



PACTE –SU29-17-099

RAPPORT

ETUDE : HYGRO-PV "IMPACT DE LA MISE EN
OEUVRE DU PARE-VAPEUR : RISQUE DE
PATHOLOGIES LIES A UNE PERTURBATION DANS
LA CONTINUITE DU PARE VAPEUR"

Auteurs : Clément BELLEUDY - Sylvain BOULET - Teddy
CONNAN – Matthieu COSNIER - Jordan GAUVRIT -
Nicolas PLACE - Claude POMPEO – Sihem TASCA
GUERNOUTI
19/08/2019

SUIVI DES VERSIONS

Indice	Date	Commentaire
1.0	25/07/2019	Première version rassemblant les rapports des différentes tâches
2.0	31/07/2019	Prise en compte des remarques des auteurs
2.1	19/08/2019	Version suite à la relecture des différents partenaires

TABLE DES MATIERES

TERMES	6
DEFINITIONS	7
1 RESUME	8
2 PREAMBULE	9
2.1 CONTEXTE	9
2.2 OBJECTIFS DU PROJET HYGRO-PV	10
2.3 PROGRAMME DE TRAVAIL ET PRISE EN COMPTE DES DIFFERENTS MODES DE TRANSPORTS D'HUMIDITE	12
3 TACHE 2	13
3.1 OBJECTIF DE LA TACHE 2	13
3.2 PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU ET VALEURS A PRENDRE EN COMPTE DANS LES SIMULATIONS	15
3.2.1 <i>Choix des matériaux et des perturbations</i>	15
3.2.2 <i>Résultats de mesures</i>	18
3.2.3 <i>Analyses des résultats de mesures</i>	21
3.3 PERMEABILITE A L'AIR DES DEFATS	25
3.3.1 <i>Méthode de mesure de la perméabilité à l'air</i>	25
3.4 RESULTATS DE MESURE	27
3.5 ANALYSE DES RESULTATS	28
3.6 CONCLUSIONS GENERALES DE LA TACHE 2	30
4 TACHE 3	31
4.1 OBJECTIFS	31
4.2 PRESENTATION DES ESSAIS	31
4.3 PRESENTATION DES CAS D'ETUDE	33
4.4 RESULTATS D'ESSAIS	35
4.5 CONCLUSIONS GENERALES DE LA TACHE 3	53
5 TACHE 4	55
5.1 OBJECTIFS	55
5.2 ETAT DE L'ART	55
5.2.1 <i>Les modes de transports d'humidité dans les parois</i>	55
5.2.2 <i>Les effets des perturbations de membrane sur les modes de transport d'humidité</i>	56
5.2.3 <i>La prise en compte des phénomènes convectifs dans WUFI</i>	60
5.2.4 <i>Discussions et perspectives pour le projet HYGRO-PV</i>	63
5.3 COMPARAISON CALCUL/MESURE	65
5.3.1 <i>Démarche de travail</i>	65
5.3.2 <i>Description des cas d'études (Configuration 3 et 5)</i>	66
5.3.3 <i>Simulations hygrothermiques des configurations 3 et 5</i>	71
5.3.4 <i>Modélisation de l'effet d'une entaille (configuration 5)</i>	84
5.3.5 <i>Confrontation dans les conditions de simulation et calibration des débits</i>	93
5.3.6 <i>Conclusion</i>	100
5.4 MODELISATION DES CAS D'ETUDES	102
5.4.1 <i>Hypothèses de modélisation</i>	102
5.4.2 <i>Méthodologie</i>	103
5.4.3 <i>Présentation des cas d'étude modélisés</i>	110
5.5 ANALYSE DES RESULTATS	114
5.5.1 <i>Configuration isolation sous rampant</i>	114
5.5.2 <i>Configuration Paroi lourde</i>	121

5.5.3	<i>Configuration Isolation sous combles perdus.....</i>	<i>129</i>
5.5.4	<i>Configuration Paroi légère</i>	<i>137</i>
5.5.5	<i>Synthèse des résultats</i>	<i>146</i>
5.6	CONCLUSIONS GENERALES DE LA TACHE 4.....	148
6	CONCLUSIONS GENERALES	149
7	BIBLIOGRAPHIE.....	156

TERMES

Dans ce document différents termes sont utilisés. Afin de mieux expliciter et améliorer la compréhension du texte, les différents termes sont indiqués ci-dessous :

- Pare-vapeur : feuille souple plastique, élastomère ou composite, dont la fonction est de limiter la transmission de la vapeur d'eau dans un mur, un plancher ou une toiture.
- Feuille plastique : feuille souple fabriquée en usine et constituée de matière élastomère polymérique et qui peut comprendre des composites avec d'autres matériaux.
- Feuille élastomère : feuille souple fabriquée en usine et constituée de polymère élastomère et qui peut comprendre des composites avec d'autres matériaux.
- Il existe des pare-vapeur ; des pare-vapeur non étanche à l'eau et des pare-vapeur avec couche de diffusion ou couche drainante.

Il existe différents types de polymères :

- Les plastiques :
 - o CSM Polyéthylène chlorosulfoné,
 - o EEA Ethylène-acétate d'éthyle,
 - o EBA Ethylène- acétate butyle,
 - o ECB Copolymère éthylène-bitume,
 - o EVAC Ethylène-acétate de vinyle,
 - o FPO Polyoléfine souple
 - o FPP Polypropylène souple,
 - o PE Polyéthylène,
 - o PE-C Polyéthylène chloré,
 - o PIB Polyisobutylène,
 - o PP Polypropylène,
 - o PVC Polychlorure de vinyle.
- Les élastomères :
 - o BR Elastomère butadiène,
 - o CR Elastomère chloroprène,
 - o CSM Elastomère de polyéthylène chlorosulfoné,
 - o EPDM Terpolymère d'éthylène, de propylène et d'un diène,
 - o IIR Caoutchouc isobutène-isoprène,
 - o NBR Caoutchouc acrylonitrile -butadiène,
- Les élastomères thermoplastiques :
 - o EA Alliages d'élastomères,
 - o MPR Elastomère mis en œuvre par fusion,
 - o SEBS Styrène-éthylène-butylène-styrène,
 - o TPE-O Elastomère thermoplastiques, non réticulés,
 - o TPE-V Elastomère thermoplastiques, réticulés,

DEFINITIONS

Certains termes spécifiques à l'humidité sont également utilisés dans ce document. Les définitions proposées sont les suivantes :

Tableau 1 : Définitions

Grandeur	Symbole	Unité
Flux de vapeur d'eau : Masse de vapeur d'eau transmise par unité de temps à travers l'éprouvette dans la coupelle	P	kg/s
Densité de flux de vapeur d'eau : Flux de vapeur d'eau par unité de surface	g	kg/(m ² .s)
Perméance à la vapeur d'eau : Densité de flux de vapeur par unité de pression	Wp	kg/(m ² .s.Pa)
Perméabilité à la vapeur d'eau : Perméance à la vapeur d'eau pour un mètre d'épaisseur de produit	δ	kg/(m.s.Pa)
Facteur de résistance à la vapeur d'eau : Rapport entre la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air et la perméabilité à la vapeur d'eau du produit	μ	
Epaisseur de couche d'air équivalente : Facteur de résistance à la vapeur d'eau ramené à l'épaisseur du produit	Sd	m

1 RESUME

Le Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Energétique (PACTE) lancé en 2015 par les pouvoirs publics a pour objectif d'accompagner la montée en compétence des professionnels du bâtiment dans le champ de l'efficacité énergétique, et ce, afin de renforcer la qualité dans la construction et de réduire la sinistralité. Dans ce cadre, le projet HYGRO-PV porté par le CSTB en partenariat avec le FCBA et le Cerema s'intéresse aux risques de pathologies liées à l'humidité, causés par les perturbations des pare-vapeur.

Ce rapport décrit l'ensemble des travaux réalisés au cours de ce projet.

2 PREAMBULE

2.1 Contexte

Le bâtiment est le siège d'interactions nombreuses avec l'eau. Les parois de bâtiment sont toujours en présence d'eau sous forme vapeur ou sous forme liquide. Les quantités d'eau échangées sont importantes. Selon une étude de l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques), l'humidité est le problème le plus fréquemment rencontré au sein des logements français. Les problématiques d'humidité dans le bâtiment touchent plus de 25 % des logements en France d'après l'AQC (Agence Qualité Construction). Dans les murs modernes (dès les années 1970), la stratégie consiste à faire barrage à la migration de la vapeur d'eau avec l'emploi d'un pare-vapeur pour éviter de détériorer les murs et les isolants.

Selon la définition du DTU 31.2, le pare-vapeur est un « matériau imperméable en plaque ou en film mis en œuvre sur la face chaude de la paroi, dont la fonction est de limiter la transmission de vapeur d'eau ». Il peut contribuer à assurer l'étanchéité à l'air de l'ouvrage. Souvent placé entre le parement intérieur et l'isolant thermique, il permet de limiter le transfert de vapeur de l'ambiance intérieure vers la paroi. Ainsi, les risques de condensation, de développement fongique et de diminution des performances thermiques de certains isolants sont significativement limités. Le pare-vapeur est caractérisé par le facteur Sd qui traduit sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.

Le projet HYGRO-PV s'intéresse à tous constituants de parois, barrières à la diffusion de vapeur d'eau et contenant potentiellement des discontinuités (ou perturbations) lorsqu'ils sont mis en œuvre. Leur coefficient Sd est compris entre quelques m et plus d'une centaine de m et est altéré localement par les discontinuités.

2.2 Objectifs du projet HYGRO-PV

Le projet HYGRO-PV a été retenu dans le cadre de l'axe 1.4 du programme PACTE.

L'objectif global du projet HYGRO-PV "IMPACT DE LA MISE EN OEUVRE DU PARE-VAPEUR : RISQUE DE PATHOLOGIES LIES A UNE PERTURBATION DANS LA CONTINUITE DU PARE VAPEUR" est de proposer aux professionnels (maîtres d'œuvre, entreprises, artisans) un rapport sous forme de fiches techniques valorisables présentant des valeurs Sd équivalente qui pourront être utilisées comme données d'entrées dans les logiciels de calculs hygrothermiques.

Cette finalité repose sur 2 aspects :

- Etudier l'impact de la mise en œuvre du pare vapeur et le risque associé aux discontinuités sur l'apparition de pathologies liées à l'humidité,
- Etudier l'influence des différentes perturbations sur les transferts hygrothermiques de parois (murs et combles (aménagés et perdus)).

Afin de mener à bien ce projet, le CSTB, responsable de la coordination globale du projet, a proposé au Cerema et FCBA d'associer leurs actions et leurs compétences. L'association de ces 3 entités permet de couvrir un large spectre de compétences dans les domaines de la physique du bâtiment (énergétique, hygrothermique des matériaux, approche scientifique et méthodologique). Ainsi, au travers de différents travaux, ils ont accumulé une certaine connaissance en matière de compréhension du comportement du bâtiment par rapport à l'humidité (projets ANR Humibatex, MOB AIR, ADEME Capvent, rapport RAGE sur l'évaluation des risques de pathologies liées à l'humidité...).

Ces travaux antérieurs et en cours leur confèrent une certaine légitimité à porter aujourd'hui le projet HYGRO-PV. Par ailleurs, les résultats de ce projet pourront être utilisés dans le projet OPERA, proposé dans le cadre du programme PACTE 1.4, qui vise la réalisation d'une suite d'outils permettant de mieux maîtriser les risques de pathologies liées à l'humidité dans les projets de rénovation de parois anciennes.

L'objectif du projet est d'étudier l'influence de la mise en œuvre d'un pare-vapeur et le risque associé à ses perturbations sur l'apparition de pathologies liées à l'humidité. Les enseignements devront permettre :

- D'améliorer la compréhension des modes de transports d'humidité dans la paroi en fonction de la perturbation ;
- D'évaluer le risque de pathologies causées par une perturbation d'un pare-vapeur dans un but de **sensibilisation à la bonne mise en œuvre** ;
- De définir les données d'entrées à utiliser lors de simulations de transferts hygrothermiques en fonction du type de perturbation.

En aucun cas il s'agira d'interpréter ces résultats comme des preuves de tolérances à apporter sur les règles et recommandations techniques actuelles sur la pose d'un pare-vapeur. L'objet de ce travail est de mettre l'accent sur les conséquences à ne pas tenir

compte des recommandations de mise en œuvre des produits dans l'ouvrage qui pourrait occasionner des désordres.

Dans la suite de ce document, le terme « Sd équivalent » pourra être employé pour des cas de figure bien particulier. Dans la plupart des cas un flux de vapeur d'eau traversant le défaut sera déterminé puis suivant le cas sera appliqué localement.

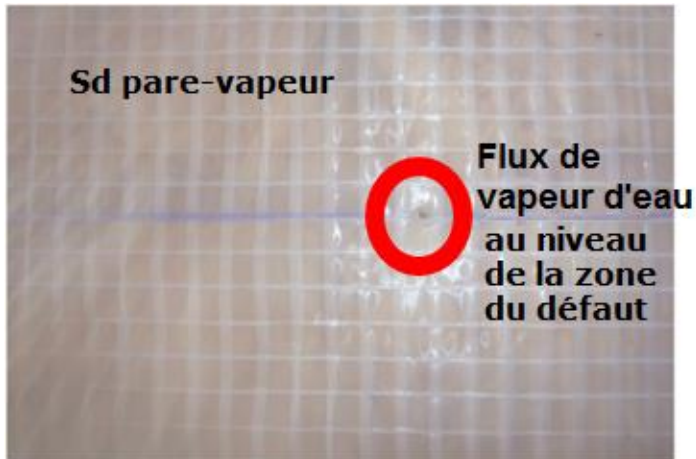


Figure 1 : présentation d'un défaut potentiel

Le type de résultats attendus est en partie présenté dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Exemples de résultats attendus à l'issu du projet

Types de perturbations dans le pare-vapeur	Hypothèses à vérifier et résultats attendus
Celles liées directement à la mise en œuvre lors de la construction agrafage, clous de fixation de la membrane....	Détermination du flux de vapeur occasionné. Analyse de l'importance de ce flux par rapport au flux en partie courante. Suivant son importance => intégration ou non dans un Sd équivalent. En simulation hygrothermique, utilisation de valeurs Sd équivalent ou d'un terme source supplémentaire pour tenir compte de la perturbation du phénomène de diffusion.
Perturbations accidentelles : coup de cutter ou percement pour le passage des gaines électriques,....	Détermination du flux de vapeur occasionné. Analyse de l'importance de ce flux par rapport au flux en partie courante. La perturbation étant accidentelle une valeur de Sd équivalente n'est pas pertinente. Détermination du risque de pathologies au niveau de la perturbation

2.3 Programme de travail et prise en compte des différents modes de transports d'humidité

Afin de répondre au mieux aux attentes des participants au GT Pacte, une étape de consultation et de validation des choix est intégrée dans une **(Tâche 1)**. Les membres du GT Pacte sont accompagnés par un collège d'experts dont l'avis est consultatif. Durant la période de réalisation du projet, le GT Pacte valide les choix de cas d'étude et d'hypothèses de travail nécessaires à la bonne réalisation du projet. Ce processus de validation est rythmé par les réunions du GT Pacte se déroulant tous les six mois environ.

La seconde tâche du programme de travail se situe à l'échelle de la perturbation du pare-vapeur et a d'abord pour but de mesurer ses caractéristiques de transferts diffusifs d'humidité **(Tâche 2)**. Il s'agit de traduire l'impact d'un défaut par un terme « source » ou produit équivalent en surface et en perméabilité. D'une part, ces résultats permettent de comparer les effets des types de perturbations sur les transferts diffusifs. D'autre part, ce sont des données d'entrées pour les simulations hygrothermiques. Les résultats sont produits par étape pour « calibrer » le protocole de mesure puis le reproduire sur d'autres types de perturbations.

De plus, des mesures de la résistance à l'écoulement d'air de plusieurs perturbations sont également réalisées. Ces résultats permettront d'appréhender l'impact sur le transport d'humidité par transfert d'air de ces perturbations.

La troisième tâche se situe à l'échelle paroi et a pour but de mesurer l'impact d'une perturbation sur les champs hygrothermiques d'une paroi **(Tâche 3)** dans des conditions maîtrisées. De plus, elle devra permettre de confronter les approches mises en œuvre dans les simulations aux résultats expérimentaux.

La dernière tâche **(Tâche 4)**, a pour but d'élargir par le calcul le champ de l'étude à d'autres configurations. Tout d'abord, une phase de bibliographie permet de faire un état des lieux des méthodes existantes de prise en compte de perturbations en simulation. Puis, en lien avec la tâche 2 et la tâche 3, il s'agit de définir une démarche permettant de représenter au mieux, dans les simulations hygrothermiques, les phénomènes physiques induits par une perturbation de membrane. Cette démarche appliquée à un ensemble de configurations à simuler, permet d'étendre les enseignements à des cas plus représentatifs de la réalité.

3 TACHE 2

3.1 Objectif de la TACHE 2

Cette partie rassemble l'ensemble des résultats et analyses de la TACHE 2 du projet HYGRO-PV.

Cette Tâche T2 a été mise en place afin d'évaluer la perméabilité à la vapeur d'eau (Sd) des points singuliers. Deux sous tâche ont été prévues.

La **sous tâche 2.1** concerne la réalisation des essais à la coupelle sur les perturbations sélectionnées.

La première étape visait la sélection des points singuliers à étudier. Cela a été réalisé en parallèle de la tâche 1 « phase de priorisation des parois courantes type en fonction des besoins du terrain ». Les perturbations ont été sélectionnées avec la participation du Groupe de Travail comprenant des experts, des sachants de la pathologie afin d'intégrer les remontées de désordres constatés.

Les perturbations choisies par les membres du Groupe de Travail sont :

- Agrafes non étanchées (sans adhésif) sur un liteau,
- Agrafes comportant un système de pastille étanches,
- Pare-vapeur pris entre deux liteaux cloués,
- Pare-vapeur posé côte à côte sans adhésif,
- Entaille droite (fente) de 10cm,
- Entaille en « croix » de 5 cm

Les essais ont été réalisés sur des pare-vapeurs neufs sans perturbations dans différentes conditions d'humidité. En parallèle et sur les mêmes pare-vapeur comportant des perturbations des essais ont été menés dans les conditions d'humidité retenues.

Les mesures de perméabilité à la vapeur d'eau ont été réalisées suivant la méthode dite de la « coupelle ».

Les essais de détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau ont été menés en suivant les prérogatives décrites dans les normes ci-dessous :

Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ déterminé obligatoirement par essai selon la norme NF EN 1931 pour les films pare-pluie et les barrières à la diffusion de vapeur. Les éprouvettes, en forme de disques de diamètre 200 mm, sont disposées dans des coupelles (Figure 2). La partie inférieure de la coupelle contient une solution saline pour maintenir une humidité relative constante. L'ensemble est disposé dans une enceinte régulée en température et en humidité.

La perméance est calculée à partir de la relation suivante :

$$W = P/(A \cdot \Delta Pa) \text{ (kg/s.m}^2\text{.Pa)}$$

avec :

P : flux de vapeur (kg/s) calculé à partir de la pente de la courbe de variation de masse en fonction du temps

A : surface de l'éprouvette (m²)

ΔPa : différence de pression de vapeur d'eau (Pa)

On en déduit la perméabilité par la relation suivante :

$$\delta = W \cdot d \text{ (kg/s.m.Pa)}$$

avec :

d : épaisseur de l'éprouvette (m)



Figure 2 : Schéma d'une coupelle

NB : Les barrières à la vapeur à Sd variable ne sont pas étudiées. La mise en œuvre de ce type de barrière doit faire l'objet d'un Avis Technique ou d'un Document Technique d'Application

La **sous tâche 2.2** concerne la détermination des valeurs de Sd équivalent.
Les valeurs à déterminer pour chacune des perturbations sont :

- Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ (-)
- L'épaisseur de lame d'air équivalente (Sd en m)

Le coefficient μ caractérise la capacité du matériau à empêcher son franchissement par la vapeur d'eau. Plus un matériau est étanche à la vapeur d'eau, plus le μ est élevé. Par convention, on considère que l'air immobile possède un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu = 1$.

En pratique, l'épaisseur de lame d'air équivalente (Sd en m) remplace le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (μ sans unité). Ces deux grandeurs sont reliées par la relation suivante :

$$Sd = \mu * e$$

où e est l'épaisseur (en mètres) du matériau en question.

Le Sd rend mieux compte de la capacité du matériau mis en œuvre à se laisser traverser par la vapeur, puisqu'il tient compte de l'épaisseur de ce dernier. Il est également plus simple à appréhender : 1 cm d'un matériau de $\mu=10$ s'oppose au passage de la vapeur d'eau comme 10 cm d'air.

Ainsi, un matériau disposant d'un μ élevé mais mis en œuvre en faible épaisseur peut aussi bien résister au passage de la vapeur d'eau qu'un matériau disposant d'un μ plus faible mais mis en œuvre avec une épaisseur plus importante. C'est la raison pour laquelle le classement par coefficient de résistance à la diffusion de vapeur peut différer de celui par épaisseur équivalente d'air.

Le résultat attendu de la sous tâche 2 concerne les valeurs Sd équivalentes pour chacune des perturbations constituant des données d'entrées pour la modélisation.

3.2 Perméabilité à la vapeur d'eau et valeurs à prendre en compte dans les simulations

3.2.1 Choix des matériaux et des perturbations

Après débat au sein du Groupe de Travail trois membranes ont été choisies pour la réalisation des différents essais de perméabilité à la vapeur d'eau.

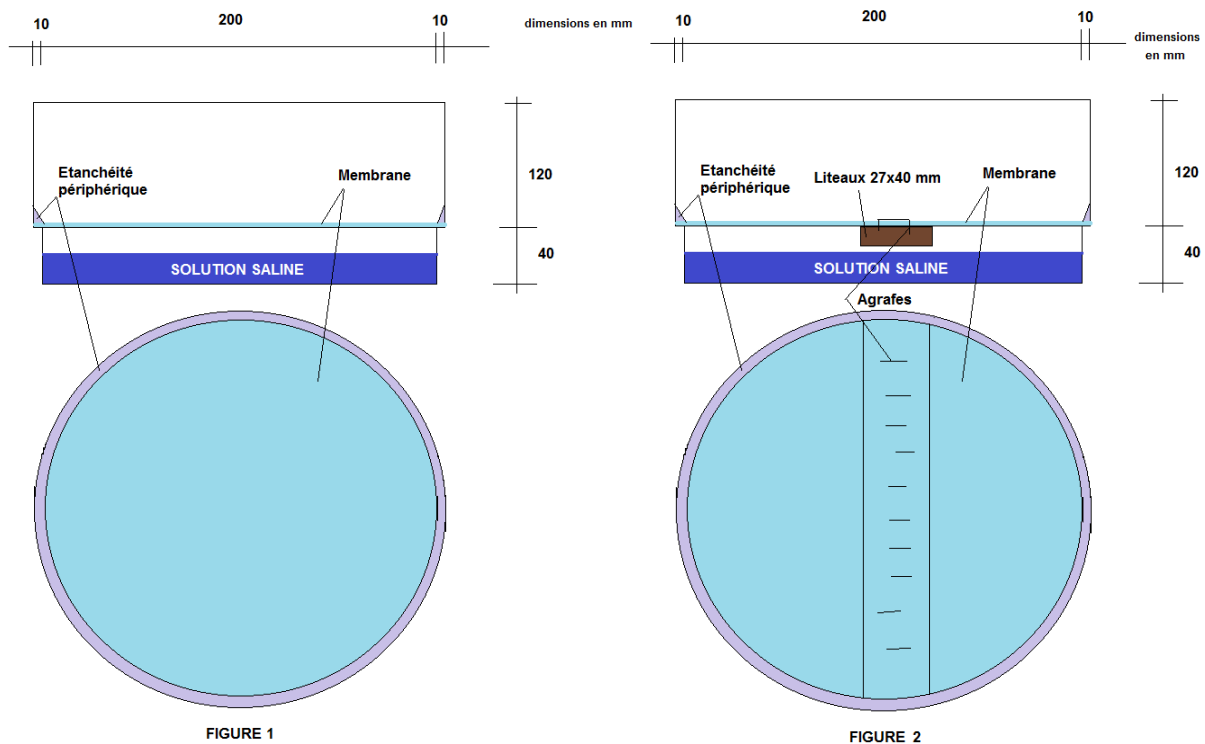
Ces trois membranes correspondent à des situations pouvant être rencontrées dans le bâtiment.

La première membrane correspond à une membrane permettant de laisser la vapeur d'eau la traverser facilement et avec une faible résistance aux transferts. La valeur retenue devait être de l'ordre de quelques mètres. La membrane choisie est une membrane ayant un Sd de 2m (valeur annoncée par le fabricant).

La deuxième membrane correspond à une membrane utilisée habituellement dans les constructions à ossature bois. Le Sd préconisé pour ce type de système constructif est de 18 m. La membrane retenue possède un Sd de 20 m (annoncé par le fabricant).

La troisième et dernière membrane choisie est une membrane ayant au moins un Sd de 90m ce qui correspond à une utilisation en climat de montagne. La membrane retenue est une membrane ayant un Sd de 100 m (annoncé par le fabricant).

Les différentes perturbations actées lors des réunions du Groupe de Travail sont celles définies et schématisées ci-après :



A- Sans perturbation

B- Agrafes nues

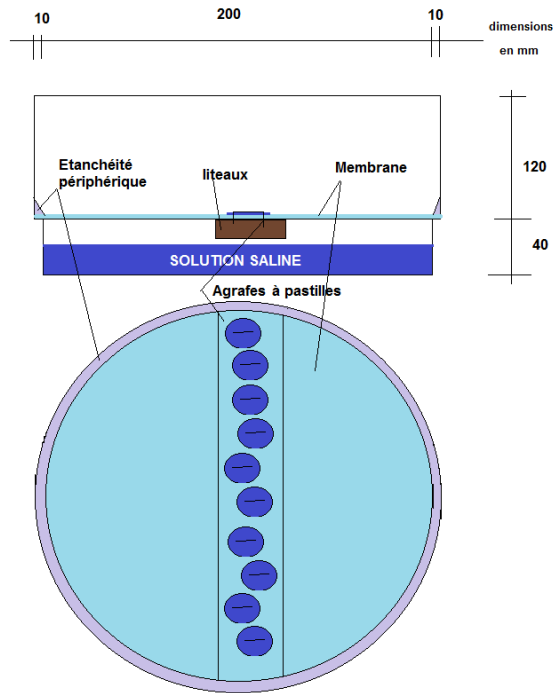


FIGURE 3

B- Agrafes avec pastilles adhésif

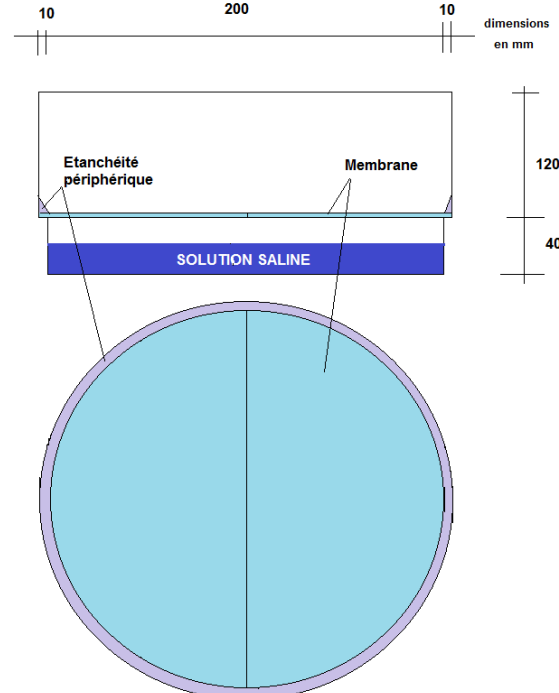


FIGURE 7

C- Liaison de deux lès sans

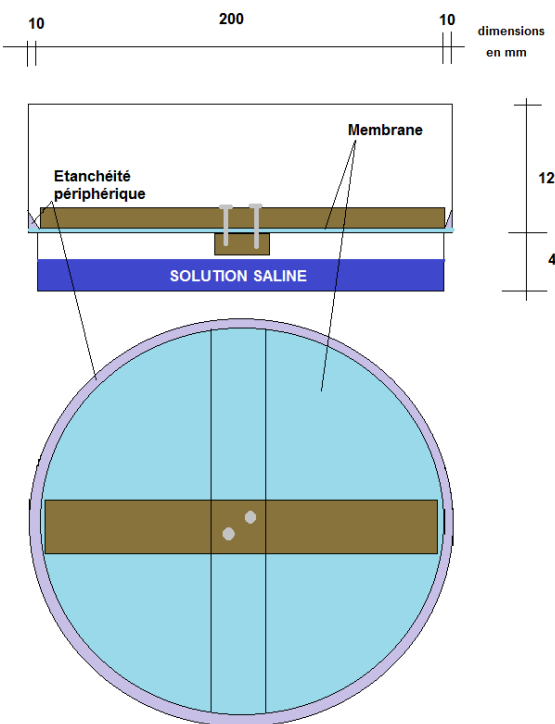


FIGURE 8

D- Liteaux en croix cloués

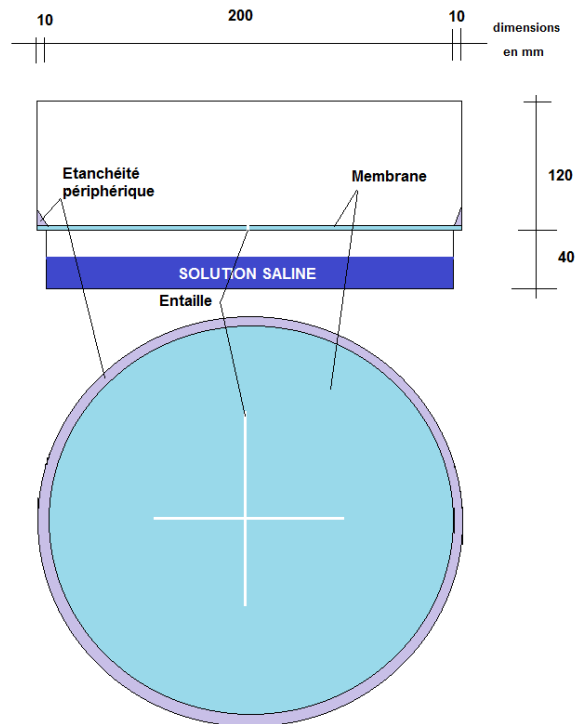


FIGURE 14

G- entaille en croix

Figure 3 : Schéma des coupelles associées aux perturbations retenues

Ces différentes perturbations sont réalisées sur les trois types de membranes avec une différence d'humidité constante (0-90%HR) et sur trois éprouvettes différentes.

Le Tableau 3 suivant présente la liste des échantillons mesurés :

Tableau 3 : liste des échantillons mesurés

N°	Type de Défaut	Figure	Conditions particulières	HR	Sd pare-vapeur en m	Méthodologie
A1	Aucun	A	Aucune	0-90	2	Les mesures A1 A2 et A3 serviront de base de comparaison avec les autres mesures. 3 pare-vapeur différents ont été préconisés lors de la réunion du GT du 27 juin 2017.
A2					20	
A3					100	
A4	Aucun	A	Aucune	0-90	—	La mesure A4 permet de connaître la résistance à la diffusion de la membrane perméable utilisée pour bloquer les transferts d'air.
B5	Agrafes nues	B	10 agrafes sur 200 mm	0-90	2	Les mesures B5 à B10 concernent l'impact des agrafes. Ce défaut est préconisé par tous les membres du GT. Une dizaine d'agrafes est proposée pour que l'impact soit mesurable s'il existe. Pour ces six mesures la différence de pression devrait être négligeable car, a priori, le débit de vapeur d'eau occasionné par ce défaut devrait être faible. Un essai de perméabilité à l'air sera réalisé sur le dispositif avec agrafes nues pour vérification.
B6					20	
B7					100	
B8	Agrafes à pastilles nues	B	10 agrafes sur 200 mm	0-90	2	
B9					20	
B10					100	
C11	Liaison de deux lès sans adhésif et sans chevauchement	C	Liaison sur 200 mm sans chevauchement	0-90	2	Les mesures C11 à C13 concernent l'impact d'une liaison sans recouvrement et sans adhésif. Ce défaut est demandé par l'UMPI. Pour s'affranchir des effets convectifs une membrane de très faible résistance aux transferts de vapeur d'eau sera mise en place entre l'intérieur de la coupelle et le produit à tester. Un essai de perméabilité à l'air sera réalisé sur le même dispositif pour valider l'incidence de la convection.
C12					20	
C13					100	
D14	Pare-vapeur pris en sandwich entre 2 liteaux	D (liteaux en croix)	2 clous traversant seront mis en œuvre	0-90	2	Les propositions D14 et D16 concernent le pare-vapeur pris en sandwich entre deux liteaux en croix et comportant des clous traversants. Les liteaux utilisés seront des liteaux de 27x40 mm.
D15					20	
D16					100	

N°	Type de Défaut	Figure	Conditions particulières	HR	Sd pare-vapeur en m	Méthodologie
G17	Entaille en croix dans le pare vapeur	G	Entaille en croix de 100 mm x 100 mm	0-90	2	Les mesures G17 à G19 concernent l'impact d'une entaille dans le pare-vapeur. Pour s'affranchir des effets convectifs une membrane de très faible résistance aux transferts de vapeur d'eau sera mise en place entre l'intérieur de la coupelle et le produit à tester. Un essai de perméabilité à l'air sera réalisé sur le même dispositif pour valider l'incidence de la convection.
G18					20	
G19					100	
H20	Aucun	-	Etanchéité de la coupelle à la graisse	0-90	Sans pare-vapeur	Les mesures H20 concernent la laine seule détachée aux ciseaux du kraft sur laquelle elle est collée
I21	Aucun	-	Aucune	0-90	< 0.05m	Réaliser des mesures sur l'écran de sous toiture HPV

Afin de limiter les transferts d'air en plus des transferts de vapeur d'eau, sachant que le flux de transfert d'air pourrait entraîner un transfert de vapeur d'eau complémentaire, les éprouvettes ayant des perturbations permettant ce transfert d'air ont été complétées par un film perméable à la vapeur d'eau mais étanche aux transferts d'air (film I21) afin de ne mesurer que les transferts de vapeur d'eau.

3.2.2 Résultats de mesures

Les 63 éprouvettes ont été insérées dans les coupelles de 210 mm de diamètre. Ces coupelles comportent du chlorure de calcium permettant de définir une humidité dans la coupelle de 0%HR. Ces coupelles sont ensuite mises dans une étuve réglée en température (20°C) et humidité (90%HR).

Les résultats de mesure sont indiqués dans le tableau ci-après :

Tableau 4 : Résultats de mesures des différents échantillons

1	2	3	4	5	6	7	8
Cas d'étude	Défaut	Δm en g	P Flux de vapeur en kg/s	δ Perméabilité en kg/(m.s.Pa)	Valeur μ	Valeur Sd fabricant en m	Valeur Sd en m
A1	Aucun	13.397	2.43E-08	4.90E-14	4101	2	0.65
A2		0.835	4.86E-10	8.41E-16	238966	20	32.64
A3		0.275	1.12E-10	2.59E-16	777378	100	141.52
B5	Agrafes nues	8.927	2.85E-08	5.57E-14	3610	2	0.56
B6		2.832	2.42E-09	4.39E-15	45774	20	6.57
B7		2.034	1.10E-09	2.47E-15	81513	100	14.37
B8	Agrafes avec pastilles	6.104	2.62E-08	5.26E-14	3822	2	0.61
B9		1.166	1.07E-09	1.97E-15	102266	20	14.89
B10		0.970	5.24E-10	1.24E-15	161852	100	30.26
C11	Liaison 2 lès sans recouvrement	32.650	6.09E-08	1.61E-13	1248	2	0.26
C12		22.940	4.35E-08	9.96E-14	2017	20	0.36
C13		12.550	2.37E-08	6.47E-14	3107	100	0.67
D14	Liteaux en croix avec 2 clous	17.770	2.70E-08	5.74E-14	3498	2	0.59
D15		3.900	9.54E-10	1.81E-15	111005	20	16.60
D16		3.010	4.70E-10	1.05E-15	190950	100	33.80
G17	Entaille en croix	30.440	5.74E-08	1.28E-13	1573	2	0.28
G18		20.880	3.94E-08	8.14E-14	2470	20	0.40
G19		15.190	2.89E-08	7.19E-14	2797	100	0.55

La première information à retenir des résultats sur les films est que les valeurs de Sd obtenues ne correspondent pas aux valeurs annoncées par les fabricants.

Le pare-vapeur ayant un Sd de 2 m se retrouve plutôt vers 0.65 m qui correspond à une valeur 4 fois moins importante que celle revendiquée. Pour le pare-vapeur dont la valeur Sd revendiquée est de 20 m obtient en définitive une valeur de plus de 32 m ce qui correspond à 1,5 fois la valeur initialement prévue. Enfin le dernier pare-vapeur dont le Sd est ciblé à 100 m obtient en définitive 141 m ce qui est encore, environ, 1,5 fois la valeur citée par le fabricant. Les valeurs mesurées semblent loin des incertitudes liées à la fabrication.

A partir de ces résultats bruts, il est possible de définir la différence entre le flux de vapeur d'eau qui passe par le pare-vapeur avec défaut et le flux de vapeur d'eau qui passe par le pare-vapeur sans perturbation. A partir de cette différence, celle-ci est indiquée par unité de pression de vapeur d'eau. Cette dernière valeur va permettre de définir un μ spécifique à ramener à une surface et une épaisseur bien définie.

Le tableau suivant précise les valeurs obtenues en fonction du type de perturbations.

Tableau 5 : Première transformation des résultats de mesures

1	2	7	8	9	10	11	12
				différence entre produit avec défaut et produit initial	colonne 9/différence de pression	(colonne 9/ flux de vapeur produit initial)*100	Ecart entre les 3 éprouvettes en %
Cas d'étude	Défaut	Valeur Sd fabricant en m	Valeur Sd en m	DF Différence de flux en kg/s	DF Différence de flux pour 1 Pa en kg/(s.Pa)	Ecart différence/valeur initiale en %	Ecart entre les éprouvettes en %
A1	Aucun	2	0.65				4.6
A2		20	32.64				1
A3		100	141.52				1
B5	Agrafes nues	2	0.56	4.18E-09	1.66E-12	17	2.6
B6		20	6.57	1.93E-09	7.68E-13	397	12.2
B7		100	14.37	9.92E-10	3.95E-13	885	16.7
B8	Agrafes avec pastilles	2	0.61	1.90E-09	7.56E-13	8	5.8
B9		20	14.89	5.79E-10	2.31E-13	119	15.2
B10		100	30.26	4.12E-10	1.64E-13	368	44
C11	Liaison 2 lès sans recouvrement	2	0.26	3.66E-08	1.46E-11	151	5.2
C12		20	0.36	4.30E-08	1.71E-11	8847	17.5
C13		100	0.67	2.36E-08	9.39E-12	21037	9.2
D14	Liteaux en croix avec 2 clous	2	0.59	2.72E-09	1.08E-12	11	6
D15		20	16.60	4.68E-10	1.86E-13	96	14
D16		100	33.80	3.58E-10	1.42E-13	319	1.4
G17	Entaille en croix	2	0.28	3.31E-08	1.32E-11	136	5.4
G18		20	0.40	3.89E-08	1.55E-11	8004	3.8
G19		100	0.55	2.88E-08	1.15E-11	25675	22.7

3.2.3 Analyses des résultats de mesures

Les résultats montrent que les perturbations sont conséquentes sur les transferts de vapeur d'eau.

Deux groupes se distinguent. Le premier groupe concerne les éprouvettes comportant des agrafes et les éprouvettes ayant un pare-vapeur inséré entre deux liteaux croisés et cloués. Le second groupe concerne les passages de vapeur d'eau direct ce qui concerne les éprouvettes avec deux films côte à côte et sans recouvrement et les éprouvettes comportant un film avec des entailles en croix.

Les résultats de mesure des éprouvettes du premier groupe représentent entre 10 et 90 % de la valeur initiale. Plus le pare-vapeur est initialement étanche, et plus la perturbation va avoir une incidence sur la valeur perturbée. Le Sd initial de l'éprouvette ayant le pare-vapeur le plus étanche à savoir 141 m voit sa valeur Sd passer à 14,4 m pour la valeur la plus faible et à 33,8 m pour le pare vapeur pris en sandwich entre deux liteaux croisés. Ce qui représente respectivement 10 et 20 % de la valeur initiale.

La figure ci-dessous représente l'évolution de la valeur Sd des éprouvettes en fonction du type de perturbations récurrentes.

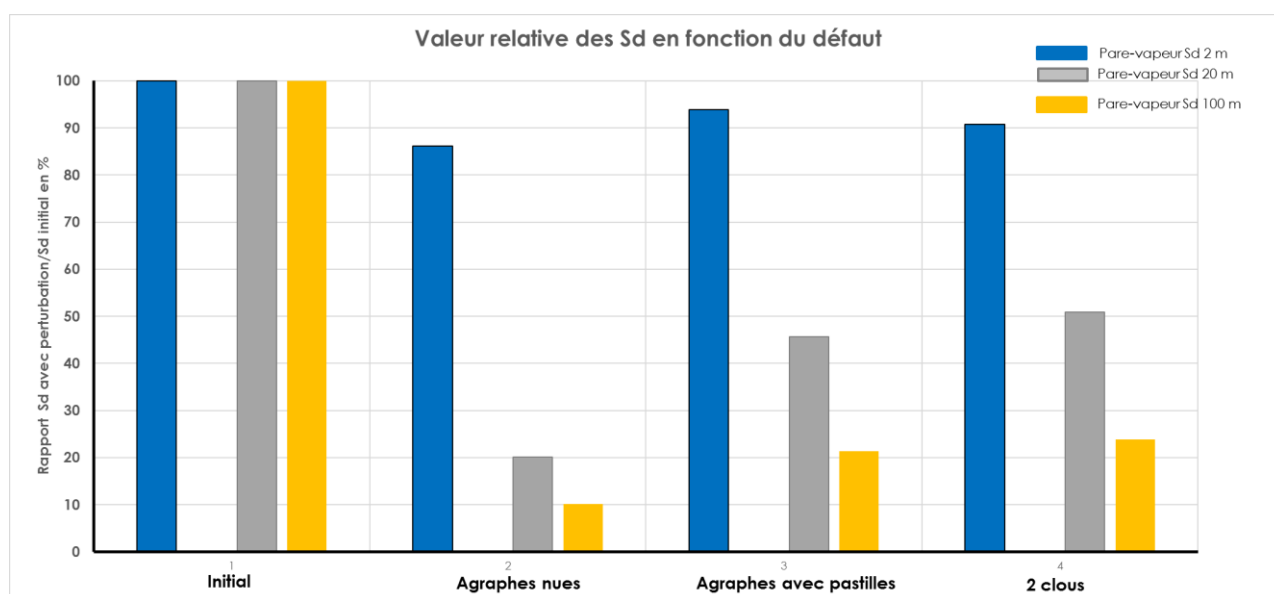


Figure 4 : Représentation du rapport Sd avec perturbations/Sd initial en fonction du type de perturbations récurrentes

Les perturbations n'affectent pas les valeurs initiales du pare-vapeur ayant un Sd initial de 0,65 m (de 85 à 95% de la valeur initiale).

Le pare-vapeur intermédiaire obtient des valeurs intermédiaires et avec des rapports compris entre 20 et 50 %.

La figure ci-dessous représente l'évolution de la valeur Sd des éprouvettes en fonction du type de perturbations accidentelles.

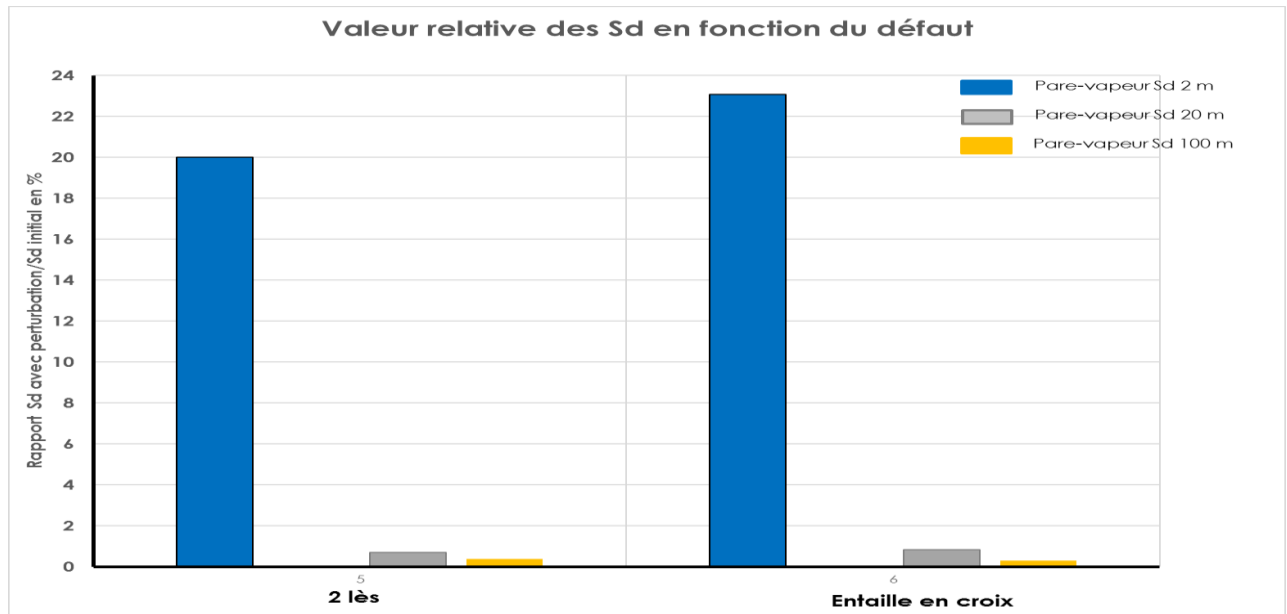


Figure 5 : Représentation du rapport Sd avec perturbations/Sd initial en fonction du type de perturbations accidentelles

Quand une entaille est réalisée ou qu'il y a discontinuité du pare vapeur localement, le pare-vapeur ayant un Sd significatif (plus d'une dizaine de m) est réduit à quelques pourcents.

Les valeurs de Sd et de μ équivalents peuvent, à partir des mesures à la coupelle, être déterminées.

Tout d'abord il est important de définir le flux passant par une seule perturbation (un clou ou une agrafe).

$Q_{\text{mesure}} = \text{Flux de vapeur mesurée en kg/s}$

$Q_{\text{perturbation}} = Q_{\text{mesure}} / \text{nb de perturbations lors de la mesure,}$

Puis d'appliquer le flux d'une perturbation au nombre de perturbations au m^2 .

$Q_{\text{m}^2} = Q_{\text{perturbations}} * \text{nb de perturbation au m}^2$

Le nombre de perturbations au m^2 est défini à partir des recommandations dans les documents de mises en œuvre des pare-vapeur.

Cette nouvelle valeur de flux est ramenée à une différence de pression de 1Pa.

$Q_{\text{m}^2 \cdot \text{Pa}} = Q_{\text{m}^2} / \Delta \text{Pa}$ lors de la mesure

Elle est appliquée à une surface donnée.

$Q_{\text{sr}} = Q_{\text{m}^2 \cdot \text{Pa}} / \text{Surface représentative en m}^2$

et pour une épaisseur donnée pour aboutir à une perméabilité à la vapeur des perturbations.

$\delta_{\text{perturbation}} = Q_{\text{sr}} * \text{épaisseur équivalente en m}$

A partir de cette perméabilité il est aisé de déterminer le μ et le Sd équivalent.

Le tableau ci-dessous présente les différentes valeurs ainsi calculées.

Défaut	nombre de perturbations dans la coupelle	flux par une perturbation en kg/s	flux par perturbation en kg/(s.Pa)	Nombre de perturbations au m ²	flux par m ² en kg/(s.Pa.m ²)	Surface représentative lors des simulations	flux par m ² en kg/(s.Pa.m ²) ramené à la surface représentative	perméabilité équivalente pour une épaisseur de produit fictif de 1 mm comme les différente membrane	μ équivalent	Sd équivalent
Agrafes nues	7	5.97E-10	2.39E-13	6/m ²	1.43E-12	s=0.027*1.66	3.20E-11	3.20E-14	6.25E+03	6.25E+00
	7	2.76E-10	1.10E-13	6/m ²	6.61E-13	s=0.027*1.66	1.48E-11	1.48E-14	1.36E+04	1.36E+01
	8	1.24E-10	4.96E-14	6/m ²	2.98E-13	s=0.027*1.66	6.64E-12	6.64E-15	3.01E+04	3.01E+01
Agrafes avec pastilles	7	2.71E-10	1.09E-13	6/m ²	6.51E-13	s=0.027*1.66	1.45E-11	1.45E-14	1.38E+04	1.38E+01
	7	8.28E-11	3.31E-14	6/m ²	1.99E-13	s=0.027*1.66	4.43E-12	4.43E-15	4.51E+04	4.51E+01
	7	5.89E-11	2.36E-14	6/m ²	1.41E-13	s=0.027*1.66	3.15E-12	3.15E-15	6.34E+04	6.34E+01
Liaison 2 lès sans recouvrement	200 mm de long	1.83E-07	7.32E-11	5	3.66E-10	s=0.001*1	3.66E-07	3.66E-10	5.46E-01	5.46E-04
	200 mm de long	2.15E-07	8.60E-11	5	4.30E-10	s=0.001*1	4.30E-07	4.30E-10	4.65E-01	4.65E-04
	200 mm de long	1.18E-07	4.72E-11	5	2.36E-10	s=0.001*1	2.36E-07	2.36E-10	8.48E-01	
Liteaux en croix avec 2 clous	2	1.36E-09	5.43E-13	3/m ²	1.63E-12	s=0.027*1.66	3.64E-11	3.64E-14	5.50E+03	5.50E+00
	2	2.34E-10	9.36E-14	3/m ²	2.81E-13	s=0.027*1.66	6.26E-12	6.26E-15	3.19E+04	3.19E+01
	2	1.79E-10	7.16E-14	3/m ²	2.15E-13	s=0.027*1.66	4.79E-12	4.79E-15	4.17E+04	4.17E+01
Entaille en croix	100 x100 mm	1.66E-07	6.62E-11	0.5	3.31E-11	s=0.001*0.1	3.31163E-07	3.31E-10	6.04E-01	
	100x100 mm	1.95E-07	7.78E-11	0.5	3.89E-11	s=0.001*0.1	3.89138E-07	3.89E-10	5.14E-01	3.36E-08
	100x100 mm	1.44E-07	5.76E-11	0.5	2.88E-11	s=0.001*0.1	2.87879E-07	2.88E-10	6.95E-01	

Tableau 6 : Tableau de calculs des μ et Sd équivalents des différentes perturbations

Les valeurs équivalentes des perturbations sont variables en fonction de la valeur S_d de la membrane à l'initial. La figure suivante permet de visualiser l'évolution de cette perturbation récurrente en fonction du S_d initial.

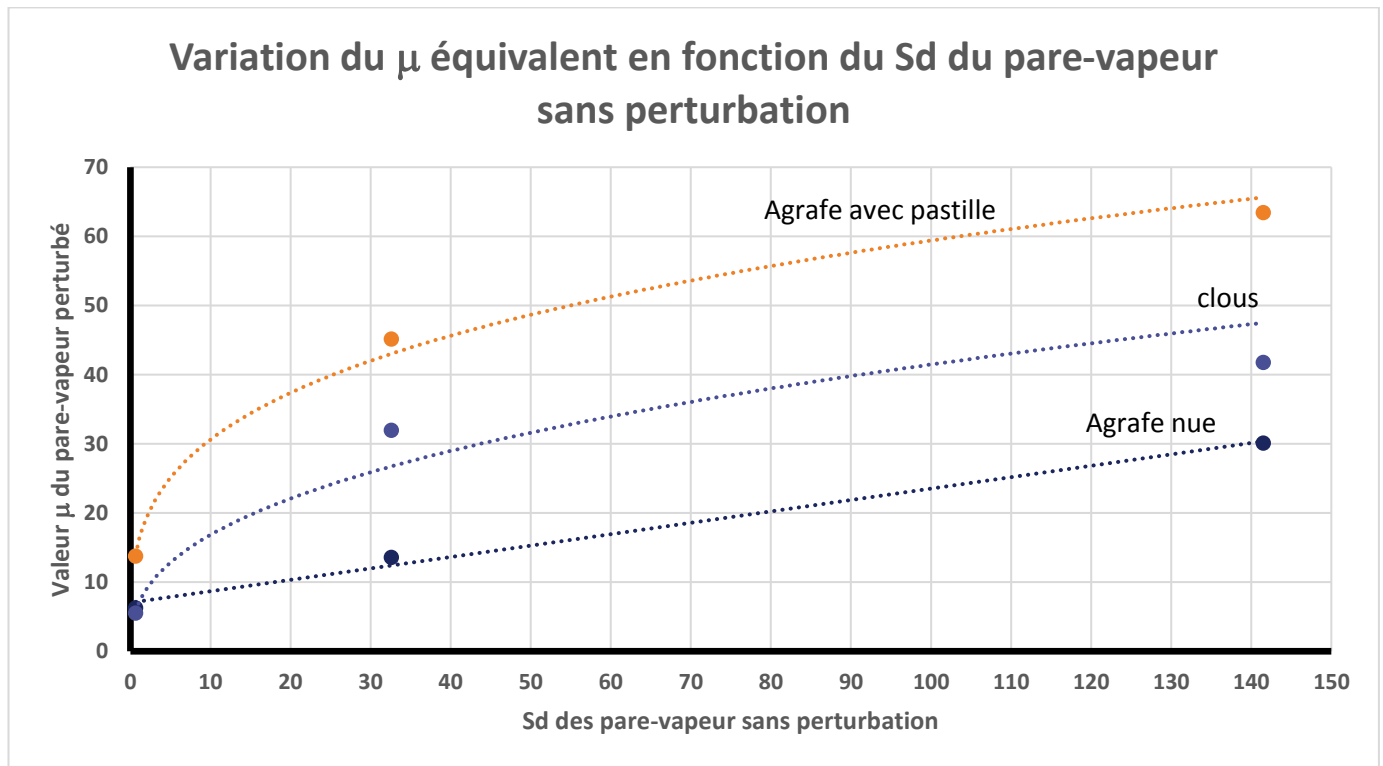


Figure 6 : Evolution des valeurs μ en fonction du S_d initial de la membrane pour perturbations récurrentes

Les variations de chacune des perturbations peuvent être déclinées à partir d'une équation simple pour chacune des perturbations en fonction de la valeur S_d de la membrane ayant cette perturbation.

L'ensemble des résultats de mesure conduit aux valeurs μ du tableau suivant.

Tableau 7 : Tableau des valeurs des μ équivalents suivant les différentes perturbations

Type de perturbation	Valeur de μ	Surface et épaisseur du produit fictif représentant la perturbation
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des agrafes seules	$\mu = 0.17 S_d + 6.01$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des agrafes avec pastilles	$\mu = 16 * S_d^{0.3}$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des clous avec la membrane prise entre deux liteaux	$\mu = 6.5 * S_d^{0.4}$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a une entaille ou un deux lès non jointoyé	$\mu = 0.0006$	Valeur à appliquer sur une largeur de 1 mm et pour une épaisseur de 1 mm

Dans le tableau ci-dessus il est également indiqué la surface sur laquelle est appliquée le $\square$ équivalent et l'épaisseur du produit équivalent à prendre en compte dans les simulations de transferts hygrothermiques.

Les simulations de transferts hygrothermiques prendront en compte ces perturbations en remplaçant le pare vapeur à l'endroit de la perturbation par un pare vapeur ayant les mêmes caractéristiques que le pare-vapeur mais avec un coefficient μ égale à la valeur correspondante dans le tableau ci-dessus at avec l'épaisseur et la largeur correspondantes

3.3 Perméabilité à l'air des défauts

Pour compléter les mesures de perméabilité à la vapeur d'eau le Groupe de Travail a souhaité que des essais de perméabilité à l'air soient effectués.

Des essais ont donc été menés pour définir le débit d'air traversant une fente de plusieurs dimensions en fonction de différentes pressions.

Les résultats de mesure permettent de définir un débit d'air éventuel à travers une fente sous une différence de pression de 4 Pa. Cette valeur de pression est celle définie dans la réglementation thermique pour définir la perméabilité à l'air d'un bâtiment.

Pour la détermination de la perméabilité à l'air deux approches ont été utilisées :

- d'une part à partir de résultats de mesure déjà effectuées sur une plaque de plâtre et sur une plaque métallique. Les courbes du débit en m³/h traversant l'orifice sous 4 Pa ont été tracées en fonction du diamètre de ce trou.
- d'autre part à partir de mesures effectuées sur une membrane kraft comportant une entaille de 100 mm de longueur et quelques millimètres de large.

Les résultats sont présentés ci-après.

3.3.1 Méthode de mesure de la perméabilité à l'air

La perméabilité intrinsèque d'un matériau peut être déterminée à partir de la loi de DARCY. Cette loi permet de relier le débit de fluide considéré au gradient de pression qui lui est appliqué. Elle montre que la perméabilité d'un matériau peut être obtenue à partir de la connaissance du débit traversant l'éprouvette et du gradient de pression aux bornes de l'éprouvette.

La perméabilité intrinsèque est alors de la forme :

$$K=\mu/R_s$$

Avec :

- R_s : Résistance spécifique au passage de l'air en Pa.s/m²,
- μ : viscosité dynamique du fluide en Poises (1 Poise = 0.1 Pa.s)

Les normes relatives aux méthodes de mesure de la perméabilité à l'air sont les suivantes :

- NF EN 29053 « Perméabilité à l'air matériaux pour application acoustique »
- NF B 20-109 et NF B 20-104 « Perméabilité à l'air de produits isolants à base de fibres minérales. Feutres, matelas et panneaux en laine minérale »
- NF EN ISO 4638 « Détermination de la perméabilité à l'air de matériaux polymères alvéolaires souples »
- NF EN ISO 9237 « Détermination de la perméabilité à l'air des étoffes »

La méthode décrite dans les normes consiste à réaliser un écoulement d'air au travers de l'éprouvette testée. Grâce à un débitmètre, le débit d'air est réglé. A ce débit la différence de pression est mesurée aux bornes de l'éprouvette.

Un dispositif de mesure appelé perméamètre est utilisé pour estimer la perméabilité locale d'une éprouvette.

Comme l'impose les normes, le perméamètre est composé de :

- Une cellule de mesure : diamètre intérieur = 300mm et hauteur = 325mm,
- Une chambre de tranquillisation : hauteur = 140mm,
- Un support d'éprouvette et un piston,
- Un dispositif de production d'écoulement d'air constant par dépression,
- Un dispositif de mesure du débit volumétrique d'air,
- Un dispositif de mesure de la pression différentielle de part et d'autre de l'éprouvette,
- Un dispositif de mesure de l'épaisseur de l'éprouvette.

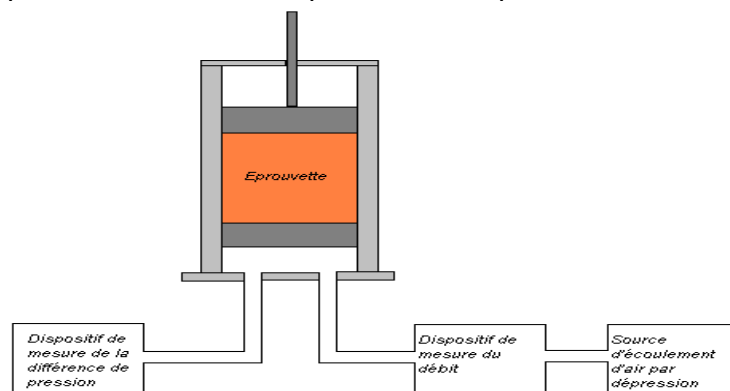


Figure 7 : Schéma de principe du perméamètre



Figure 8 : Vues du dispositif d'essai



Figure 9 : Vues de l'éprouvette dans le dispositif

3.4 Résultats de mesure

Des mesures ont été réalisées sur des éprouvettes de film avec des perturbations récurrentes (agrafes et clous). Ces mesures n'ont rien données car il n'y avait pas de débit d'air décelable entre 0 et 250 Pa.

Ensuite des mesures ont été réalisées sur des éprouvettes en papier kraft ayant des fentes de 3x35 mm, 3x98 mm et 5x98 mm.

Le papier kraft sans fente obtient un débit nul entre 0 et 250 Pa de différence de pression.

Les résultats de mesure sont indiqués dans le tableau suivant

Tableau 8 : Tableau des résultats de mesures des débits d'air

Débit d'air à travers une fente en fonction de la différence de pression				
Dimensions de la fente en mm		3x35	3x98	5x98
Section en mm ²		105	294	490
Diamètre de trou équivalent en mm		11.6	19	25
Débit		Différence de pression en Pa		
en l/min	en m ³ /h			
1.2	0.33	1.07	0.82	0.79
2	0.56	1.92	1.45	1.32
3	0.83	3.06	2.29	2.08
4	1.11	4.27	3.17	2.86
5	1.39	5.5	4.06	3.64
6	1.67	6.83	4.99	4.46
8	2.22	9.58	6.96	6.2
10	2.78	12.4	8.93	7.9
12	3.33	15.56	11.06	9.76
15	4.17	19.65	14.36	12.16
20	5.56	27.92	19.75	16.63
25	6.94	36.6	25	21.06
30	8.33	46	30.63	25.6
35	9.72	56	36.4	30.33
50	13.89	93.3	55.7	46.2

3.5 Analyse des résultats

La figure suivante montre l'évolution du débit d'air traversant les éprouvettes en fonction de la différence de pression.

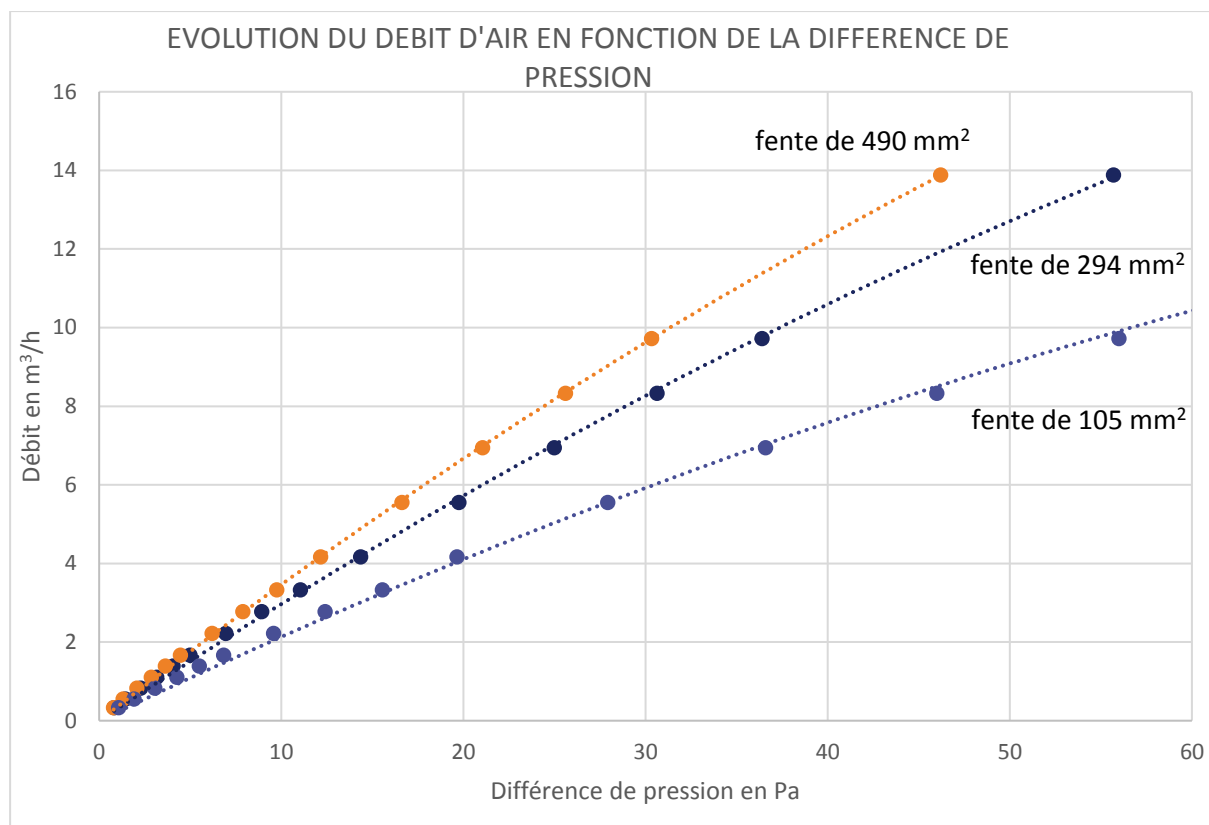


Figure 10 : Evolution du débit d'air en fonction de la différence de pression

Cette figure montre que le débit est plus important lorsque la fente a une surface plus importante mais pas dans les mêmes proportions. En multipliant par plus de 4 la surface de fente, le débit est multiplié par moins de 2.

De ces mesures, le débit d'air obtenu sous 4 Pa peut être déterminé. Le tableau suivant rassemble ces débits sous 4 Pa pour chacune des surfaces de fente

Tableau 9 : Tableau des débits obtenus sous 4 Pa

Débit d'air à travers une fente en fonction de la différence de pression			
Dimensions de la fente en mm	3x35	3x98	5x98
Section en mm ²	105	294	490
Diamètre de trou équivalent en mm	11.6	19	25
Débit d'air sous 4 Pa	0.87	1.21	1.41

Des mesures avaient été réalisées précédemment sur des éprouvettes métalliques d'un millimètre d'épaisseur et sur une plaque de plâtre de 13 mm d'épaisseur.

Ces différents résultats sont présentés dans la figure suivante :

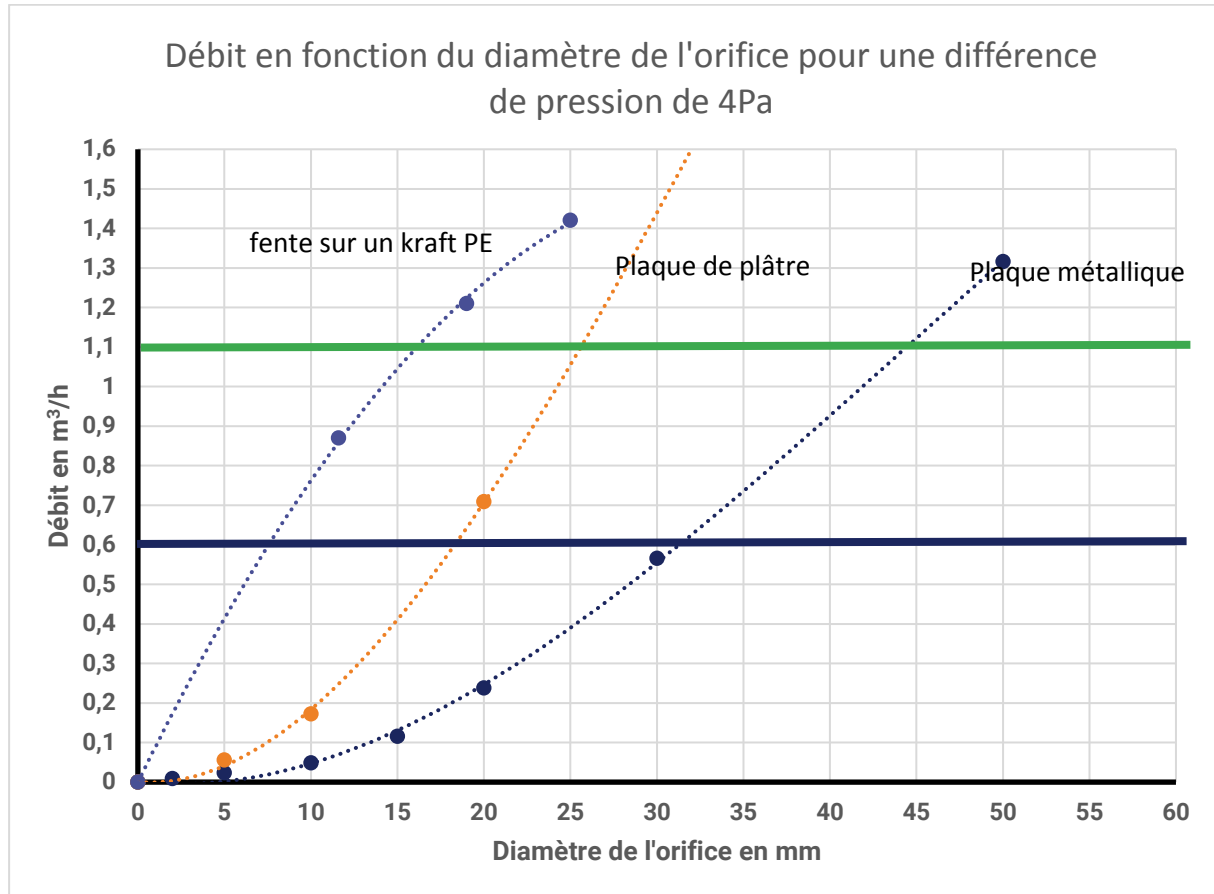


Figure 11 : Evolution du débit d'air en fonction du diamètre équivalent de l'orifice pour une différence de pression de 4 Pa

Il apparaît que la nature de matériau et de la forme du trou ont une incidence sur le débit.

Pour atteindre le débit de 0,6 m³/h sous 4 Pa (débit limite dans le cadre de la Réglementation Thermique pour les maisons individuelle), le diamètre équivalent de l'orifice doit être au plus égale à 8 mm.

Ce diamètre équivalent correspond à une surface de 50 mm² environ soit deux fois moins importante de la plus petite des fentes mesurées.

Cela signifie qu'il faut très peu de fente pour voir s'engouffrer au moins ponctuellement l'équivalent de la limite admissible de la réglementation.

3.6 Conclusions générales de la TACHE 2

Les différentes mesures ont pu être réalisées. Elles montrent qu'il y a deux types de perturbations.

Le premier type de perturbations concerne les perturbations n'entraînant pas de transfert d'air, le second type entraîne des transferts de vapeur d'eau et d'air.

L'ensemble des résultats de mesure conduit aux valeurs μ équivalent du tableau suivant.

La surface sur laquelle doit être appliquée le μ équivalent et l'épaisseur du produit équivalent à prendre en compte dans les simulations de transferts hygrothermiques sont indiquées également dans ce tableau.

Tableau 10 : Tableau des valeurs de μ équivalents des différentes perturbations

Type de perturbation	Valeur de μ	Surface et épaisseur du produit fictif représentant la perturbation
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des agrafes seules	$\mu = 0.17 S_d + 6.01$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des agrafes avec pastilles	$\mu = 16 * S_d^{0.3}$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des clous avec la membrane prise entre deux liteaux	$\mu = 6.5 * S_d^{0.4}$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a une entaille ou un deux lès non jointoyé	$\mu = 0.0006$	Valeur à appliquer sur une largeur de 1 mm et pour une épaisseur de 1 mm

Le débit d'air pouvant traverser une fente lorsqu'il y a une différence de pression de 4 Pa est de :

$$\text{Débit (m}^3/\text{h)} = 0.18498 \cdot d_0^{0.633}$$

Avec d_0 : diamètre équivalent de l'orifice en mm.

Le débit d'air pouvant traverser un pare-vapeur ayant une perturbation récurrente comme les agrafes et les clous est considéré comme nul lorsqu'il y a une différence de pression entre 0 et 250 Pa.

4 TACHE 3

4.1 Objectifs

La réalisation d'expérimentation à l'échelle paroi a pour objectif, d'une part, d'évaluer les éventuels risques liés à la présence d'humidité due aux perturbations dans la membrane pare-vapeur et, d'autre part, de pouvoir confronter les résultats issus des expérimentations avec les modélisations WUFI (voir tâche 4) afin de valider les nouvelles données d'entrées dans le logiciel (apports d'humidité supplémentaire liés à une perturbation du pare-vapeur).

La tâche 3 est scindée en 2 partie :

- Sous-tâche 3.1 : Mise en place et réalisation des essais en fonction des configurations retenues dans la tâche 1,
- Sous-tâche 3.2 : Analyse des essais et confrontation des résultats avec le logiciel WUFI : évaluation du risque de pathologie et définition des Sd modifiés (lien avec les sous-tâches 4.2 et 4.4)

4.2 Présentation des essais

Les cellules de mesure hygrothermique sont composées de deux enceintes indépendantes séparées par une paroi isolante contenant deux ouvertures (zone de test) dans lesquelles les échantillons sont mis en œuvre. Des mesures de température et d'humidité seront réalisées à chaque interface des parois. Plusieurs scénarios de couplage climat intérieur/climat extérieur seront testés à l'aide de système de régulation en température et humidité.

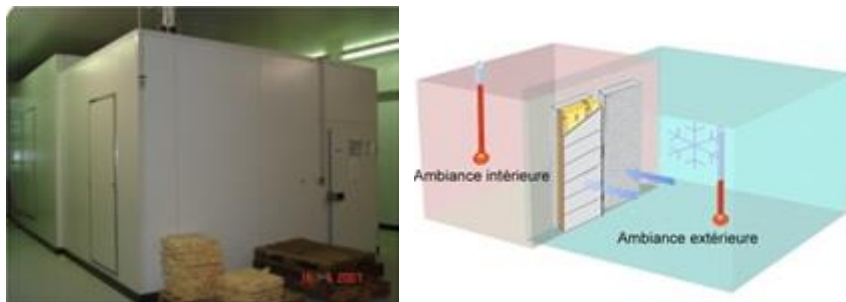


Figure 12 : Présentation des cellules climatiques

Les cellules hygrothermiques permettent de mesurer simultanément deux parois. Les expérimentations seront réalisées sur des échantillons de 2m de hauteur par 0,7m de largeur. Le choix des configurations de parois à tester ainsi que des perturbations associées découle des discussions entre membres du comité de pilotage du projet, plusieurs enquêtes, questionnaires et propositions de typologies de parois qui ont été proposées dans ce sens. Le risque lié à la présence de discontinuité dans le pare-vapeur sera évalué à travers des mesures de profils de température et d'humidité au sein des parois testées. Les essais sont réalisés en conditions stationnaires.

Instrumentation



Figure 13 : Capteur de température et humidité : STH 55 (Newsteo) Température : -25 à $+80^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$
HR : 0 à $100\% \pm 2\%$

Scénario de régulation

L'objectif est d'étudier la migration d'un flux de vapeur d'eau traversant la paroi de l'intérieur vers l'extérieur. Les conditions de température et d'humidité relative des ambiances sont les suivantes :

- $T=23^{\circ}\text{C}$ / HR=85% en intérieur
- $T=23^{\circ}\text{C}$ / HR=35% en extérieur

La première étape de la mesure sera réalisée sans différentiel de pressions entre les deux ambiances puis, afin de favoriser la migration de la vapeur d'eau dans la paroi, la cellule correspondant à l'ambiance extérieure sera mise en pression ou en dépression à l'aide d'une porte soufflante.

Chaque configuration testée est soumise à 4 scénarios en continu dans l'ordre suivant :

- Scénario A : Paroi sans perturbation, sans mise en route de la porte soufflante
- Scénario B : Paroi sans perturbation, avec mise en route de la porte soufflante
- Scénario C : Paroi avec perturbation, sans mise en route de la porte soufflante
- Scénario D : Paroi avec perturbation, avec mise en route de la porte soufflante

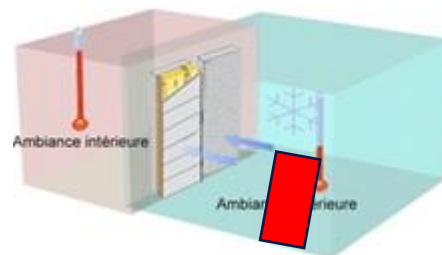


Figure 14 : Porte soufflante entre la cellule d'ambiance extérieure et l'environnement entourant les essais

4.3 Présentation des cas d'étude

Huit configurations ont été prévues. Après enquête lors des GT, il est proposé de mettre en œuvre dans un premier temps quatre cas d'étude (1 à 4) dont les résultats sont présentés dans le présent rapport. Les résultats ont servi de base à la discussion sur la définition des quatre autres cas d'études.

Cas de figure validés

Les configurations dont les mesures ont été réalisées sont les suivantes :

- 1- Combles aménagés – non jointolement de 2 isolants laine de verre surfacage kraft
NB : durant l'essai, l'inclinaison de la paroi sera verticale et non inclinée

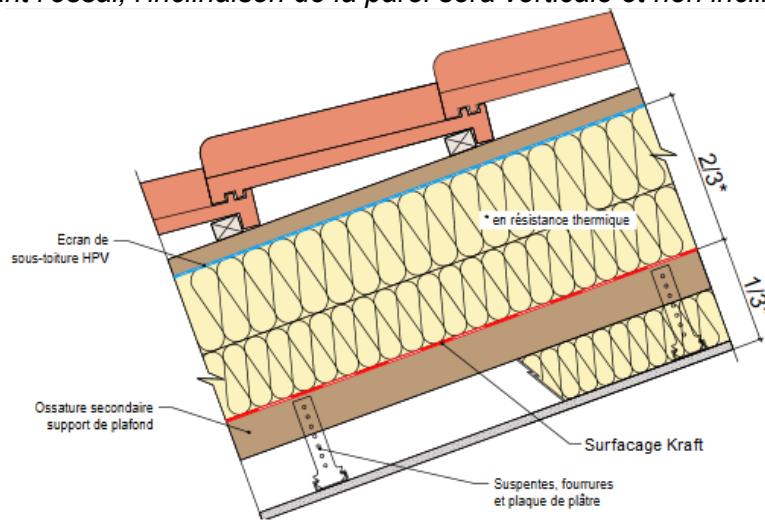


Figure 15 : Schéma de la configuration 1 combles aménagés

- 2- Combles aménagés – jointolement adhésif de 2 isolants laine de verre surfacage kraft
NB : durant l'essai, l'inclinaison de la paroi sera verticale et non inclinée

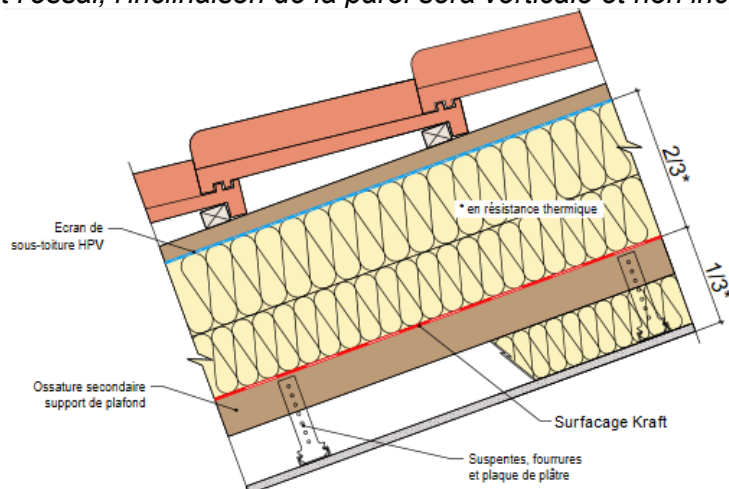


Figure 16 : Schéma de la configuration 2 combles aménagés

3- Paroi ossature bois: entaille droite 10 cm dans le PV 18m (mesure réalisée avec et sans entaille)

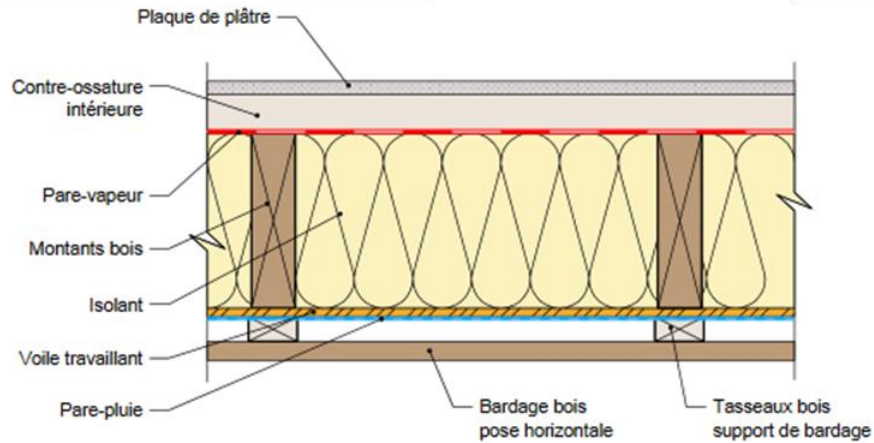


Figure 17 : Schéma de la configuration 3 paroi ossature bois

4- Paroi lourde type maçonnerie : entaille droite 10 cm dans le PV 18m (mesure réalisée avec et sans entaille)

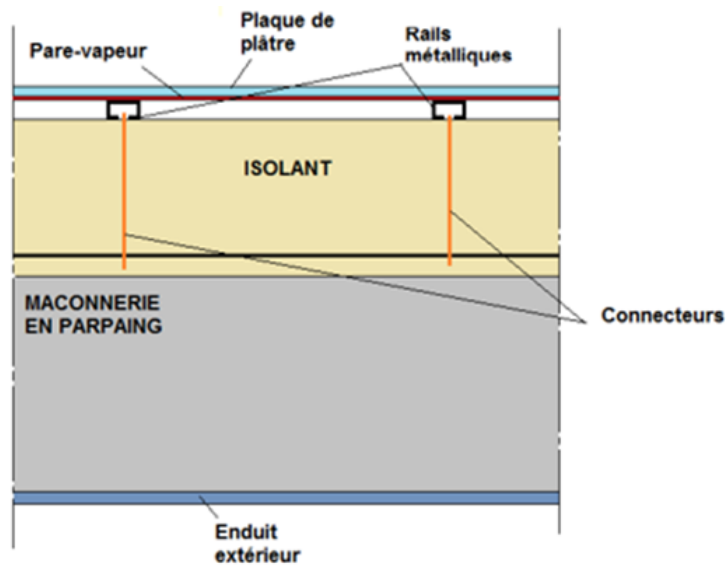


Figure 18 : Schéma de la configuration 4 paroi lourde en maçonnerie

4.4 Résultats d'essais

Configurations 1 et 2

L'objectif des deux premiers essais est d'étudier la capacité du kraft à jouer le rôle de pare-vapeur. Aucune des configurations testées ne présente de film pare-vapeur. La configuration 1 représente une typologie de combles aménagés avec pose d'un isolant avec surfaçage kraft déposé entre solives, la configuration 2 est identique à l'exception d'un jointement des isolants côté kraft afin d'avoir une surface recouvrant la totalité de la surface de l'échantillon.



Figure 19 : Configuration 1 (kraft sans jointolement a) et configuration 2 (kraft avec jointolement b et c)



Figure 20 : configurations identiques à celles-ci-dessus – vues côté intérieur (a) et extérieur (b)

La pose du scotch permettant le jointolement du kraft est réalisée de manière soignée afin de n'avoir aucun chemin d'air parasite sur toute la surface de l'échantillon.

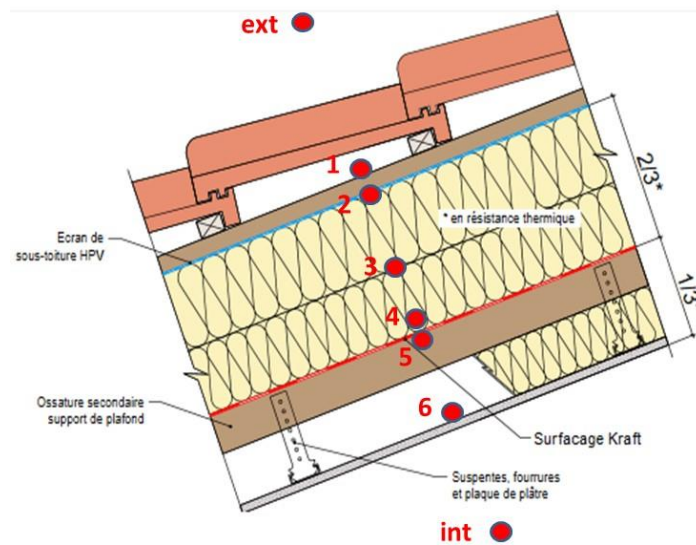


Figure 21 : Emplacements des capteurs de température et d'humidité

Pour ces cas de figure, seulement 2 scénarios de régulation sont appliqués (avec et sans porte soufflante).

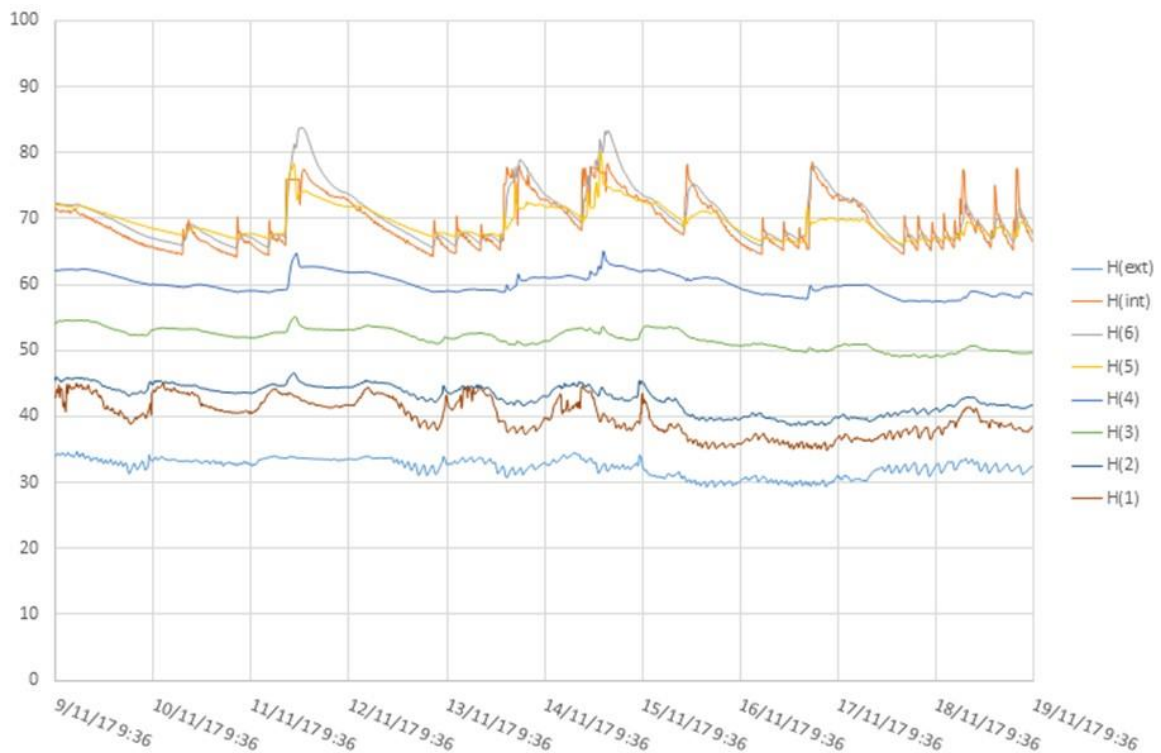


Figure 22 : Evolution des humidités relatives au sein de la paroi sans mise en route de la porte soufflante (configuration 1 sans jointolement)

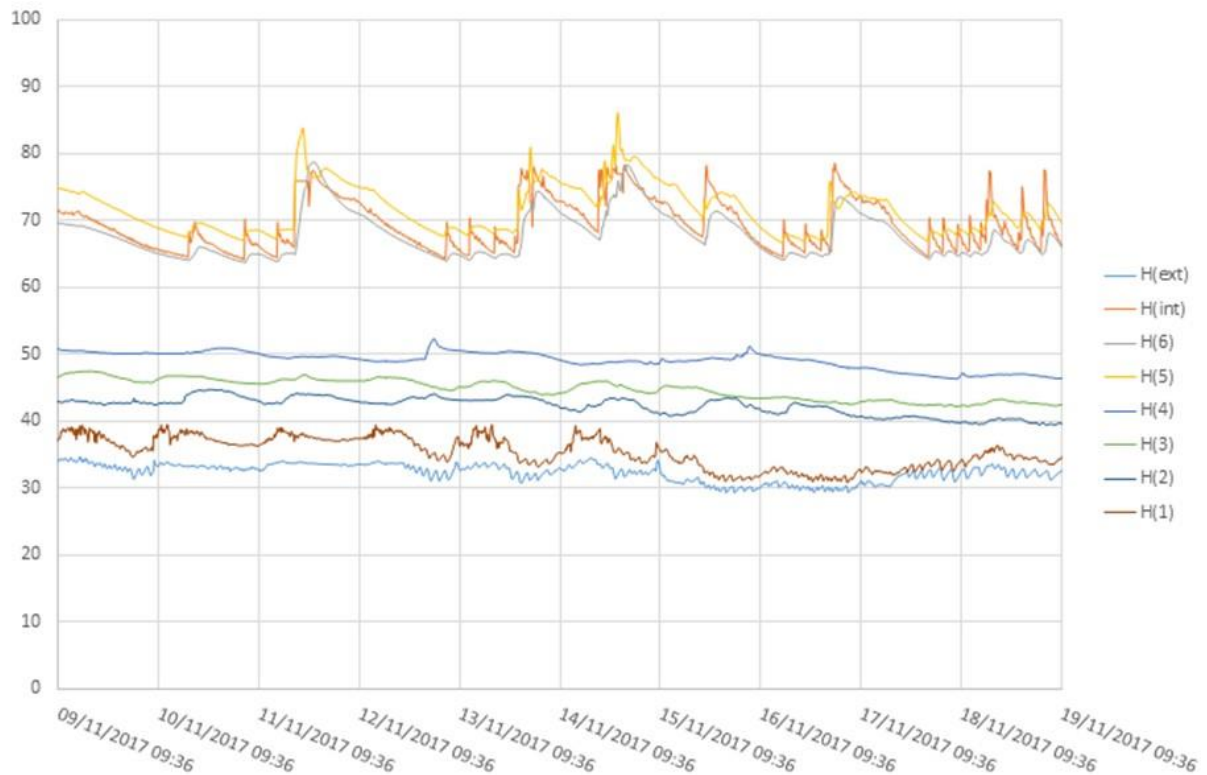


Figure 23 : Evolution des humidités relatives au sein de la paroi sans mise en route de la porte soufflante (configuration 2 avec jointolement)

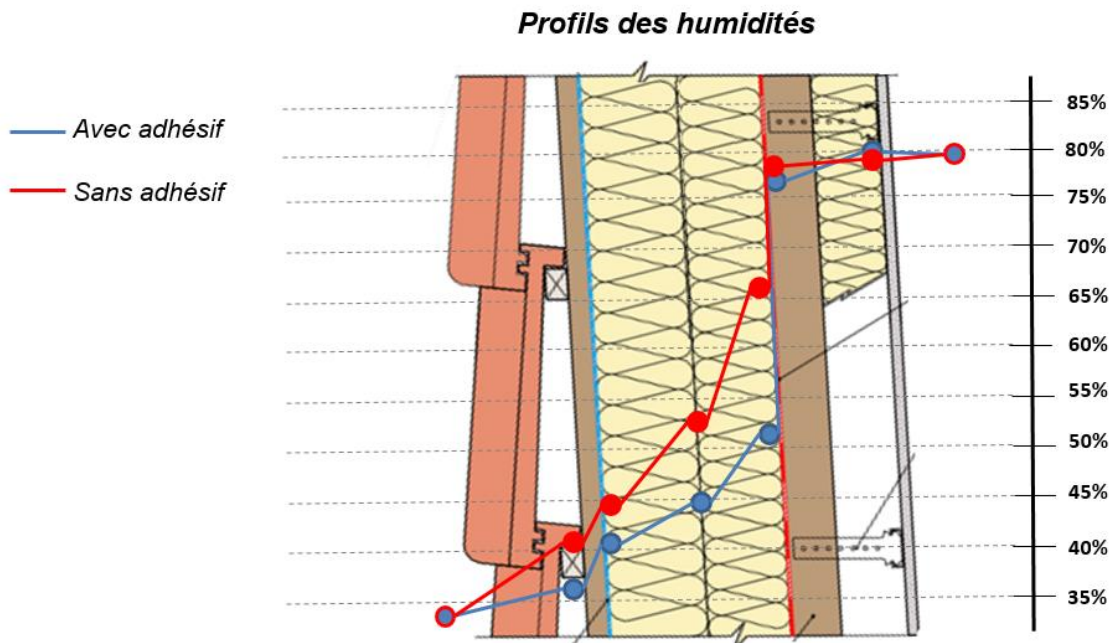


Figure 24 : profils des humidités relatives mesurées au sein des configurations 1 et 2

La configuration 1 présente une distribution des humidités relatives « progressive » dans le sens où chaque couche de la paroi va jouer un rôle dans l'amortissement du gradient de pression de vapeur d'eau, contrairement à la configuration 2 qui présente une différence

importante (30% au maximum) entre les points de mesure 4 et 5 correspondants au surfacage kraft, dans ce cas de figure le kraft jointoyé soigneusement avec de l'adhésif semble jouer un rôle de frein vapeur.

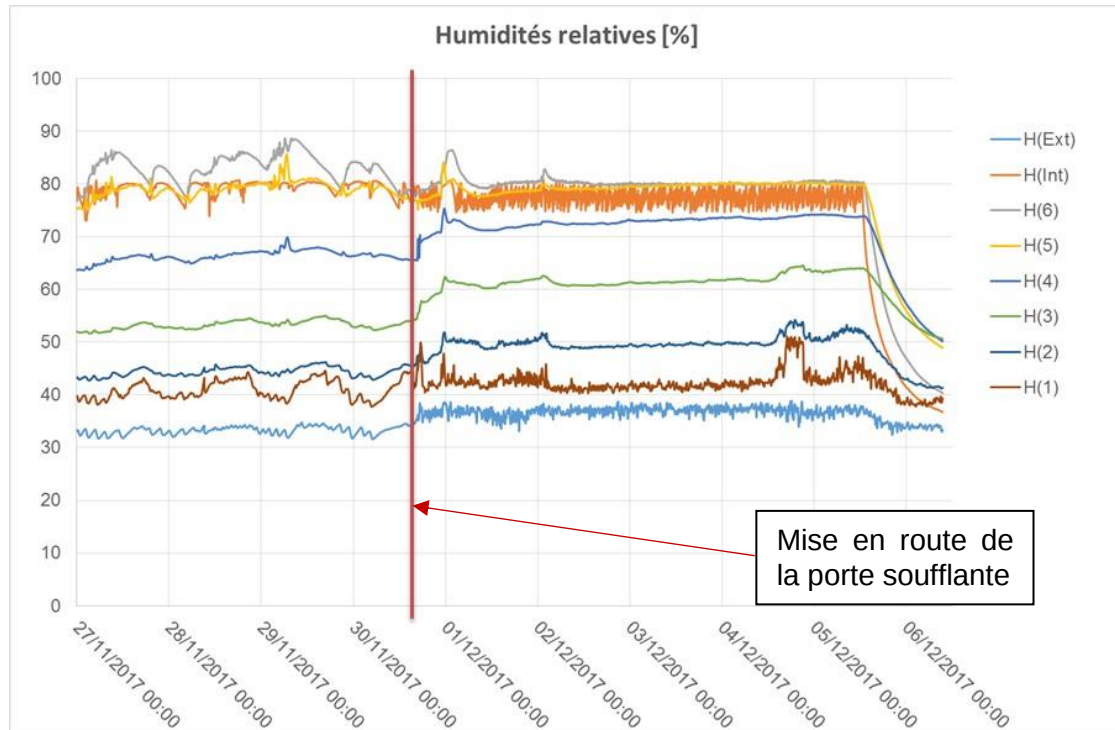


Figure 25 : Evolution des humidités relatives au sein de la paroi avec mise en route de la porte soufflante (configuration 1 sans jointolement)

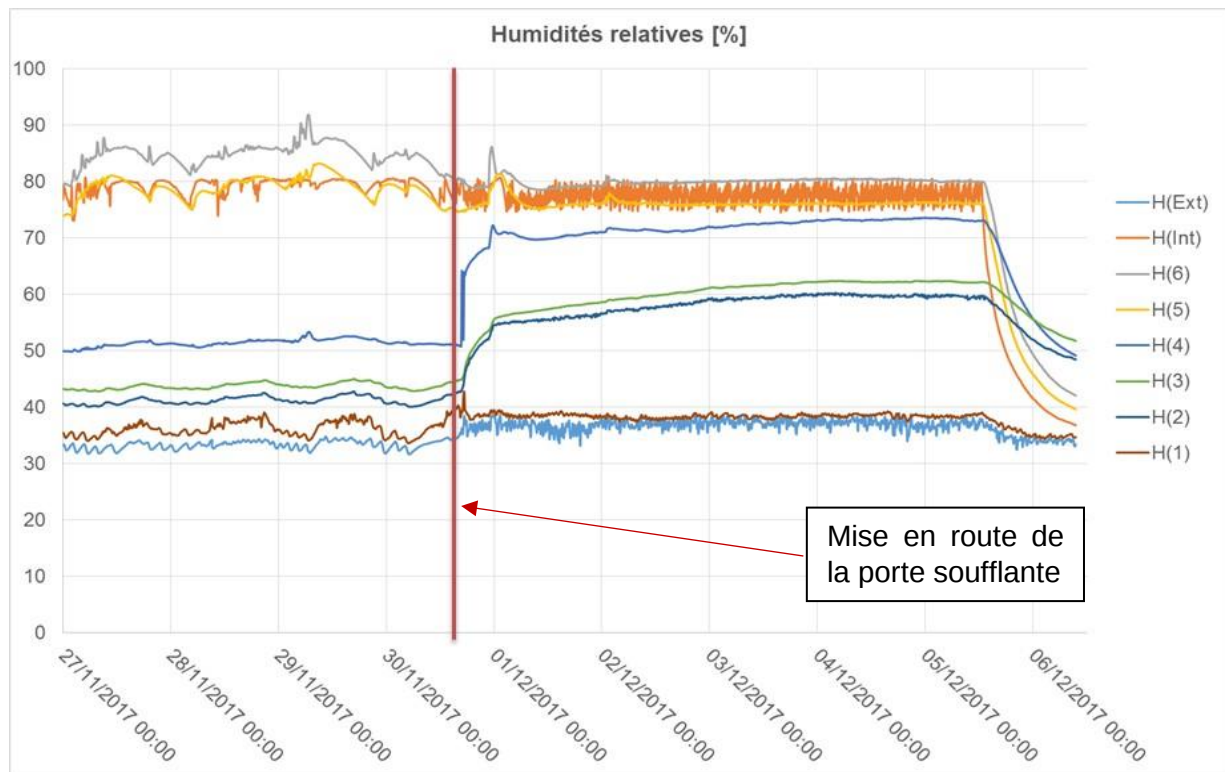


Figure 26 : Evolution des humidités relatives au sein de la paroi avec mise en route de la porte soufflante (configuration 2 avec jointolement)

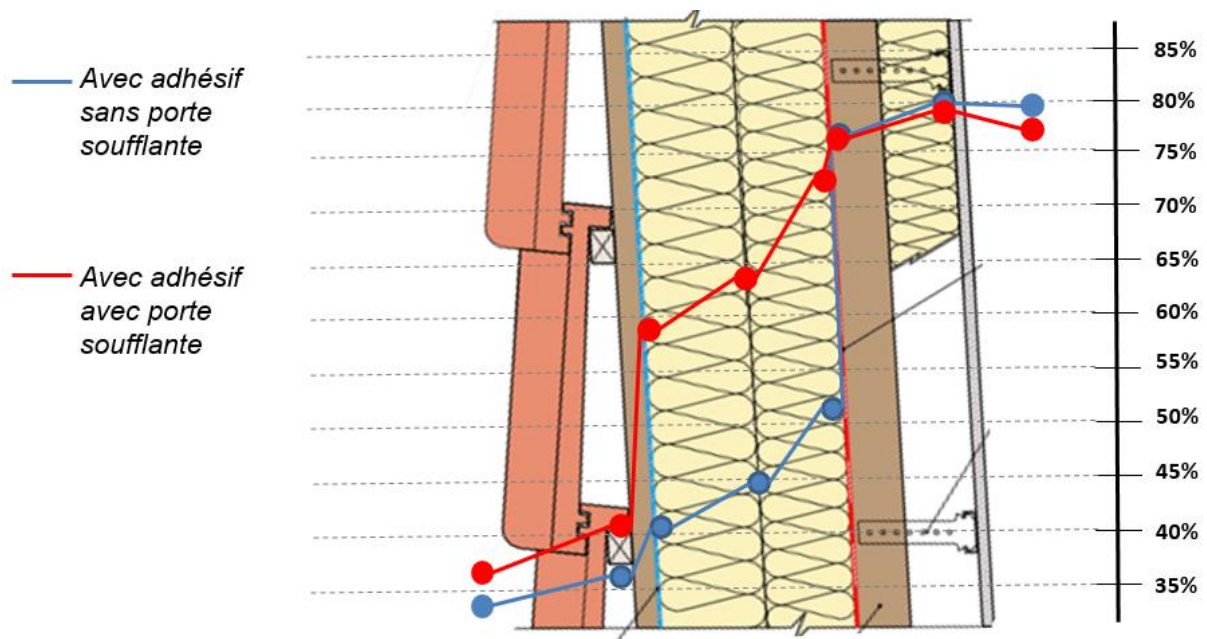


Figure 27 : Profil des humidités relatives mesurées au sein de la configuration 2 avec et sans mise en

La mise en route de la porte soufflante, avec un débit assez faible (5% de la puissance maximale du ventilateur), permet de constater que lorsqu'une dépression est appliquée côté extérieur, l'effet frein vapeur n'existe plus ; on retrouve le même profil que sans adhésif. Deux possibilités peuvent expliquer ce résultat soit le kraft n'est pas étanche à l'air ce qui ne correspond pas aux résultats de perméabilité à l'air des produits, soit lors de la dépression l'air passe par un autre endroit.

Configurations 3 et 4

L'objectif de ces essais est de pouvoir quantifier le risque lié à la présence d'humidité dû à une perturbation de type entaille droite dans le film pare-vapeur (exemple : coup de cutter en phase chantier). Pour cela, 2 typologies de murs extérieurs sont considérées : un mur à ossature bois et un mur lourd de type maçonnerie.



Figure 28 : Mise en œuvre de la configuration 3 (mur ossature bois)



Figure 29 : Mise en œuvre de la configuration 4 (paroi en maçonnerie)

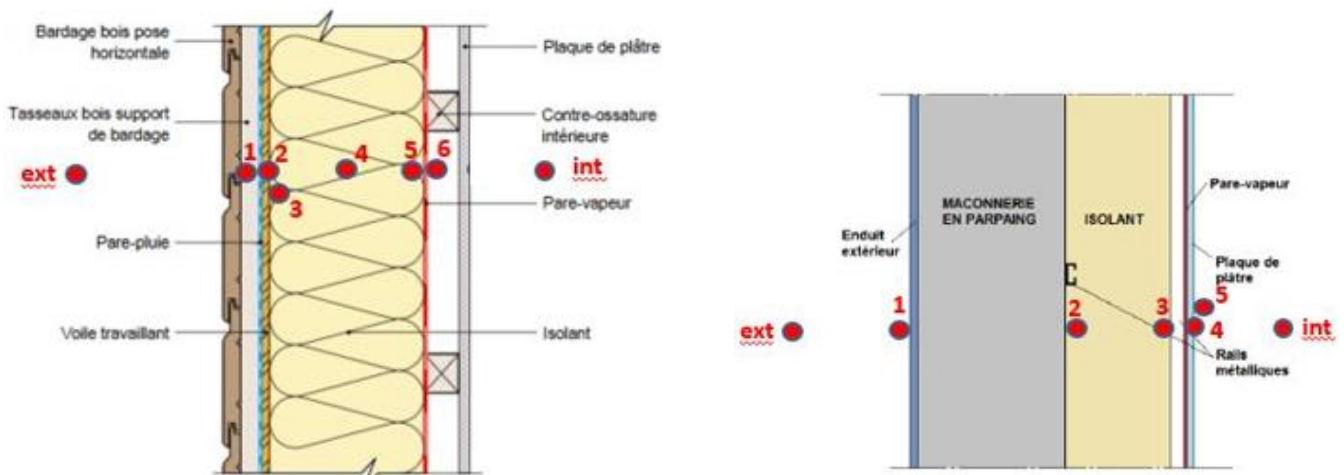


Figure 30 : Emplacement des capteurs de température et d'humidité

Pour ces cas de figure, les 4 scénarios de régulation sont appliqués (avec et sans entaille ET avec et sans porte soufflante). Il s'agit d'une entaille droite de 10cm de long.



Climat A Climat B Climat C Climat D
Figure 31 : Evolutions des humidités relatives de la configuration 3 (mur ossature bois)

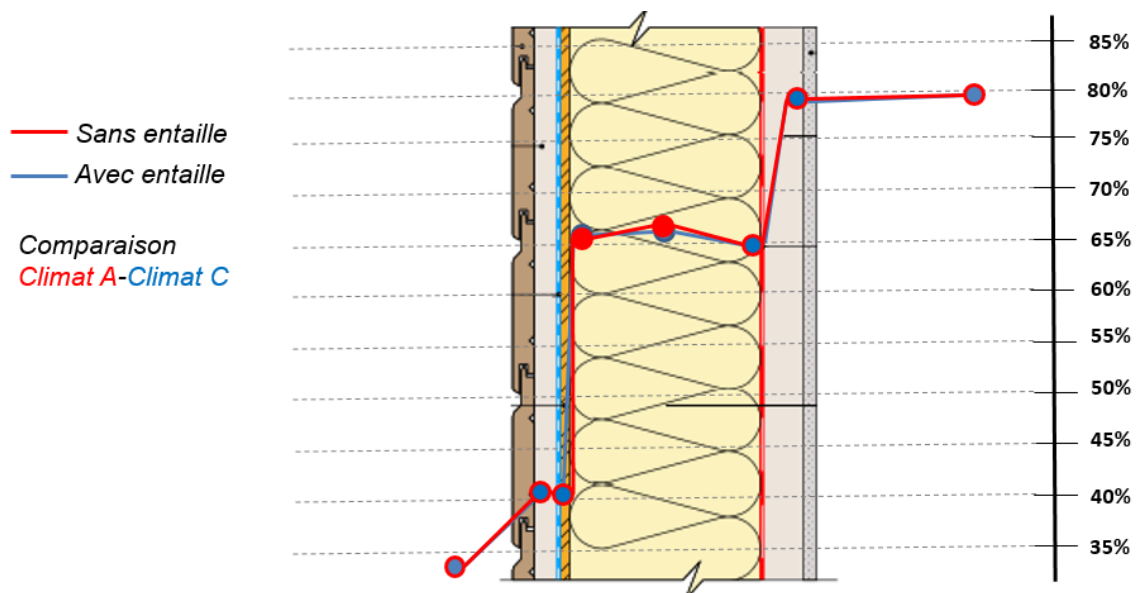


Figure 32 : Profils des humidités relatives de la configuration 3 (mur ossature bois) sans mise en route de la porte soufflante

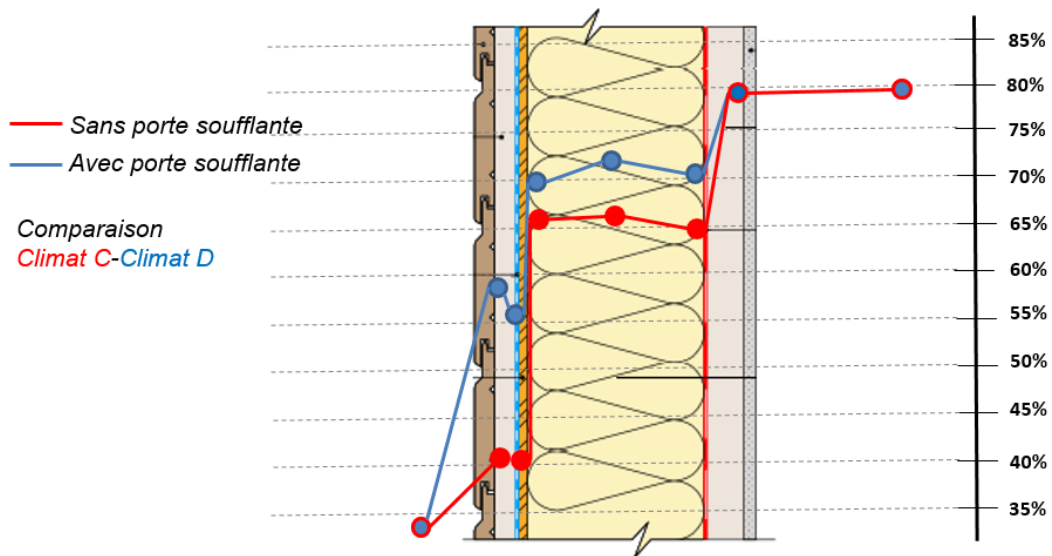


Figure 33 : Profils des humidités relatives de la configuration 3 (mur ossature bois) avec une entaille droite de 10 cm

L'humidité de l'ambiance intérieure est perturbée lorsque la porte soufflante est actionnée. La courbe correspondant à l'humidité mesurée dans la lame d'air du bardage extérieur est très éloignée de la courbe d'humidité de l'ambiance extérieure lorsque la porte soufflante est actionnée.

Il n'y a pas d'évolution significative des humidités dans l'isolant en laine minérale lorsqu'il y a présence d'une entaille et lorsqu'une différence de pression est exercée entre les deux ambiances.

L'humidité mesurée entre le panneau OSB et le pare-pluie indique une valeur toujours plus faible (quelques %) par rapport à l'humidité mesurée dans la lame d'air ventilée derrière le bardage.

Ces observations conduisent à se poser certaines interrogations sur le déroulement des essais notamment au niveau des erreurs de mesures éventuelles des capteurs et des fuites d'air parasites (en périphérie des ouvertures accueillant les échantillons) qui court-circuiteraient les mesures considérées.

Une analyse plus poussée des résultats obtenus pour la configuration 3 est présentée dans la partie 5.3.2.1 dédiée à la tâche 4 (p.66).

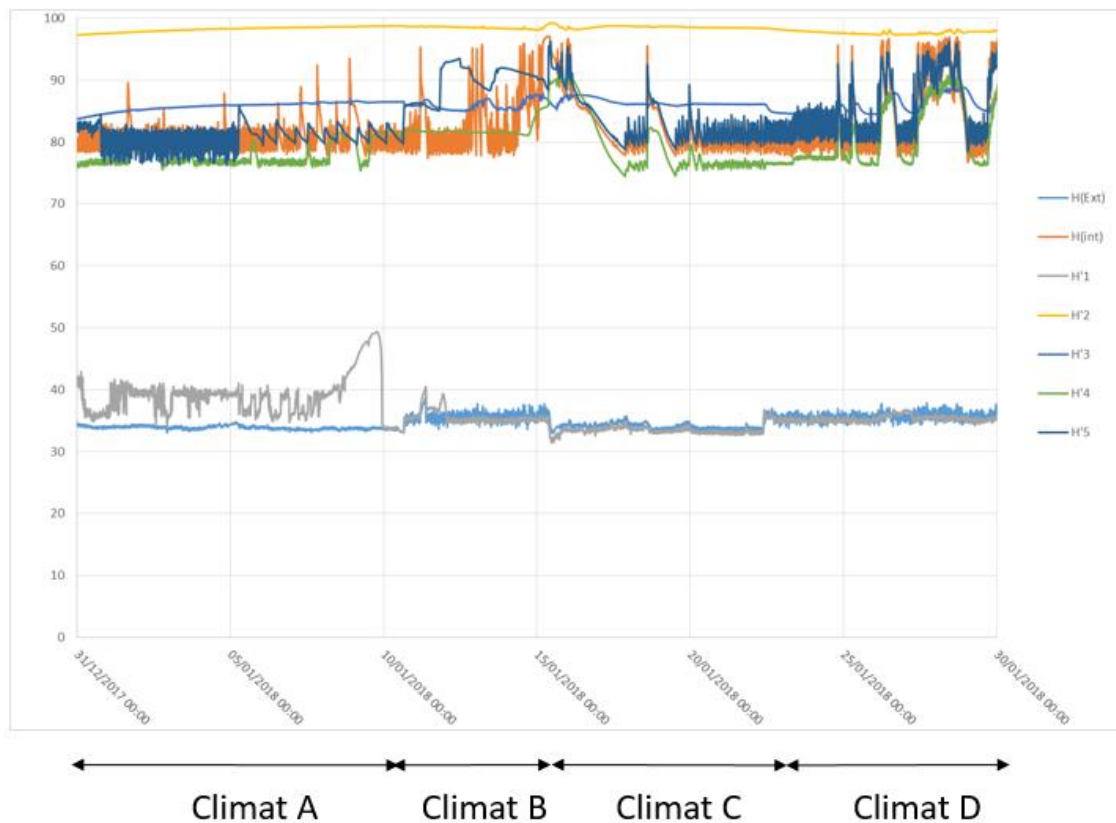


Figure 34 : Evolutions des humidités relatives de la configuration 4 (paroi en maçonnerie)

Les mesures correspondant aux capteurs présents dans la paroi (H2, H3, H4) affichent toutes des humidités relatives supérieures à 75%. La mise en œuvre de la paroi implique la pose d'un enduit humide côté extérieur mais également du mortier entre les parpaings, la laine de verre jouant le rôle de sur-isolation côté intérieur se retrouve chargée en humidité provenant de la paroi elle-même et non de l'ambiance intérieure régulée à 85% d'humidité. Même si le temps du test est assez court (1 mois) la paroi ne montre aucun signe de réduction des taux d'humidités.

Ces résultats montrent bien la nécessité d'avoir une « paroi sèche » lors de la pose d'un complément d'isolant intérieur associé à un film pare-vapeur, sous peine de voir l'humidité coincée dans l'isolant. Il est toutefois difficile d'apprécier finement le comportement à la vapeur d'eau de cette configuration car les temps de séchage sont trop longs pour un projet de ce type qui demande une succession d'essais et de configurations en un temps assez court.

Configurations 5 et 6

La configuration 5 qui est identique à la configuration 3 mais avec un pare-vapeur ayant un S_d de 90 m au lieu d'un pare-vapeur de 18 m. La configuration 6 qui est de type comble perdu. L'ambiance extérieure est directement en contact avec la laine minérale, une surisolation intérieure complète cette paroi.



Figure 35 : Mise en œuvre de la configuration 5 (paroi ossature bois)



Figure 36 : Mise en œuvre de la configuration 6 (comble perdu)

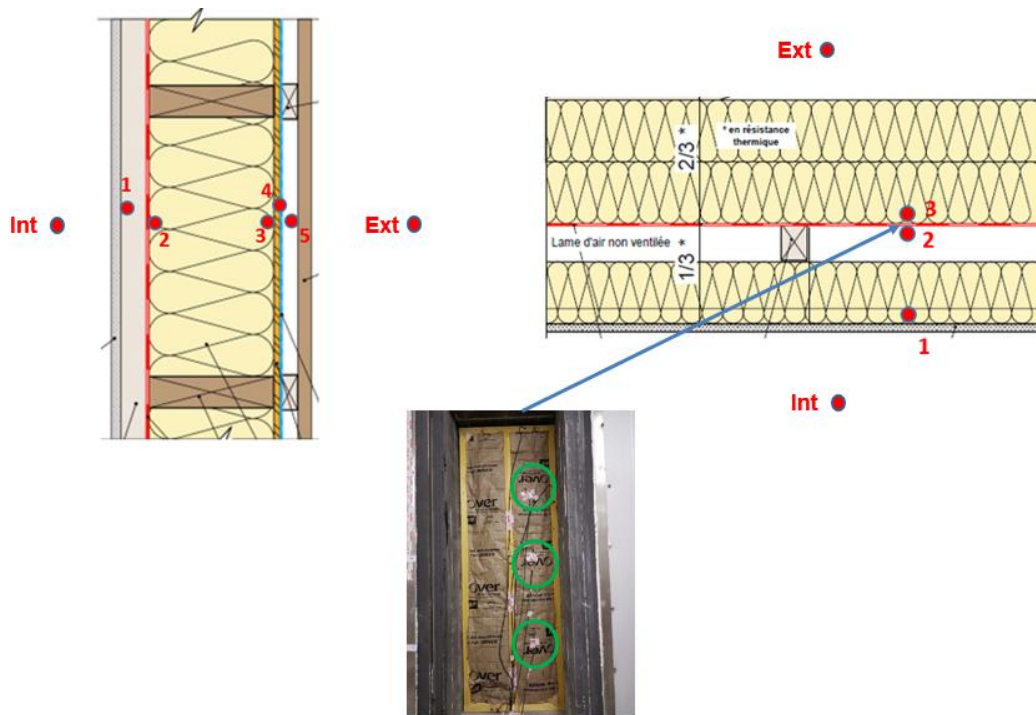


Figure 37 : Emplacement des capteurs de température et d'humidité

Pour ces cas de figure, les 4 scénarios de régulation sont appliqués (avec et sans entaille ET avec et sans porte soufflante). Il s'agit d'une entaille droite de 10cm de long.

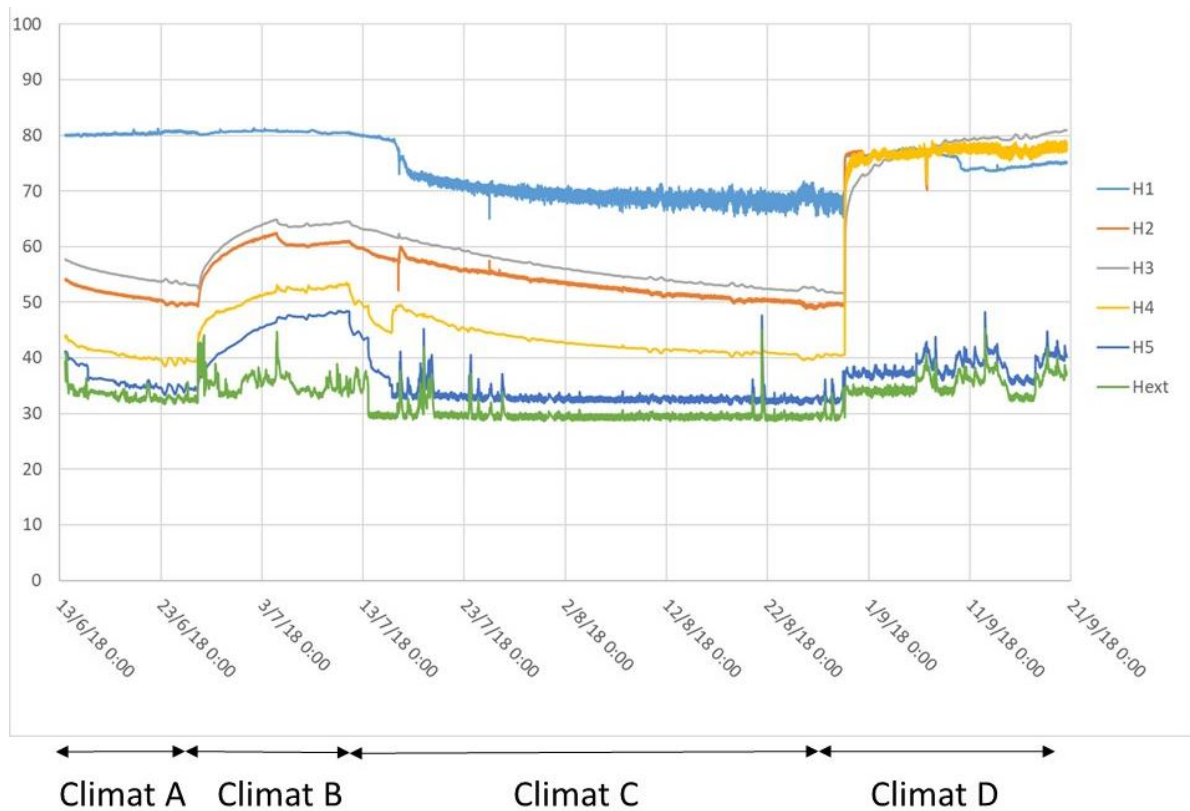


Figure 38 : Evolutions des humidités relatives de la configuration 5 (mur ossature bois)

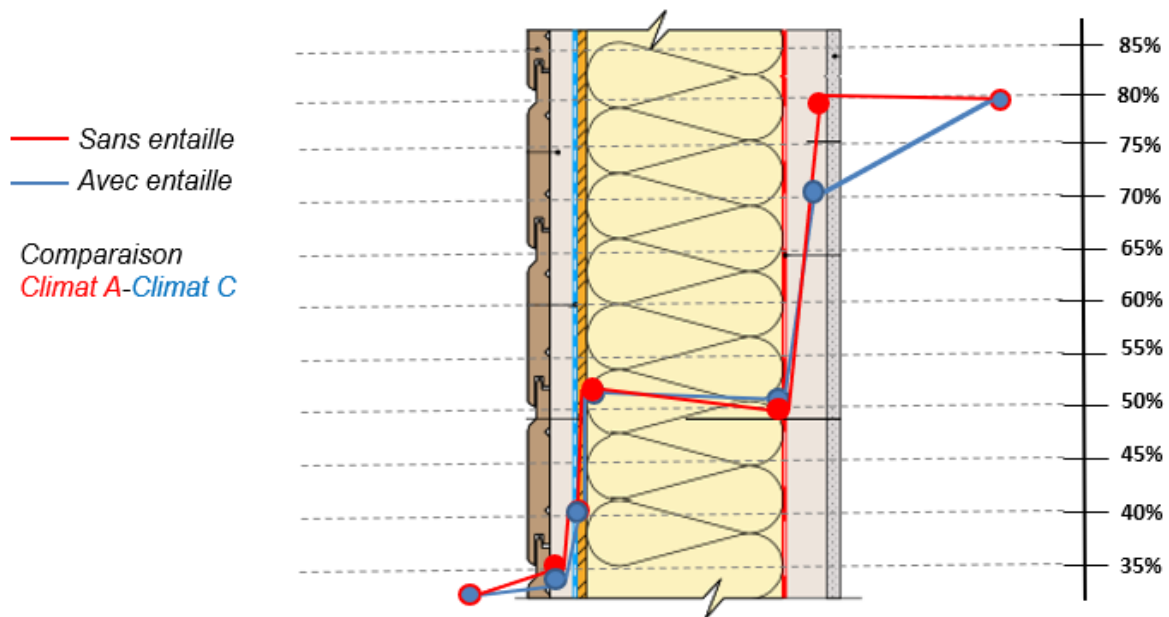


Figure 39 : Profils des humidités relatives de la configuration 5 sans mise en route de la porte soufflante

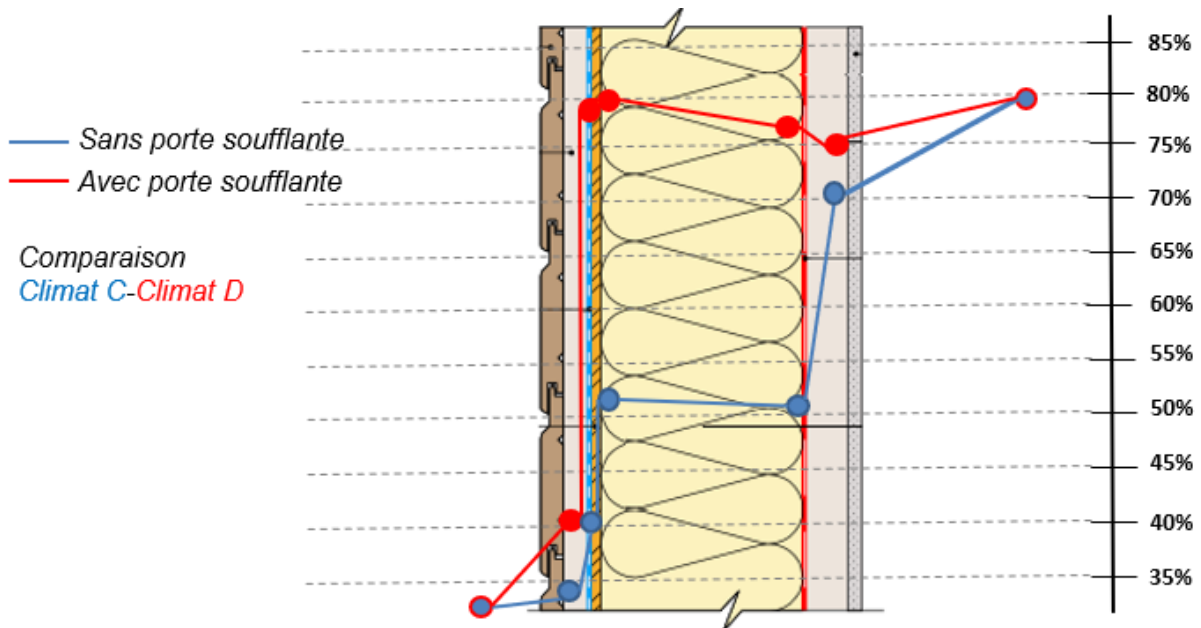


Figure 40 : Profils des humidités relatives de la configuration 5 avec une entaille droite de 10 cm

Les essais ont été plus longs que précédemment (deux mois et demi) afin d'obtenir des conditions totalement stables.

Il y a très peu de différence entre le climat A et le climat C, cela conduirait à montrer que la diffusion de vapeur d'eau seule est faible.

Au contraire, il y a une différence importante entre les climats A et B et C et D, cela montre que la part convective liée aux transferts d'air est importante.

Plusieurs explications peuvent expliquer ces phénomènes : la part diffusive est ponctuelle, si le capteur d'humidité dans la paroi était simplement décalé dans l'espace de quelques centimètres, la non prise en compte de ce phénomène est possible.

Une autre explication pourrait provenir d'une différence de pression constante et continue mais inconnue. Celle-ci pourrait être importante (plusieurs dizaines de Pascal). Cette sollicitation en pression est assez rare dans le bâtiment. Il est donc possible que cette différence de pression exacerbe certain passage d'air parasite.

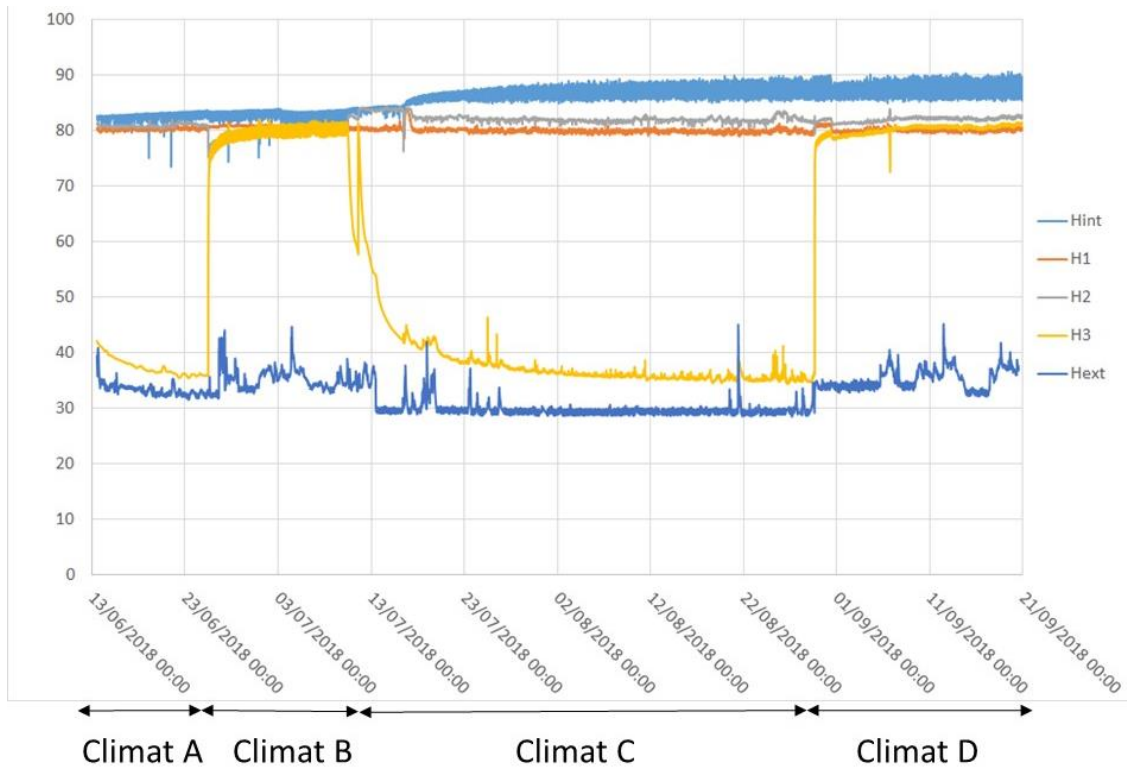


Figure 41 : Evolutions des humidités relatives de la configuration 6 (combles perdus)

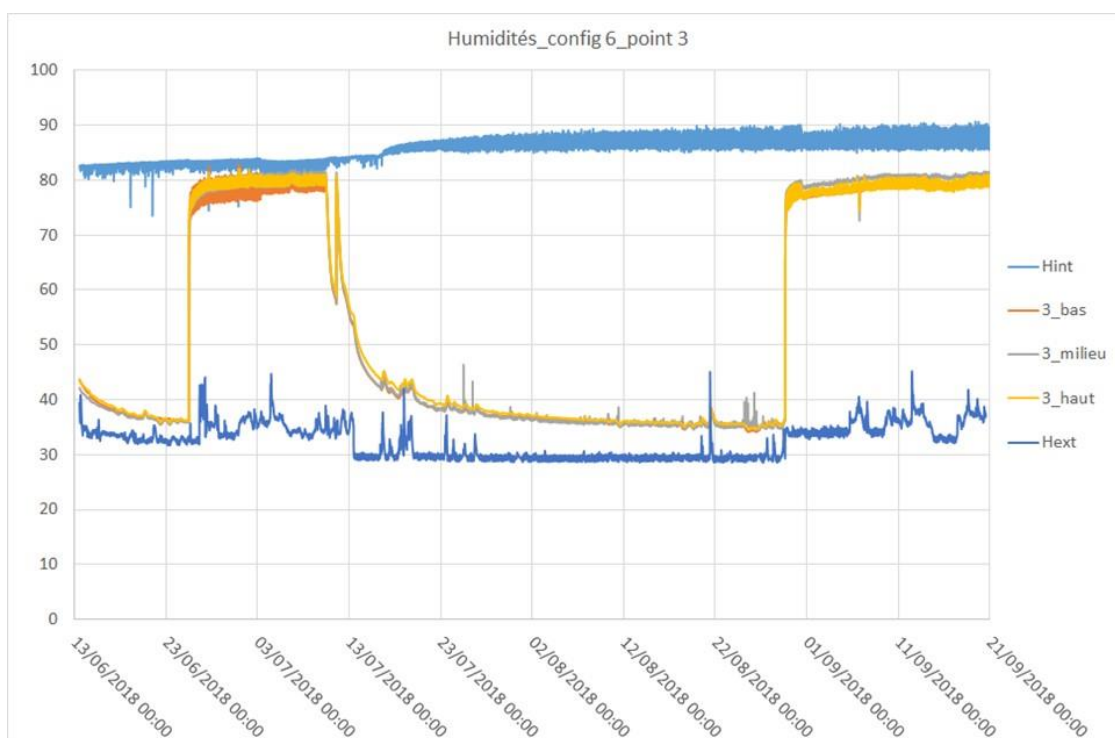


Figure 42 : Evolutions des humidités relatives au point 3 (gradient vertical) de la configuration 6

Il n'y a pas de différence entre les climats B et D, cela tendrait à dire que même s'il n'y a pas d'entaille la perméabilité à l'air de la configuration est très importante. Lorsqu'une différence de pression d'air est imposée à la paroi, la plupart des capteurs présentent des valeurs d'humidité relatives proches entre elles, avec ou sans entaille. Malgré la mise en œuvre très soignée des échantillons, des fuites d'air parasites peuvent être prépondérantes par rapport à la fuite d'air engendrée par l'entaille et expliquée que les résultats avec ou sans entaille sont très proches.

Configurations 7 et 8

Afin de faciliter la confrontation entre les résultats issus des essais et ceux issus des simulations, il a été décidé de mettre en œuvre dans les cellules hygrothermiques une paroi qualifiée de « simplifiée » afin de s'affranchir des incertitudes liées aux hétérogénéités et aux mesures. Une des 2 dernières configurations se présentera donc comme un assemblage de matériaux connus, dont les principales propriétés de transferts ont été mesurées : un isolant en laine de verre pris en sandwich entre 2 films pare-vapeur présentant des valeurs de S_d différentes (18m et 90m). Aussi, les hypothèses sur les conditions initiales de l'état hygrothermique de la paroi sont moins incertaines et moins influentes.

L'autre configuration correspond à une paroi à ossature bois avec un pare-vapeur de 18m présentant une entaille droite 10cm dans le pare-vapeur (identique à la configuration 3), la différence se situe au niveau des conditions de régulation des ambiances avec la mise en pression d'air avec 3 valeurs de différence de pression d'air (de la plus basse à la plus haute). Ces derniers tests seront réalisés sur une période plus longue. Chaque étape du test sera vérifiée avant le passage à l'étape suivante. La vérification portera sur la stabilité des températures et humidités.

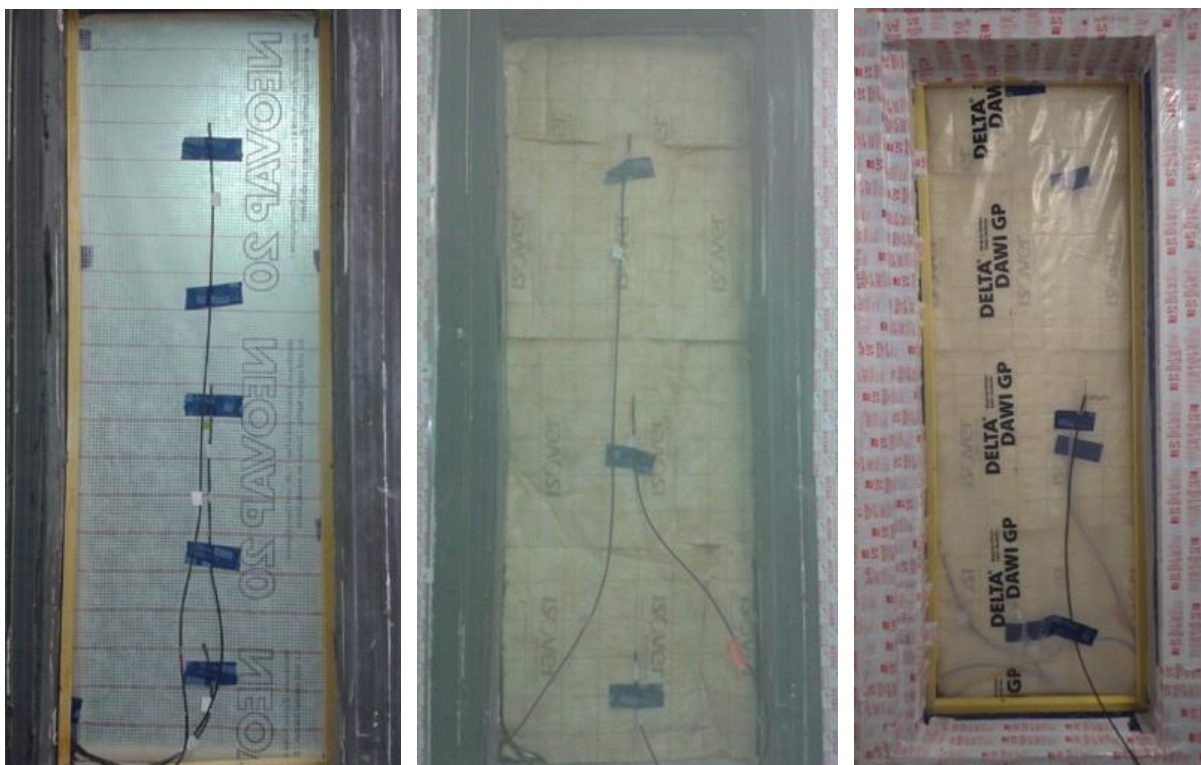


Figure 43 : Mise en œuvre de la configuration 7 (paroi simplifiée)



Figure 44 : Mise en œuvre de la configuration 8 (paroi ossature bois)

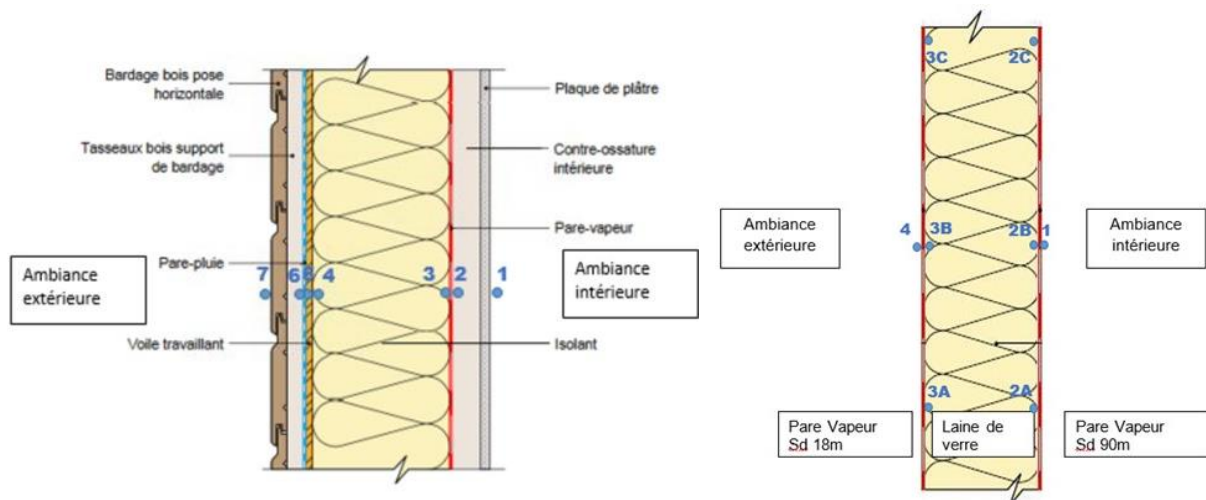


Figure 45 : Emplacement des capteurs de température et d'humidité

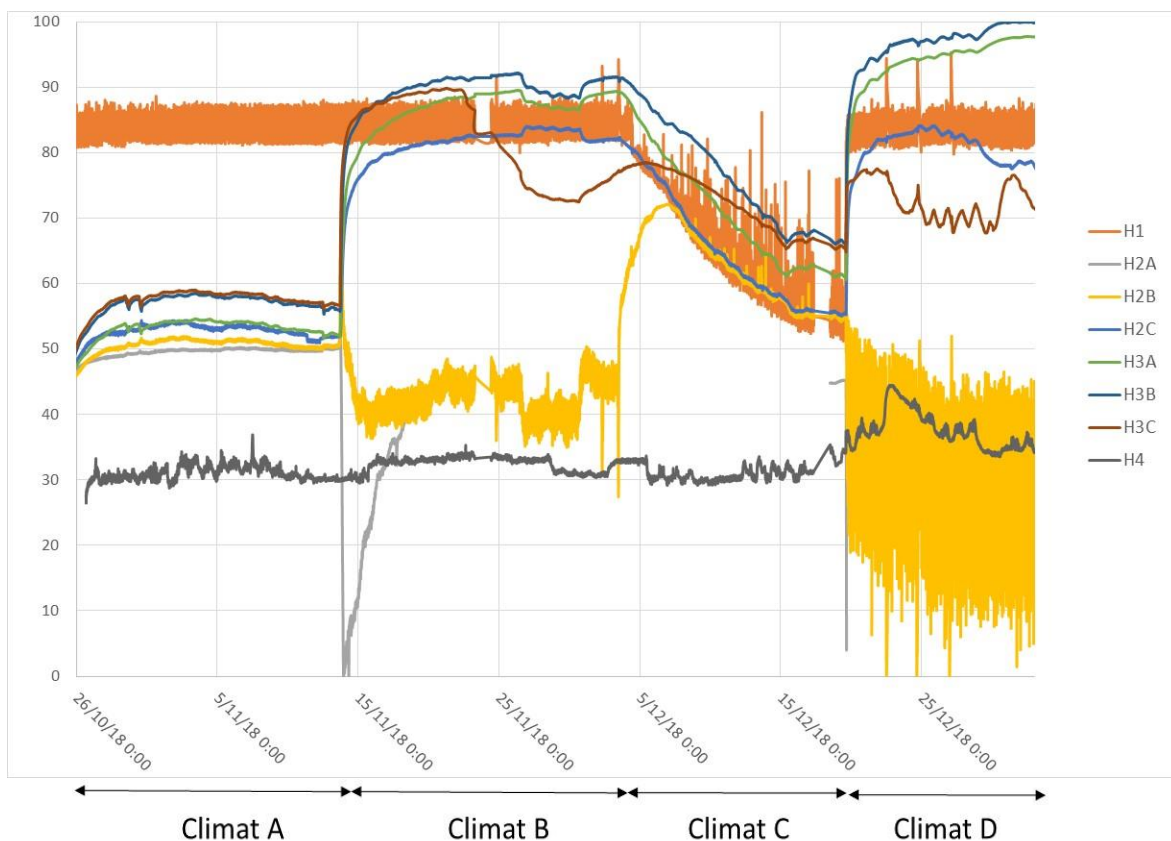


Figure 46 : Evolutions des humidités relatives dans la configuration 7 (paroi simplifiée)

Pour le climat A, les gradients verticaux (présence de 3 capteurs : bas, milieu et haut) des deux côtés de la laine de verre sont les mêmes. Les points dans l'isolant semblent se stabiliser rapidement et il n'existe pas de décroissance de ces points au cours du temps. Cela confirmerait que dans les essais précédents la structure bois avait bien une incidence sur l'humidité dans l'isolant. Les différents points dans l'isolant sont également dans une position intermédiaire entre les niveaux d'humidité intérieure et extérieure.

Au cours du climat B le point 2C et les points 3 réagissent immédiatement lors de la mise en pression. Les résultats du point 3C diminuent après quelques temps alors que les points 3B et 3A non. La seule différence entre le climat A et le climat B correspond à la création d'une différence de pression entre les deux côtés de la paroi. Les valeurs affichées des points 1 et 4 ne bougent pas indiquant que les ambiances intérieure et extérieure sont stables. Les pressions de vapeur des points 2C, 3B, 3A et 3C augmentent. Cela prouverait qu'un débit d'air existe et traverse l'isolant de l'intérieur vers l'extérieur et augmenterait la pression de vapeur et donc l'humidité dans l'isolant.

Les valeurs affichées par les capteurs 2A et 2B sont difficilement compréhensibles et laissent penser que ces 2 capteurs sont endommagés.

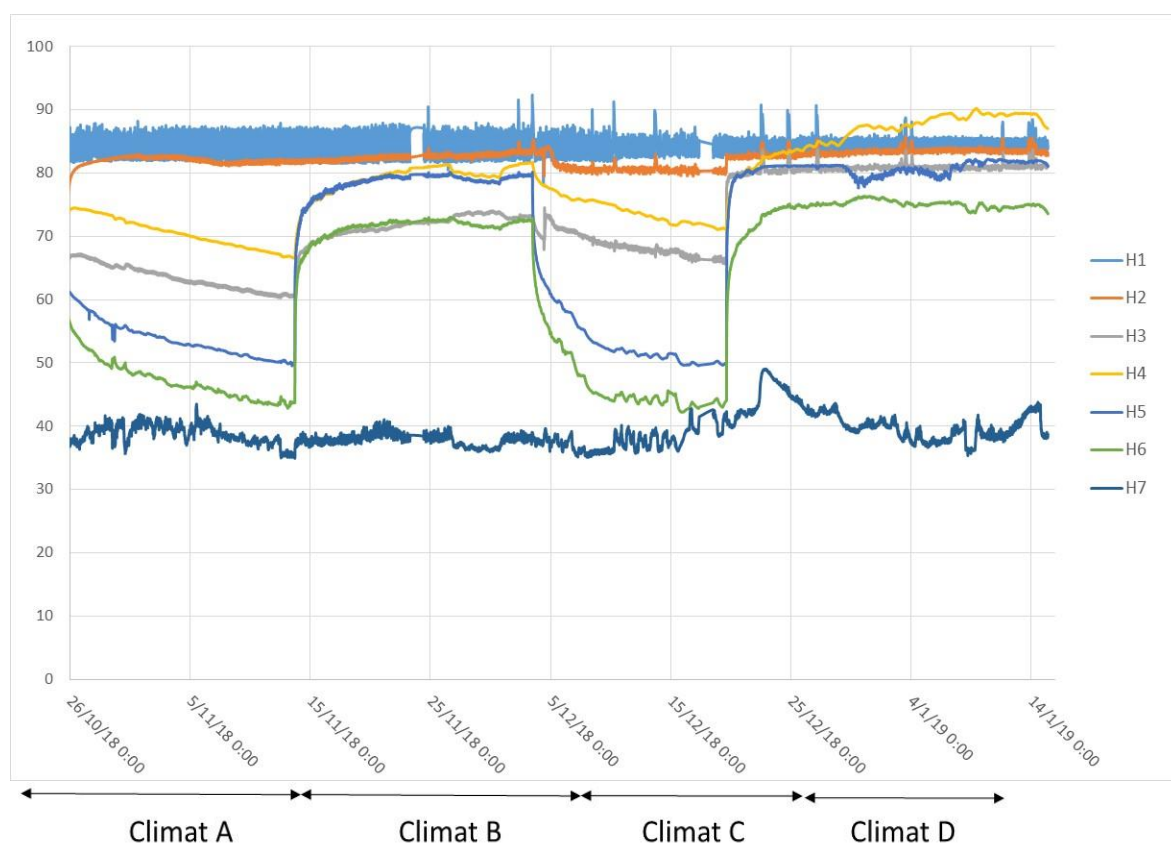


Figure 47 : Evolutions des humidités relatives dans la configuration 7 (paroi simplifiée)

Pour le climat A, les capteurs 3 et 4 de part et d'autre du pare-vapeur présentent des valeurs identiques, cela traduit bien la grande perméabilité à la vapeur de la laine. On retrouve bien les gradients dans la paroi. Il y a toujours cette lente décroissance liée certainement à l'inertie (hydrique) des montants.

Pour le climat B : les valeurs des points de mesure 3, 4 et 5 sont quasi identiques, il est possible que l'air passe derrière le panneau OSB. Il y a bien un gradient avec le point de mesure 6, le pare-pluie semble bien étanche à l'air.

Le climat C : Les valeurs affichées par les points de mesure 3 et 4 sont différentes, l'entaille génère un gradient dans la laine de verre, certainement local car les niveaux en fin de test des capteurs 4, 5 et 6 restent identiques à la séquence du climat A. Mais les écarts entre A et C sont très faibles pour que la différence soit imputée au seul effet de l'entaille étant donnée l'influence du séchage des montants.

Le climat D est très similaire au climat B, cela tendrait à dire que même s'il n'y a pas d'entaille la perméabilité à l'air de la configuration est très importante.

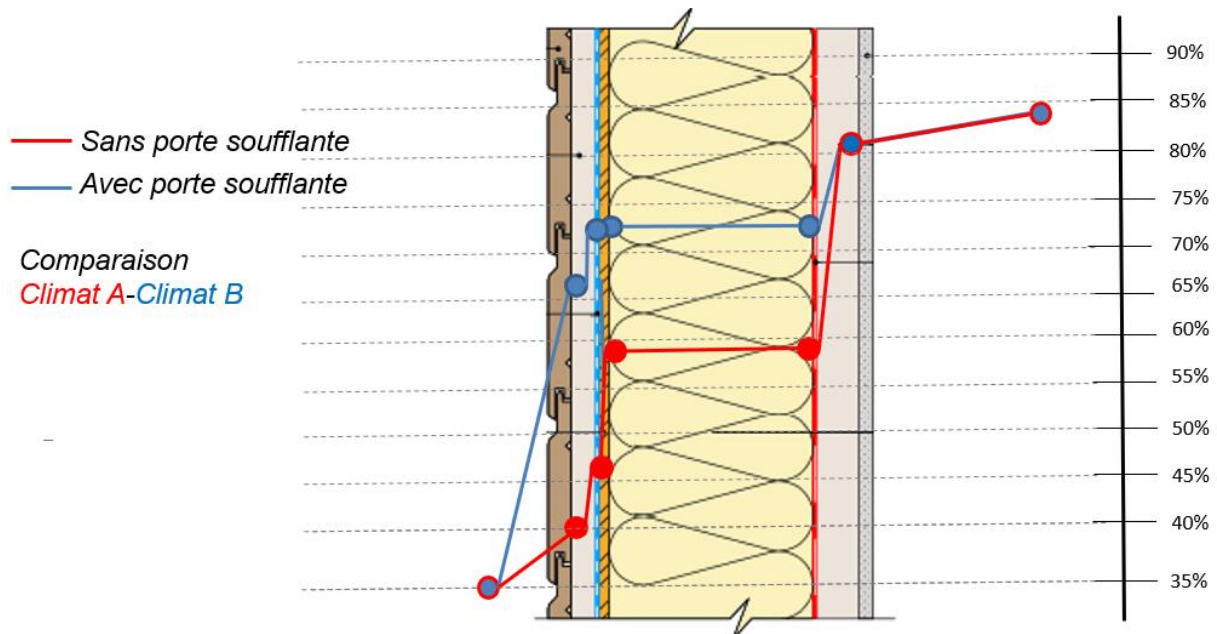


Figure 48 : Profils des humidités relatives de la configuration 8 avec une entaille droite de 10 cm

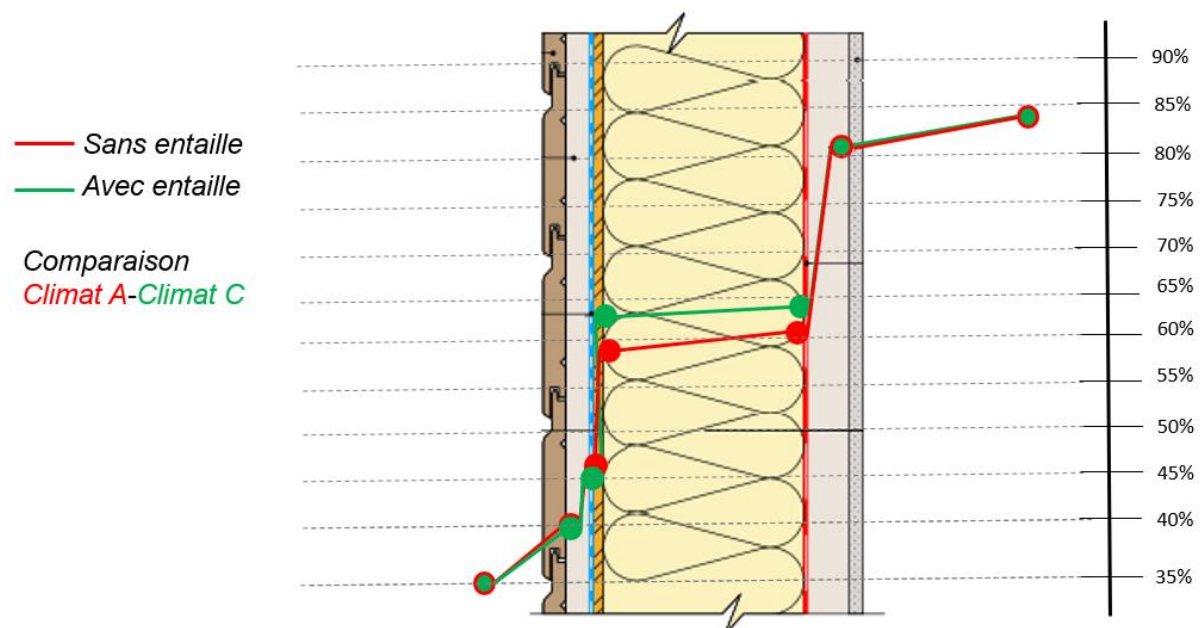


Figure 49 : Profils des humidités relatives de la configuration 8 sans mise en route de la porte soufflante

Malgré la diminution de la puissance du ventilateur afin d'obtenir une différence de pression moins importante de part et d'autre de l'échantillon, les profils d'humidités sont assez similaires avec ceux obtenus dans la configuration 3. Les questions inhérentes aux essais subsistent. Des erreurs de mesures éventuelles des capteurs et des fuites d'air parasites court-circuiteraient les mesures considérées.

4.5 Conclusions générales de la TACHE 3

La tâche 3 du projet Hygro-PV avait pour objectif principal la réalisation d'essais en cellules climatiques régulées sur 8 configurations qui ont été discutées et retenues durant les différents comités de pilotage. Afin d'évaluer les éventuels risques liés l'humidité due aux perturbations dans la membrane pare-vapeur.

Dans un second temps, les résultats des essais devaient être confrontés aux résultats issus des modélisations WUFI (tâche 4) et ainsi valider les nouvelles données d'entrées dans le logiciel.

Une des réalisations de cette tâche a été la mise en place d'un protocole de mesure pour le suivi des profils de températures et d'humidités relatives au sein de paroi soumis à une mise en pression (réalisé à l'aide d'une porte soufflante).

4 scénarios de climat ont été mises en œuvre pour chaque configuration testée :

- Scénario climat A : Paroi sans perturbation, sans mise en route de la porte soufflante
- Scénario climat B : Paroi sans perturbation, avec mise en route de la porte soufflante
- Scénario climat C : Paroi avec perturbation, sans mise en route de la porte soufflante
- Scénario climat D : Paroi avec perturbation, avec mise en route de la porte soufflante

Quel que soit la configuration considérée, lors des scénarios en diffusion seule (sans mise en route de la porte soufflante), la mise en œuvre de perturbations présente peu d'impacts observables sur les profils de pression de vapeur.

Il semble que la partie convective liée aux transferts d'air soit plus importante et perturbe considérablement les profils d'humidité au sein de la paroi. Cependant, il est plus difficile d'identifier les chemins de passage de l'air avec la mise en route de la porte soufflante. Certaines interrogations sur le déroulement des essais ont été soulevées notamment des erreurs de mesures éventuelles des capteurs ou des fuites d'air parasites qui court-circuiteraient la partie mesurée.

Il faut également noter que les maquettes ont été réalisées avec une attention très particulière par un professionnel, notamment l'étanchéité entre l'échantillon et l'ouverture entre les 2 cellules climatiques. Malgré cela, il est difficile d'assurer une étanchéité parfaite (en particulier pour la configuration de paroi simplifiée) et il est envisageable qu'une micro-fuite existe et perturbe donc les mesures. Au même titre que pour les essais en laboratoire, il est probable que dans la réalité d'un chantier des fuites au niveau des point singuliers (jonction paroi/menuiserie, liaison mur/plancher...) apparaissent et perturbent alors les transferts d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment, d'où l'importance de la mise en œuvre et des points singuliers en phase chantier.

Cette étude a permis de soulever des interrogations sur les mesures associant thermique, humidité et transferts d'air. En perspective, pour obtenir une meilleure connaissance des phénomènes convectifs en lien avec les transferts d'humidité, plusieurs pistes sont à étudier :

- Nécessité d'avoir une meilleure connaissance sur les incertitudes liées aux conditions initiales (exemple : impact de l'hygroscopie du bois présent dans les parois).
- Importance de mesurer la pression de part et d'autre des échantillons en continu.
- Nécessité de connaître le débit traversant l'échantillon.
- Nécessité de calibrer le laboratoire avant le lancement des mesures (recherche de fuites éventuelles, exemple : caméra thermique).

- Investigation sur l'impact de la mise en œuvre du film pare-vapeur au niveau des points singuliers.
- Nouveau protocole avec plus de mesures « proches de la perturbation ».

La prise en compte de ces différents éléments permettrait de s'approcher d'une quantification des phénomènes.

5 TACHE 4

5.1 Objectifs

Les actions de la tâche 4 visent à évaluer par la simulation du comportement hygrothermique des configurations supplémentaires. Les sous-tâches sont organisées de la manière suivante :

- Sous-tâche 4-1 : Etude bibliographique de la prise en compte des perturbations. Il s'agit ici de décrire les phénomènes physiques en jeu lorsqu'une paroi subit des transferts hygrothermiques. A partir de cette connaissance, les effets possibles des irrégularités de membranes sont décrits. Enfin, un état de l'art des méthodes pour prendre en compte ces phénomènes dans le logiciel Wufi est proposé ;
- Sous-tâche 4-2 : Modélisation des essais expérimentaux (en lien avec la sous-tâche 3.2). Dans cette sous-tâche, des configurations des essais à l'échelle paroi sont simulées. L'objectif ici est de confronter le modèle aux cas expérimentaux de la tâche 3, sollicités dans des conditions à priori maîtrisées ;
- Sous-tâche 4-3 et 4-4 : Modélisations et analyses de 66 configurations réelles. Il s'agit ici de placer les configurations de parois dans des conditions réelles. Par le calcul, les effets des perturbations sur les risques de pathologies sont évalués sur le long terme.

5.2 Etat de l'art

5.2.1 Les modes de transports d'humidité dans les parois

L'enveloppe d'un bâtiment sépare le volume chauffé de l'environnement extérieur, et est le siège de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité. A l'échelle d'une surface représentative d'une paroi et de son système constructif, l'étude de ces transferts permet d'évaluer les risques de pathologies liées à l'humidité dans des conditions normales d'utilisation.

Dans ces conditions, différents modes de transports d'humidité de l'intérieur vers l'extérieur de la paroi sont pris en compte. En supposant d'abord que l'élément représentatif de paroi n'ait aucun défaut d'étanchéité de membrane, ces modes peuvent prendre plusieurs formes :

1. Par diffusion : Les molécules d'air (N₂, O₂, etc..) et la vapeur d'eau peuvent traverser la membrane pare-vapeur par diffusion. Les forces entrainant ces phénomènes sont :
 - a) La différence de pression de vapeur d'eau de part et d'autre du système qui entraine uniquement la vapeur d'eau ;
 - b) La différence de pression totale (air + vapeur d'eau) (advection) de part et d'autre du système qui entraine le mélange air + vapeur d'eau. Cette différence de pression totale peut-être induite par des effets de pression dus au vent et à la différence de température de part et d'autre du pare-vapeur, etc....
2. Par convection : Bien que l'élément représentatif de la paroi soit parfaitement étanche à l'air, l'enveloppe globale du bâtiment comporte des défauts inévitables d'étanchéité à l'air (même en cas de bonne mise en œuvre). En attestent les tests à la porte soufflante, où

l'on mesure un débit de fuite non nul propre à une classe d'étanchéité. Ces défauts induisent un flux d'air parasite résiduel qui a été mis en évidence dans de nombreuses études expérimentales [1], [2], [3], [4], [5], [6] et [7]. Elles mettent aussi en évidence la difficulté d'identifier leurs chemins parcourus et ainsi que d'évaluer les débits qui leur sont associés. Il faut aussi dire que le moteur de ces flux est la différence de pression totale de part et d'autre de la paroi. Elle résulte de trois actions combinées :

- a) Le tirage thermique, induit par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment en période de chauffe (variation de la masse volumique de l'air avec la température), qui crée une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur ;
- b) La ventilation mécanique (par extraction, insufflation ou double flux) ;
- c) Le vent qui génère une pression dynamique sur la façade.

La Figure 50 montre un élément représentatif d'une paroi légère, à ossature bois. Les différents modes de transport d'humidité sont illustrés dans le cas où le pare-vapeur serait parfaitement étanche à l'air.

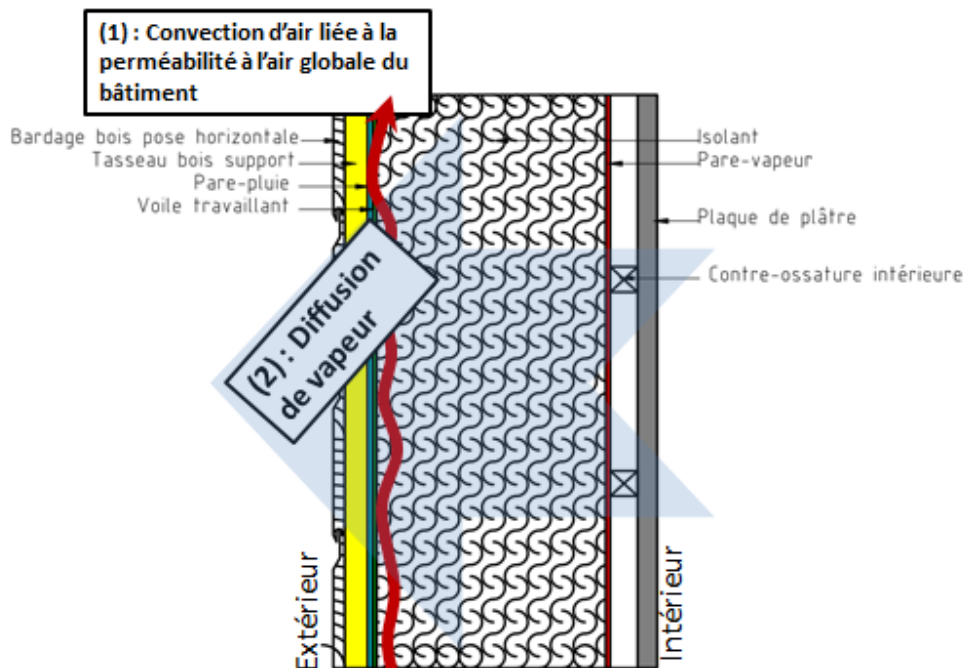


Figure 50 : Modes de transport d'humidité dans un élément représentatif d'une paroi sans perturbation. La contre-ossature intérieure n'induit aucune perturbation sur les transferts. Un flux de vapeur diffusif est représenté dans les conditions hivernales. Un flux d'air résiduel est représenté dans le cas où il s'écoulerait le long de la zone la plus à risque de la paroi (point froid).

5.2.2 Les effets des perturbations de membrane sur les modes de transport d'humidité

5.2.2.1 Notion de perturbation de membrane

On appelle perturbation de membrane, un élément se situant sur une membrane qui viendrait modifier localement ses propriétés de transfert à la vapeur et/ou à l'air. Les origines de certaines de ces perturbations sont inévitables même dans le cas où la mise en œuvre du pare-vapeur serait conforme. Généralement, ces perturbations se répètent à l'échelle de la paroi à des intervalles de distances réguliers. Dans le périmètre du projet HYGRO-PV, les perturbations « récurrentes » prises en compte sont :

- L'agrafage de la membrane nu (sans pastille) ;
- L'agrafage de la membrane avec pastille ;
- La prise de la membrane entre 2 liteaux en croix avec 2 clous.

D'autres perturbations peuvent être liées à une mise en œuvre non conforme d'une membrane ou à des événements indésirables pouvant subvenir lors de la phase travaux ou après réception de l'ouvrage. Ces perturbations sont qualifiées d'« accidentelles ». Il a été jugé nécessaire d'intégrer ces perturbations au projet dans une logique de sensibilisation aux conséquences de la non prise en compte des recommandations de bonne mise en œuvre. Dans le cadre du projet HYGRO-PV, les perturbations accidentelles sont :

- La liaison entre 2 lés de membrane sans recouvrement ;
- L'entaille en croix.

Aucune étude connue à ce jour n'a permis de caractériser localement les effets des perturbations de membrane sur les propriétés de transferts à l'échelle de la perturbation. Dans le cadre du projet HYGRO-PV et de la tâche 2, ces points précis ont été traités.

5.2.2.2 Effets d'une perturbation récurrente

Les essais de la tâche 2 ont mis en évidence que les perturbations récurrentes modifiaient les propriétés de transfert de la vapeur d'eau de la membrane. Ils ont aussi mis en évidence que la membrane demeurait étanche à l'air même en présence d'une perturbation récurrente.

Ainsi, à l'échelle d'un élément représentatif de la paroi, la perturbation récurrente modifie localement le transfert par diffusion de la vapeur d'eau à travers la membrane mais reste étanche à l'air. Il n'y a ainsi, pas de raison de tenir compte d'une modification des transferts d'air (liés à la perméabilité globale du bâtiment) causée par cette perturbation.

La Figure 51 illustre les différents modes de transports d'humidité à tenir compte sur un élément représentatif d'une paroi comportant des perturbations de membrane récurrentes.

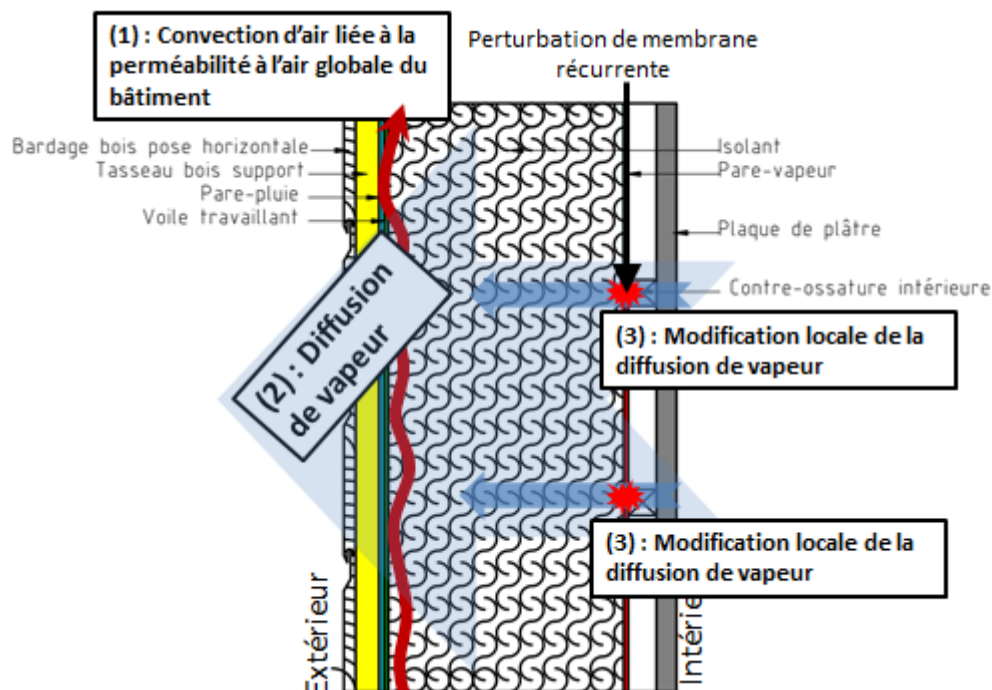


Figure 51 : Modes de transport d'humidité dans un élément représentatif d'une paroi avec des perturbations récurrentes. La contre-ossature prend en pince la membrane ce qui modifie localement ses propriétés de transfert à la vapeur. Le flux d'air convectif lié à la perméabilité globale du bâtiment n'est pas impacté par les perturbations récurrentes car elles sont étanches à l'air.

5.2.2.3 Effets d'une perturbation accidentelle

Les essais de la tâche 2 ont mis en évidence que les perturbations accidentelles modifiaient (fortement) les propriétés de transfert à la vapeur de la membrane. Ils ont aussi mis en évidence qu'un flux d'air est susceptible de traverser le défaut.

Ainsi, à l'échelle d'un élément représentatif de la paroi, la perturbation accidentelle modifie localement le transfert par diffusion de la vapeur à travers la membrane. D'autre part, un flux d'air peut aussi traverser la perturbation. Dans ce cas, les transferts d'air (liés à la perméabilité globale du bâtiment) peuvent être impactés par cette perturbation.

La Figure 52 illustre les différents modes de transports d'humidité dans un élément représentatif d'une paroi avec une perturbation accidentelle. La perturbation accidentelle modifie localement les propriétés de transfert à la vapeur de la membrane. Un flux d'air supplémentaire peut aussi traverser la membrane par la perturbation. Le flux d'air convectif lié à la perméabilité globale

du bâtiment est possiblement impacté par ce flux supplémentaire. illustre les différents modes de transports d'humidité à tenir compte sur un élément représentatif d'une paroi comportant des perturbations de membranes accidentelles

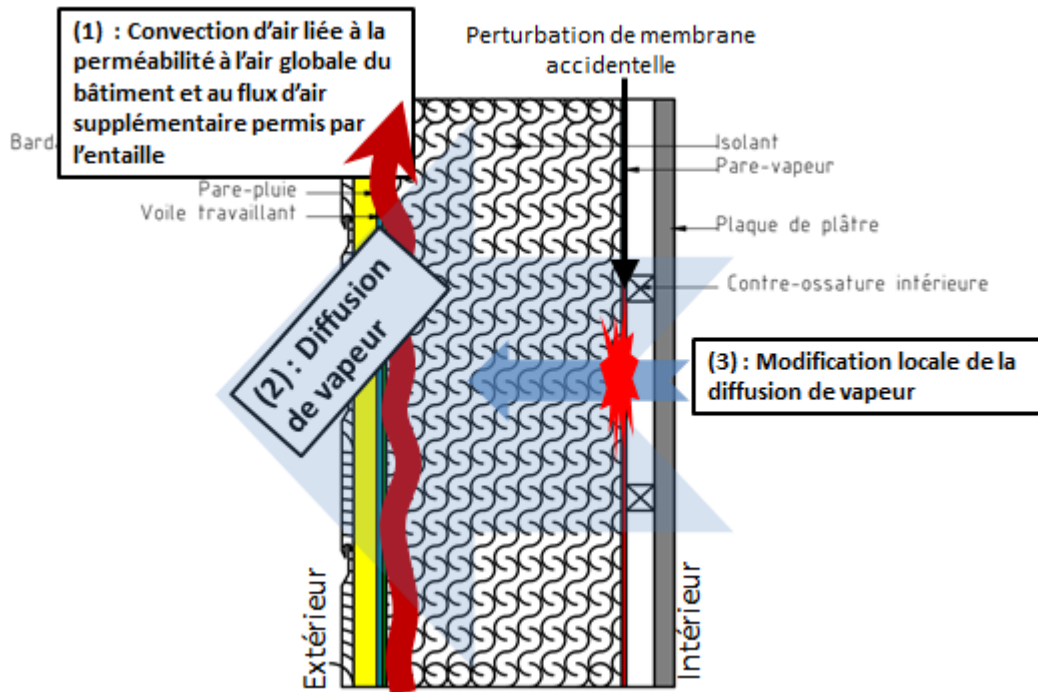


Figure 52 : Modes de transport d'humidité dans un élément représentatif d'une paroi avec une perturbation accidentelle. La perturbation accidentelle modifie localement les propriétés de transfert à la vapeur de la membrane. Un flux d'air supplémentaire peut aussi traverser la membrane par la perturbation. Le flux d'air convectif lié à la perméabilité globale du bâtiment est possiblement impacté par ce flux supplémentaire.

5.2.2.4 Problématiques rencontrées en simulation hygrothermique

Pour modéliser le comportement hygrothermique d'une paroi il est donc nécessaire de distinguer les différents phénomènes physiques en place. Cependant, les outils de simulation de transferts hygrothermiques n'en tiennent pas compte de la même manière.

La diffusion est prise en compte par la simulation des transferts hygrothermiques via les propriétés de perméance à la vapeur d'eau et de stockage des matériaux. Il suffit donc de connaître les matériaux constructifs et leurs propriétés pour simuler ce phénomène.

Pour tenir compte du phénomène de convection dans WUFI, la démarche est plus complexe. Les transferts d'air ne sont pas simulés, mais, il est possible d'intégrer indirectement leurs effets sur l'état hygrothermique de la paroi via l'ajout de sources d'humidité dans l'assemblage correspondant à la quantité d'humidité transportée par convection. Néanmoins, la caractérisation du phénomène de convection d'air humide ne dépend pas seulement des propriétés de transferts des matériaux de la paroi mais davantage du contexte de mise en œuvre lié :

- Au système constructif (plus ou moins sensible aux transferts d'air résiduels) ;
- Au niveau visé d'étanchéité à l'air du bâtiment et à la qualité de la mise en œuvre sur le chantier ;
- Aux caractéristiques des transferts d'air propre à chaque fuite d'air. Un défaut comme une tuyauterie traversant la paroi et étanchée par rapport au reste de la paroi, abaisse

globalement l'étanchéité à l'air du bâtiment. Cependant, l'air circulant à travers ce défaut n'apportera aucune humidité à la paroi et ne contribuera pas au développement de pathologie en son sein. Pour un défaut comme une ouverture accidentelle de quelques centimètres d'une membrane d'une paroi légère, l'étanchéité à l'air globale du bâtiment sera aussi dégradée. Par ailleurs, l'air circulant à travers le défaut apportera plus d'une humidité supplémentaire dans la paroi (car le chemin de passage offrira plus d'opportunité à l'air d'échanger de l'humidité avec le milieu), vecteur de risque d'un développement de pathologie.

Une première problématique est donc ici rencontrée pour modéliser les effets convectifs en simulation hygrothermique. De manière générale, il semble impossible d'identifier exactement les quantités d'humidité supplémentaire apportées par ces flux d'air résiduels. Même le niveau d'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas une information suffisante pour quantifier l'humidité supplémentaire apporter à une paroi. Il permet seulement de quantifier globalement le flux d'air traversant le bâtiment dans des conditions données. Il est donc encore moins possible de caractériser précisément l'effet d'une entaille sur les caractéristiques de ces flux d'air. Il sera donc nécessaire de formuler certaines hypothèses afin de placer les simulations dans des situations à risque mais demeurant probables au regard de la connaissance actuelle issue des différentes études sur ce sujet.

La seconde problématique est le choix du modèle pour tenir compte d'un apport d'humidité supplémentaire lié à ces flux d'air. Un état de l'art de ces modèles est présenté dans la partie suivante.

5.2.3 La prise en compte des phénomènes convectifs dans WUFI

5.2.3.1 Méthode statique – Par modification des propriétés de la membrane

Les travaux de [8] visent à trouver une corrélation entre la perméabilité à l'air globale du bâtiment et l'apport d'humidité par convection dans les parois. Ainsi, il est établi que pour des constructions légères présentant une bonne mise en œuvre, la quantité globale d'humidité apportée par convection d'air est équivalente à celle transmise par diffusion à travers un pare vapeur de valeur $S_d=3,3$ m. Cette approche permet d'obtenir un ordre de grandeur de l'apport global d'humidité par convection, sans pour autant pouvoir le prendre en compte dans une simulation hygrothermique dynamique.

Suite à cette étude, le Fraunhofer IBP a proposé une approche pour prendre en compte cette entrée d'humidité par convection [9], en introduisant une source d'humidité supplémentaire statique de 250 g/m^2 (pour les toitures) ou de 100 g/m^2 (pour les plafonds et murs) en période de chauffe, au niveau du point de condensation probable dans la paroi (les cinq premiers millimètres de la face intérieure du panneau de contreventement extérieur). Pour qu'une paroi soit pérenne, elle doit être dimensionnée de manière à être en mesure de sécher en été cette quantité d'humidité accumulée lors de la période de chauffe. C'est la notion de potentiel de séchage.

5.2.3.2 Méthode dynamique – Par un modèle d'infiltration

Après l'avènement des codes de simulation de transferts couplés chaleur-humidité, le Fraunhofer IBP propose un « modèle d'infiltration » implémenté dans WUFI pour prendre en compte cette apport d'humidité convective sous forme de source dynamique de condensation, moyennant certaines hypothèses. Les détails de cette approche sont exposés dans [10] et [11].

Cette approche part du principe que les défauts d'étanchéité ou « fuites » à travers lesquels l'air circule, peuvent être scindés en deux catégories (Figure 53) :

- Les fuites d'air directes, aussi appelées « *energy leaks* », où l'air qui circule part directement de l'intérieur vers l'extérieur. Ces fuites d'air correspondent notamment aux jonctions entre les menuiseries et la paroi et aux traversées de paroi, et sont responsables de la majeure partie du débit de fuite à travers l'enveloppe. Elles ont un fort impact énergétique à l'échelle du bâtiment, mais un faible impact hygrothermique car l'air n'a pas le temps de se refroidir et d'atteindre son point de rosée dans la paroi.
- Les fuites d'air mettant en jeu un cheminement plus complexe, aussi appelées « *moisture leaks* ». Dans ce cas de figure, le flux d'air a le temps de se refroidir et de condenser au contact de la première surface froide (en général du côté froid de la paroi derrière l'isolant). C'est cet apport d'humidité supplémentaire que l'on cherche à modéliser et à quantifier au moyen d'une source d'humidité. On ne considère ici que des flux d'air de l'intérieur vers l'extérieur (exfiltration), car ce sont ceux qui peuvent créer des pathologies supplémentaires liées à l'humidité [6].

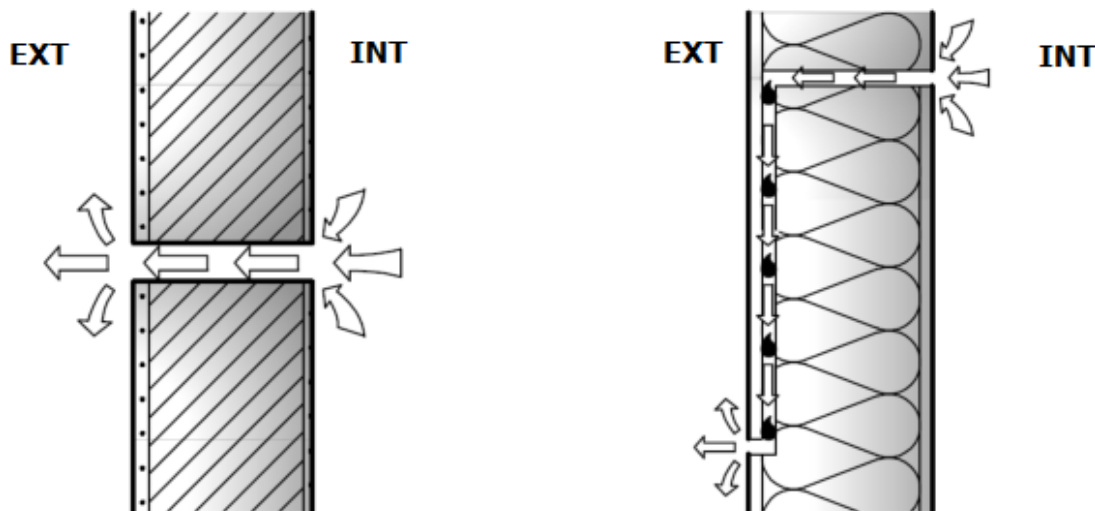


Figure 53 : Forme possible du passage de l'air dans une fuite dans les éléments de l'enveloppe du bâtiment selon [10]. A gauche, le passage de l'air est direct (« *energy leak* ») : très peu d'humidité est apportée aux constituants de la paroi par ce passage de l'air humide. A droite, le passage est tortueux. L'humidité contenue dans l'air empruntant ce chemin a le temps de condenser lorsqu'il entre en contact avec des zones froides (« *moisture leak* »)

Le potentiel moteur des transferts d'air par convection est l'écart résultant de pression totale ΔP entre les ambiances extérieure et intérieure, dû aux actions combinées du vent, du tirage thermique et de la ventilation mécanique. Cependant, seuls les deux derniers effets sont pris en compte dans le modèle d'infiltration pour déterminer le $\Delta P(t)$, car ils sont permanents pendant la période de chauffe. L'action du vent, en plus d'être intermittente, produit tantôt une surpression (façade au vent) tantôt une dépression (façade sous le vent) sur la même paroi, elle est donc considérée comme nulle en moyenne. L'écart de pression totale résultant s'exprime alors par :

$$\Delta P = \underbrace{\rho_{\text{air-ext}} \frac{T_{\text{ext}}(t) - T_{\text{int}}(t)}{T_{\text{int}}} g \frac{h}{2}}_{\text{Tirage thermique}} + \underbrace{\Delta P_{\text{méca}}}_{\text{Ventilation (valeur constante)}}$$

Où h [m] est la hauteur de la colonne d'air en contact avec la paroi, g [$m.s^{-2}$] l'accélération de la pesanteur et $\rho_{air-ext}$ [$kg.m^{-3}$] la masse volumique de l'air extérieur.

La perméabilité à l'air de la paroi k_{CL} [$m^3/(m^2.s.Pa)$] imputable aux fuites tortueuses posant des problèmes d'humidité est déterminée à partir de la perméabilité à l'air globale du bâtiment q_{50} . Des mesures sur des parois légères ont permis d'évaluer que k_{CL} est 15 fois moins important que la perméabilité globale n_{50} [h^{-1}] (voir [9]).

A partir de ces informations, le flux d'air parasite résiduel q_{CL} [$m^3/(m^2.s)$] transportant de l'air humide à travers la paroi est calculé selon :

$$q_{CL} = k_{CL} \times \Delta P$$

La quantité de vapeur condensant en un lieu donné de la paroi (élément, ensemble d'éléments, couche entière) est calculée en fonction du flux d'air et des conditions de température et d'humidité en ce point et du côté intérieur (le flux d'air est toujours supposé aller de l'intérieur vers l'extérieur). Le modèle calcule la quantité d'eau à ajouter au bilan du nœud à chaque pas de temps [12].:

$$S_{CL} = \frac{q_{CL} (c_{int} - c_{sat,x_p})}{\Delta x}$$

c_{int} : humidité absolue intérieure (kg/m^3)

c_{sat,x_p} : humidité absolue à saturation au niveau de la surface en contact avec le flux d'air (kg/m^3),

Δx : épaisseur de la couche dans laquelle s'infiltre la quantité d'humidité apportée par condensation imputable à la convection d'air (m)

Dans ce cas, seule la vapeur qui se condense est prise en compte comme source d'eau (écart entre l'humidité absolue côté intérieur et l'humidité absolue à saturation au nœud considéré à la position x_p). De fait, cette source est toujours positive (l'effet de séchage quand $c_{int} < c_{sat,x_p}$ n'est pas prise en compte).

La chaleur latente libérée par cette condensation n'est pas prise en compte (approche sécuritaire).

Cette approche permet de prendre en compte l'apport d'humidité par convection dans l'assemblage en fonction de conditions aux limites variables, et de dimensionner les parois en conséquence pour éviter les risques de pathologie liées à l'humidité.

Il faut préciser que cette approche n'a pas pour vocation de prendre en compte, dans la phase de dimensionnement, des défauts majeurs sur la membrane suite à une mauvaise mise en œuvre, car ils sont difficilement quantifiables d'une part et que la quantité d'humidité par convection serait alors trop importante par rapport à la capacité de séchage de la paroi d'autre part.

Dans le cadre de son post-doctorat, Amandine Piot a comparé plusieurs approches de modélisation de cet apport convectif [12]. Elle conclut que le modèle d'infiltration proposé par l'IBP est capable de rendre compte correctement des effets mesurés mais que les résultats

sont sensibles au positionnement de la source dans l'assemblage, qui est laissée au choix de l'utilisateur.

Des études ont été menées pour définir l'incidence de ces phénomènes sur les transferts de vapeur d'eau et surtout sur les risques de condensation ou les risques de développement fongiques dans la paroi. Ces études ont montré l'importance de ces phénomènes sur des systèmes constructifs de parois légères (paroi à ossatures bois ou plancher de combles perdus ou rampant de toitures) et à chaque fois avec un isolant fibreux léger. Pour ce cas de figure précis, l'IBP a établi une corrélation entre les mesures et les coefficients à appliquer pour prendre en compte ce phénomène dans les simulations avec le logiciel WUFI.

En revanche, les essais n'ont pas porté sur des structures lourdes ou avec des isolants plus denses ou plus étanches aux transferts d'air ou aux transferts d'humidité.

5.2.3.3 Méthode dynamique – Par un modèle de renouvellement d'air

Le modèle présenté dans cette section est décrit par [11] et [12]. Ce modèle vise à caractériser le bilan thermique et hydrique d'une lame d'air ventilée par l'intermédiaire de sources de chaleur $S_h(t)$ et d'humidité $S_w(t)$:

$$S_h = \frac{\rho_{air\ ext} c_{p\ air} n_{vent} d_{vent} (T_{ext} - T_{vent})}{\Delta x}$$

$$S_w = \frac{n_{vent} d_{vent} (c_{ext} - c_{vent})}{\Delta x}$$

Où n_{vent} est le taux de renouvellement d'air de la lame d'air, d_{vent} l'épaisseur de la lame d'air, Δx l'épaisseur de la maille considérée dans la lame d'air, $c_{p\ air}$ la capacité thermique de l'air extérieur.

Ce modèle a été utilisé pour modéliser le transport d'humidité par convection dans une paroi, en considérant une lame d'air fictive d'épaisseur constante (1mm) et ventilée par de l'air intérieur [13]. Il est possible d'identifier une valeur de taux de renouvellement d'air afin que la quantité d'humidité apportée soit la même que celle apportée avec le modèle par infiltration précédemment décrit. Contrairement au modèle d'infiltration, le modèle de renouvellement d'air permet de prendre en compte l'effet de séchage induit par la circulation d'air. Cette possibilité, souhaitable lors de la modélisation d'une lame d'air ventilée, semble moins pertinente dans le cas d'une modélisation de convection d'air parasite, car elle rendrait l'approche moins sécuritaire. Des études expérimentales menées sur des murs à structure légère en présence de convection d'air humide ont cependant montré que le modèle d'infiltration fournissait une meilleure prédiction du champ hygrothermique que le modèle de renouvellement d'air [12].

5.2.4 Discussions et perspectives pour le projet HYGRO-PV

Le choix d'un modèle pour tenir compte d'un apport d'humidité par convection se doit d'être discuté. La méthode statique est simple à implémenter mais est une représentation trop éloignée de la réalité. Il n'est donc pas pertinent de retenir cette méthode pour la réalisation de ce projet.

Les méthodes dynamiques représentent plus fidèlement la réalité. Le modèle d'infiltration est une approche sécuritaire qui permet de tenir compte uniquement d'apports d'humidité dans la paroi. Il est intéressant d'utiliser ce modèle dès lors que des condensations dans la paroi peuvent être rencontrées.

Plusieurs inconvénients peuvent être mentionnés dans les perspectives de réalisation du projet Hygro-PV. D'abord, dans l'exercice de comparaison entre calcul et mesure, les essais expérimentaux se font à température constante de part et d'autre de la paroi. Ainsi, il n'y a pas de raison qu'il y ait un point froid dans la paroi et donc un risque de condensation lors des essais. Dans ces conditions, ce modèle ne semble pas adapté pour modéliser l'apport d'humidité convectif des essais à l'échelle paroi (T3).

Le modèle de renouvellement d'air est moins sécuritaire que le modèle d'infiltration car il permet le séchage de la paroi durant la période estivale. Il ne nécessite pas un calcul préalable et peut être utilisé pour modéliser les configurations des essais de la T3. Pour limiter l'effet de séchage, il faut alors définir un débit de renouvellement variable pour préserver une approche sécuritaire.

A ce stade, les méthodes dynamiques sont envisagées. Des simulations préalables sont réalisées dans la partie initiale pour comparer les deux méthodes dynamiques et conclure sur l'approche à utiliser pour les 66 simulations.

5.3 Comparaison calcul/mesure

5.3.1 Démarche de travail

Dépendant directement du planning de réalisation des essais de la T3, les configurations utilisées pour la réalisation du travail de comparaison calcul/mesure ont été :

1. Combles aménagés – non jointoiement de 2 isolants laine de verre de surfaçage kraft
2. Combles aménagés – jointoiement adhésif de 2 isolants laine de verre surfaçage kraft
3. Mur ossature bois – entaille droite 10cm dans le pare-vapeur $S_d=18m$
4. Mur maçonnerie – entaille droite 10cm dans le pare-vapeur $S_d=18m$
5. Mur ossature bois – entaille droite 10cm dans le pare-vapeur S_d fabricant $=90m$
6. Combles perdus – entaille droite 10cm dans le pare-vapeur $S_d=18m$

Les configurations 1 et 2 n'ont pas fait l'objet de modélisations. Elles permettent néanmoins de mettre en évidence par la mesure, l'effet du non jointoiement du kraft dans une configuration d'isolation d'un plafond de combles aménagés. La démarche de travail sur chacune des configurations débute par une étape d'interprétation des résultats expérimentaux. Les configurations choisies pour la simulation ont été sélectionnées selon ces observations et guidées selon les réponses à certaines interrogations : les milieux sont-ils stabilisés à l'issue de l'essai ? Quelle est la certitude sur la compréhension des phénomènes en jeu lors de la réalisation des essais ? Les configurations retenues pour les comparaisons calcul/mesure ont été les configurations 3 et 5. D'une part, leurs matériaux ont des propriétés physiques connues dans des bases de données ou ont été directement mesurées. Cela permet de limiter l'étendue de leur plage d'incertitude possible. D'autre part, les champs hygrothermiques ont été mesurés à différentes épaisseurs et constituent une base de validation pertinente. Enfin, les conditions de stabilisations étaient les mieux respectées dans ces cas et il s'agit de cas où l'interprétation des résultats posait le moins de questions à propos des phénomènes physiques en jeu.

Ces cas d'étude ont fait l'objet de simulations de transferts hygrothermiques par le Cerema et le CSTB. Leur objectif principal a été de développer et valider la méthode de modélisation de prises en compte des perturbations en confrontant calcul et mesure sur ces cas d'études « simples ». Cet objectif s'est décliné en plusieurs axes de travail :

- La comparaison des outils utilisés par le Cerema et le CSTB ;
- La sensibilité du modèle à des paramètres incertains :
 - Propriétés physiques des matériaux ;
 - Conditions initiales dans les matériaux.
- La modélisation des effets des perturbations
 - Modélisation des effets diffusifs ;
 - Modélisation des effets convectifs et diffusifs.

5.3.2 Description des cas d'études (Configuration 3 et 5)

5.3.2.1 Description des essais

La Figure 54 est une coupe verticale de la paroi à ossature mise en place pour la réalisation des essais des configurations 3 et 5:

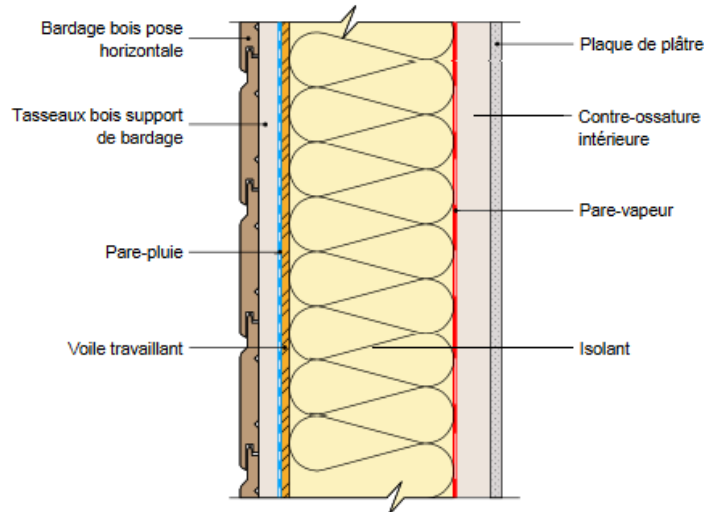


Figure 54 : Coupe verticale de la paroi ossature bois (FCBA)

Ces caractéristiques géométriques sont les suivantes :

- Bardage clin sapin - pose horizontale, ép. 21mm
- Lattage support de bardage, section 22x45mm
- Film pare-pluie, ép. 0,5mm
- Voile travaillant OSB/3, ép. 13mm
- Ossature en montants bois massif épicea, section 45x145mm
- Remplissage en laine de verre rouleau, ép. 140mm
- Film pare-vapeur, ép. 0,5mm
- Contre ossature bois, section 48x48mm
- Plaque de plâtre BA13

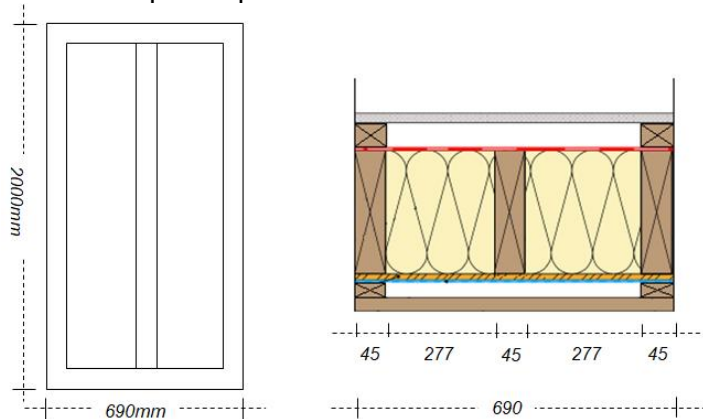


Figure 55 : Caractéristiques géométriques de la paroi ossature bois (FCBA)

Dans la configuration 3, le fabricant de la membrane déclare pour son produit une valeur de $S_d=20m$. Pour la configuration 5, il déclare un $S_d =90m$.

Chaque paroi est sollicitée dans 4 essais différents nommés ClimatA, ClimatB, ClimatC et ClimatD :

- Climat A : Sans entaille et sans porte soufflante. Dans ces conditions, l'humidité apportée à la paroi est à priori principalement transportée par diffusion de vapeur à travers le pare vapeur.
- Climat B : Sans entaille et avec porte soufflante. Dans ces conditions, l'humidité apportée à la paroi est à priori principalement transportée par diffusion de vapeur à travers la membrane. La différence de pression de l'ordre de plusieurs 10Pa est imposée. Elle pourrait contribuer à forcer un passage d'air au niveau de défauts d'étanchéité à l'air de la membrane bien que le soin ait été pris durant la mise en œuvre d'empêcher tout risque de fuite d'air « parasite ».
- Climat C : Avec entaille et sans porte soufflante. Dans ces conditions, l'humidité apportée à la paroi est à priori principalement transportée par le phénomène de diffusion de vapeur à travers l'entaille créée. La diffusion à travers la membrane est toujours présente mais on peut pressentir, d'après les essais de la tâche 2, que la quantité totale d'humidité apportée dans la paroi durant l'essai provient principalement de la diffusion de vapeur au travers l'entaille. On fait ici l'hypothèse que le transport d'air à travers l'entaille apporte peu d'humidité par rapport à la diffusion à travers la membrane. Les conditions d'essais sont peu favorables à ce type de transfert car aucune différence de pression totale n'est imposée et la température constante de part et d'autre de la paroi limite le phénomène de tirage thermique.
- Climat D : Avec entaille et avec porte soufflante. Dans ces conditions, l'humidité est à priori principalement apportée par le transport de l'air à travers l'entaille percée dans la membrane. Les autres modes de transports doivent coexister mais ils ne sont à priori pas prépondérants par rapport à la quantité finale d'humidité apportée.

Le Tableau 11 est une synthèse des *aprioris* physiques relatifs à la prépondérance des modes de transport d'humidité en fonction des conditions de réalisation des essais.

Tableau 11 : *Apriori sur la prépondérance des modes de transport d'humidité responsables de la quantité d'humidité globale apportée dans la paroi lors des essais. N/A : Mode de transport inexistant lors de l'essai, * : Mode de transport d'humidité fournissant une part négligeable d'humidité par rapport à la quantité totale apportée à la paroi durant l'essai, */** : Mode de transport apportant une part non négligeable d'humidité dans la paroi durant l'essai mais ce n'est à priori pas la part prépondérante, *** : Mode de transport apportant la part prépondérante d'humidité à la paroi durant l'essai*

Climat	Modes de transport d'humidité dans la paroi – Apriori physique			
	Diffusion de vapeur à travers le pare-vapeur	Transport d'air à travers les défauts d'étanchéité parasite	Diffusion de vapeur à travers l'entaille	Transport d'air à travers l'entaille
ClimatA	***	*	N/A	N/A
ClimatB	***	*/ **	N/A	N/A
ClimatC	*	*	***	*
ClimatD	*	*	*/**	***

5.3.2.2 Interprétation des résultats

5.3.2.2.1 Plan de mesure

Durant les essais, des couples de Température/Humidité Relative (T/HR) ont été mesurés à différentes profondeurs (Figure 56). La zone d'étude pour la modélisation hygrothermique est située entre la lame d'air recouverte par la plaque de plâtre du côté intérieur ((6) ou (1) selon la configuration) et la lame d'air recouverte par le bardage côté extérieur ((1) ou (5) selon la configuration). Ainsi, il s'agit de modéliser le comportement hygrothermique de la paroi comprenant les composants situés du pare-vapeur au pare-pluie. Cela permettra de limiter le nombre d'hypothèse ; par rapport aux propriétés physiques de la plaque de plâtre et du bardage ainsi que par rapport au fonctionnement des deux lames d'air.

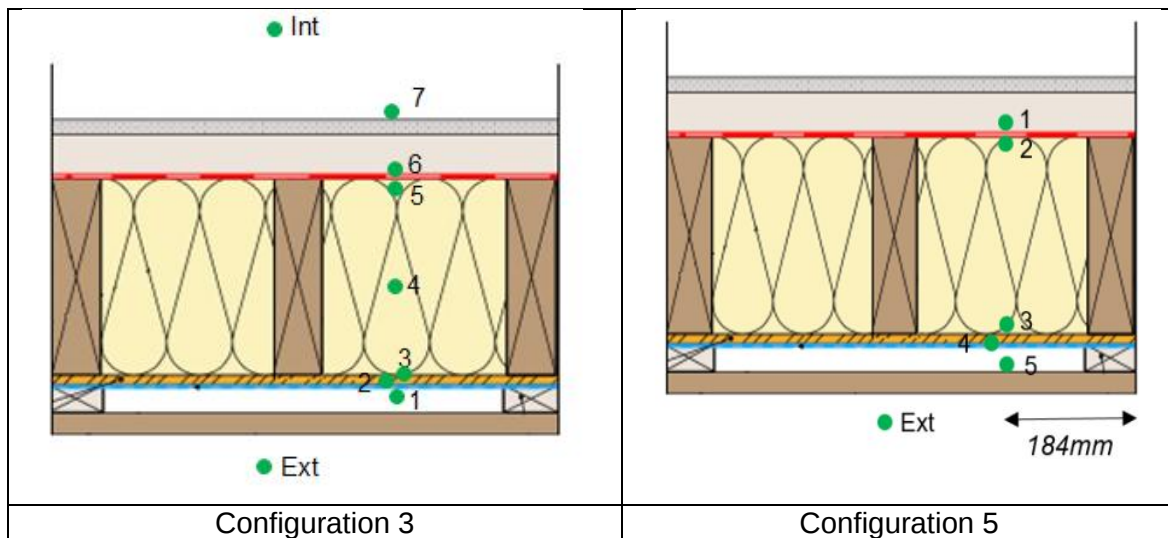


Figure 56: Plan de mesures des couples T/HR au sein de la paroi ossature bois – A gauche, le plan de mesure de la config 3 (S_d fabricant $\approx 18m$) et à droite le plan de mesure de la config 5 (S_d fabricant $\approx 90m$)

Le matériel utilisé pour effectuer ces mesures sont des capteurs STH 55 Newsteo (Figure 57) ayant les caractéristiques suivantes :

- T : -25 à $+80^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$
- HR : 0 à $100\% \pm 2\%$



Figure 57 : Capteur T/HR ST 55 (Newsteo)

5.3.2.2.2 Interprétation des résultats de la configuration 3

La Figure 58 et la Figure 59 montrent l'évolution dans le temps des pressions de vapeur mesurées dans la paroi. Elles sont déduites à partir des mesures de température et d'humidité relative. La pression de vapeur est le moteur des transferts d'humidité par diffusion. Le calcul de cette variable permet de mieux apprécier le sens et l'intensité de ces transferts dans les conditions de réalisations des essais. L'interprétation des essais de la configuration 3 est décomposée en 2 parties.

1^{ère} Partie (Figure 58)

Sans mise en pression, les conditions intérieures et extérieures sont stables dans le temps **(1)**. Lors de la mise en pression, les conditions intérieures sont fortement perturbées. Les conditions extérieures le sont un peu également **(2)**. La pression de vapeur devant le pare-pluie est supérieure à la pression de vapeur dans la lame d'air quelque-soit l'essai **(3)**. Cela correspond à une inversion par rapport au gradient attendu. Il faut y voir un potentiel biais de mesure. Enfin, la mise en pression a un fort impact sur les mesures autour du pare-pluie, même dans le cas où il n'y a pas d'entaille **(4)**. Il est probable que cela soit dû à des fuites parasites non maîtrisées.

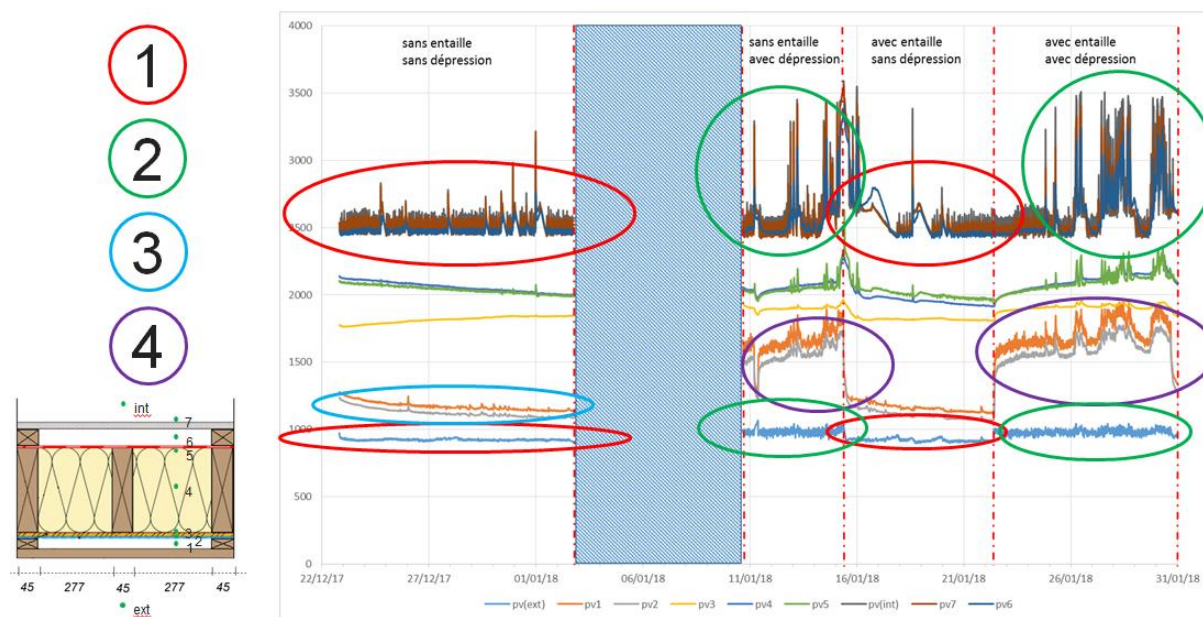


Figure 58 : Configuration 3, Résultats mesurés lors des différents essais. Interprétation Partie 1

2^{ème} Partie (Figure 59)

Lorsque la configuration est soumise à la sollicitation en pression, la pression de vapeur dans l'isolant augmente. Néanmoins, l'entaille ne semble pas avoir amplifié significativement cette augmentation **(1)**. Sans sollicitation en pression, l'entaille n'a pas non plus d'impact mesurable sur l'état en pression de vapeur de la paroi **(2)**. Dans l'isolant, les pressions de vapeurs ne sont pas stables à la fin des essais avec ou sans mise en pression. De plus, un équilibre en pression est observé du centre de l'isolant vers le pare-vapeur. Par ailleurs, il y a un gradient du centre de l'isolant vers le pare-pluie **(2+3)**.

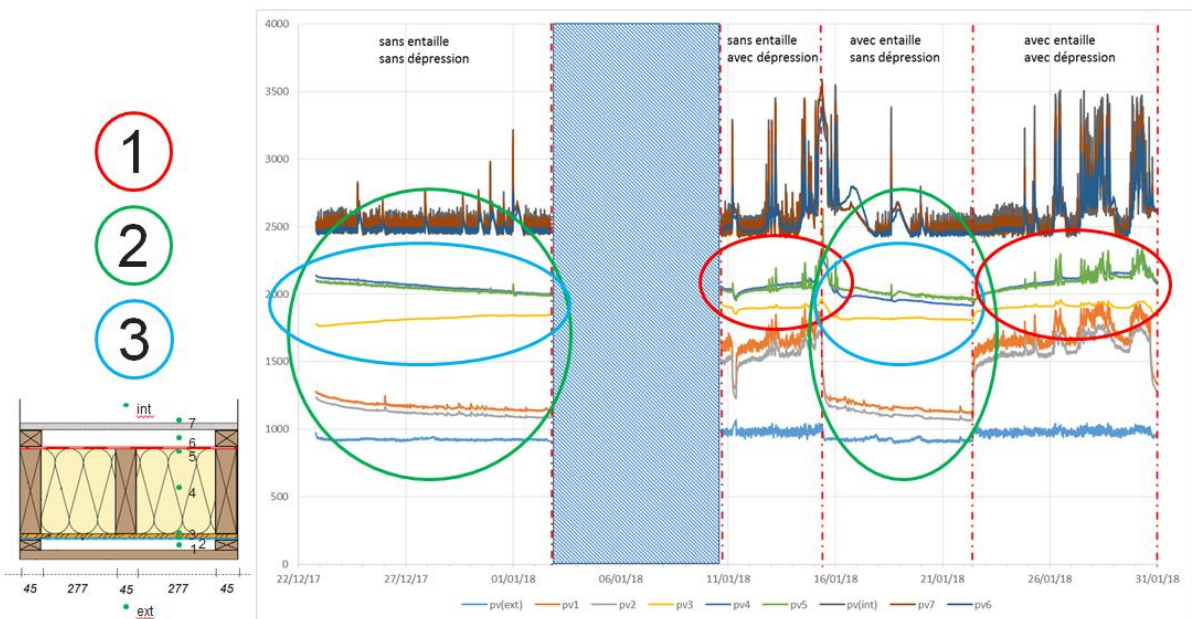


Figure 59 : Configuration 3, Résultats mesurés lors des différents essais. Interprétation Partie 2

Pour l'exercice de modélisation de cette configuration, une première difficulté est identifiée car les observations ne sont pas cohérentes avec les effets attendus des phénomènes physiques en jeu (l'effet de la mise en pression d'une paroi supposée parfaitement étanche à l'air, l'effet mitigé de l'entaille sur les pressions de vapeurs observées).

Dans ces premiers essais, leur durée était trop courte pour que la paroi ait atteint un état stable. Il a donc été décidé de tenir compte de ce point précis pour la réalisation des derniers essais de la T3, en particulier pour la configuration 5.

5.3.2.2.3 Interprétation des résultats de la configuration 5

La Figure 60 représente les pressions de vapeurs mesurées lors des essais de la configuration 5. Leur durée est plus longue que celle de la configuration 3. Ainsi, l'état de la paroi est plus stable à la fin des essais.

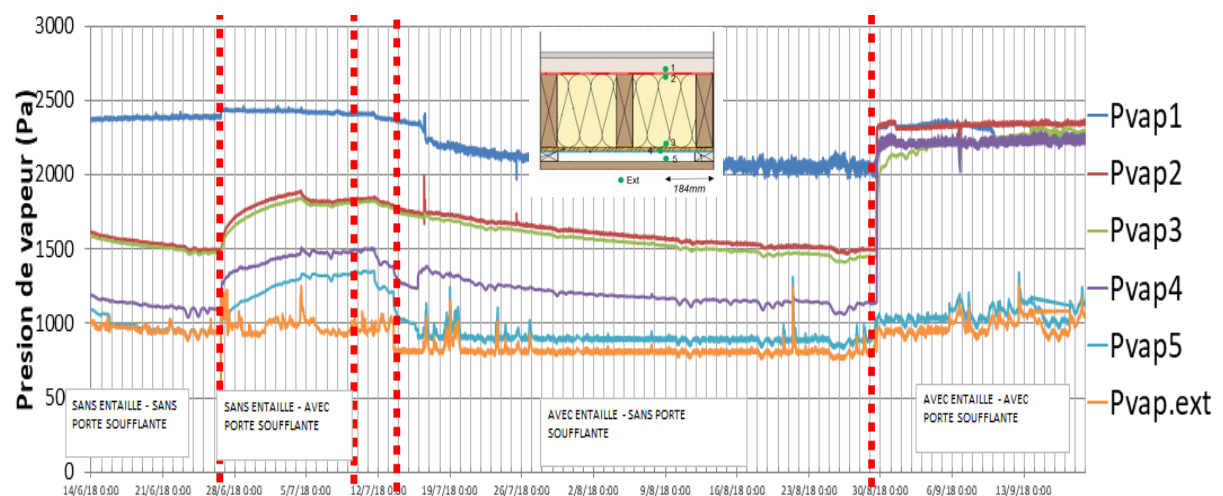


Figure 60 : Configuration 5, Résultats mesurés lors des différents essais

Sans mise en pression, les conditions intérieures et extérieures sont stables dans le temps. Cependant, lors de l'essai avec entaille et sans mise en pression, la pression de vapeur côté intérieure baisse significativement par rapport aux autres essais. Lors de la mise en pression, les conditions extérieures sont perturbées. Par rapport à l'essai en configuration 3 la pression de vapeur devant le pare-pluie est inférieure à la pression de vapeur dans la lame d'air quelque-soit l'essai. Cela est bien cohérent par rapport au gradient attendu. Enfin, dans cette configuration, la mise en pression a également un fort impact sur les mesures autour du pare-pluie, même dans le cas où il n'y a pas d'entaille. Des fuites parasites pourraient expliquer ces résultats.

Lorsque la configuration est mise en pression, la pression de vapeur dans l'isolant augmente. Contrairement à la configuration 3, l'entaille semble fortement amplifier cette augmentation. Sans sollicitation en pression, avec l'entaille, un petit gradient de pression est observable dans l'isolant.

Les résultats des essais sont compatibles avec l'interprétation physique des phénomènes en jeu selon les différentes conditions de réalisation des essais. Ces essais seront modélisés, en particulier pour confronter le modèle de prise en compte des effets de l'entaille aux mesures.

La différence de plusieurs 10Pa imposée en continu durant plusieurs jours est à comparer avec les sollicitations in-situ où la paroi est soumise en moyenne à une différence de quelques Pa (de l'ordre de 4Pa) et des expositions durant quelques minutes de l'ordre de plusieurs dizaines de Pa. Ainsi, durant ces essais les parois ont été confrontées à une sollicitation en pression très éloignées d'une situation réelle.

5.3.3 Simulations hygrothermiques des configurations 3 et 5

5.3.3.1 Modélisation de la paroi

La Figure 61 montre l'une des géométries et son maillage dans le logiciel Wufi2D pour modéliser ces cas d'étude. Il s'agit d'une coupe horizontale de la paroi sur laquelle, un schéma du maillage saisi sur le logiciel de calcul a été juxtaposé. Dans ce cas, le nombre de mailles est de 104x102.

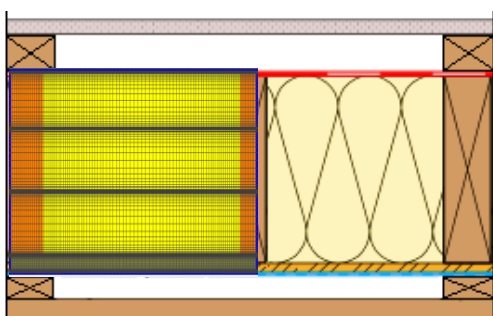


Figure 61 : Géométrie de la paroi en ossature bois modélisée sous Wufi2D

Concernant les matériaux et leurs propriétés physiques, les choix suivants ont été réalisés pour réaliser une modélisation de référence. Ces choix dépendaient notamment des données disponibles aux moments de la réalisation des modélisations (Tableau 12)

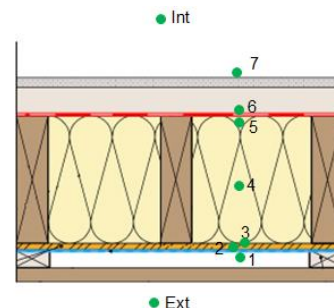
Tableau 12 : Propriétés des matériaux des simulations de référence selon les configurations

Matériau	Configuration 3	Configuration 5
Pare-vapeur	Valeur de Sd mesurée ($S_d = 32,6m$) sur les échantillons d'une même référence fabricant ($S_d = 20m$) lors de la tâche 2. Les autres propriétés sont des valeurs théoriques liées à la nature du matériau et n'ont pas d'impact sur les transferts hygrothermiques en jeu.	Valeur de Sd mesurée ($S_d = 141m$) sur les échantillons d'une même référence fabricant ($S_d = 100m$) lors de la tâche 2. Les autres propriétés sont des valeurs théoriques liées à la nature du matériau et n'ont pas d'impact sur les transferts hygrothermiques en jeu.
Isolant - Laine de verre	Il s'agit d'un matériau issu de la bibliothèque Wufi2D.	
Montant en bois	Il s'agit de montants en chêne dont les propriétés sont aussi estimées à partir de la bibliothèque de matériau Wufi2D	
Plaque OSB	Une valeur de perméabilité à la vapeur par défaut est utilisée ($\mu=650$). Les autres propriétés sont des valeurs standards.	La propriété de perméabilité de la vapeur des plaques d'OSB utilisées lors des essais a été mesurée ($\mu=24$). Les autres propriétés sont des valeurs standards.
Pare-pluie	Une valeur de perméabilité à la vapeur par défaut est utilisée ($\mu=100$). Les autres propriétés sont des valeurs standards.	La propriété de perméabilité de la vapeur du pare-pluie utilisé lors des essais a été mesurée ($\mu=104$). Les autres propriétés sont des valeurs standards.

Concernant les conditions initiales, elles sont considérées comme étant homogènes par matériau. Elles se basent sur les mesures réalisées au départ des essais au niveau des différentes couches de la paroi. Les règles décrites dans le Tableau 13 illustrent la méthode et les conditions initiales utilisées pour la modélisation de référence de la configuration 3 en climat A (sans entaille, sans mise en pression). Il peut s'agir ici de paramètres assez incertains qui auront un impact important sur les résultats car les durées des essais peuvent être courtes. L'ossature en bois étant l'élément comportant le plus d'inertie (en terme thermique mais aussi hydrique), il s'agira de considérer ces conditions initiales incertaines lors d'une analyse de sensibilité.

Tableau 13 : Définition des conditions initiales –Exemple : Configuration 3 Climat A

Au départ de l'essai	Milieu	T	HR
Moyenne(de (3) à (5))	Laine minérale	23,7°C	68%
Moyenne(de(1) à (2))	Pare pluie	22,5°C	46%
Moyenne(de(2) à (3))	OSB	22,7°C	55%
Moyenne(de(6) à (5))	Pare vapeur	24,7°C	74%
T:moyenne(de(3) à (5)) HR: mesure teneur en eau dans les montants de bois ou mesure HR	Montants en bois	23,7°C	65%



Les conditions aux limites côté intérieur et côté extérieur sont résumées par la Figure 62. Les climats utilisés sont issus des mesures réalisées dans les lames d'air lors des essais. Ces mesures comportent par nature une incertitude (en HR il est indiqué +/-2%HR) et peut donc expliquer des écarts entre calcul et mesure.

Figure 62 : Définition des conditions aux limites - Paroi ossature bois - ClimatA

Enfin, par rapport au calcul numérique le pas de temps utilisé est de 10minutes.

La suite de ce chapitre est illustrée par l'analyse des résultats des simulations des configurations 3 et 5. Les 3 parties suivantes montrent :

- La comparaison entre des outils utilisés par le Cerema et le CSTB (Configuration 3 en Climat A, B, C et D);
- La sensibilité du modèle à des paramètres incertains (Configuration 3 en Climat A) ;
 - Propriétés physiques des matériaux ;
 - Conditions initiales dans les matériaux.
- La modélisation des effets des perturbations (Configuration 5 en Climat A, B, C et D)
 - Modélisation des effets diffusifs ;
 - Modélisation des effets convectifs et diffusifs.

5.3.3.2 Comparaison des outils Cerema et CSTB (sur la configuration 3)

La même configuration de paroi a été simulée par deux versions différentes du logiciel Wufi2D. L'une est utilisée par le CSTB et l'autre par le Cerema. La configuration testée conjointement est celle la configuration 3 soumise aux climats A, B, C et D. Les résultats présentés ci-dessous sont ceux obtenus avec le climat A. Les points de comparaison sont les calculs et les mesures effectués aux endroits (2), (3), (4) et (5) selon la Figure 56. Les mesures en (1) et en (6) sont utilisées comme conditions aux limites.

Outre la version du logiciel, une différence existe dans la description géométrique du problème. Le Cerema a modélisé la moitié de la paroi en considérant une symétrie possible. Le CSTB a opté pour une description géométrique complète. Concernant l'épaisseur des membranes, le Cerema a opté pour une épaisseur fictive de 1 mm alors que le CSTB a choisi

une épaisseur fictive de 0,5 mm. Le nombre de maille du maillage étant équivalent entre les deux modèles, le modèle Cerema est donc un peu plus détaillé. Ainsi, la comparaison des variables des points d'observation doit aussi tenir compte de la petite différence entre les deux maillages utilisés.

Toutes les autres hypothèses de simulation ont aussi été définies précisément afin de réduire les écarts possibles dans la modélisation.

La Figure 63 et la Figure 64 montrent les couples T/HR calculés par les deux modèles et montrent une excellente concordance dans les résultats obtenus. Cela valide donc l'utilisation des deux versions du logiciel Wufi2D pour la réalisation de ce projet.

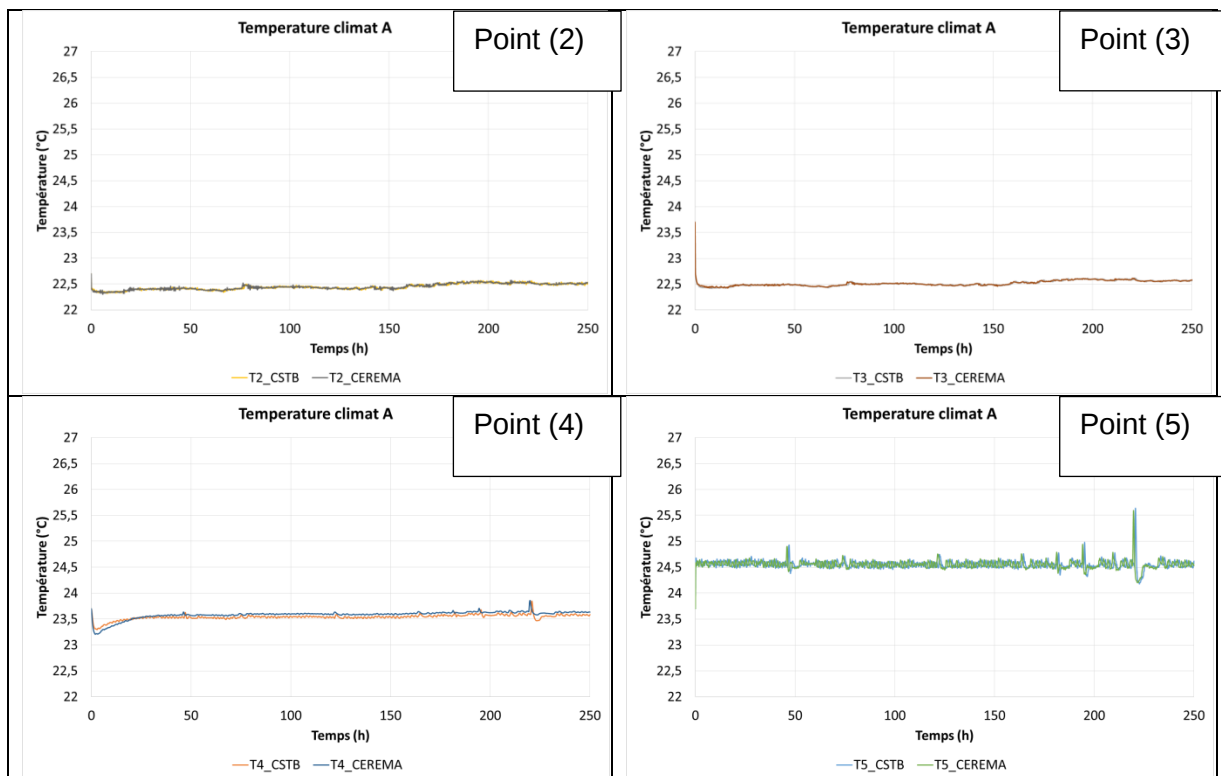
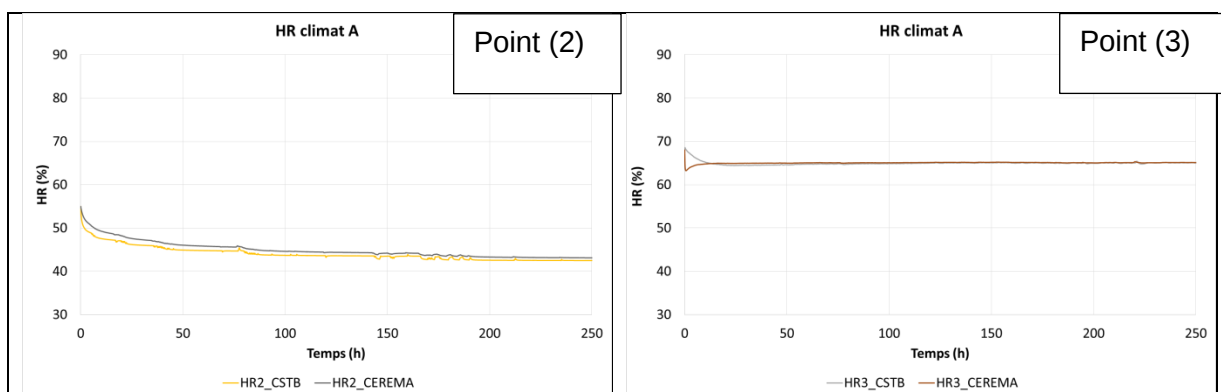


Figure 63 : Comparaison des résultats CSTB/Cerema, Température calculée de la configuration 3 en climat A



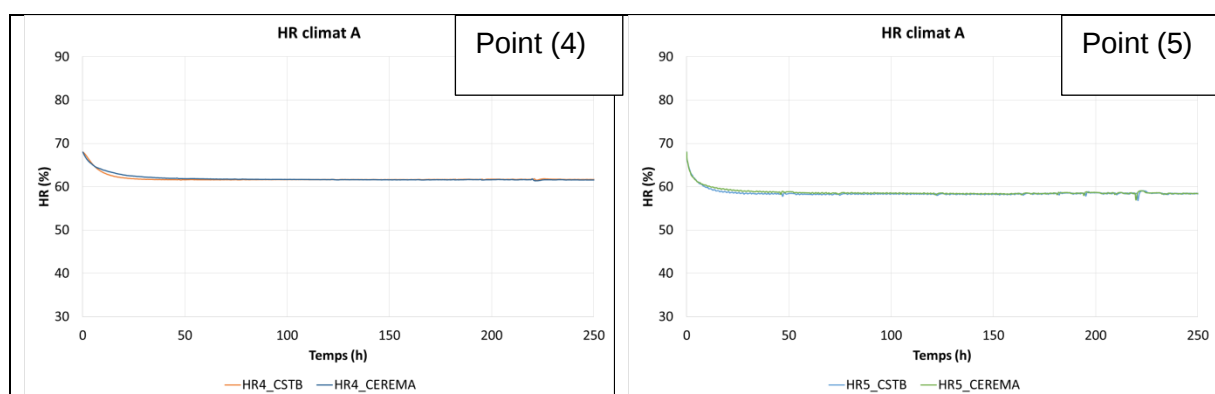


Figure 64 : Comparaison des résultats CSTB/Cerema, Humidité relative calculée de la configuration 3 en climat A

5.3.3.3 Sensibilité aux paramètres incertains (configuration 3 et 5)

Dans cette partie, la configuration 3 est utilisée pour étudier la sensibilité du calcul à la variation des propriétés des matériaux. Les configurations 3 et 5 sont utilisées pour étudier la sensibilité du calcul aux conditions initiales. On s'intéresse seulement aux essais où les configurations sont soumises au climat A. Dans ces conditions d'essais, le transport d'humidité dans la paroi doit provenir principalement du phénomène de diffusion de vapeur à travers le pare-vapeur. En effet, la membrane n'a pas d'imperfections et les moteurs de transport à travers la membrane et ses défauts parasites sont quasi inexistants (pas de mise sous pression et température assez homogène).

Ainsi, les hypothèses de calcul en simulation hygrothermique sont donc bien respectées dans ces conditions. Ces cas d'études constituent une base de comparaison pertinente entre le calcul et la mesure.

Les résultats de simulations à suivre illustrent l'impact dans le choix de paramètre de calculs incertains. Ces paramètres incertains sont les propriétés de certains matériaux et les conditions initiales de calcul.

5.3.3.3.1 Propriétés des matériaux

Il s'agit ici d'analyser la sensibilité du calcul à des paramètres incertains. Au préalable, les propriétés physiques incertaines des matériaux sont définies :

- **Pare-vapeur** : Des mesures ont été réalisées sur un matériau de même référence de fabricant. Cette propriété physique n'est donc pas jugée incertaine.
- **Isolant, laine de verre** : Dans le calcul, il s'agit d'un matériau issu de la bibliothèque Wufi2D. Une erreur sur la conductivité thermique devrait avoir un impact limité car la température est homogène. Par contre, une erreur sur le coefficient de diffusion de vapeur pourrait expliquer des différences entre le calcul et la mesure. C'est donc un paramètre à prendre en compte pour l'étude de sensibilité.
- **Montants en bois** : Il s'agit de montants en chêne dont les propriétés sont aussi estimées à partir de la bibliothèque de matériau Wufi2D. Bien qu'il n'y a pas eu de mesures directes faites sur ce matériau, la position des montants est éloignée des points de mesures donc ils devraient peu intervenir sur les résultats mesurés.
- **Plaque OSB** : 2 valeurs de perméabilités à la vapeur seront considérées. L'une correspondant à un $S_d=6m$ (valeur par défaut) et l'autre à un $S_d=2m$. C'est un paramètre incertain pour ce type de matériau qui peut dans ce cas d'étude avoir un impact significatif sur les résultats mesurés.

- **Le pare-pluie** : matériau standard qui à priori a peu d'impact sur les résultats car il est par nature perméable à la vapeur d'eau

La Figure 65 montre les températures mesurées et calculées avec les hypothèses de calcul de référence. Le calcul prédit correctement les températures mesurées et les écarts restants sont peu significatifs notamment vis à vis de l'incertitude de mesure. On peut souligner des écarts plus importants durant les premières heures de l'essai (jusqu'à 24h) qui correspondent à l'influence de la connaissance partielle des conditions initiales.

La Figure 66 illustre les HR calculées et mesurées. Les modélisations des points (2) et (3) semblent pertinentes. Au niveau de (2), à l'interface le pare-pluie/OSB, une légère différence est observée entre le calcul et la mesure. L'écart est constant et la dynamique reproduite par le calcul correspond bien à celle calculée. A l'interface OSB/isolant (3), le calcul indique une rapide stabilisation de l'HR alors que l'HR mesurée met plus de temps (environ 200h). Lorsque le HR est stable, les niveaux mesurés et calculés sont proches (moins de 2%HR d'écart) ce qui rend la modélisation acceptable.

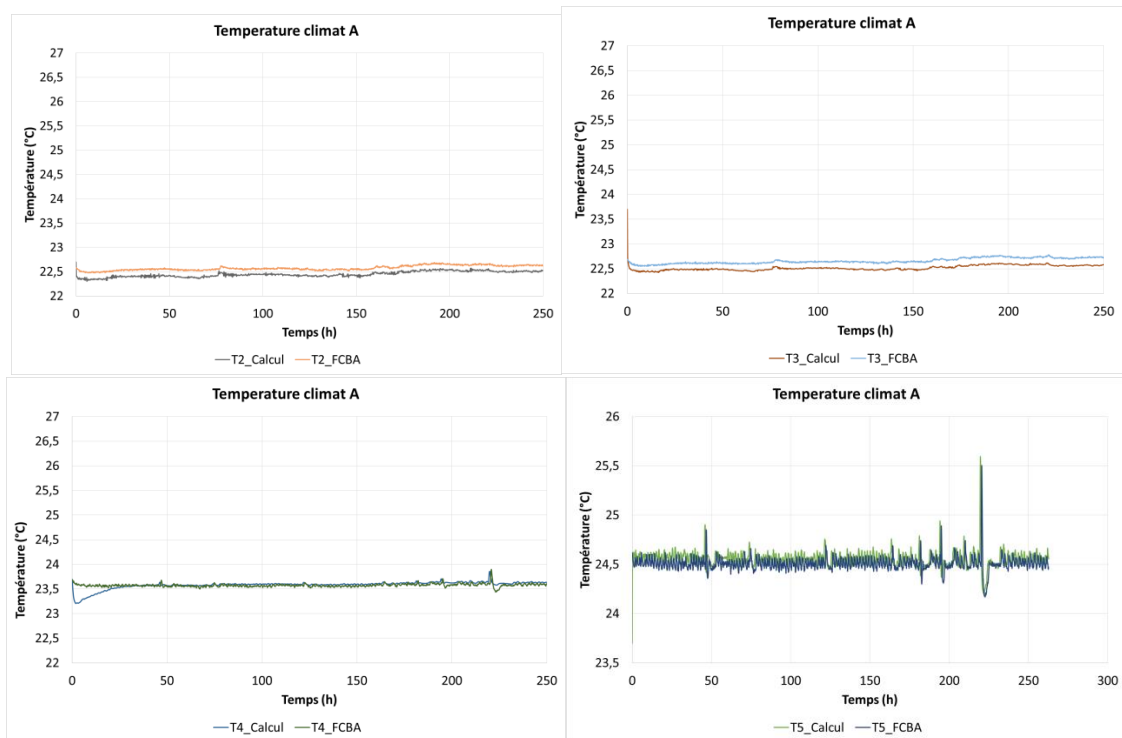


Figure 65 : Températures calculées et mesurées - Paroi ossature bois - Climat A - Hypothèses initiales de calcul

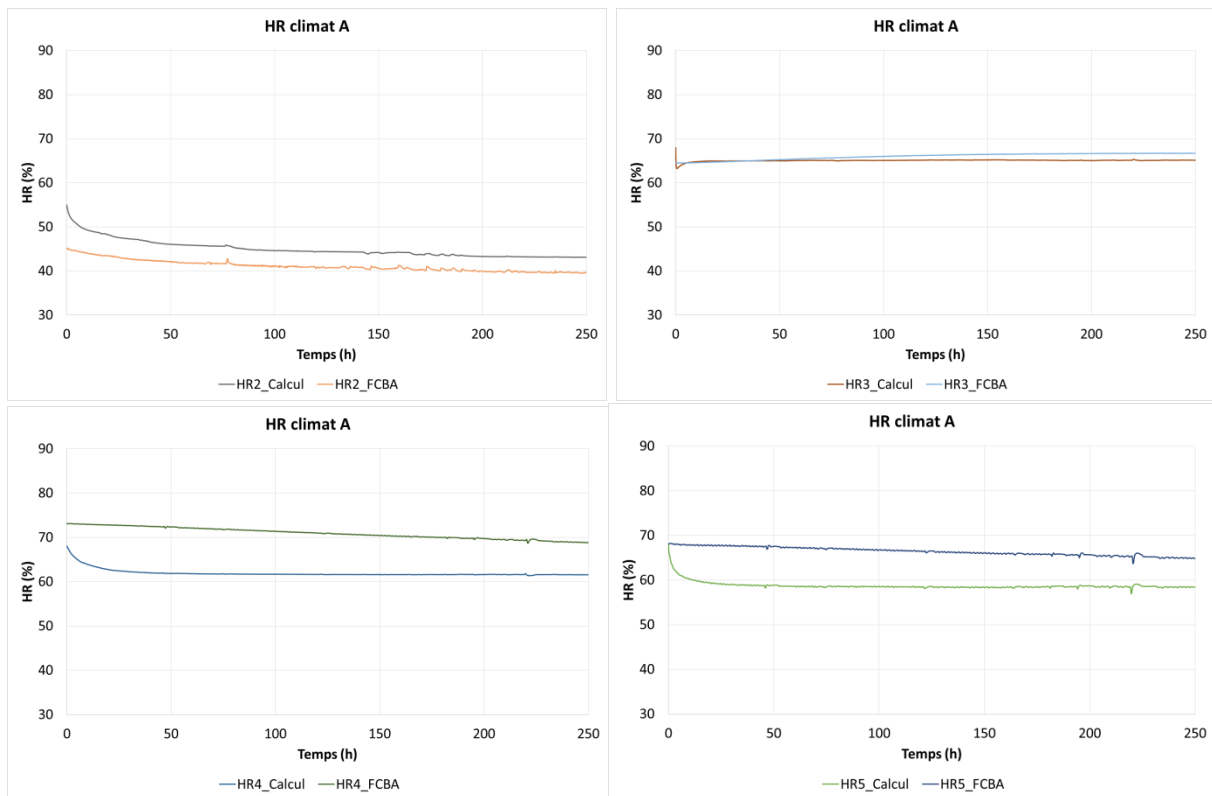


Figure 66 : Humidités relatives calculées et mesurées - Paroi ossature bois - Climat A - Hypothèses initiales de calcul

Cependant, la modélisation des points dans l'isolant (4) et à l'interface isolant / pare vapeur (5) donnent des résultats assez éloignés entre calcul et mesure. D'une part, l'HR mesurée est plus élevée que celle calculée (entre +5%HR et 10%HR). D'autre part, l'HR obtenue par la mesure dans l'isolant ne stabilise pas durant l'essai alors que dans le calcul elle est constante.

Les propriétés physiques incertaines des matériaux pourraient expliquer les écarts observés entre calcul et mesure au niveau des variables HR des points (4) et (5). Pour évaluer l'impact de ces incertitudes, de nouvelles simulations ont été réalisées en faisant varier ces paramètres. Ils ont été modifiés de la manière suivante :

- Plaque d'OSB, $S_d = 6m$ / Isolant $\mu=1.5$ (Simulation de référence)
- Plaque d'OSB, $S_d = 2m$ / Isolant $\mu=1.5$
- Plaque d'OSB, $S_d = 6m$ / Isolant $\mu=10$
- Plaque d'OSB, $S_d = 6m$ / Isolant $\mu=25$

La Figure 67 illustre l'évolution de l'HR au point (4). C'est un point d'étude intéressant car un écart important entre le calcul et la mesure avait été observé initialement. Notamment, les observations de HR ne stabilisaient pas dans la mesure alors que le calcul de référence prévoit une stabilisation. On constate que la variation des propriétés physiques des matériaux ne permet pas de simuler la même tendance que celle mesurée. La variation de la perméance de l'isolant permet d'augmenter légèrement le temps de stabilisation.

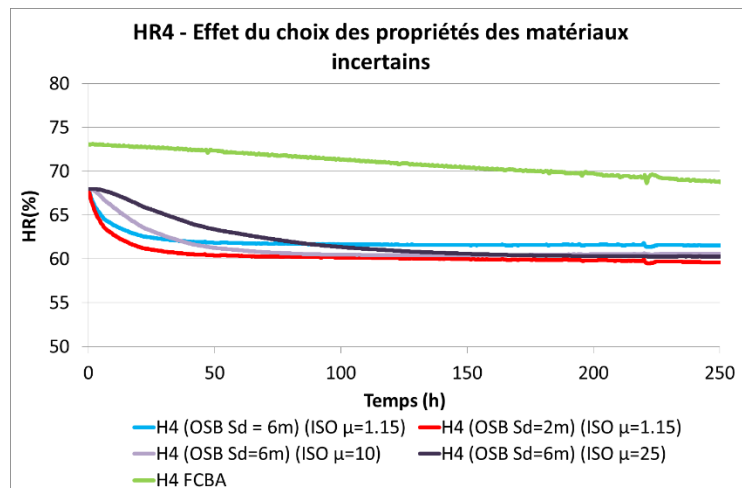


Figure 67 : HR calculée et mesurée au point (4) – Configuration 3 – Climat A - Effets de propriétés physiques incertaines

La Figure 68 représente les résultats d'HR obtenus à la fin de l'essai selon une coupe verticale de la paroi. Pour faciliter la lecture, les proportions exactes de chaque élément n'ont pas été conservées. A gauche de la coupe, il s'agit de la lame d'air situé contre le bardage ; à droite de la coupe, il s'agit de la lame d'air située contre la plaque de plâtre. Les profils calculés s'éloignent du profil mesuré, notamment au centre de l'isolant et derrière le pare-vapeur. D'autre part, il faut aussi remarquer que la simulation de référence (en bleu) se rapproche le mieux du profil mesuré de part et d'autre de la plaque d'OSB.

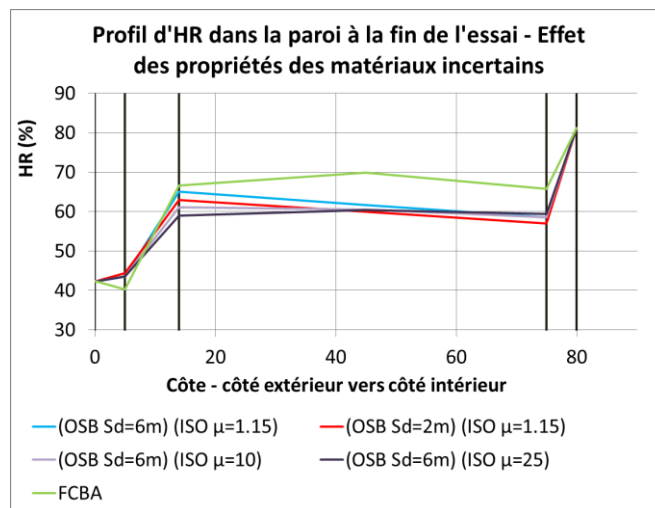


Figure 68 : Profil HR calculée et mesurée – Configuration 3 – Climat A - Effets de propriétés physiques incertaines

Pour réduire l'incertitude sur les propriétés de transfert des matériaux, le CSTB a mesuré la perméabilité à la vapeur des produits directement utilisé lors des essais du FCBA. Ainsi, les résultats suivants ont été obtenus (Tableau 14):

Tableau 14: Valeurs consolidées des propriétés physiques des produits de la configuration 3

	Valeur utilisée lors de la simulation de référence	Valeur mesurée directement sur le produit utilisé lors des essais de la configuration 3
Pare-vapeur (Sd fabricant = 18m)	Sd=32m	Sd=37m
Plaque d'OSB	$\mu=650$	$\mu=24$
Pare-pluie	$\mu=100m$	$\mu=107m$

La perméabilité à la vapeur d la plaque d'OSB est significativement plus basse que la valeur de référence.

Une nouvelle simulation de la configuration 3 a donc été réalisée avec ces propriétés de matériaux. Il a aussi été décidé d'augmenter la condition initiale en HR dans les montants en bois pour apporter de l'humidité supplémentaire (voir partie suivante).

La Figure 69 illustre l'évolution de l'HR au point (4). En utilisant les propriétés mesurées, le temps de stabilisation mesuré au point 4 s'allonge. Néanmoins, le calcul avec les propriétés mesurées prévoit toujours une stabilisation à la fin de l'essai.

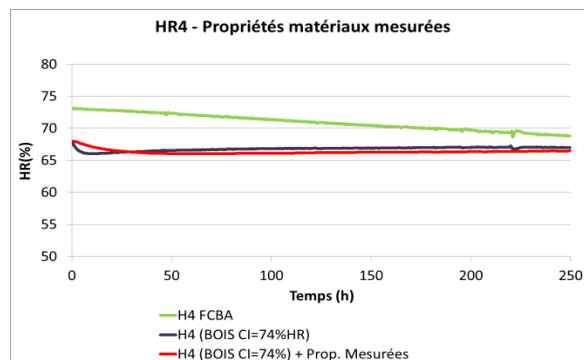


Figure 69 : HR calculée et mesurée au point (4) – Configuration 3 - Climat A – Consolidation des propriétés physiques des produits.

La Figure 70 représente les résultats d'HR obtenus à la fin de l'essai selon une coupe verticale de la paroi. Le profil rouge correspond aux résultats calculés avec les propriétés mesurées directement sur les produits utilisés lors des essais. Par rapport aux résultats de référence, l'utilisation des paramètres directement mesurés n'a pas beaucoup d'impact sur la prévision du calcul à la fin de l'essai. Il faut noter ici par rapport aux résultats précédents, que les conditions initiales utilisées ont ici plus d'impacts sur les résultats en fin d'essai.

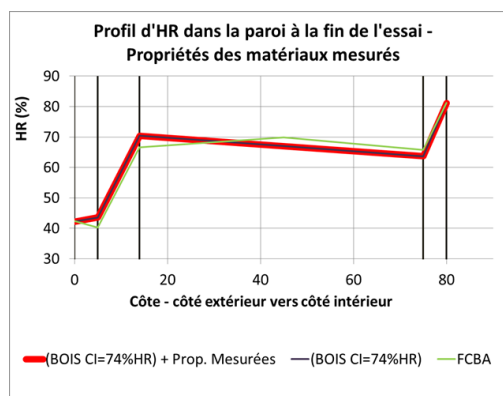


Figure 70 : Profil HR calculée et mesurée – Configuration 3 – Climat A - Consolidation des propriétés physiques des produits.

5.3.3.3.2 Choix des conditions initiales (configuration 3)

Dans cette partie, les propriétés physiques des matériaux n'ont pas été modifiées par rapport aux valeurs de référence. Les conditions initiales (CI) dans les montants en bois sont modifiées. La teneur en eau moyenne réelle au début de l'expérience dans le matériau est très probablement différente de celle observée par la mesure. Il s'agit donc ici de faire varier ce paramètre sur un intervalle probable aux vues des mesures réalisées. Il est donc proposé de réaliser des simulations dans les conditions suivantes :

- Montants en bois : en conditions initiales HR=65%HR
- Montants en bois : en conditions initiales HR=70%HR
- Montants en bois : en conditions initiales HR=74%HR

La Figure 71 illustre la variation de l'HR mesurée au point (4). En fonction du choix des CI dans les montants en bois, la valeur stabilisée au niveau de ce point de mesure varie fortement (de 62%HR à 67%HR). Les valeurs calculées se rapprochent de celles mesurées. La dynamique semble difficile à reproduire sans tenir compte de l'hétérogénéité des CI au sein de chaque matériau.

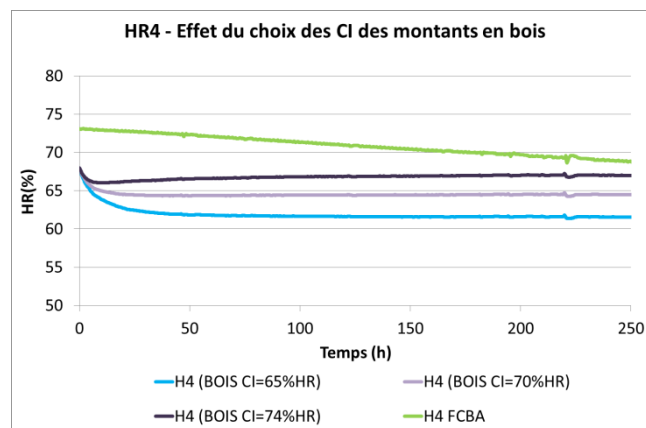


Figure 71 : HR calculées et mesurée au point (4) - Ossature bois - Climat A - Effets des CI dans les montants en bois

La Figure 72 montre les profils mesurés et calculés de l'HR. Avec des CI plus humides dans les montants (CI=74%HR), les HR calculés au centre de l'isolant et derrière le pare-vapeur se rapprochent. Les écarts deviennent négligeables devant l'incertitude de mesure. Cependant, il faut noter que l'HR derrière la plaque d'OSB s'écarte de la valeur mesurée.

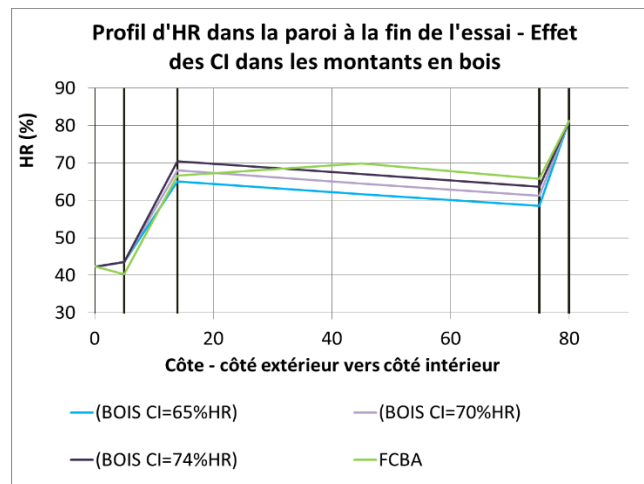


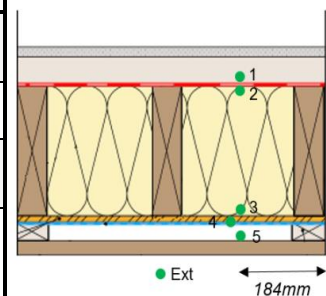
Figure 72 : Profils calculés et mesuré – Configuration 3 – Climat A - Effets des CI dans les montants en bois

5.3.3.3.3 Choix des conditions initiales (configuration 5)

Pour cette configuration, un autre type de sensibilité aux conditions initiales a été investigué. En effet, le logiciel de simulation offre deux possibilités de prise en compte des conditions initiales, soit de manière homogène, soit de manière matricielle. La première consiste à indiquer pour chaque matériau constituant la paroi une unique valeur de température et de teneur en eau initiale. La seconde consiste à définir ces valeurs pour chaque maille. Dans ce dernier cas, nous avons supposé des variations linéaires d'humidité et de température entre chaque point de mesure à notre disposition. Pour le cas particulier des montants pour lequel aucune mesure n'est disponible, il a été choisi d'affecter dans les deux cas une valeur moyenne d'humidité. Le Tableau 15 détaille les valeurs utilisées dans les deux cas pour chaque matériau.

Tableau 15 : utilisation des mesures pour la définition des conditions initiales

Matériau	CI homogènes	CI matricielles
Ecran sous toiture	Mesures 4	Linéarisation mes5/mes4
OSB	Mesures 4	Linéarisation mes4/mes3
Isolant	Moyenne mesures2 / mesures3	Linéarisation mes3/mes2
Montant	Moyenne mesures2 / mesures3	Moyenne mes/2/mes3 (HR) Linéarisation mes3/mes2 (T)
Pare vapeur	Mesures2	Linéarisation mes2/mes1



Les figures Figure 73 et Figure 74 présentent la comparaison des résultats expérimentaux (FCBA) et des simulations dans les deux modes de prise en compte des conditions initiales (« CI homogène » et « CI matricielle »), à l'interface pare vapeur / isolant (HR2) et à l'interface isolant / OSB (HR3).

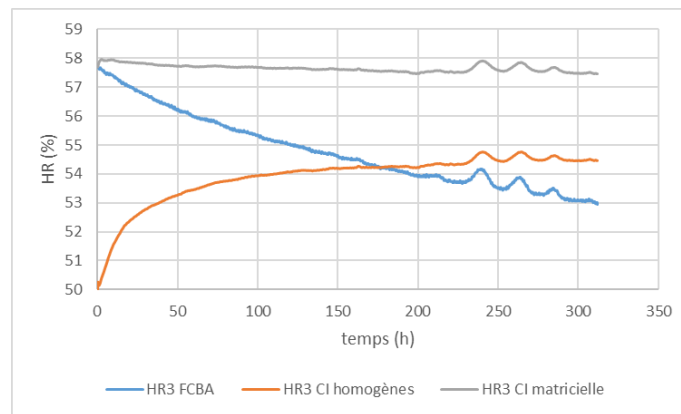


Figure 73 : impact de la prise en compte des CI pour le capteur 3

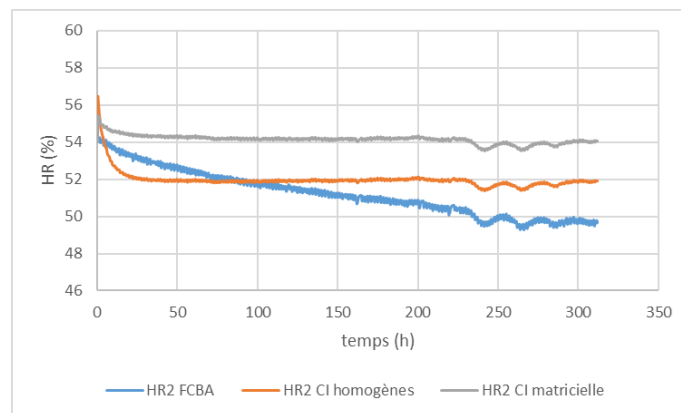


Figure 74 : impact de la prise en compte des CI pour le capteur 2

Ces résultats indiquent l'extrême influence des conditions initiales sur les résultats, dans le cas d'expérimentations courtes en durée. Si la prise en compte matricielle assure dans les deux cas une valeur identique des conditions initiales par rapport aux mesures, le calcul et la mesure restent très éloignées à la fin de l'essai ; l'écart est amplifié lorsqu'on tient compte d'une répartition non homogène.

Dans un second temps, il a alors été décidé de modifier la valeur de la condition initiale dans les montants, puisque c'est le seul élément pour lequel on ne dispose pas de mesures. Ainsi, plutôt qu'une valeur de 56%, une nouvelle valeur de 50% a été affectée. Enfin il a également été testé la possibilité d'une variation linéaire dans le montant, entre 52% et 48%. Les résultats sont indiqués sur la Figure 75 et la Figure 76. L'indice « mat » indique la prise en compte matricielle. La valeur concerne la valeur de la condition initiale dans le montant bois. La prise en compte homogène figure toujours.

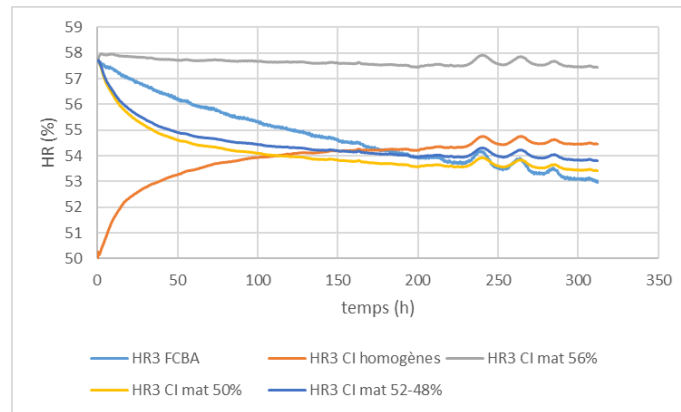


Figure 75 : impact de la CI dans les montants pour le capteur 3

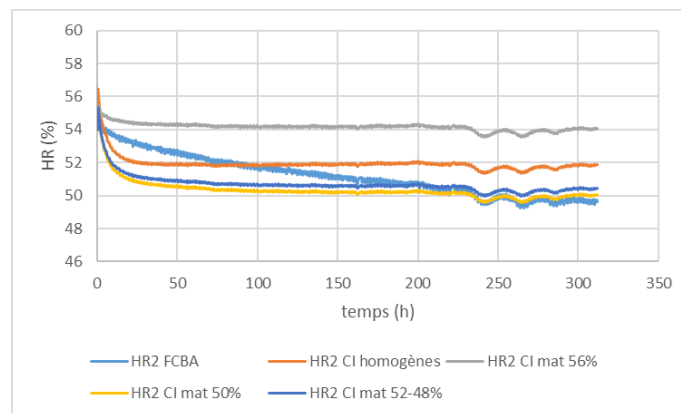


Figure 76 : impact de la CI dans les montants pour le capteur 2

Les résultats de simulation sont extrêmement sensibles à la condition initiale choisie pour le montant bois. Ainsi, lorsque cette condition est dans ce cas autour de 50%, plutôt que de 56% (valeur issue des mesures dans l'isolant), les résultats en régime permanent sont très proches des résultats expérimentaux. La dynamique reste pour autant assez différente et toujours inexplicable compte tenu des mesures en notre possession. Enfin, l'application d'une variation linéaire de la condition initiale dans le montant a un effet très faible sur les résultats.

Par la suite, nous conserverons une prise en compte des conditions initiales via un mode matriciel en prenant une valeur initiale dans les montants de 50%.

5.3.3.3.4 Choix de l'emplacement des mesures (configuration 5)

Pour tenter d'expliquer l'écart de dynamique entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales, une dernière étude de sensibilité a été menée, vis-à-vis de l'emplacement de la mesure. Dans tous les résultats présentés jusqu'alors, les résultats de simulation correspondants au capteur (3), à l'interface isolant/OSB, ont été obtenus à partir des valeurs calculées dans des mailles situées de part et d'autre de l'interface, c'est-à-dire dans l'isolant et dans l'OSB. Ici, il a été choisi de ne sélectionner soit que des mailles dans l'isolant, soit que des mailles dans l'OSB. Les résultats sont indiqués sur la Figure 77.

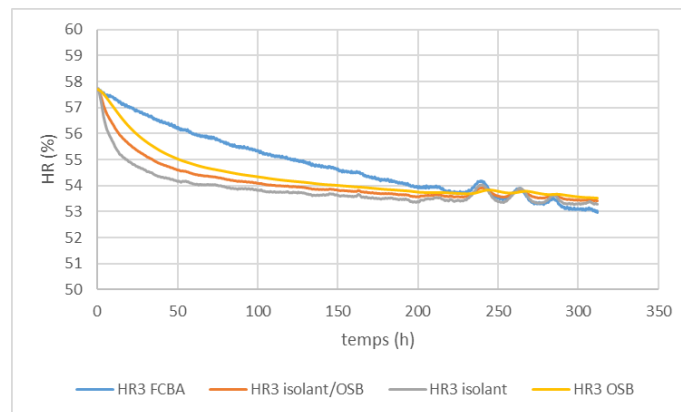


Figure 77 : Impact de l'emplacement de la mesure

Lorsque seules des mailles de l'OSB sont sélectionnées, la dynamique simulée est légèrement plus proche des résultats expérimentaux que lorsque seul l'isolant est sélectionné, compte tenu de la capacité de stockage du matériau. Toutefois les différences restent faibles et toujours inexpliquées malgré le travail réalisé.

5.3.3.4 Conclusion

La prise en compte de l'incertitude sur les propriétés des matériaux en simulation hygrothermique ne suffit pas pour expliquer les différences entre calcul et mesure. En consolidant ces données, il est toujours difficile de modéliser fidèlement les phénomènes observés par la mesure.

Pour expliquer les écarts restants, la prise en compte des conditions initiales dans le calcul joue un rôle important. En effet, il s'agit ici d'une modélisation sur le court terme. Les résultats finaux peuvent donc dépendre fortement de ces CI, notamment selon l'inertie du système. Ici, la définition des Conditions Initiales des montants en bois a une influence prépondérante.

La prise en compte des CI est une difficulté supplémentaire dans l'exercice de comparaison calcul/mesure sur des périodes courtes. Cela a donc motivé le choix d'allonger la durée des essais lors du projet. Les simulations, dans le cadre de la sous-tâche 4.3 et 4.4, seront réalisées sur le long terme. Les résultats ne devraient donc pas être impactés par les conditions initiales.

5.3.4 Modélisation de l'effet d'une entaille (configuration 5)

Dans cette partie, la configuration 5 est utilisée pour tester les méthodes de modélisation de l'effet des entailles sur le comportement hygrothermique de la paroi. On s'intéresse seulement aux essais où les configurations sont soumises au climat C et D.

Dans les conditions d'essais du climat C, une entaille est réalisée dans le pare-vapeur. Le transport d'humidité à travers cette ouverture doit être principalement lié au phénomène de diffusion. Le transport d'air est ici négligé car il n'y a pas de différence de pression totale imposée entre les deux parois et les températures sont aussi très proches (pas de tirage thermique).

Dans les conditions d'essais du climat D, une entaille est également réalisée. De plus une porte soufflante est mise en fonctionnement pour mettre en surpression le côté intérieur par rapport au côté extérieur. Le transport d'humidité à travers l'ouverture est lié au phénomène de diffusion et aussi au phénomène de convection dont le moteur est le gradient de pression imposé par la porte soufflante.

Les résultats de simulations à suivre sont séparés selon les climats. D'abord, en climat C, on s'attachera à modéliser les effets diffusifs de l'entaille. Puis, en climat D, les effets convectifs et diffusifs sont modélisés.

5.3.4.1 Modélisation des effets diffusifs (Climat C)

Pour tenir compte de l'effet diffusif de l'entaille, la géométrie de la membrane est modifiée dans le logiciel. Le principe suivant est mis en œuvre. La membrane est modélisée en trois parties (Figure 78). Deux parties « saines » dont les propriétés de transfert à la vapeur correspondent aux propriétés mesurées lors de la tâche 2. Une partie de dimension 1mmx1mm modélisant l'entaille (vue de dessus).



Figure 78 : Schéma de la membrane modélisée en simulation hygrothermique pour tenir compte des effets diffusifs de l'entaille

La propriété de transfert à la vapeur de cette dernière partie est déterminée selon les résultats obtenus lors des essais de perméabilité sur les perturbations de la tâche 2. La résistance à la diffusion de l'entaille est évaluée à $\mu=0.0006$ pour une valeur à appliquer sur une largeur de 1mm et une épaisseur de 1mm.

En simulation hygrothermique avec le logiciel Wufi2D, ce modèle diffusif d'entaille peut induire des problèmes de convergence lors de la réalisation des calculs. Pour les limiter, il est alors possible d'affiner le maillage de la géométrie ou éventuellement d'augmenter la valeur de la perméance de l'entaille.

Un calcul avec et sans le modèle d'entaille a été réalisé ainsi avec le Climat C. Les profils en pression de vapeur calculés au droit de l'emplacement de l'entaille sont représentés sur la Figure 79. Le modèle qui représente le mieux le profil mesuré est le modèle sans entaille.

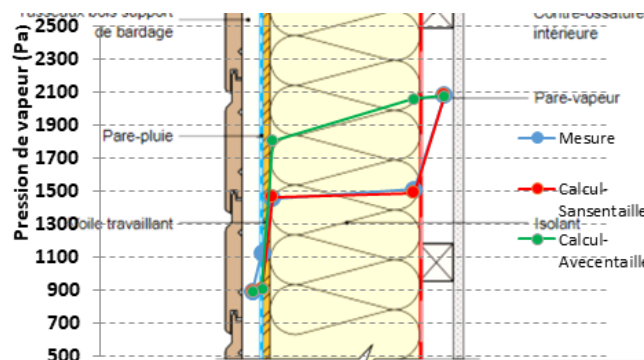


Figure 79 : Profil de pression de vapeur- Configuration 5, Climat C - Modélisation de l'effet diffusif de l'entaille

En observant le champ de pression de vapeur calculé à la fin de l'essai avec le modèle d'entaille (Figure 80), l'impact calculé est très localisé, autour de l'entaille. En se fiant à ce résultat de calcul, cela montrerait que l'observation par la mesure, de l'effet de l'entaille dans les conditions du climat C dépend de l'emplacement du capteur relativement à la position de l'entaille. Si le capteur se situe seulement à quelques millimètres aux alentours de l'entaille, il est possible que sa mesure soit peu impactée par la présence de l'entaille (dans les conditions du climat C). Alors que s'il s'était situé directement au droit de l'entaille, alors il l'aurait été beaucoup plus (dans les mêmes conditions).

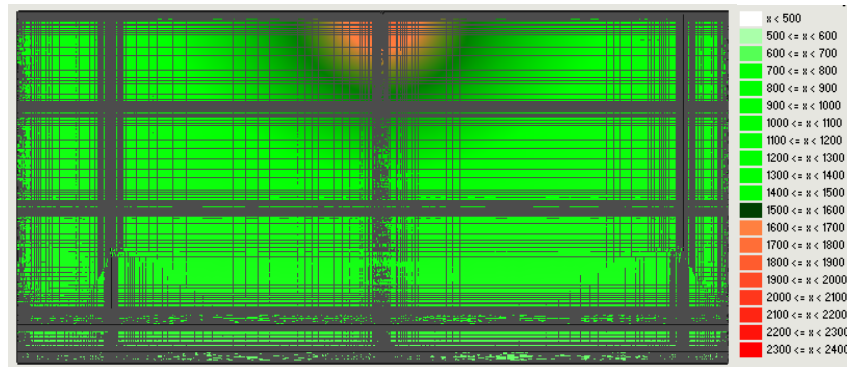


Figure 80 : Champ de pression de vapeur calculé à la fin de l'essai - Configuration 5, Climat C

Ainsi, la différence entre le calcul avec entaille et la mesure est peut être uniquement liée à une incohérence entre les emplacements des points d'observations. Dans la suite de ce travail on précisera la position des points d'observations, relativement par rapport à la perturbation. Pour cela, on définit la grandeur x comme étant la position du point d'observation par rapport à l'entaille. Lorsque le point d'observation se situe au droit de l'entaille, alors $x=0\text{mm}$. Plus le point d'observation s'en éloigne, alors x augmente.

5.3.4.2 Modélisation des effets convectifs et diffusifs (Climat D)

Cette partie présente des essais de modélisations des transferts convectifs par le modèle de renouvellement d'air.

D'abord, des premières simulations permettent d'observer le comportement de la paroi lorsque ce type de modèle est intégré. Puis, en confrontant ces simulations aux mesures, des pistes ont été identifiées pour améliorer le modèle.

5.3.4.2.1 Comportement de la paroi avec un modèle de renouvellement d'air

Le modèle des effets diffusifs de l'entaille est le même que celui présenté précédemment. Pour modéliser les effets convectifs en simulation hygrothermique, il est d'abord nécessaire de définir l'emplacement de la source d'humidité supplémentaire. L'emplacement choisi est situé entre la plaque d'OSB et l'isolant (le même emplacement qui aurait été choisi avec un modèle par infiltration).

Le modèle par renouvellement d'air comporte une lame d'air de 5mm d'épaisseur ajoutée entre la plaque d'OSB et l'isolant. Son taux de renouvellement d'air de référence est de 1 vol/h par de l'air intérieur. Ces conditions aux limites latérales sont les conditions intérieures. Plusieurs simulations sont réalisées dans les conditions du Climat D :

- Calc.REF : Une simulation de référence sans tenir compte des effets diffusifs ni convectifs de l'entaille
- Calc.Enta : Une simulation en tenant seulement compte d'un l'effet diffusif de l'entaille

- Calc.Air : Une simulation en tenant seulement compte d'un effet convectif de l'entaille (lame d'air ventilée)
- Calc.Enta.Air : Une simulation en tenant compte d'un effet diffusif de l'entaille et d'un effet convectif (lame d'air ventilée)

La Figure 81 montre les profils de pression de vapeur obtenus au droit de l'entaille avec ces différents calculs. Le modèle de renouvellement d'air permet d'élever la pression de vapeur entre l'OSB et l'isolant. Le gradient de pression de vapeur dans l'isolant est assez faible et correspond à ce qui a été mesuré. En ajoutant le modèle d'effet diffusif au modèle d'effet convectif, cela crée un gradient de pression de vapeur dans l'isolant. Il est lié au point d'observation, situé au droit de l'entaille. Les niveaux de pressions de vapeurs calculés dans l'isolant sont encore loin de ceux mesurés.

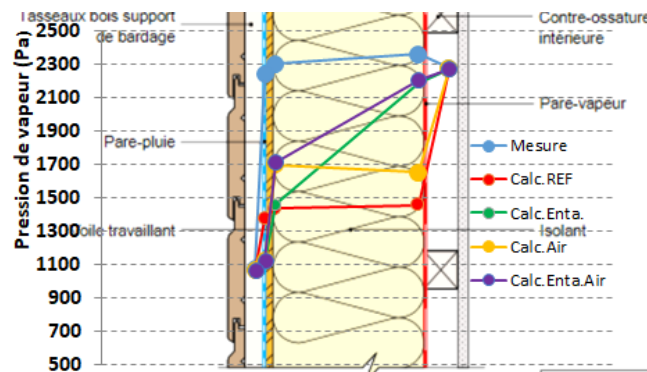
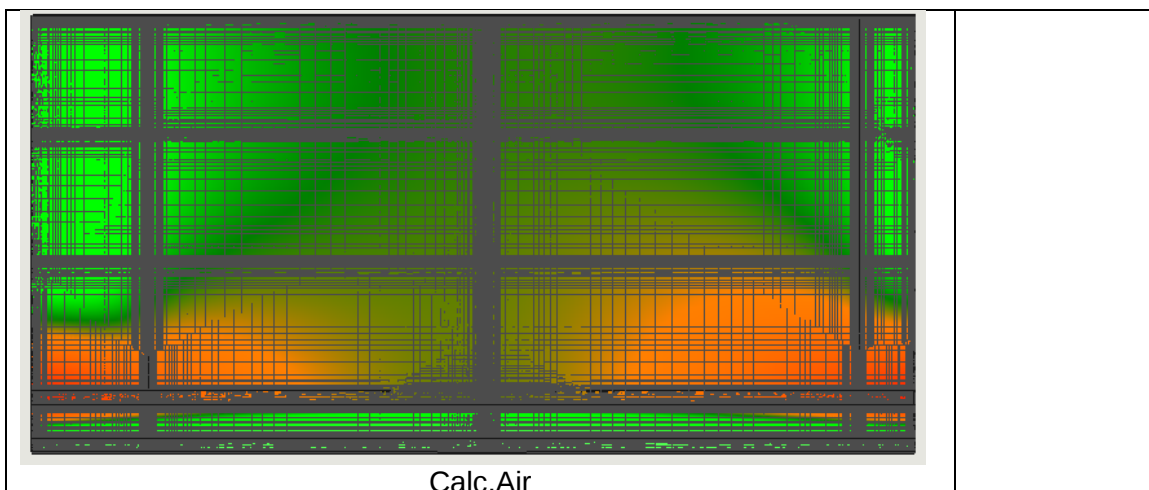
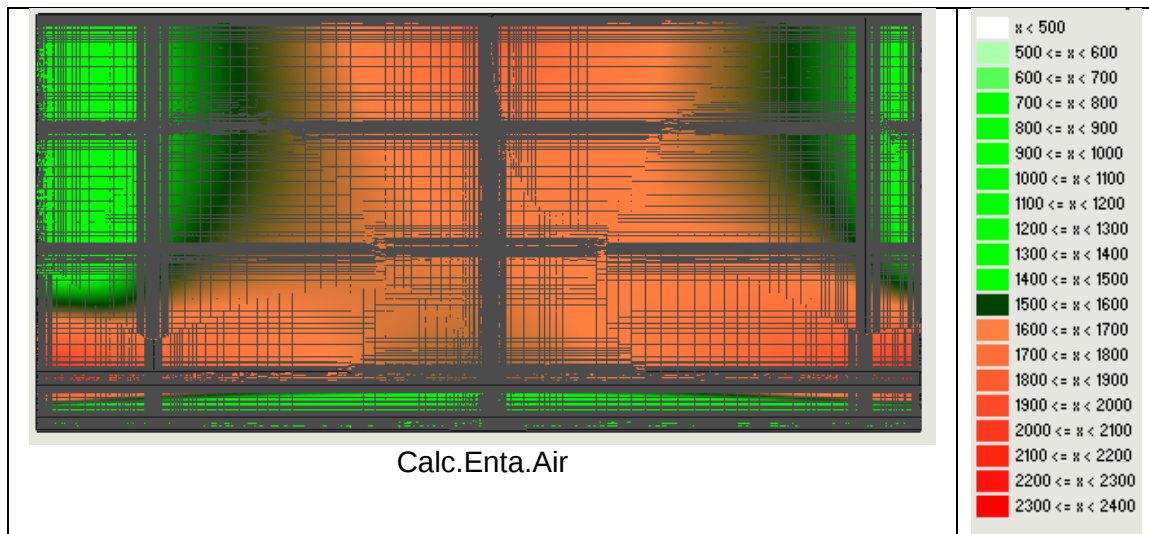


Figure 81 : Profils de pression de vapeur au droit de l'entaille- Configuration 5, Climat D - Modélisation de l'effet diffusif et convectif (par renouvellement d'air) de l'entaille

Il faut aussi noter que l'effet diffusif de l'entaille combiné à un effet convectif entre l'isolant et l'OSB tend à homogénéiser la pression de vapeur dans l'isolant, comme le montre les figures du Tableau 16.

Tableau 16 : Champ de pression de vapeur calculé à la fin de l'essai - Configuration 5, Climat D - Modélisation de l'effet diffusif et convectif (par renouvellement d'air) de l'entaille





Sur ces premières simulations, on constate que :

- Derrière la membrane la pression calculée est toujours inférieure à la mesure ;
- La pression entre l'OSB et l'isolant est significativement différente entre le calcul et la mesure et quelque soit le position du point d'observation) ;
- La comparaison avec les profils mesurés dépendent toujours de la position du point d'observation.

Pour améliorer la cohérence entre le modèle par renouvellement et la mesure deux pistes sont étudiées:

- Le changement du débit de la lame d'air. La valeur initial du débit était arbitraire. On propose de modifier ce débit pour évaluer la sensibilité du modèle ;
- La sensibilité des observations selon la position du point d'observation ;
- L'ajout des lames d'air renouvelée supplémentaires à la paroi. L'objectif est de trouver les combinaisons qui permettraient d'obtenir des résultats plus près des mesures. Les lames d'air retenues correspondraient physiquement à l'emplacement dans la paroi où l'air échange de l'humidité avec le milieu.

5.3.4.2.2 Effet du débit de renouvellement d'air

Des simulations ont été réalisées en augmentant le débit de la lame d'air entre 1vol/h et 1200vol/h. Un débit de 1200vol/h pour une lame d'air de cette dimension équivaut à 2m³/h (soit un débit d'air passant à travers une fente en kraft de 35mmx3mm sous 10Pa). Les résultats observés au droit de l'entaille sont présentées sur Figure 82.

Entre l'OSB et l'isolant on observe une meilleure représentation des pressions de vapeur lorsque le débit est très fort mais il est insuffisant pour obtenir un résultat de calcul cohérent avec la mesure entre l'OSB et le pare-pluie.

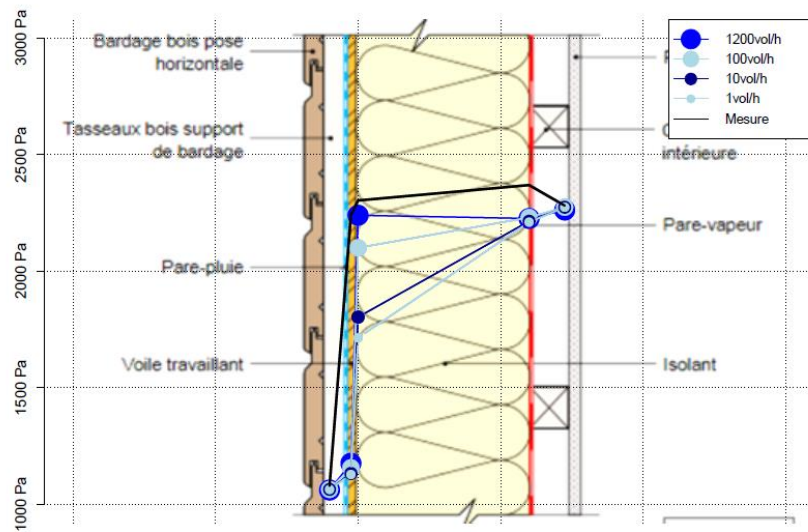


Figure 82 : Sensibilité au débit de renouvellement d'air - Observation au droit de l'entaille

Effet de la position du point d'observation

Les résultats obtenus avec le débit de 1200vol/h ont été analysés en faisant varier la position du point d'observation Figure 83.

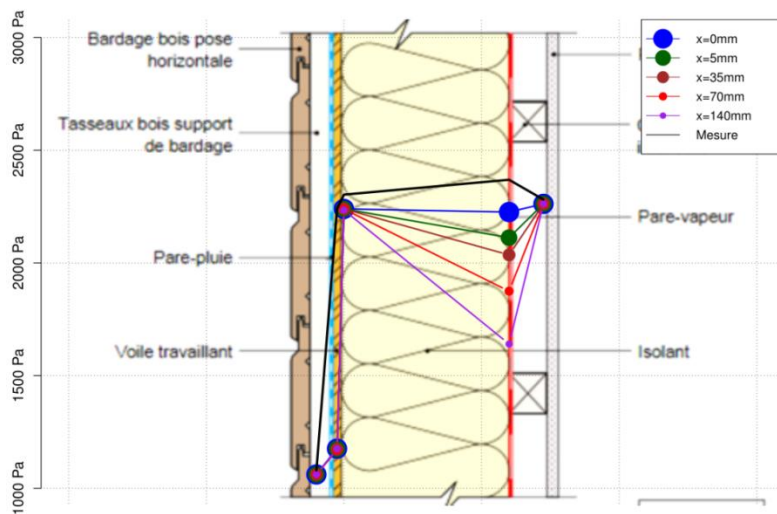


Figure 83 : Impact de la position du point d'observation

En s'éloignant de l'entaille, il faut constater que les résultats simulés s'éloignent fortement de la mesure entre la membrane et l'isolant. Notamment à 5mm, la simulation prédit une forte baisse de la pression de vapeur. Or, la mesure indique des conditions proches de l'ambiance intérieure. La diffusion à travers l'entaille ainsi qu'un apport d'humidité supplémentaire entre l'isolant et l'OSB ne suffisent pas à expliquer ce qui est observé par la mesure. Il faut peut-être prendre en compte une source supplémentaire pour répartir à différents endroits les sources.

5.3.4.2.3 Effet lié à l'ajout de lames d'air

Les emplacements de trois lames d'air renouvelés sont alors définis selon la Figure 84 :

- L1 : Lame d'air entre la membrane et l'isolant ;

- L2 : lame d'air entre l'OSB et l'isolant. Il s'agit de la lame d'air qui était alors seule prise en compte dans ce qui précède ;
- L3 : lame d'air entre l'OSB et le pare-pluie.

L'épaisseur de ces lames d'air est de 5mm.

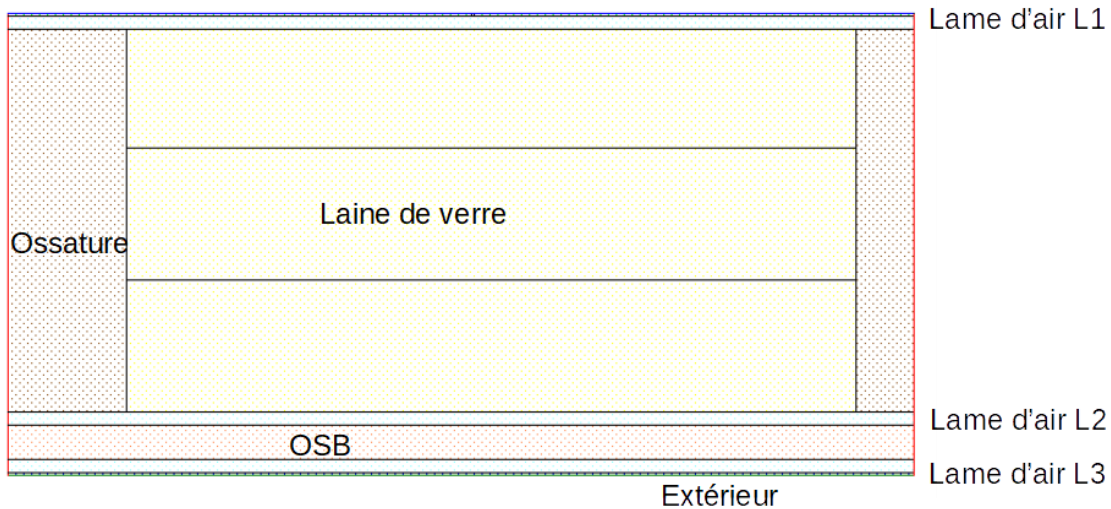


Figure 84 : Nomenclature des lames d'air renouvelées

Plusieurs scénarios sont testés en activant et en désactivant certaines de ces lames d'air. Lorsqu'une lame d'air est active, le taux de renouvellement appliqué est de 1200 vol/h. La position du point d'observation retenu se situe à 5mm de l'entaille. Les résultats obtenus sont montrés dans la Figure 85.

Les calculs les plus cohérents avec la mesure sont obtenus lorsque les trois lames d'air sont activées (L1L2L3). En désactivant uniquement la lame d'air L1 (cas L2L3), la pression de vapeur calculée derrière la membrane diminue légèrement. En désactivant uniquement L3 (cas L1L2), la pression entre l'OSB et le pare-vapeur chute. Enfin, la pression entre l'isolant et l'OSB chute dans le cas L1L3 (L2 désactivé).

Aux vues des écarts observés, les modèles par renouvellement d'air les plus cohérents avec la mesure sont ceux avec au moins les lames d'air L2 et L3 activées.

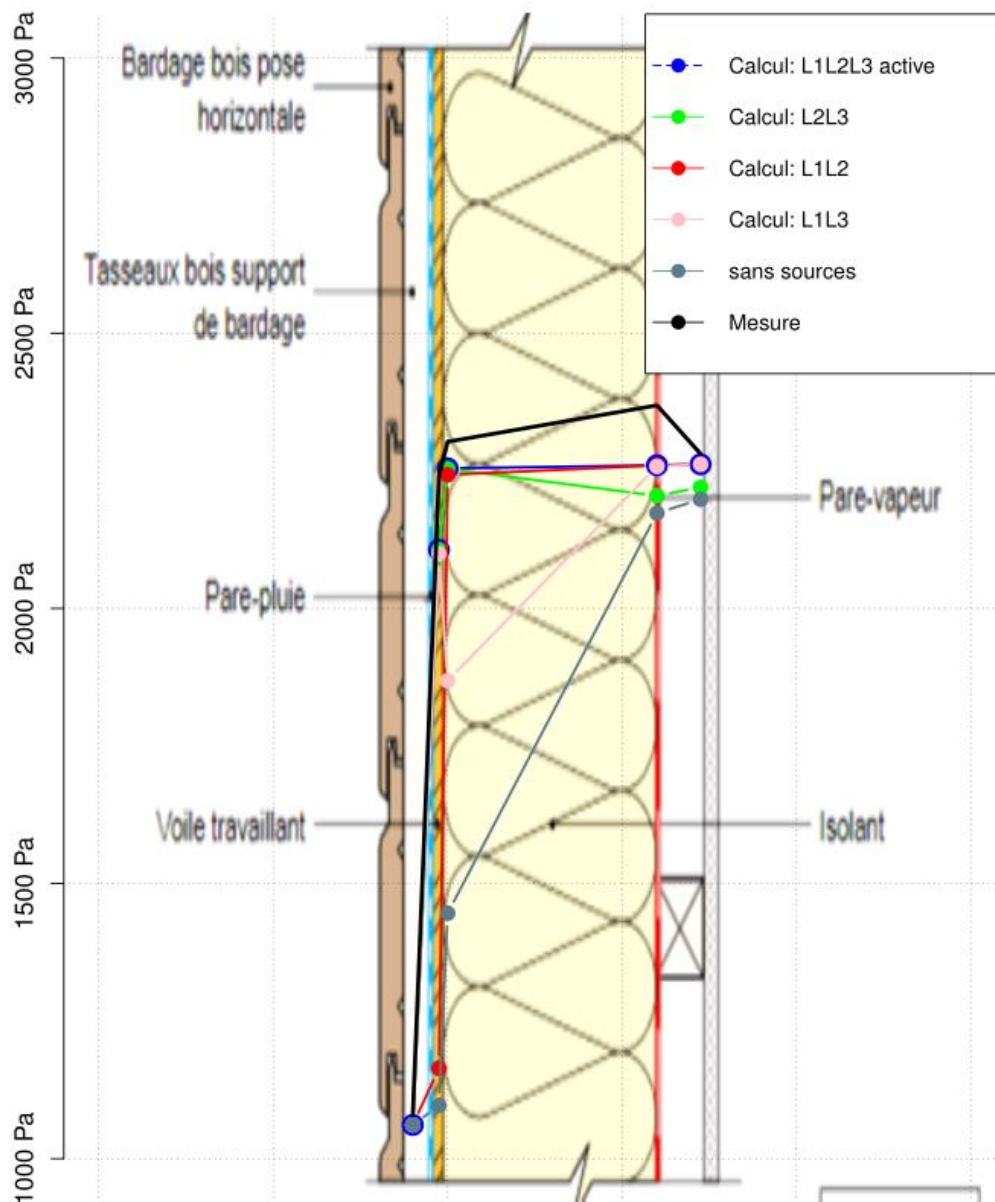


Figure 85 : Choix de l'emplacement et du nombre de lame d'air PV pour un modèle par renouvellement

5.3.4.2.4 Autre méthode

Enfin, une autre méthode a été testée pour modéliser les effets de l'entaille dans le cas du climat D. Dans cette simulation, le pare-vapeur a été supprimé de la géométrie de la paroi. Les profils obtenus sont visibles sur la Figure 86.

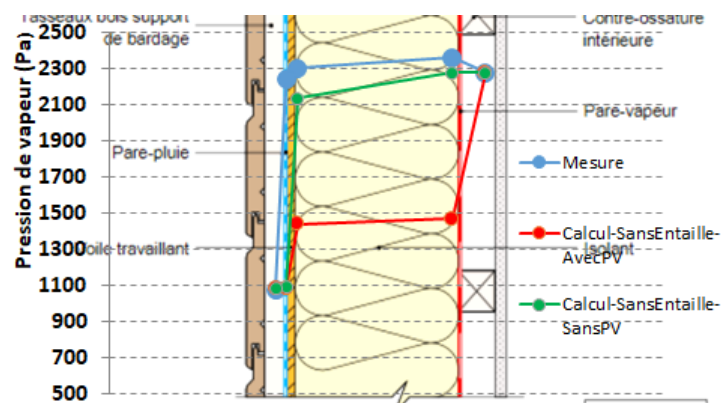


Figure 86 : Profils de pression de vapeur - Configuration 5, Climat D – Modélisation avec et sans pare-vapeur

On peut constater que le profil calculé sans pare-vapeur est plus proche de la mesure. Cependant, la mesure entre l'OSB et le pare-pluie est nettement plus élevée.

5.3.4.3 Conclusion

Une méthode de modélisation de l'effet diffusif d'une perturbation de membrane a été proposée. La comparaison entre calcul et mesure n'a pas montré de fortes incohérences liées à ce modèle. L'analyse des champs de pression de vapeur calculés et mesurés a mis en évidence une différence liée peut-être à l'emplacement des points d'observations.

Un modèle de renouvellement d'air a été utilisé pour tenir compte de l'effet convectif de l'entaille sur le comportement hygrothermique de la paroi. En combinant ce modèle au modèle diffusif de l'entaille, la pression de vapeur dans l'isolant tend à s'homogénéiser. Une étude de sensibilité sur ce modèle a également été conduite en faisant varier le taux de renouvellement d'air et le nombre de lame d'air afin de rapprocher le calcul au mieux de la mesure. Les résultats les plus cohérents ont été obtenus lorsque :

- Au moins deux lames d'air sont prises en compte et sont situées de part et d'autre de la plaque d'OSB ;
- Le taux de renouvellement d'air global est de l'ordre de 1200vol/h.

Dans les conditions de simulations sur le long terme, le modèle par infiltration apportera également de l'humidité à la paroi car les conditions extérieures utilisées pourront conduire à l'apparition de point de condensation. Le modèle par renouvellement d'air doit maintenant être confronté au modèle par infiltration dans ces conditions. Cette étape de confrontation permettra de choisir le modèle utilisé. Il sera ensuite nécessaire de calibrer la méthode pour quantifier l'intensité de la perméabilité résiduelle et les effets des perturbations « accidentelles ».

5.3.5 Confrontation dans les conditions de simulation et calibration des débits.

5.3.5.1 Confrontation du modèle par renouvellement d'air et par infiltration

Le modèle par renouvellement d'air et le modèle par infiltration sont comparés selon une base commune :

- La paroi est une ossature légère du même type que celle décrite précédemment. Elle est soumise aux conditions climatiques suivantes : Climat extérieur : Climat de Nancy de la BDD Wufi, Climat intérieur : selon les recommandations, dans les conditions du fichier météo de Nancy ;
- Une source d'humidité modélisant les apports par perméabilité à l'air résiduelle est intégrée dans la paroi. Le débit du flux d'air est constant et est de l'ordre de $0.6\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$. A priori, ce débit est bien supérieur au débit qui sera utilisé lors des simulations. La source d'humidité issue de ce flux d'air se situe sur un plan de condensation située entre l'OSB et l'isolant.

Par rapport au modèle d'infiltration, le modèle par renouvellement d'air va potentiellement sécher la paroi durant la période estivale. Il s'agit d'abord de comparer par le calcul l'intensité du phénomène de séchage et conclure sur la nécessité d'en tenir compte ou pas. Pour réaliser cette étude, des simulations de l'ossature légère ont été réalisées avec le modèle par renouvellement d'air dans différentes conditions :

- Pas de source : Sans débit de renouvellement d'air ;
- Renouvellement sur toute l'année : Avec un débit constant sur une année de l'ordre de $0.6\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$;
- Renouvellement hors été : Avec un débit variant dans le temps : débit nul du 1er mai au 31 août, débit constant en dehors de cette période (de l'ordre de $0.6\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$)..

La Figure 87 représente la teneur en eau dans l'ossature en bois calculé selon ces conditions.

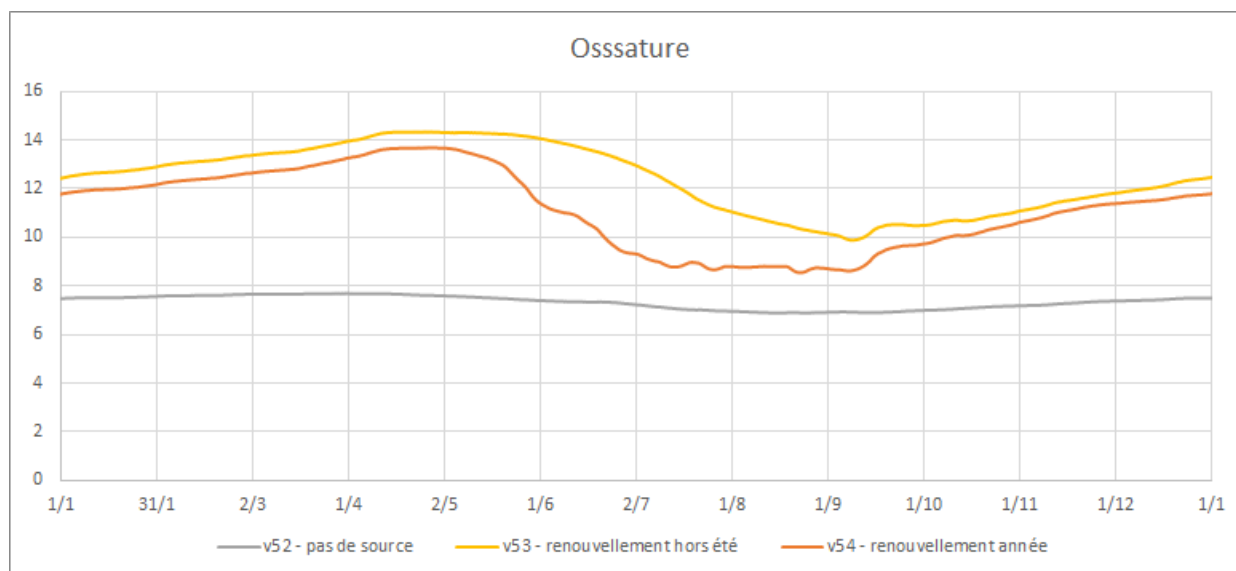


Figure 87 : Teneur en eau en masse dans l'ossature bois de la paroi – Effet de la période

Lorsqu'il y a un renouvellement à l'année, l'ossature en bois sèche beaucoup plus que lorsqu'il y a un renouvellement uniquement hors été. Le phénomène de séchage n'est pas négligeable et il faut donc en tenir compte pour comparer les deux modèles. Or, le modèle par infiltration simule uniquement un apport d'humidité, il faut donc ajuster au mieux le modèle par renouvellement afin qu'il contribue principalement à l'apport d'humidité dans la paroi.

Pour ajuster au mieux la période de débit nul du modèle par renouvellement, on propose l'analyse suivante (Figure 88). En bleu est représentée la température sur une année au niveau du plan de condensation (contact entre l'OSB et l'isolant) et en rouge est représentée sa moyenne mobile sur 100h afin de mettre en évidence des tendances. La température de rosée de l'air intérieure est en jaune.

Lorsque la température au niveau du plan de condensation (bleu) est inférieure à la température de rosée (jaune), si de l'air humide intérieur rentrait en contact avec ce plan, alors un condensat se formerait et contribuerait à humidifier la paroi (c'est le débit de ce condensat qui est calculée par le modèle par infiltration). A partir de la Figure 88, en utilisant la moyenne mobile (rouge) on constate que cette situation n'est jamais observée entre le 1er mai et le 31 août. Durant cette période, le modèle par infiltration calculerait un débit de condensat nul, et ainsi on déduit que le débit de renouvellement d'air est nul durant cette période

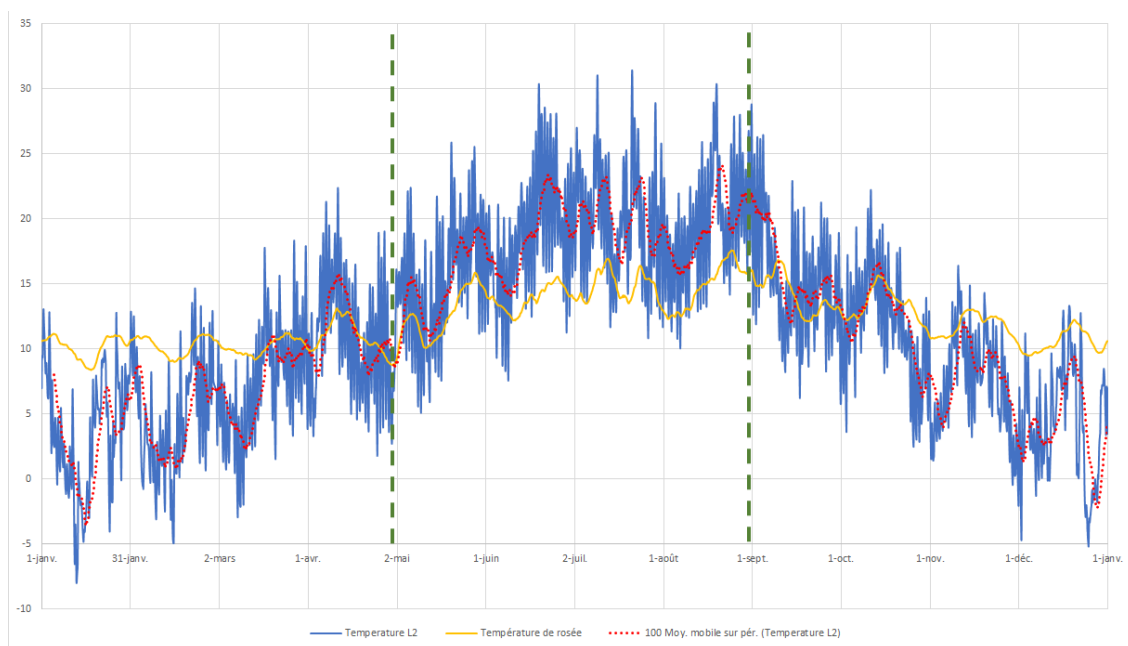


Figure 88: Identification d'une période de séchage du modèle par renouvellement d'air

Par rapport au modèle par infiltration, le modèle par renouvellement d'air intègre des éléments de lames d'air supplémentaires à la géométrie qui peuvent modifier le comportement hygrothermique de la paroi.

Une autre simulation a été réalisée en doublant l'épaisseur de la lame d'air (v53-2). Le renouvellement d'air de la lame a été divisée par deux afin d'avoir des apports équivalents. Les résultats obtenus en teneur en eau sont représentés sur la Figure 89. On observe que :

- L'hiver, la paroi se charge d'humidité. Les quantités apportées sont bien équivalentes entre les simulations avec des épaisseurs de lames différentes (v53 et v53-2) car les teneurs eau sont proches à cette période. Cela valide la méthode de détermination du taux de renouvellement d'air répartie sur deux épaisseurs différentes ;
- A la fin de l'hiver, la teneur en eau de l'OSB est la plus élevée de la paroi. Durant l'été, il y a donc deux possibilités pour sécher cet élément. Un premier transfert de l'OSB vers l'extérieur (ce potentiel de séchage ne change pas entre les v53 et v53-2). Un second, de l'OSB vers l'intérieur (ce potentiel de séchage est freiné dans la seconde simulation car la lame d'air est plus épaisse et donc sa résistance est plus élevée) ;
- Ainsi, le séchage de l'OSB est moins important lorsque la lame d'air est doublée (donc la teneur en eau plus élevée durant l'été), d'autre part l'ossature en bois et l'isolant se charge plus en humidité et plus tardivement à cause du freinage de ce second transfert (déphasage de plusieurs semaines pour les courbes de la teneur en eau de l'ossature) ;
- Les résultats du modèle par renouvellement d'air sont donc très sensibles au paramètre d'épaisseur de la lame d'air. De plus, c'est un paramètre dont la valeur est très incertaine.

Le rôle de frein à la diffusion lié à lame d'air est un effet "parasite" du modèle de renouvellement. Le modèle de renouvellement est intégré à la simulation uniquement pour générer une source d'humidité supplémentaire à la paroi correspondant aux apports d'humidité liés aux transferts d'air dans la paroi. Les effets constatés sont :

- Un effet de séchage qui peut être limité en imposant un taux de renouvellement nul durant une période « estivale » ;
- Un frein à la diffusion ; Des simulations supplémentaires seraient nécessaires pour définir une méthode pour limiter son effet.

Bien que le modèle par infiltration ne soit pas généralisable aux essais expérimentaux, ce modèle a été choisi pour réaliser les simulations sur le long terme.

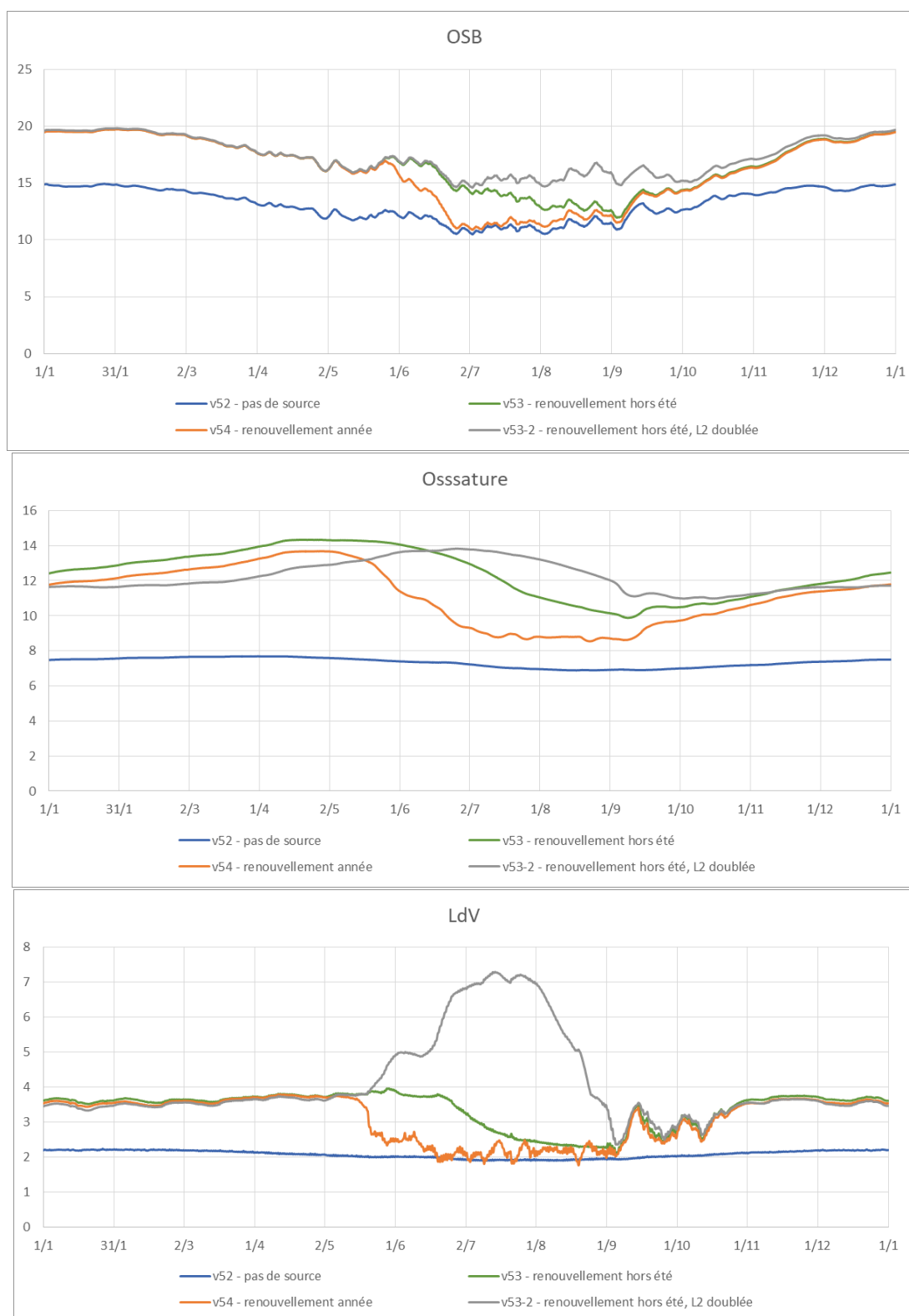


Figure 89 : Modèle par renouvellement d'air - Effet de l'épaisseur de la lame d'air

5.3.5.2 Calibration du modèle par infiltration

Le modèle par infiltration est choisi pour modéliser les apports d'humidité liés aux transferts d'air dans la paroi. On rappelle que deux cas seront distingués. Le premier correspond à la

situation où les transferts d'air dans la paroi sont liés uniquement à la perméabilité résiduelle : c'est le cas dans une situation où la membrane n'a aucun défaut ou juste des défauts récurrents. Le second correspond à la situation où les transferts sont liés à la perméabilité résiduelle et à un défaut accidentel.

Cette partie décrit l'adaptation du modèle d'infiltration à ces deux cas.

5.3.5.2.1 Hypothèses générales

Le bâtiment de référence est un pavillon français sur deux étages, de 100 m² de surface habitable par étage. Afin de faciliter les calculs, les dimensions des murs extérieurs sont considérées comme égales entre elles, et mesurent 10m par 5m de hauteur. La surface déperditive **hors plancher bas** est notée A_{RT} et vaut **310m²** (en tenant compte d'une faible inclinaison de paroi). La surface déperditive **plancher bas compris** est notée A_{tot} et vaut **410m²**.

En France, l'indicateur de perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment noté q_{4Pa} est le débit d'air sous 4Pa et réparti sur A_{RT} . C'est l'indicateur pris en compte dans la RT2012 et dont une mesure est exigée afin de valider le niveau de performance à l'étanchéité à l'air de l'enveloppe.

Enfin l'exposant de la loi d'écoulement est noté n et est supposé être égal à 2/3. Cela correspond à un coefficient d'écoulement à travers l'enveloppe du bâtiment et mêle différents types de régimes aérodynamiques.

5.3.5.2.2 Modèle WUFI de perméabilité résiduelle et lien avec q_{4Pa}

Pour évaluer le débit d'air lié aux fuites parasites (ou perméabilité résiduelle notée $q_{\Delta P}$) en fonction de la différence de pression ΔP à laquelle sont soumis les composants de la paroi, le logiciel WUFI utilise l'équation décrite dans [15] théorique suivant :

$$q_{\Delta P} = |\Delta P| \frac{q_{50Pa,comp}}{\Delta P_{50Pa}} \quad (1)$$

ΔP_{50} étant une différence de pression équivalente à 50Pa et $q_{50,comp}$ représente la part de la perméabilité à l'air globale du bâtiment s'infiltrant à l'intérieur des différents composants de la paroi simulée. On peut noter que l'exposant de la loi d'écoulement est égal à 1 dans cette relation ; le modèle fait alors l'hypothèse que l'écoulement dans les éléments de paroi courante est purement laminaire. Les auteurs de [15] prescrivent la relation suivante entre la perméabilité globale du bâtiment à 50Pa (q_{50Pa}) et $q_{50Pa,comp}$:

$$q_{50Pa,comp} = \frac{q_{50Pa}}{15} \quad (2)$$

Il faut comprendre ici que d'après cette référence, le débit de fuite parasite sous 50Pa, correspond à 1/15^{ème} du débit de fuite global.

Il s'agit maintenant d'établir la relation selon les hypothèses générales exposées précédemment entre le q_{50Pa} et q_{4Pa} . Le q_{50Pa} lui, se calcule avec toutes les surfaces (A_{tot}) et le q_{4Pa} est répartie seulement sur A_{RT} . On propose donc d'établir l'équivalence suivante entre les deux indicateurs :

$$q_{50Pa} = q_{4Pa} * \left(\frac{\Delta P_{50Pa}}{\Delta P_{4Pa}} \right)^n * \frac{A_{tot}}{A_{RT}} \quad (3)$$

Ainsi, pour différentes classes de valeurs de q_{4Pa} on déduit de (3), (2) et (1) les valeurs de perméabilité résiduelles estimées par le modèle d'infiltration de Wufi1D sur la Figure 90. Elle représente la perméabilité résiduelle ($q_{\Delta P}$) en fonction de ΔP et de la perméabilité globale choisie (q_{50Pa}). Les valeurs de q_{50Pa} sont indiquées sur la droite de la figure. A chaque ligne, on peut associer un q_{4Pa} (en légende) d'après (3).

Pour la ligne la plus épaisse de la figure, il faut noter que $q_{4Pa} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Il s'agit des conditions sans défaut accidentelle utilisées dans le cadre du projet HYGRO-PV.

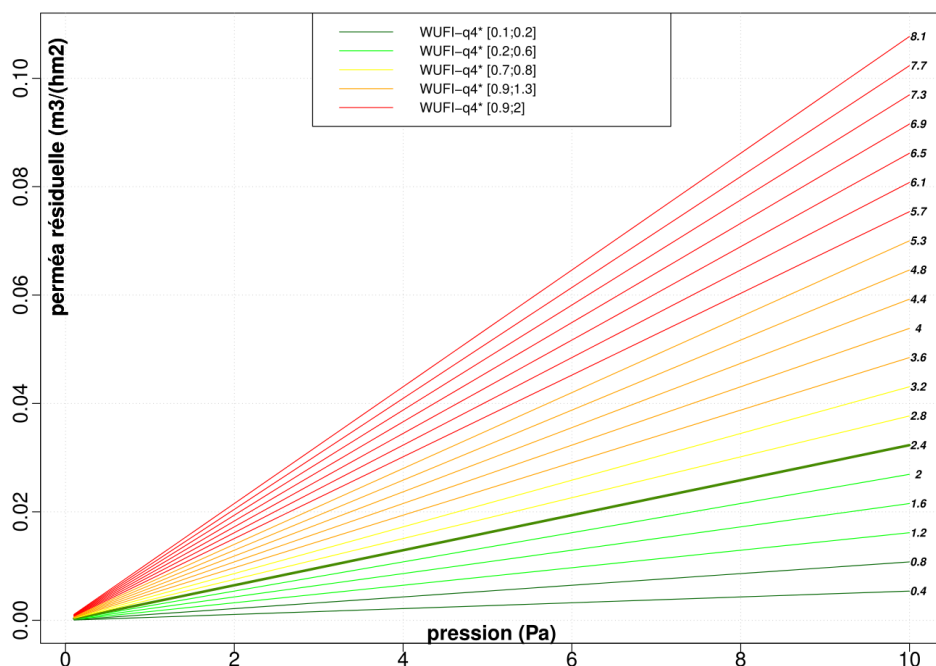


Figure 90 : Equivalence entre q_{50Pa} (entrée de Wufi1D) et q_{4Pa} pour le modèle d'infiltration de WUFI 1D

Il faut maintenant définir les valeurs à prendre en compte pour les cas où il y a des défauts accidentels.

5.3.5.2.3 Utilisation des mesures A*E*V* du projet ANR- MOBAIR

Dans le cadre du projet ANR-MOBAIR [14], le FCBA a mesuré l'influence de défauts impactant l'étanchéité à l'air d'une paroi à ossature bois. Une paroi de référence (sans défaut avec mise en œuvre soignée) a d'abord été analysée. Cette étude a comparé l'impact de plusieurs perturbations vis-à-vis de cette paroi de référence. La performance d'une paroi a été mesurée sur un banc A*E*V*. En général, ce banc mesure la performance de systèmes pour caractériser la perméabilité à l'air (A*), l'étanchéité à l'eau (E*) et résistance au vent (V*). Ici, la perméabilité à l'air seule a été mesurée.

Les essais ont permis de quantifier le débit de fuite supplémentaire dû à chaque défaut apporté. Les essais ont été réalisés selon la norme NF EN 12114 :2000 suivants des cycles de mise en pression et en dépression de la paroi testée. La paroi était en ossature bois (échantillon 2mx1m) dont la composition diffère un peu de celle définie dans le cadre du projet HYGRO-PV (couche d'isolant extérieure supplémentaire).

Les résultats exploités pour HYGRO-PV sont les perméabilités à l'air mesurées en pression/dépression avec le pare-pluie fermé et dans les conditions suivantes :

- Sans défaut ;
- Fente en croix de 5cm ;
- Recouvrement vertical du pare-vapeur sans adhésif (lés non recouverts).

La Figure 91 est un extrait des résultats obtenus (à noter, les points à 4Pa et 10Pa ont été extrapolés à partir des mesures des paliers de pression supérieures).

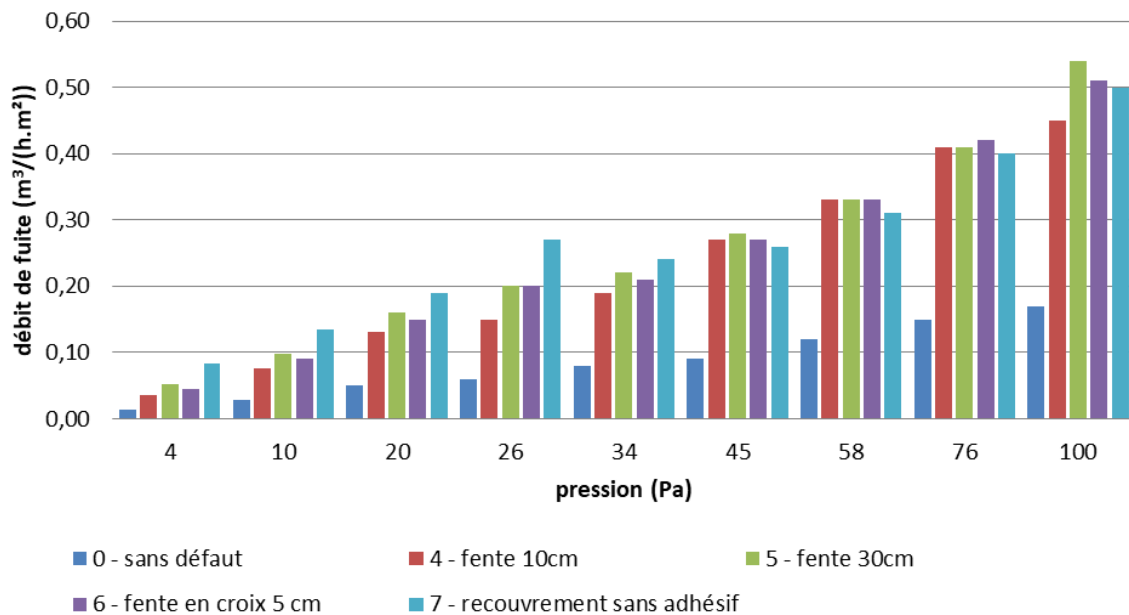


Figure 91 : Extrait des résultats de mesures en dépression et pare-pluie fermé (source: (MOBAIR 2016))

D'abord, pour chaque configuration et dans des conditions se rapprochant d'écoulement laminaire, on identifie par régression linéaire une loi débit/pression du type :

$$Q = b\Delta P$$

Avec Q le débit mesuré en m³/h et ΔP la différence de pression en Pa.

b est un paramètre à identifier à partir des mesures.

Les conditions d'écoulements laminaires ont le plus de chance d'être respectées dans le cas où les différences de pressions sont faibles. Pour identifier le paramètre b , on utilisera uniquement les mesures à 20Pa et 26Pa. On utilise la moyenne des mesures en surpression et en dépression.

Ensuite, il faut répartir cette loi [débit (traversant une paroi de 2m²) / pression], sur une surface de référence pour obtenir une perméabilité à l'air comparable à celles identifiées précédemment.

La surface d'échange de l'échantillon étant égale à 2m², on aura :

$$q_{\Delta P} = \frac{b\Delta P}{2} * \frac{A_{RT}}{A_{tot}}$$

Puis les lois obtenues sont représentées sur le graphique ci-dessous. La perméabilité sans défaut de la paroi testée est équivalente à un $q_{50Pa} = 1.4m³/(m².h)$. Elle est plus performante

que la perméabilité résiduelle sans défaut prise en compte dans le projet HygroPV ($2,4\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$).

La dégradation liée à l'entaille en croix conduit à un $q_{50Pa} = 4\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$ et celle liée aux lés non recouverts à un $q_{50Pa} = 4,6\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$.

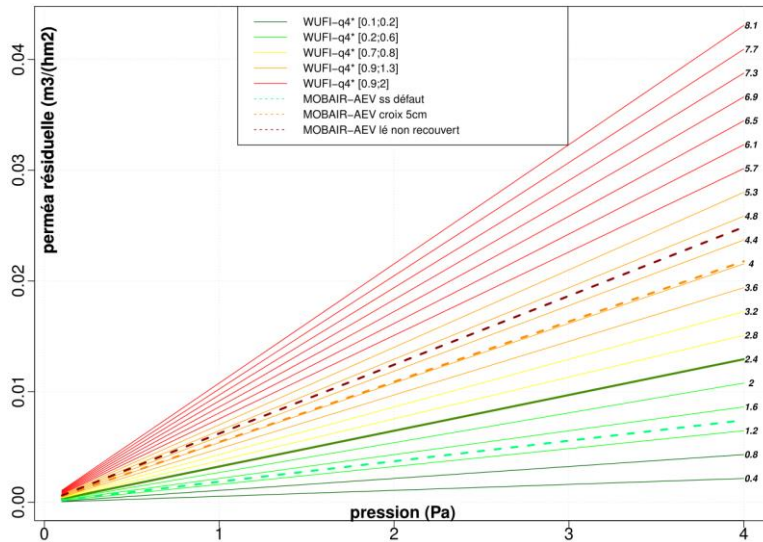


Figure 92 : Equivalence entre q_{50Pa} (entrée de Wufi1D) et q_{4Pa} pour le modèle d'infiltration de WUFI 1D – Positionnement des perméabilités mesurées dans MOBAIR

Pour prendre en compte dans les simulations la même amplitude de variation liée aux défauts d'étanchéité à l'air, on propose donc les valeurs suivantes de q_{50Pa} :

Tableau 17 : Définition de la perméabilité à l'air selon le type de défaut

Type de défaut	Origine de la source d'humidité	Valeur équivalente dans Wufi1D (q_{50})
A1-A3 ;B5-B10 ; D14-D16	Perméabilité résiduelle	$q_{50Pa} = 2.4\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$
C11-C13	Perméabilité résiduelle & apport supplémentaire lié au défaut (croix de 5cm)	$q_{50Pa} = 5\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$
G17-G19	Perméabilité résiduelle & apport supplémentaire lié au défaut (lés non recouvert)	$q_{50Pa} = 5.6\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$

5.3.6 Conclusion

Un travail de bibliographie et d'état de l'art a d'abord permis de décrire les différents modes de transports d'humidité à prendre en compte pour caractériser le comportement hygrothermique d'une paroi dans le bâtiment. Puis la notion de perturbation de membrane a été définie et les effets possibles de ces perturbations sur les modes de transports d'humidité ont été décrits. Enfin, ce travail préparatoire s'est conclu par la description des méthodes de prise en compte des apports d'humidité par convection dans le contexte de la simulation hygrothermique.

Ensuite, un travail de comparaison calcul/mesure a été réalisé. Cette tâche a traité en particulier les configurations mises en place lors des expérimentations à l'échelle paroi. S'agissant d'un travail collaboratif entre des équipes différentes, cette étape a d'abord permis de croiser et de valider les outils utilisés par chacune des équipes. Une étude de sensibilité des modèles aux paramètres a été menée et a mis en évidence certaines limites dans l'exercice de comparaison calcul/mesure de l'état hygrothermique d'une paroi. En particulier, l'incertitude des conditions initiales des produits de la paroi à forte « inertie hygrique », même dans les conditions expérimentales du projet (conditions stables dans le temps, durée de l'essai de plusieurs semaines) peuvent être très influentes sur les résultats de simulation. Un second point particulier est lié à la sensibilité des résultats à la position du point d'observation dans une paroi.

Puis, une démarche pour prendre en compte séparément les effets diffusifs et convectifs d'une entaille en simulation hygrothermique a été décrite. Pour valider cette démarche, il a été tenté de reproduire par le calcul les résultats observés expérimentalement en considérant les limites de l'exercice mis en évidence précédemment.

Pour ce qui est de l'effet diffusif, des écarts importants entre calcul et mesure ont été observés. Néanmoins, l'effet diffusif simulé était extrêmement localisé autour de l'entaille. Donc l'écart calcul/mesure est extrêmement sensible à la position des points d'observations et peut expliquer ces différences. Cette démarche a donc été retenue.

Pour ce qui est de l'effet convectif, l'interprétation des résultats expérimentaux a montré que de fortes interrogations subsistaient dans la compréhension des phénomènes physiques en jeu (en particulier lors des essais avec la mise en fonctionnement d'une porte soufflante). Ainsi, de fortes incertitudes demeurent sur les chemins réels de passage de l'air dans la paroi expérimentale ainsi que les débits d'air réels. Cela laisse donc beaucoup de liberté au modélisateur pour calibrer le modèle convectif par renouvellement d'air. Il a donc été possible de reproduire par le calcul les résultats expérimentaux en condition convective, mais sans pour autant pouvoir valider les hypothèses de modélisation. Ce travail n'a pas été suffisant pour valider cet aspect de la démarche.

Des simulations supplémentaires ont donc été réalisées afin de confronter le modèle de renouvellement au modèle d'infiltration. Des effets parasites liés au modèle par renouvellement d'air ont été mis en évidence sans avoir pu identifier de méthodes pour les compenser. Ainsi, le modèle par infiltration a été privilégié. Enfin, une méthode de calibration du modèle d'infiltration pour distinguer les cas avec ou sans défaut accidentel a été proposée. Elle se base sur des résultats expérimentaux obtenus lors du projet ANR MOBAIR. Cette démarche sera directement appliquée lors de la réalisation des 66 simulations de configurations sur le long terme.

5.4 Modélisation des cas d'études

Dans cette partie, les hypothèses de modélisation, la méthodologie de réalisation des simulations ainsi que l'ensemble des cas d'étude sont décrits. La démarche appliquée pourrait être reproduite à d'autres cas d'études.

5.4.1 Hypothèses de modélisation

Les hypothèses de modélisations faites lors des simulations concernent :

- **Conditions aux limites intérieures** : Elles sont identiques entre chaque simulation. Il s'agit principalement de la définition du climat intérieur. Elles sont calculées selon les recommandations du projet Pacte BDD Climat, dans les conditions du fichier météo de Nancy de la BDD Wufi ;
- **Conditions aux limites extérieures** : Il s'agit principalement de la définition du climat extérieur. Le fichier de données de climat extérieur utilisé est le fichier météo de Nancy de la BDD Wufi. Il s'agit d'un climat continental, favorable à l'apparition de point froid dans une paroi, ce qui peut induire un risque de condensation ;
- **Prise en compte de la perméabilité globale du bâtiment** : Indépendamment du défaut ; les modélisations tiennent compte d'un transfert d'air lié à la perméabilité à l'air résiduelle. Un passage d'air sera pris en compte à l'endroit le plus critique de la paroi. Le modèle d'infiltration est utilisé ;
- **Les propriétés de transfert des matériaux** : Les perméabilités à la vapeur de la laine de verre et de l'OSB mesurées lors de la tâche 2 sont utilisées pour réaliser les simulations. La perméabilité à la vapeur des membranes correspond à la valeur déclarée par le fabricant. Les autres propriétés de transfert des matériaux sont issues des bases de données matériaux du logiciel Wufi 2D.
- **Les propriétés de transfert des matériaux – Isolant hygroscopique** : Certains cas d'étude font appel à un isolant perméable hygroscopique (type biosourcé). D'autres simulations utilisent un isolant non hygroscopique. Une contrainte sur la conductivité sèche de l'isolant hygroscopique a donc été posée (0.04W/mK) de manière à faciliter la comparaison entre ces simulations. Les autres propriétés ont été définies selon la même méthode employée pour le projet Pacte OPERA¹, de manière à obtenir un matériau générique et représentatif de la connaissance actuelle du marché des isolants biosourcés.

Les effets des perturbations sont pris en compte de la manière suivante :

- **L'effet diffusif (perturbation récurrente ou accidentelle)** : le flux de vapeur occasionné par la perturbation de membrane est appliqué à une surface équivalente de cette perturbation (largeur d'un liteau par exemple) ;
- **L'effet convectif (perturbation accidentelle)** : la perturbation accidentelle vient en plus modifier le phénomène convectif. Dans ce cas, la perméabilité à l'air utilisée pour quantifier les apports convectifs est dégradée selon le Tableau 17.

¹ L'un des points clés est lié à la courbe de sorption et le seuil de développement fongique. Pour ce matériau générique, le seuil est situé au niveau du seuil moyen des matériaux biosourcés connus.

5.4.2 Méthodologie

La méthodologie de réalisation des simulations du projet HYGRO-PV est détaillée ici par étape. Elle commence par la définition de la géométrie et se termine par le calcul d'indicateurs de pathologies. Elle nécessite l'utilisation de deux outils de simulations de transferts hygrothermiques :

- WUFI® 2D : Pour la simulation des transferts bidimensionnels à l'échelle d'une paroi sur le long terme ;
- WUFI® Pro : Pour le calcul à l'aide du modèle d'infiltration, de la source à intégrer au modèle bidimensionnel.

5.4.2.1 Etape1 (WUFI® 2D) : Construction de la géométrie

Lors de la saisie d'une géométrie un point de vigilance est à porter sur **la saisie de la géométrie de la membrane pare vapeur. Elle doit tenir compte de toutes les perturbations possibles.** A cette étape, la géométrie de la membrane est décomposée selon les emplacements possibles des perturbations de la membrane comme sur l'exemple de la Figure 93.



Figure 93 : Schéma de la membrane modélisée en simulation hygrothermique pour tenir compte des effets diffusifs de l'entaille

Les dimensions indiquées dans le Tableau 18 sont issues de la Tâche 2 du projet. Même dans le cas où la simulation correspond à une situation sans défaut, il est largement souhaitable que ces emplacements soient pris en compte afin de ne pas modifier le maillage par rapport à une simulation avec prise en compte de défaut.

5.4.2.2 Etape2 (WUFI® 2D) : Attribution de matériaux

Pour l'attribution des matériaux, un point de vigilance est à porter sur **les matériaux des différents éléments de la membrane.** Chaque emplacement possible d'une perturbation étant modélisé, il faut donc leur attribuer la bonne valeur de résistance à la diffusion. **Ces valeurs sont indiquées dans le Tableau 18.** La tâche 2 du projet propose également une forme généralisée des perméabilités pour n'importe quelle membrane originelle. On pourra donc utiliser ces formes généralisées si besoin.

5.4.2.3 Etape3 (WUFI® 2D) : Application d'un maillage

Un maillage type « médium » couplé à un critère de convergence du résidu de 5.10^{-5} est utilisé (attention cette valeur peut dépendre de la version du logiciel utilisée). Une étude de l'influence du maillage et du critère de convergence a été réalisée dans le cadre du Projet Pacte OPERA. Elle a montré que pour des parois (simples comme celles du projet Pacte Hygro-PV) le gain de précision reste faible en comparaison au temps de calcul nécessaire et au volume du fichier de résultats finaux généré.

Tableau 18 : Caractéristiques des modèles des effets diffusifs

Type de perturbation (défaut associé)	Dimensions de la perturbation (Lxh) [mm]	Sd membrane originel [m]	μ avec perturbation	Sd perturbation [m] Avec défaut associé	
Agrafes seules (B5 - B7)	27x1	2	6.35	6.35E-03	B5
		20	9.41	9.41E-03	B6
		100	23.01	2.30E-02	B7
Agrafes avec pastilles (B8 - B10)	27x1	2	19.70	1.97E-02	B8
		20	39.30	3.93E-02	B9
		100	63.70	6.37E-02	B10
Clous et membrane prise entre deux liteaux (D14 - D16)	27x1	2	8.58	8.58E-03	D14
		20	21.54	2.15E-02	D15
		100	41.01	4.10E-02	D16
Entaille ou lés non jointoyé (C11 - C13 / G17 - G19)	1x1	2	6.00E-04	6.00E-07	C11 - C13 G17 - G19
		20			
		100			

5.4.2.4 Etape4 (WUFI® 2D) : Définition des conditions aux limites

La définition des conditions aux limites se fait en cohérence avec les hypothèses communes du projet (section 5.4.1).

5.4.2.5 Etape5 (WUFI® 2D) : Définition des conditions initiales

Les simulations s'effectuant sur une période de 10 ans avec un démarrage au premier janvier (type 01/01/201X). Les conditions initiales sont fixées à 20°C – 80%HR. Il est à noter que ces valeurs permettent une meilleure convergence de la simulation (valeurs courantes dans une paroi) mais n'ont que peu d'impact sur le résultat final étant donné que seule la dixième année est analysée.

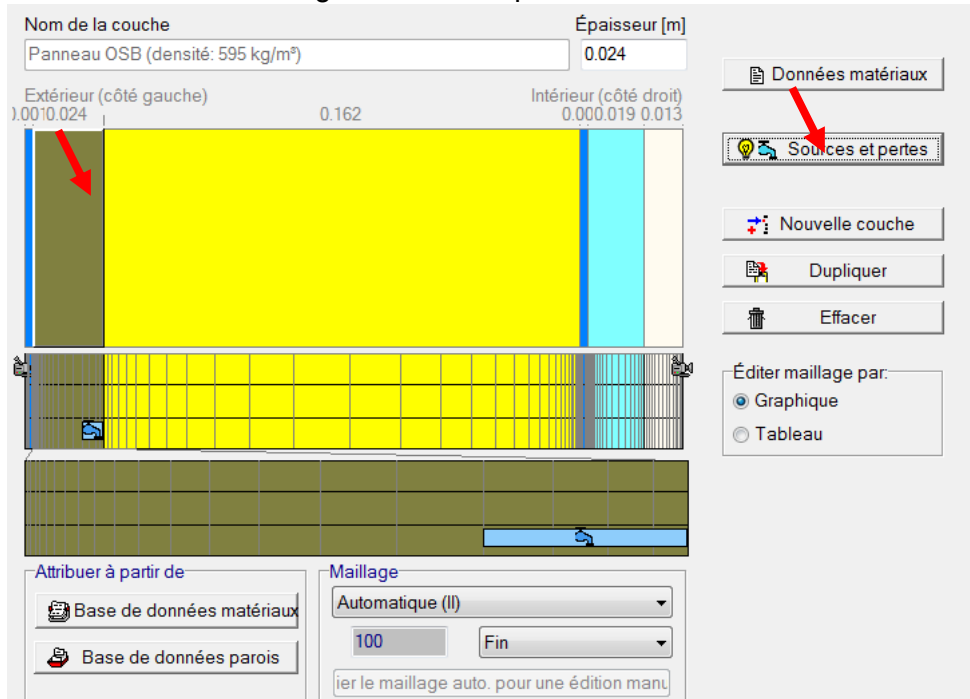
5.4.2.6 Etape6 (WUFI® Pro) Définition d'une source par le modèle d'infiltration

Dans le modèle WUFI® 2D une source d'humidité est à prendre en compte pour modéliser les apports d'humidité liés aux transferts d'air. **Le modèle par infiltration programmé dans WUFI® Pro est utilisé.** Le calcul de la source par le modèle infiltration se fait en deux temps :

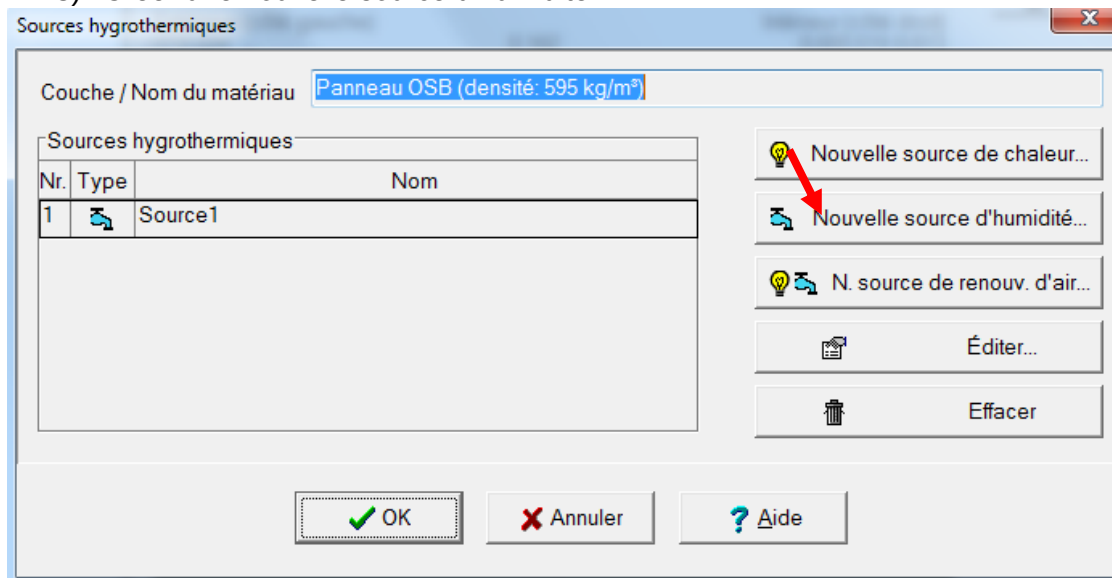
- D'abord, simulation sous WUFI® Pro d'un cas simplifié pour quantifier cette source ;
- Puis post traitement de la source simulée 1D pour l'adapter aux simulations 2D.

Pour réaliser ce calcul, la démarche suivante est adoptée :

- 1) Créer l'équivalent de la géométrie bidimensionnelle dans WUFI® Pro (partie courante).
- 2) Sélectionner le matériau qui se trouve à la première interface froide (ici l'OSB) puis sélectionner l'onglet sources et pertes



- 3) Créer une nouvelle source d'humidité



- 4) Maintenant, deux méthodes sont possibles :

Première méthode : Dans l'onglet surface affectée, sélectionner « plusieurs éléments » et définir le début et la fin de la zone choisie (qui doit être de 5mm). Attention, x=0 au DEBUT du matériau et non au début de l'assemblage.

Seconde méthode : Scinder le matériau qui recevra la source en deux, dont la partie la plus froide (en contact avec l'isolant) faisant 5mm. De ce fait, l'OSB mesurant initialement 24mm se trouve scindé en deux « OSB théoriques » de 19 et 5 mm.

5) Une fois la zone choisie, sélectionner « modèle d'infiltration d'air IBP » et veiller à ce que la limitation à la saturation capillaire soit bien cochée.
 Dans « infiltration par l'enveloppe q50 », choisir « défini par l'utilisateur » et indiquer un q50 selon le tableau ci-dessous (voir « 5.3.5.2 Calibration du modèle par infiltration », p96)

Tableau 19 : Perméabilité à l'air pris en compte selon le type de défaut

Type de défaut	Origine de la source d'humidité	Valeur équivalente dans WUFI® Pro (q50)
A1-A3 ; B5-B10 ; D14-D16	Perméabilité résiduelle	$q_{50Pa} = 2.4m^3/(m^2.h)$
C11-C13	Perméabilité résiduelle & apport supplémentaire lié au défaut (croix de 5cm)	$q_{50Pa} = 5m^3/(m^2.h)$
G17-G19	Perméabilité résiduelle & apport supplémentaire lié au défaut (lé non recouvert)	$q_{50Pa} = 5.6m^3/(m^2.h)$

Choisir une hauteur de colonne d'air interconnectée de 5m (équivalent d'une maison sur deux niveaux) et aucun ΔP du à la ventilation.

Source d'humidité

Nom: Source1

Surface affectée:

- ☐ Un seul élément
- ☒ Plusieurs éléments
- ☐ Toute la couche

Commencer dans la profondeur de la couche [m]: 0.019

Profondeur de fin dans la couche [m]: 0.024

Type de source:

- ☐ Variable (à partir d'un fichier)
- ☐ Fraction de la pluie battante
- ☒ Modèle d'infiltration d'air IBP
- ☐ Charge d'humidité mensuelle constante

Limiter le terme source [kg/m³]:

- ☐ Pas de limitation
- ☐ Limiter à la teneur en eau max.
- ☒ Limiter à la saturation capillaire
- ☐ Défini par l'utilisateur

Infiltration par l'enveloppe q50 [m³/m²h]: 2.44

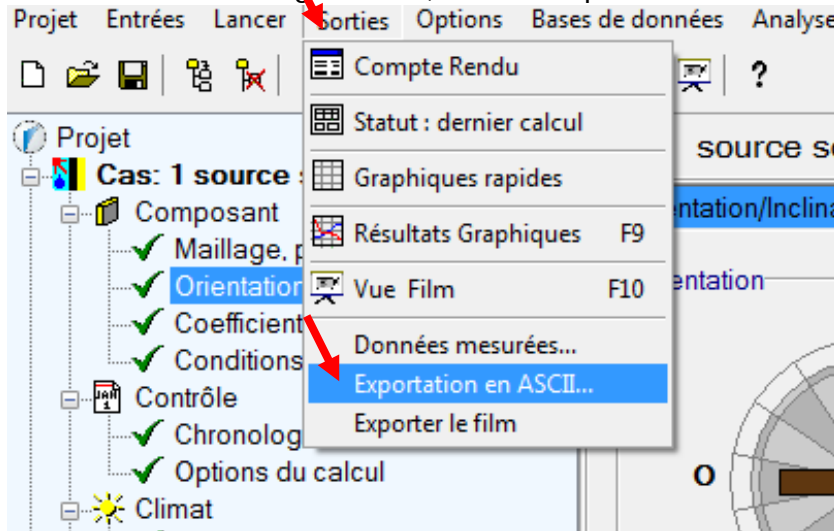
Défini par l'utilisateur

Hauteur de la colonne d'air [m]: 5

Surpression due à la ventilation mécanique [Pa]: 0

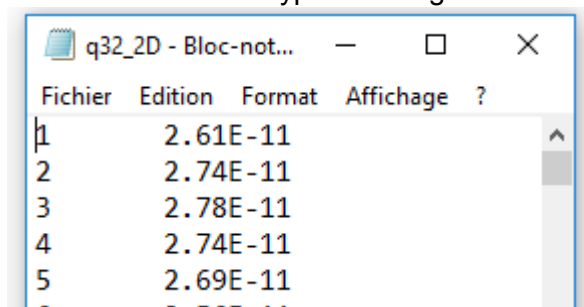
- 6) Prendre les mêmes conditions initiales que pour la simulation 2D et lancer la simulation sur 2 ans (attention le coefficient de transfert convectif est inversé entre 1D ($\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$) et 2D ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)).

- 7) Une fois la simulation terminée, aller dans l'onglet sortie > exportation en ASCII. Dans l'encart « variogramme », choisir uniquement « source d'humidité, nom de la source »



Voici maintenant l'étape de post traitement de la source

- 8) Importer le fichier de sortie dans un tableur et multiplier la colonne par l'épaisseur de l'emprise de la source dans WUFI® 2D, ici 0.005m. La sortie de la simulation 1D s'exprime en $\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$, il faut donc multiplier par cette épaisseur pour obtenir une variable homogène à des $\text{kg}/\text{m}.\text{s}$, qui est l'unité interprétée par WUFI® 2D.
- 9) Sélectionner la plage de la seconde année de données l'exporter de manière à obtenir un fichier du type .txt s'organisant selon la figure ci-dessous :



Pour éviter les erreurs d'interprétations du logiciel, vérifier que le séparateur décimal soit « . » et que le fichier ne comporte pas de ligne vide.

- 10) Il ne reste qu'à incorporer la source sur WUFI® 2D

5.4.2.7 Etape7 (WUFI® 2D) : Paramètres de calcul

Les paramètres numériques sont ceux définis par défaut. La précision reste moyenne (**critère de convergence de 5.10^{-5}**) et la dépendance de convergence reste faible (baisse de la tolérance du solveur numérique et évite d'implémenter les erreurs à chaque pas de temps).

5.4.2.8 Etape8 : Traitement des résultats

Après la réalisation des simulations, les emplacements de zones d'intérêts sont définis. **Pour des zones de petites dimensions (20mmx2mm par exemple), on choisit des zones d'une dimension plus importante de manière à retenir plusieurs mailles.**

Après export des résultats simulés au niveau de ces zones d'intérêts, on peut observer le comportement hygrothermique de la paroi et évaluer des indicateurs de pathologies liées à l'humidité.

Les indicateurs A et B se rapportent à des matériaux structurant la paroi. Ils sont définis dans le tableau ci-dessous.

Indic.	A	B
Description	Teneurs en eau dans les éléments porteurs de la paroi	Teneur en eau dans des éléments singuliers en bois
Carac.	Stabilisation de la teneur en eau dans le temps - Taux d'humidité maximal pour le mur existant	Accumulation d'humidité dans le bois
Emplacement	A1 : En partie courante moyenne sur un élément porteur (zone de capture sur l'ensemble d'un matériau) A2: Element de plusieurs mm au niveau d'un point singulier (exemple au droit de la perturbation dans une poutre de l'ossature)	B : Moyenne sur un élément de quelques centimètres du bois d'environ 20mmx2mm
Limites	L'augmentation de la teneur en eau moyenne sur l'ensemble d'un produit ne doit pas dépasser 2% lors de la dernière année de simulation. L'humidité relative moyenne d'un élément porteur doit être inférieure à 95% en moyenne sur 24h.	Pour les produits biosourcés utilisés comme éléments porteur la teneur en eau en masse ne doit pas être supérieure à 20% en masse pendant plus de 8 semaines la dernière année de simulation. Les périodes au-delà de 20% en masse inférieures à une semaine ne sont pas comptabilisées. La teneur en eau des produits biosourcés porteur ne doit pas dépasser 30% en masse même ponctuellement lors de la dernière année de simulation.

Les indicateurs C et D se rapportent à des isolants thermiques de la paroi. Ils sont définis dans le tableau ci-dessous.

Indic.	C	D
Description	Dégradation thermique et teneur en eau dans l'isolant	Condensation interne et développement fongique dans l'isolant
Carac.	Humidification de l'isolant et perte de résistance thermique	Développement fongique potentiel ou condensation aux interfaces et aux environs de points singuliers liés à la présence d'humidité
Emplacement	C : Moyenne sur l'isolant (zone de capture sur l'ensemble de l'isolant)	D1 : Interfaces (sur toute la longueur de l'interface) – Moyenne sur une épaisseur de qq millimètres de l'isolant coté mur existant /Moyenne sur une épaisseur de qq millimètres de l'isolant coté membrane D2 : Points singuliers – Elements de l'isolant d'environ 2mmx20mm se situant au droit des perturbations de membranes et à chaque interface.
Limites	Lors de la dernière année de simulations la conductivité thermique moyenne maximale sur une période de 24h doit être inférieure à $1,05 \cdot \lambda \cdot \text{sec}$	Pour les isolants biosourcés la teneur en eau en masse ne doit pas être supérieure à 23% en masse pendant plus de 8 semaines la dernière année de simulation. Les périodes au-delà de 23% en masse inférieures à une semaine ne sont pas comptabilisées. La teneur en eau des produits isolants biosourcés ne doit pas dépasser 30% en masse même ponctuellement lors de la dernière année de simulation. Les isolants non-biosourcés doivent maintenir $HR < 98\%$ sur des durées supérieures à 6h.

Ces indicateurs permettent d'apprécier la viabilité thermique, hydrique, sanitaire et mécanique en tout point d'une paroi afin d'éviter tout désordre dans le temps.

5.4.3 Présentation des cas d'étude modélisés

5.4.3.1 Plan de simulation

La méthodologie a été appliquée à 66 cas d'études dont la description complète figure dans le plan de simulations. Elles sont réparties entre 4 configurations différentes :

- Comble aménagé ;
- Paroi lourde ;
- Comble non-aménagé ;
- Paroi légère.

5.4.3.2 Configuration isolation comble aménagé

La géométrie de la paroi correspondant à l'isolation du comble aménagé est représentée sur la Figure 94. L'emplacement des perturbations de membranes est également indiqué.

Comme proposé dans le cadre du projet Pacte BDD Climat, un modèle simplifié de la lame d'air ventilée sous couverture est utilisé. La géométrie de la lame d'air et de la couverture n'est pas modélisée. Leurs effets (convectif et par rayonnement) sont intégrés dans le coefficient de transfert convectif équivalent. L'orientation de la paroi n'a pas d'impact car les transferts par rayonnement sont pris en compte à travers le coefficient convectif équivalent. Enfin, la pluie battante n'est pas prise en compte car elle n'entre pas en contact directement avec le modèle de la paroi.

Le coefficient de transfert intérieur est défini selon les règles de calcul Th-BCE. Dans ce cas, on peut établir qu'en période de chauffe, un flux thermique ascendant passe à travers une paroi horizontale donnant sur l'extérieur. Les règles de calcul préconisent la valeur ainsi indiquée dans le tableau.

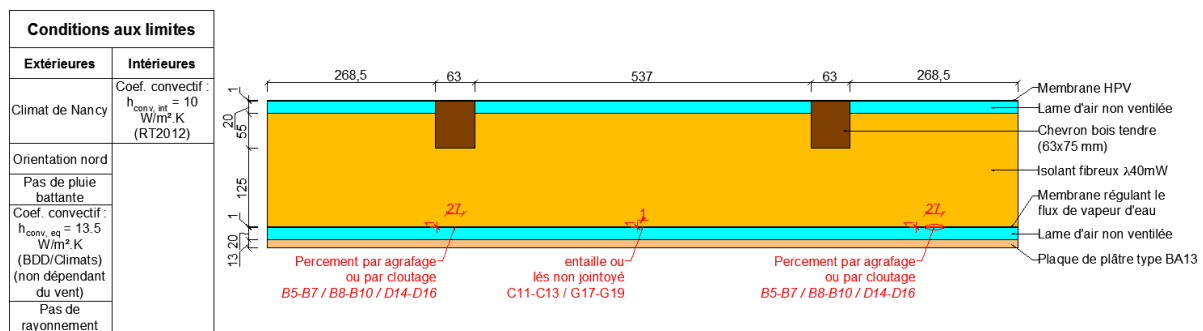


Figure 94: Géométrie et conditions aux limites choisies pour la simulation de l'isolation du comble aménagé

5.4.3.3 Configuration paroi lourde

La géométrie de la paroi correspondant à la paroi lourde simulée est représentée sur la Figure 95. L'emplacement des perturbations de membranes est également indiqué.

Le coefficient de transfert convectif extérieur choisi est cohérent avec les règles de calcul Th-BCE. Il est dépendant de la vitesse du vent. L'orientation au Nord est choisie afin de limiter les apports solaires et ne pas favoriser le phénomène de séchage. Les coefficients de transfert de rayonnement correspondent à un revêtement extérieur de couleur clair. La pluie battante est aussi prise en compte.

Enfin, le coefficient de transfert intérieur est défini selon les règles de calcul Th-BCE.

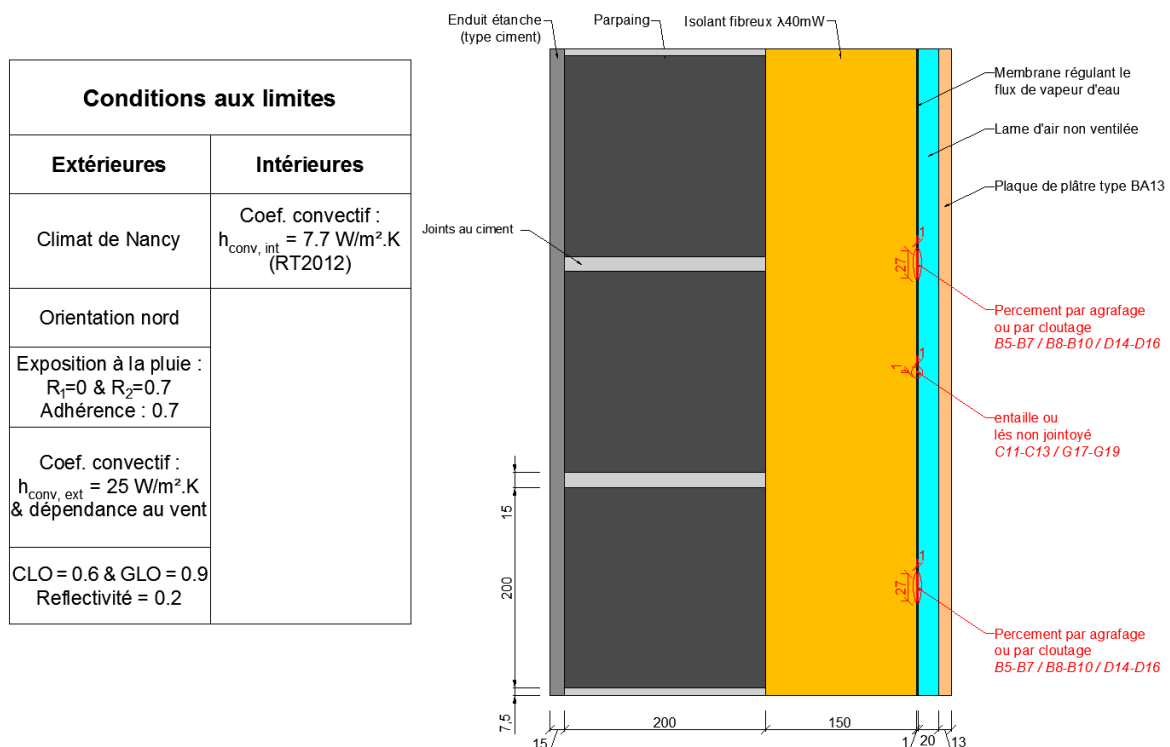


Figure 95: Géométrie et conditions aux limites choisies pour la simulation de la paroi lourde

5.4.3.4 Configuration isolation sous comble non-aménagé

La géométrie de la paroi correspondant à l'isolation sous-comble non-aménagé est représentée sur la Figure 96. L'emplacement des perturbations de membrane est également indiqué.

Le coefficient de transfert convectif extérieur choisi est cohérent avec les règles de calcul Th-BCE. En période de chauffe, le flux thermique ascendant passe à travers une paroi horizontale donnant sur un espace tampon non chauffé, d'où la valeur choisie. Le rayonnement solaire ainsi que la pluie battante ne sont pas pris en compte car ils n'affectent pas directement le comportement de la paroi.

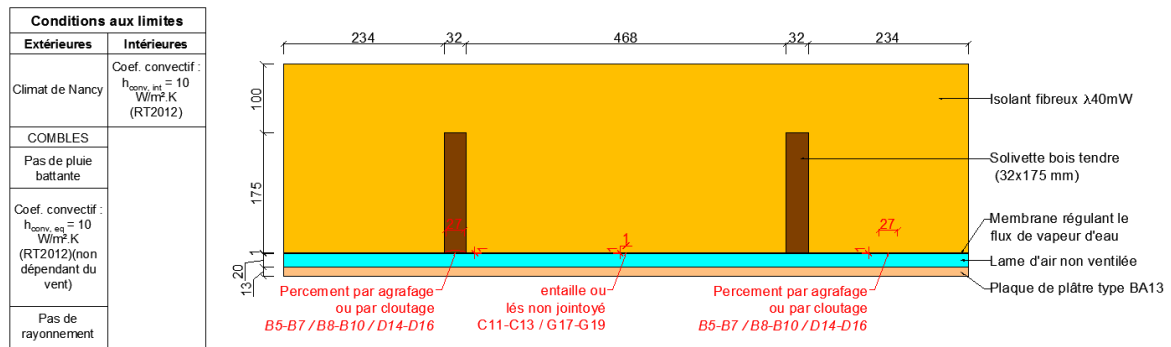


Figure 96: Géométrie et conditions aux limites choisies pour l'isolation sous comble non-aménagé

Les données de climat extérieur ont été simulées à partir d'un modèle de comble construit par le CSTB. Ce modèle a été sollicité dans les conditions du fichier de climat de Nancy pour construire le fichier de conditions aux limites extérieures de cette configuration. Ces données au pas de temps horaire sont représentées sur la Figure 97.

Enfin, le coefficient de transfert intérieur est défini selon les règles de calcul Th-BCE.

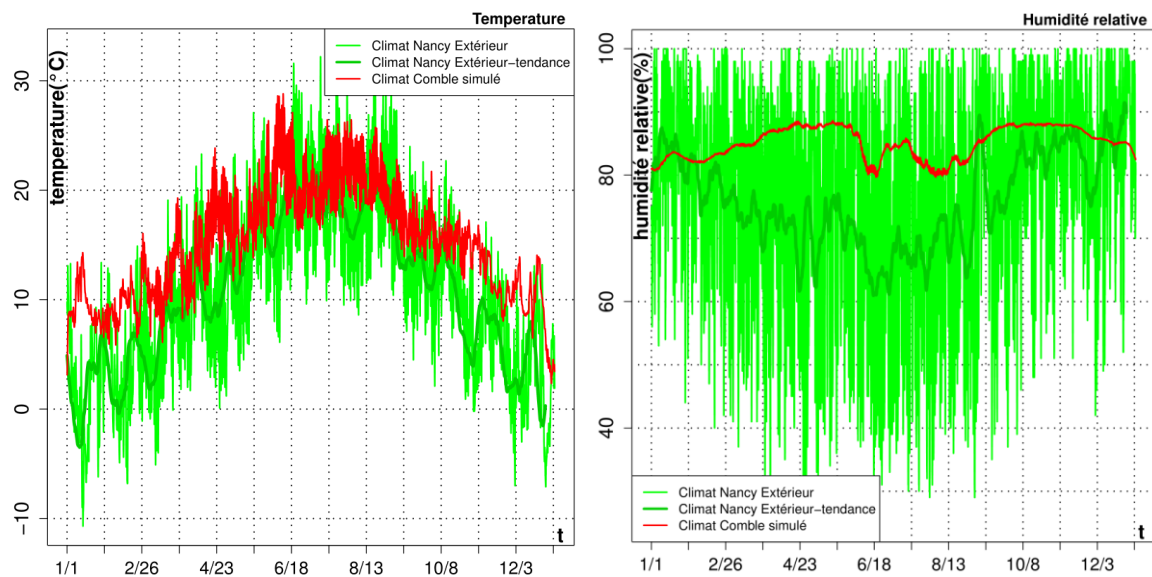


Figure 97 : Climat du fichier de Nancy et Climat du comble perdu

5.4.3.5 Configuration paroi légère

La géométrie de la paroi correspondant à la paroi légère verticale est représentée sur la Figure 98. L'emplacement des perturbations de membranes est également indiqué.

Comme proposé dans le cadre du projet Pacte BDD Climat, un modèle simplifié de lame d'air ventilée de bardage est utilisé. La géométrie de la lame d'air et du bardage n'est pas modélisée. Leurs effets (convectif et par rayonnement) sont intégrés dans le coefficient de transfert convectif extérieur. L'orientation de la paroi n'a pas d'impact car les transferts par rayonnement sont pris en compte dans le coefficient convectif. Enfin, la pluie battante n'est pas prise en compte car elle n'entre pas en contact directement avec la paroi modélisée.

Enfin, le coefficient de transfert intérieur est défini selon les règles de calcul Th-BCE.

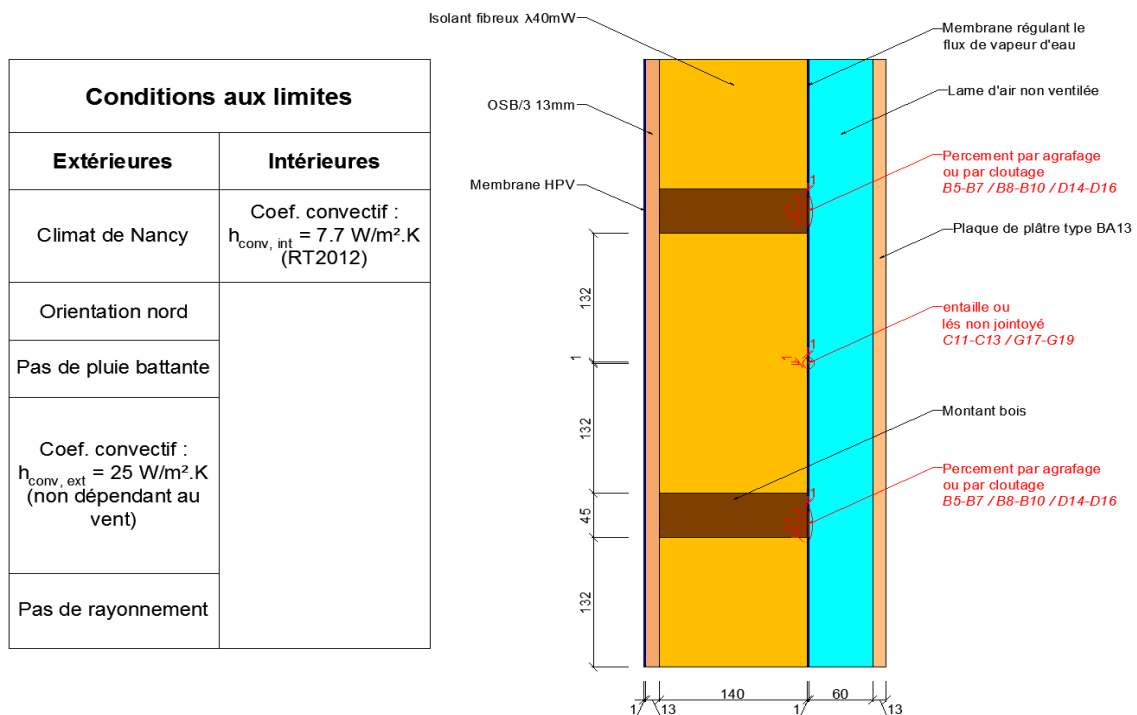


Figure 98: Géométrie et conditions aux limites choisies pour la paroi légère verticale

5.5 Analyse des résultats

5.5.1 Configuration isolation sous rampant

Les simulations réalisées pour la configuration isolation sous rampant sont décrites dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Simulations configuration isolation sous rampant

		Matériaux					Type de défaut							q50
		Membrane (Sd en m)			Isolant									
#	Desc.	2	20	100	Non HYGRO	HYGRO	A1 A3	B5 B7	B8 B10	C11 C13	D14 D16	G17 G19	m³/h.m²	
1	Etude du comportement isolation sous rampant		x		x		x						0	
2		x			x		x						2.4	
3			x		x		x						2.4	
4				x	x		x						2.4	
5		x			x			x					2.4	
6			x		x			x					2.4	
7				x	x			x					2.4	
8			x		x				x				2.4	
9			x		x					x			5	
10			x		x						x		2.4	
11				x	x						x		2.4	
12			x		x							x	5.6	

Les résultats des simulations de comportement hygrothermique de la configuration en combles aménagés (isolation sous rampant) ont été extraits à différentes positions de la paroi comme indiqué sur la Figure 99. Les zones concernées par les indicateurs sont :

- Indicateur A : au niveau des chevrons et de l'isolant, au droit des percements ;
- Indicateur B : analysé à différents endroits du chevron ;
- Indicateur C : cet indicateur reprend l'intégralité de l'isolant ;
- Indicateur D1 : les zones analysées se situent aux périphéries de l'isolant ;
- Indicateur D2 : l'analyse se porte au droit des percements, à la fois directement en contact avec la membrane et de l'autre côté de l'isolant, en contact avec la lame d'air.

Ces résultats sont utilisés pour calculer les indicateurs de pathologies et analyser les différences de comportement hygrothermique entre chaque simulation.

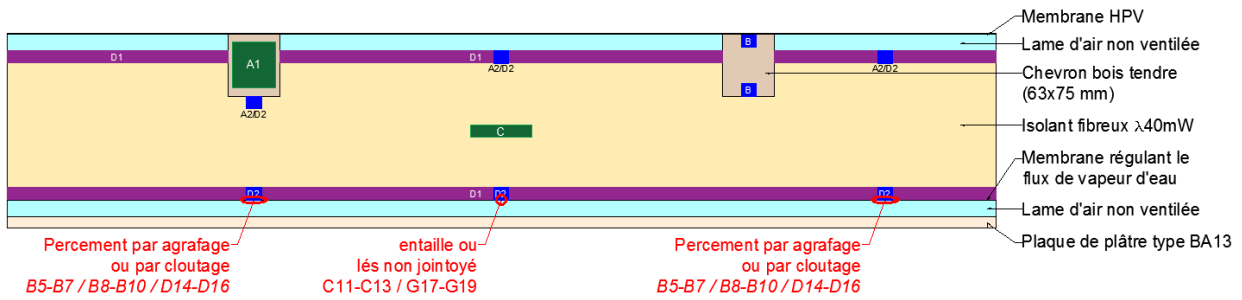


Figure 99 : Sous rampant - Position des points d'observations pour le calcul des indicateurs

5.5.1.1 Les résultats

Dans la Figure 100, nous observons la distribution de la teneur en eau du chevron la dernière année de simulation via un diagramme de Tukey (représentation synthétique des résultats) et un diagramme représentant l'évolution de la teneur en eau dans le temps.

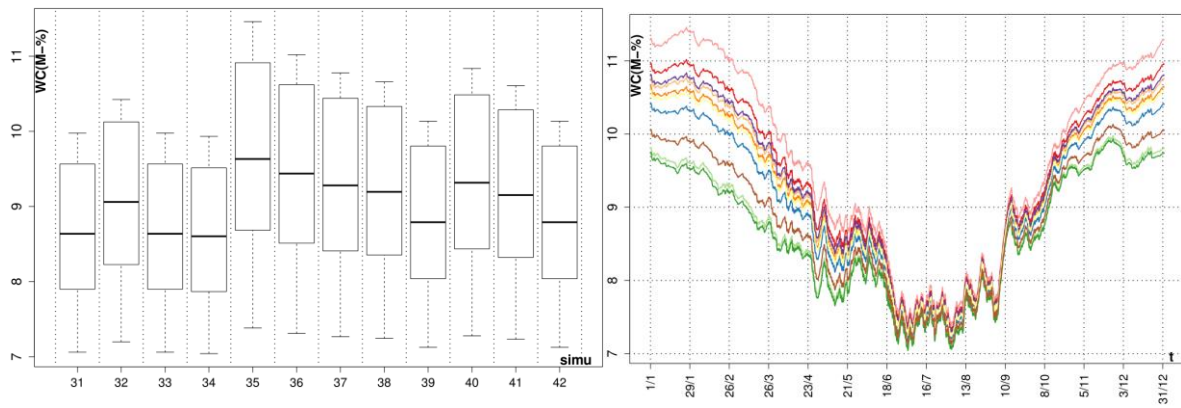


Figure 100 : Teneur en eau dans le chevron en bois

La Figure 101 permet d'observer l'évolution de la teneur en eau dans l'isolant lors de la dernière année de simulation, de la même manière que pour le chevron.

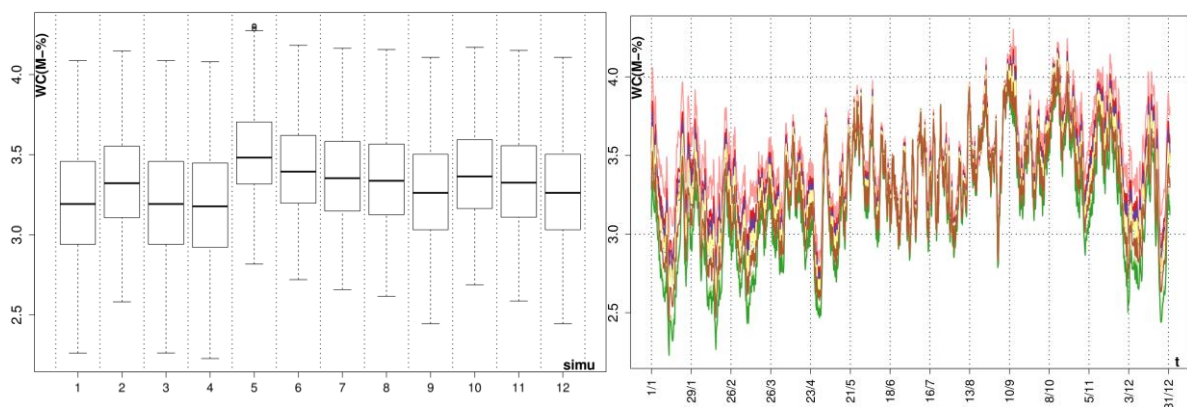


Figure 101 : Teneur en eau dans l'isolant

En toute logique, le pic de teneur en eau dans la paroi se trouve pendant la période hivernale, avec un important séchage durant la période estivale (environ 20kg/m³ entre les deux saisons, soit une variation de plus ou moins 25%).

5.5.1.2 Les indicateurs

Indicateurs A

L'indicateur A est analysé dans le chevron et dans l'isolant, à l'interface avec la lame d'air et au droit de la singularité.

Dans les 12 simulations réalisées sur la paroi sous-rampant, aucune d'entre elles n'a atteint l'équilibre hygrothermique lors de la dixième année de simulation, avec une augmentation moyenne de la teneur en eau de 1.54% dans le chevron étudié (un minimum de +1.45% pour le cas 1 et +1.68% d'augmentation pour le cas 5).

La paroi ne semble néanmoins pas être le siège d'apparition d'eau liquide. L'humidité relative la plus élevée sur l'ensemble des simulations est située dans l'isolant au droit du percement, avec une humidité relative maximale de 92.7% pour le cas 5.

Nous pouvons alors remarquer qu'une membrane pare vapeur possédant un $S_d=2m$ et un faible défaut de mise en œuvre (agrafes nues, faible perméabilité résiduelle) présente le plus de risque dans le cas étudié.

Indicateurs B

L'indicateur B permet d'analyser les éléments structurels en bois dans la paroi, et notamment sur un aspect mécanique (dégradation de sa résistance mécanique) et fongique (possible émission de spores).

Dans le cas de la paroi sous-rampant, un seul élément en bois est présent dans la simulation, à savoir le chevron. Dans les 12 cas simulés, les résultats montrent que les différents défauts dans la paroi n'entraînent pas de risques pour le chevron, qui voit constamment sa teneur en eau en masse inférieure à 20%M, avec un maximum relevé à 11.68%M pour le cas 5 ($S_d=2m$).

Dans tous les cas, la teneur en eau moyenne dans le chevron se situe aux alentours de 11.5%M.

Indicateurs C

L'indicateur C permet de renseigner une potentielle diminution de la performance thermique de l'isolant lorsque ce dernier se charge en humidité. La baisse de la performance thermique ne doit pas être supérieure à 5% de sa conductivité thermique sèche dans la totalité de l'isolant.

Pour la configuration sous rampant, l'isolant non hygroscopique ne se charge que faiblement en humidité : sa teneur en eau volumique n'excède jamais $0.6kg/m^3$. A savoir que pour dépasser la limite de 5% supplémentaire sur la conductivité thermique, il est nécessaire d'avoir une teneur en eau dans l'isolant supérieure à $35kg/m^3$.

Indicateurs D

L'indicateur D est aussi concentré sur l'isolant mais il permet d'étudier d'autres caractéristiques, tel que le développement fongique ou l'apparition d'eau liquide.

Pour l'indicateur D1, toute la longueur de l'isolant est investiguée sur quelques mm de largeur, que ce soit à l'interface avec l'intérieur ou avec l'extérieur (aussi appelée « interface froide »). L'analyse se porte ensuite sur six zones pour l'indicateur D2 au droit de la perturbation de la membrane, que ce soit à son interface directe ou au droit du percement du « côté froid ».

Etant donné que cette paroi n'a été testée qu'avec une laine minérale non hygroscopique, le seul focus sera au niveau de l'humidité relative, qui ne doit pas dépasser 98%HR sur une période supérieure à 6h (afin d'éviter un éventuel défaut de convergence du logiciel).

Dans le cas de l'indicateur D1, aucun risque hygrothermique ne semble apparaître aux deux interfaces de l'isolant. L'humidité relative moyenne dans l'isolant est 86.8%HR au niveau de l'interface froide. La valeur maximale enregistrée est 90.5%HR pour le cas 5.

Les résultats de l'indicateur D2 ne sont pas vraiment différents. L'humidité relative reste perpétuellement contenue en dessous de 98%HR. La zone la plus froide reste aussi la plus humide, avec une humidité relative moyenne de 88.8%HR dans les zones en contact avec la lame d'air et une valeur maximale relevée à 92.8HR% pour le cas 5.

5.5.1.3 Les observations

Le pare vapeur

La différence de résistance à la diffusion de vapeur d'eau de la membrane pare-vapeur possède un fort impact sur la teneur en eau du système étudié. Ici, plus le pare-vapeur possède un S_d faible, plus la teneur en eau de la paroi sera élevée.

A partir d'une valeur S_d plus élevée, la différence ne s'en fait que peu ressentir. Ainsi, les teneurs en eau des membranes à $S_d=20m$ et $S_d=100m$ est proche.

La Figure 102 illustre ces propos à travers la teneur en eau dans le chevron pour des cas sans perturbation du facteur μ de la membrane et avec une perméabilité résiduelle $q_{50}=2.4m^3.m^{-2}.h^{-1}$.

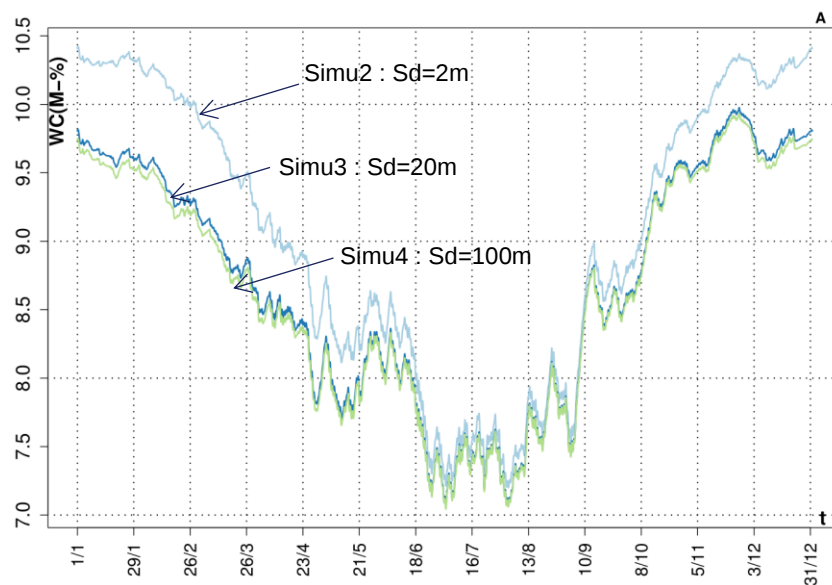


Figure 102 : Teneur en eau dans le chevron - Impact du pare-vapeur choisi

Les perturbations

Nous pouvons distinguer trois types de perturbations :

- L'absence de perturbation (Simu 3) ;
- Les perturbations récurrentes (agrafage et cloutage, Simu 6, 8 & 10) ;
- Les perturbations accidentelles (entaille ou lés non jointoyées, Simu 9 & 12).

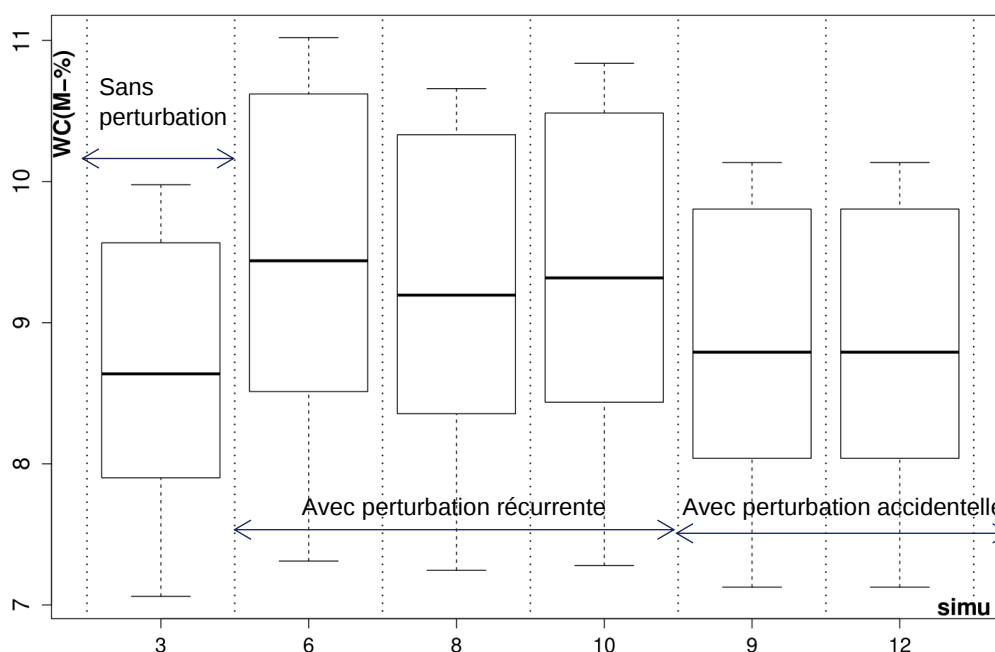


Figure 103 : Teneur en eau dans le chevron - Effets des perturbations

Dans le cas d'une paroi sous rampant, la perturbation récurrente entraîne une augmentation de la teneur en eau allant jusqu'à 9.5 kg/m^3 en période hivernale, comme le montre la Figure 103. Pour les cas ayant une perturbation accidentelle, nous observons une influence finalement négligeable, malgré la très forte perméabilité à la vapeur d'eau qui est associée à ce type de défaut. Ainsi, les deux cas (9 & 12) ne sont au final que légèrement plus humide que le cas de référence, sans perturbation.

Les apports convectifs

Ici, on observe la teneur en eau dans le chevron avec différentes perméabilités à l'air résiduelles. Sont alors représentés dans la Figure 104 cas avec:

- Une perméabilité nulle (cas théorique idéal, sans perméabilité résiduelle, $q_{50}=0.0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) ;
- Une perméabilité résiduelle (correspondant aux fuites inévitables, tel que la perméabilité résiduelle $q_{50}=2.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) ;
- Une perméabilité résiduelle amplifiée par une perturbation accidentelle de membrane ($q_{50}=5$ à $5.6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ selon le type de perturbation).

En analysant cette figure, nous pouvons remarquer que la teneur en eau dans le chevron du cas 3 (avec une perméabilité à l'air résiduelle de $2.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) est très proche du cas 1, qui lui est considéré comme parfait. Ces résultats peuvent aussi se retranscrire entre les cas 9 & 12 qui ont une teneur en eau quasiment identique.

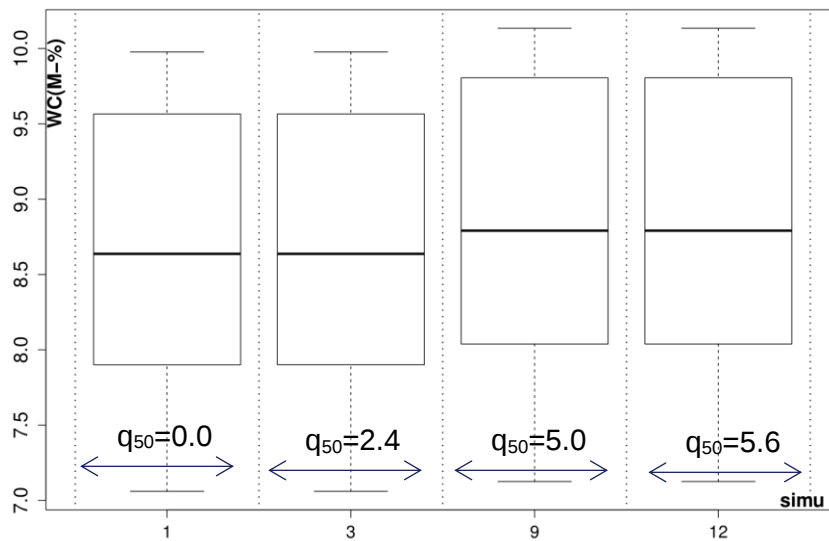


Figure 104 : Teneur en eau dans le chevron – Effets des apports convectifs

Nous pouvons toutefois noter que la teneur en eau des deux derniers cas est légèrement supérieure aux deux précédents cas, mais cet impact reste faible, et il peut être aussi bien être dû à l'irrégularité dans la membrane, qu'à la perméabilité à l'air résiduelle du système.

Synthèse

Dans le cadre de la paroi sous rampant, aucun risque de pathologie ne se trouve avéré, malgré une faible augmentation de la teneur en eau recensée sur les douze cas lors de la dernière année de simulation. Sur tous les résultats obtenus, les premières conclusions montrent qu'une membrane pare-vapeur ayant un $S_d=2m$ semble la moins adaptée à cet assemblage, entraînant alors les teneurs en eau les plus importantes.

Les perturbations dans la membrane montrent un faible impact sur la teneur en eau des résultats, avec une augmentation plus importante pour les cas avec perturbation récurrente. Les simulations comprenant une perturbation accidentelle n'ont au final qu'un impact très faible, augmentant la teneur en eau de seulement quelques kg/m^3 durant la période hivernale.

Les apports convectifs liés aux percements des membranes pare-vapeur ne montrent pour le système qu'un faible impact sur la teneur en eau du système, qui peut alors être induite par la baisse de la perméabilité à la vapeur de la membrane.

5.5.2 Configuration Paroi lourde

Les simulations réalisées pour la configuration paroi lourde sont décrites dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Simulations de la configuration paroi lourde

		Matériaux					Type de défaut							q50
		Membrane (Sd en m)			Isolant									
#	Desc.	2	20	100	Non HYGRO	HYGRO	A1 A3	B5 B7	B8 B10	C11 C13	D14 D16	G17 G19	m³/h.m²	
13	Etude du comportement de la paroi lourde		x		x		x						0	
14		x			x		x						2.4	
15			x		x		x						2.4	
16				x	x		x						2.4	
17		x			x			x					2.4	
18			x		x			x					2.4	
19				x	x			x					2.4	
20			x		x				x				2.4	
21			x		x					x			5	
22			x		x						x		2.4	
23				x	x						x		2.4	
24			x		x							x	5.6	
25	Impact de l'isolant paroi lourde		x			x	x						2.4	
26				x		x	x						2.4	
27			x			x		x					2.4	
28				x		x		x					2.4	
29			x			x					x		2.4	
30			x				x					x	5.6	

Les résultats des simulations de comportement hygrothermique de la configuration en paroi lourde (isolation sur parpaing) ont été extraits à différentes positions de la paroi comme indiqué sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Les zones concernées par les indicateurs sont :

- Indicateur A : au niveau des joints et du parpaing central, au droit des percements ;
- Indicateur B : absent dans la typologie lourde ;
- Indicateur C : cet indicateur reprend l'intégralité de l'isolant ;
- Indicateur D1 : les zones analysées se situent aux périphéries de l'isolant ;
- Indicateur D2 : l'analyse se porte au droit des percements, à la fois directement en contact avec la membrane et de l'autre côté de l'isolant, en contact avec les joints et le parpaing central.

Ces résultats sont utilisés pour calculer les indicateurs de pathologies et analyser les différences de comportement hygrothermique entre chaque simulation.

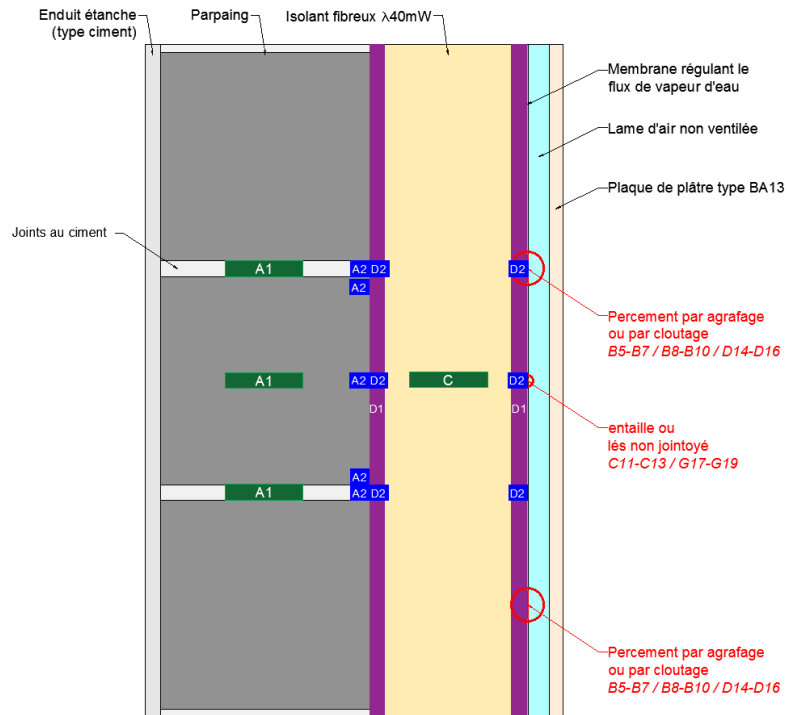


Figure 105 : Paroi lourde - Position des points d'observations pour le calcul des indicateurs

5.5.2.1 Les résultats

Afin d'observer le comportement hygrothermique de la paroi, la teneur en eau d'un joint, d'un parpaing et de l'isolant sont analysés et représentés en Figure 106, Figure 107 et Figure 108.

La teneur en eau maximale du système est observée durant le mois de février, avec un faible décalage temporel entre les configurations avec un isolant non hygroscopique et hygroscopique (une semaine plus tard pour l'isolant hygroscopique).

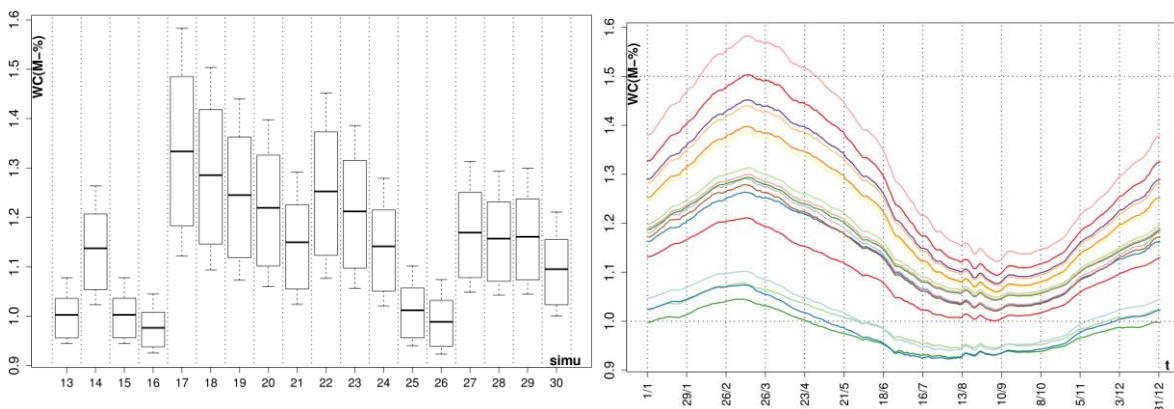


Figure 106 : teneur en eau dans le parpaing

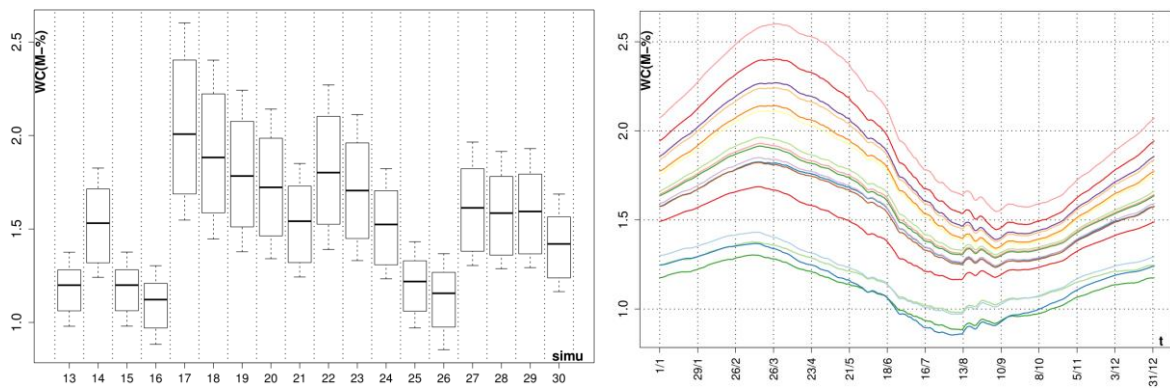


Figure 107 : teneur en eau dans le joint (1)

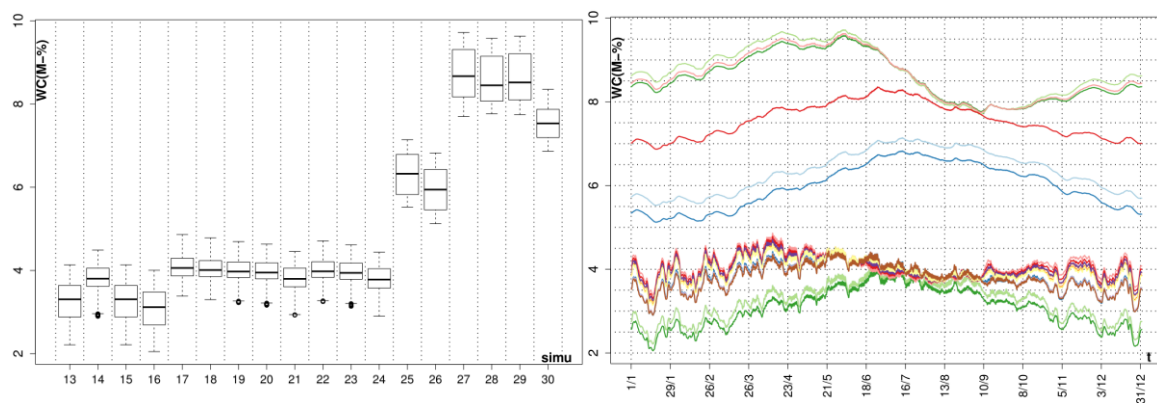


Figure 108 : Teneur en eau dans l'isolant

5.5.2.2 Les indicateurs

Indicateurs A

L'analyse concernant l'indicateur A est concentrée sur le joint en partie supérieure et sur le parpaing central.

Pour tous les cas testés, qu'ils soient avec isolant non hygroscopique ou bien hygroscopique, la teneur en eau se montre stable lors de la dixième année de simulation, avec une stabilisation au cours de la sixième année.

L'humidité relative dans les éléments porteurs – à savoir les joints cimentés et le parpaing – est constamment en dessous de 95%HR, même de façon ponctuelle.

Le cas simulé ayant la plus forte augmentation est le cas 16 (Sd=100m, sans perturbation), avec une augmentation de 0.36% entre la 9^{ème} et la 10^{ème} année. Néanmoins, cette (faible) augmentation est à nuancer avec la teneur en eau de tous les composants de la paroi, qui reste inférieure à la teneur en eau de tous les autres cas.

Indicateurs C

Dans le cas de dégradation de la performance thermique de l'isolant, nous observons l'évolution de la teneur en eau de ce dernier lors de la dernière année, en vérifiant que sa conductivité thermique ne se dégrade pas.

Pour la paroi lourde, aucun risque ne semble apparaître avec un isolant non hygroscopique. La teneur en eau maximale relevée est de 0.73kg/m³ la dernière année, avec une moyenne

située aux environ de 0.67kg/m^3 . Cette teneur en eau est bien inférieure à la limite admissible pour une quelconque baisse de la performance thermique.

Dans le cas d'un isolant hygroscopique, la teneur en eau est bien évidemment supérieure (due aux propriétés permettant de conserver de l'eau dans la structure du matériau) mais reste là encore contenue, avec un maximum à 4.7kg/m^3 et une moyenne avoisinant les 4.15kg/m^3 .

Indicateurs D

L'indicateur D est analysé sur deux niveaux dans l'isolant : le premier, l'indicateur D1, sera axé sur les interfaces, permettant de savoir si une accumulation d'eau se fait tout le long de la paroi et l'indicateur D2, qui traite de points singuliers au voisinage des singularités de la membrane pare-vapeur.

Cas 13 à 24 (isolant non hygroscopique)

Pour la laine minérale (non hygroscopique), nous pouvons observer via l'indicateur D1 une humidité relative plutôt haute pour l'ensemble des simulations, avec un dépassement de 90%HR sur 6 cas (cas 17 à 20, 22 & 23) et une moyenne proche de 87%HR. Cette humidité relative reste néanmoins acceptable pour ce type de matériau, qui ne se voit dégradé qu'à de très fortes humidités relatives, avoisinant les 98%HR.

L'indicateur D2 présente assez logiquement des valeurs supérieures à celles trouvées dans l'indicateur D1, grâce à ses zones de capture plus localisées. Ici, presque tous les cas dépassent les 90%HR hormis les cas 13, 15 et 16. La valeur maximale est de 96,8%HR au voisinage du joint supérieur pour le cas 17 (membrane $S_d=2\text{m}$). La valeur moyenne est ici de 90%HR.

Cas 25 à 30 (isolant hygroscopique)

Lorsque la paroi lourde est couplée à un isolant hygroscopique, nous observons une teneur en eau en masse dans l'isolant à l'interface avec la structure allant de 10.9%M à 22.5%M, restant alors constamment en dessous de la limite de 23%M en masse. Les valeurs les plus importantes sont rencontrées dans les cas 27 à 29, où la teneur en eau en masse dépasse 22%M.

L'indicateur D2, confirme les tendances de l'indicateur D1. Les teneurs en eau en masse sont comprises entre 11.6%M et 24.8%M, avec un dépassement de la limite de 23%M en masse pour les cas 27 à 29.

Bien que la limite de 23%M soit dépassée pour ces trois cas, une apparition de désordre semble peu probable du fait de la faible durée de dépassement (3.6 semaines pour le cas 27, 1 semaine pour le 28 et 1.2 semaine pour le cas 29).

5.5.2.3 Les observations

Le pare vapeur

Comme le montre la Figure 109 ci-dessous, Le type de membrane mise en œuvre a un impact sur la teneur en eau des éléments constituant la paroi.

Nous remarquons qu'une membrane pare-vapeur avec un $S_d=2\text{m}$ laisse transiter plus d'humidité dans la paroi, montant alors la teneur en eau de cette dernière. Néanmoins, lorsque

la paroi est couplée à un pare-vapeur plus résistant à la diffusion de vapeur d'eau (ici 20m et 100m), la teneur en eau du système a tendance à être inférieure.

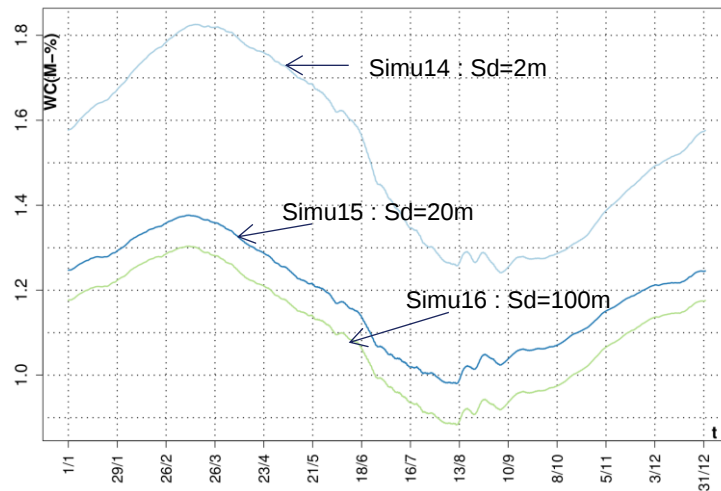


Figure 109 : Teneur en eau dans le joint - Impact du pare-vapeur choisi

L'isolant hygroscopique

Pour analyser l'effet de l'isolant hygroscopique, nous allons comparer les simulations avec ce type d'isolant avec celles employant un isolant non hygroscopique :

- Simu15 (isolant non hygroscopique) – Simu25 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, perméabilité résiduelle ;
- Simu16 (isolant non hygroscopique) – Simu26 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=100m, perméabilité résiduelle ;
- Simu18 (isolant non hygroscopique) – Simu27 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, agrafes seules ;
- Simu19 (isolant non hygroscopique) – Simu28 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=100m, agrafes seules ;
- Simu24 (isolant non hygroscopique) – Simu30 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, lé non jointoyé.

La Figure 110 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** nous montre que le type d'isolant a un impact sur la teneur en eau de la structure porteuse ; dans ce cas, sur le parpaing. Sans perturbation de la membrane, nous observons une teneur en eau globalement inférieure avec un isolant non hygroscopique. Néanmoins, avec un isolant hygroscopique, nous pouvons remarquer que l'amplitude de variation à l'année est inférieure dans le cas où la membrane se trouve perturbée. Ainsi, l'isolant permet d'amortir la teneur en eau de la structure lorsque les apports d'humidité sont favorisés par les perturbations.

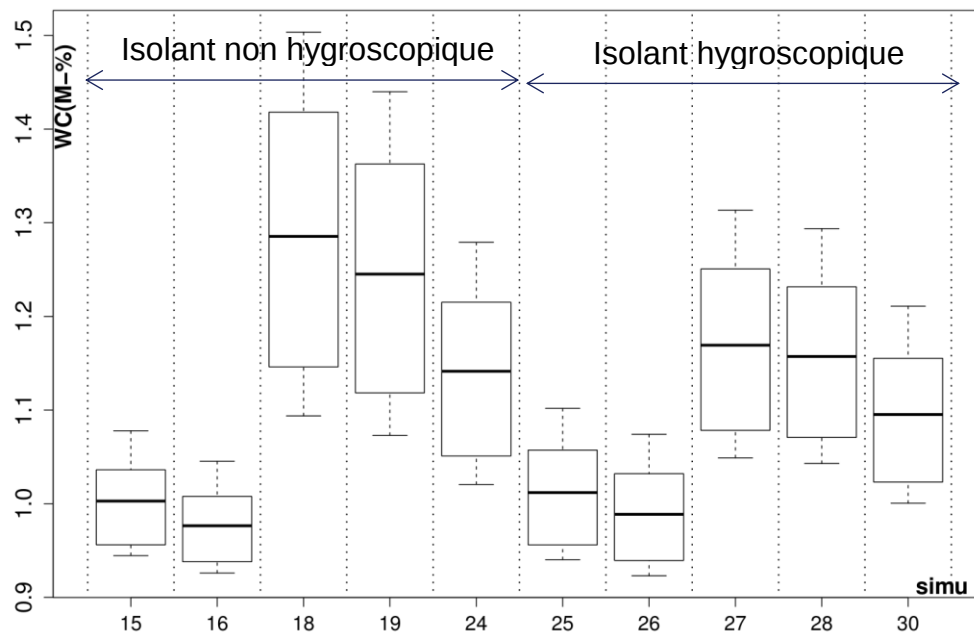


Figure 110 : Teneur en eau du point A1 du parpaing – Effets du choix de l'isolant

Si nous nous attardons sur l'humidité relative dans les premiers mm du joint, en contact avec l'isolant (position A2_joint1) présenté en Figure 111 nous constatons la même tendance que dans le parpaing.

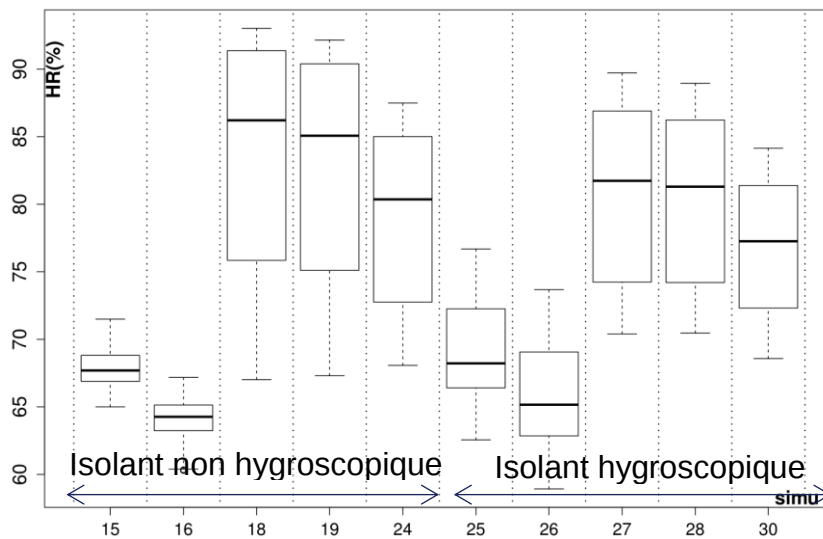


Figure 111 : Humidité relative de la zone A2 du joint – Effets du choix de l'isolant

L'isolant non hygroscopique n'étant pas capable de stocker de l'humidité en son sein (sans dégradation), nous retrouvons cette humidité dans le premier matériau ayant la capacité de stocker et diffuser cette humidité (dans ce cas le joint).

Les perturbations

L'analyse des perturbations se fait en distinguant les trois niveaux de singularités : sans perturbation (cas 15), la perturbation accidentelle (cas 21 & 24) et la perturbation récurrente (cas 18, 20 & 22).

La perturbation accidentelle ne semble pas entraîner une forte augmentation de la teneur en eau dans le parpaing (Figure 112). Concernant les perturbations récurrentes, il semble que ces dernières entraînent une augmentation plus importante de cette teneur en eau, notamment dans le cas d'un agrafage dénué de pastille (cas 18).

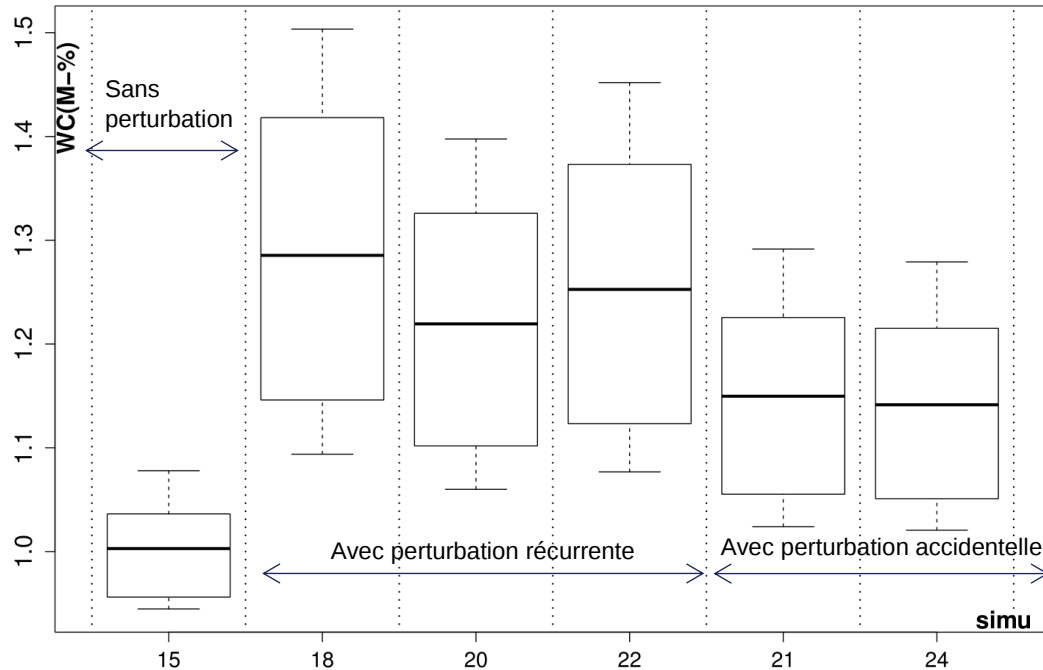


Figure 112 : Teneur en eau dans le parpaing - Effets des perturbations

Les apports convectifs

Les apports convectifs sont observés sur quatre simulations différentes, reprenant les différents niveaux de perméabilité résiduelle appliqués aux simulations. Ainsi, le q_{50} passe de 0 à $5.6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

Dans ces simulations, la différence entre une perméabilité à l'air nulle et de $2.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ne semble pas impacter le comportement de la paroi, comme le montre la Figure 113 (distributions identiques).

L'écart de teneur en eau volumique observé dans le parpaing entre les deux perméabilités plus importantes semble aussi anecdotique. La différence maximale constatée sur une année est de l'ordre 300 g/m^3 en hiver.

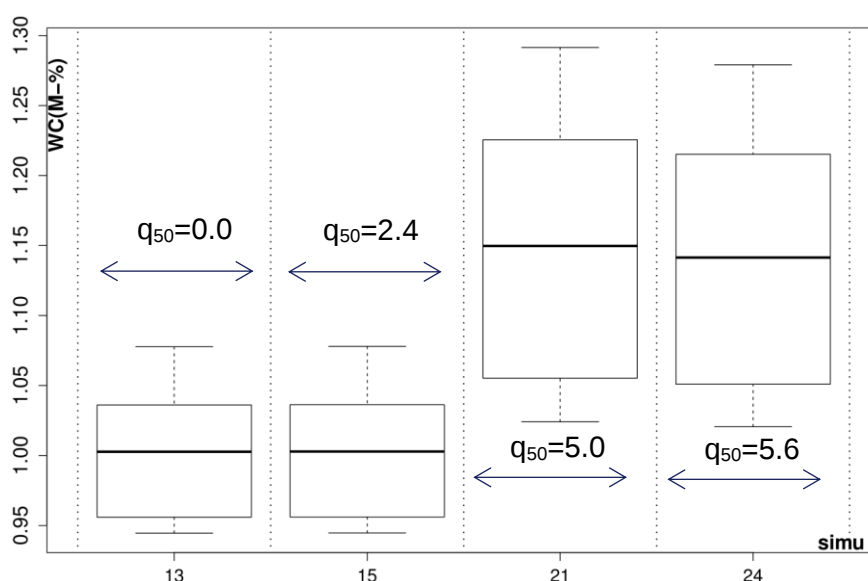


Figure 113 : Teneur en eau dans le parpaing – Effets des apports convectifs

Synthèse

Dans le cadre de la paroi verticale en parpaing, aucun risque hygrothermique ne semble avéré avec les configurations testées. La stabilisation dans la paroi s'effectue rapidement, mais les niveaux d'humidités restent néanmoins haut, avec des valeurs proches de 95%HR dans la structure et de 98%HR dans l'isolant (non hygroscopique). Pour un complexe en structure lourde, il est à noter qu'une membrane pare-vapeur avec un $S_d=2m$ présente les plus niveaux d'humidité les plus élevés.

Les perturbations dans la membrane entraînent une forte augmentation de la teneur en eau dans les éléments, et notamment dans l'isolant à l'interface avec la structure froide. Par ailleurs, ces niveaux sont atteints avec une perturbation dite récurrente. Une perturbation accidentelle ne semble pas entraîner de défauts complémentaires avec les choix de modélisations qui ont été faits.

L'isolant hygroscopique permet d'amortir les pics d'humidité dans la paroi, en particulier dans la structure porteuse. Cela se fait au dépend de la teneur en eau dans l'isolant, s'approchant alors de la limite admissible pour la famille d'isolants biosourcés.

Enfin, la méthode utilisée pour tenir compte des apports convectifs ne semble pas faire varier les teneurs en eau dans la paroi. L'augmentation de la teneur en eau totale semble ici plus due aux propriétés de transfert de vapeur de la membrane.

5.5.3 Configuration Isolation sous combles perdus

Les simulations réalisation pour la configuration Isolation sous combles perdus sont présentées dans le Tableau 22.

Tableau 22 : Simulations de la configuration isolation sous combles perdus

		Matériaux					Type de défaut							q50
		Membrane (Sd en m)			Isolant									
#	Desc.	2	20	100	Non HYGRO	HYGRO	A1 A3	B5 B7	B8 B10	C11 C13	D14 D16	G17 G19	m³/h.m²	
31	Etude du comportement isolation sous combles perdus		x		x		x						0	
32		x			x		x						2.4	
33			x		x		x						2.4	
34				x	x		x						2.4	
35		x			x			x					2.4	
36			x		x			x					2.4	
37				x	x			x					2.4	
38			x		x				x				2.4	
39			x		x					x			5	
40			x		x						x		2.4	
41				x	x						x		2.4	
42			x		x							x	5.6	
43	Impact de l'isolant isolation sous combles perdus		x			x	x						2.4	
44				x		x	x						2.4	
45			x			x		x					2.4	
46				x		x		x					2.4	
47			x			x					x		2.4	
48			x				x					x	5.6	

Les résultats des simulations de comportement hygrothermique de l'isolation sous combles perdus ont été extraits à différentes positions de la paroi comme indiqué sur la Figure 114 : Combles perdus - Position des points d'observations pour le calcul des indicateurs. Les positions A et B se situent dans la solivette en bois, en face de la perturbation correspondant à l'agrafage de la membrane. Les positions C et D se situent à différents endroits dans l'isolant. Ces résultats sont utilisés pour calculer les indicateurs de pathologies et analyser les différences de comportement hygrothermique entre chaque simulation.

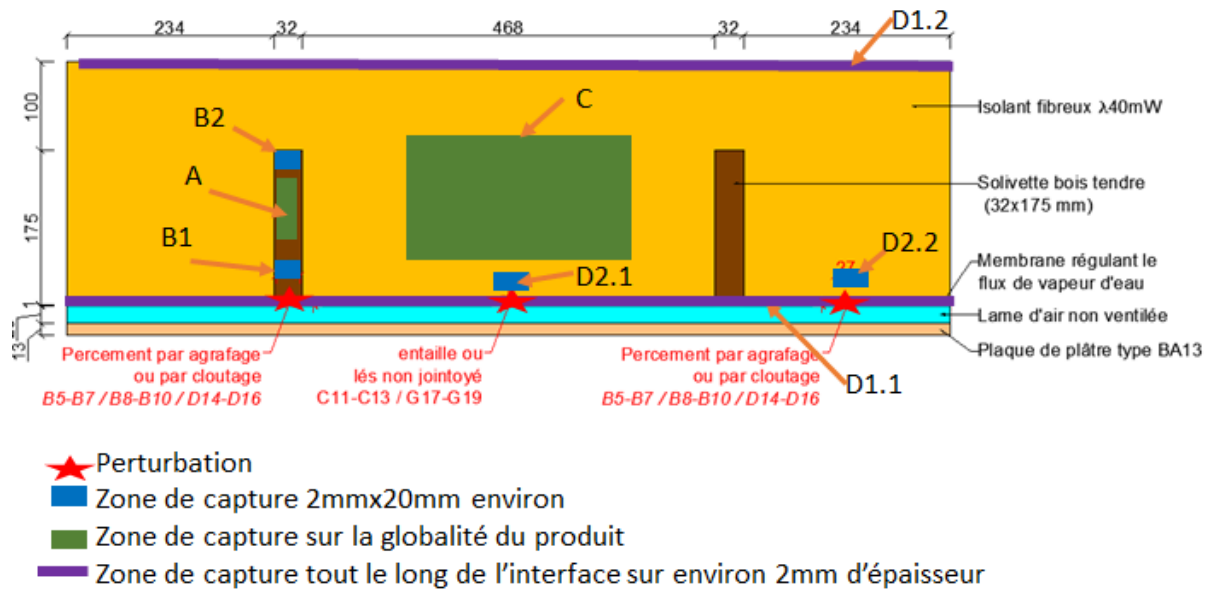


Figure 114 : Combles perdus - Position des points d'observations pour le calcul des indicateurs

5.5.3.1 Les résultats

Sur la Figure 115, la teneur en eau calculée dans la solivette (position A) lors de la dernière année de simulation est représentée. Durant les trois premiers mois, la teneur en eau est assez stable. Puis elle augmente, plus ou moins rapidement, d'avril à juin. Le pic annuel est observé au milieu du mois de juin (simulations avec laine de verre) ou au milieu du mois d'août (simulations avec isolant hygroscopique). Enfin, la teneur en eau chute nettement à partir du mois de novembre.

Ici, on observe une influence importante du matériau isolant sur l'évolution de la teneur en eau de la solivette. L'isolant hygroscopique diminue l'amplitude de variation annuelle de la solivette et retarde l'apparition du pic de teneur en eau dans l'année.

Cette paroi a la particularité d'humidifier l'élément porteur durant la période estivale et de le sécher durant la période hivernale. Les teneurs en eau observées dans le bois demeurent néanmoins éloignées des seuils de pathologies. Au maximum, elles valent 10%M.

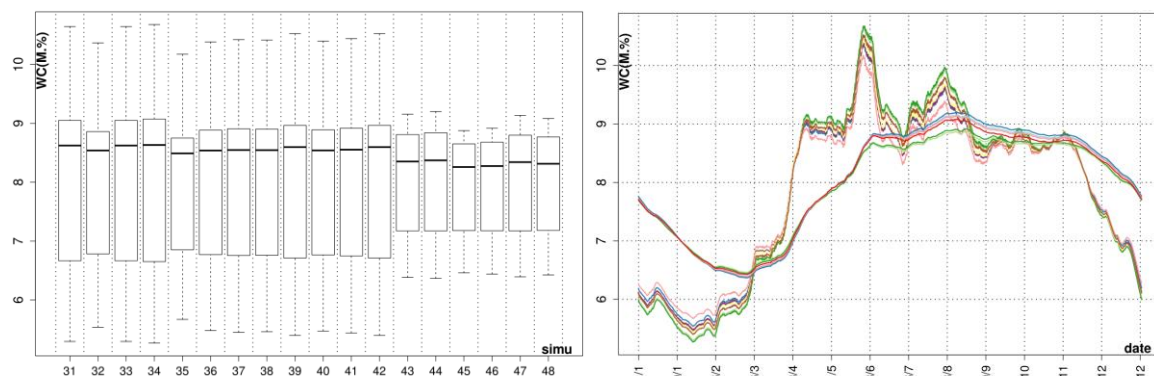


Figure 115 : Teneur en eau dans la solivette

Sur la Figure 116 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** l'isolant (position C) lors de la dernière année de simulation est représentée. Le cycle d'humidification séchage est analogue à celui des éléments en bois.

Les teneurs en eau dans l'isolant en laine de verre varient sur l'année entre 3%M et 6%M. Celles dans l'isolant hygroscopique varient sur l'année entre 8%M et 11%M.

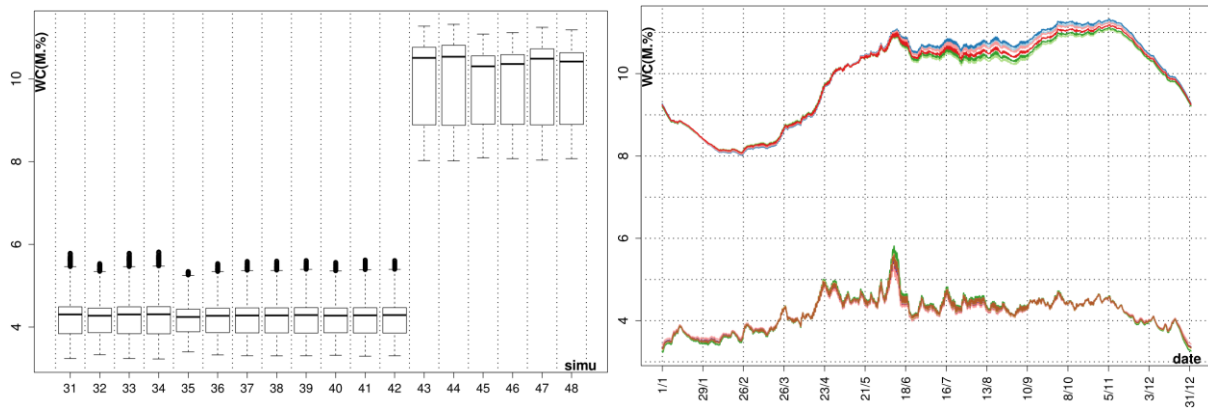


Figure 116 : Teneur en eau dans l'isolant

5.5.3.2 Les indicateurs

Indicateurs A

On regarde ici le comportement des éléments d'ossature bois sur le long terme.

La teneur en eau dans la solivette A varie entre les deux dernières années de moins de 2%. Dans ces simulations, on n'observe pas d'accumulation globalement ou localement dans la solivette.

Lors de la dernière année de simulation, les pics d'humidités relatives les plus importants sont observés sur la partie de la solivette exposée au comble non chauffé (position B2). Selon la simulation, le pic varie de 76%HR à 83%HR. Ces valeurs sont éloignées du seuil critique de 95%.

Indicateurs B

On évalue ici sur les éléments singuliers du bois (éléments situés au droit de la perturbation), l'accumulation d'humidité au cours de la dernière année.

On observe aucun problème de cumul d'humidité dans les points singuliers des solivettes (position B1 et B2). Le pic de teneur en eau est observé à la position B2 et varie entre 10%M et 11.3%M. Cette valeur est très éloignée du seuil de risque pathologique de 20%M.

Indicateurs C

La teneur en eau dans l'isolant ne dépasse jamais les 6%M en masse pour l'isolant en laine de verre et 12%M en masse pour l'isolant hygroscopique.

Avec un niveau si bas de teneur en eau, on considère qu'il n'y a pas de dégradation des performances de l'isolant. En effet, pour augmenter la conductivité thermique de la laine de verre de 5%, il faudrait atteindre une teneur en eau de 76%M. Pour augmenter de 5% celle de l'isolant hygroscopique, il faudrait atteindre une teneur en eau de 50%M.

Indicateurs D

On observe ici les indicateurs de pathologies dans les isolants.

Dans la laine de verre, l'interface la plus exposée est celle se situant côté intérieur (position D1.1). Le pic le plus élevé d'HR est observé pour la simulation 34 (sans perturbation et $S_d=2m$) et vaut 93%HR. Côté comble, le pic est de l'ordre de 88%HR. Ces valeurs restent éloignées du seuil de risque 98%HR. Le point singulier D2.1 est le point le plus exposé. Le pic observé varie autour de 94%HR.

Dans l'isolant hygroscopique, on n'observe aucun problème de cumul. Le pic maximal de teneur en eau sur l'année est observé à l'interface entre l'isolant et le comble non aménagé. Il est alors de l'ordre de 20%M. Côté intérieur, il est entre 8%M et 9%M.

5.5.3.3 Les observations

Le pare vapeur

Pour observer l'influence de la membrane sur le comportement hygrothermique de la paroi, on compare les résultats des simulations 32, 33 et 34 (sans perturbation, perméabilité à la vapeur variant de 2m à 100m).

La moyenne de la teneur en eau dans les solivettes et l'isolant dans l'année est très peu impactée par le choix de la membrane (Figure 115 Figure 116 Figure 117), on observe que la membrane a un effet plus important sur l'interface intérieur de l'isolant (D1.1) que sur l'interface extérieur (D1.2).

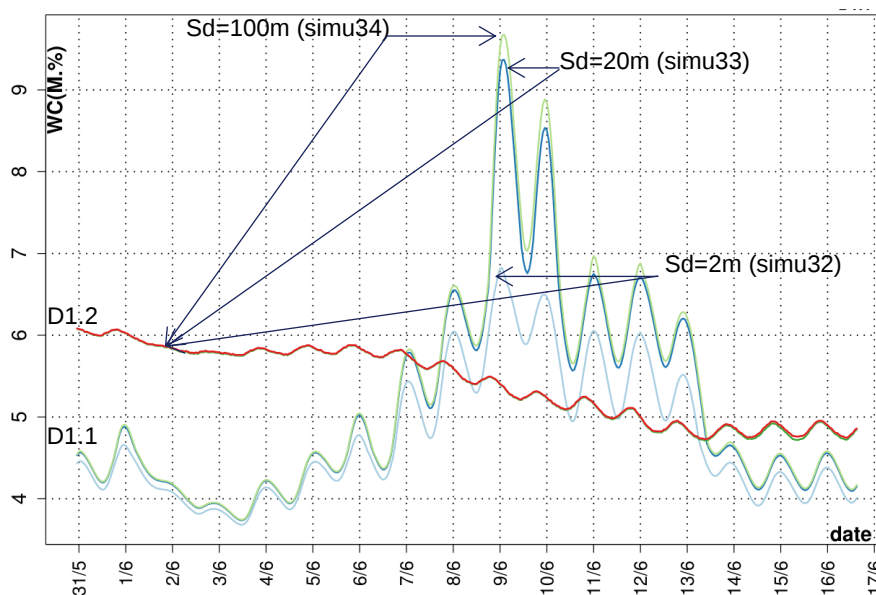


Figure 117 :Teneur en eau à l'interface entre isolant/membrane (D1.1) et à l'interface isolant/comble (D1.2) - Influence de la membrane

Le climat chaud et humide du comble contribue à humidifier par « l'extérieur » la paroi. Ainsi, lorsque la résistance à la diffusion de la membrane augmente, l'humidité s'accumule plus dans l'isolant (sans atteindre ici des niveaux pathologiques).

L'isolant hygroscopique

Pour analyser le comportement de l'isolant hygroscopique, nous allons comparer les simulations avec ce type d'isolant avec celles employant un isolant non hygroscopique :

- Simu33 (isolant non hygroscopique) – Simu43 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, perméabilité résiduelle ;
- Simu34 (isolant non hygroscopique) – Simu44 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=100m, perméabilité résiduelle ;
- Simu36 (isolant non hygroscopique) – Simu45 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, agrafes seules ;
- Simu37 (isolant non hygroscopique) – Simu46 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=100m, agrafes seules ;
- Simu42 (isolant non hygroscopique) – Simu48 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, Lés non jointoyés.

La teneur en eau globale dans les solivettes est légèrement impactée par le choix de l'isolant Figure 118 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** reste en dessous des valeurs critiques pouvant conduire à des pathologies.

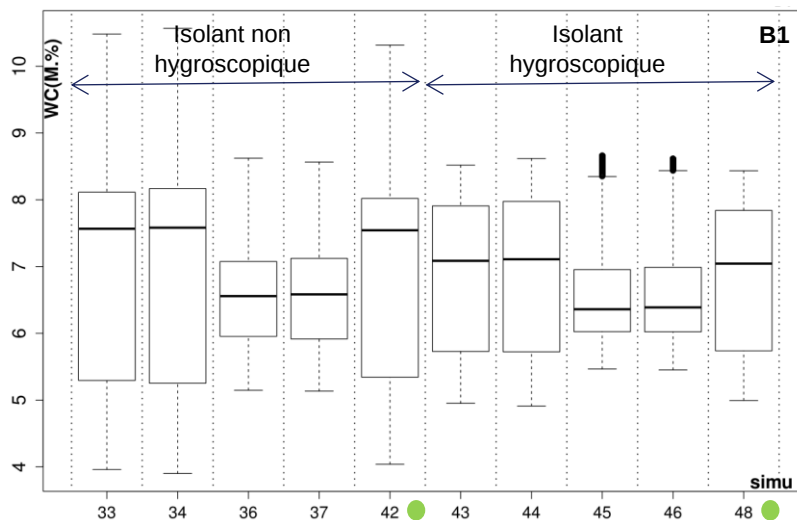


Figure 118 : Teneur en eau du point singulier B1 de la solivette – Effets du choix de l'isolant

Par ailleurs, nous constatons une augmentation de la teneur en eau dans l'isolant hygroscopique ainsi qu'aux interfaces intérieure et extérieure de l'isolant et ceci pour toutes les simulations. La teneur en eau ne dépasse pas 20% (interface D1.2), ce qui ne présente pas de risque majeur dans un isolant biosourcé. On note aussi que l'amplitude de variation de la teneur en eau dans l'isolant au niveau de l'interface intérieure est nettement moins importante avec l'isolant non hygroscopique (Figure 119).

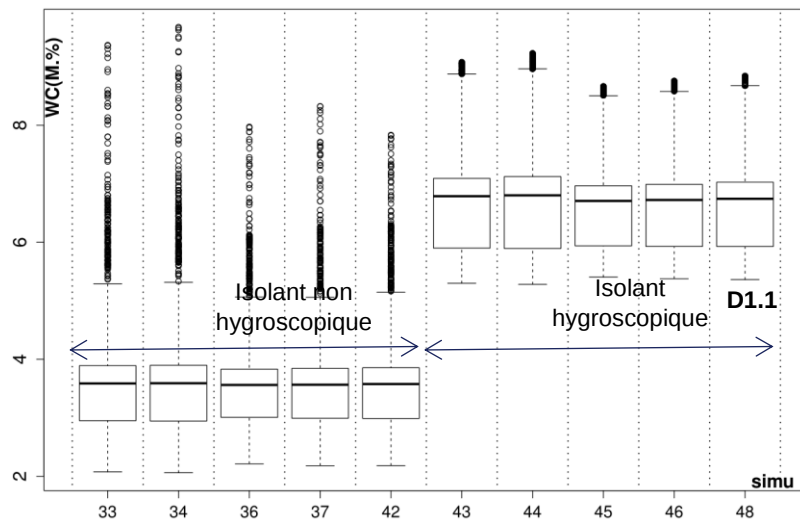


Figure 119 : Teneur en eau à l'interface de l'isolant côté intérieur- Effet du choix de l'isolant

Les perturbations

Pour analyser les effets des agrafes seules, on compare les résultats observés entre les :

- Simu32 et Simu35 (cas $S_d=2m$) ;
- Simu33 et Simu36 (cas $S_d=20m$) ;
- Simu34 et Simu37 (cas $S_d=100m$).

La teneur en eau globale dans les solivettes et l'isolant dans l'année est peu impactée par la prise en compte d'agrafes nues dans le modèle (Figure 117, Figure 118).

Leurs effets sont très localisés à proximité de la perturbation. Dans la solivette, juste derrière la perturbation (point d'observation B1), la teneur en eau diminue en présence des agrafes. En s'éloignant du point d'observation B1 (point B2), les teneurs en eau sont moins impactées par les agrafes (Figure120).

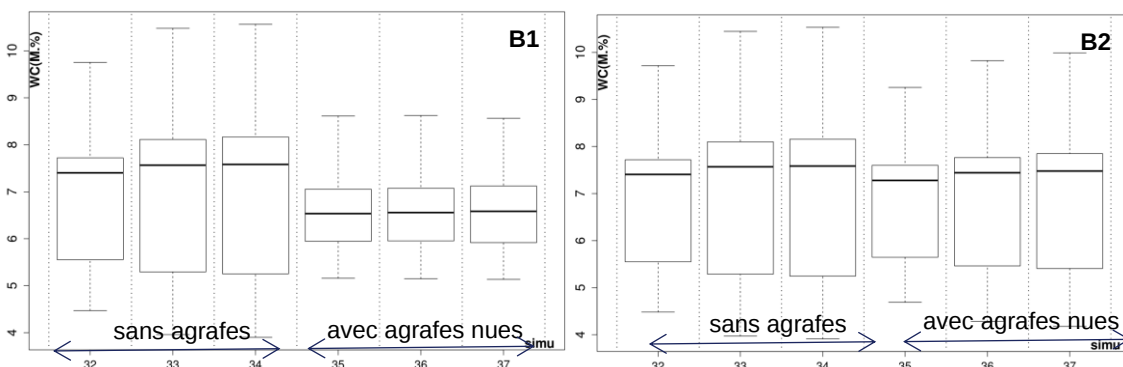


Figure 120 : Teneur en eau des points singuliers de la solivette – Effets des agrafes

Par rapport à la situation des agrafes nues, il n'a pas été observé d'effets liés au pastillage des agrafes sur ces indicateurs (comparaison des simulations 36 et 38).

Les effets liés à la prise entre liteaux sont analysés en comparant les simulations :

- Simu33 et Simu40 (cas $S_d=20m$) ;
- Simu34 et Simu41 (cas $S_d=100m$).

Comme pour les agrafes, ces effets sont visibles autour de la position de la perturbation sur la membrane. La teneur en eau des matériaux diminue d'une amplitude équivalente (Figure121).

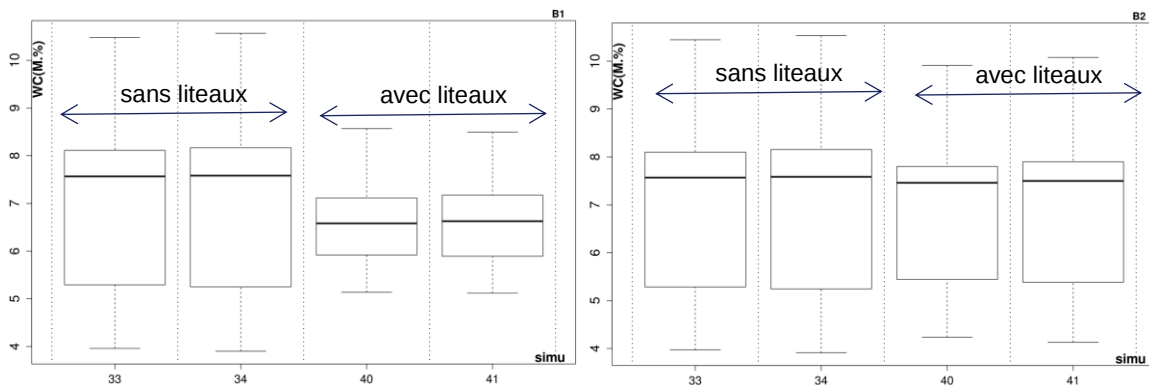


Figure 121 : Teneur en eau des points singuliers de la solivette – Effets de la prise entre liteaux

Les effets liés aux lés non recouverts et à l'entaille sont observés en comparant :

- simu33 à simu39 (entaille en croix) ;
- simu33 à simu41 (lés non recouverts).

La teneur en eau globale dans les solivettes et l'isolant dans l'année est peu impactée par la prise en compte de ces perturbations (Figure117 Figure118 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure122), le pic de teneur en eau dans l'isolant derrière la perturbation diminue lorsque l'entaille ou les lés non recouverts sont pris en compte. Le pic de teneur en eau dans l'isolant derrière la perturbation diminue lorsque l'entaille ou les lés non recouverts sont pris en compte.

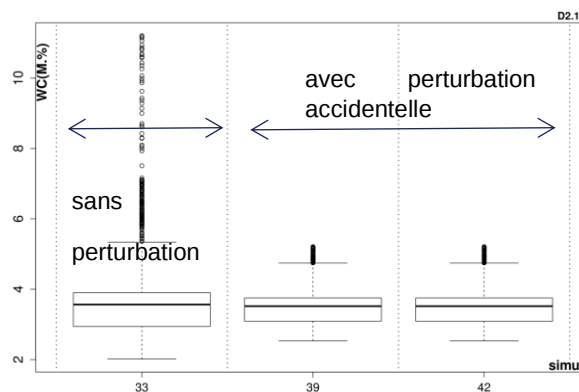


Figure 122 : Teneur en eau du point D2.1 singulier de l'isolant – Effets de la prise de l'entaille et des lés non recouverts

Les apports convectifs

Pour observer l'effet de la méthode de prise en compte de phénomènes convectifs dans la paroi, une simulation sans source d'infiltration a été réalisée (simu31). En comparant cette dernière à la simu33, il faut constater que les apports d'humidité liés au modèle d'infiltration sont négligeables dans ce cas (Figure117, Figure118).

Dans la modélisation, la source d'infiltration est positionnée au niveau du plan de condensation, i.e dans une épaisseur de quelques millimètres d'isolant à l'interface avec les conditions aux limites du comble. Le débit de la source, estimé avec le modèle d'infiltration

n'est peut-être pas suffisamment élevé dans ce cas pour générer des variations significatives de l'état de la paroi.

Synthèse

Les simulations des perturbations de membranes n'indiquent pas de pathologies liées à l'humidité car :

- Les apports d'humidité liés à la convection simulés par le modèle d'infiltration sont négligeables dans ce cas. Même en dégradant la perméabilité à l'air de la paroi dans le cas d'une entaille, le modèle d'infiltration n'a que peu d'effets sur les résultats simulés. Il faut ici préciser que le modèle pourrait sous-estimer les apports convectifs sous toutes leurs formes ce qui est une limite à prendre en compte dans ces résultats ;
- Les cas avec isolants non hygroscopiques et hygroscopiques sont des cas non pathologiques. De plus, il faut noter que l'isolant hygroscopique permet aussi de stabiliser la teneur en eau dans la solivette ; ce qui la rend moins sensible aux variations extérieures. En contrepartie, la teneur en eau dans l'isolant est plus élevée mais reste en deçà des seuils pathologiques ;
- Le climat chaud et humide (en période estivale) du comble non chauffé contribue à humidifier par « l'extérieur » la paroi. Ainsi, les configurations les plus étanches à la vapeur (avec une perméabilité à la vapeur de membrane plus élevée) sont les configurations où on observe le plus d'accumulation d'humidité dans l'isolant. Néanmoins cette accumulation n'engendre pas le dépassement de seuils de pathologies. De plus, les perturbations permettent de laisser passer l'humidité et réduisent localement l'accumulation d'eau dans l'isolant ;

En pratique, pour limiter le phénomène d'accumulation, il ne s'agirait pas de supprimer la membrane d'étanchéité. En effet, cela augmenterait fortement les pertes thermiques par infiltration d'air à travers le plafond. Dans ces conditions, il faudrait limiter la source (provenant des combles) en assurant une aération de ce comble, en particulier durant la période la plus favorable au séchage de l'année.

5.5.4 Configuration Paroi légère

Les simulations réalisées pour la configuration paroi légère sont décrites dans le Tableau 25.

Tableau 23 : Simulations de la configuration paroi légère

		Matériaux					Type de défaut							q50
		Membrane (Sd en m)			Isolant									
#	Desc.	2	20	100	Non HYGRO	HYGRO	A1 A3	B5 B7	B8 B10	C11 C13	D14 D16	G17 G19	m³/h.m²	
49	Etude du comportement de la paroi légère		x		x		x						0	
50		x			x		x						2.4	
51			x		x		x						2.4	
52				x	x		x						2.4	
53		x			x			x					2.4	
54			x		x			x					2.4	
55				x	x			x					2.4	
56			x		x				x				2.4	
57			x		x					x			5	
58			x		x						x		2.4	
59				x	x						x		2.4	
60			x		x							x	5.6	
61	Impact de l'isolant paroi légère	x				x	x						2.4	
62			x			x	x						2.4	
63		x				x		x					2.4	
64			x			x		x					2.4	
65		x				x					x		2.4	
66		x				x						x	5.6	

Les résultats des simulations de comportement hygrothermique de la paroi légère ont été extraits à différentes positions de la paroi comme indiqué sur la Figure123. Les positions A se situent sur les éléments d'ossature en bois, au droit des perturbations. La position B correspond à un morceau du contreventement en OSB, toujours au droit de la perturbation. Les positions C et D se situent à différents endroits dans l'isolant. Ces résultats sont utilisés pour calculer les indicateurs de pathologies et analyser les différences du comportement hygrothermique entre chaque simulation.

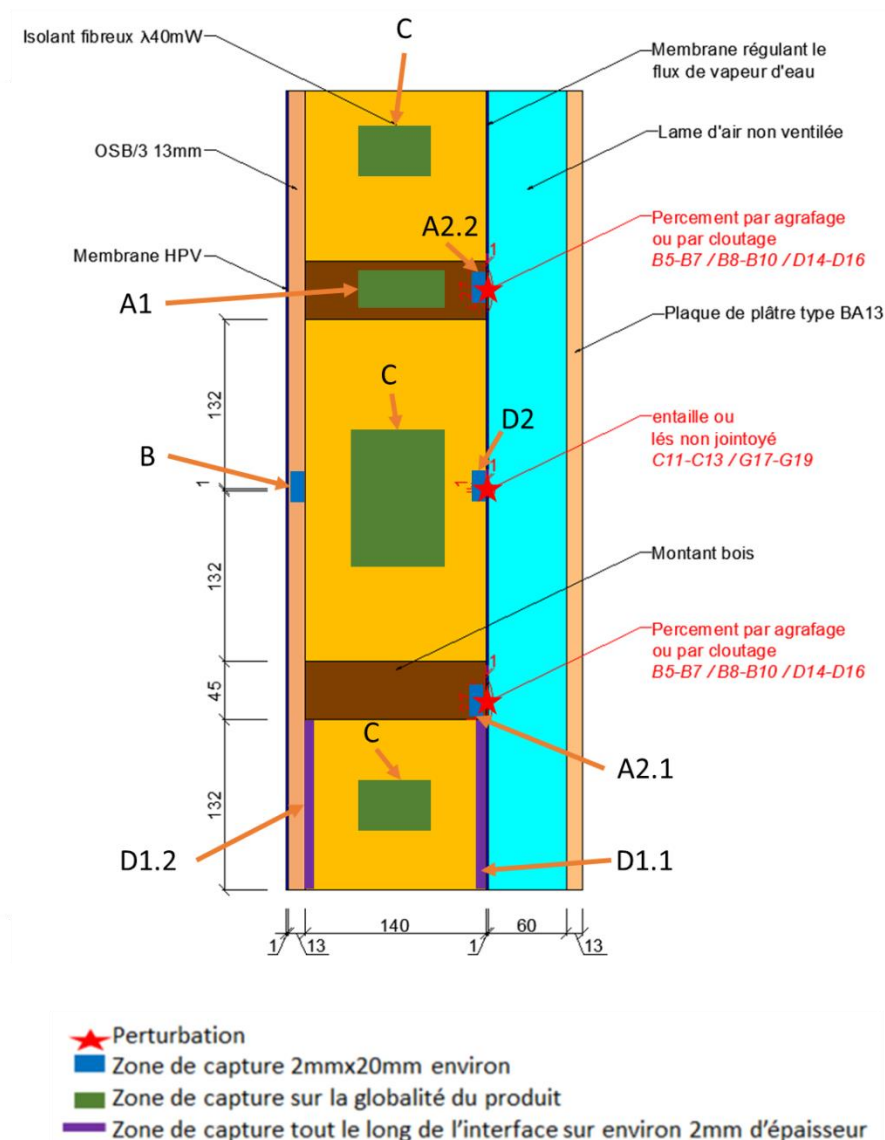


Figure 123 : Paroi légère - Position des points d'observations pour le calcul des indicateurs

5.5.4.1 Les résultats

La Figure124 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**représente l'évolution, sur les deux dernières années de simulation, de la teneur en eau dans un élément d'ossature en bois (observation en A1) et pour les différentes configurations de paroi légère simulées. Un diagramme de Tukey permet d'avoir une vision de la distribution de la teneur en eau durant ces dernières années.

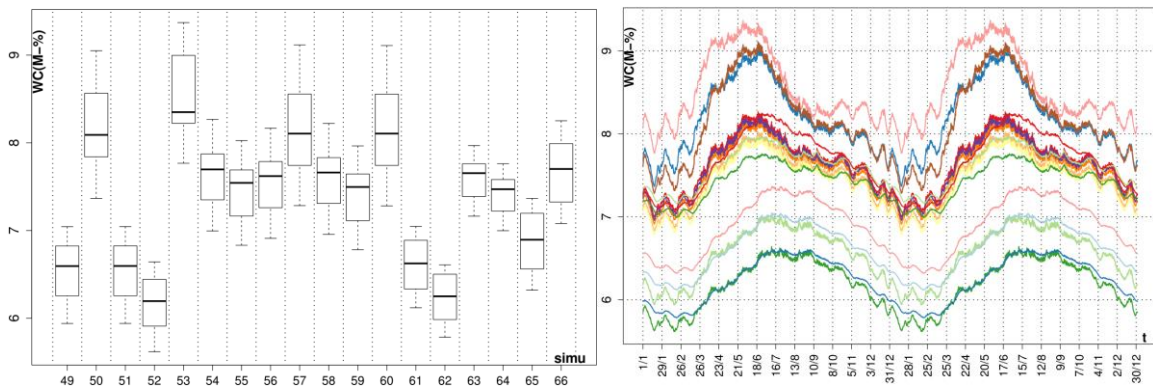


Figure 124 : Teneur en eau dans l'ossature en bois

La Figure125 et la Figure126 représentent ces informations dans le contreventement en OSB (position B) et dans l'isolant (position C).

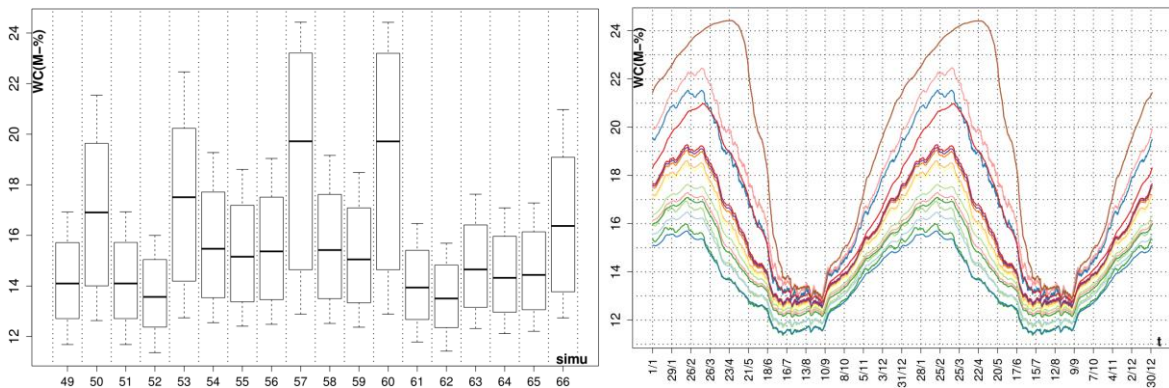


Figure 125 : Teneur en eau dans le contreventement en OSB

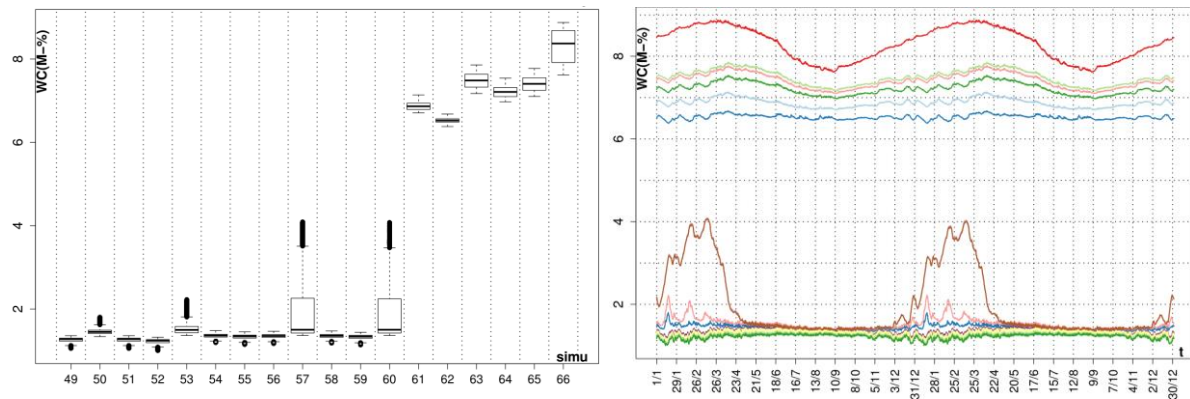


Figure 126 : teneur en eau dans l'isolant

On observe un phénomène d'humidification de la paroi en hiver et un séchage en été. Ce phénomène est très nettement visible sur l'OSB avec une teneur en eau maximale en fin d'hiver et minimale en fin d'été. Dans les éléments d'ossatures, ce phénomène est observé avec un déphasage de presque un mois et demi.

Dans l'isolant, sauf cas particuliers abordés plus bas, la teneur en eau est stable durant l'année. Elle évolue entre 1 et 2 %M pour l'isolant la laine de verre et entre 6 et 8%M pour l'isolant hygroscopique générique.

5.5.4.2 Les indicateurs

Indicateurs A

On regarde ici le comportement des éléments d'ossature bois sur le long terme.

Pour l'ensemble des simulations, l'équilibre hygrothermique est atteint bien avant la 10^{ème} année et on ne constate donc pas d'augmentation de la teneur en eau moyenne entre la 9^{ème} et la 10^{ème} année. Toutefois on relève une variabilité annuelle qui peut dépasser les 2% en masse.

En termes de niveau, la teneur en eau moyenne sur l'année se situe entre 4 et 8,5 % en masse. Les situations les plus à « risques » sont celles avec une membrane Sd 2m et celles avec des défauts de type entaille ou lés on jointoyés. La teneur en eau peut ponctuellement atteindre les 9,4 %M. Mais l'humidité relative reste, dans tous les cas, inférieure à 95 %.

Indicateurs B

On s'intéresse à présent aux éléments singuliers du bois, ici le contreventement en OSB.

Au cours de l'hiver, la teneur en eau y dépasse le seuil critique des 20 %M pour quatre simulations :

- cas 50 : 11,8 semaines consécutives, maximum de 21,5 %M
- cas 53 : 13,9 semaines consécutives, maximum de 22,5 %M
- cas 57 : 25,1 semaines consécutives, maximum de 24,5 %M
- cas 60 : 25,1 semaines consécutives, maximum de 24,5 %M
- cas 66 : 8,8 semaines consécutives, maximum de 21 %M

Il s'agit là encore des configurations avec un pare-vapeur de Sd 2m et celles avec des défauts de type entailles ou lés non jointoyés. Il y a un risque important de dégradation du matériau.

Pour les autres configurations la teneur en eau maximale au cours de l'année ne dépasse pas les 19 %M et s'établit en moyenne autour des 15 %M.

Indicateurs C

La teneur en eau dans l'isolant non hygroscopique ne dépasse jamais les 4,1 % en masse et cette valeur critique n'est atteinte que pour deux configurations. Dans la plupart des cas elle ne dépasse guère les 1,5% en masse.

Avec un niveau si bas de teneur en eau, on considère qu'il n'y a pas de dégradation des performances de l'isolant. En effet, pour augmenter la conductivité de notre isolant non hygroscopique de seulement 5%, il faudrait qu'il atteigne une teneur en eau de 76 %M.

La teneur en eau maximale dans l'isolant hygroscopique, est quant à elle supérieure à celle calculée dans l'isolant non hygroscopique et oscille entre 6,7 et 7,1%M. Comme pour l'isolant non hygroscopique, ces niveaux de teneur en eau n'engendrent pas de dégradation de la conductivité thermique de l'isolant hygroscopique. En effet, d'après les propriétés de ce type d'isolant, il faudrait que sa teneur en eau soit supérieure à 50%M pour que sa conductivité thermique se dégrade de 5%.

Indicateurs D

On regarde à présent le risque de condensation, et donc de développement fongique éventuel, au niveau des interfaces de l'isolant et de ses points singuliers (notamment au droit des perturbations dans la membrane).

A l'interface chaude de l'isolant non hygroscopique (côté intérieur), l'humidité relative ne dépasse pas les 80%. A l'interface froide, en contact avec l'OSB, l'humidité relative atteint 89% voire, dans les configurations particulières (Sd 2m), 96%. Avec une humidité relative qui reste donc constamment inférieure à 98% dans l'isolant, il n'y a pas de risque de condensation ou de développement fongique ici.

A l'interface chaude de l'isolant hygroscopique (côté intérieur), la teneur en eau ne dépasse pas 7,1%M. A l'interface froide, en contact avec l'OSB, la teneur en eau atteinte varie entre 12,6%M et 17,7%M selon la simulation. Avec une teneur en eau dans l'isolant hygroscopique qui reste constamment inférieure à 20%M, il n'y a pas de risque d'accumulation ou de développement fongique ici non plus.

5.5.4.3 Les observations

Le pare vapeur

L'impact du facteur de diffusion à la vapeur d'eau de la membrane d'étanchéité est clairement visible. Plus le pare-vapeur est fermé, plus la teneur en eau, en tout point du modèle, est faible ; et inversement. Le pare-vapeur Sd 2m a d'ailleurs posé des problèmes de simulation (obligation d'affiner le maillage) et induit une criticité de l'indicateur B.

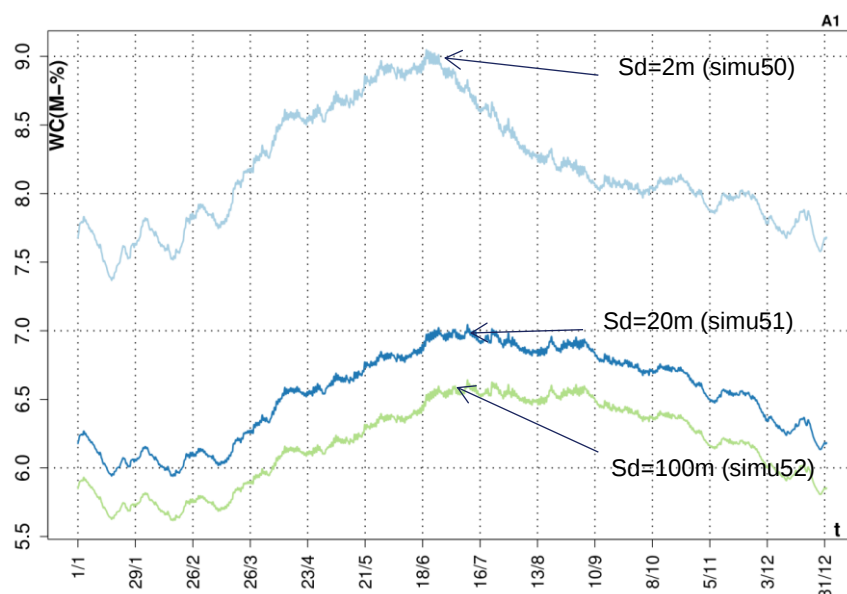


Figure 127 : Impact du choix de pare-vapeur sur la teneur en eau (observation en A1)

La Figure127 illustre cette observation dans la globalité de l'ossature bois en l'absence de perturbation de la membrane.

L'isolant hygroscopique

Pour analyser le comportement de l'isolant hygroscopique, nous allons comparer les simulations avec ce type d'isolant à celles employant un isolant non hygroscopique :

- Simu51 (isolant non hygroscopique) – Simu61 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, perméabilité résiduelle ;

- Simu52 (isolant non hygroscopique) – Simu62 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=100m, perméabilité résiduelle ;
- Simu54 (isolant non hygroscopique) – Simu63 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, agrafes seules ;
- Simu55 (isolant non hygroscopique) – Simu64 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=100m, agrafes seules ;
- Simu60 (isolant non hygroscopique) – Simu66 (isolant hygroscopique) : Cas Sd=20m, lé non jointoyé.

Dans les éléments d'ossatures, il n'y a pas de variations significatives de la teneur en eau en choisissant l'isolant hygroscopique à la place de l'isolant non hygroscopique. Pour la simu66 (cas avec le lé non jointoyé) nous constatons seulement une légère baisse de la teneur en eau dans le cas de l'utilisation d'un isolant hygroscopique. Cet effet est visible (Figure128) dans la globalité de l'ossature (A1) et aussi dans l'élément d'ossature en contact avec la lame d'air intérieur (A3)

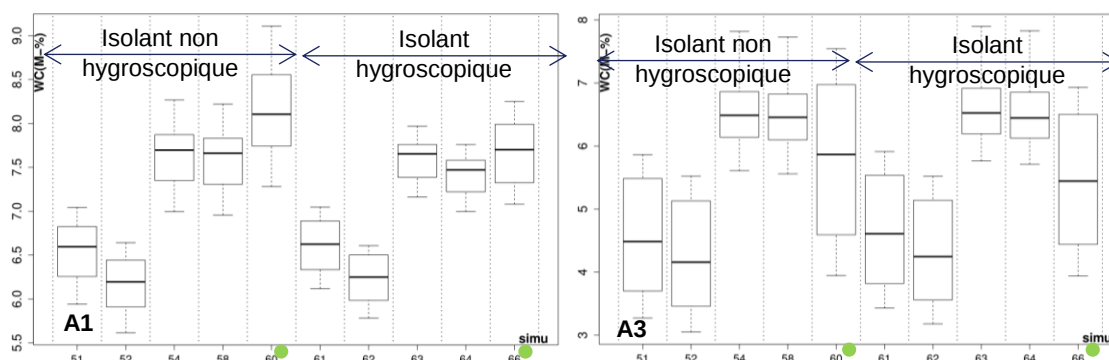


Figure 128 : Teneur en eau dans l'ossature en bois. Effet du choix de l'isolant

Dans l'OSB, la teneur en eau max passe de 24.5%M dans le cas d'un isolant non hygroscopique à 21%M dans le cas d'un isolant hygroscopique ; l'amplitude de variation est également réduite (Figure129). La durée d'exposition au seuil de 20%M est aussi réduite, passant de 25 semaines à 9 semaines.

Par ailleurs, l'utilisation d'un isolant hygroscopique montre une augmentation des teneurs en eau dans l'isolant et aux interfaces qui ne dépasse pas 15%M.

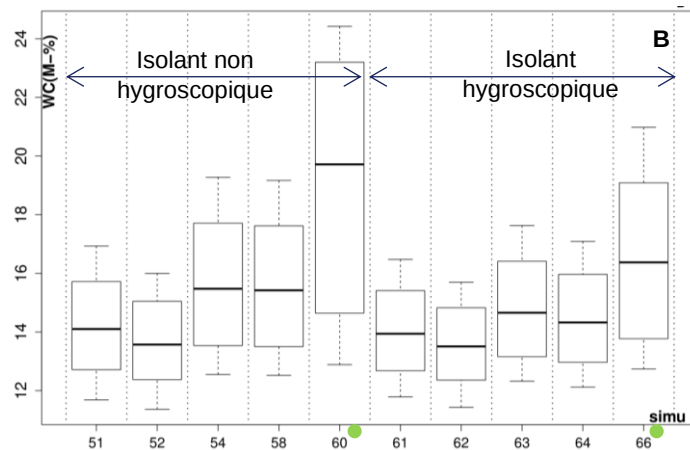


Figure 129 : Teneur en eau dans l'OSB. Effet du choix de l'isolant

Les perturbations

On distingue trois types de cas concernant les perturbations : l'absence de perturbation (simu51) et la présence d'une perturbation induisant, ou non, un apport convectif supplémentaire. simu57 et simu60 sont des simulations avec perturbations accidentelles donc avec apport convectif supplémentaire. simu54, simu56 et simu58 sont des simulations avec perturbations récurrentes donc sans apport convectif supplémentaire.

Le passage d'un type de cas à l'autre a un impact net sur la teneur en eau dans la paroi, comme illustré dans la Figure130 par les distributions de la teneur en eau de l'ossature en A1. En revanche, au sein d'une même catégorie, le changement de perturbation n'a finalement que peu d'impact.

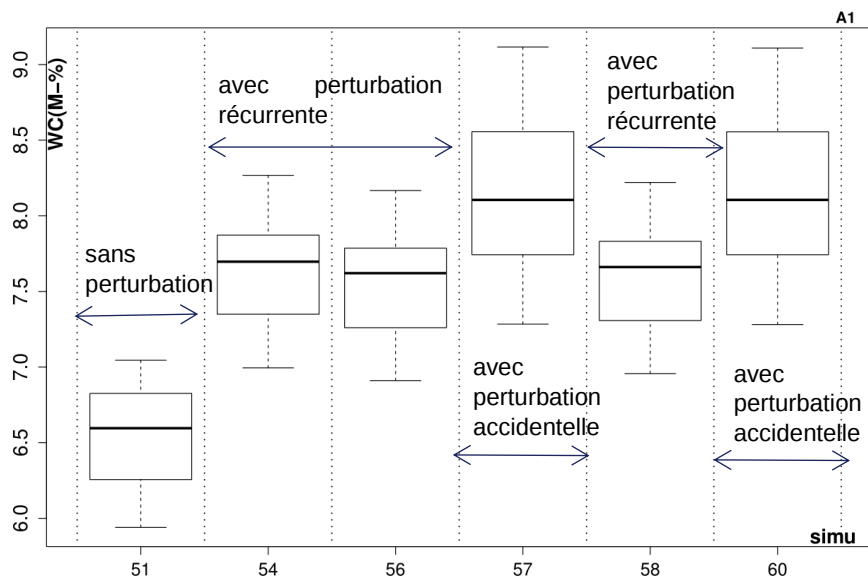


Figure 130 : effets des perturbations de la membrane (Sd 20m, observation en A1)

Les apports convectifs

L'ajout de la source liée à la perméabilité résiduelle ($2,4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$) n'a quasiment aucun impact sur les teneurs en eau (différence entre les cas 49 et 51). En revanche l'ajout des sources liées aux défauts dans le pare-vapeur semble déterminant (cas 57 et 60, avec des sources de 5 et $5,6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$), et engendre un comportement du modèle complètement différent, notamment dans l'isolant. Par contre, on ne relève pas d'écart notable entre les cas 57 et 60 (Figure 131 et Figure 132) (non-linéarité entre le débit de la source convective et le comportement de la paroi), pousse à relativiser l'impact des apports convectifs. Les différences majeures observées sont plus certainement à attribuer aux caractéristiques du pare-vapeur au niveau de la perturbation entre le débit de la source convective et le comportement de la paroi, pousse à relativiser l'impact des apports convectifs. Les différences majeures observées sont plus certainement à attribuer aux caractéristiques du pare-vapeur au niveau de la perturbation.

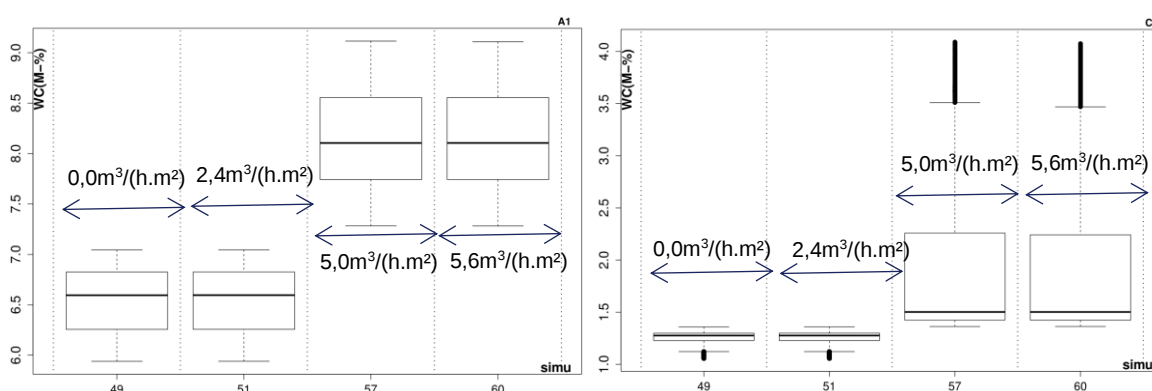


Figure 131 : Impact de la source convective, dans l'ossature à gauche (A1) et l'isolant à droite (C)

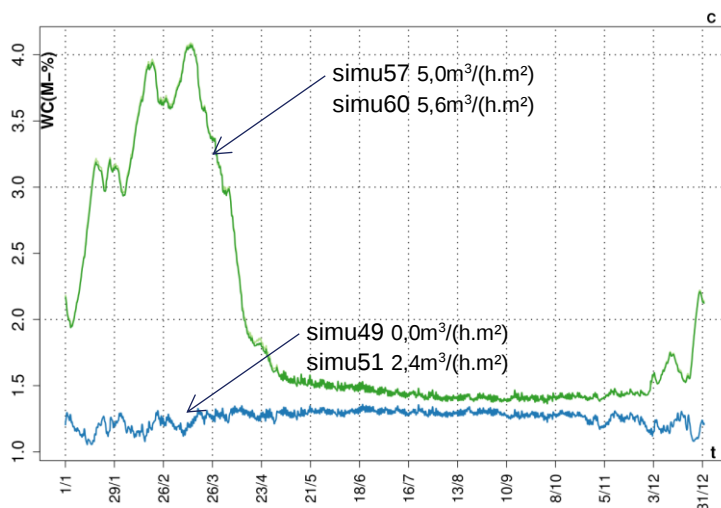


Figure 132 : Variation de la teneur en eau dans l'isolant (C) - Impact de la source convective

Synthèse

Sur cette paroi, des risques de pathologie sont identifiés dès lors que la membrane d'étanchéité est trop perméable à la vapeur d'eau, soit de par ses caractéristiques ($S_d=2\text{m}$), soit à cause de perturbations (entailles ou lés non jointoyés).

Dans ces situations, la paroi se charge en eau en hiver, et atteint des seuils pathologiques dans les zones les plus froides (côté extérieur donc), en particulier dans l'OSB de contreventement. L'effet pathologique des entailles est atténué mais demeure au-delà des seuils fixés avec l'isolant hygroscopique.

Dès lors que la membrane est suffisamment étanche à la vapeur d'eau et bien mise en œuvre, afin de bloquer les transferts d'humidité entre l'intérieur et la paroi, aucun risque pathologique n'est observé dans ces simulations.

5.5.5 Synthèse des résultats

Enseignements méthodologiques

Les résultats de simulations ont montré que l'apport d'humidité lié aux phénomènes de convection et simulé par le modèle d'infiltration n'avait que peu d'effet sur le comportement hygrothermique des parois. Il faut préciser que le modèle d'infiltration utilisé est une adaptation d'une méthode existante à la problématique traitée dans ce projet. Ce modèle contient des limites puisqu'il ne considère qu'un seul mode d'apport d'humidité possible dans la paroi (par le phénomène de condensation). Pour améliorer l'évaluation de l'impact des perturbations de membrane, il faudrait alors utiliser un modèle qui prend en compte les apports des phénomènes convectifs dans leur généralité mais ce dernier n'existe pas actuellement.

Le modèle d'effet diffusif utilisé dans ces simulations a permis de simuler des apports d'humidité supplémentaire au niveau des perturbations. Aucun problème de convergence de calcul n'a été directement imputable à ce modèle et aux singularités géométriques qu'il engendre dans le logiciel. L'analyse des résultats montre que l'utilisation de ce modèle a un effet sur le comportement global de la paroi, qui peut être amplifié au voisinage des perturbations.

En conclusion, la méthodologie employée dans ces simulations rend le comportement de la paroi particulièrement sensible aux effets diffusifs des perturbations mais peu sensible à leurs effets convectifs. Ainsi, les fluctuations de comportement lors de l'ajout d'une perturbation semblent être principalement dues à l'impact sur le phénomène de diffusion. Pourtant, les apports par convection pourraient être prépondérants par rapport à la diffusion mais nous ne disposons pas de suffisamment d'informations pour pouvoir mieux les évaluer.

Enseignements opérationnels de ces simulations

Sauf cas particulier, les perturbations de membranes tendent à augmenter la teneur en eau dans les différents composants des parois. L'amplitude de la fluctuation dépend à la fois :

- de « l'intensité » de la perturbation de la membrane ;
- du positionnement géométrique de la perturbation par rapport aux composants structurant de la paroi. En particulier, les teneurs en eau des composants se situant au voisinage de l'emplacement de la perturbation peuvent y être très sensible, bien qu'il ne s'agisse que d'une perturbation récurrente.

Dans certains cas, **les effets des perturbations « accidentelles » peuvent modifier complètement le comportement hygrothermique de la paroi et faire atteindre des seuils pathologiques :**

- aux alentours de ces mêmes perturbations ;
- à des endroits plus éloignés dans la paroi (à l'interface froide par exemple).

Si les caractéristiques de perméabilité à la vapeur de la membrane ne sont pas adaptées à la configuration, alors il y a de forts risques que des pathologies apparaissent dans ces simulations ; elles seront plus dues au mauvais choix de la typologie de membrane qu'à la qualité de sa mise en œuvre. Si la membrane est adaptée, les perturbations récurrentes simulées n'ont pas détérioré significativement le comportement hygrothermique de la paroi.

Dans les simulations où l'isolant non hygroscopique a été remplacé par un isolant hygroscopique, il est apparu que :

- dans l'isolant thermique la teneur augmente et peut se rapprocher de seuils pathologiques ;
- dans les autres composants de paroi, l'amplitude de variation à l'année de la teneur en eau diminue ce qui peut réduire dans certains cas la durée d'exposition aux seuils de pathologies.

Ces résultats illustrent le potentiel d'un isolant hygroscopique qui peut limiter l'exposition d'éléments sensibles de la paroi à des niveaux élevés d'humidité. Ces résultats ne doivent pas être généralisés à tous types isolant dits « hygroscopiques » puisque les caractéristiques de ces derniers peuvent fortement varier matériau à un autre. **Au final, l'utilisation d'un isolant hygroscopique ne protège pas la paroi des effets pathologiques issus d'un mauvais choix d'une membrane où à des perturbations accidentelles mais peut limiter l'intensité des pathologies rencontrées.**

5.6 Conclusions générales de la TACHE 4

L'objectif principal de la Tâche 4 du projet HYGRO-PV vise à évaluer par la simulation les effets des perturbations de membranes sur le comportement hygrothermique de parois typiques du bâtiment soumises à des conditions d'utilisation normales.

D'abord, une méthodologie a été construite pour tenir compte des effets de ces perturbations sur les transferts d'humidité par diffusion et par convection en simulation hygrothermique. Concernant les aspects diffusifs, les nouveaux éléments de connaissances apportés par les expérimentations de la Tâche 2 du projet ont été directement utilisés. Pour les aspects convectifs, les enseignements des parties expérimentales du projet n'ont pas été suffisants pour interpréter précisément les phénomènes physiques en jeu et les reproduire de manière satisfaisante par le modèle. Ainsi, il a été choisi d'incorporer des apports d'humidité par convection en choisissant un modèle d'infiltration calibré avec ou sans défaut accidentel.

Dans un premier temps, cette méthodologie a été appliquée aux configurations mises en place lors des expérimentations à l'échelle paroi. Ce travail de comparaison a permis de valider les outils utilisés entre les différentes équipes du projet, de mettre en évidence l'existence de certains facteurs d'influence sur les résultats observés (positions des capteurs, conditions initiales dans les produits avec une forte inertie « hygrique ») et d'évaluer l'intérêt de la méthodologie proposée.

Dans un second temps, la même démarche a été appliquée à 66 cas théoriques permettant d'évaluer l'impact des perturbations de membranes sur le comportement de 4 typologies de paroi soumises à des conditions climatiques représentatives de la réalité.

L'analyse de ces résultats a d'abord fourni des enseignements méthodologiques. Notamment, le comportement simulé des parois a été plus sensible aux effets diffusifs qu'aux effets convectifs des perturbations. Il s'agit probablement d'une limite de la démarche employée car cette dernière considère que les apports par convection sont uniquement liés au phénomène de condensation de la vapeur d'eau dans la paroi. Néanmoins, la prise en compte des effets diffusifs semble être prometteuse pour évaluer la robustesse d'une paroi théorique. De plus cette dernière est généralisable à tout types de paroi et applicable pour tout type de pare-vapeur à Sd fixe.

L'analyse a également montré que l'élévation du champ de teneur eau dans la paroi générée par les perturbations de membrane dépendait de « l'intensité » de la perturbation et également de l'emplacement géométrique de la perturbation par rapport aux composants de la paroi capable d'accumuler de l'humidité. Les cas d'études les plus à risques ont été identifiés lorsque la typologie de membrane choisie n'était pas adaptée ou lorsque des perturbations accidentelles étaient simulées.

6 CONCLUSIONS GENERALES

Synthèse du travail réalisé

L'objectif du projet est d'étudier l'influence de la mise en œuvre d'un pare-vapeur et le risque associé à ses perturbations sur l'apparition de pathologies liées à l'humidité. Les enseignements devront permettre :

- D'améliorer la compréhension des modes de transports d'humidité dans la paroi en fonction de la perturbation ;
- D'évaluer le risque de pathologies causées par une perturbation d'un pare-vapeur dans un but de **sensibilisation à la bonne mise en œuvre** ;
- De définir les données d'entrées à utiliser lors de simulations de transferts hygrothermiques en fonction du type de perturbation.

L'ensemble de ces résultats sera proposé aux professionnels (maîtres d'œuvre, entreprises, artisans) dans un rapport global, sous forme de fiches.

En aucun cas il s'agira d'interpréter ces résultats comme des preuves de tolérances à apporter sur les règles et recommandations techniques actuelles sur la pose d'un pare-vapeur. L'objet de ce travail est de mettre l'accent sur les conséquences à ne pas tenir compte des recommandations de mise en œuvre des produits dans l'ouvrage qui pourrait occasionner des désordres.

L'étude est basée, d'une part sur des mesures sur le produit de base et sur les parois en vraie grandeur et d'autre part sur des simulations. Le but est de relier les résultats de mesure sur le produit aux résultats de mesures sur les parois et ensuite pouvoir intégrer les données tirées des mesures pour réaliser des simulations à long terme et étendre ces simulations à d'autres parois.

La première tâche du programme de travail s'est située à l'échelle de la perturbation du pare-vapeur et avait pour but de mesurer ses caractéristiques de transferts diffusifs d'humidité (**Tâche 2**) et de transformer l'impact d'un défaut par un terme « source » ou produit équivalent en surface et en perméabilité. Les résultats ont permis de comparer les effets des types de perturbations sur les transferts diffusifs.

Des mesures de la résistance à l'écoulement d'air de plusieurs perturbations ont été réalisées. Ces résultats ont permis d'appréhender l'impact sur le transport d'humidité par transfert d'air de ces perturbations.

La deuxième tâche visait l'échelle paroi et avait pour but de mesurer l'impact d'une perturbation sur les champs hygrothermiques d'une paroi (**Tâche 3**). De plus, elle devrait permettre de confronter les approches mises en œuvre dans les simulations aux résultats expérimentaux.

La troisième tâche (**Tâche 4**), avait pour but d'élargir le champ de l'étude à d'autres configurations, par le calcul. Une phase de bibliographie initiale a permis de faire un état des lieux des méthodes existantes de prise en compte de perturbations en simulation. En lien avec la tâche 2 et la tâche 3, les échanges ont été représentés au mieux, dans les simulations hygrothermiques. Cette démarche appliquée à un ensemble de configurations à simuler,

permet d'étendre les enseignements à des cas plus représentatifs de la mise en œuvre classique dans le bâtiment.

Synthèse des résultats obtenus

La **Tâche 2** a permis de proposer une vingtaine de résultats de mesure avec différents défauts avec des membranes ayant des Sd de 2 ; 20 et 100m.

Ces défauts ont été établis en comparant la référence de transfert de vapeur d'eau de base à la valeur de transfert de vapeur d'eau de la membrane avec un défaut. Les différentes membranes ont été mesurées sans perturbation pour déterminer la base. Les résultats ont été surprenant car :

- La membrane annoncée avec un Sd de 2m a été mesurée sans défaut à 0.65 m,
- La membrane annoncée avec un Sd de 20 m a été mesurée sans défaut à 32.64 m,
- Enfin la membrane annoncée avec un Sd de 100 m a été mesurée sans défaut à 141.52 m.

Deux catégories de défauts ont été mis en évidence :

- Les défauts ayant uniquement des transferts diffusifs (diffusion de la vapeur d'eau seule),
- Les défauts alliant les transferts diffusifs (vapeur d'eau) et convectifs (transferts d'air).

Des essais de transferts convectifs ont également été réalisés pour évaluer ces transferts et permettre d'intégrer ces informations dans les logiciels de calculs pour évaluer les risques liés à l'humidité.

L'ensemble des résultats de mesure conduit aux valeurs μ équivalent du tableau suivant.

La surface sur laquelle doit être appliquée le μ équivalent et l'épaisseur du produit équivalent à prendre en compte dans les simulations de transferts hygrothermiques sont indiquées également dans ce tableau.

Tableau 24 : Tableau des valeurs de μ équivalents des différentes perturbations

Type de perturbation	Valeur de μ	Surface et épaisseur du produit fictif représentant la perturbation
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des agrafes seules	$\mu = 0.17 \text{ Sd} + 6.01$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des agrafes avec pastilles	$\mu = 16 * \text{Sd}^{0.3}$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a des clous avec la membrane prise entre deux liteaux	$\mu = 6.5 * \text{Sd}^{0.4}$	Valeur à appliquer sur une largeur de 27 mm et pour une épaisseur de 1 mm
Valeur μ équivalent lorsqu'il y a une entaille ou un deux lès non jointoyé	$\mu = 0.0006$	Valeur à appliquer sur une largeur de 1 mm et pour une épaisseur de 1 mm

Le débit d'air pouvant traverser une fente en kraft lorsqu'il y a une différence de pression de 4 Pa est de :

$$\text{Débit (m}^3/\text{h)} = 0.18498 \cdot d_0^{0.633}$$

Avec d_0 : diamètre équivalent de l'orifice en mm.

Le débit d'air pouvant traverser un pare-vapeur ayant une perturbation récurrente comme les agrafes et les clous est considéré comme nul lorsqu'il y a une différence de pression entre 0 et 250 Pa.

La **tâche 3** avait pour objectif principal la réalisation d'essais en cellules climatiques régulées sur 8 configurations qui ont été discutées et retenues durant les différents comités de pilotage. Les éventuels risques liés à l'humidité due aux perturbations dans la membrane pare-vapeur ont été aussi évalués.

La première partie de cette tâche a été la mise en place d'un protocole de mesure pour le suivi des profils de températures et d'humidités relatives au sein de parois soumises à une mise en pression (réalisée à l'aide d'une porte soufflante).

4 scénarios de climat ont été mis en œuvre pour chaque configuration testée :

- Scénario climat A : Paroi sans perturbation, sans mise en route de la porte soufflante
- Scénario climat B : Paroi sans perturbation, avec mise en route de la porte soufflante
- Scénario climat C : Paroi avec perturbation, sans mise en route de la porte soufflante
- Scénario climat D : Paroi avec perturbation, avec mise en route de la porte soufflante

Quel que soit la configuration considérée, lors des scénarios en diffusion seule (sans mise en route de la porte soufflante), la mise en œuvre de perturbations présente peu d'impacts observables sur les profils de pression de vapeur.

La partie convective liée aux transferts d'air est plus importante et perturbe considérablement les profils d'humidité au sein de la paroi.

Cependant, il est plus difficile d'identifier les chemins de passage de l'air avec la mise en route de la porte soufflante. Certaines interrogations sur le déroulement des essais ont été soulevées notamment des erreurs de mesures éventuelles des capteurs, l'emplacement exact des capteurs ou des fuites d'air parasites qui court-circuiteraient la partie mesurée.

Il faut également noter que les maquettes ont été réalisées avec une attention très particulière, notamment l'étanchéité entre l'échantillon et l'ouverture entre les 2 cellules climatiques. Malgré cela, il est difficile d'assurer une étanchéité parfaite (en particulier pour la configuration de paroi simplifiée) et il est envisageable qu'une fuite existe et perturbe donc les mesures.

Cette étude a permis de soulever des interrogations sur les mesures associant la thermique, l'humidité et les transferts d'air. En perspective, pour obtenir une meilleure connaissance des phénomènes convectifs en lien avec les transferts d'humidité, des études complémentaires seraient nécessaires.

La **tâche 4** comporte deux parties distinctes.

La première partie concerne la comparaison entre les résultats de mesure sur les parois de la tâche 3 et les simulations de transferts hygroaéothermiques.

Dans cette première partie l'incidence de chacun des paramètres d'entrée a été analysée et notamment :

- Les incertitudes potentielles des propriétés des matériaux,
- Les conditions initiales dans les matériaux,
- Les modèles de renouvellement d'air.

S'agissant d'un travail collaboratif entre des équipes différentes, une étape complémentaire a également permis de croiser et de valider les outils utilisés par chacune des équipes.

Après cette analyse les comparaisons entre les résultats de mesure sur les parois et les simulations ont pu être réalisées.

Les éléments obtenus dans la tâche 2 ont permis de modéliser les effets diffusifs d'une perturbation de membrane. La différence des résultats entre calcul et mesure est très faible. L'analyse des champs de pression de vapeur calculés et mesurés a mis en évidence une différence certainement liée à l'emplacement des points d'observations. Cette démarche a donc été retenue pour la suite des simulations.

Ensuite la comparaison entre calculs et mesure s'est orientée vers les parois avec une différence de pression totale entre les deux ambiances séparées par la paroi mesurée.

La prise en compte séparément les effets diffusifs et convectifs d'une entaille en simulation hygrothermique a été décrite. Pour valider cette démarche, il a été tenté de reproduire par le calcul les résultats observés expérimentalement en considérant les limites de l'exercice mis en évidence précédemment.

L'interprétation de l'effet convectif dans les résultats expérimentaux a montré que de fortes interrogations subsistaient dans la compréhension des phénomènes physiques en jeu (en particulier lors des essais avec la mise en fonctionnement d'une porte soufflante). Ainsi, de fortes incertitudes demeurent sur les chemins réels de passage de l'air dans la paroi expérimentale ainsi que les débits réels en jeu. Cela laisse donc beaucoup de liberté au modélisateur pour calibrer le modèle convectif par renouvellement d'air. Il a donc été possible de reproduire par le calcul les résultats expérimentaux en condition convective, mais sans pour autant pouvoir valider les hypothèses de modélisation. Ce travail n'a pas été suffisant pour valider cet aspect de la démarche.

Des simulations supplémentaires ont donc été réalisées afin de confronter le modèle de renouvellement au modèle d'infiltration. Des effets parasites liés au modèle par renouvellement d'air ont été mis en évidence sans avoir pu identifier de méthodes pour les compenser. Ainsi, le modèle par infiltration a été privilégié. Enfin, une méthode de calibration du modèle d'infiltration pour distinguer les cas avec ou sans défaut accidentel a été proposée. Elle se base sur des résultats expérimentaux obtenus lors du projet ANR MOBAIR. Cette démarche est directement appliquée lors de la réalisation des différentes simulations pour la seconde partie de ce travail..

Cette dernière est consacrée aux simulations des procédés de parois courantes suivants :

- Paroi isolée de combles perdus ;
- Paroi légère isolée ;
- Paroi lourde isolée ;
- Toiture isolée en rampant.

La paroi isolée de combles perdus

Les simulations des parois comportant des perturbations de membranes n'indiquent pas de pathologies liées à l'humidité.

Les apports d'humidité liés à la convection simulés par le modèle d'infiltration sont négligeables. Même pour la paroi comportant une entaille, le modèle d'infiltration n'a que peu d'effets sur les résultats simulés. Le modèle de prise en compte pour l'effet convectif pourrait sous-estimer les apports sous toutes leurs formes ce qui est une limite à prendre en compte dans ces résultats.

Les cas avec isolants non hygroscopiques et hygroscopiques sont des cas non pathologiques. De plus, il faut noter que l'isolant hygroscopique permet aussi de stabiliser la teneur en eau dans la solivette ; ce qui la rend moins sensible aux variations extérieures. En contrepartie, la teneur en eau dans l'isolant est plus élevée mais reste en deçà des seuils pathologiques.

Le climat chaud et humide (en période estivale) du comble non chauffé contribue à humidifier par « l'extérieur » la paroi. Ainsi, les configurations les plus étanches à la vapeur (avec une perméabilité à la vapeur de membrane plus élevée) sont les configurations où on observe le plus d'accumulation d'humidité dans l'isolant. Néanmoins cette accumulation n'engendre pas le dépassement de seuils de pathologies. De plus, les perturbations permettent de laisser passer l'humidité et réduisent localement l'accumulation d'eau dans l'isolant.



En conclusion les perturbations dans les parois de combles perdus n'engendrent pas de risques liés à l'humidité. Mais la membrane pare-vapeur est nécessaire. La supprimer augmenterait fortement les pertes thermiques par infiltration d'air à travers le plafond. Dans ces conditions, il faudrait limiter la source (provenant des combles) en assurant une aération de ce comble, en particulier durant la période la plus favorable au séchage de l'année.

La paroi légère isolée

Pour les parois légères, des risques de pathologie sont identifiés dès lors que la membrane d'étanchéité est trop perméable à la vapeur d'eau, soit de par ses caractéristiques ($S_d \leq 2m$), soit à cause de perturbations (entailles ou lés non jointoyés).

Dans ces situations, la paroi se charge en eau en hiver, et atteint des seuils pathologiques dans les zones les plus froides (côté extérieur donc), en particulier dans l'OSB de contreventement. L'effet pathologique des entailles est atténué avec l'isolant hygroscopique mais demeure au-delà des seuils.

Dès lors que la membrane est suffisamment étanche à la vapeur d'eau ($S_d \geq 18m$) et bien mise en œuvre, afin de bloquer les transferts d'humidité entre l'intérieur et la paroi, aucun risque pathologique n'est observé dans ces simulations.

La paroi lourde isolée

Les parois verticales en parpaing simulées ne montrent aucun risque hygrothermique. La stabilisation dans la paroi s'effectue rapidement, mais les niveaux d'humidités restent néanmoins élevés, avec des valeurs proches de 95% dans la structure et de 98% dans l'isolant

(non hygroscopique). Pour un complexe en structure lourde, il est à noter qu'une membrane pare-vapeur avec un $S_d=2m$ présente les niveaux d'humidité les plus élevés.

Les perturbations dans la membrane entraînent une forte augmentation de la teneur en eau dans les éléments, et notamment dans l'isolant à l'interface avec la structure froide. Les plus hauts niveaux sont atteints avec une perturbation dite récurrente. Une perturbation accidentelle ne semble pas entraîner de défauts complémentaires avec les choix de modélisations qui ont été établis.

L'isolant hygroscopique permet de créer un tampon hygroscopique dans la paroi, contribuant ainsi à diminuer l'humidité dans la structure porteuse. Cependant, la teneur en eau de l'isolant augmente, ce qui approche son état des limites pathologiques pour la famille des isolants biosourcés.

Enfin, les apports convectifs ne semblent pas faire varier les teneurs en eau dans la paroi. L'augmentation de la teneur en eau totale de la paroi semble due aux défauts de la membrane.

La toiture en rampant isolée

Les toitures sous rampant ne présentent aucun risque de pathologie, malgré une faible augmentation de la teneur en eau recensée lors de la dernière année de simulation sur les différents cas traités.

Une membrane pare-vapeur ayant un $S_d=2m$ semble peu adaptée à cet assemblage, entraînant alors les teneurs en eau les plus importantes.

Les perturbations dans la membrane ont un faible impact sur la teneur en eau des différents éléments de la paroi. L'augmentation est la plus importante pour les cas avec une perturbation récurrente.

Les simulations comprenant une perturbation accidentelle n'ont qu'un impact très faible, Elles n'augmentent la teneur en eau de seulement quelques kg/m^3 durant la période hivernale.

Conclusions générales

Les mesures sur les produits ont permis de définir des modèles de diffusion de la vapeur d'eau pour les simulations.

La comparaison de ces résultats avec les essais uniquement diffusifs montre des différences faibles et explicables. Ces phénomènes diffusifs sont très localisés dans la paroi. Ils ne sont pas très importants et n'entraînent que peu d'évolution de la teneur en eau et de l'humidité relative dans les composants de la paroi. Mais pour des procédés dont les humidités sont proches des limites des risques, ces perturbations peuvent faire basculer leur état au-delà de ces limites et entraîner des risques liés à l'humidité ; notamment les parois ayant une barrière aux transferts de vapeur d'eau en face extérieure (toiture terrasse, paroi à ossature bois avec contreventement extérieur, etc...).

Les résultats de simulations ont montré que l'apport d'humidité lié aux phénomènes de convections et simulé par le modèle d'infiltration n'avait que peu d'effet sur le comportement hygrothermique des parois.

Il faut préciser que le modèle d'infiltration utilisé est une adaptation d'une méthode existante à la problématique traitée dans ce projet faute d'avoir pu correctement caler les simulations aux résultats de mesure. Ce modèle contient des limites puisqu'il ne considère qu'un seul mode d'apport d'humidité possible dans la paroi (par le phénomène de condensation). Pour améliorer l'évaluation de l'impact des perturbations de membrane, il faudrait alors utiliser un modèle qui prend en compte les phénomènes convectifs dans leur généralité mais ce dernier n'existe pas actuellement.

Les phénomènes convectifs sont très difficiles à appréhender. Beaucoup de paramètres peuvent influencer ces phénomènes. En laboratoire des essais pourraient être réalisés pour définir les différents phénomènes. Mais il est probable que dans la réalité d'un chantier des fuites au niveau des points singuliers (jonction paroi/menuiserie, liaison mur/plancher...) apparaissent et perturbent alors les transferts d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment, d'où l'importance de la mise en œuvre et des points singuliers en phase chantier.

En perspective, pour obtenir une meilleure connaissance des phénomènes convectifs en lien avec les transferts d'humidité, plusieurs pistes seraient à étudier :

- Nécessité d'avoir une meilleure connaissance sur les incertitudes liées aux conditions initiales (exemple : impact de l'hygroscopie du bois présents dans les parois) pour l'interprétation des résultats expérimentaux.
- Importance de mesurer la pression de part et d'autre des échantillons en continu,
- Importance de démarrer les essais par un essai simple pour éventuellement mettre en place des correctifs pour limiter les erreurs de mesure,
- Nécessité de connaître le débit traversant l'échantillon,
- Nécessité de calibrer le laboratoire avant le lancement des mesures (recherche de fuites éventuelles, exemple : caméra thermique).

Après avoir cadrer le dispositif de mesure, les investigations suivantes pourraient être envisagées :

- Investigation sur l'impact de la mise en œuvre du film pare-vapeur au niveau des points singuliers.
- Nouveau protocole avec plus de mesures « proche de la perturbation ».

La prise en compte de ces différents éléments permettrait de s'approcher d'une quantification des phénomènes.

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Janssens, « Reliable control of interstitial condensation in lightweight roof systems: calculation and assessment methods », Ph.D. Thesis, Departement of Civil Engineering, KU Leuven, Belgium, 1998.
- [2] A. Janssens et H. Hens, « Interstitial Condensation Due to Air Leakage: A Sensitivity Analysis », *J. Build. Phys.*, vol. 27, n° 1, p. 15-19, juill. 2003.
- [3] D. Derome, « Moisture Accumulation in Cellulose Insulation Caused by Air Leakage in Flat Wood Frame Roofs », *J. Build. Phys.*, vol. 28, n° 3, p. 269-287, janv. 2005.
- [4] G. Desmarais, D. Derome, et P. Fazio, « Mapping of Air Leakage in Exterior Wall Assemblies », *J. Therm. Envel. Build. Sci.*, vol. 24, n° 2, p. 132-154, oct. 2000.
- [5] C. Belleudy, A. Kayello, M. Woloszyn, et H. Ge, « Experimental and numerical investigations of the effects of air leakage on temperature and moisture fields in porous insulation », *Build. Environ.*, vol. 94, p. 457-466, déc. 2015.
- [6] C. Belleudy, M. Woloszyn, M. Chhay, et M. Cosnier, « A 2D model for coupled heat, air, and moisture transfer through porous media in contact with air channels », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 95, p. 453-465, avr. 2016.
- [7] P. Kölsch, A. Zegowitz, B. Nusser, D. Zirkelbach, H. Künzle, et R. Wagner, « Airflow through Lightweight Wall Assemblies - Influence of Size and Location of Leakages », in *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII International Conference*, Clearwater Beach, Florida, 2016.
- [8] A. TenWolde, C. G. Carll, et V. Malinauskas, « Air pressures in wood frame walls », in *Proceedings Thermal VII. ASHRAE Publications*, Atlanta, 1999.
- [9] DIN, « DIN 68800-2: Wood preservation - Part 2: Preventive constructional measures in buildings ». AFNOR, févr-2012.
- [10] H. M. Künzle, D. Zirkelbach, et B. Schafaczek, « Modelling the effect of air leakage in hygrothermal envelope simulation », in *Building Enclosure Science & Technology (BEST3) Conference*, Atlanta, 2012.
- [11] « WTA Guideline 6-2: Simulation of heat and moisture transfer ». 2014.
- [12] A. Piot, « Étude des effets des infiltrations d'air humide dans une paroi de maison à ossature bois - Rapport de Post-Doctorat », CSTB et Fraunhofer IBP, 2010.
- [13] L. Wang et H. Ge, « Effect of air leakage on the hygrothermal performance of highly insulated wood frame walls: Comparison of air leakage modelling methods », *Build. Environ.*, vol. 123, p. 363-377, oct. 2017.
- [14] Garnier, Géraldine, Sylvain Boulet, et Mickaël Pailha. 2016. « Etudes expérimentales - PROJET MOBAIR - « Maîtriser les transferts d'air et leur impact sur le comportement hygrothermique des maisons à ossatures bois » - Rapport de synthèse »
- [15] Zirkelbach, D., Hartwig M. Kunzel, B. Schafaczek, et R. Borsh-Laaks. 2009. « Dampfkongvention wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen ». In . Berlin/Germany.