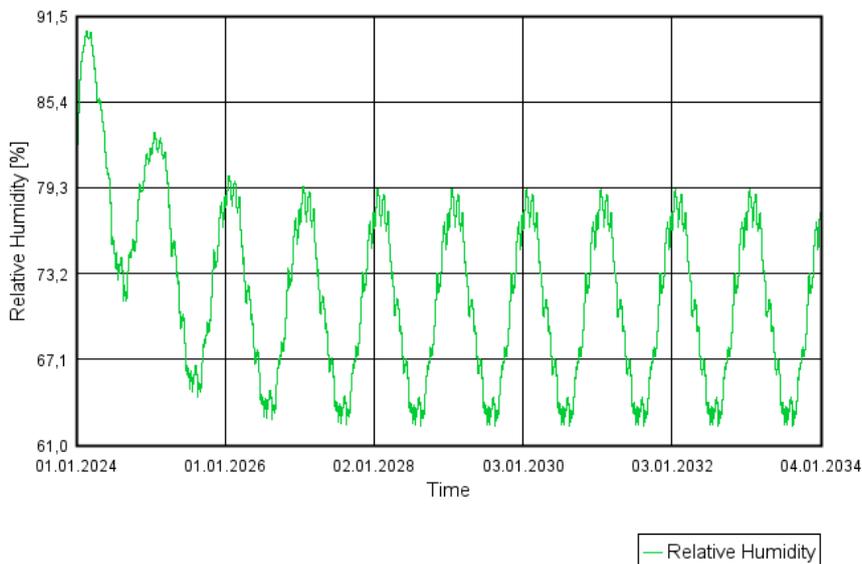
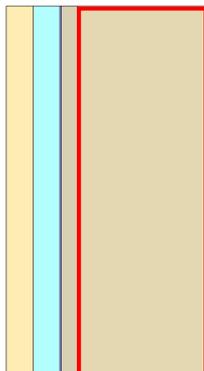
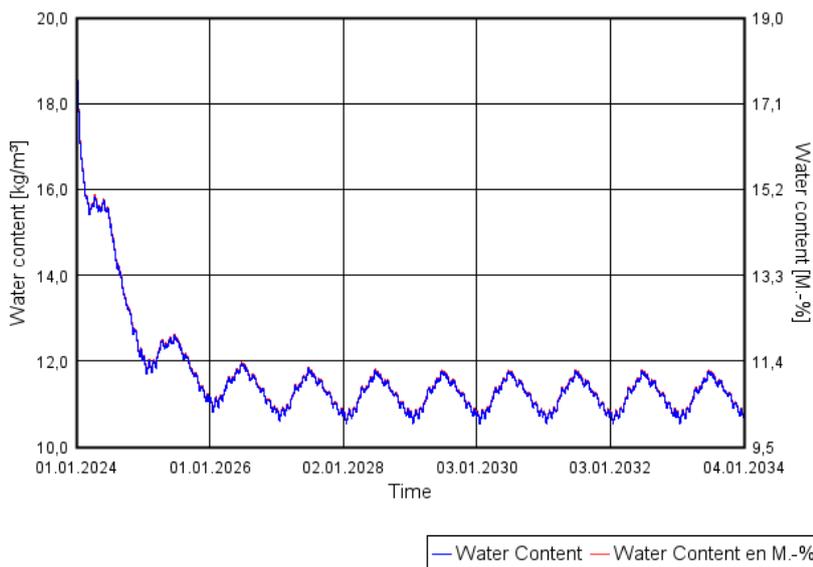


Figure 1-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Water Content paille



Relative Humidity

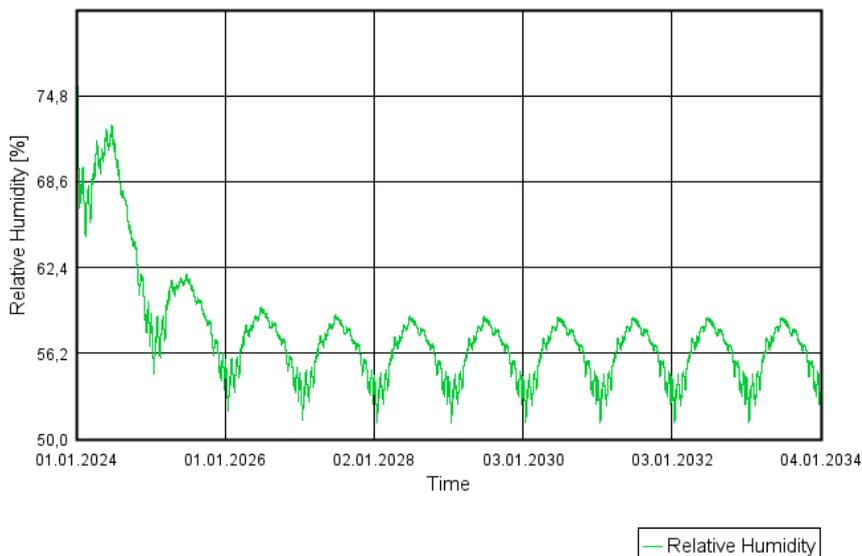
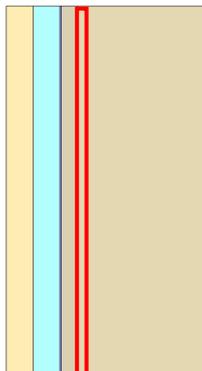
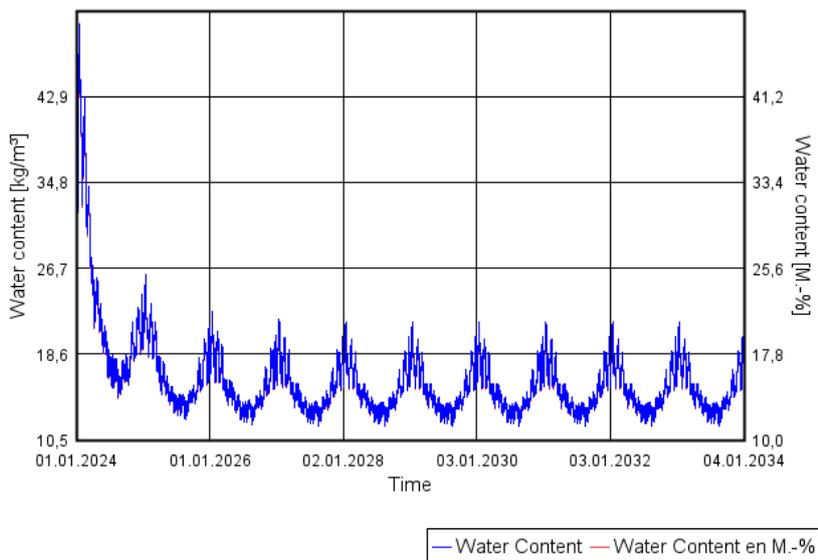


Figure 1-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB



Water Content paille inter OSB



Relative Humidity

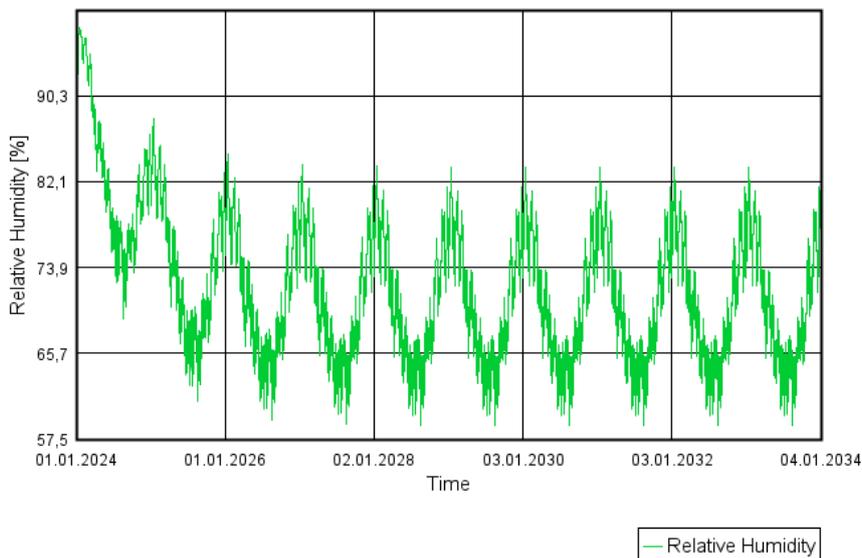
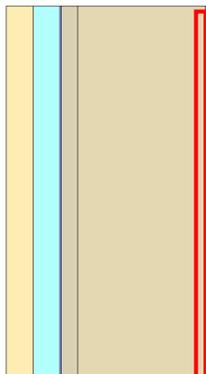
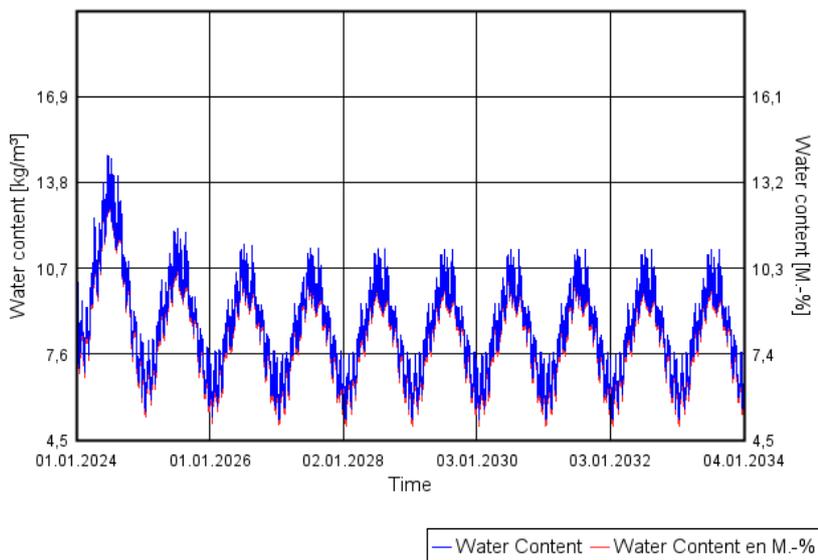


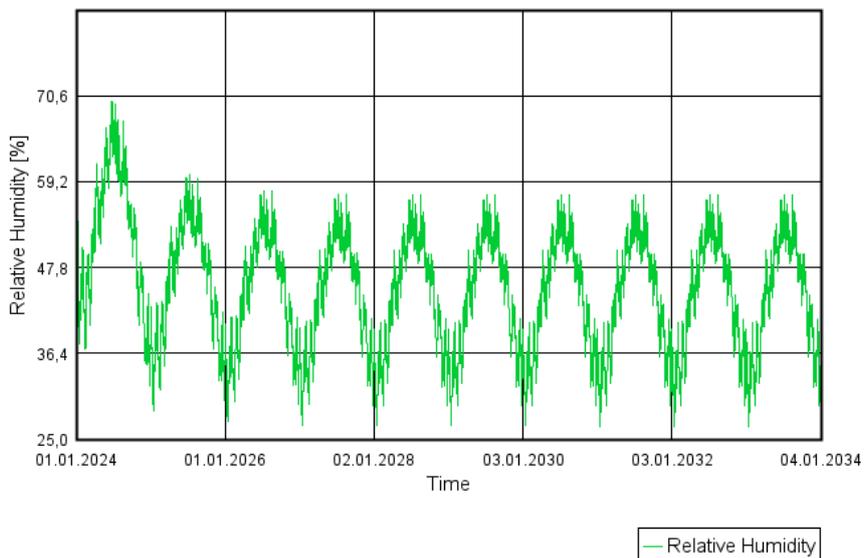
Figure 1-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le pare-vapeur



Water Content paille inter PV



Relative Humidity



Cas 2

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 2-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 2-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB (figure 2-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie (figure 2- d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille hachée (figure 2-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 2-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB (figure 2-g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le pare-vapeur (figure 2-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 2-a : Rappel du schéma de la paroi 2

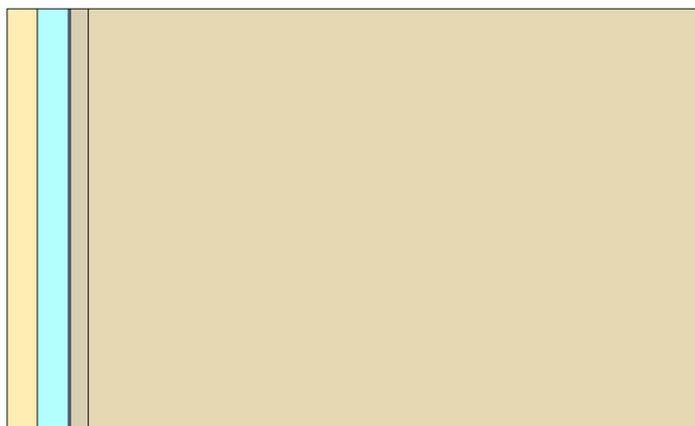


Figure 2-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

Teneur en eau totale

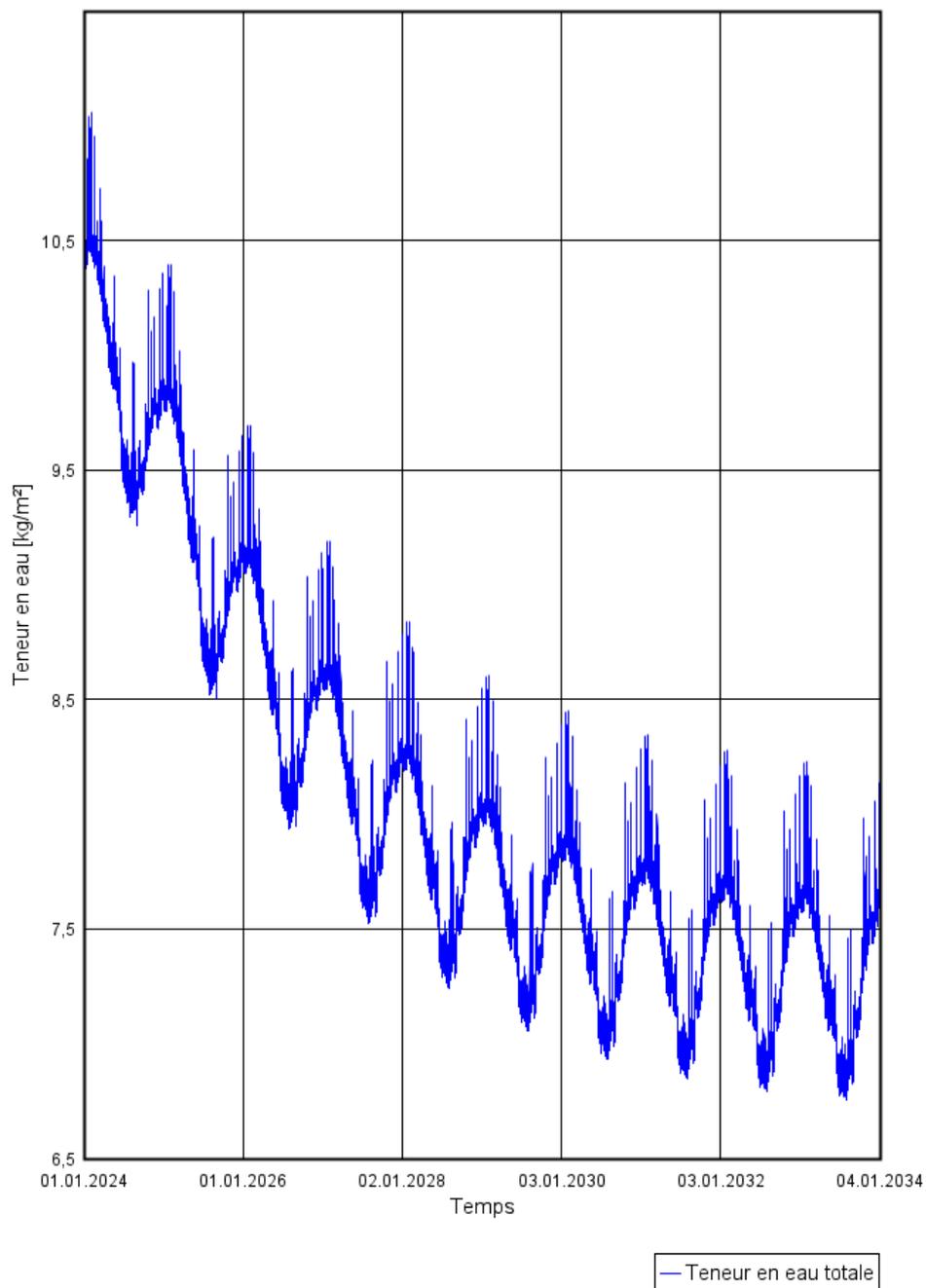
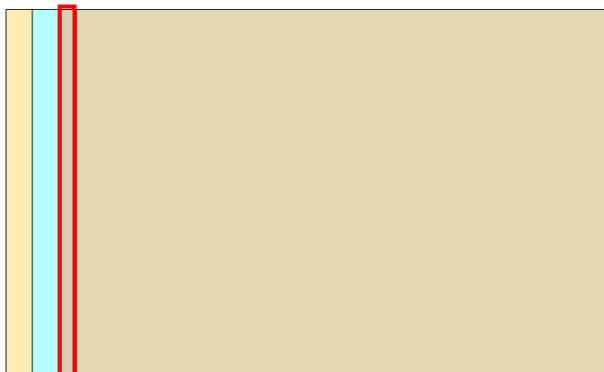
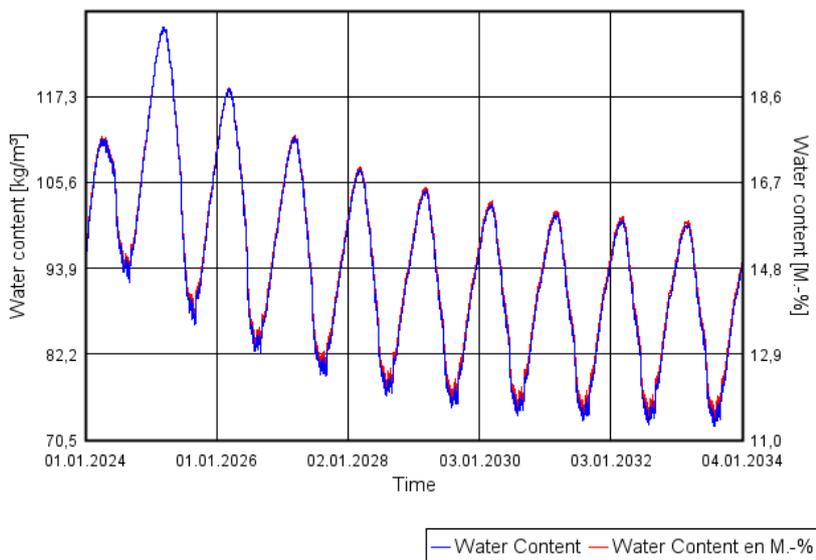


Figure 2-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB



Water Content OSB



Relative Humidity

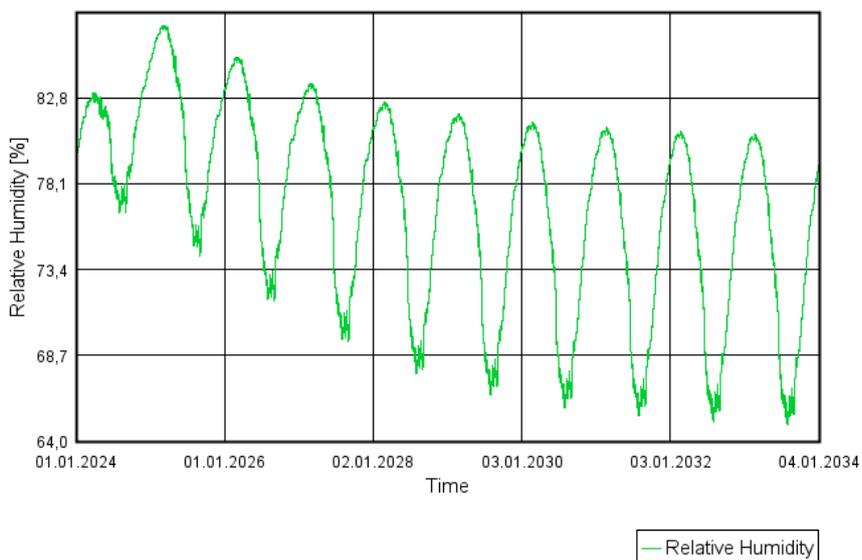
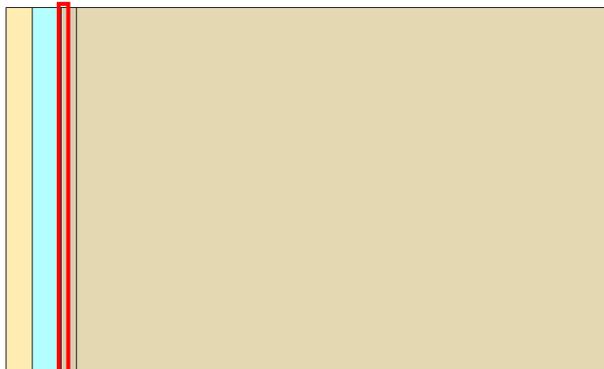
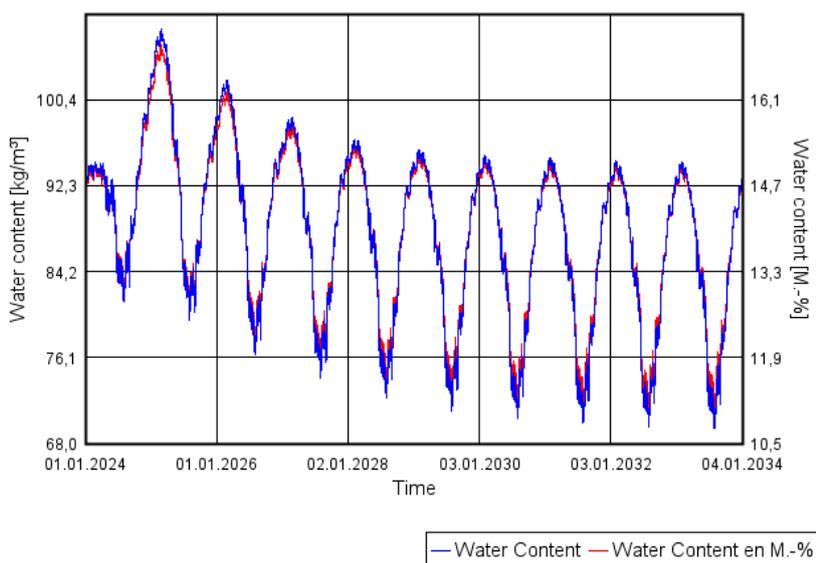


Figure 2-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie



Water Content OSB inter HPV



Relative Humidity

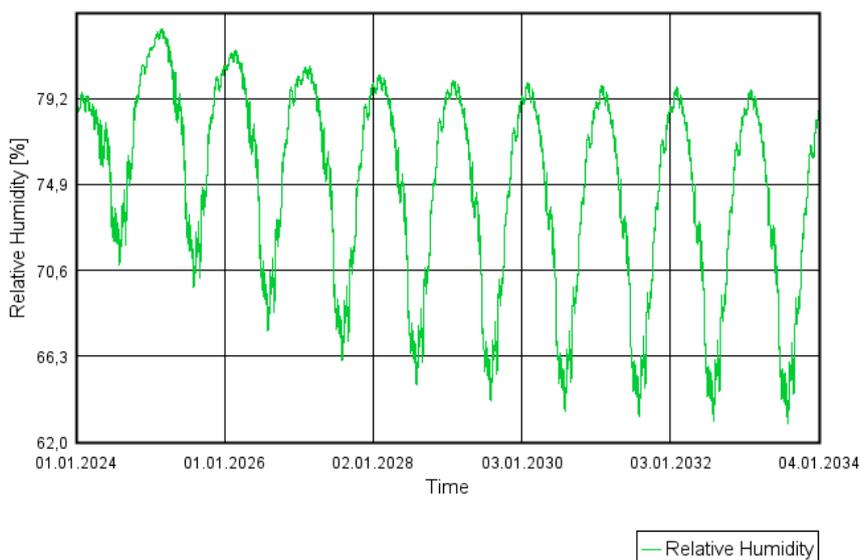
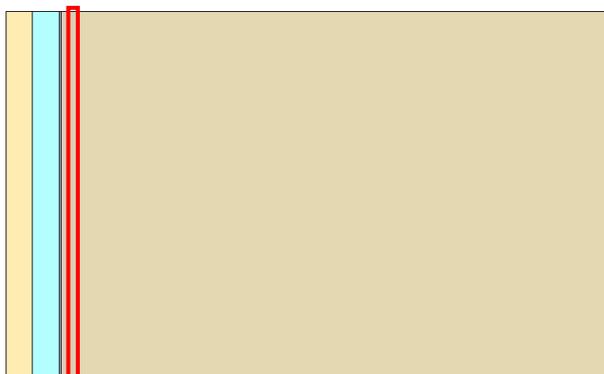
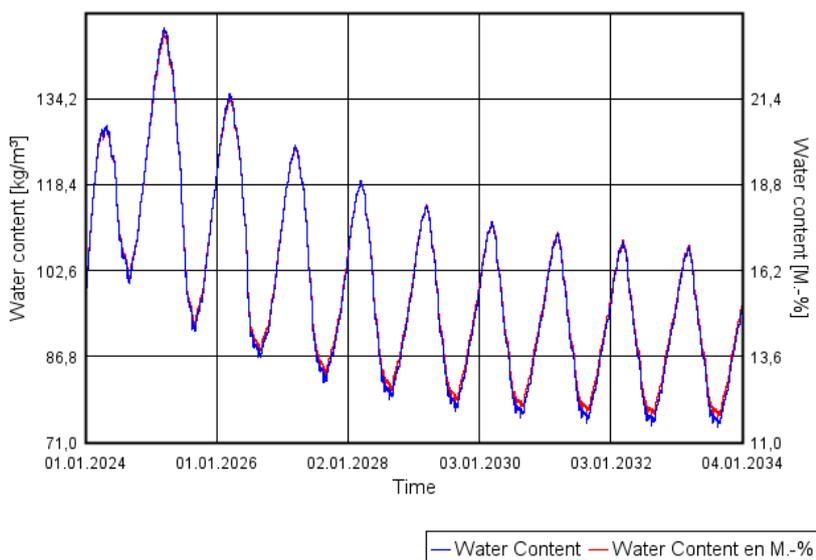


Figure 2-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille



Water Content OSB inter paille



Relative Humidity

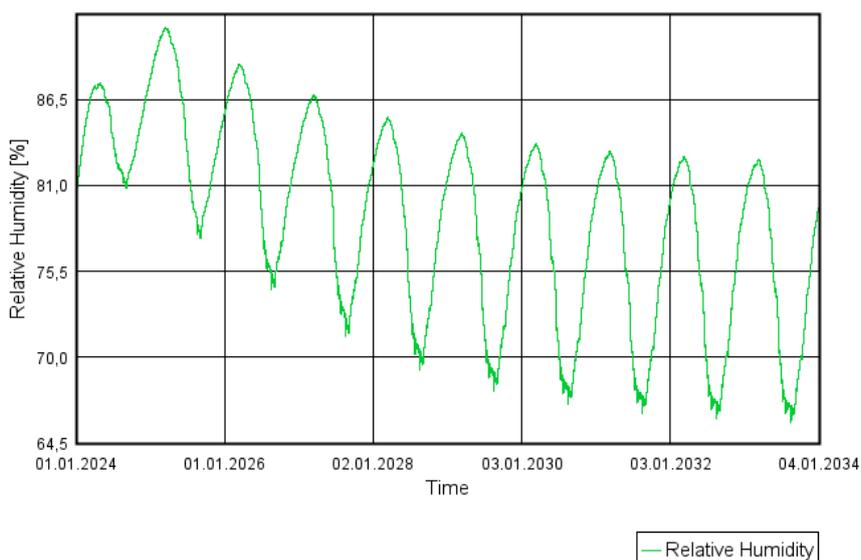
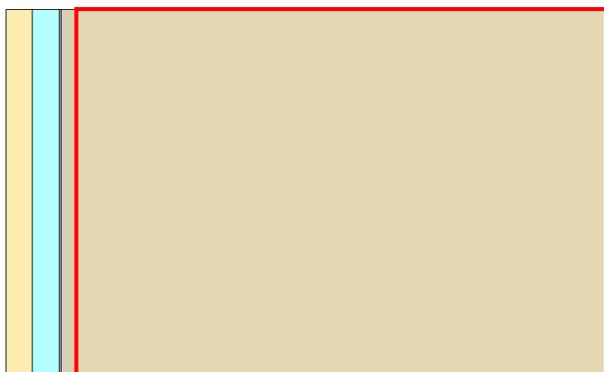
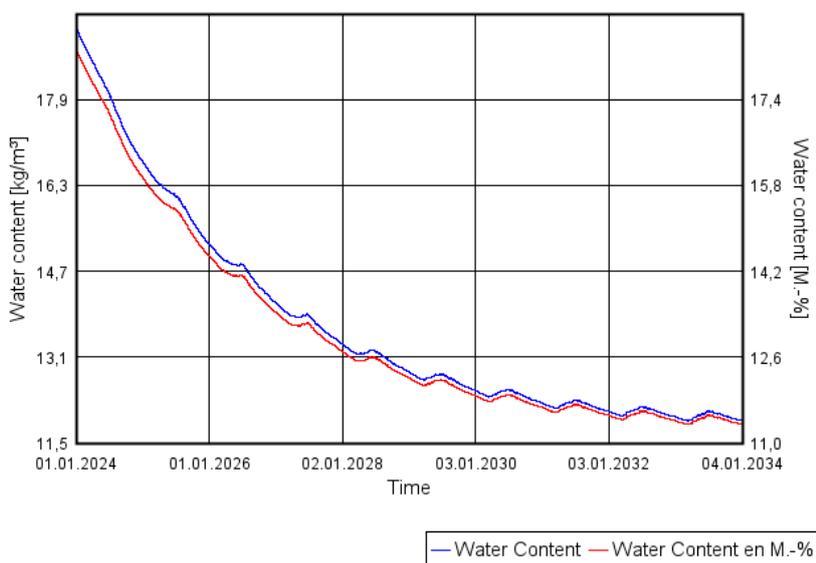


Figure 2-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Water Content paille



Relative Humidity

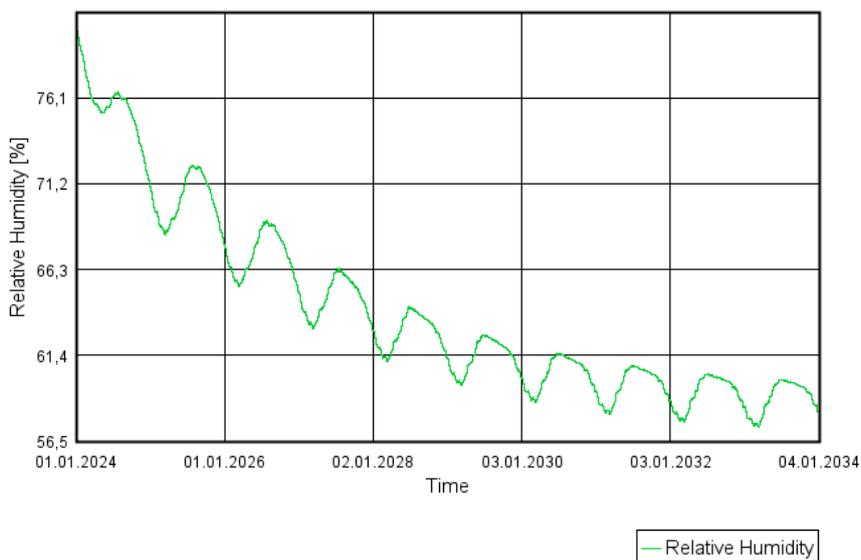
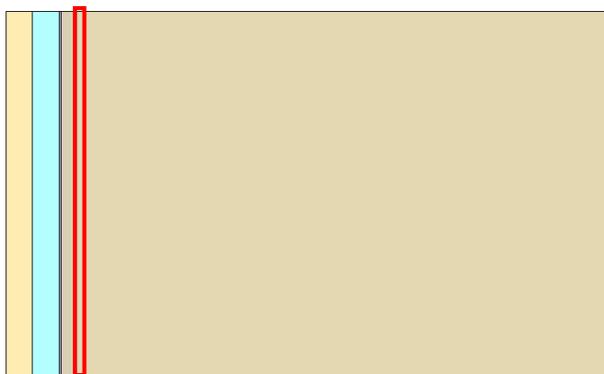
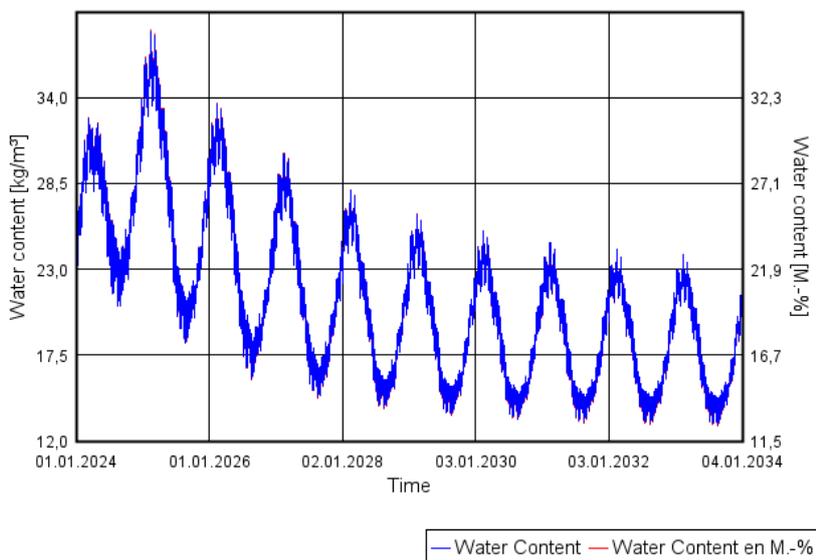


Figure 2-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB



Water Content paille inter OSB



Relative Humidity

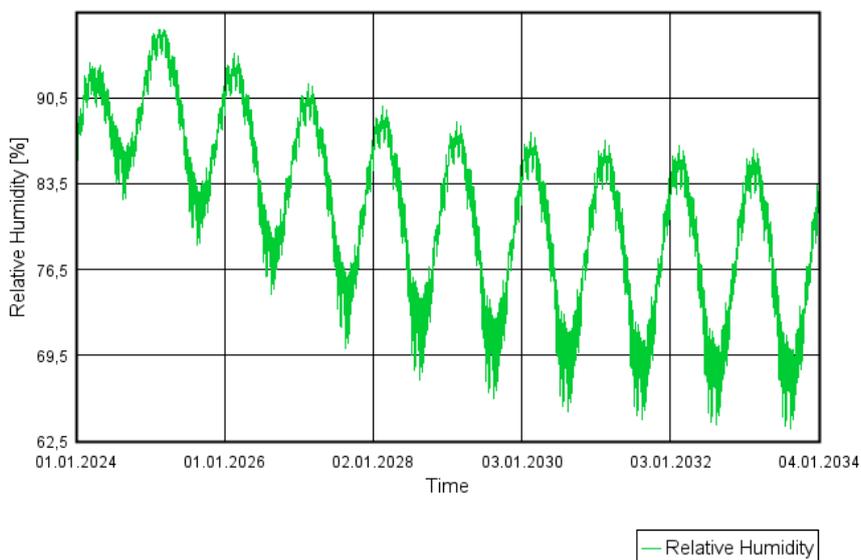
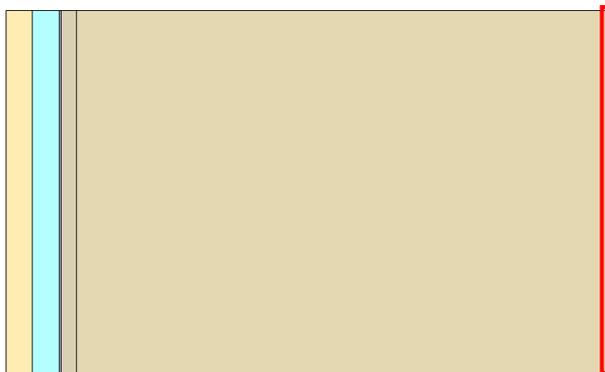
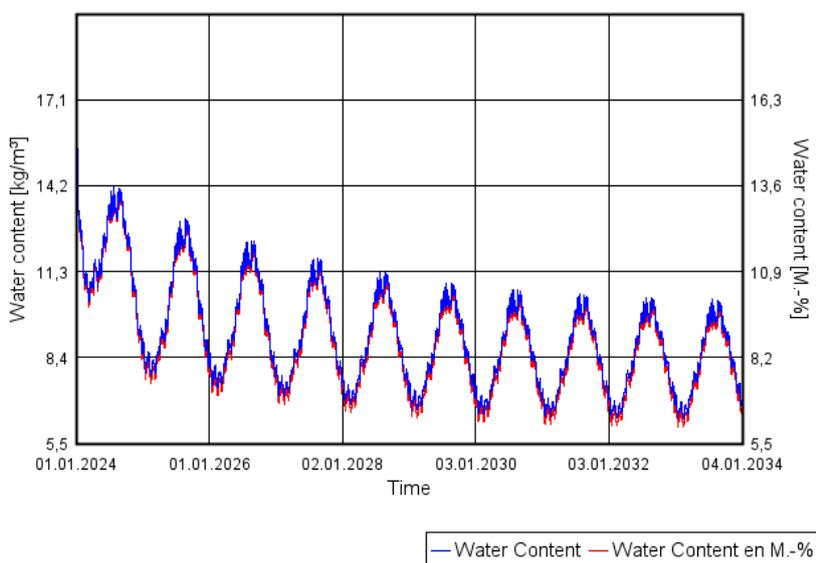


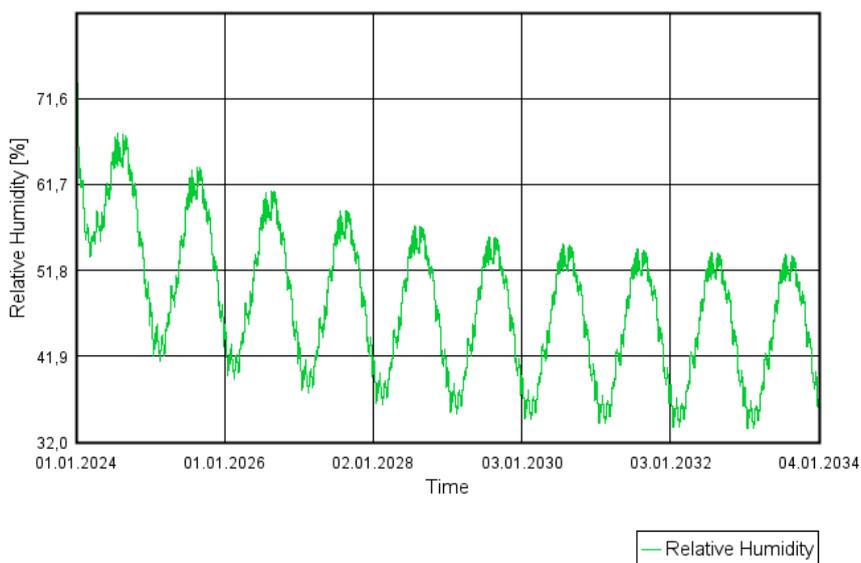
Figure 2-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le pare-vapeur



Water Content paille inter PV



Relative Humidity



Cas 3

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 3-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 3-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB (figure 3-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie (figure 3 d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille hachée (figure 3-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 3-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB (figure 3-g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le pare-vapeur (figure 3-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 3-a : Rappel du schéma de la paroi 3

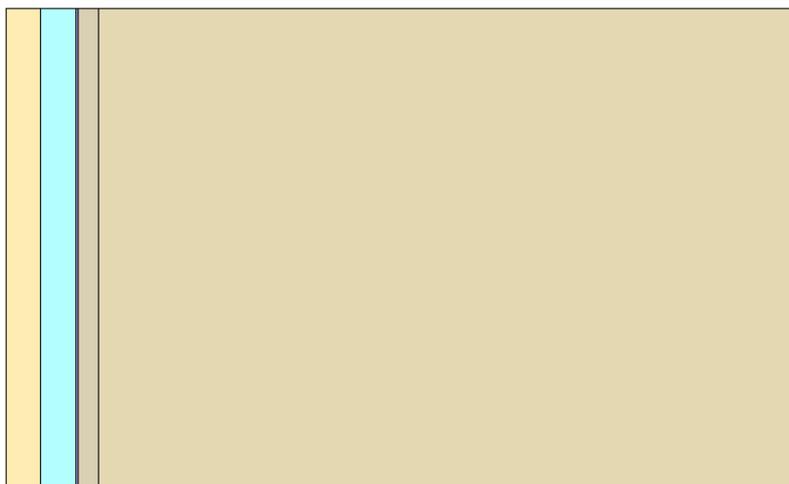


Figure 3-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

Teneur en eau totale

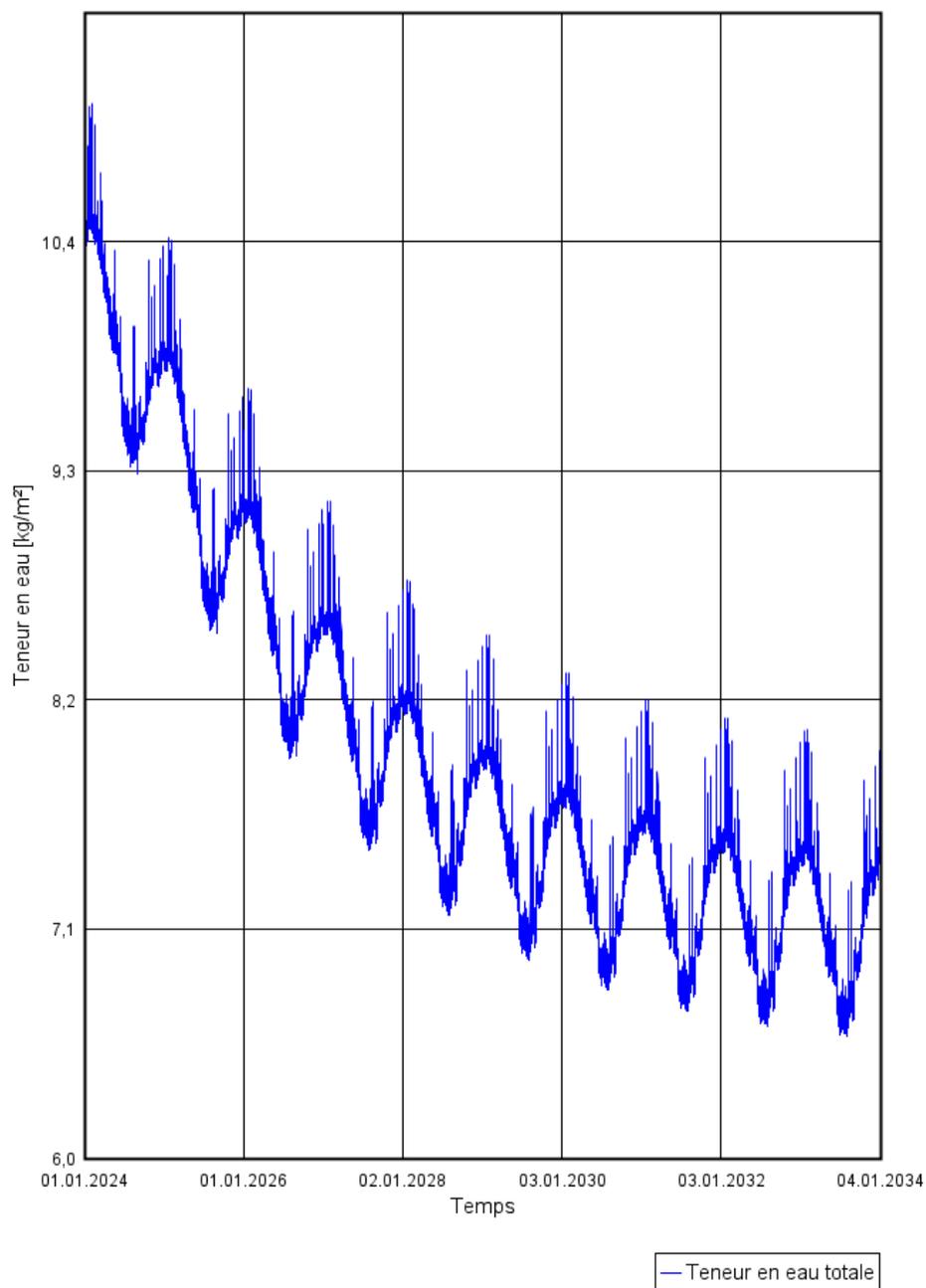
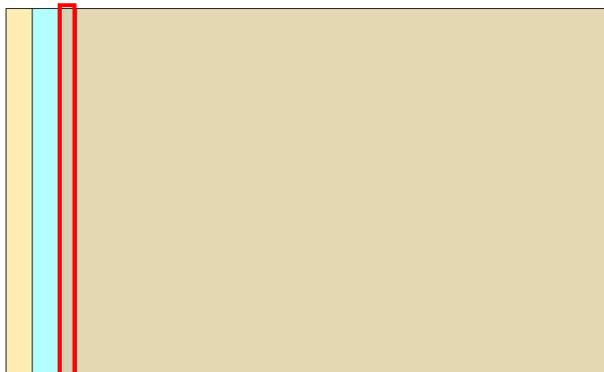
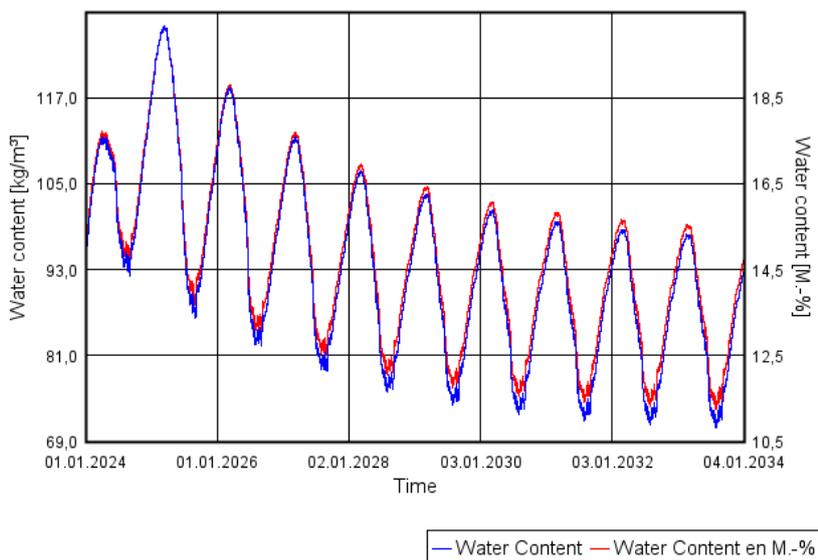


Figure 3-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB



Water Content OSB



Relative Humidity

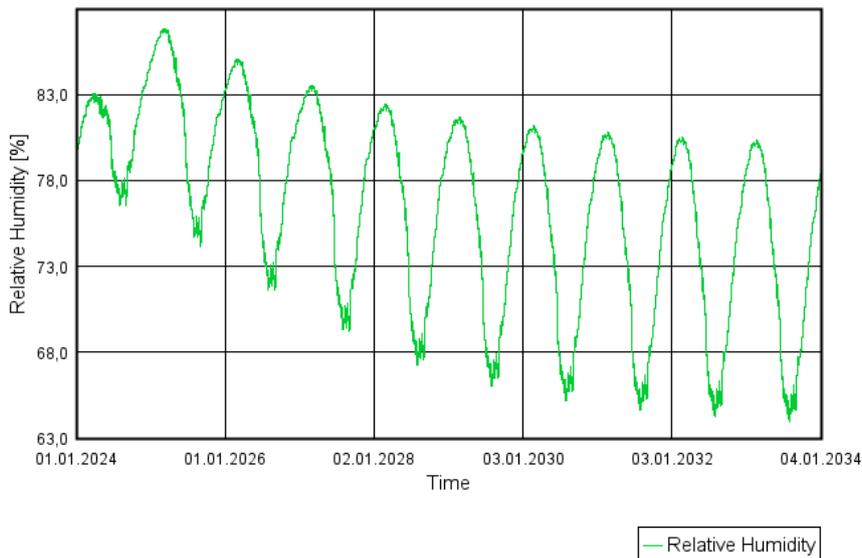
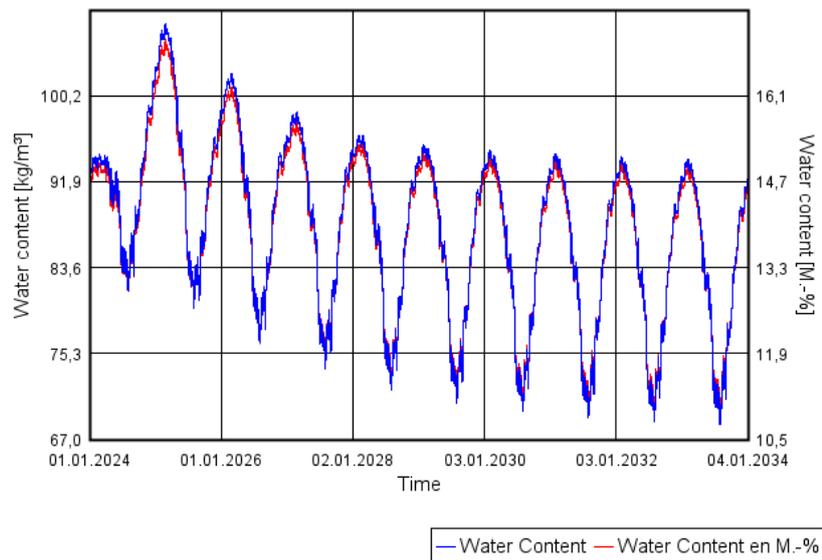


Figure 3-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie



Water Content OSB inter HPV



Relative Humidity

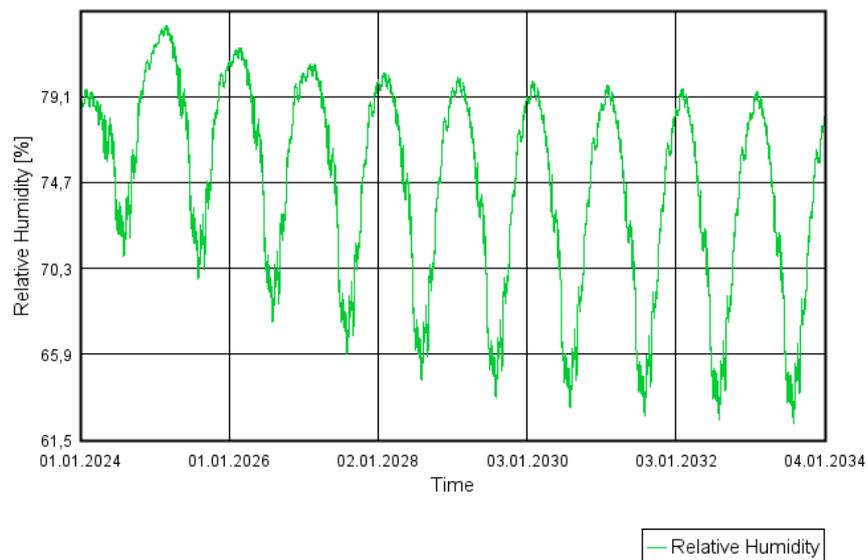
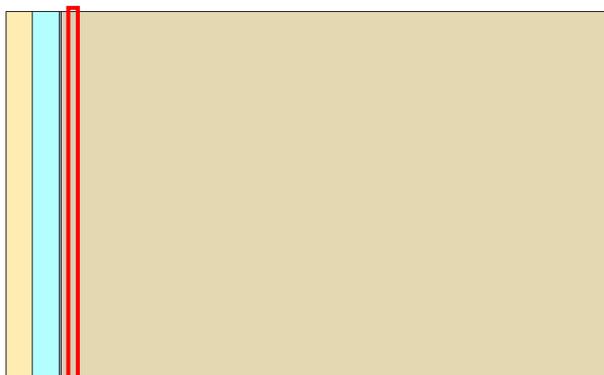
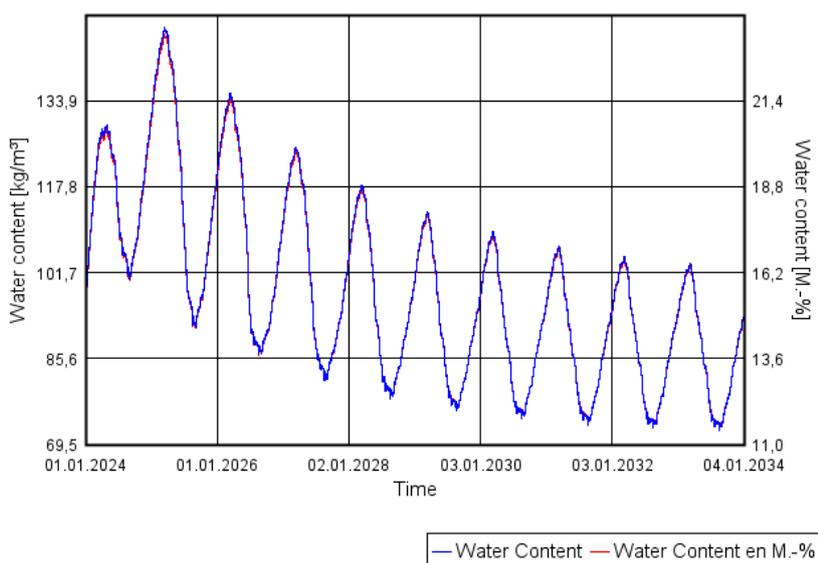


Figure 3-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille



Water Content OSB inter paille



Relative Humidity

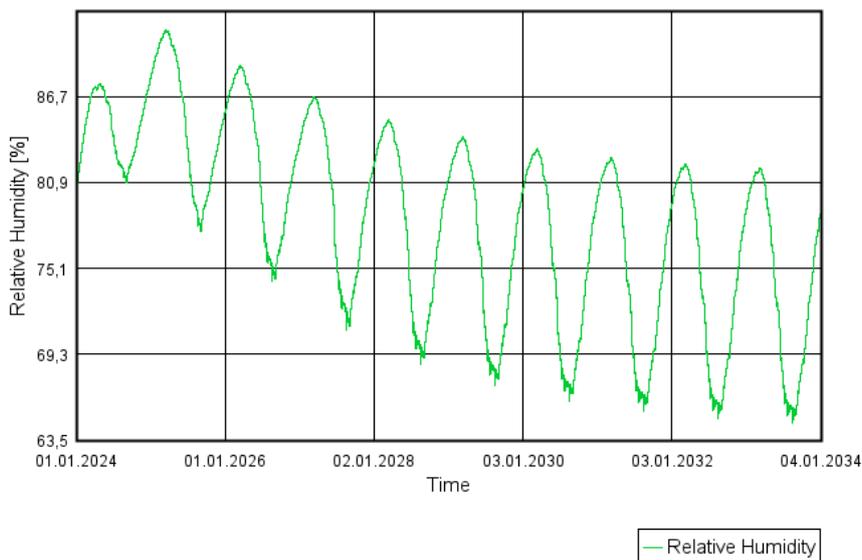
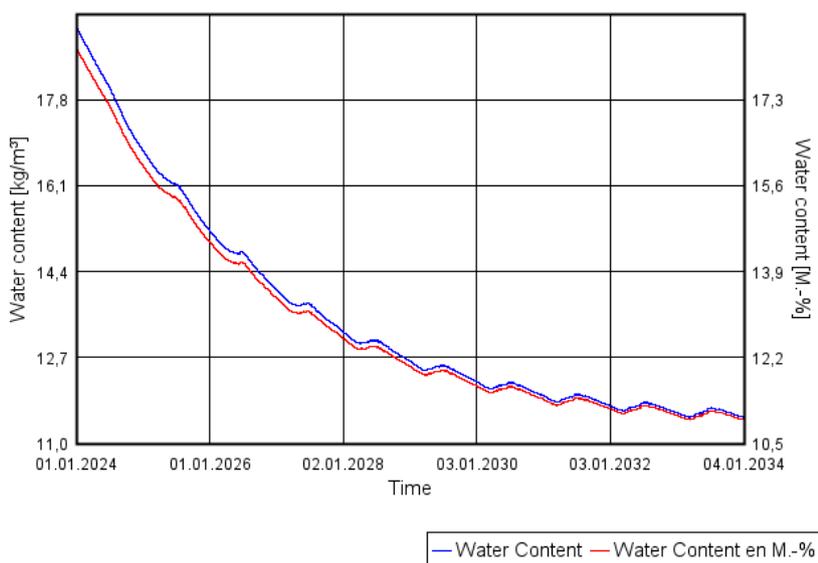


Figure 3-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Water Content paille



Relative Humidity

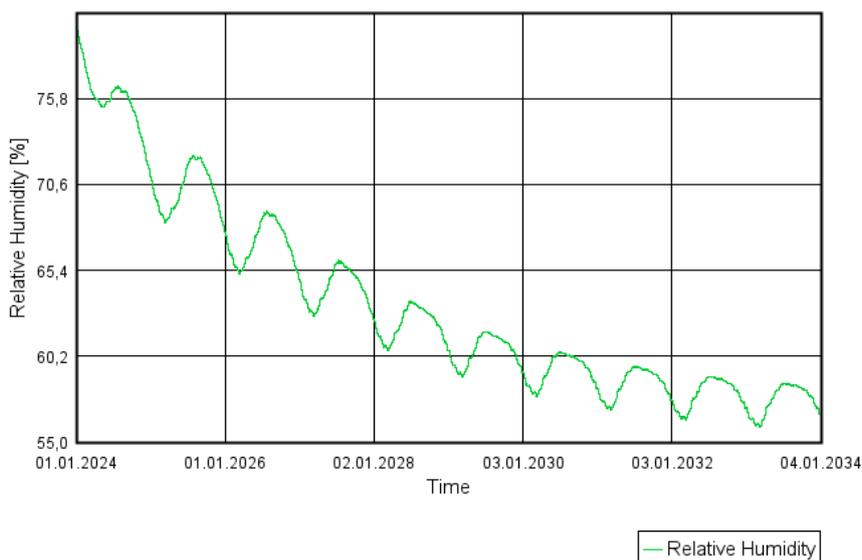
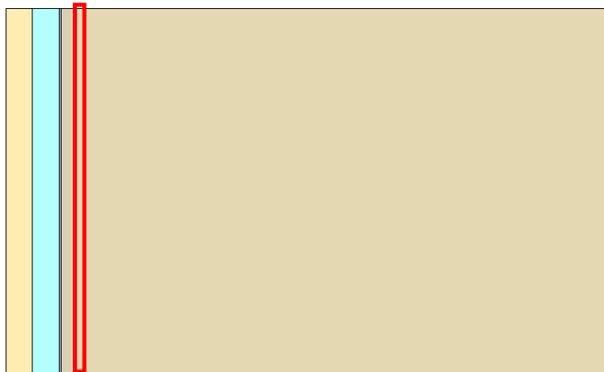
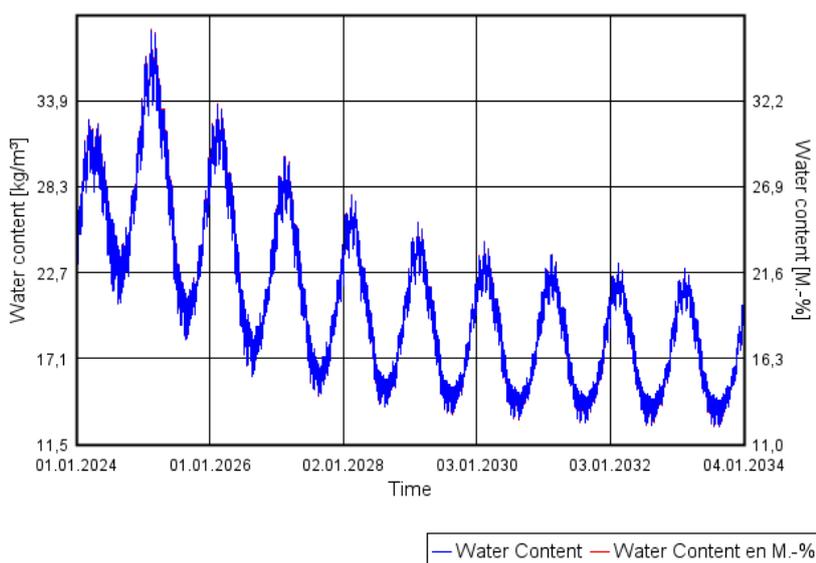


Figure 3-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB



Water Content paille inter OSB



Relative Humidity

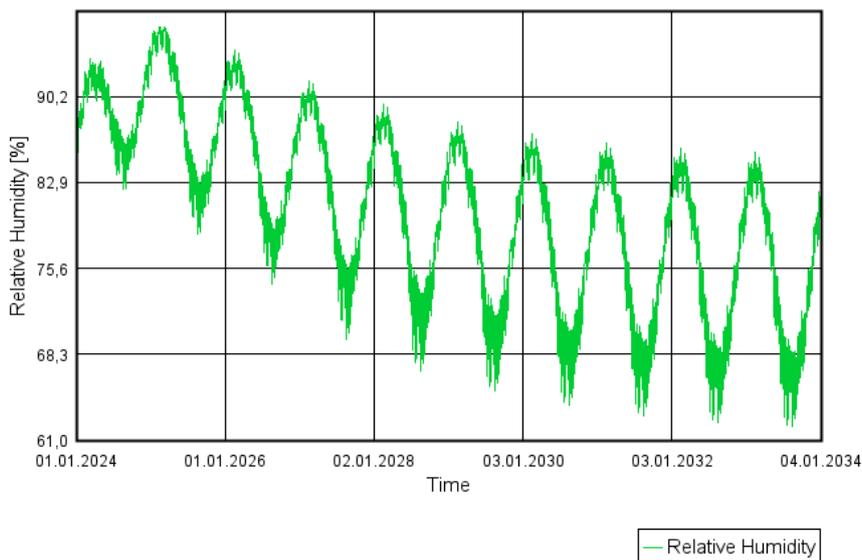
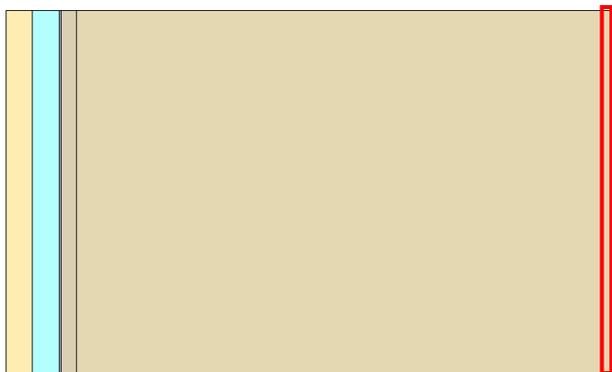
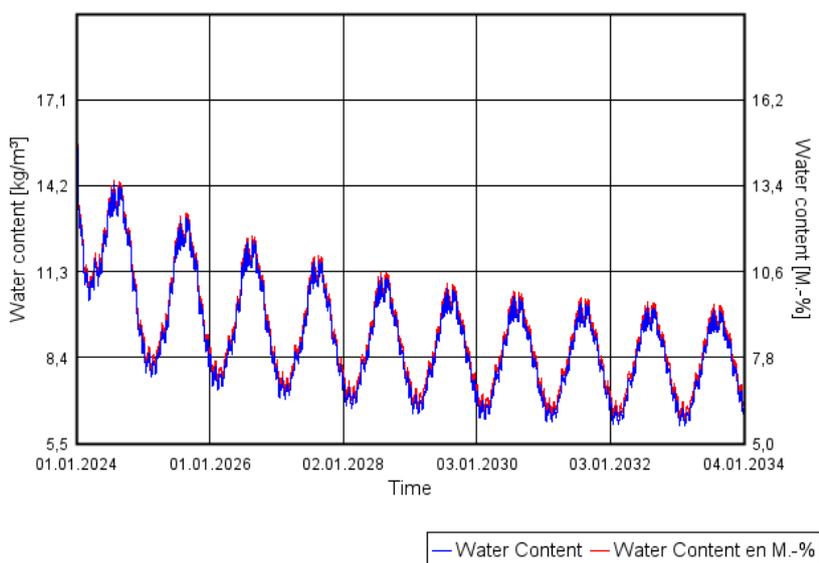


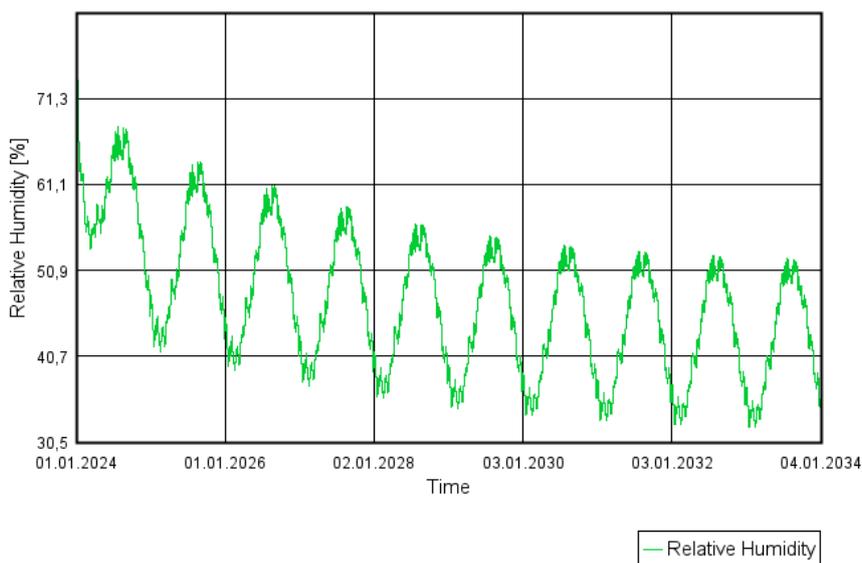
Figure 3-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le pare-vapeur



Water Content paille inter PV



Relative Humidity



Cas 4

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 4-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 4-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB (figure 4-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie (figure 4 d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille hachée (figure 4-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 4-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB (figure 4-g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le pare-vapeur (figure 4-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 4-a : Rappel du schéma de la paroi 4

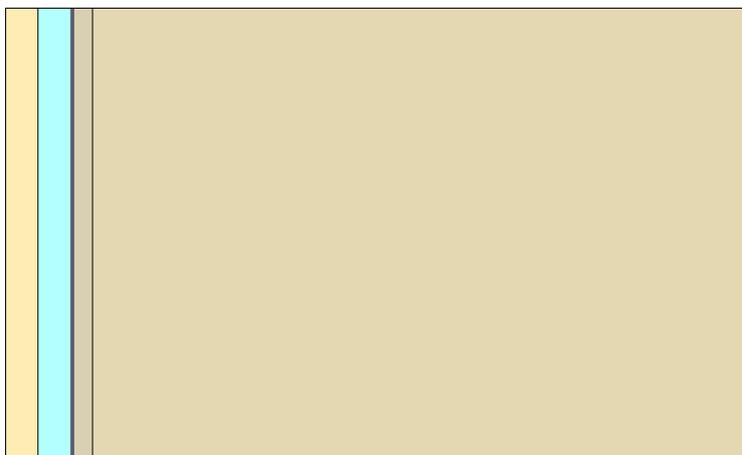


Figure 4-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

Teneur en eau totale

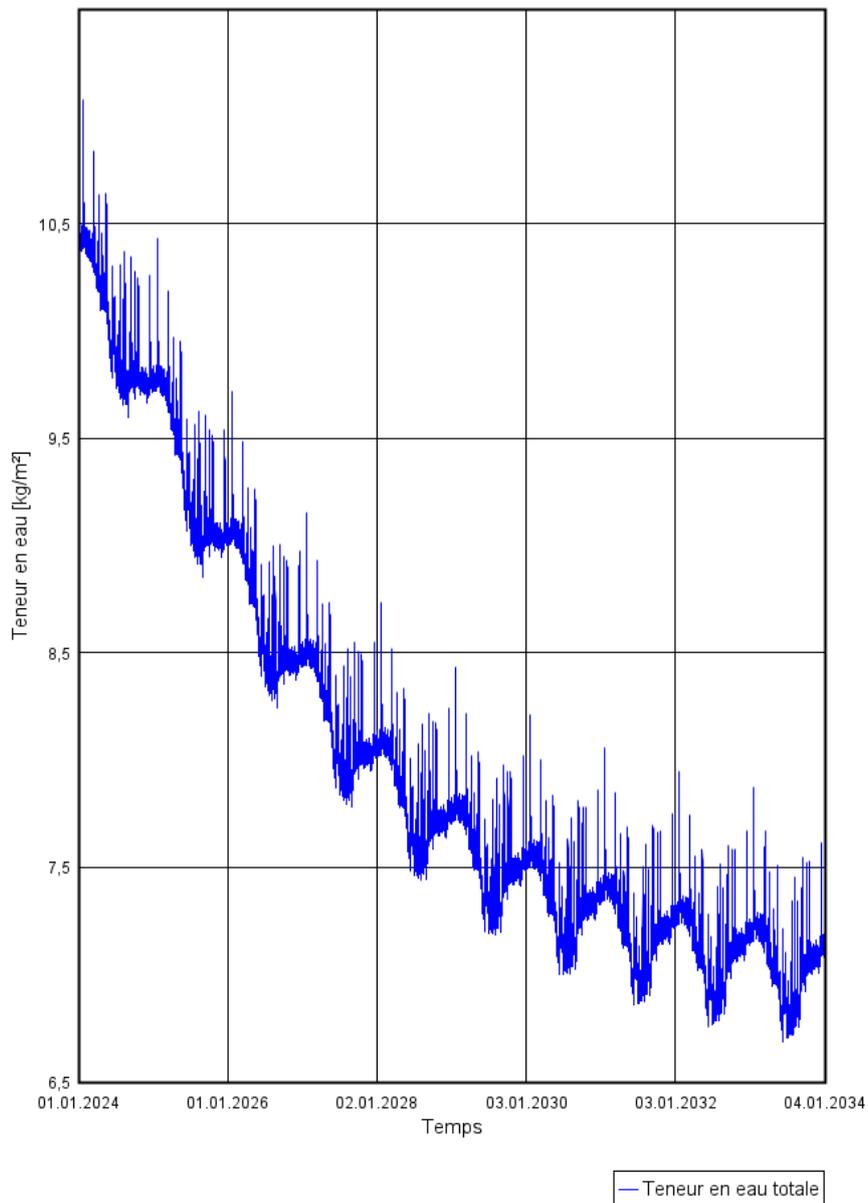
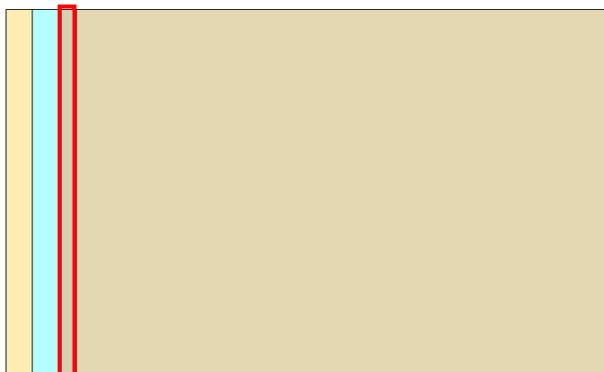
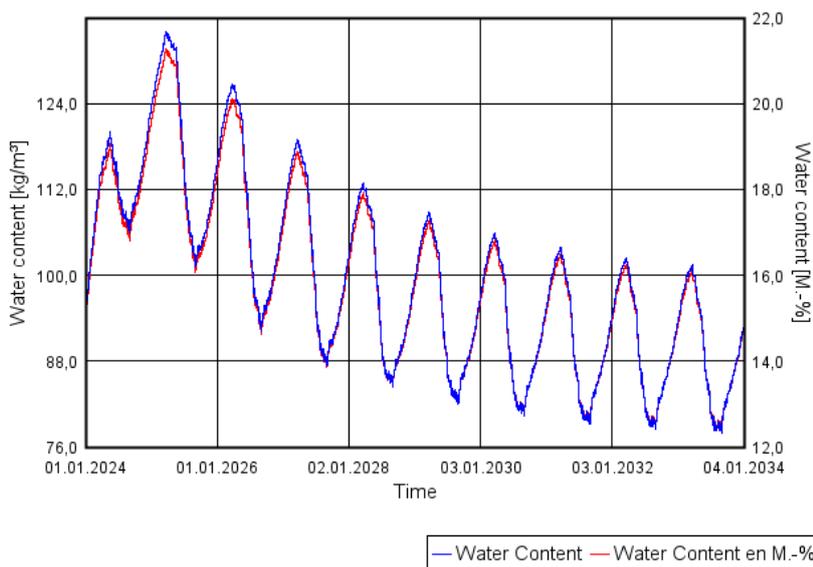


Figure 4-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB



Water Content OSB



Relative Humidity

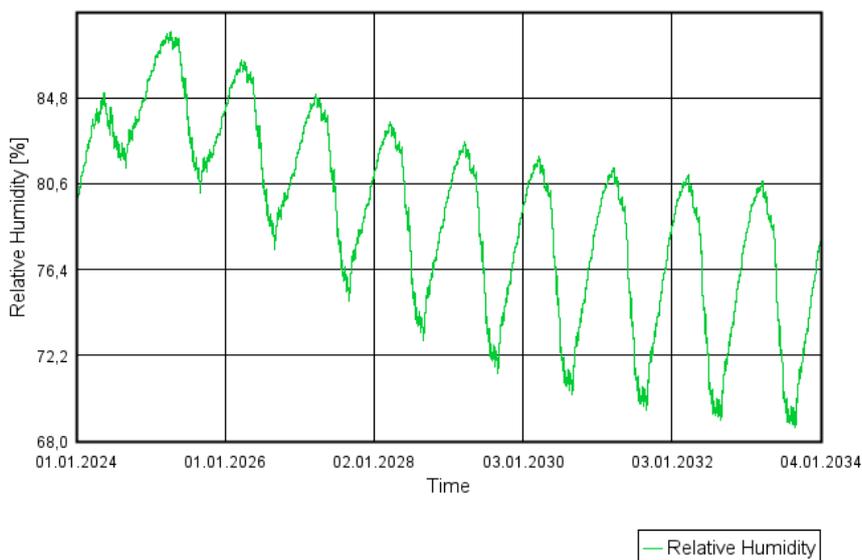
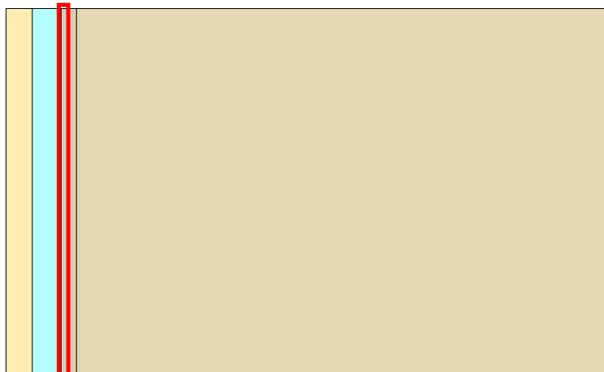
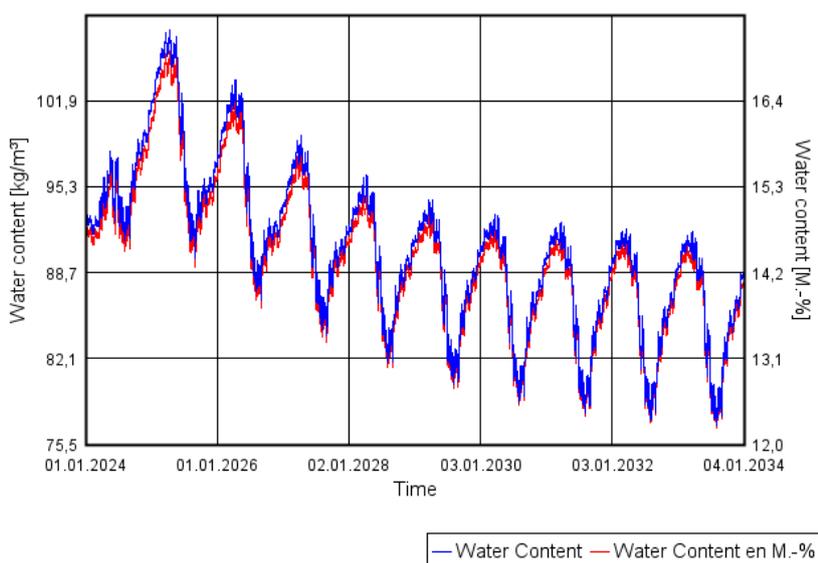


Figure 4-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie



Water Content OSB inter HPV



Relative Humidity

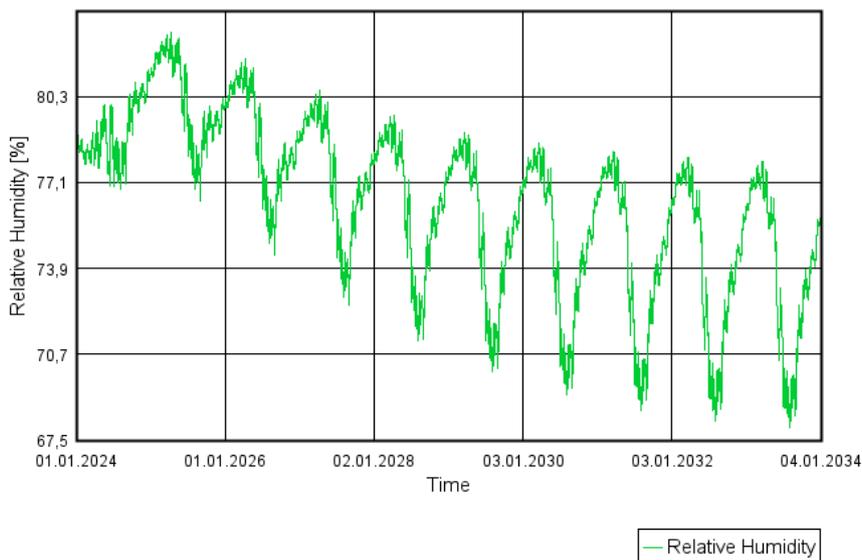
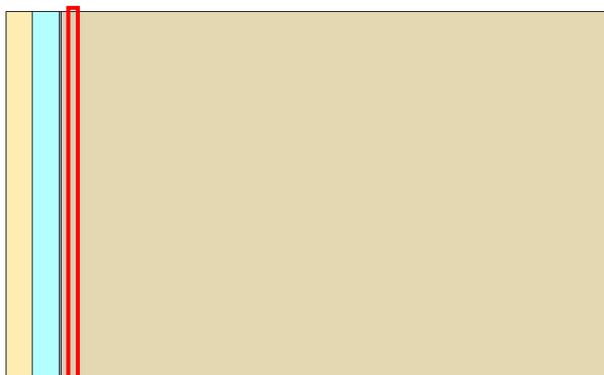
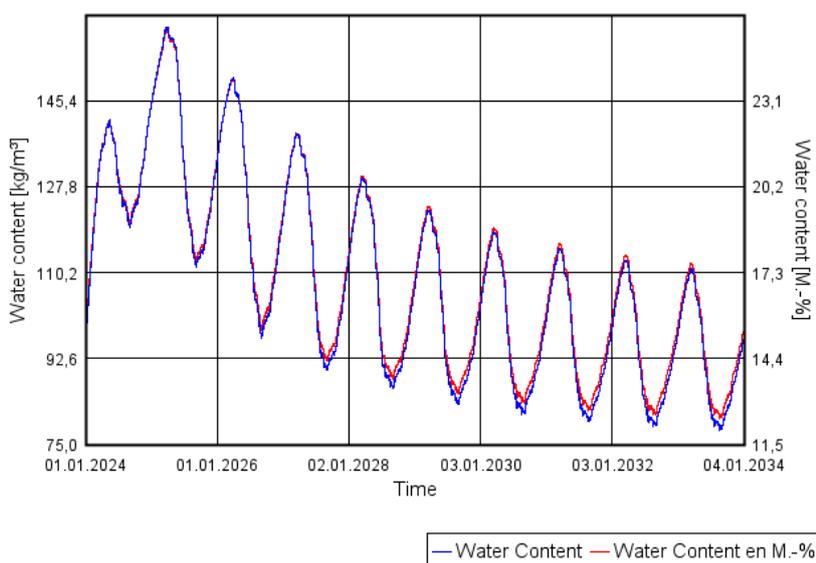


Figure 4-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille



Water Content OSB inter paille



Relative Humidity

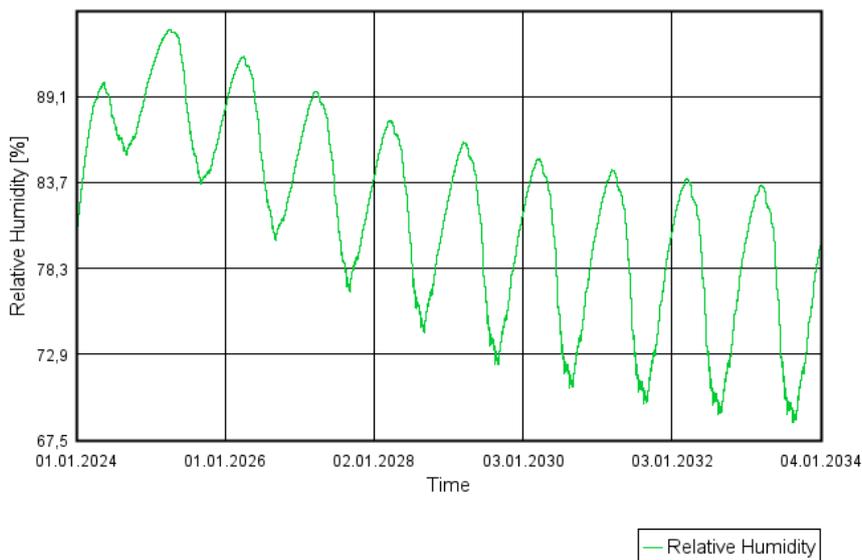
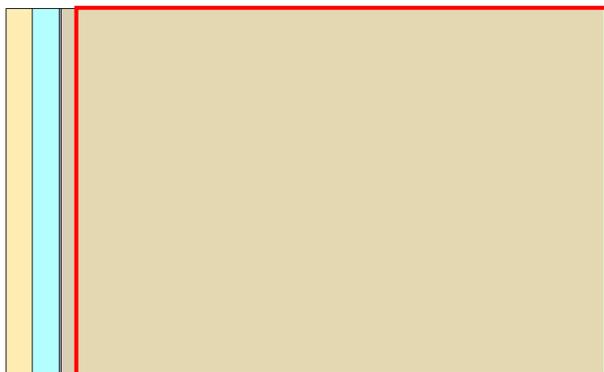
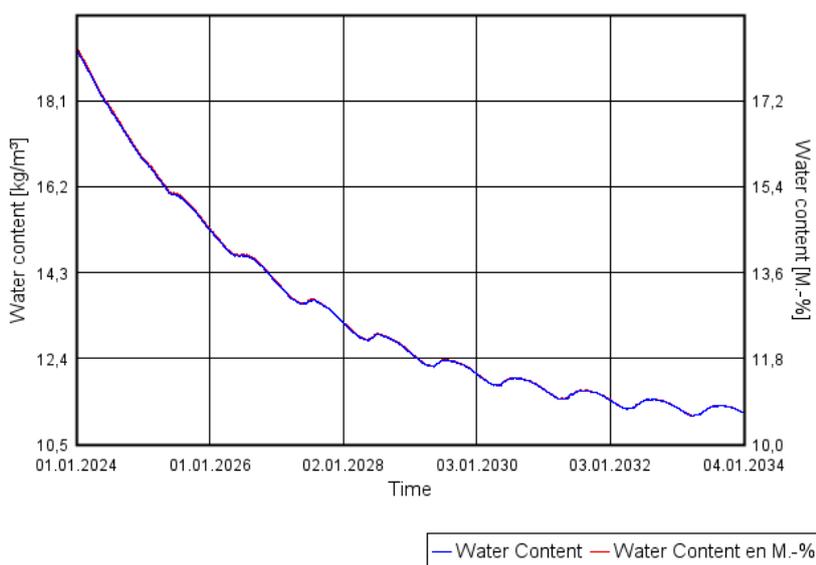


Figure 4-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Water Content paille



Relative Humidity

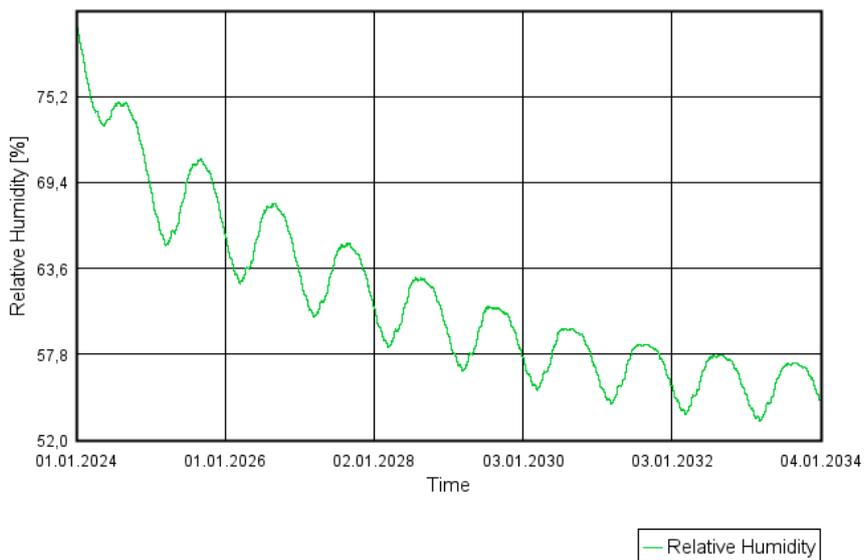
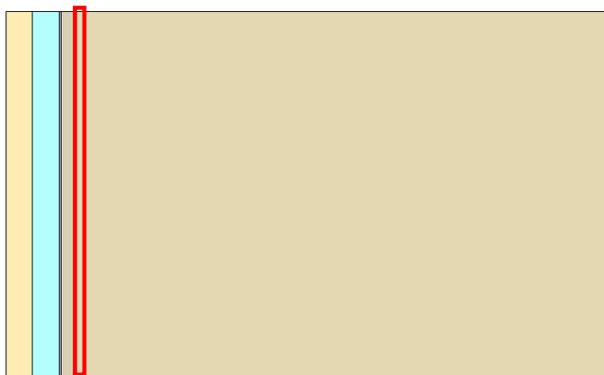
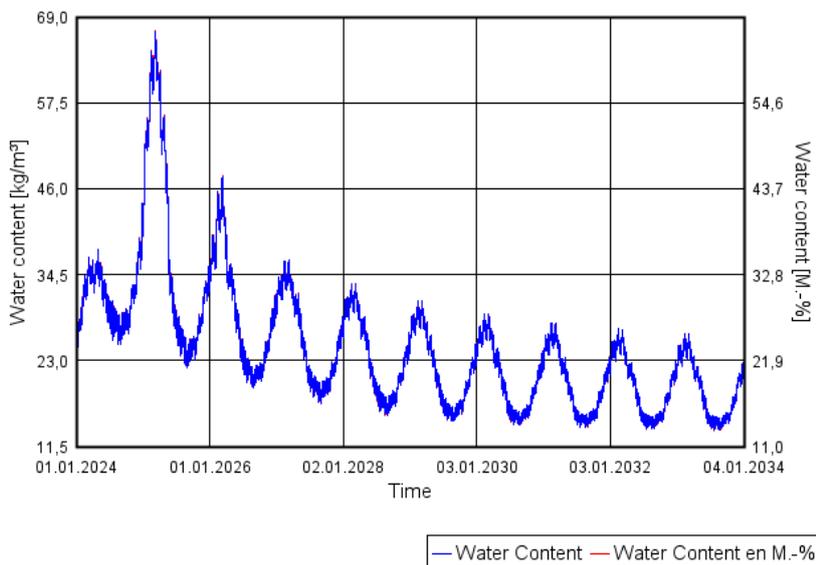


Figure 4-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB



Water Content paille inter OSB



Relative Humidity

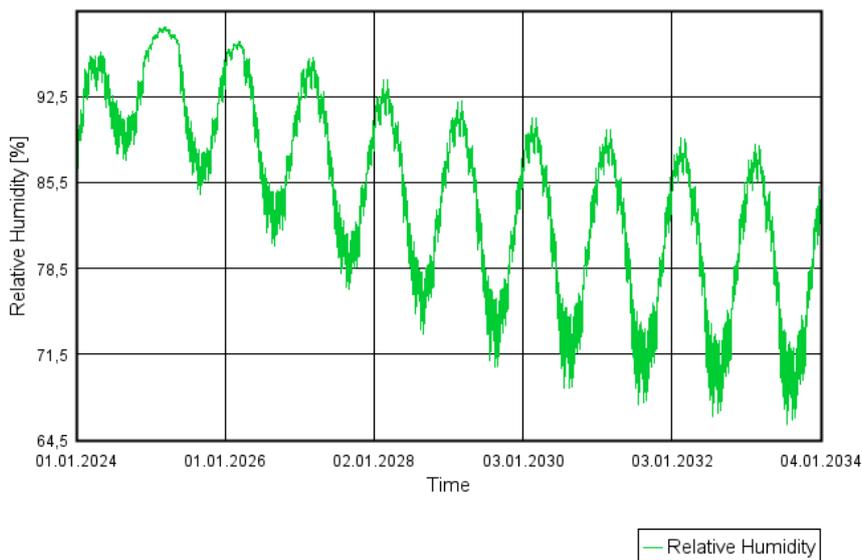
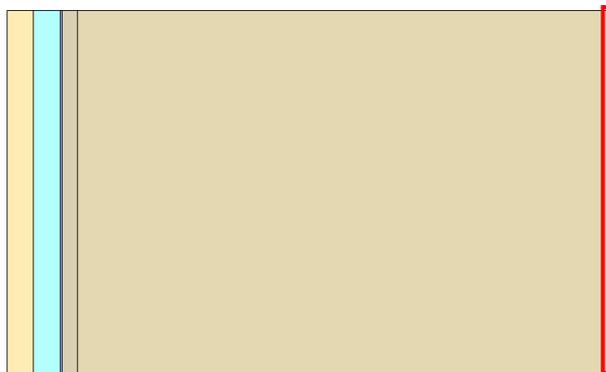
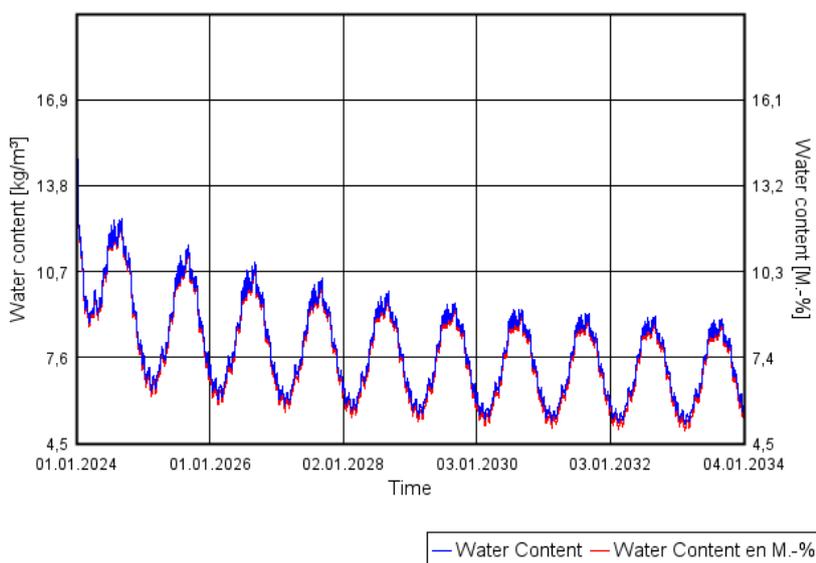


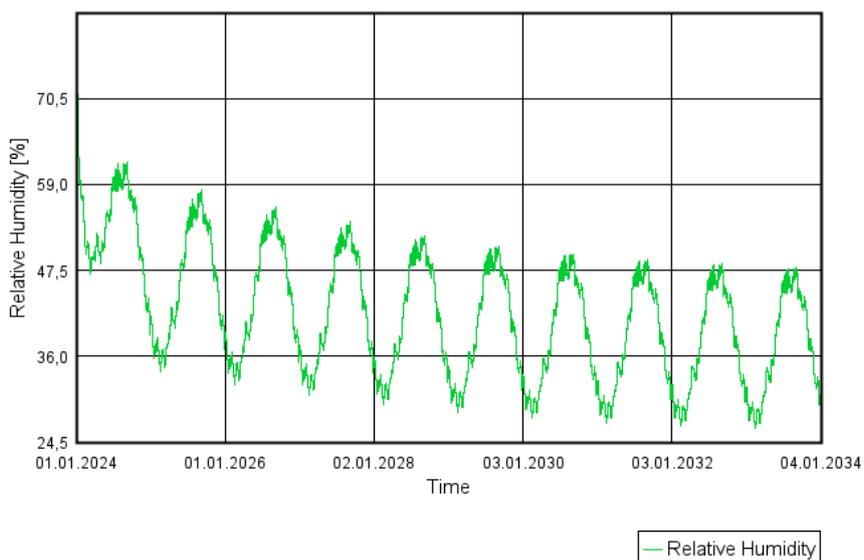
Figure 4-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le pare-vapeur



Water Content paille inter PV



Relative Humidity



Cas 5

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 5-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 5-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB (figure 5-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie (figure 5- d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille hachée (figure 5-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 5-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB (figure 5-g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le pare-vapeur (figure 5-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 5-a : Rappel du schéma de la paroi 5

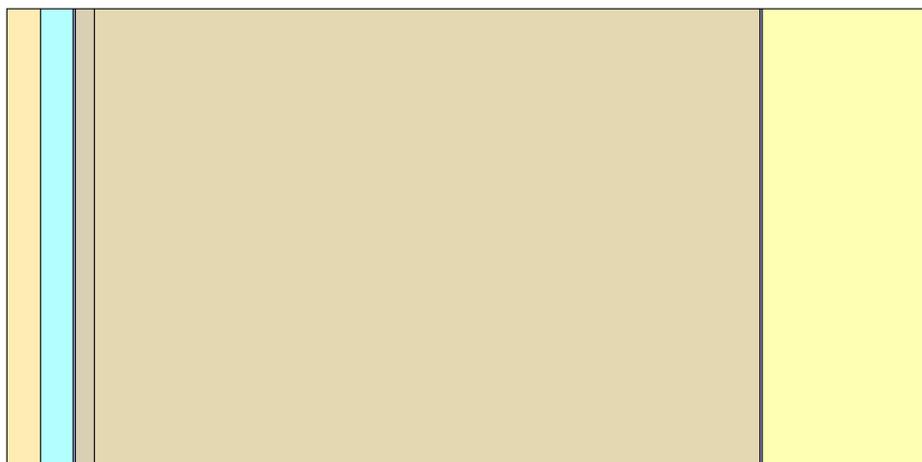


Figure 5-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

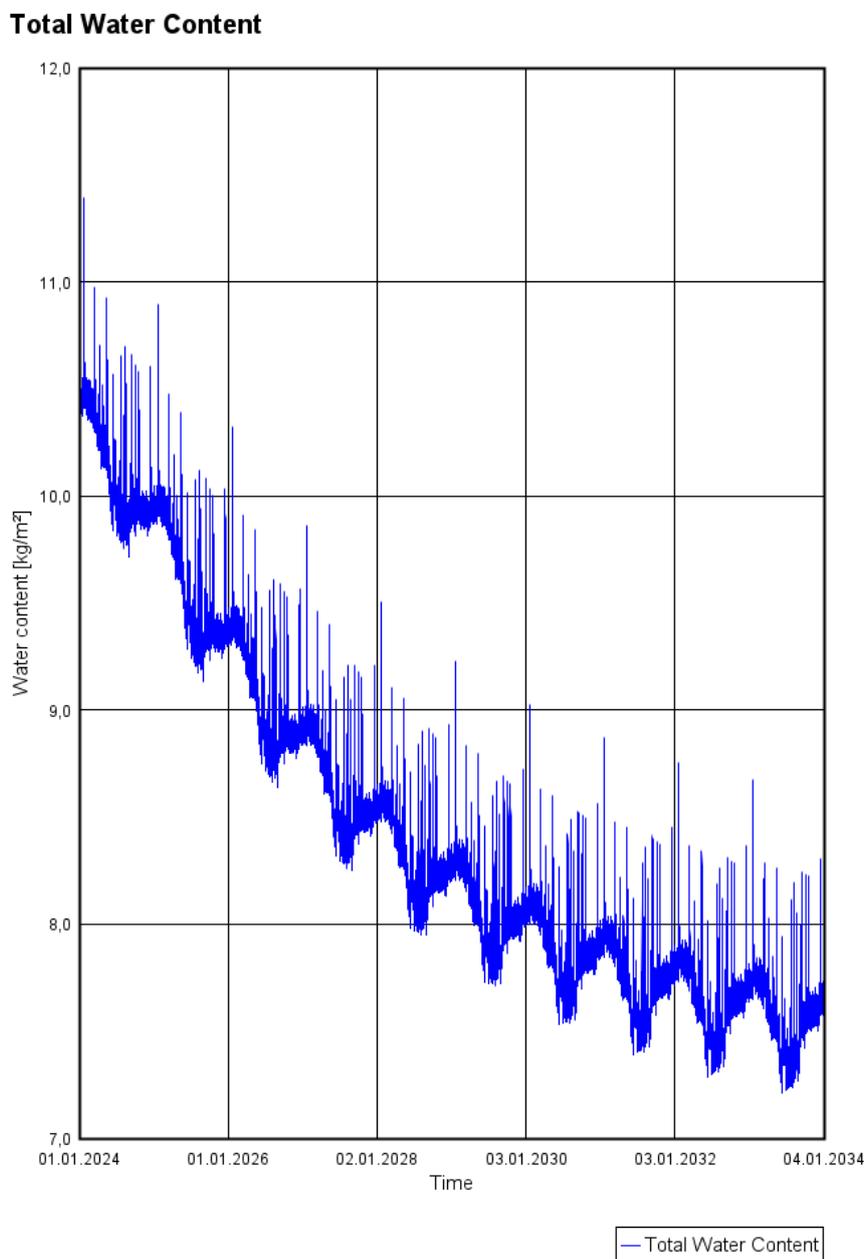


Figure 5-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB

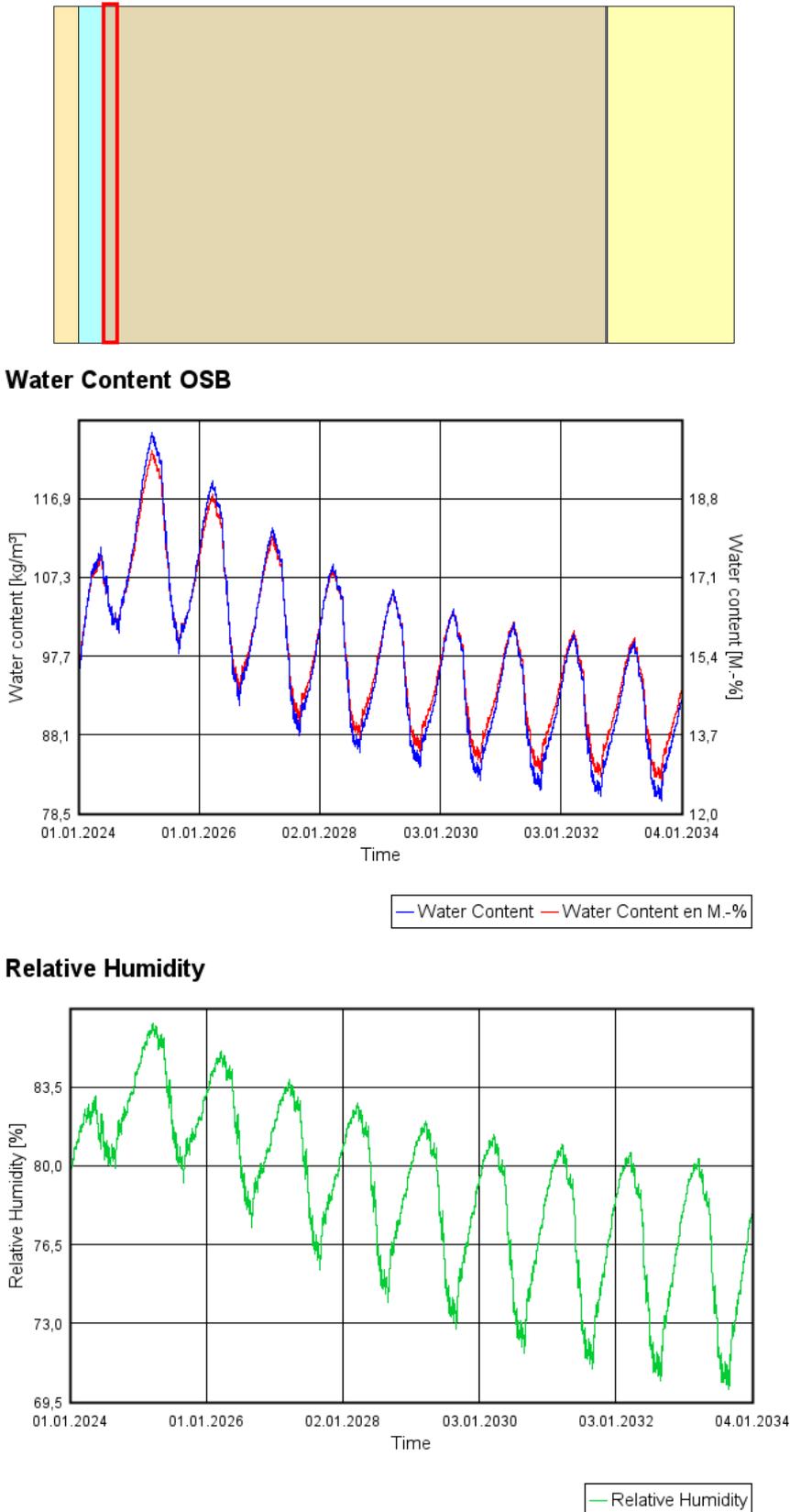
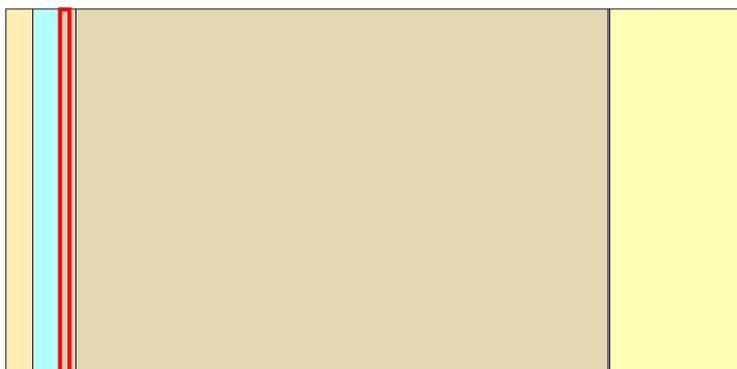
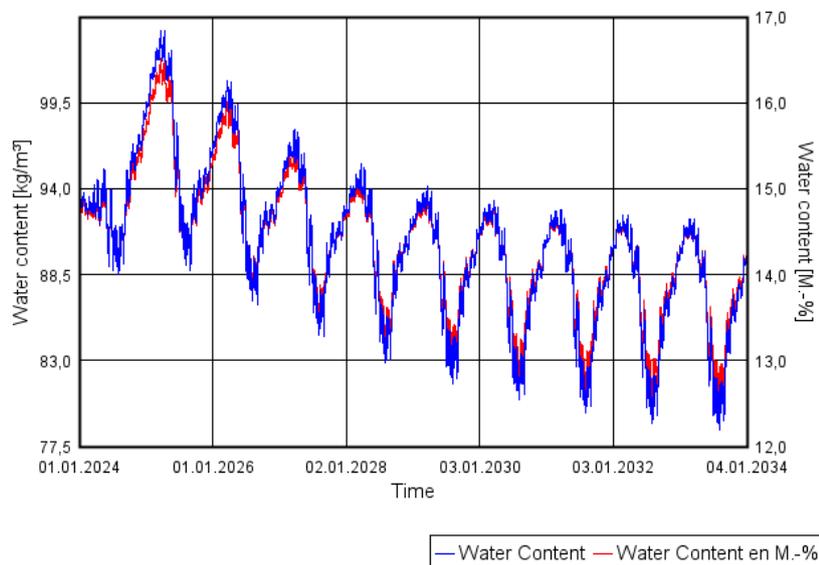


Figure 5-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie



Water Content OSB inter HPV



Relative Humidity

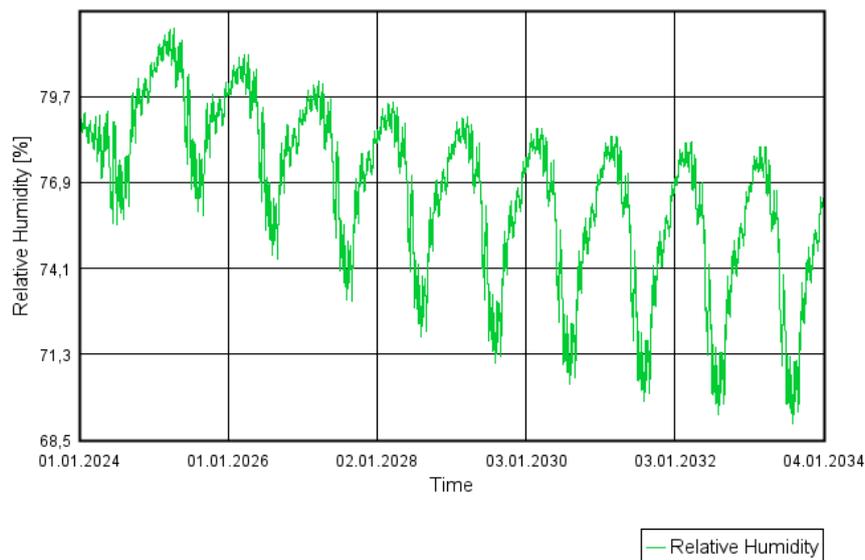
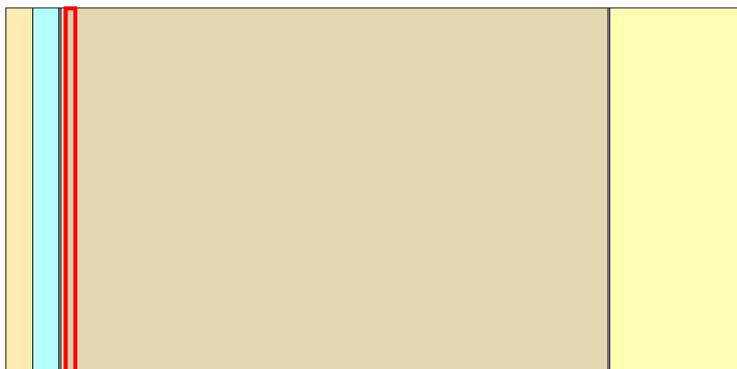
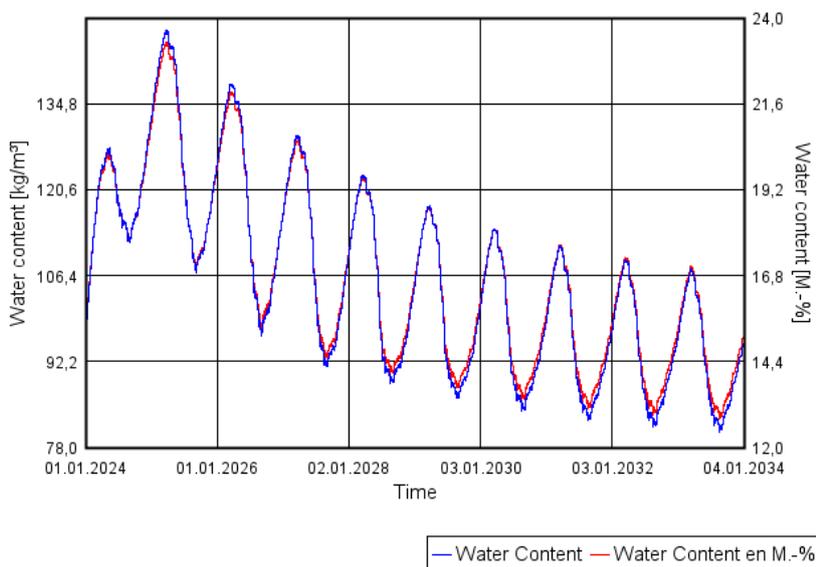


Figure 5-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille



Water Content OSB inter paille



Relative Humidity

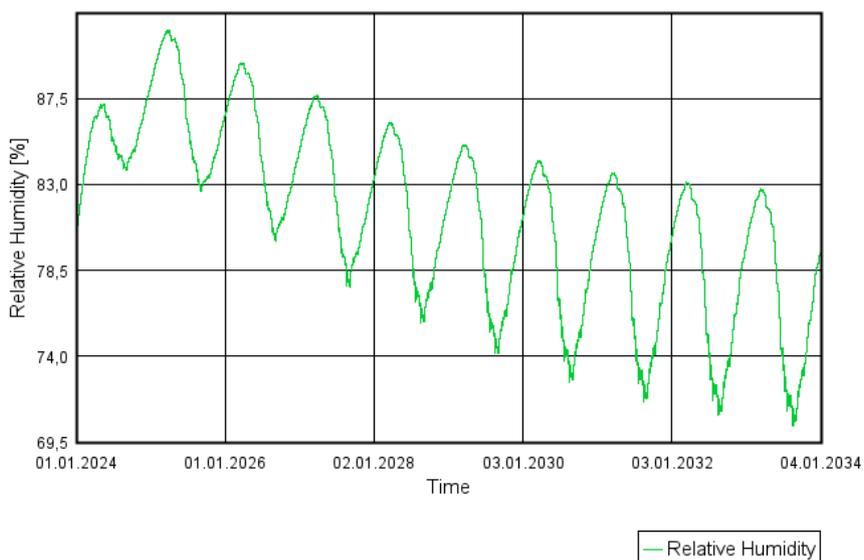
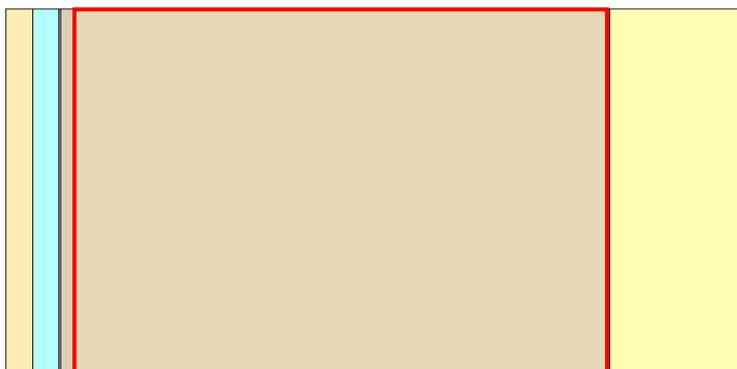
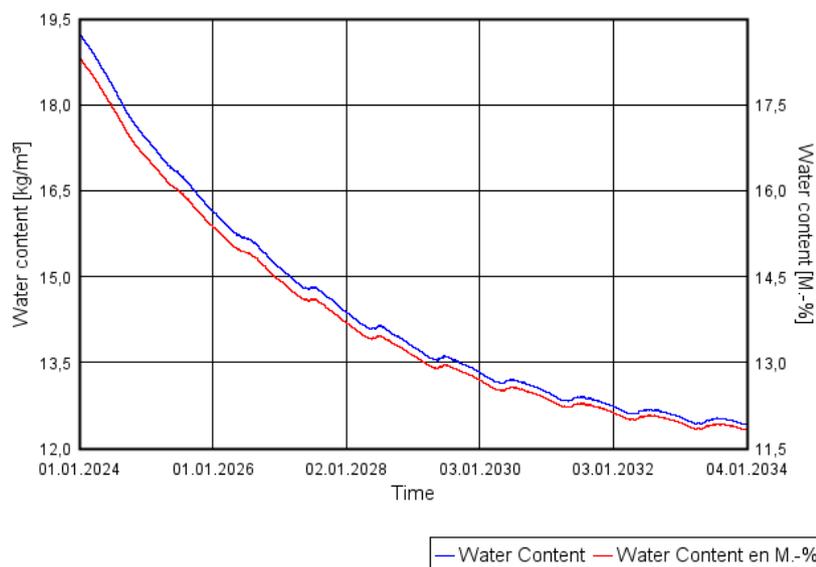


Figure 5-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Water Content paille



Relative Humidity

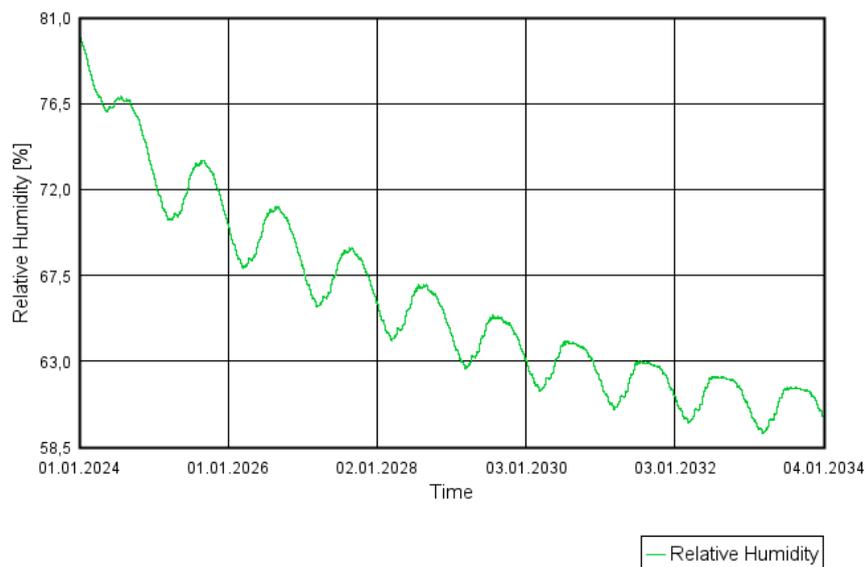
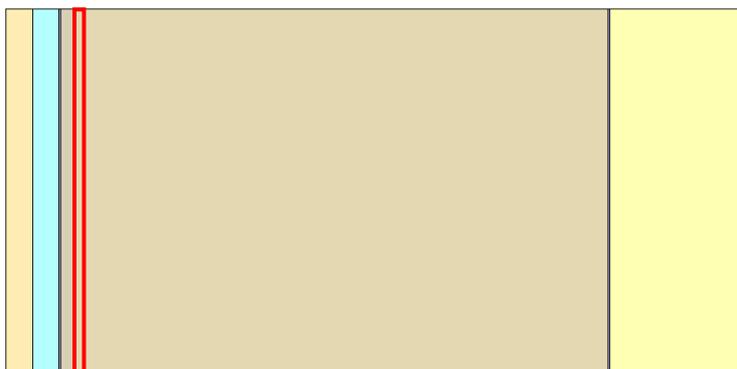
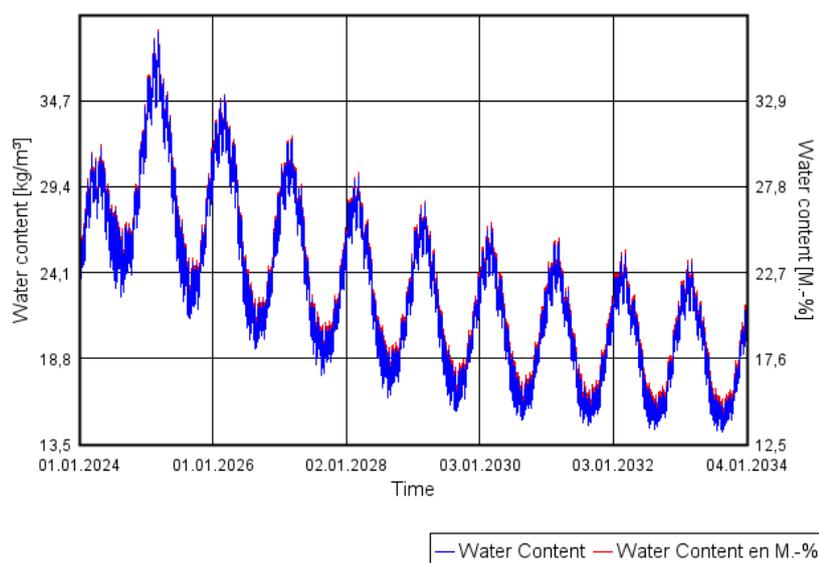


Figure 5-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB



Water Content paille inter OSB



Relative Humidity

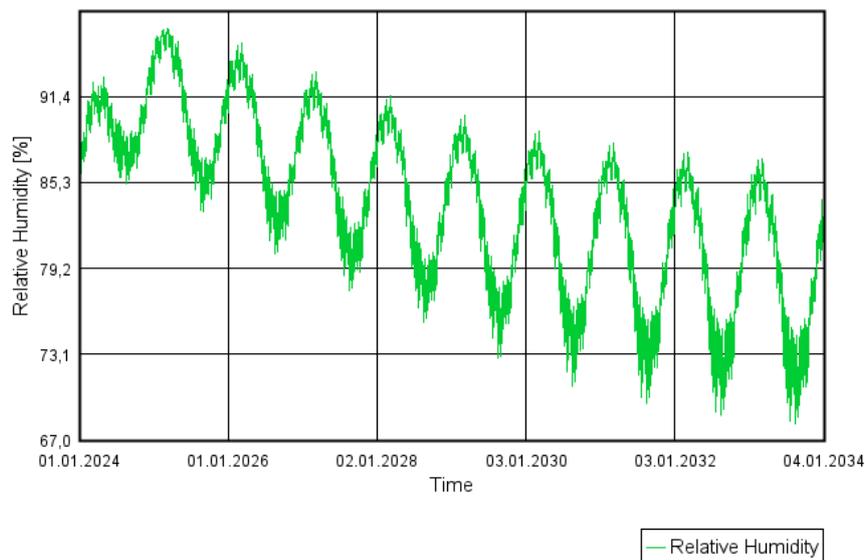
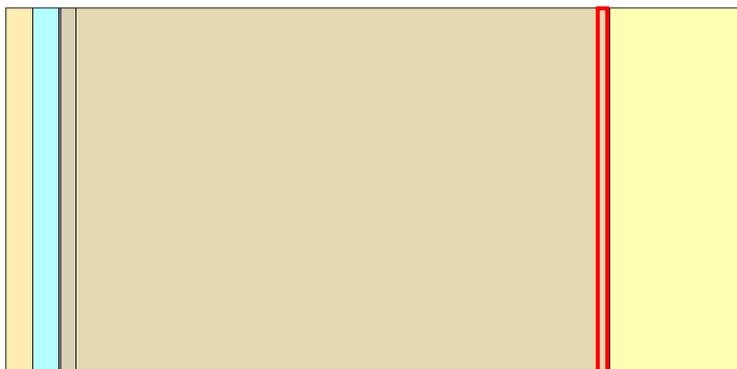
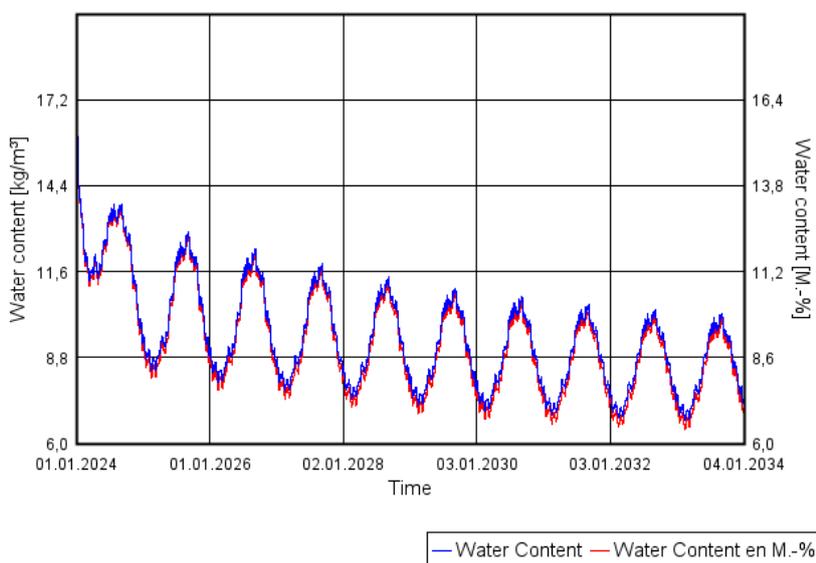


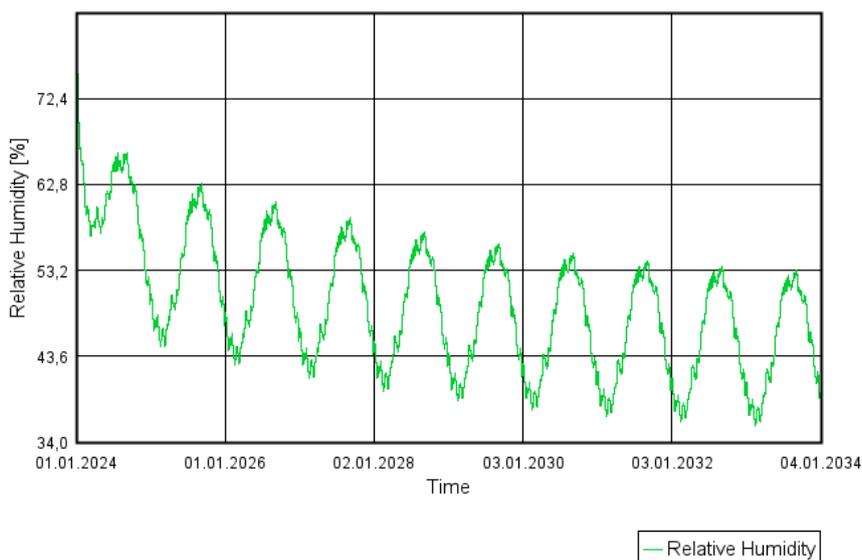
Figure 5-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le pare-vapeur



Water Content paille inter PV



Relative Humidity



Cas 6

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 6-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 6-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB (figure 6-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie (figure 6- d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille hachée (figure 6-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 6-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB (figure 6-g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le pare-vapeur (figure 6-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 6-a : Rappel du schéma de la paroi 6

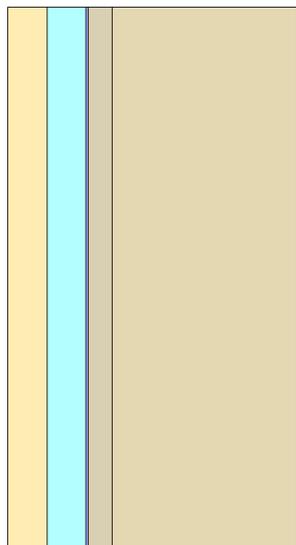


Figure 6-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

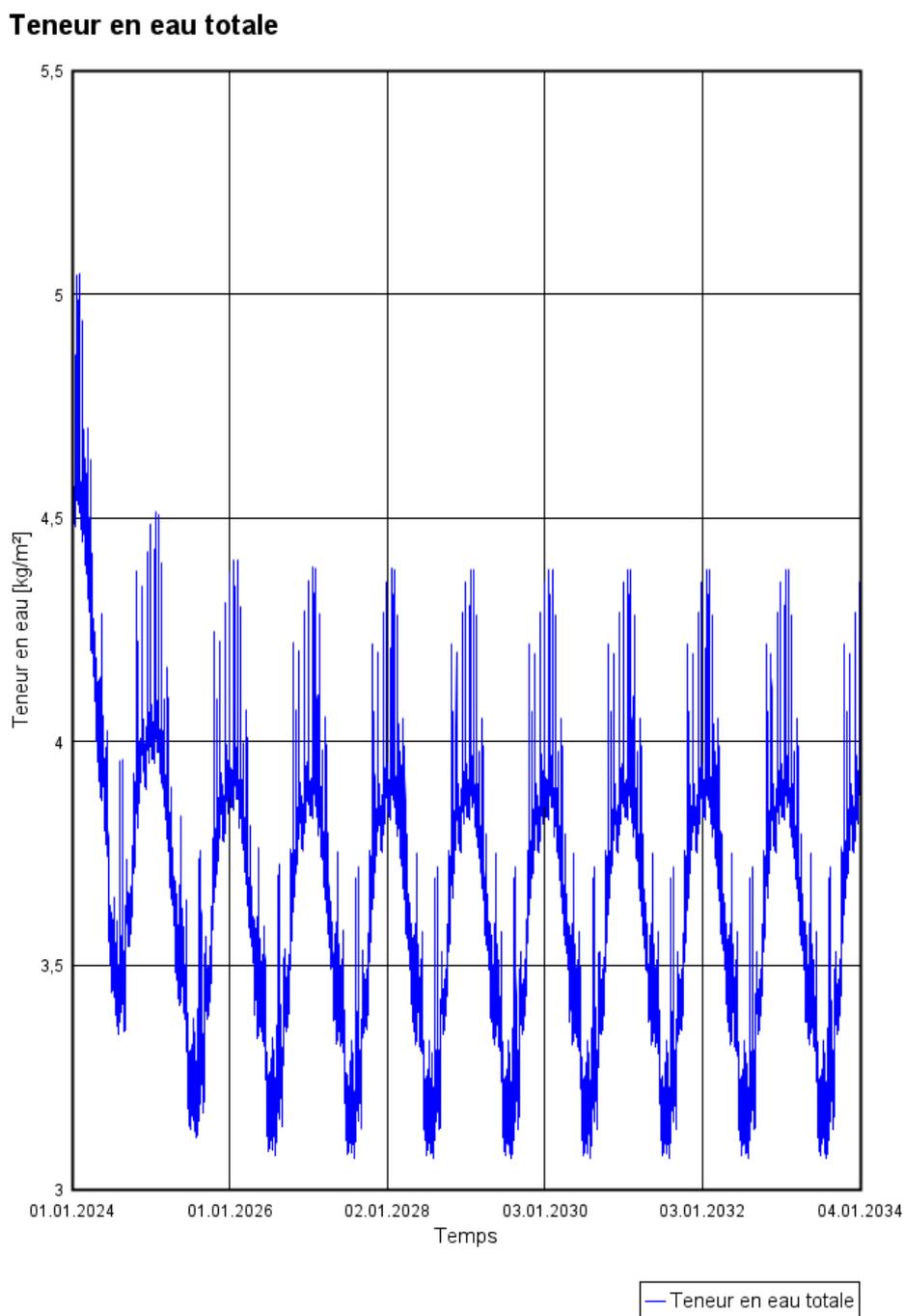
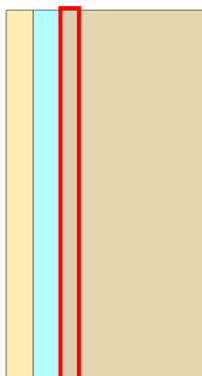
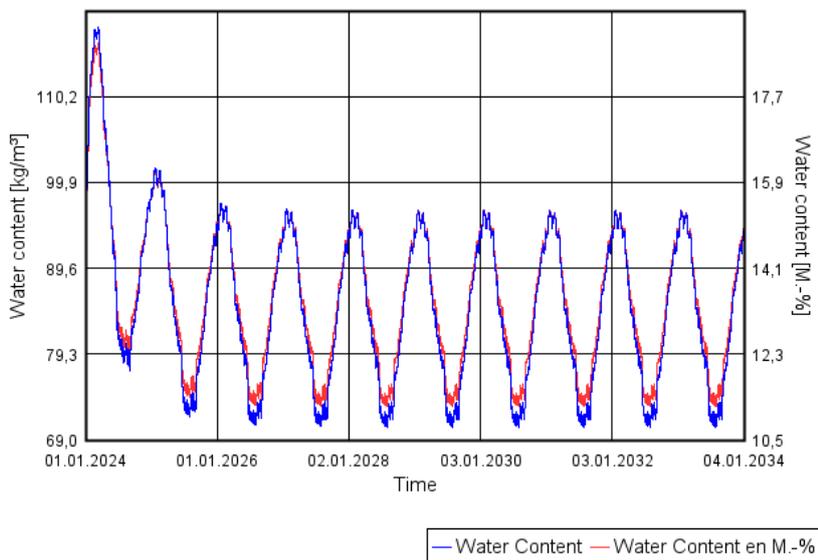


Figure 6-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB



Water Content OSB



Relative Humidity

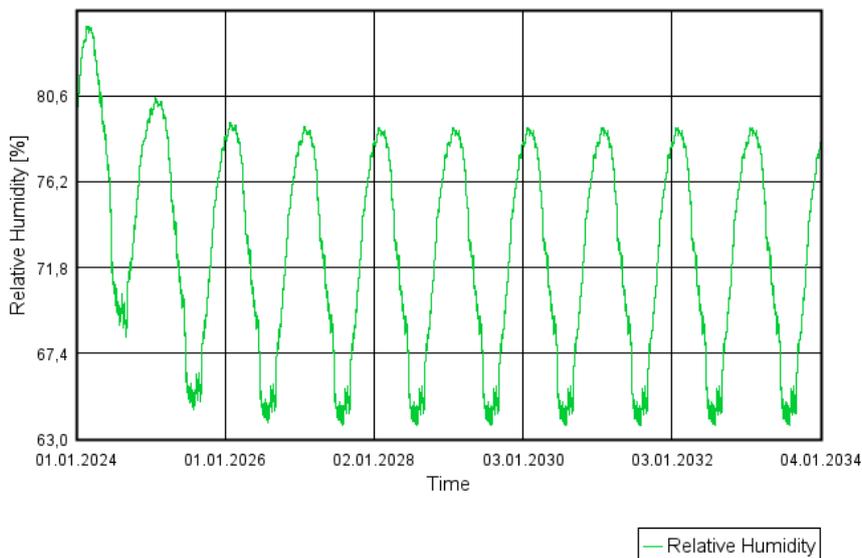
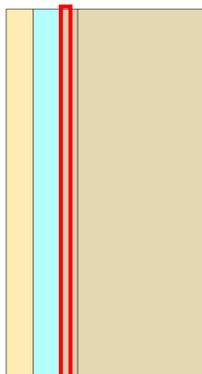
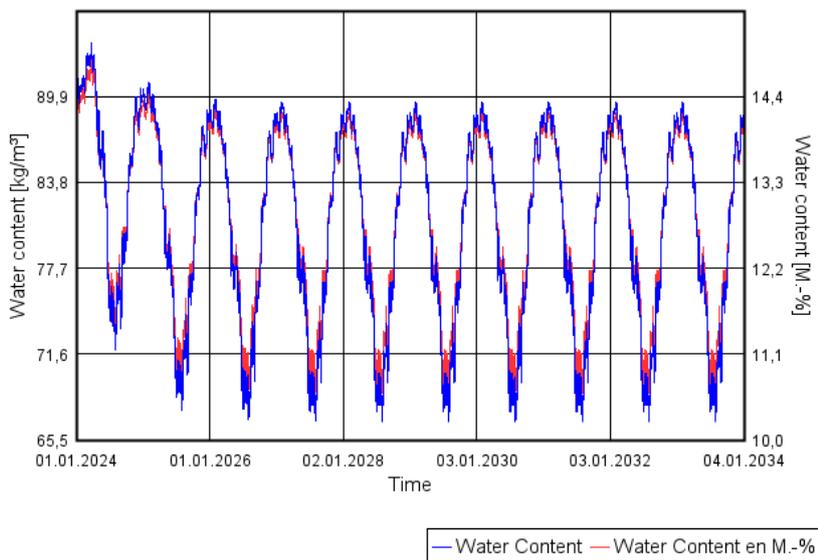


Figure 6-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie



Water Content OSB inter HPV



Relative Humidity

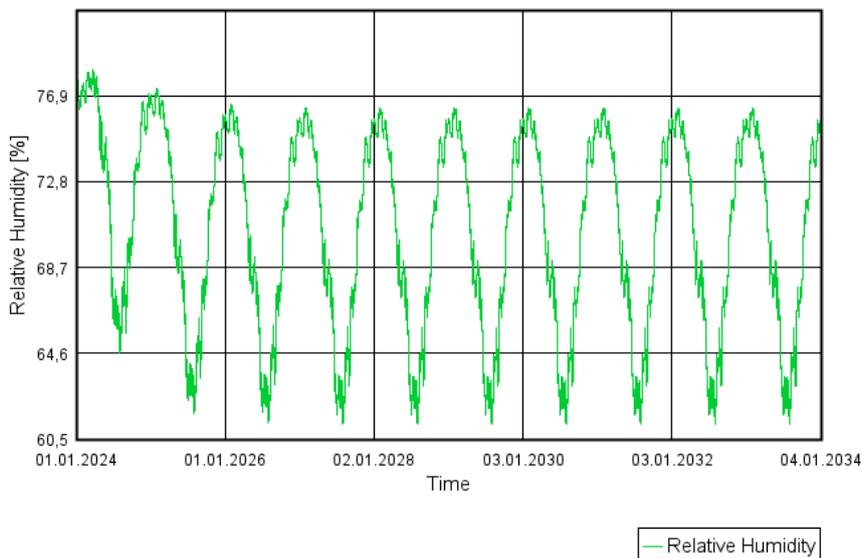
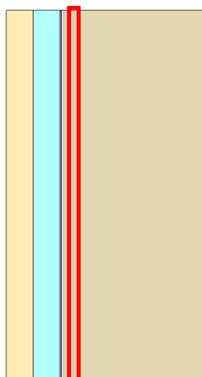
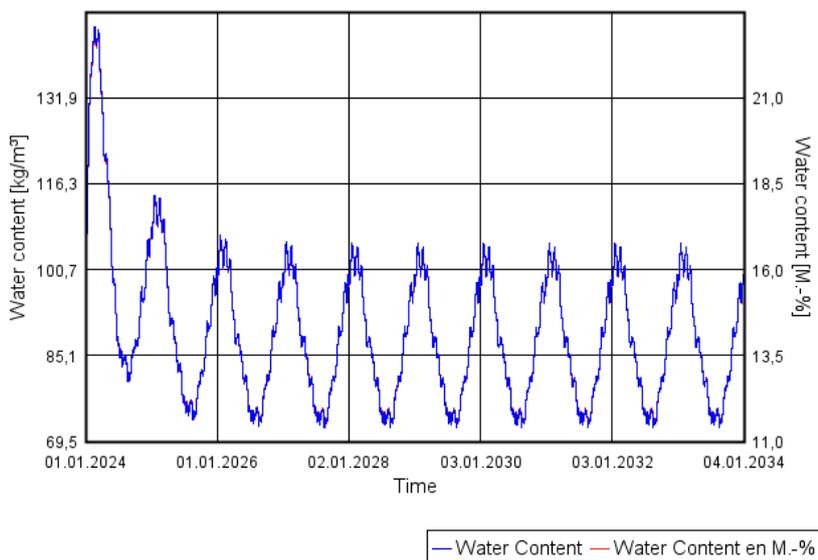


Figure 6-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille



Water Content OSB inter paille



Relative Humidity

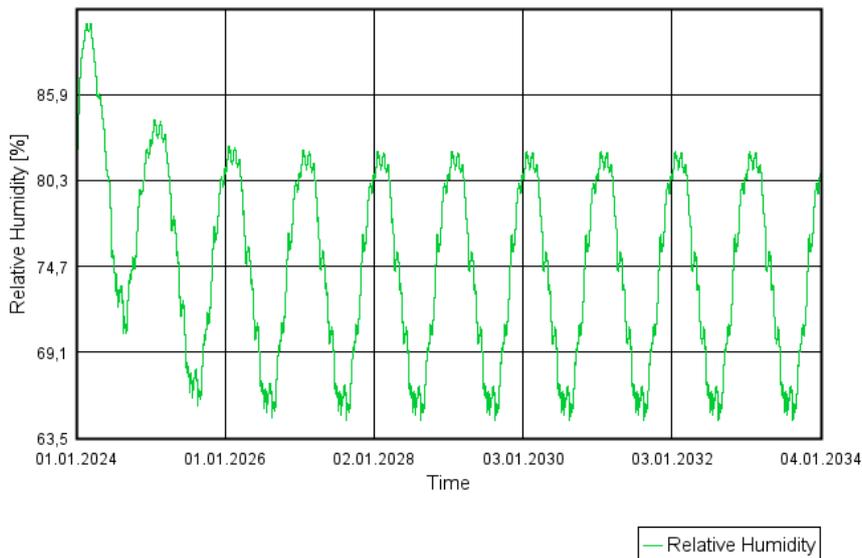
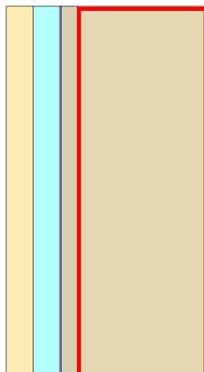
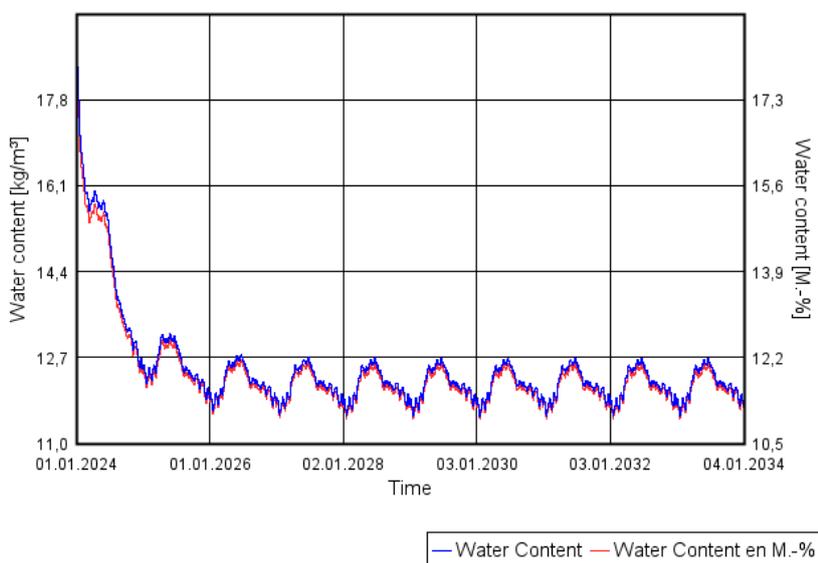


Figure 6-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Water Content paille



Relative Humidity

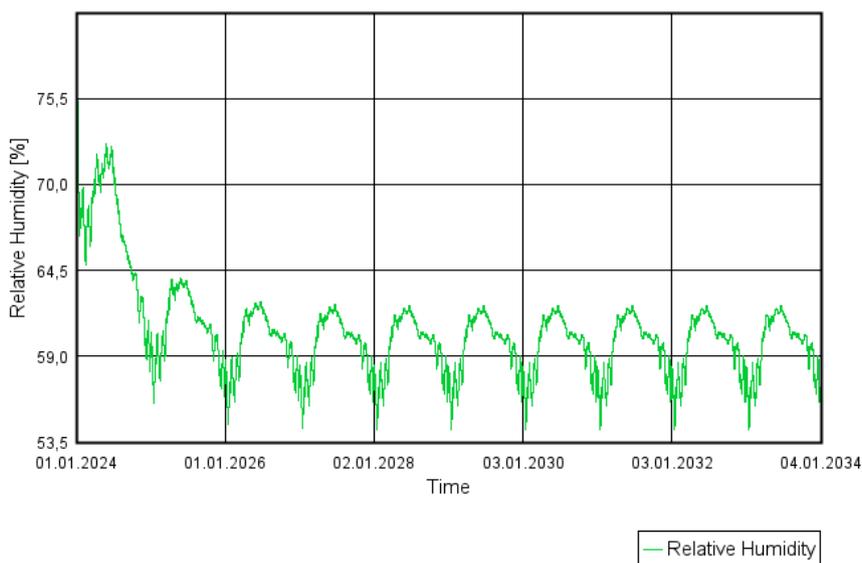
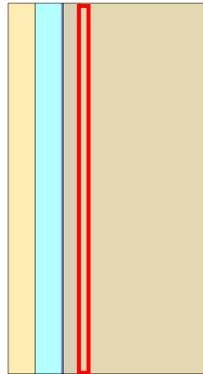
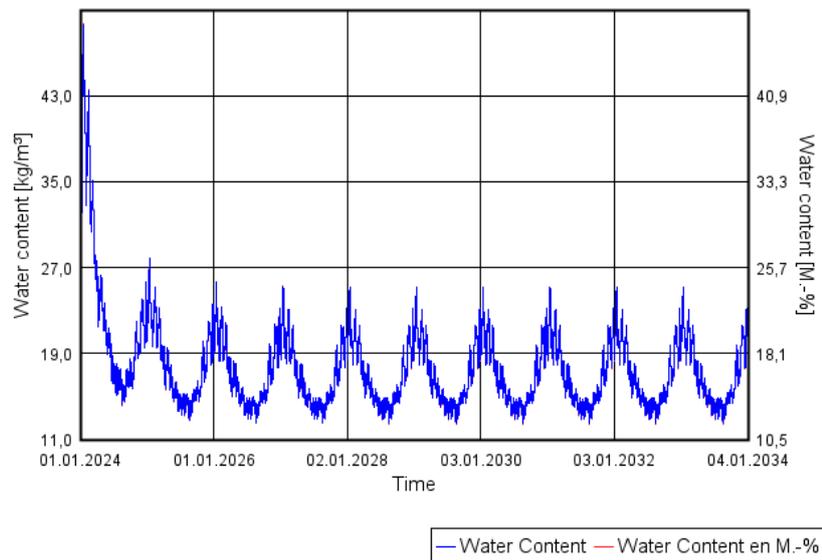


Figure 6-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB



Water Content paille inter OSB



Relative Humidity

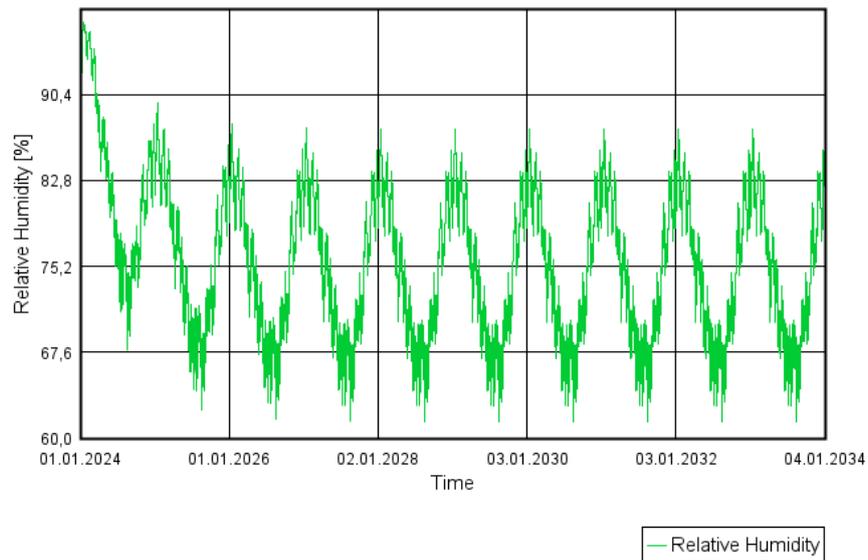
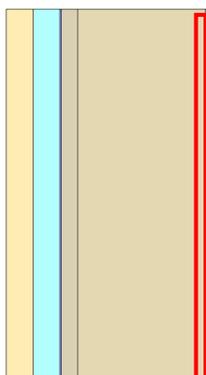
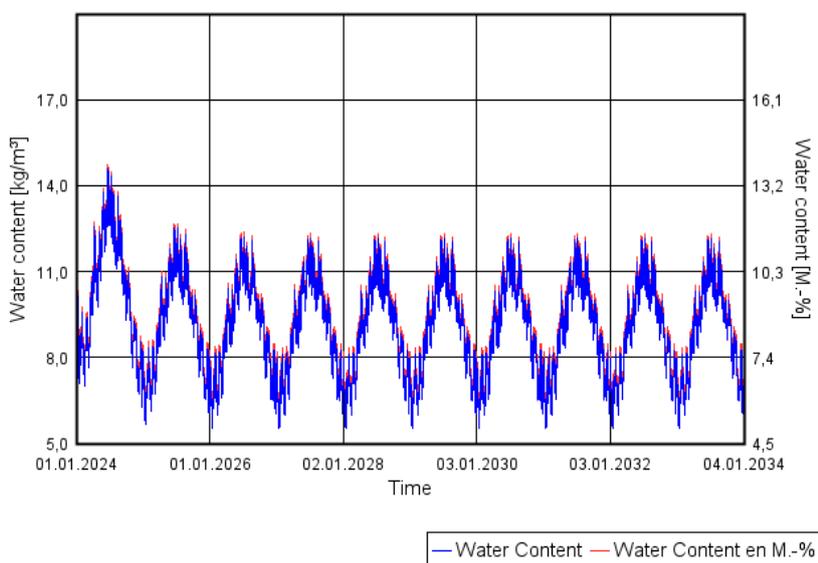


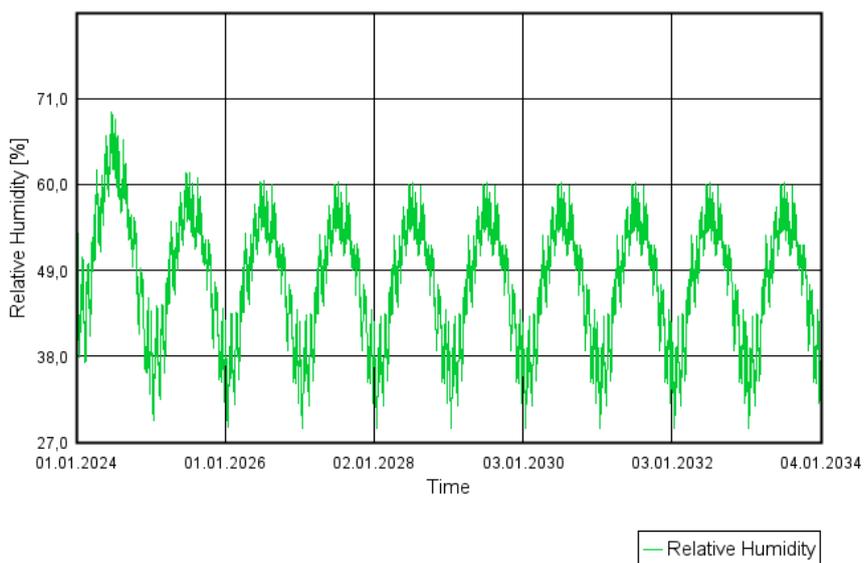
Figure 6-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le pare-vapeur



Water Content paille inter PV



Relative Humidity



Cas 7

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 7-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 7-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB (figure 7-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie (figure 7 d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille hachée (figure 7-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 7-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB (figure 7-g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le pare-vapeur (figure 7-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 7-a : Rappel du schéma de la paroi 7

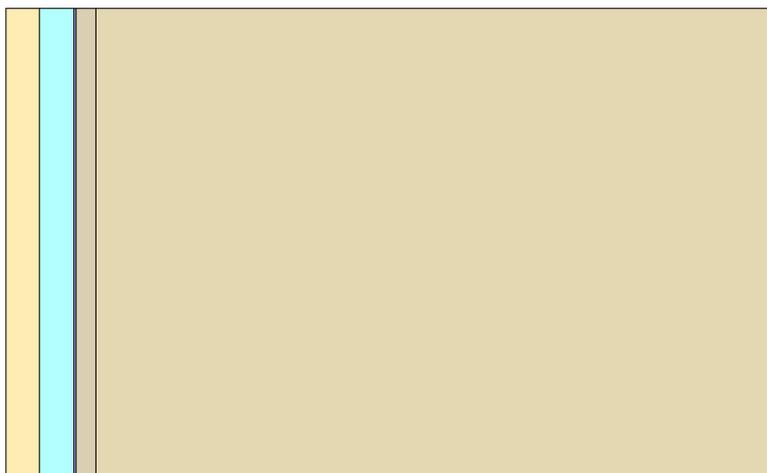


Figure 7-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

Teneur en eau totale

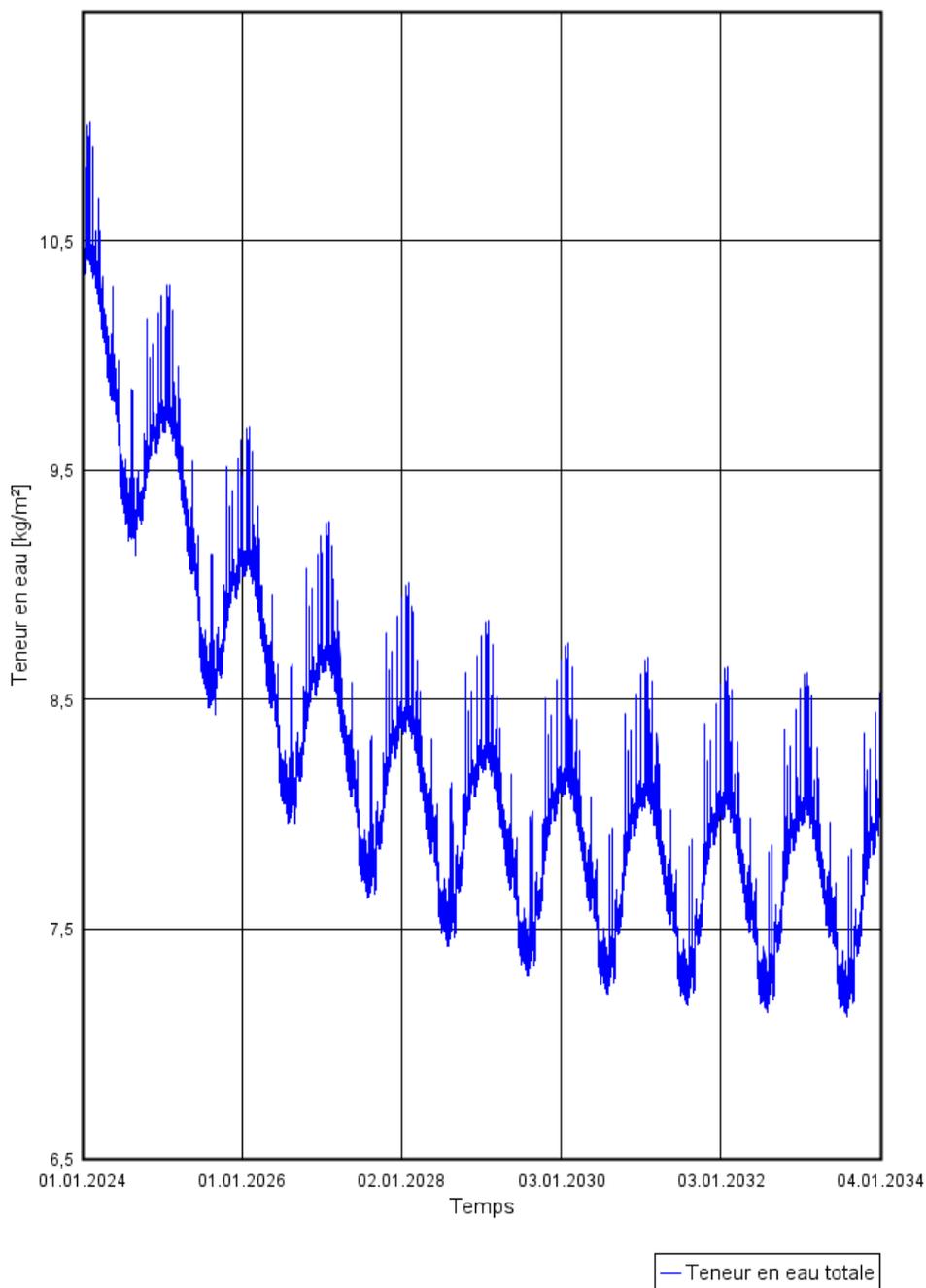
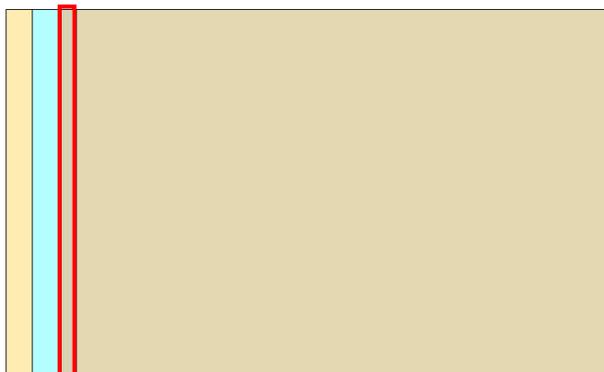
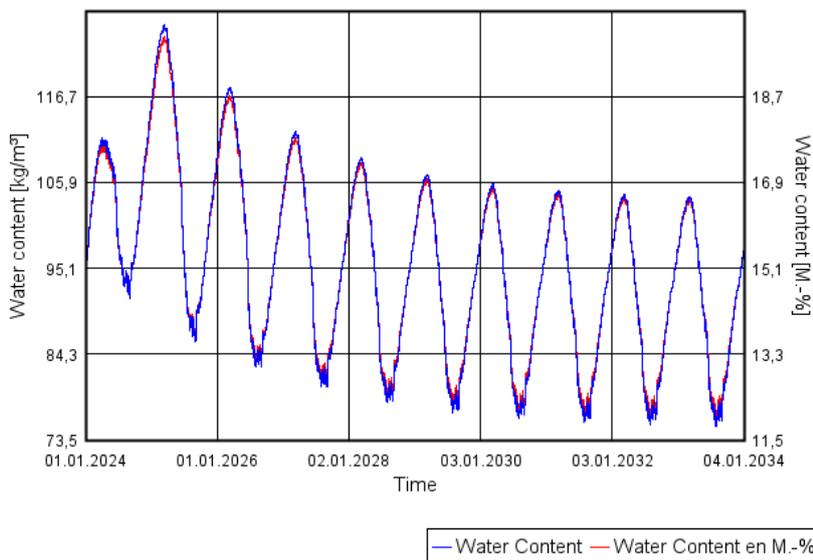


Figure 7-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB



Water Content OSB



Relative Humidity

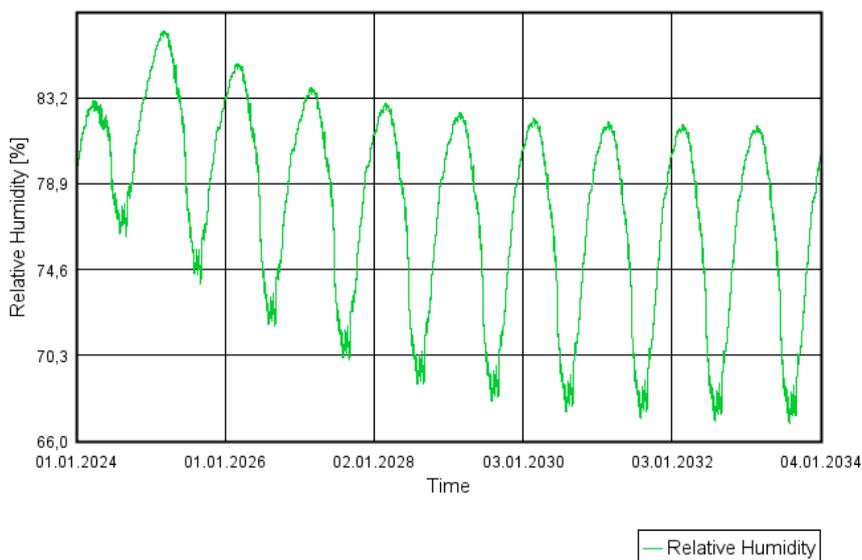
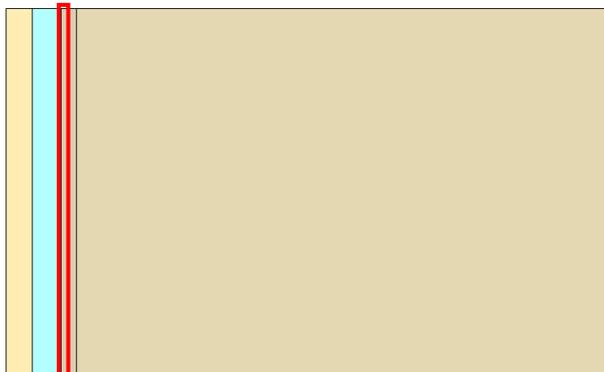
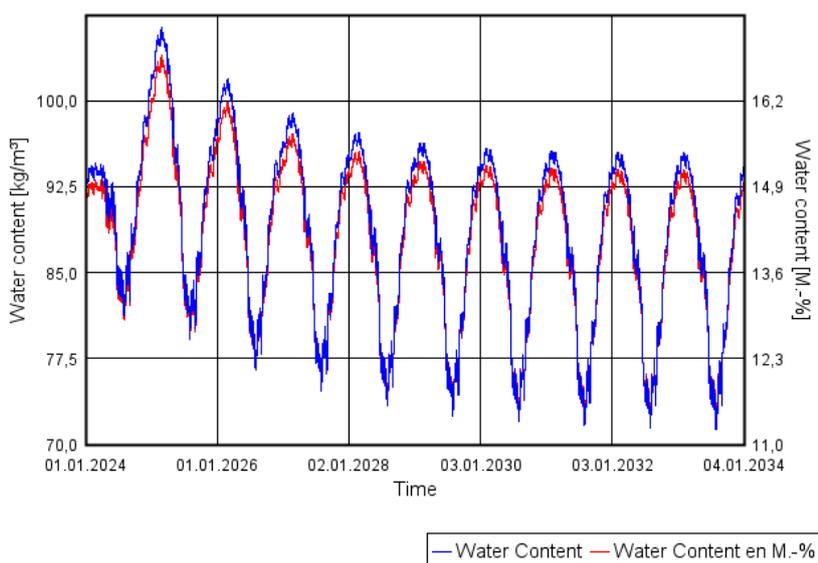


Figure 7-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie



Water Content OSB inter HPV



Relative Humidity

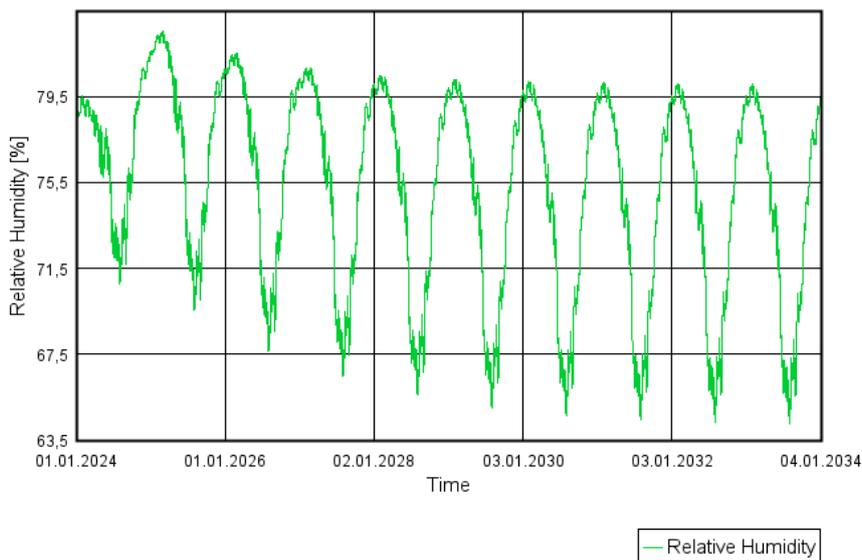
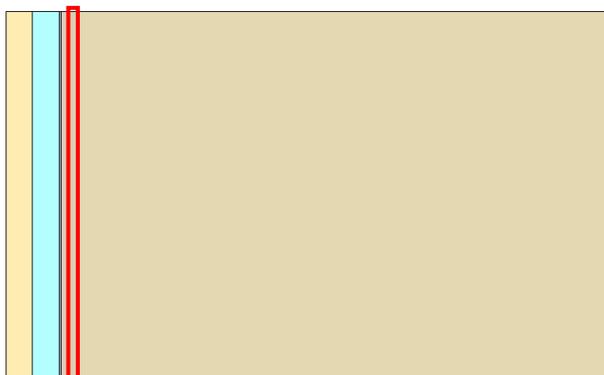
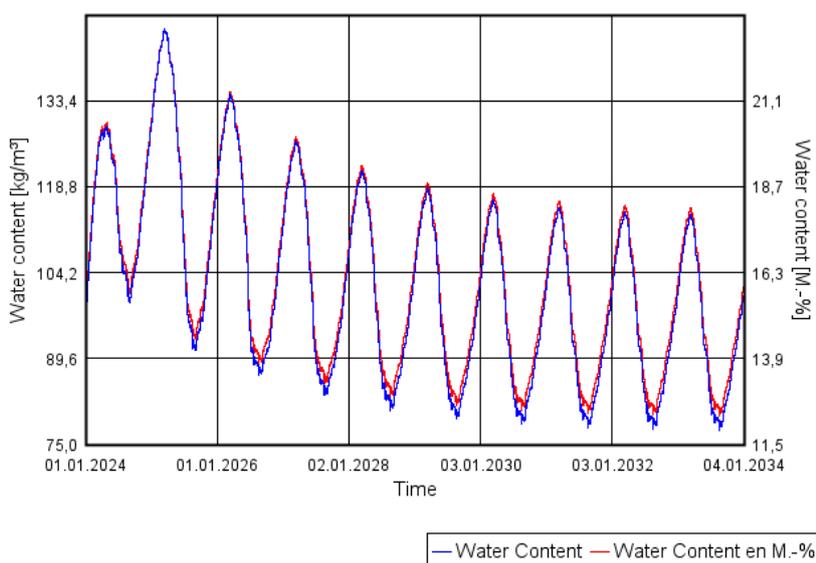


Figure 7-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille



Water Content OSB inter paille



Relative Humidity

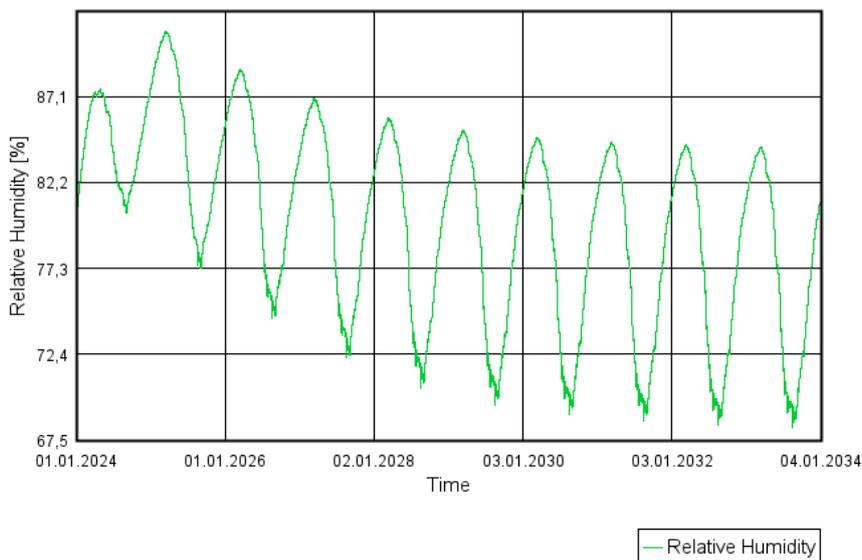
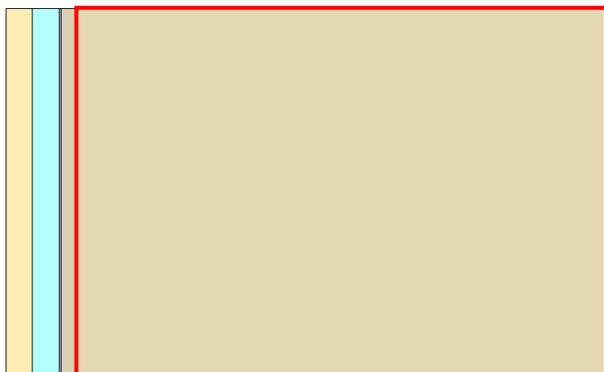
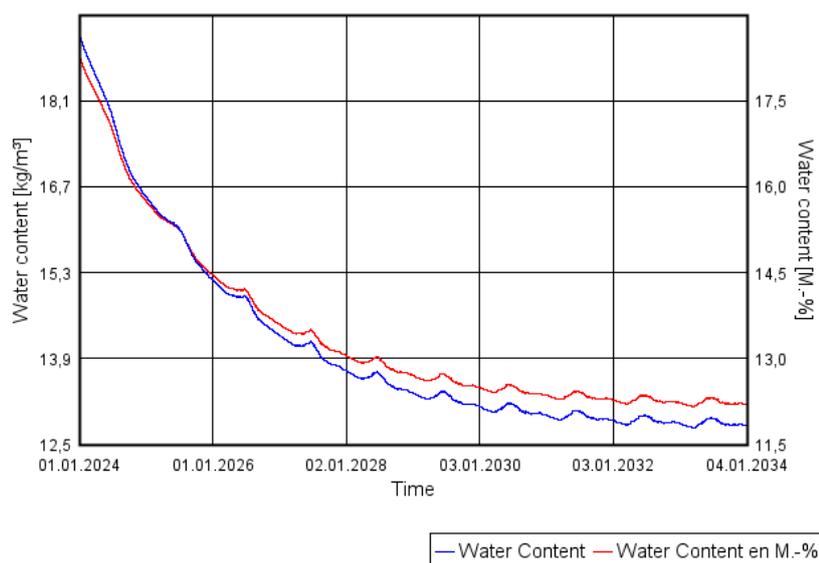


Figure 7-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Water Content paille



Relative Humidity

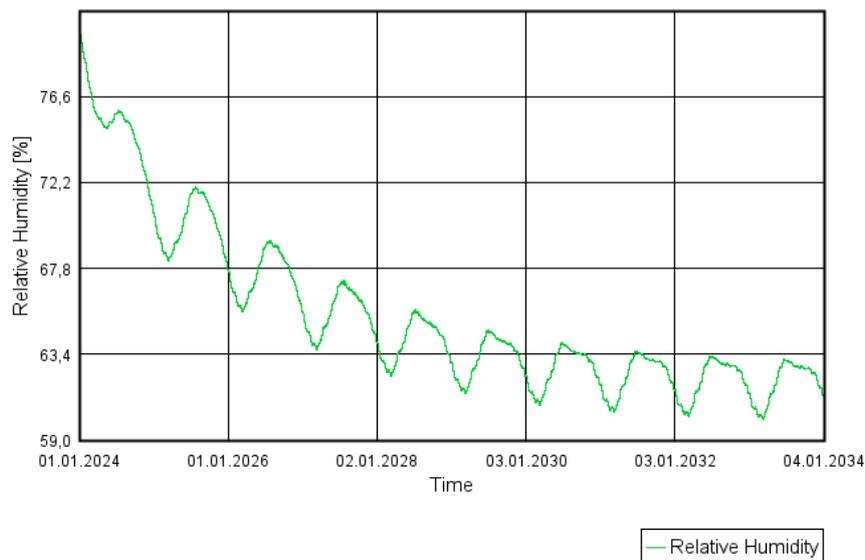
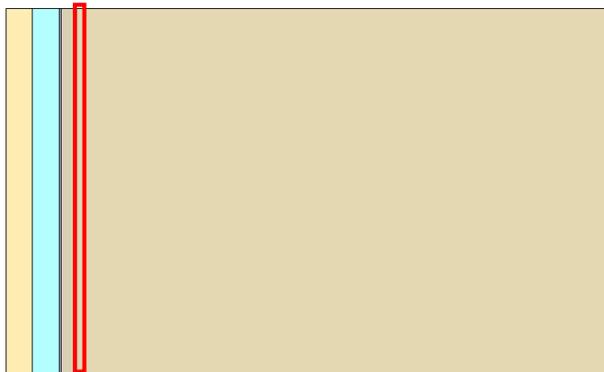
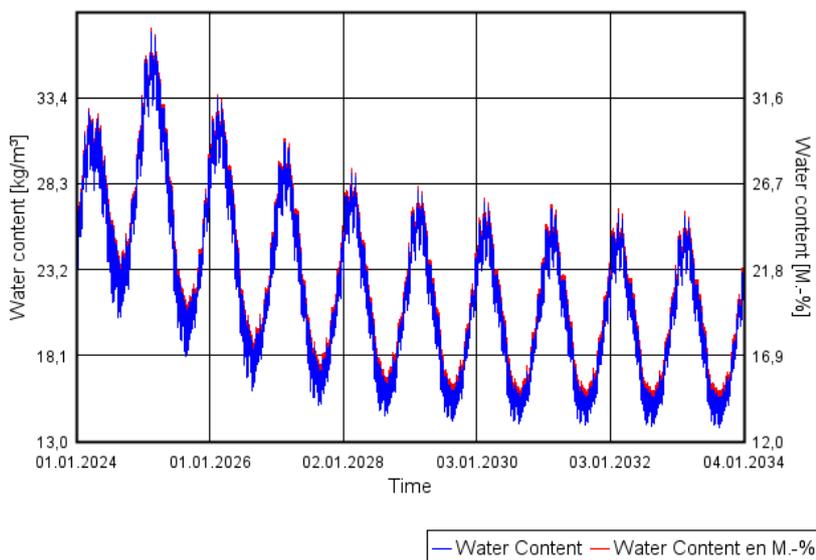


Figure 7-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB



Water Content paille inter OSB



Relative Humidity

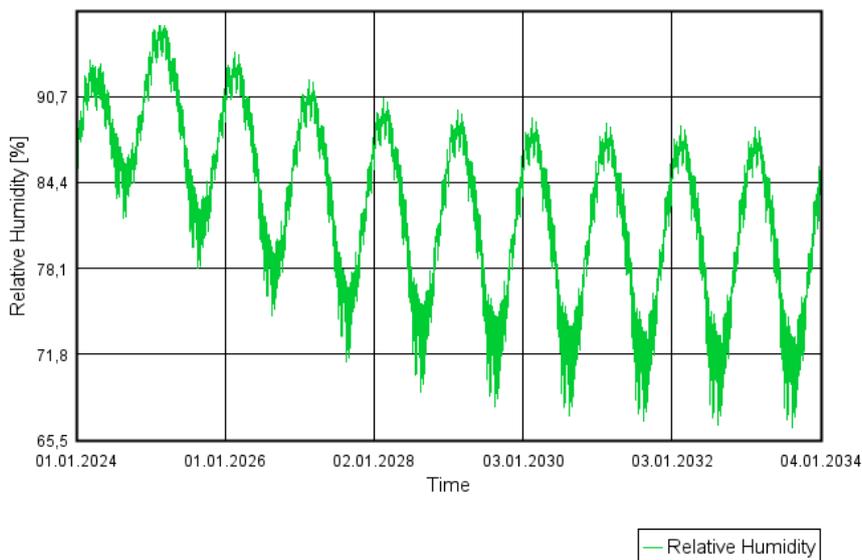
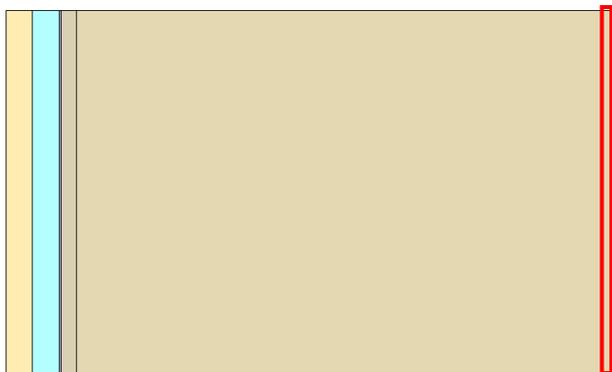
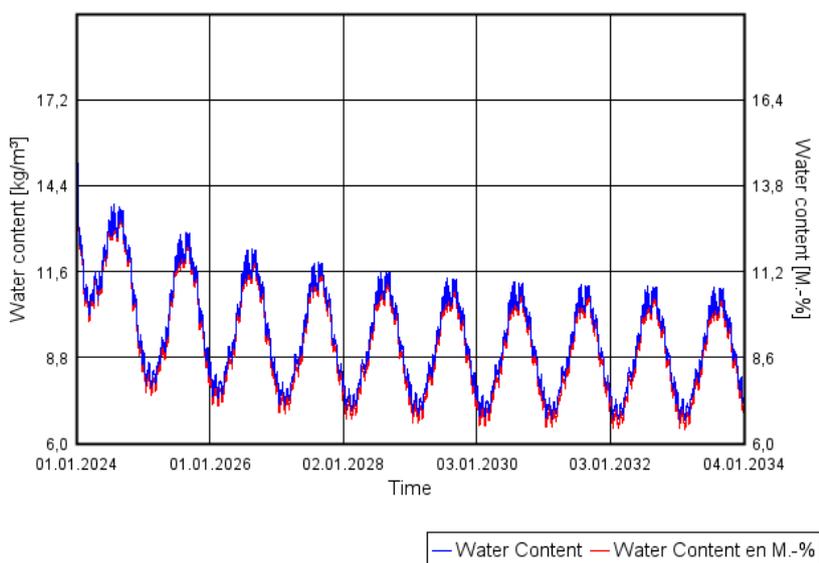


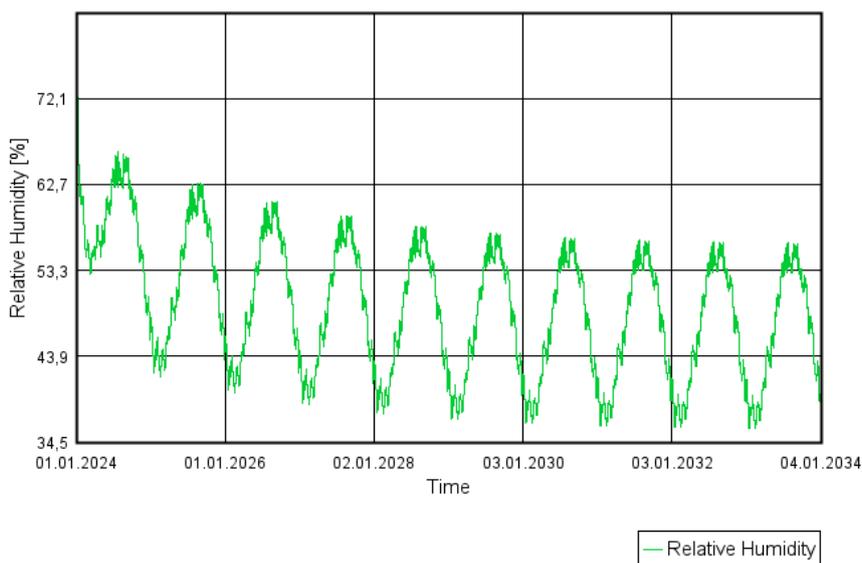
Figure 7-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le pare-vapeur



Water Content paille inter PV



Relative Humidity



Cas 8

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 8-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 8-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB (figure 8-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie (figure 8 d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille hachée (figure 8-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 8-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB (figure 8-g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le pare-vapeur (figure 8-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 8-a : Rappel du schéma de la paroi 8

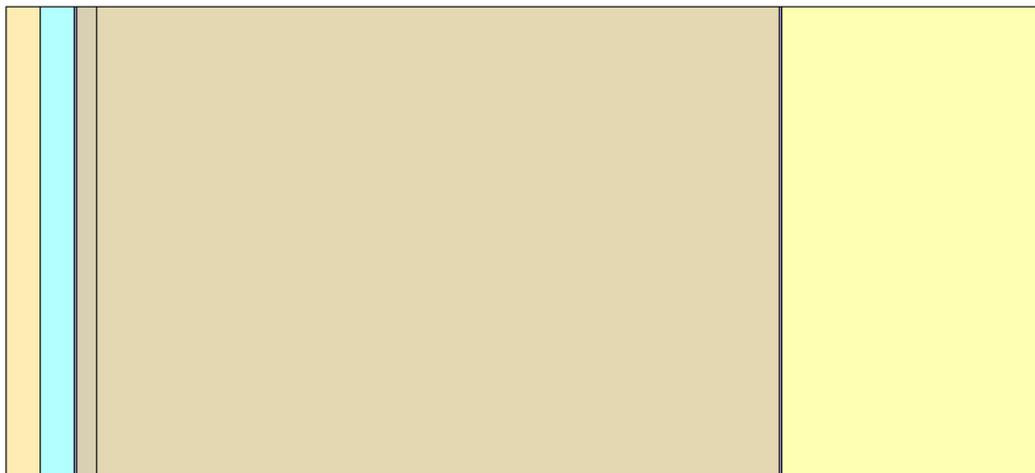


Figure 8-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

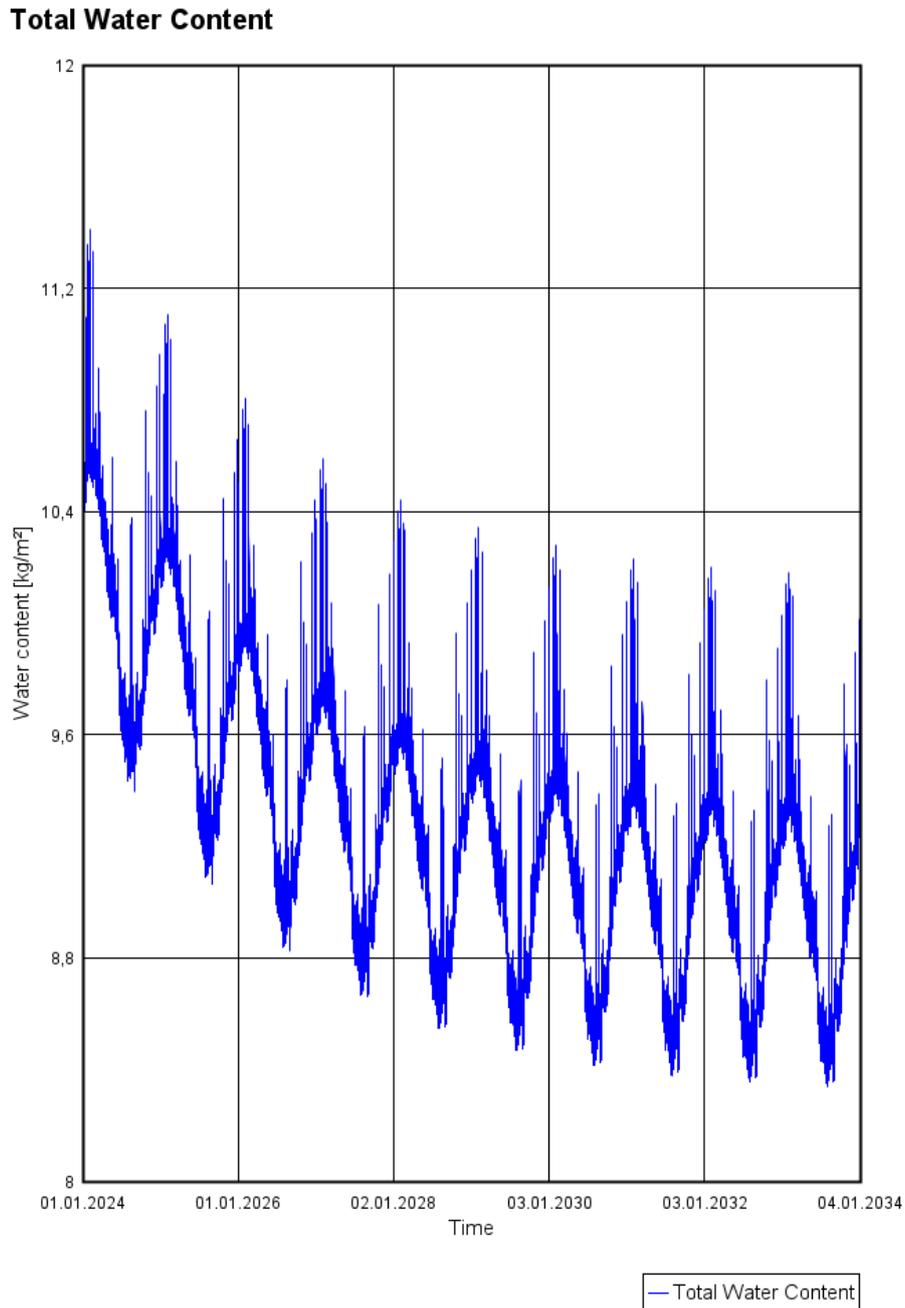
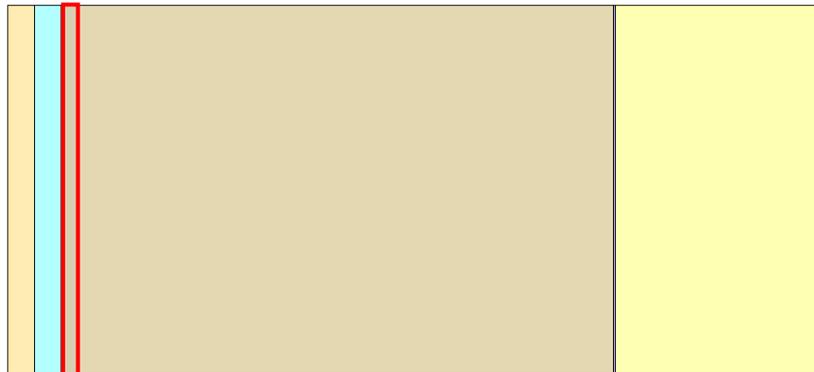
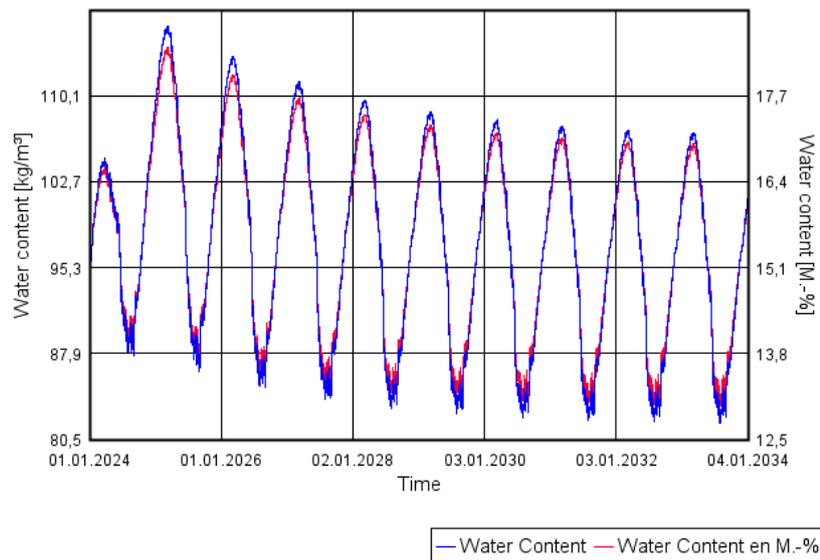


Figure 8-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB



Water Content OSB



Relative Humidity

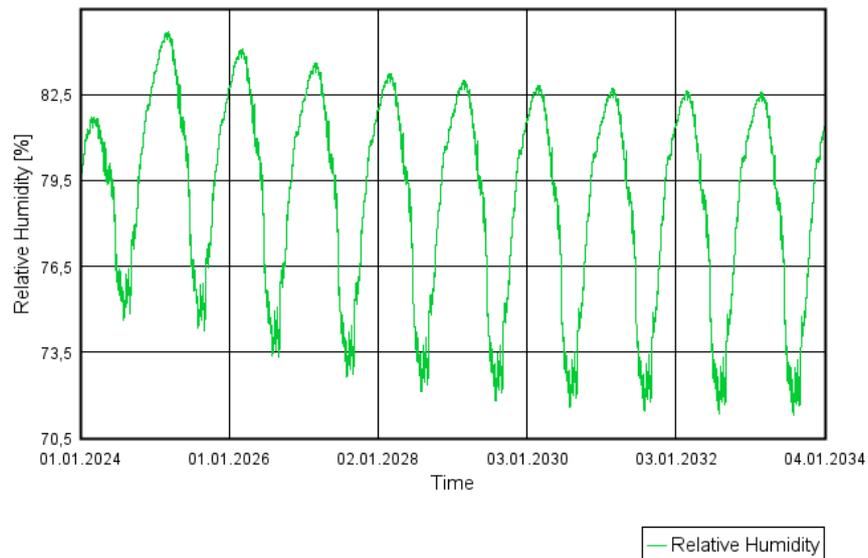
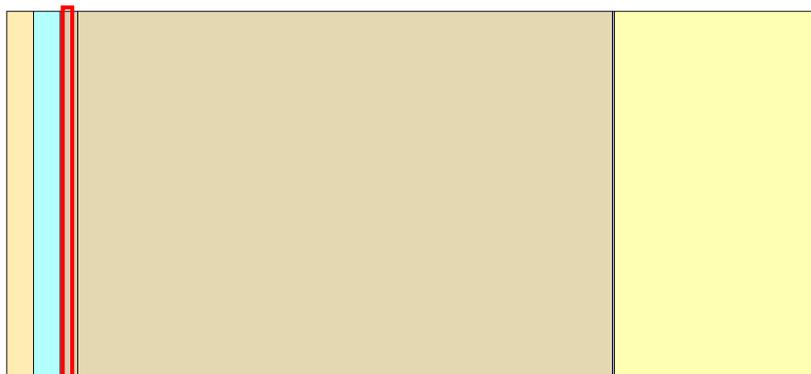
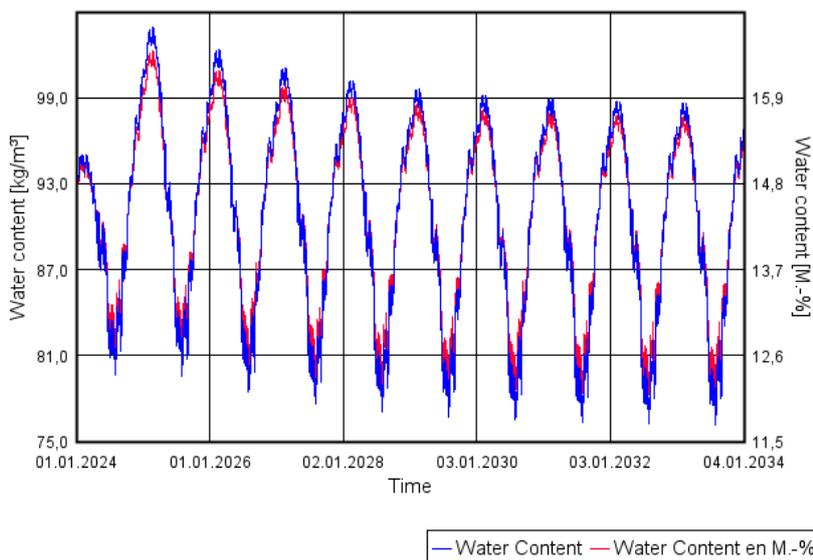


Figure 8-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec le pare-pluie



Water Content OSB inter HPV



Relative Humidity

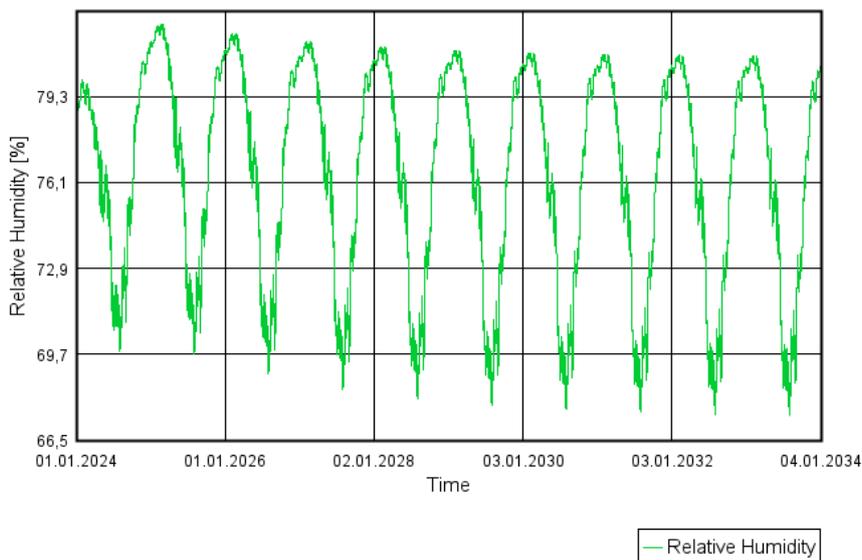
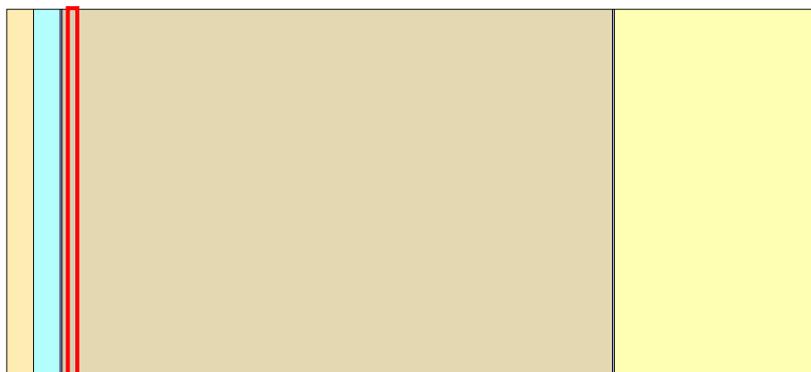
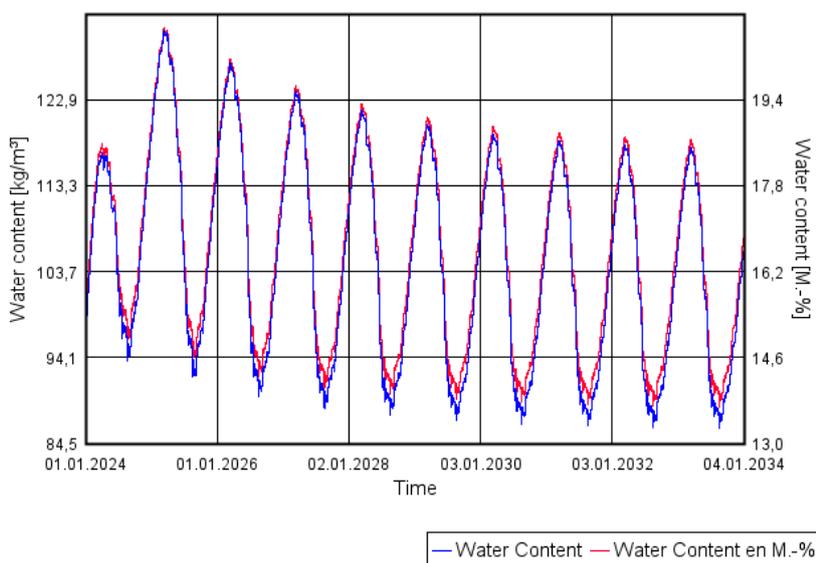


Figure 8-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB, à l'interface avec la paille



Water Content OSB inter paille



Relative Humidity

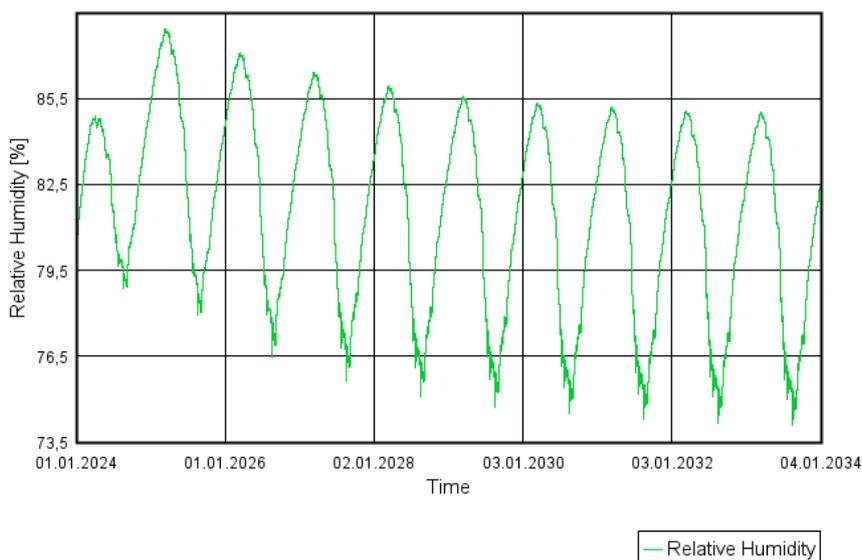
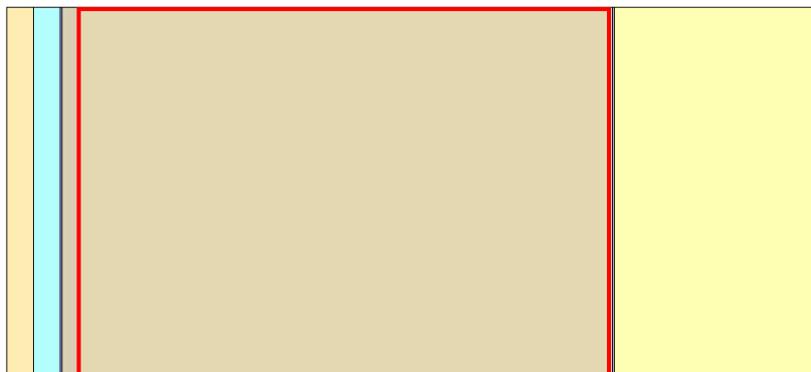
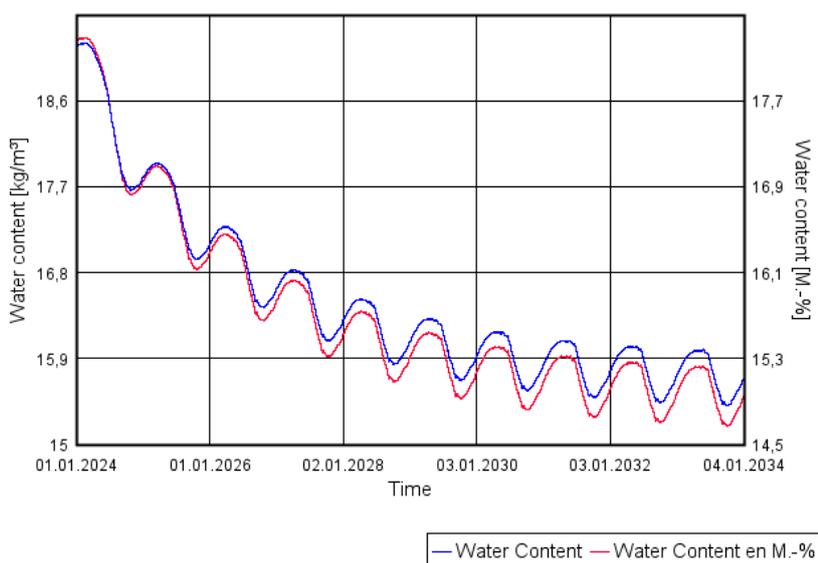


Figure 8-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Water Content paille



Relative Humidity

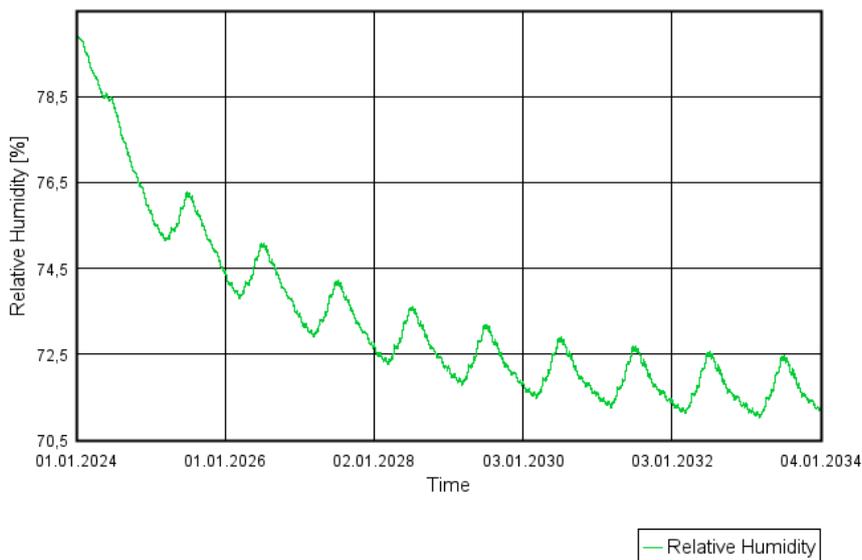
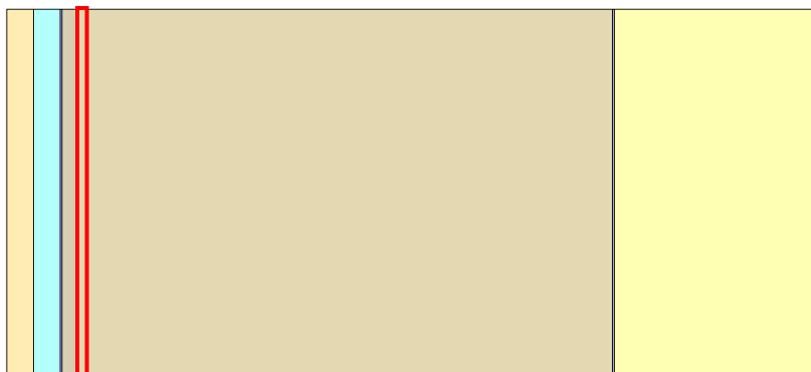
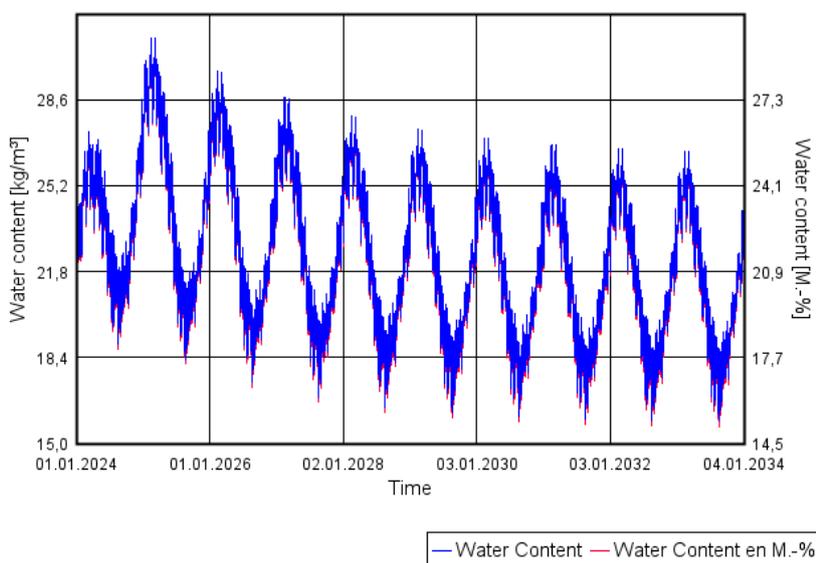


Figure 8-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB



Water Content paille inter OSB



Relative Humidity

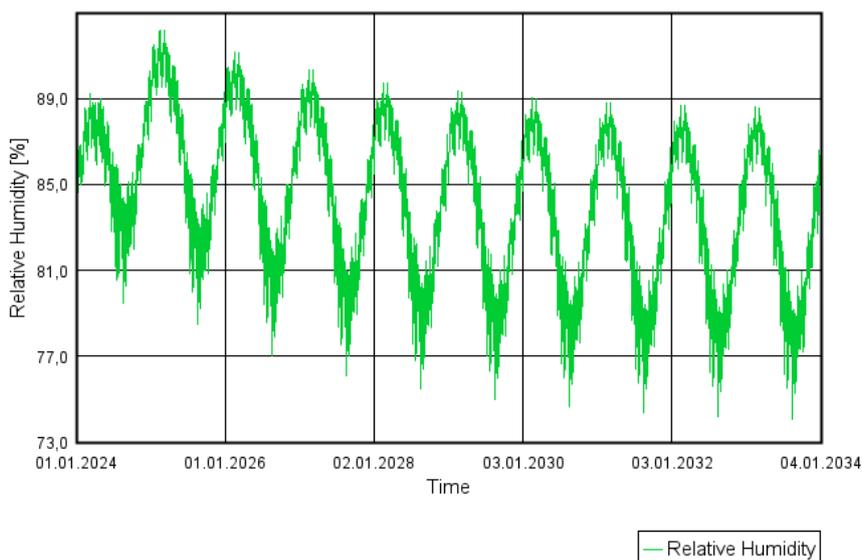
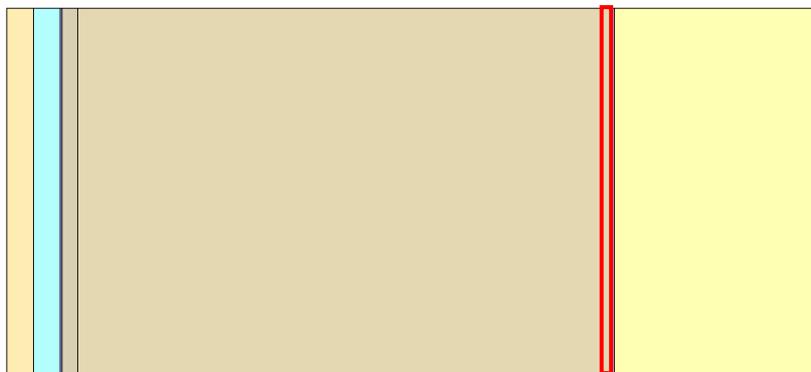
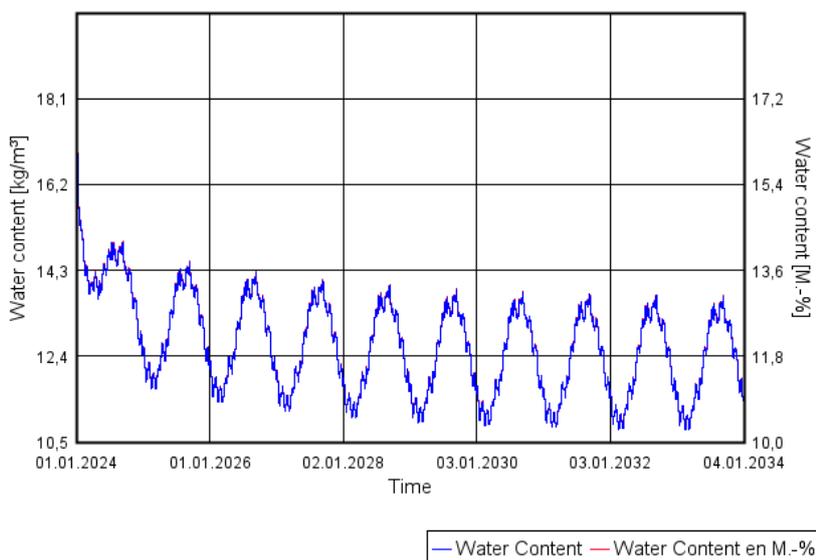


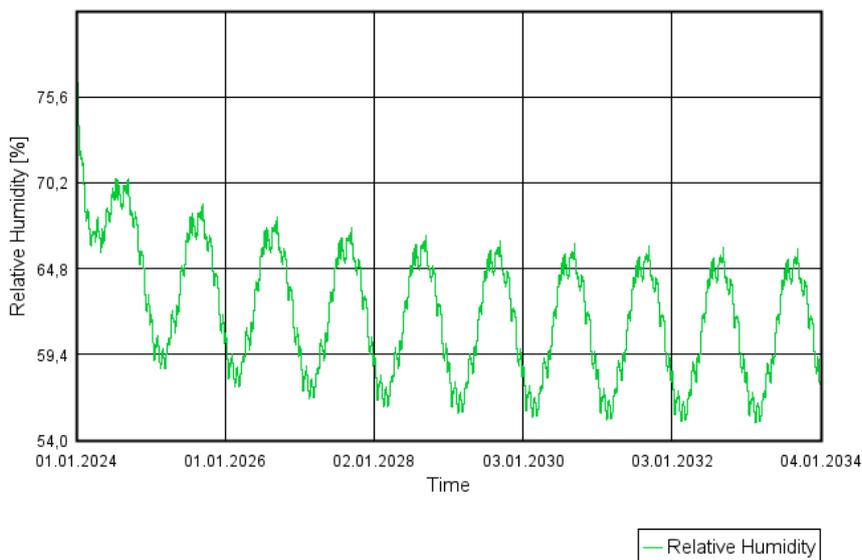
Figure 8-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le pare-vapeur



Water Content paille inter PV



Relative Humidity



Cas 9

Les figures suivantes montrent les résultats des simulations sur les différentes parois :

- Rappel du schéma de la paroi (figure 9-a) ;
- Teneur en eau moyenne (kg/m^3) dans la paroi globale (figure 9-b) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB extérieur (figure 9-c) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB extérieur, à l'interface avec le pare-pluie (figure 9-d) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB extérieur, à l'interface avec la paille hachée (figure 9-e) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée (figure 9-f) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB extérieur (figure 9-g) ;
- Teneur en eau et humidité relative dans la paille hachée, à l'interface avec le panneau OSB intérieur (figure 9-h).

L'emplacement des différents points suivis plus particulièrement au cours du temps est souligné dans ces figures par un rectangle rouge.

Figure 9-a : Rappel du schéma de la paroi 9

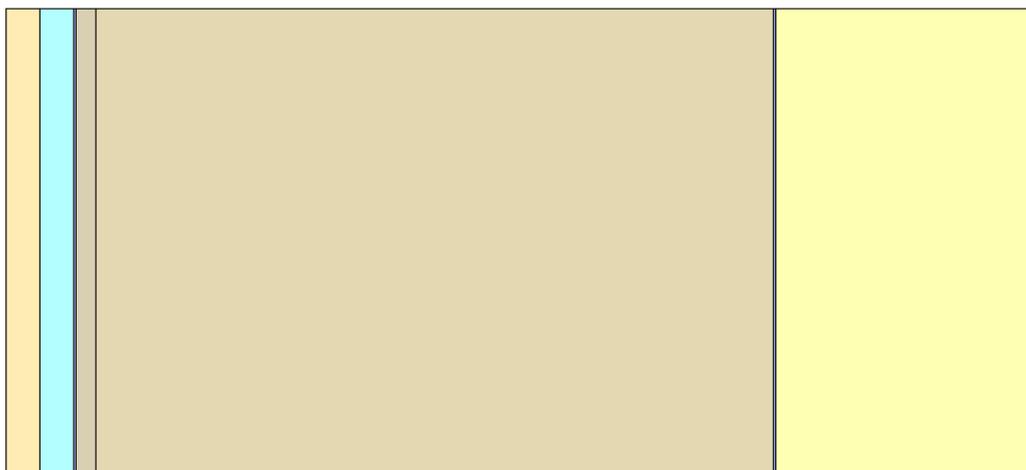


Figure 9-b : Teneur en eau moyenne dans la paroi globale

Teneur en eau totale

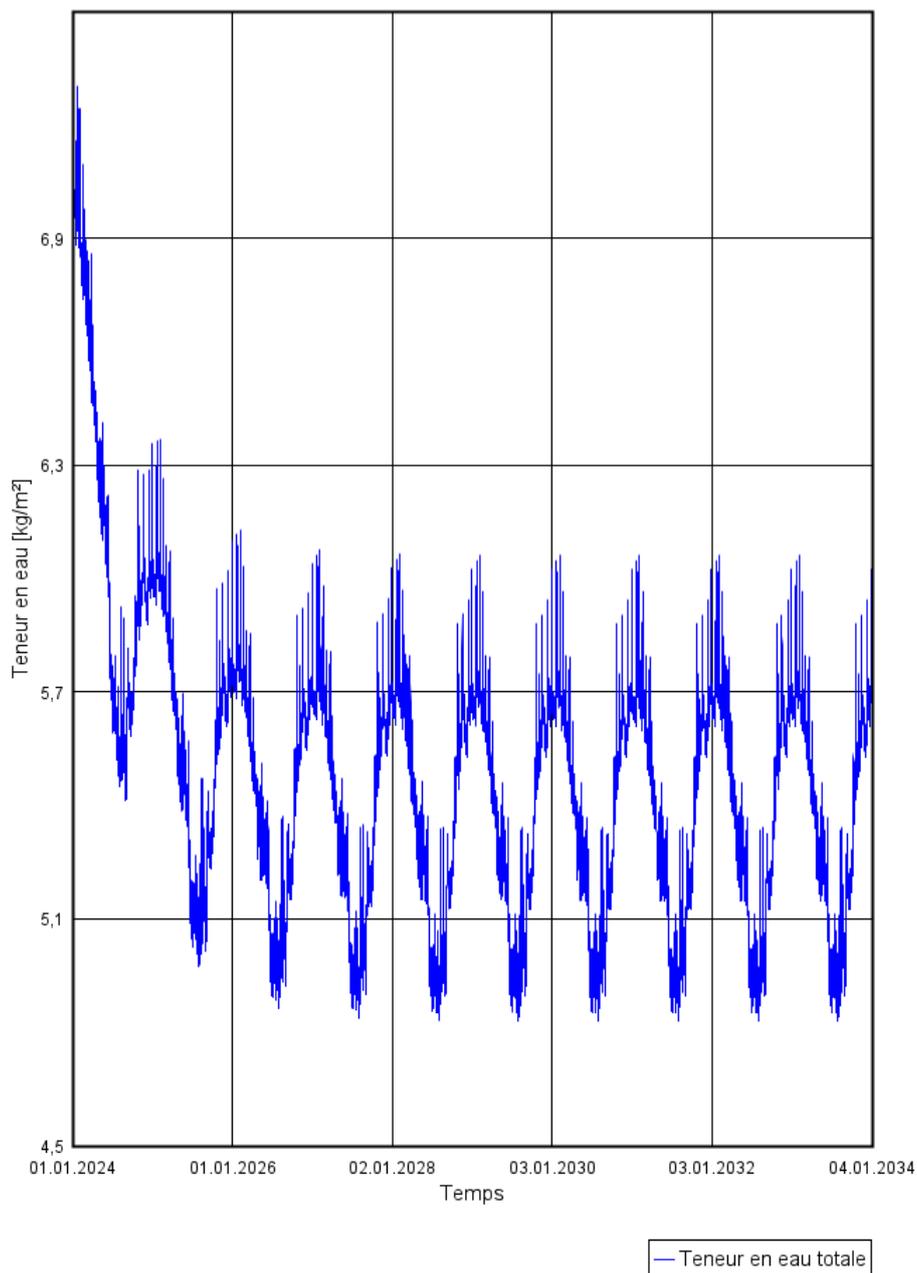
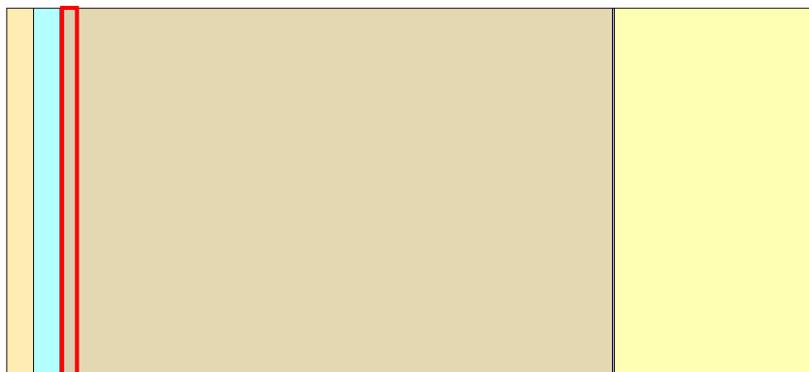
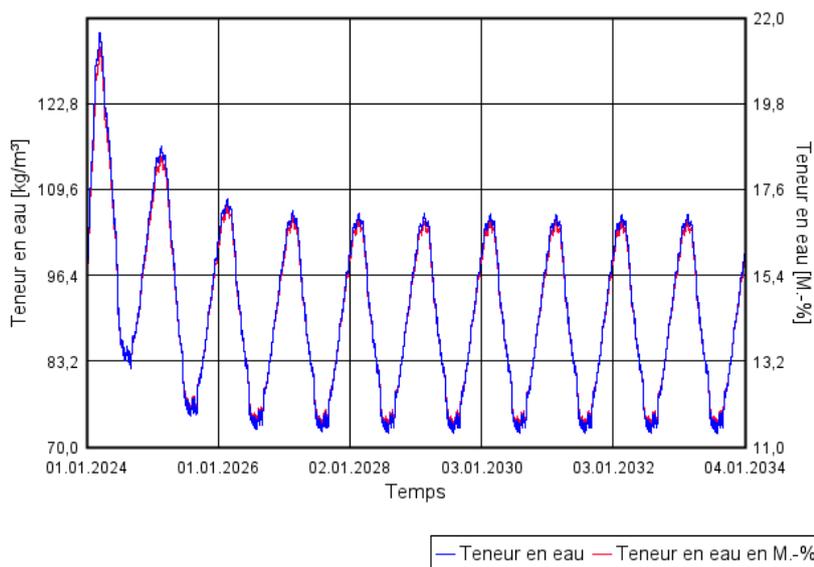


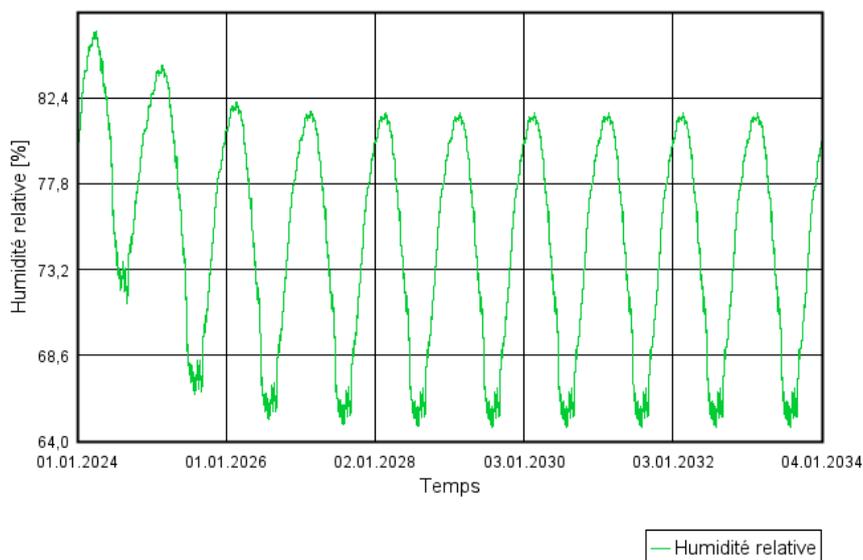
Figure 9-c : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB extérieur



Teneur en eau OSB

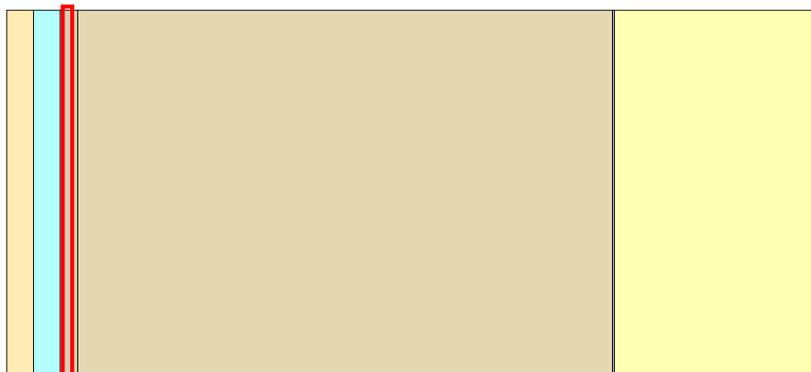


Humidité relative

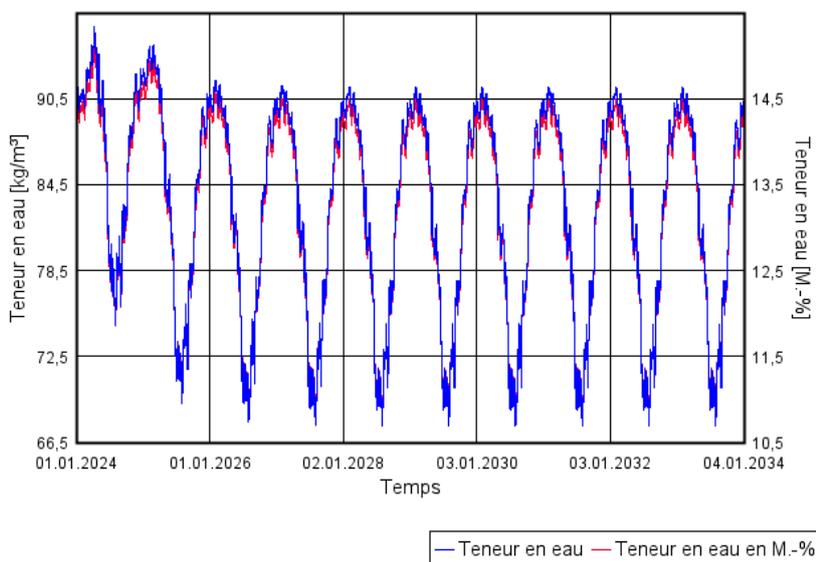


RAPPORT D'EXPERTISE

Figure 9-d : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB extérieur, à l'interface avec le pare-pluie



Teneur en eau OSB inter PP



Humidité relative

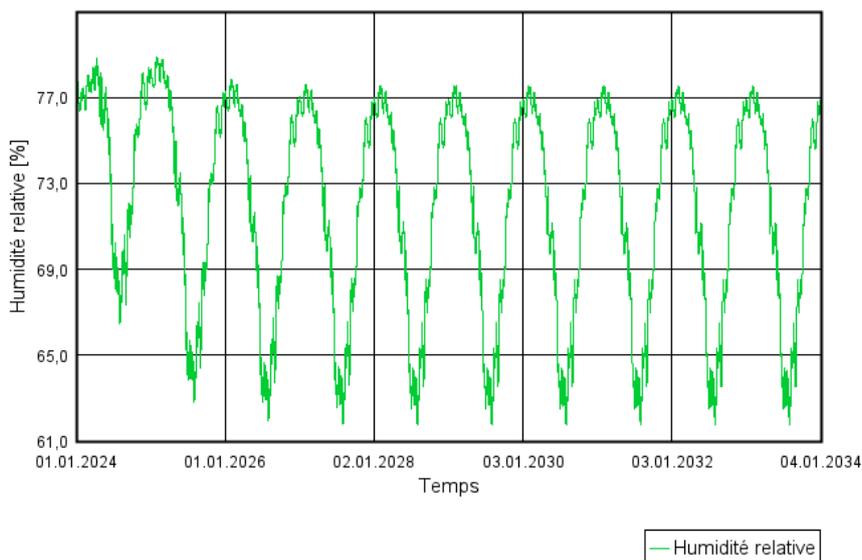
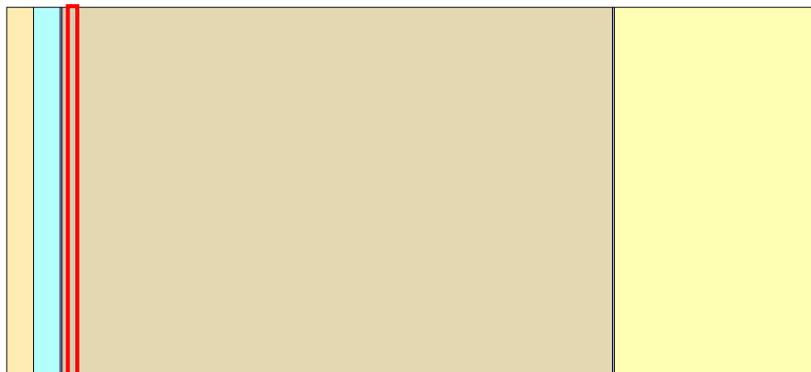
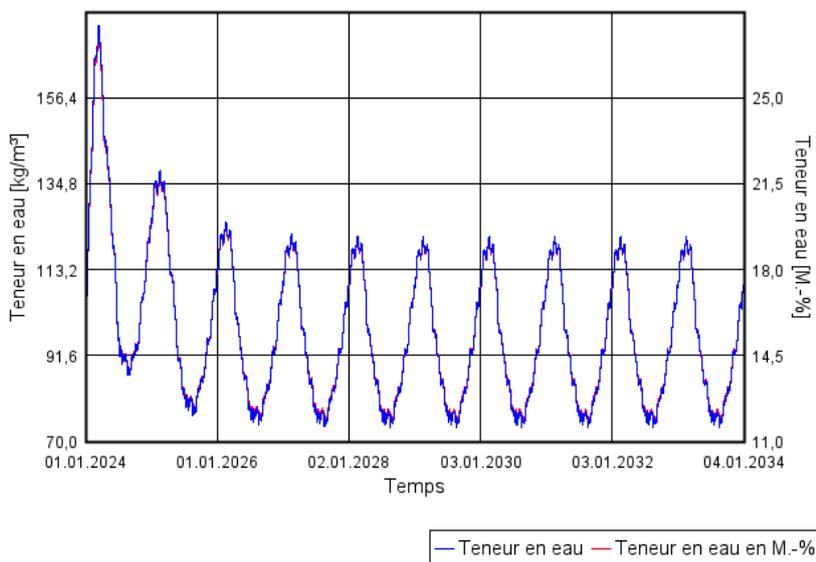


Figure 9-e : Teneur en eau et humidité relative dans le panneau OSB extérieur, à l'interface avec la paille



Teneur en eau OSB inter paille



Humidité relative

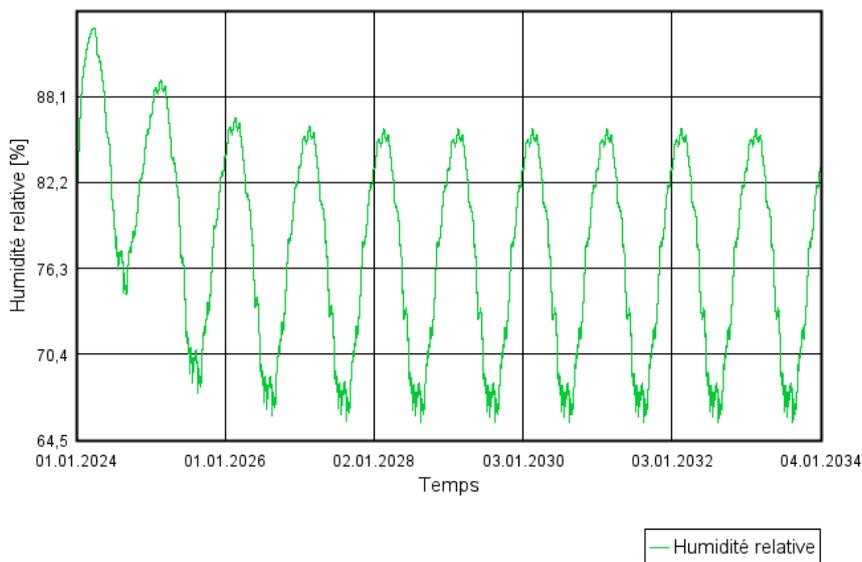
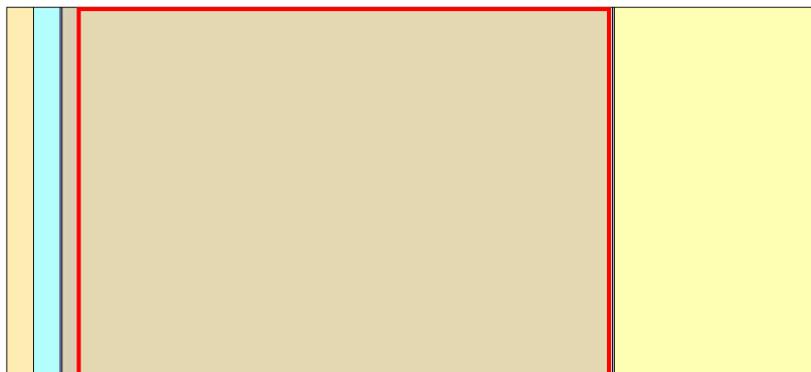
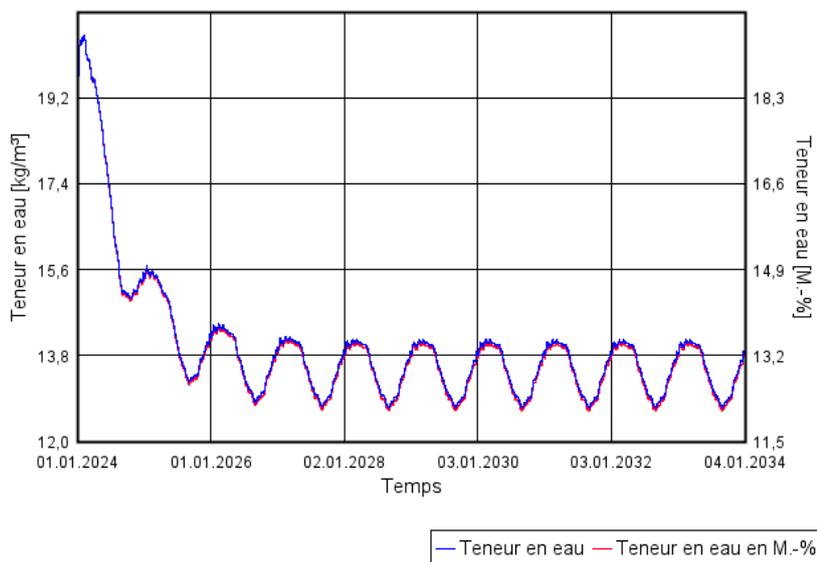


Figure 9-f : Teneur en eau et humidité relative dans la paille



Teneur en eau paille



Humidité relative

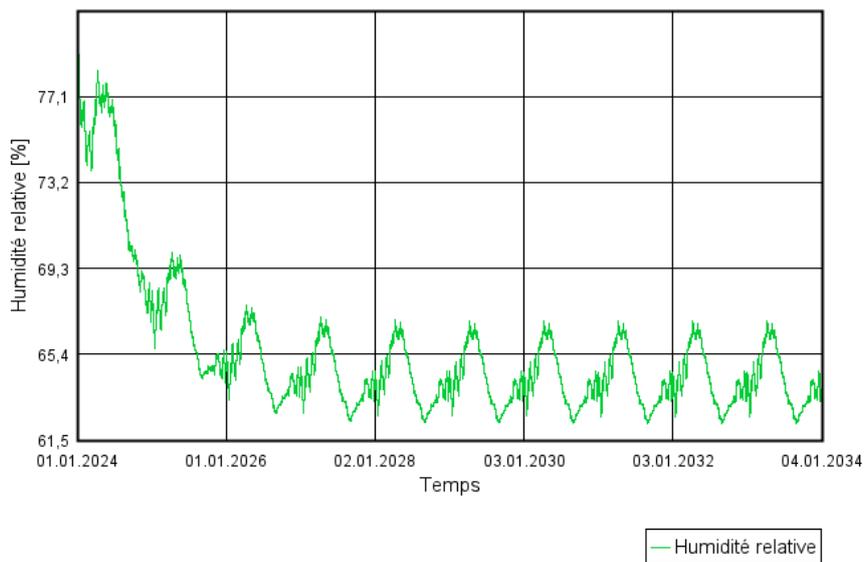
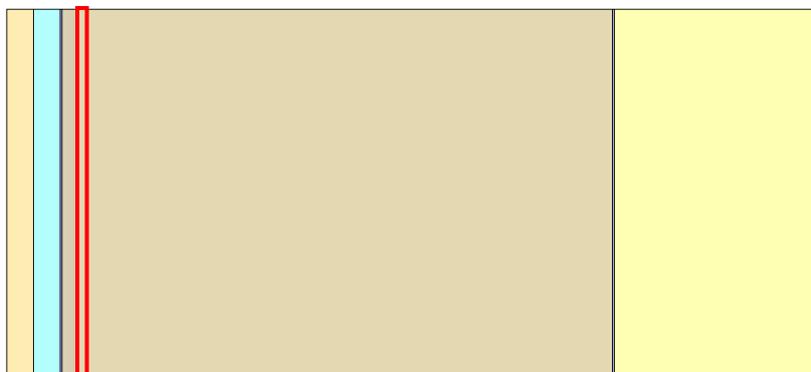
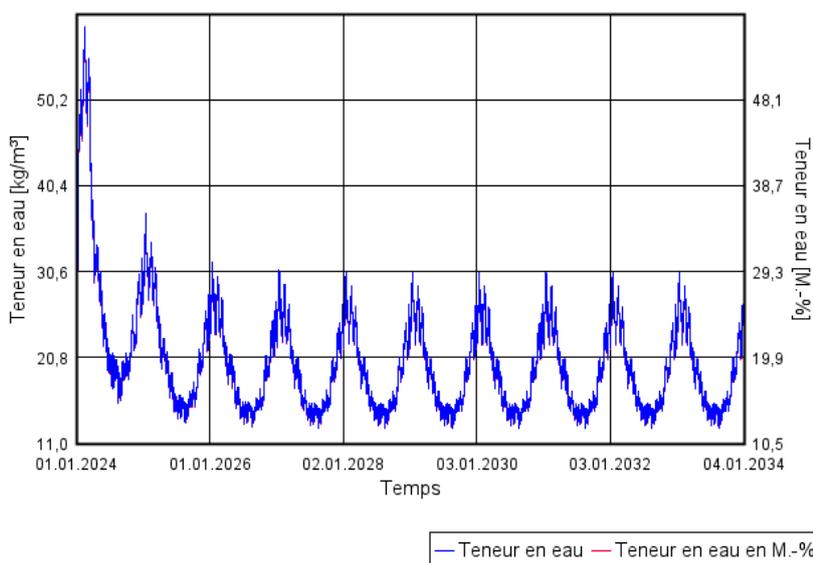


Figure 9-g : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB extérieur



Teneur en eau paille inter OSB ext



Humidité relative

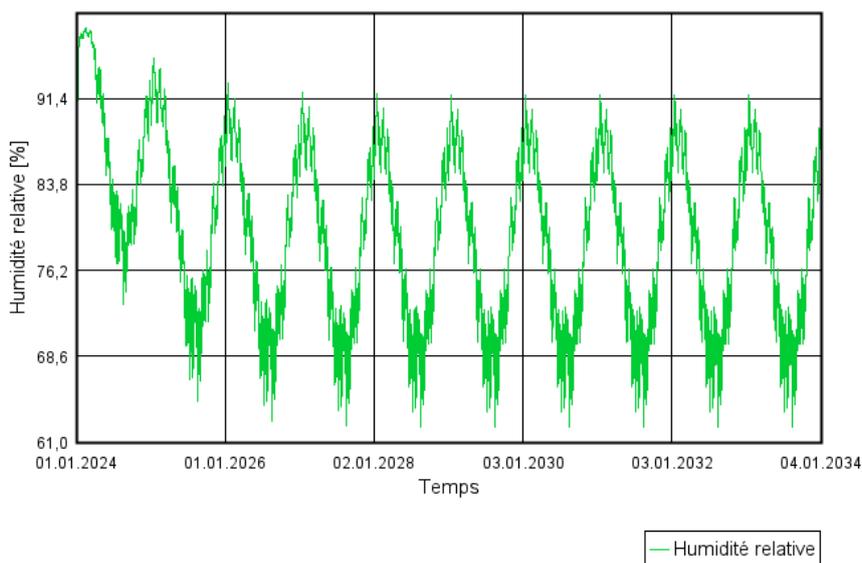
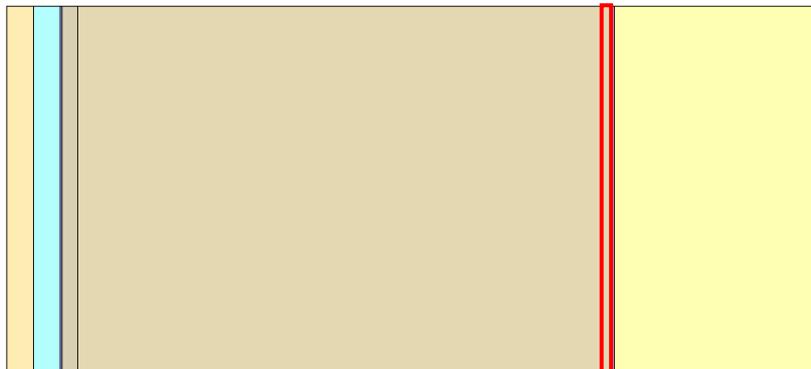
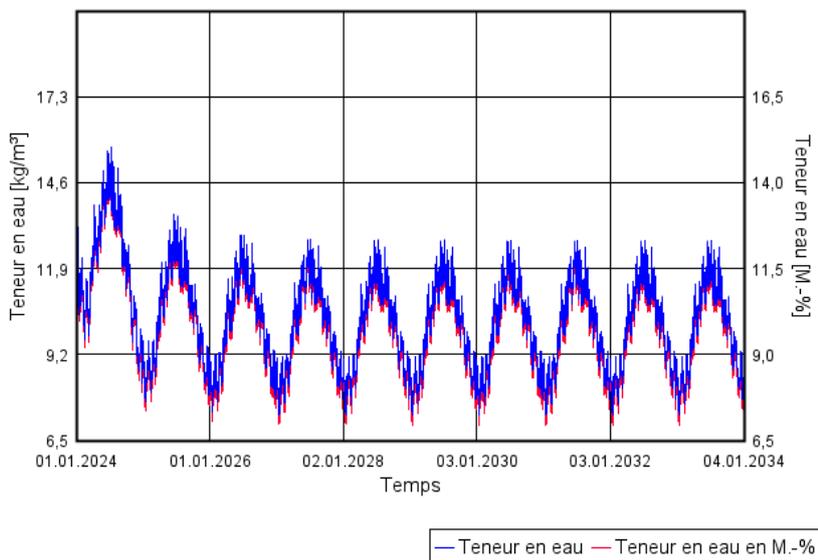


Figure 9-h : Teneur en eau et humidité relative dans la paille, à l'interface avec le panneau OSB intérieur



Teneur en eau paille inter OSB int



Humidité relative

