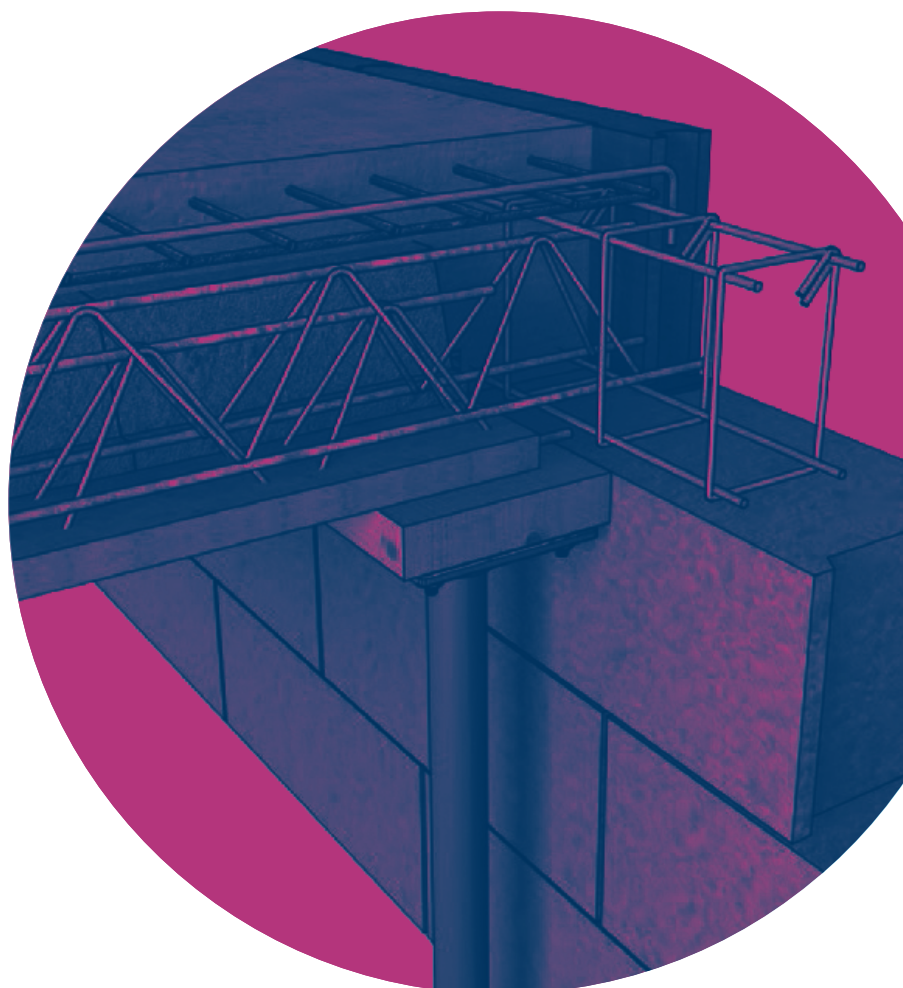


IMPACT DE LA VENTILATION SUR LA MIGRATION D'HUMIDITÉ DANS L'ENVELOPPE

JANVIER 2022



AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

PARTENAIRES PROFEEL :

Pouvoirs Publics



Porteurs



Financeurs



Filière Bâtiments

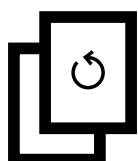


PROFEEL, un programme financé par le dispositif des certificats d'économie d'énergie (CEE)



SOMMAIRE

○	RÉSUMÉ EXÉCUTIF	4
○	NOMENCLATURE	5
①	INTRODUCTION	6
②	ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : CRITÈRES D'ANALYSE DES RÉSULTATS DE CALCULS HYGROTHERMIQUES	7
③	DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE UNIDIMENSIONNEL DE TRANSFERTS HYDRIQUES	10
④	DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE FUITE D'AIR THERMO-HYGRO-AÉRAULIQUE	13
⑥	DESCRIPTION DES CAS D'ÉTUDE	22
⑤	RÉSULTATS	33
⑦	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	41
⑧	RÉFÉRENCES	42
⑨	ANNEXES	44



VERSION
Initiale

DATE DE LA PUBLICATION
Janvier 2022

MODIFICATIONS



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

La migration d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment est un sujet important du fait du risque sur la pérennité du bâti. Elle est par ailleurs à l'origine de la réglementation en ventilation.

Bien qu'il soit possible d'installer différents systèmes de ventilation (par extraction / insufflation / double flux) ou encore d'installer des systèmes de chauffage et rafraîchissement par vecteur air, leur impact sur cette migration n'est que très peu documenté.

L'objectif du présent travail est donc d'apporter des analyses qualitatives sur l'impact du type de système de ventilation sur les risques liés à la migration d'humidité dans les parois des logements.

Pour ce faire, le logiciel MATHIS, développé par le CSTB, a été complété d'un module permettant de calculer les transferts d'humidité au sein des murs par diffusion à l'aide d'un modèle classique. Puis, un modèle spécifique a été développé pour prendre en compte la migration d'un flux d'air humide au sein de la paroi. Ce modèle a pu être comparé à des données de la littérature pour s'assurer de sa pertinence.

De nombreuses combinaisons de parois, de systèmes de ventilation et de zone climatique ont été définies afin de

balayer de manière large les risques possibles. Plusieurs critères ont été sélectionnés afin de définir le niveau de risque associé à une configuration donnée. Les risques analysés sont en particulier l'accumulation d'humidité dans la paroi, la condensation, le développement de moisissures et la dégradation des matériaux bois ou biosourcés

Les résultats montrent qu'en cas de bonne étanchéité à l'air les parois ne présentent pas de risque particulier, quel que soit le système de ventilation, y compris en usage « pièce humide ».

Pour les parois en béton banché isolées par l'intérieur, les résultats montrent un risque accru en ventilation par insufflation si les parois des pièces humides présentent des infiltrations d'air. Il est donc particulièrement important de soigner l'étanchéité à l'air et les traversées de paroi dans ces configurations. Dans les autres configurations, un surplus d'humidité est prévisible en cas d'infiltration pour une ventilation par insufflation par rapport à une ventilation par extraction, mais ce surplus ne semble pas suffisant pour créer des risques hygrothermiques significatifs au vu des critères établis.



NOMENCLATURE

symbole	description	unité
Cp	chaleur spécifique	J/kg.K
hc	coefficient d'échange de chaleur convectif	W/m ² /K
hm	coefficient de transfert de vapeur d'eau	kg/s/m ² /Pa
HR	humidité relative	% ou -
L	longueur	m
Lv	chaleur latente de vaporisation	J/kg
m	masse	kg
Mw	masse molaire de l'eau	kg/mol
n	exposant de la loi débit-pression d'un composant aéraulique	-
pv	pression partielle de vapeur	Pa
P	pression	Pa
Q	débit volumique	m ³ /h
R	constante des gaz parfaits	J/mol.K
S	surface	m ²
t	temps	s
T	température	°C ou K
VMC	Ventilation mécanique contrôlée (extraction)	
VIR	Ventilation mécanique par insufflation répartie	
VIC	Ventilation mécanique par insufflation centralisée	
w	teneur en eau	kg/m ³
wm	teneur en eau massique	%-masse ou kg/kg
Y	fraction massique de vapeur d'eau dans l'air	kg/kg
δ	perméabilité à la vapeur	kg/m.s.Pa
Δ	différentiel	-
λ	conductivité thermique	W/m.K
μ	facteur de résistance à la diffusion de vapeur	-
ρ	masse volumique	kg/m ³
φ	humidité relative	% ou -
indices		
mat	matériau	
sat	saturation	
ref	référence	
f	relatif à une fuite d'air	
w	relatif à une paroi	
exposants		
m	couche de matériau	
"	par unité de surface	
.	par unité de temps	

1

INTRODUCTION

1

1

L'HUMIDITÉ

L'humidité est l'une des premières causes de dégâts dans le bâtiment. Le projet de recherche français Humibatex [1] avait par exemple recensé, en interrogeant divers acteurs, de nombreux dommages liés à l'humidité. Pour ce qui concerne les parois, citons :

- Corrosion des armatures en BA en façade
- Désordres dans la construction bois
- Remontées capillaires
- Condensation en sous-face de couverture métallique
- Baisse de performance de l'isolation thermique
- Mousse et moisissure

- Efflorescences/tâches de bistre
- Pourrissement du bois
- Éclatement des matériaux
- Perte de résistance des murs en terre crue
- Tassement des isolants hygroscopiques (manque de données/seuil)

Par ailleurs, des outils existent pour modéliser et prévoir les conditions hygrothermiques dans une paroi soumise à certaines sollicitations. Mais les liens entre dommages visibles sur le terrain et résultats de modélisation ne sont pas simples à établir, et peu de données existent à ce sujet.

1

2

LIEN AVEC LA VENTILATION ET MODÉLISATION

Plusieurs auteurs ont montré des effets d'accumulation d'humidité dans les parois en présence d'un flux d'air, en particulier en cas de surpression entre l'intérieur et l'extérieur [2]–[8].

Ces études, pour la plupart, sont menées avec une surpression constante et des conditions aux limites fixes, ce qui accroît significativement les flux et le risque d'accumulation d'humidité. Il paraissait donc pertinent de travailler dans des conditions variables, et à des niveaux de pression plus réaliste.

Le modèle de référence WUFI, dispose d'un module permettant de prendre en compte de manière simplifiée l'apport d'humidité lié à un flux d'air au sein de la paroi [9] ; ce modèle est intéressant mais présente des limites, la

principale étant que la pression appliquée est soit liée au tirage thermique (calcul fait par wufi), soit liée à une surpression mécanique constante. Une dépression (cas de la ventilation par extraction ou inversion liée au vent) ne peut pas être considérée. En outre, c'est à l'utilisateur de définir à l'avance quel sera l'emplacement où se situera le risque de condensation.

Un nouveau modèle a donc été développé et implémenté dans Mathis [10], [11], permettant le calcul global : à la fois aéraulique et niveau de pression dans le logement, écarts de pression au niveau des murs, flux hygrothermique au sein des parois, et flux d'air humide, recalculé à chaque pas de temps.

2

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : CRITÈRES D'ANALYSE DES RÉSULTATS DE CALCULS HYGROTHERMIQUES

2

1

NORMES

En Europe, deux normes définissent chacune une manière de réaliser une étude des risques hygrothermiques dans les parois de bâtiment : la norme EN 13788 [12] et la norme EN 15026 [13].

La norme EN 13788, plus ancienne, utilise la méthode dite « de Glaser » pour évaluer les risques de condensation dans les parois. Cette méthode ne nécessite pas de moyens de calculs poussés (elle peut s'appliquer à la main). Elle est plutôt adaptée aux parois légères ou peu hygroscopiques, non soumises à des flux d'air ou d'eau sous forme liquide (capillarité). Les calculs sont faits en régime permanent, mois par mois, et évaluent s'il y a de la condensation, combien, et s'il y a suffisamment de séchage durant les mois d'été. Cette méthode est de nos jours de moins en moins utilisée, car des outils plus précis sont désormais disponibles.

La norme EN 15026 est la norme de référence à l'heure actuelle. Elle spécifie une méthode de calcul basée sur les équations de transferts couplés de chaleur et d'humidité, résolues en régime dynamique, tenant compte de l'inertie

thermique des parois, des phénomènes de sorption hygroscopique et de transferts par capillarité, en plus de la simple diffusion de vapeur. Ces équations seront détaillées au §3.1. Cette norme définit les conditions aux limites et les équations à résoudre, mais toutefois ne spécifie pas de méthode d'analyse des résultats en termes de risques de dégradation des parois.

En France, les constructions à ossature bois sont régies par le DTU31-2 [14], qui spécifie que les bois employés doivent être de classe d'emploi 2, telle que définie dans la norme NF EN 335 [15] (« *bois sous abris, non exposé aux intempéries mais humidification occasionnelle non persistante possible : il peut se former de la condensation en surface* »). Cette dernière précise également que le développement de champignons n'est pas possible à une teneur en eau massique inférieure à 20 %-m.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de norme régissant la teneur en eau ou l'exposition à l'humidité pour d'autres types de matériaux constructifs.

2

2

LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

Berger et ses coauteurs [16] font une large revue de la littérature scientifique sur les risques de dégradations liés à l'humidité dans les parois ; ils listent différents types de défaillances liés à l'humidité, avec plusieurs références par type de dommage. Les principaux risques considérés sont :

- Chute de la résistance mécanique suivant la teneur en eau
- Chute de la résistance thermique des isolants

● Déformation : retrait/gonflement des bois

- Gel
- Moisissures
- Corrosion

Ces types de risques sont les plus répandus dans la littérature traitant du sujet.

À titre d'exemple, on peut citer quelques articles présentés lors de la conférence NSB 2020 (*12th Symposium on Building Physics*), qui fait référence pour les travaux sur l'humidité dans les bâtiments, qui donnent un aperçu représentatif des dommages fréquemment étudiés. *K. Calle* [17] présente une analyse de sensibilité au gel sur des murs en brique, une évaluation du risque de putréfaction d'un bois encastré dans la brique, et un risque de développement de moisissure en surface intérieure. Dans ce travail, le risque de gel est corrélé au taux volumique de glace, mais non chiffré. *Viljanen* [18] présente une étude expérimentale sur plus de 2 ans sur des murs à ossature bois très isolés et une toiture, avec évaluation par modèle [19] du risque de moisissure dans la cavité extérieure. *Johansson* [20], [21] développe son propre modèle de risque de moisissures sur différents matériaux, et présente une humidité relative « de sécurité », en dessous de laquelle la croissance de micro-organismes peut être exclue. *Hansen* [22] analyse également les risques de moisissure en comparant des données expérimentales à différents modèles.

Concernant les matériaux à base de bois et de produits biosourcés, les auteurs de l'étude [23] recommandent que la teneur en eau massique ne dépasse jamais les 30 %-m (seuil au-delà duquel de l'eau liquide apparaît et peut s'écouler) ; ils recommandent également de ne pas dépasser 23 %-m plus de 8 semaines par an, afin de ne pas permettre le développement de la putréfaction. Nous retiendrons ces critères pour les matériaux non structurels (isolants par exemple). En revanche, pour les matériaux structurels, nous limiterons cette valeur à 20 %-m pour être plus « sécuritaire » [15].

Pour évaluer le risque de condensation dans la paroi, deux cas de figure seront considérés : dans les matériaux, on considérera que de la condensation peut apparaître à partir du moment où l'humidité relative calculée est supérieure à 98 %HR. On calculera le nombre d'heures où cette valeur est dépassée pour comparer les parois. En dehors des matériaux hygroscopiques, la norme [12] préconise ne de pas excéder une masse de 200g/m² pour éviter que la condensation formée ne ruisselle. Ces deux seuils seront donc utilisés.

Pour le développement de moisissures à l'interface entre les matériaux, nous utiliserons le modèle dit « VTT » (Centre de recherche technique de Finlande, *Teknologian tutkimuskeskus*), largement utilisé dans la littérature [19], [24]–[26]. Ce modèle de post-traitement calcule, en fonction de la température et de l'humidité relative à chaque pas de temps, la croissance ou la décroissance des micro-organismes. La vitesse de croissance dépend fortement du type de matériau (bois, papier, béton, verre etc.) Un « indice de moisissure » est ainsi calculé à chaque pas de temps. Les auteurs préconisent de ne pas dépasser un seuil de 3 à l'intérieur d'une paroi. Les valeurs prises pour calculer cet indicateur sont données en annexe.

Concernant les risques mécaniques liés à l'humidité dans le béton, on trouve peu de littérature. Shoukri [27] donne

une équation pour la résistance en compression fonction de la teneur en eau. L'analyse des valeurs fournies montre que pour atteindre une réduction de 5 % de la résistance, la teneur en eau correspondrait à une humidité relative supérieure à 100 %, ce qui correspond à un béton immergé ou en cours de prise initiale, et non à la vie en œuvre. Cette situation ne correspond pas aux cas étudiés ici. Les résultats présentés par [28] donnent une équation similaire de réduction de la résistance en compression. Une autre publication [29] donne des résultats peu exploitables car sans information sur les niveaux d'humidité intermédiaires entre sec et saturé. Ce risque ne sera donc pas considéré dans cette étude.

Pour de la brique pleine, les mesures de [30] montrent une baisse de 15 % de la résistance en compression entre l'état « séché à l'air libre » (état de référence) et l'état saturé. Si on suppose une relation linéaire entre le degré de saturation et la résistance mécanique, on aboutit aux mêmes conclusions que pour le béton : les teneurs en eau pour aboutir à une chute de 5 % de la résistance sont trop élevées pour entrer dans le cadre de la présente étude. Les mesures de [31] donnent une chute de 10 % de la résistance mécanique entre l'état sec (au four) et l'état saturé, ce qui conforte les conclusions précédentes. Les résultats de [32] sont plus complexes à interpréter, la teneur en eau à saturation n'étant pas chiffrée. Toutefois, les teneurs en eau étudiées semblent élevées, car la conductivité thermique des échantillons est multipliée par 3 ou 4. Ce risque ne sera donc pas considéré dans cette étude.

La durée d'initiation de la corrosion des armatures dans du béton armé peut être de 20 à 30 ans, d'après les différentes études citées dans [33]. Dans le cadre de calculs réalisés pour du bâtiment neuf, la corrosion n'est donc pas un risque pertinent à analyser. Pour des calculs en rénovation, les hypothèses à faire sur la durée depuis l'initiation éventuelle seraient fortes et entraîneraient trop d'incertitude dans l'analyse des résultats. De plus, la corrosion n'est pas liée uniquement à la présence d'humidité mais également à la présence d'agents chimiques (types chlorures), non représentés dans nos calculs [34]. Ce risque ne sera donc pas considéré dans cette étude.

De manière similaire, si l'on sait évaluer expérimentalement le risque lié au cyclage gel/dégel pour un matériau donné, le lien entre teneur en eau calculé par modélisation et le risque d'éclatement est peu documenté. On peut tout de même citer les approches présentées dans [35], [36]. Le risque dépend des caractéristiques de la structure microscopique du réseau poreux et varie d'un matériau à l'autre au sein d'une même catégorie (certaines briques sont plus sensibles, d'autres moins par exemple). De plus, ce risque va se situer majoritairement sous l'enduit extérieur, et sera accentué par la présence d'une isolation par l'extérieur et d'une exposition à la pluie, non modélisée ici. Nous n'évaluerons donc pas le risque lié au gel dans le cadre de cette étude.

dommage	où	quand	seuil
accumulation d'humidité	toute la paroi	évolution entre la dernière et l'avant-dernière année	stabilité ¹ ou diminution
saturation des bois et biosourcés	par couche de maximum 1 cm	la dernière année	teneur en eau à 30 %-m
dégradation bois structurel	par couche de maximum 1 cm	maximum 8 semaines par an, la dernière année	teneur en eau à 20 %-m
dégradation isolants biosourcés	par couche de maximum 1 cm	maximum 8 semaines par an, la dernière année	teneur en eau à 23 %-m
formation de condensat risquant de s'écouler	sur le trajet de la fuite d'air	la dernière année	eau condensée 200 g/m ²

1. La stabilité est considérée comme une variation inférieure à 2 %/an

TABLEAU 1 Critères retenus pour analyser les résultats

3

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE UNIDIMENSIONNEL DE TRANSFERTS HYDRIQUES

3

1

DESCRIPTION DU MODÈLE

Un modèle classique de transferts hygrothermiques a été implémenté dans l'outil de calculs Mathis [10], [11]. Ce modèle est basé sur les travaux de Künzle [37]. Le bilan hydrique fait intervenir les flux par diffusion de vapeur et conduction d'eau liquide, ainsi que la capacité de sorption du matériau. Ces

flux s'ajoutent aux échanges par conduction. Le couplage avec les flux thermiques résulte de l'énergie latente de sorption et de la chaleur spécifique de l'eau présente dans le matériau. De plus, les propriétés des matériaux dépendent des niveaux d'humidité et de température.

$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[-\left(\delta_{mat} P_{sat} + D_w \frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \right) \nabla \cdot \varphi^o - \delta_{mat} \varphi \frac{dP_{sat}}{dT} \nabla \cdot T \right]$$
$$(\rho_{mat} C_{pmat} + w(\varphi) C_w) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[-\left(\lambda_{mat} + L_v \delta_{mat} \varphi \frac{dP_{sat}}{dT} \right) \nabla \cdot T - L_v \delta_{mat} P_{sat} \nabla \cdot \varphi \right]$$

Pour modéliser une paroi, ces équations sont discrétisées dans une approche à 1 dimension, avec un maillage spatial à pas variable. Un nœud est présent en frontière de

chaque matériau et assure la continuité des échanges ou grandeurs d'état. L'approche numérique est similaire aux travaux de [38].

3

2

IMPLÉMENTATION DANS MATHIS

Un solveur spécifique a été développé pour résoudre les équations de transferts hygrothermiques ci-dessus. Il résout les équations de transfert par bloc physique (d'abord les humidités puis les températures et ainsi de suite jusqu'à convergence à chaque pas de temps). Contrairement au modèle de transfert thermique déjà implémenté, pour lequel on résout les températures de paroi en même temps que les températures d'air au cours des itérations du solveur aéraulique, les température et humidités de parois du modèle hygrothermique sont ici calculées et mises à jour uniquement à la fin de chaque pas de temps

du solveur aéraulique. Le pas de temps de la simulation doit donc le cas échéant être adapté pour s'assurer d'une bonne représentation des constantes de temps du système. Dans le cadre de la présente étude, cette approche par couplage 'ping-pong' entre le solveur aéraulique et le solveur hygrothermique s'est révélée tout à fait compatible avec le pas de temps classiquement utilisé pour les calculs aérauliques à l'échelle d'un logement (15 minutes).

De nouveaux paramètres sont alors disponibles pour permettre à l'utilisateur de décrire en données d'entrée du calcul les caractéristiques des matériaux (mot-clef

« &MAT »), l'assemblage de ces dernier en type de parois (mot-clef « &SURF ») puis la création des parois proprement dites dans le modèle géométrique de bâtiment (mot-clef « &WALL »).

Les tableaux ci-après présente la liste des paramètres. Les nouveaux paramètres de MATHIS développés spécifiquement dans le cadre des présents travaux y apparaissent en bleu.

&MAT /				
Paramètre	Unité	Type	Défaut	Domaine
ID	---	string	'DEFAULTCONCRETE'	identifiant du matériau
RHO	kg/m ³	double	2200	densité du matériau
CS	J/kg.K	double	1000	chaleur spécifique du matériau
LAMBDA	W/m.K	double	1.75	conductivité thermique du matériau
DW	m ² /s	double	6.D-10	diffusivité hydrique du matériau
PERM	s	double	1.D-15	perméabilité à la vapeur d'eau
SORP	kg/m ³	double	20.D0	isotherme de sorption
LAMBDATEBLE	{'---,W/m.K}	{1001,2}*double	{9999,9999}	conductivité thermique fonction de HR
DWTABLE	{'---,m ² /s}	{1001,2}*double	{9999,9999}	diffusivité hydrique fonction de HR
PERMTABLE	{'---,s}	{1001,2}*double	{9999,9999}	perméabilité à la vapeur d'eau fonction de HR
SORPTABLE	{'---,kg/m ³ }	{1001,2}*double	{9999,9999}	isotherme de sorption fonction de HR
LAMBDAFILE	---	string	null'	fichier fournissant la conductivité thermique fonction de HR
DWFILE	---	string	null'	fichier fournissant la diffusivité hydrique fonction de HR
PERMFILE	---	string	null'	fichier fournissant la perméabilité à la vapeur d'eau fonction de HR
SORPFILE	---	string	null'	fichier fournissant l'isotherme de sorption fonction de HR

TABLEAU 2 Paramètres permettant de saisir les caractéristiques des matériaux

&SURF/				
Paramètre	Unité	Type	Défaut	Domaine
ID	---	string	'SURFDEFAULT'	identifiant de la paroi
NSLAB	---	integer	1	nombre de couches constituant la paroi
MATIDS	...	nslab*list(string)	{'DEFAULTCONCRETE'}	identifiants des matériaux des différentes couches
E	m	nslab*double	{0.2}	épaisseurs des différentes couches
NODEPERSLAB	---	integer	5	nombre de nœuds par couche
NODES	---	nslab*int	{5}	nombre de nœuds internes des différentes couches (remplace NODEPERSLAB)
MESH_RATIO	---	double	1.D0	raison de la loi géométrique de variation de la taille des mailles (>=1)
HMCT	kg/s/m ² /Pa	{nslab-1}*double	{1.D-6}	coefficient d'échange massique des nœuds de contacts entre couches
HCCT	W/m ² /K	{nslab-1}*double	{1.D3}	coefficient d'échange thermique des nœuds de contact entre couches
HRINI	%	nslab*double	{9999}	humidité relative initiale des différentes couches
TINI	°C	nslab*double	{9999}	température initiale des différentes couches

TABLEAU 3 Paramètres permettant de saisir les caractéristiques des différents types de parois

&WALL/				
Paramètre	Unité	Type	Défaut	Domaine
ID	---	string	MURDEFAULT	identifiant du mur
WALLTYPE	---	string	'THERMAL'	type de mur
SURFID	---	string	SURFDEFAULT	identifiant du type de paroi
LOCIDS	---	stringx2	{EXT,EXT}	identifiants des 2 noeuds séparés par le mur
AREA	m ²	double	0	surface du mur
HCONV	W/m ² /K	doublex2	{5,5}	coefficients d'échange convectif de part et d'autre du mur
HM	kg/s/m ² /Pa	doublex2	{2D-10,2D-10}	coefficients d'échange massique de part et d'autre du mur
EPS	---	doublex2	{0,9,0,9}	émissivités de part et d'autre du mur
ABS	---	doublex2	{0,4,0,4}	coefficients d'absorption de part et d'autre du mur
SLOPE	°	double	90	inclinaison d'un mur extérieur par rapport à l'horizontale
ORIENTATION	°	double	180	orientation d'un mur extérieur (0°=Nord)

TABLEAU 4 Paramètres permettant de placer les parois dans le modèle géométriques de bâtiment

3

3

VALIDATION

Pour valider les développements réalisés, nous nous sommes appuyés sur deux cas de référence de la littérature classiquement utilisés comme benchmark des modèles de transferts hygrothermiques [39], [40].

Ces cas de référence font intervenir :

- une situation de séchage isotherme d'un mur monocouche sur 1000 heures ;

- une situation de transfert thermo-hydriques d'une toiture isolée sur cinq années.

Le détail de ces cas de référence et les résultats obtenus sont présentés en Annexes (cf. §9.1 page 36 et §9.2 page 37)

4

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE FUITE D'AIR THERMO-HYGRO- AÉRAULIQUE

4 1

DESCRIPTION DU MODÈLE

Le modèle vise à reproduire les flux d'humidité générés dans une paroi par un défaut d'étanchéité. La fuite d'air est représentée par un ensemble de nœuds d'air. Il y a autant de nœuds d'air que de nœuds internes placés dans les différentes couches de matériaux de la paroi pour la modélisation 1D de la diffusion. Les températures calculées dans la paroi sont imposées comme

conditions aux limites à des surfaces d'échange convectifs avec la fuite d'air. Les variations de température induites dans la fuite d'air peuvent entraîner la condensation d'une partie de l'humidité circulant dans la fuite. Cette condensation génère alors des termes sources introduits dans le modèle de diffusion.

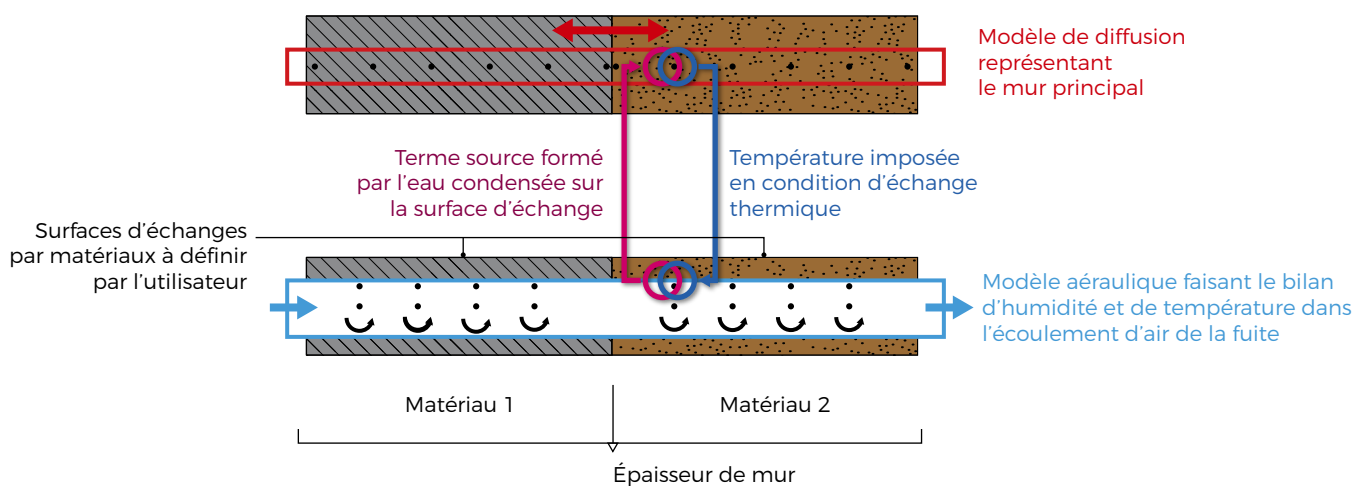


FIGURE 1 Schéma de principe du couplage entre le modèle de diffusion hygro-thermique unidimensionnel et le modèle nodal aéraulique de fuite d'air

On considère que la fuite d'air est répartie uniformément sur la surface de la paroi S_w . Le débit massique d'air surfacique \dot{m}_{fuite}'' [kg/s/m²] traversant la paroi par la fuite d'air est exprimé de la façon suivante

$$\dot{m}_{fuite}'' = \frac{mlr \cdot Q_{ref}''}{\rho_{ref}^{n-1} \Delta P_{ref}^n} (\rho'' |\Delta P|)^n$$

avec :

- ΔP : le différentiel de pression dans la paroi (Pa)
- Q_{ref}'' : la perméabilité à l'air sous ΔP_{ref} (m³/s/m²)
- mlr : la fraction de la perméabilité à l'air totale considérée pour représenter la fuite d'air (10 % dans la présente étude)
- ρ_{ref} : la masse volumique de référence (kg/m³)
- ΔP_{ref} : le différentiel de pression de référence (Pa)
- n : l'exposant de la loi débit-pression considérée ()

Dans un nœud d'air, le flux de vapeur d'eau $\dot{m}_{vap,i}''$ par unité de surface de paroi entre la phase vapeur et la phase liquide s'écrit :

$$\dot{m}_{vap,i}'' = \max \left[-\frac{m_{H2Oliq,i}''}{\Delta t}, \dot{m}_{fuite}'' (Y_{H2O}^i - Y_{sat}^i) \right]$$

Avec :

Y_{H2O}^i (kg/kg) l'humidité absolue dans le nœud d'air

Y_{sat}^i (kg/kg) l'humidité absolue à saturation dans le nœud d'air

$m_{H2Oliq,i}''$ (kg/m²) la masse d'eau en phase liquide dans le nœud d'air par unité de surface de paroi

Δt (s) le pas de temps de la simulation

On note S_{ratio} le ratio entre la surface d'échange totale de la fuite d'air avec la paroi S_f et la surface de la paroi :

$$S_{ratio} = \frac{S_f}{S_w}$$

Une portion de cette surface d'échange entre la lame d'air et la paroi est attribuée à chacun des nœuds. On note L_{ratio}^m le ratio entre la longueur du chemin L_f^m parcouru par la lame d'air dans la couche de matériau m et l'épaisseur L_m^w de cette couche :

$$L_{ratio}^m = \frac{L_f^m}{L_m^w}$$

Pour un nœud interne i d'un matériau m donné, la surface d'échange par unité de surface de paroi S_i'' qui lui est attribuée s'exprime alors comme :

$$S_i'' = S_{ratio} \frac{L_{ratio}^m \cdot \Delta x_i}{\sum_k (L_{ratio}^k \cdot L_w^k)}$$

Avec Δx_i l'épaisseur attribuée au nœud du modèle 1D de diffusion.

Le flux de chaleur par unité de surface de paroi $\dot{Q}_{c,i}''$ généré dans un nœud d'air s'écrit alors :

$$\dot{Q}_{c,i}'' = h_c \cdot S_i'' \cdot (T_{air}^i - T_w^i) + (L_v - C_p \cdot T_{air}^i) \cdot \dot{m}_{vap,i}''$$

Avec :

T_{air}^i (K) la température de la fuite d'air

T_w^i (K) la température de la paroi

h_c un coefficient d'échange convectif fixé à 5 W/m²/K dans la présente étude

L_v (J.kg⁻¹) la chaleur latente de l'eau

C_p (J.kg⁻¹.K⁻¹) la chaleur spécifique de l'eau

Ces flux de masse et de chaleur sont intégrés dans les équations de conservation de la masse et de l'énergie du modèle aéroulque et permettent de déduire la température, l'humidité absolue et la masse d'eau liquide dans chaque nœud d'air de la fuite.

Une partie de la masse d'eau en phase liquide d'un nœud d'air est injectée comme terme source de vapeur d'eau dans le nœud du modèle de diffusion correspondant et soustraite de la masse d'eau en phase liquide du nœud d'air.

On note $\dot{m}_{source,i}''$ ce terme source de vapeur d'eau par unité de surface de paroi. Ce terme source est limité de façon à ne pas dépasser la saturation dans la paroi :

$$\dot{m}_{source,i}'' = \max \left[0, \min \left[\frac{m_{H2Osat,i}'' - m_{H2O,i}''}{\Delta t}, \frac{m_{H2Oliq,i}''}{\Delta t} \right] \right]$$

Avec $m_{H2O,i}''$ la masse d'eau liquide contenue dans le nœud de paroi et $m_{H2Osat,i}''$ la masse d'eau à saturation déduites de la courbe de sorption du matériau.

Le flux de chaleur associé à ce terme source et injecté dans le modèle de diffusion s'écrit :

$$Q_{source,i}'' = (C_p \cdot T_{air}^i - L_v) \cdot \dot{m}_{source,i}''$$

Enfin, on notera que l'échange de chaleur convectif entre la paroi et la fuite d'air est négligé dans le modèle de diffusion thermo-hydrrique.

4

2

IMPLÉMENTATION DANS MATHIS

Ce modèle de fuite a été implémenté dans MATHIS au moyen d'un plugin spécifiquement dédié, nommé « moisture_leak ».

Ce plugin permet de générer automatiquement, à partir d'un jeu de paramètres relativement restreint, les différents objets MATHIS nécessaires à la modélisation : la paroi considérée proprement dite, les différents nœuds aéroulques de la fuite correspondant aux nœuds internes de la paroi, les surface d'échanges entre la fuite et la paroi, etc.

Le plugin permet d'imposer dans chaque nœud aéroulque de la fuite le bilan masse à partir du gradient de pression

obtenu de part et d'autre de la fuite, de ses caractéristiques aéroulques et des flux de masses liés au phénomène de condensation/évaporation de l'eau entre la phase vapeur et la phase liquide. Le plugin permet également de calculer les termes sources à introduire dans le modèle de diffusion de la paroi.

Le Tableau 5 ci-dessous présente les différents paramètres du plugin permettant de définir les données d'entrée nécessaires à la modélisation dans un fichier de donnée MATHIS.

&MOD/				
Paramètre	Unité	Type	Défaut	Domaine
ID	---	string	MURDEFAULT	identifiant du mur
MODTYPE	---	string	'moisture_leak'	chemin vers la dll du plugin
<i>Paramètres décrivant le type de paroi</i>				
NSLAB	---	integer	1	nombre de couches constituant la paroi
MATIDS	---	nslab*list(string)	{'DEFAULTCONCR ETE'}	identifiants des matériaux des différentes couches
E	m	nslab*double	{0,2}	épaisseurs des différentes couches
NODES	---	nslab*int	{5}	nombre de nœuds internes des différentes couches
HMCT	kg/s/m ² /Pa	(nslab-1)*double	{1,0-6}	coefficient d'échange massique des nœuds de contact entre couches
HCCT	W/m ² /K	(nslab-1)*double	{1,0-3}	coefficient d'échange thermique des nœuds de contact entre couches
HRINI	%	nslab*double	{9999}	Humidité relative initiale des différentes couches
TINI	°C	nslab*double	{9999}	température initiale des différentes couches
<i>Paramètres décrivant la paroi</i>				
LOCIDS	---	stringx2	{EXT,EXT}	identifiants des 2 nœuds séparés par le mur
AREA	m ²	double	0	surface du mur
HCONV	W/m ² /K	doublex2	{5,5}	coefficients d'échange convectif de part et d'autre du mur
HM	kg/s/m ² /Pa	doublex2	{2D-10,2D-10}	coefficients d'échange massique de part et d'autre du mur
EPS	---	doublex2	{0,9,0,9}	émissivités de part et d'autre du mur
ABS	---	doublex2	{0,4,0,4}	coefficients d'absorption de part et d'autre du mur
SLOPE	°	double	90	inclinaison d'un mur extérieur par rapport à l'horizontale
ORIENTATION	°	double	180	orientation d'un mur extérieur (0° = Nord)
<i>Paramètres décrivant la fuite</i>				
ALT	m	double	0	altitude de la fuite
Z1	m	double	0	hauteur de la fuite par rapport à l'altitude ALT côté LOCIDS(1)
Z2	m	double	0	hauteur de la fuite par rapport à l'altitude ALT côté LOCIDS(2)
BRANCHTYPE	---	list(string)	PERMEABILITE	type de branche aéraulique (PERMEABILITE ou BRANCHE_KN)
BRANCHCTRLID	---	string	CTRLDEFAULT	contrôleur permettant de moduler la loi-débit pression de la fuite
QVO	m ³ /h/m ²	double	0	débit volumique par unité de surface de paroi si PERMEABILITE
DPREF	Pa	double	20	différentiel de pression de référence
RHOREF	kg/m ³	double	1,2048	masse volumique de référence
K	f(EXPO)	double	1	coefficient empirique surfacique de la loi débit-pression si BRANCHE_KN
EXPO	---	double	0,5	exposant n de la loi débit pression
<i>Paramètres décrivant les surfaces échanges entre fuite et paroi</i>				
SRATIO	---	double	1	ratio entre la surface d'échange totale et la surface de la paroi
LRATIO	---	nslab*double	{1}	ratios entre longueurs de chemin et épaisseurs de chaque couche
HCONV(1)	W/m ² /K	double	5	coefficient d'échange convectif entre la fuite et la paroi

TABLEAU 5 Paramètres du plugin moisture_leak de MATHIS

4

3

VALIDATION

Pour valider le modèle thermo-hygro-aéraulique de fuite d'air, on reproduit une expérience réalisée par Desta & Roels [7]

4.3.1 EXPÉRIMENTATION

Desta & Roels [7] ont mené à l'université de Leuven en Belgique une expérimentation sur 18 mois : 3 éléments de parois (1,80 m x 0,60 m) de composition similaire (se distinguant par le parement intérieur et par la présence ou non de pare-vapeur) ont été exposés d'un côté à une enceinte climatique contrôlée, de l'autre aux conditions climatiques extérieures.

Le premier hiver, l'enceinte climatique n'a pas été mise sous pression. Par la suite, l'écart de pression entre l'intérieur et l'extérieur était fixé à 10 Pa. Les données sont

disponibles sur le site internet de l'université : <https://bwk.kuleuven.be/bwf/Projectdata/EADesta>

L'instrumentation comporte des capteurs de température (T sur la Figure 2), d'humidité relative (H sur la Figure 2) et des fluxmètres (HF), situés à mi-hauteur. L'écart de pression entre l'intérieur et l'extérieur a également été mesuré. Enfin, des éléments du panneau pare-vent prédécoupés ont été régulièrement pesés (après avoir été pesés à sec) pour déterminer le taux d'humidité dans le pare-vent, et ce à 3 hauteurs différentes.

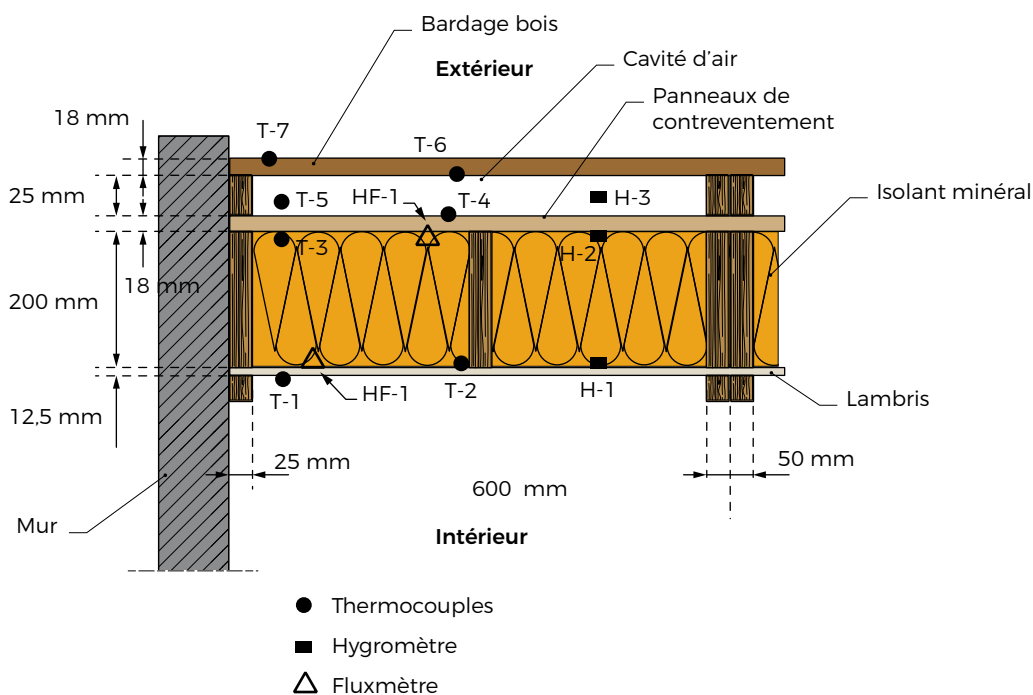


FIGURE 2 Description et instrumentation de la paroi étudiée dans le cadre de la présente étude (illustration d'après [7])

4.3.2 MODÉLISATION

On s'intéresse pour la confrontation du modèle à l'élément de paroi présentant un parement intérieur en panneaux de bois (à gauche sur la Figure 2).

La paroi modélisée, à ossature bois, est ainsi constituée d'un parement intérieur en panneaux de bois de 12.5 mm d'épaisseur, d'une couche d'isolant en fibre de verre de 200 mm d'épaisseur, d'un panneau de fibre de bois de 18 mm d'épaisseur, d'une lame d'air de 25 mm d'épaisseur et d'un bardage extérieur de 18 mm d'épaisseur.

Côté intérieur, on impose les évolutions temporelles de température, d'humidité et de pression mesurées au cours du temps dans l'enceinte du local. Les coefficients d'échanges intérieurs sont fixés à :

$$h_c = 7.7 \text{ W/m}^2/\text{K} \text{ et } h_m = 2.10^{-10} \text{ kg/s/m}^2/\text{Pa}$$

Côté extérieur, la lame d'air et le bardage extérieur ne sont pas directement modélisés : on impose en conditions aux limites les mesures d'humidité et de température réalisées dans la lame d'air (sondes T5 et H3 de la Figure 2). Les coefficients d'échanges sont imposés selon un modèle simplifié de lame d'air équivalente à :

$$h_c = 12.5 \text{ W/m}^2/\text{K} \text{ et } h_m = 9.10^{-10} \text{ kg/s/m}^2/\text{Pa}$$

Le Tableau 21 présente les caractéristiques thermo-hydrauliques retenues pour la définition des matériaux. Ces caractéristiques ont été définies à partir de mesures réalisées par Desta & Roels et de données de la littérature pour les données manquantes.

matériau	unité	HR (-)	bardage + cavité	panneaux de fibres de bois	isolant: laine minérale	panneaux bois (perforé)
épaisseur	mm		non modélisé	18	200	15
densité	kg/m ³			274	20	400
conductivité thermique	W/mK			0.0452	0.038 ⁽¹⁾	0.0938
chaleur spécifique	J/kgK			2068	840	2000
perméabilité vapeur	kg/msPa	0		2.533E-11	7.691E-11	9.720E-12
		0.2		2.533E-11	7.691E-11	9.720E-12
		0.8		2.588E-11	7.691E-11	3.639E-11
		0.9		3.409E-11	7.691E-11	3.639E-11
		1		1.638E-10	7.691E-11	3.639E-11
courbe de sorption	kg/m ³	0		0	0	0
		0.3		12	0.03	18
		0.75		22	0.07	39
		0.8		24	0.08	45
		0.94		41	0.15	77
		0.96		48	0.18	86
		0.97		54	0.21	91
		0.98		64	0.26	96
		0.99		84	0.36	101
		1		274	2	104
		1.01		1014	950	730
eau liquide Dw	m ² /s	0		0	0	0
		0.8		2.53E-12	0	4.24E-15
		1		1.37E-09	0	1.69E-12

⁽¹⁾ fonction de HR

TABEAU 6 Caractéristiques thermo-hydrauliques des matériaux

La conductivité thermique de l'isolant est modélisée comme fonction de l'humidité relative selon les données suivantes :

HR (-)	conductivité thermique W/mK
0	0.038
0.995	0.038
0.999	0.0385
0.9995	0.0364
0.9999	0.0409
1	0.08
1.01	0.6

TABLEAU 7 Conductivité thermique de l'isolant en laine minérale en fonction de l'humidité relative

Après le premier hiver, le parement bois de la paroi a été jugé trop peu perméable à l'air par les expérimentateurs ; il a donc été perforé après la première année de mesures : plus de 500 trous ont été percés (diamètre < 1 mm), répartis sur toute la surface. La perméabilité est ainsi augmentée de manière homogène. Les caractéristiques du parement bois et de la fuite d'air aérauliques ont été déterminées avant et après perforations.

La perméabilité vapeur du parement bois fixée dans le modèle correspond à la valeur mesurée après perforation.

Le débit de la fuite d'air, lui, est modélisé par un composant aéraulique de type BRANCHE_KN de la façon suivante :

$$\dot{m}'' = K \cdot [\rho \cdot |\Delta P|]^n$$

Avec m'' (kg/s/m²) le débit massique de la fuite par unité de surface de paroi, ΔP (Pa) le différentiel de pression et K (kg¹⁻²ⁿ.m⁴ⁿ⁻².s²ⁿ⁻¹) et n () les coefficients de cette loi débit pression issus des mesures expérimentales et présentés Tableau 8.

	Kb	n
avant perforation	0.5 10 ⁻⁵	0.9
après perforation	3.75 10 ⁻⁵	0.9

TABLEAU 8 Coefficients de la loi débit pression de la fuite d'air pris en compte dans le modèle

Enfin, on a considéré que le ratio de surface d'échange totale S_{ratio} était égal à 1. Le ratio de longueur L_{ratio} est pris égal à 5 dans l'isolant et à 1 dans le parement intérieur et le panneau de fibre de bois.

4.3.3 CONFRONTATION

La Figure 3 ci-dessous reproduit la teneur en eau du panneau de fibre de bois obtenu numériquement et expérimentalement. Sur cette figure sont représentées les mesures à trois hauteurs différentes de la paroi et les résultats obtenus avec MATHIS.

Sont également reproduits des résultats obtenus avec le code de calcul WUFI ([9], [37]) qui fait aujourd'hui référence dans le domaine. Dans ce calcul WUFI, la surpression et le débit d'air sont pris comme constants au cours du temps et égaux respectivement à 10 Pa et à leurs valeurs mesurées après perforation. Le plan de condensation est

défini à l'interface entre le panneau extérieur et la laine minérale, sur une épaisseur de 2 cm.

On constate, d'une part, une certaine hétérogénéité dans les résultats de mesure (le bas de la paroi étant nettement moins humide que le milieu et le haut) ; d'autre part, les deux modèles, quoique différents, atteignent le bon ordre de grandeur la seconde année (lorsqu'il y a effectivement des flux d'air au sein de la paroi). Mathis permet bien de mettre en évidence un comportement significativement moins humide la première année que la seconde.

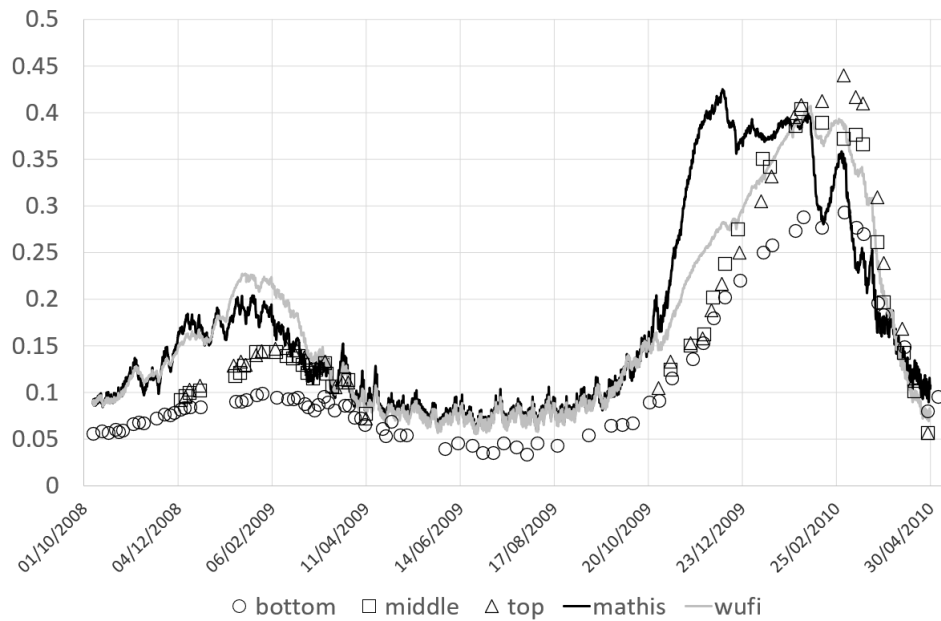


FIGURE 3 Comparaison de l'évolution de la teneur en eau du panneau de fibre de bois

4.3.4 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Au-delà des incertitudes inhérentes à la caractérisation des propriétés des matériaux, à l'assemblage de ces derniers et aux hypothèses simplificatrices réalisées concernant les phénomènes physiques mis en œuvre, en particulier lorsque l'on atteint comme ici les conditions de saturation en eau d'un matériau, les paramètres relatifs à la définition de l'échange thermique entre la fuite d'air et sa répartition au sein de la paroi apparaissent comme susceptibles d'être particulièrement influents sur le résultat.

Une étude de sensibilité a donc été réalisée en faisant varier le paramètre S_{ratio} de 0.5 à 1.5 (pour une valeur L_{ratio} dans l'isolant égale à 5) et le paramètre L_{ratio} dans l'isolant de 1 à 10 (pour une valeur de S_{ratio} égale à 1). La Figure 4 et la Figure 5 présentent les teneurs en eau des trois couches de matériau obtenues pour ces différents jeux de paramètres.

On constate que pour une longueur de chemin de la fuite fixe, la surface d'échange totale impacte principalement la teneur en eau de l'isolant le deuxième hiver. Plus la surface d'échange est grande et plus la teneur en eau de l'isolant est importante. Pour une surface d'échange totale fixe, l'augmentation de la longueur de fuite dans l'isolant conduit à une réduction de la teneur en eau du panneau de fibre de bois au cours du deuxième hiver. Cela s'explique sans doute par le fait que les conditions de l'essai conduisent ici toujours à l'atteinte de la saturation dans l'isolant : l'eau condense à l'interface fuite/isolant sans pouvoir pénétrer dans ce dernier. Plus la longueur d'échange dans l'isolant est importante et moins d'humidité se retrouve transportée par la fuite d'air jusqu'au panneau de fibre de bois.

Sur la base de ces résultats, nous avons considéré comme acceptable de fixer S_{ratio} à 1 et L_{ratio} dans l'isolant à 5 pour la suite de l'étude.

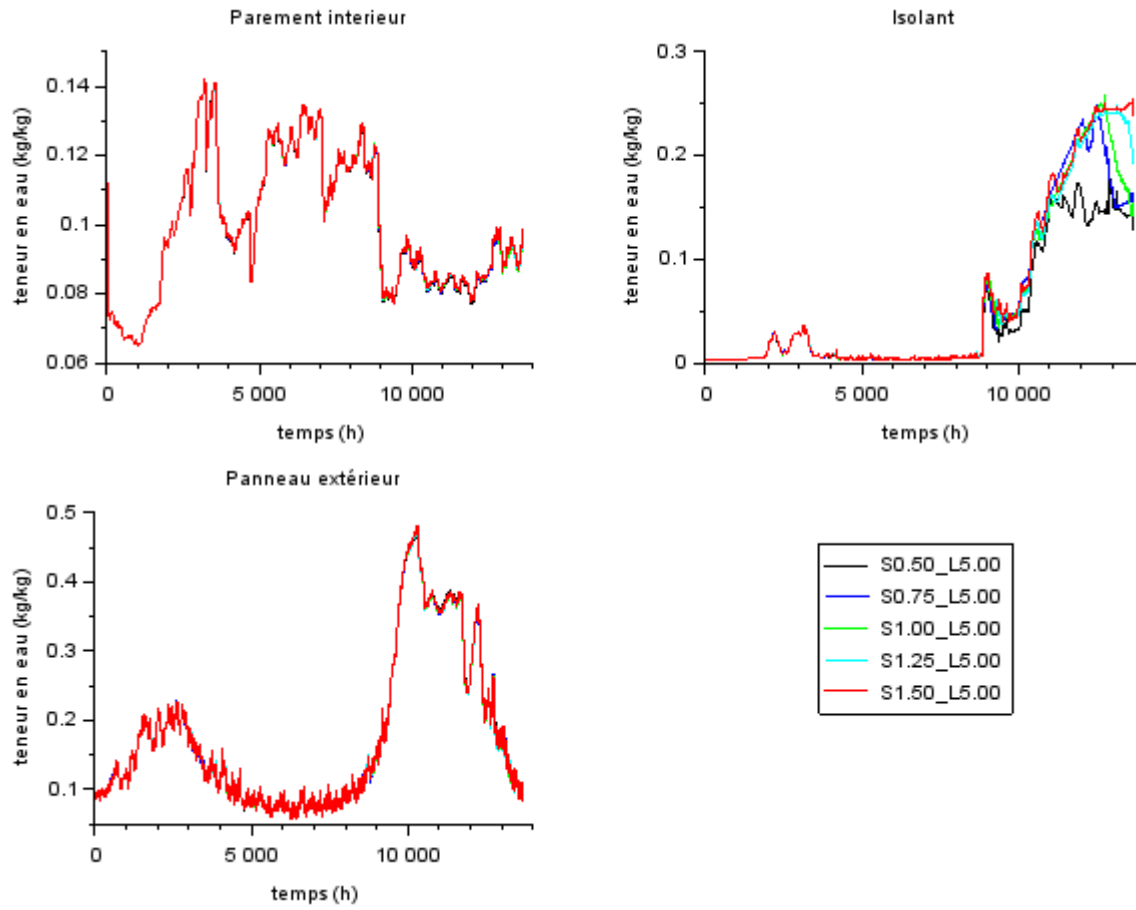


FIGURE 4 Teneur en eau dans les trois matériaux pour différents ratios de surface d'échange totale (S0.5 à S1.5) et une longueur de chemin dans l'isolant fixe (L5)

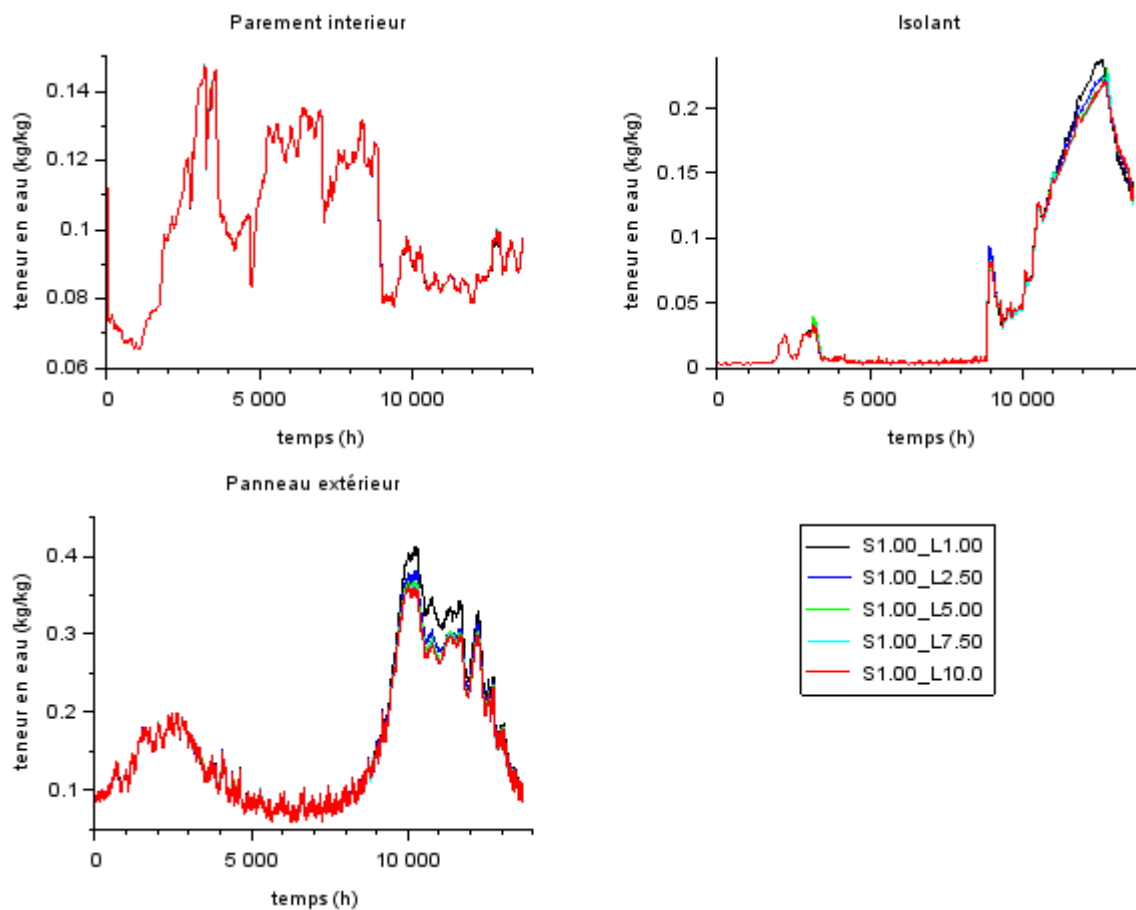


FIGURE 5 Teneur en eau dans les trois matériaux pour différents ratios de longueur de chemin dans l'isolant (L1 à L10) et une surface d'échange totale fixe (S1)

5

DESCRIPTION DES CAS D'ÉTUDE

Les calculs ont été faits sur 3 années, avec une humidité relative initiale de 80 %.

5

1

SCÉNARIO

5.1.1 LOGEMENT

Dans le cadre de l'étude, un seul logement est pris en compte, de type F4_1SdB_1WC en maison individuelle à deux niveaux tel que défini par le GS14.5 dans les règles d'instruction des demandes d'Avis Technique Ventilation [41]. La Figure 6 reproduit le plan du logement étudié.

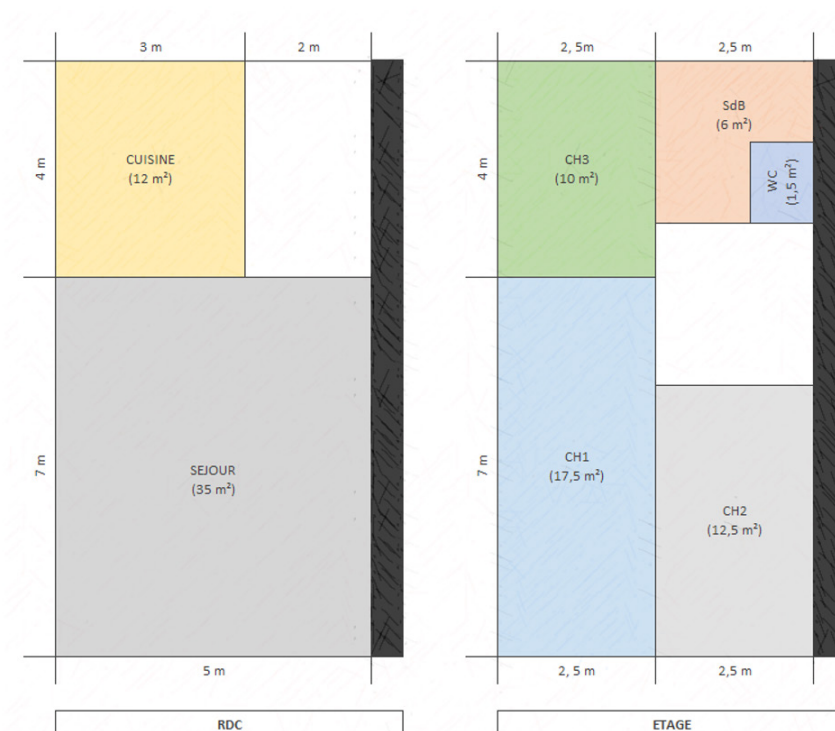


FIGURE 6 Plan du logement étudié

5.1.2 PERMÉABILITÉ À L'AIR

Une hypothèse de perméabilité à l'air correspondant à un indice $Q4Pa=0.6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ est prise en compte.

Cette perméabilité est répartie uniformément sur les murs en contact avec l'extérieur (murs nord, sud, ouest et

plafond des pièces du premier étage) au prorata de leur surface. De manière similaire au modèle de Wufi [9], [42],

10 % de la perméabilité totale a été considérée comme traversant les parois.

5.1.3 OCCUPATION

On considère un scénario d'occupation de 3 personnes tel que défini par le GS14.5 [41].

Ce scénario permet de fixer au cours du temps l'emploi du temps de personnes (présence dans le bâtiment, pièce

occupée) et les termes sources de vapeur d'eau associés à leur activité (préparation des repas, prises de douche, séchage du linge, ...)

5.1.4 CHAUFFAGE

Un système de chauffage par émetteurs à effet joule dans chaque pièce est modélisé. Une température de consigne de 21°C est appliquée dans toutes les pièces.

5.1.5 ZONES CLIMATIQUES

Quatre zones climatiques différentes sont étudiées (cf. Figure 7). Elles correspondent aux zones H1a (Trappes), H1b (Nancy), H2a (Rennes) et H3 (Nice) au sens de la réglementation thermique 2012 [43].

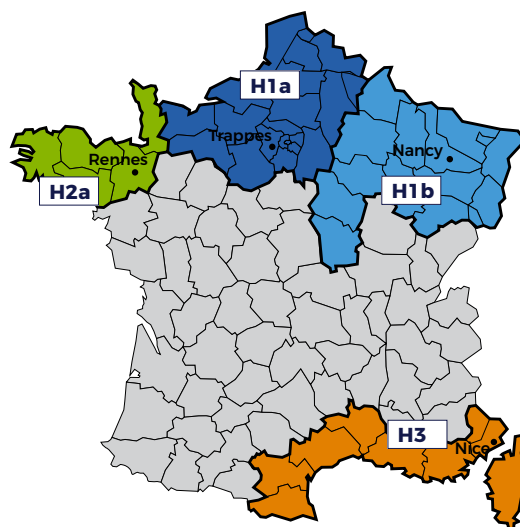


FIGURE 7 Zones climatiques prises en compte dans l'étude

Pour chaque zone, les grandeurs suivantes sont définies au pas de temps horaire selon une année type :

- Vitesse du vent
- Direction du vent
- Température d'air
- Humidité relative
- Flux solaire direct normal
- Flux solaire diffus horizontal

- Température équivalente de voûte céleste

- Température du sol à 1 m de profondeur

Elles permettent de fixer au cours du temps les conditions aux limites du modèle de logement.

On notera que les données météorologiques utilisées ne comprennent pas de pluie ; les risques spécifiquement liés à la pluie sont hors du cadre de la présente étude.

5

2

SYSTÈMES DE VENTILATION

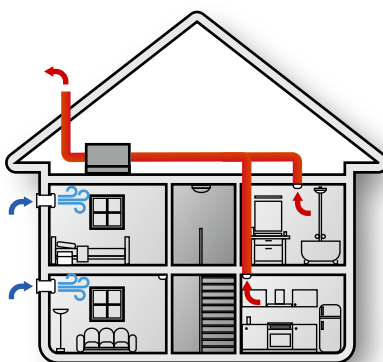
5.2.1 PRINCIPES

Trois systèmes de ventilation différents ont été pris en compte dans l'étude :

- un système de ventilation mécanique contrôlé simple flux par extraction hygro-réglable (VMC hygro B),
- un système de ventilation mécanique par insufflation répartie (VIR),
- et un système de ventilation mécanique par insufflation centralisée (VIC).

Ces trois systèmes ont été définis de façon à obtenir des conditions de climat intérieur dans les différentes pièces similaires en termes d'humidité pour les trois systèmes et des niveaux de pression intérieure réalistes au regard de notre connaissance des principes d'installation et de fonctionnement de ces systèmes (extraction ou insufflation).

Le système de VMC Hygro B fait aujourd'hui référence dans la construction neuve comme dans les opérations de rénovation. Il respecte les principes réglementaires de balayage, de débit global logement et de débits minimaux d'extraction à atteindre dans les pièces techniques. Il est constitué d'entrées d'air hygro-réglables dans les pièces principales (séjour et chambres) et de bouches d'extraction hygro-réglables et ou à débit minuté dans les pièces techniques (cuisine, salle de bain, toilettes). Le transfert d'air entre les pièces principales et les pièces techniques se fait via la circulation centrale par le détalonnage des portes (Figure 8). Les caractéristiques de ces différents composants reprennent les spécifications de l'Avis Technique 14.5/17-2269_V1 et sont rappelés au paragraphe 5.2.2.

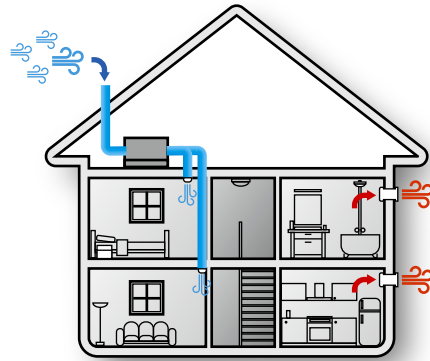


VMC : extraction

FIGURE 8 Schéma de principe de la ventilation par extraction (VMC Hygro B)

Le système VIR est un système par insufflation théorique permettant de respecter le principe de balayage et le débit global logement réglementaire. Il est constitué de bouches de soufflage dans les pièces principales et de sorties d'air en façade placées dans les pièces techniques (Figure 9). S'il ne permet pas nécessairement d'atteindre les débits minimaux réglementaires dans les pièces techniques, il dispose cependant d'une fonction « grand débit cuisine » consistant à augmenter le débit de soufflage et

la section de la sortie d'air cuisine sur demande au moyen d'un actionneur placé en cuisine. Le transfert d'air entre les pièces principales et les pièces techniques se fait via la circulation centrale par le détalonnage des portes. Les caractéristiques de ces différents composants, rappelés au paragraphe 5.2.2, ont été définies de façon à respecter les critères construits sur l'humidité relative et le dioxyde de carbone utilisés dans l'instruction des avis techniques.

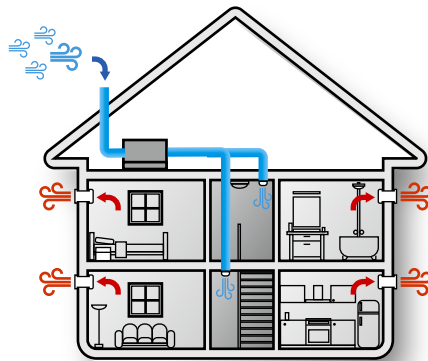


VIR : insufflation répartie

FIGURE 9 Schéma de principe de la ventilation par insufflation répartie (VIR)

Le système VIC vise à être représentatif des systèmes par insufflation que l'on trouve le plus communément mis en œuvre aujourd'hui. Il est constitué d'une ou deux bouches d'insufflation placées dans la circulation centrale. Le débit total d'insufflation est constant et de l'ordre de 0,5 vol/h. Des sorties d'air sont placées dans les différentes pièces principales et pièces techniques. Ces sorties

d'air sont réalisées au moyen de grilles fixes placées dans les menuiseries tel que celles utilisés classiquement pour les entrées d'air des systèmes VMC autorégulables. Le transfert d'air entre la circulation centrale et les pièces principales et techniques se fait par le détalonnage des portes (Figure 10). Les caractéristiques de ces différents composants sont rappelées au paragraphe 5.2.2.



VIC : insufflation centralisée

FIGURE 10 Schéma de principe de la ventilation par insufflation centralisée (VIC)

Pour les trois systèmes, le réseau de ventilation et le caisson d'extraction (de soufflage) ne sont pas directement modélisés dans les simulations : on considère que les conditions de mises en œuvre conduisent à un fonctionne-

ment des bouches à la pression minimale de leur plage de fonctionnement et donc aux débits minimaux de dimensionnement rappelés ci-après.

5.2.2 DIMENSIONNEMENT

Modules entrée d'air (m³/h sous 20 Pa)

sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
{50 %;5} {65 %;45}	{50 %;5} {65 %;45}	{50 %;5} {65 %;45}	{50 %;5} {65 %;45}	0	0	0

Débit extraction (m³/h)

	sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
base	0	0	0	0	{20 %;10} {55 %;45}	{50 %;10} {80 %;40}	[5,30]
pointe	0	0	0	0	135	{50 %;10} {80 %;40}	[5,30]

Détalonnages (section cm²)

sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
80	80	80	80	160	80	80

Grilles de transfert (section cm²)

sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU 9 Dimensionnement des composants du système VMC hygro b

Débit insufflé (m³/h)

	sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
base	35	23.33	23.33	23.33	0	0	0
pointe	60	40	40	40	0	0	0

Modules grilles d'extraction (m³/h sous 20 Pa)

	sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
base	0	0	0	0	170	75	45
pointe	0	0	0	0	340	75	45

Détalonnages (section cm²)

sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
80	80	80	80	160	80	80

Grilles de transfert (section cm²)

sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU 10 Dimensionnement des composants du système VIR

Débit insufflé (m³/h)

	hall	sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
base	140	0	0	0	0	0	0	0

Modules grilles d'extraction (m³/h sous 20 Pa)

	hall	sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
base	0	45	30	30	30	45	45	30

Détalonnages (section cm²)

sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
80	80	80	80	160	80	80

Grilles de transfert (section cm²)

sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC
0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU 11 Dimensionnement des composants du système VIR

5.2.3 RÉSULTATS

Afin de comparer la performance intrinsèque des trois systèmes ainsi définis, une simulation pour chaque système a été réalisée sur le cas du logement défini précédemment dans les conditions des calculs menés dans le cadre de l'instruction des avis techniques (simulation à température intérieure imposées sur une saison de chauffe).

5.2.3.1 CRITÈRES DE PERFORMANCE

L'approche et les critères utilisés (Groupe Spécialisé n° 14.5, 2016) dans le cadre de l'évaluation de l'aptitude à l'emploi des systèmes reposent sur des seuils à ne pas dépasser :

- Pour le dioxyde de carbone (CO₂), l'indicateur utilisé est la notion de « ppm.heures cumulés en base 2000 (cf. Figure 11). Seules les périodes d'occupation des pièces sont prises en compte. Le critère seuil est fixé à

Le paragraphe 5.2.3.1 présentent les critères de performances ainsi obtenus et le paragraphe 5.2.3.2 illustre les climats intérieurs en chambre et en salle de bain correspondant à chacun des systèmes durant la saison de chauffe.

400.000 ppm.heures cumulés en base 2000 pour chacune des pièces principales du logement.

- Pour l'humidité relative [HR], l'indicateur retenu est le nombre d'heures où l'humidité relative est supérieure à 75 % avec les critères seuils suivants : 100 heures en WC et toute pièce principale, 600 heures en cuisine, 1000 heures en salle de bains.

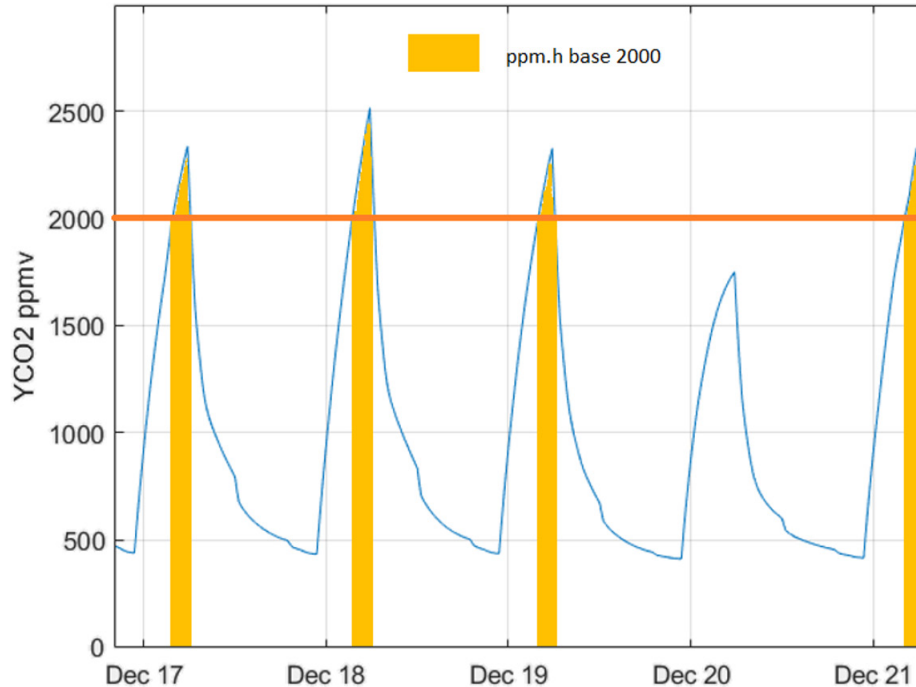


FIGURE 11 Exemple de calcul sur 5 jours de l'indicateur CO₂ (ppm.heures cumulés en base 2000) - schéma de principe

En plus de ces indicateurs de la « qualité de l'air », les Avis Techniques produisent également des données concernant la performance énergétique du système. Ces données servent à alimenter le moteur de calcul de la réglementation thermique.

Dans le cadre du présent travail et à titre informatif, on utilise le débit déperditif total Q_{deper_tot} pour comparer les systèmes entre eux. Il est calculé de la façon suivante :

$$C_{deper_tot} = \sum \dot{m} C_p (T_{ext}(t) - T_{int}(t)) \Delta t \quad \text{pour } t \text{ tel que } T_{ext}(t) > 15^\circ C$$

$$C_{deper} = \sum C_p (T_{ext}(t) - T_{int}(t)) \Delta t \quad \text{pour } t \text{ tel que } T_{ext}(t) < 15^\circ C$$

$$Q_{deper_tot} = \frac{C_{deper_tot}}{\rho_{20^\circ C} C_{deper}} \times 3600$$

Avec \dot{m} le débit massique total sortant du logement à chaque instant (système de ventilation et perméabilité à l'air des parois).

Le Tableau 12 et le Tableau 13 présentent les indicateurs CO₂ et HR obtenus pour les trois systèmes. Si le critère CO₂ est bien atteint pour les trois systèmes, celui sur l'humidité relative obtenue en cuisine n'est pas respecté pour le système VIC

	Séjour	CH1	CH2
Critère	< 400	< 400	< 400
VMC	10	335	169
VIR	0	0	0
VIC	71.6	0	0

TABLEAU 12 Indicateur CO₂ obtenu dans les pièces principales occupées (1000 ppm.heures cumulés en base 2000)

Critère	cuisine	SdB
	<600	<1000
VMC	283	588
VIR	594	997
VIC	955	996

TABLEAU 13 Indicateur HR obtenu dans les pièces techniques (heures)

Le Tableau 14 et le Tableau 15 présentent le taux de renouvellement d'air moyen et le débit déperditif total correspondant pour les trois systèmes. Les systèmes VIR et VIC

étudiés ici conduisent à une consommation énergétique induite par le renouvellement d'air 2 à 2.5 fois plus importante que le système VMC Hygro B.

	hall	sejour	CH1	CH2	CH3	cuisine	SdB	WC	Air neuf Global logement
VMC	1.3	0.2	0.3	0.4	0.3	1.4	1.2	1.9	0.2
VIR	1.7	0.4	0.6	0.8	1.0	0.9	1.5	3.8	0.4
VIC	3.5	0.2	0.6	0.6	0.9	0.7	1.5	3.4	0.5

TABLEAU 14 Taux de renouvellement d'air par pièce et d'air neuf global logement (vol/h)

	$Q_{\text{deper_tot}}$
VMC	64
VIR	114
VIC	147

TABLEAU 15 Débit déperditif total (m³/h)

5.2.3.2 CLIMATS INTÉRIEURS

Les figures suivantes présentent les niveaux de différentiel de pression et d'humidité intérieures obtenues au niveau des perméabilités de la chambre parentale et de la salle de bain pour ces simulations conventionnelles sur le cas du logement considéré.

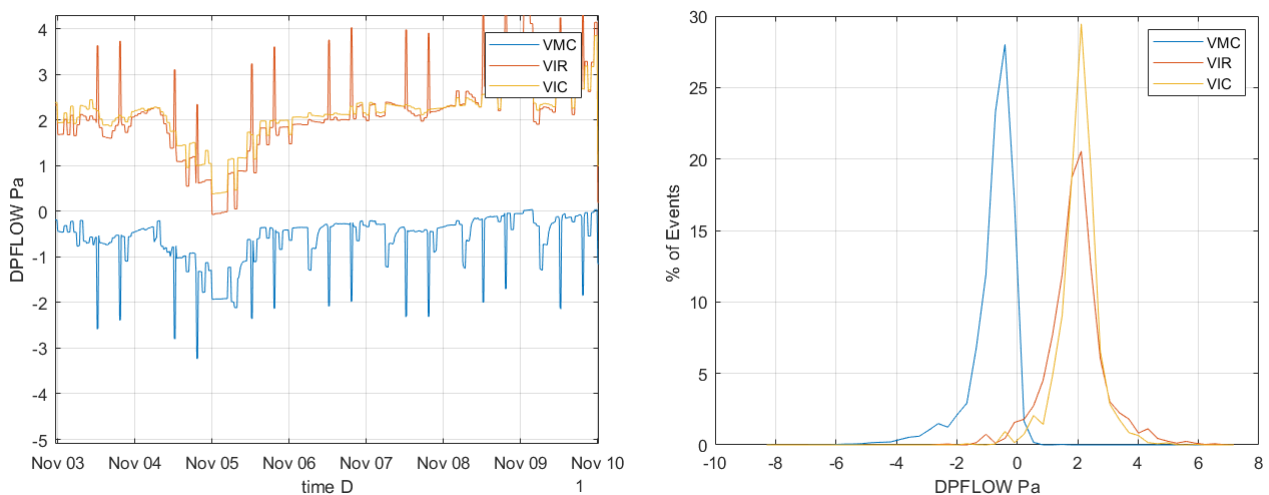


FIGURE 12 Évolution sur une semaine (à gauche) et fréquence d'occurrence sur la saison de chauffe (à droite) du différentiel de pression motrice de la perméabilité dans la chambre 1

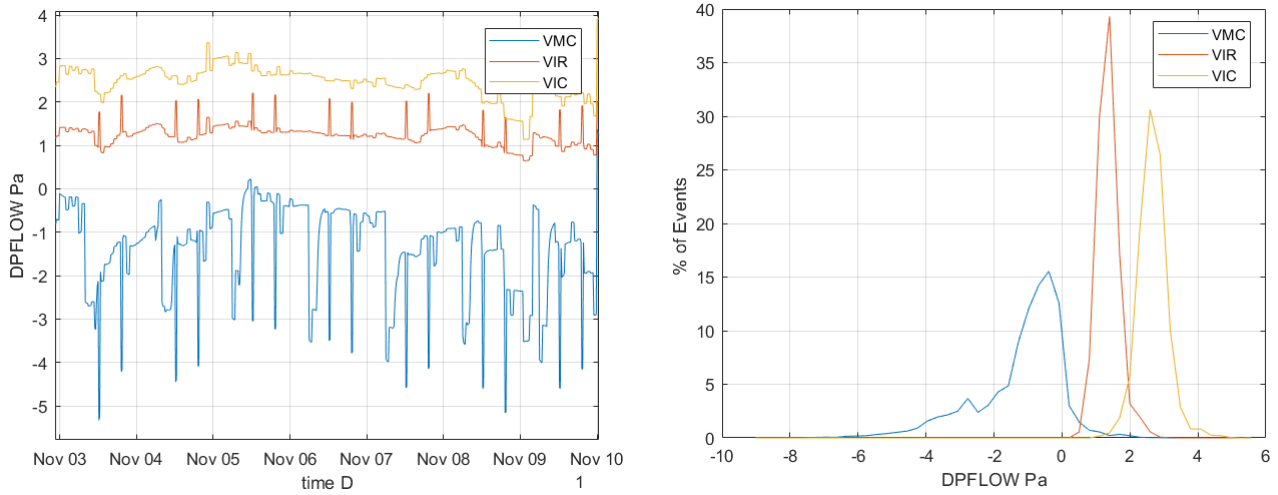


FIGURE 13 Évolution sur une semaine (à gauche) et fréquence d'occurrence sur la saison de chauffe (à droite) du différentiel de pression motrice de la perméabilité dans la salle de bain

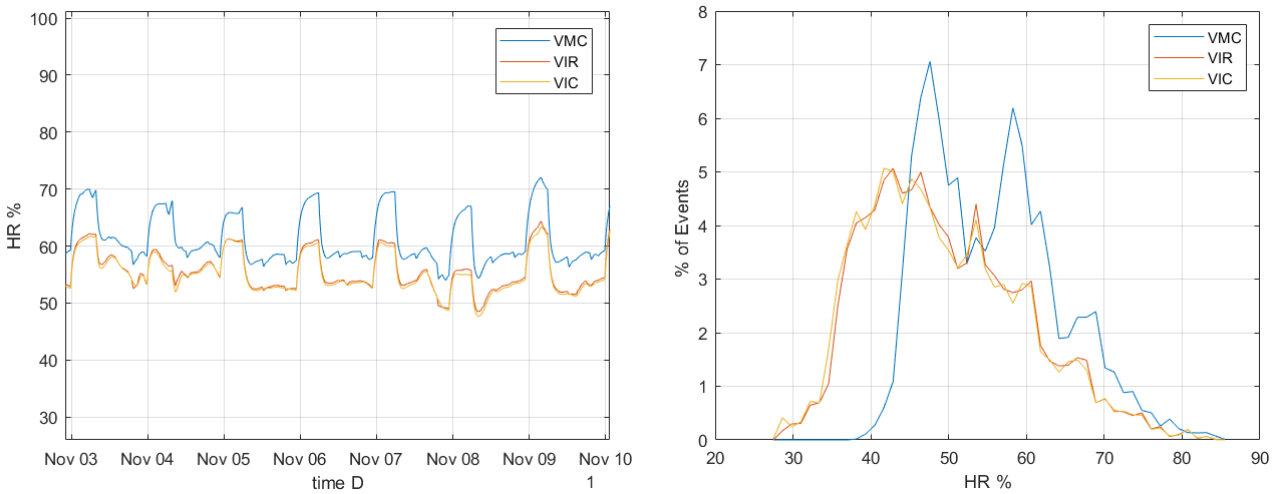


FIGURE 14 Évolution sur une semaine (à gauche) et fréquence d'occurrence sur la saison de chauffe (à droite) de l'humidité relative intérieure dans la chambre 1

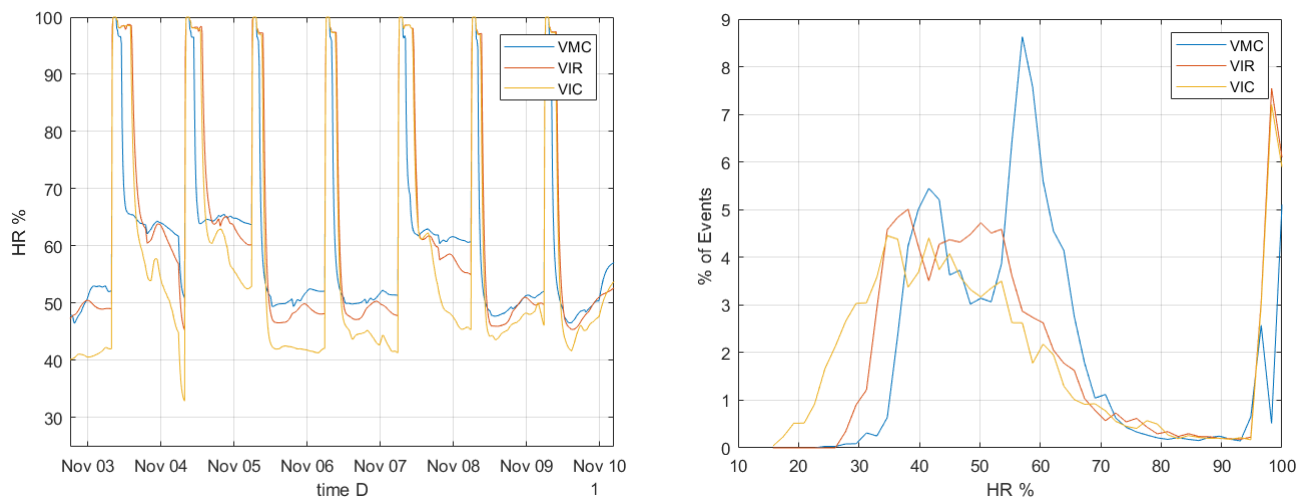


FIGURE 15 Évolution sur une semaine (à gauche) et fréquence d'occurrence sur la saison de chauffe (à droite) de l'humidité relative intérieure dans la salle de bain

5

3

TPOLOGIE DES PAROIS

Plusieurs types de parois ont été incluses dans l'étude :

- Mur à ossature bois
- Maçonnerie en béton banché, isolée par l'extérieur
- Maçonnerie en brique monomur, isolée par l'extérieur
- Maçonnerie en béton banché, isolée par l'intérieur
- Maçonnerie en brique monomur, isolée par l'intérieur

Les murs à ossature bois étudiés ont été conçus conformément aux règles du DTU 31-2 [14] ; en particulier, les parois sont munies d'une membrane pare-vapeur d'un S_d supérieur ou égal à 18m, à part l'une des parois, qui elle respecte la règle dite des « 1 pour 5 » : S_d côté intérieur plus de 5 fois plus grand que côté extérieur. Elles sont toutes composées de manière similaire (voir Tableau 16).

À l'intérieur, un parement plâtre ; puis un pare-vapeur, l'isolant situé entre les montants d'ossature, et enfin un panneau à base de bois pour assurer le contreventement. La finition extérieure est assurée par un bardage. Celui-ci n'est pas modélisé directement dans Mathis. Nous utilisons un modèle simplifié compatible avec une approche 1D : un coefficient d'échange convectif adapté, et une réduction de l'absorptivité solaire. De même, les calculs sont menés sur la partie courante de la paroi, à distance des montants et points singuliers. Ils sont en effet représentatifs de la majeure partie de l'enveloppe, et concentrent les risques de condensation dans l'enveloppe (le panneau extérieur étant plus froid en l'absence de pont thermique).

couche	parement intérieur		pare-vapeur	isolant		panneau extérieur		
	ID paroi	matériau		épaisseur	Sd	matériau	épaisseur	matériau
MOB1	plâtre	1,3 cm	18 m	laine de verre	14,5 cm	panneau 1	1 cm	0,2 m
MOB2	plâtre	1,3 cm	18 m	laine de verre	14,5 cm	panneau 2	1 cm	1 m
MOB3	plâtre	1,3 cm	18 m	laine de verre	14,5 cm	panneau 3	1 cm	5 m
MOB4	plâtre	1,3 cm	18 m	Fibre de bois 'ITE'	14,5 cm	panneau 1	1 cm	0,2 m
MOB5	plâtre	1,3 cm	18 m	Fibre de bois 'ITE'	14,5 cm	panneau 2	1 cm	1 m
MOB6	plâtre	1,3 cm	18 m	Fibre de bois 'ITE'	14,5 cm	panneau 3	1 cm	5 m
MOB7	plâtre	1,3 cm	50 m	laine de verre	14,5 cm	panneau 3	1 cm	5 m
MOB8	plâtre	1,3 cm	5 m	laine de verre	14,5 cm	panneau 1	1 cm	0,2 m

TABLEAU 16 Composition des parois des murs à ossature bois

Par ailleurs, 2 types de parois maçonnées ont été modélisées : en béton banché d'une part, en brique monomur d'autre. L'étude a porté sur des parois isolées par l'intérieur et par l'extérieur. La composition des parois est détaillée dans le Tableau 17 et le Tableau 18.

Les parois isolées par l'intérieur avec de la laine de verre ou de la fibre de bois ont été pourvues d'un pare-vapeur ; ceci n'était pas nécessaire pour les parois avec polystyrène, suffisamment étanche à la vapeur. De plus,

nous n'avons pas inclus dans nos résultats le cas de calcul « béton banché » isolé par l'intérieur avec de la fibre de bois ; en effet, le béton étant très peu perméable à la vapeur et froid, de la condensation ou accumulation d'humidité risque de se produire même en l'absence de flux d'air. Cette configuration n'était donc pas pertinente dans le cadre de cette étude, et devra faire l'objet d'analyse au cas par cas.

couche	parement intérieur		pare-vapeur	isolant		maçonnerie		parement extérieur	
	ID paroi	matériau		épaisseur	Sd	matériau	épaisseur	ID paroi	matériau
BB11	plâtre	1,3 cm	18m	laine de verre	12 cm	BB11	plâtre	1,3 cm	18 m
BB12	plâtre	1,3 cm	non	polystyrène	12 cm	BB12	plâtre	1,3 cm	non
BMI1	plâtre	1,3 cm	18m	laine de verre	12 cm	BMI1	plâtre	1,3 cm	18 m
BMI2	plâtre	1,3 cm	non	polystyrène	12 cm	BMI2	plâtre	1,3 cm	non
BMI3	plâtre	1,3 cm	18m	fibre de bois 'ITI'	12 cm	BMI3	plâtre	1,3 cm	18 m

TABLEAU 17 Composition des parois avec isolation par l'intérieur

couche	parement intérieur		maçonnerie		isolant		parement extérieur	
	ID paroi	matériau	épaisseur	matériau	épaisseur	matériau	épaisseur	matériau
BBE1	plâtre	1,3 cm	béton banché	20 cm	laine de roche	12 cm	enduit	2 cm
BBE2	plâtre	1,3 cm	béton banché	20 cm	polystyrène	12 cm	enduit	2 cm
BBE3	plâtre	1,3 cm	béton banché	20 cm	fibre de bois 'ITI'	12 cm	enduit	2 cm
BME1	plâtre	1,3 cm	brique monomur	30 cm	laine de roche	12 cm	enduit	2 cm
BME2	plâtre	1,3 cm	brique monomur	30 cm	polystyrène	12 cm	enduit	2 cm
BME3	plâtre	1,3 cm	brique monomur	30 cm	fibre de bois 'ITI'	12 cm	enduit	2 cm

TABLEAU 18 Composition des parois avec isolation par l'extérieur



RÉSULTATS

6

1

DÉMARCHE DE TRAVAIL

Les calculs ont été menés en deux étapes : d'une part en ne tenant pas compte des flux d'air dans les parois (cas classique), puis en les intégrant (nouveau modèle développé). L'ensemble des résultats figure en annexe,

6.1.1 ASPECT NUMÉRIQUE

Au total, 240 configurations ont été modélisées (parois x systèmes x climats) ; les calculs faits sans flux d'air ont porté sur 160 cas (les cas VMC et VIR). L'ensemble de ces cas de calculs ont aboutis sans erreurs de convergence. Pour les cas avec flux d'air, sur les 240 simulations lancées, seules 186 sont parvenues à leur terme (78 %). Les autres cas ont été interrompus (erreurs de convergence, « plantage »). Malgré nos efforts nous n'avons pas été en mesure de « récupérer » les 22 % restants. Toutefois, l'analyse

6.1.2 SENS PHYSIQUE DES INDICATEURS

Dans ce paragraphe nous allons faire le lien entre les valeurs résultant directement des calculs (Température et humidité relative dans la paroi, teneur en eau des matériaux), et quelques-uns des risques définis au §2.2. Cette analyse sera illustrée par le cas 4004_BBE1_NAN_VMC, avec

6.1.2.1 ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU

La teneur en eau totale de la paroi est présentée sur la Figure 16 ; le calcul réalisé vérifie si la dernière année, la teneur en eau moyenne est bien inférieure ou égale à la teneur en eau moyenne de l'année précédente. Ici, c'est

les cas étant numérotés avec la nomenclature suivante :

1001_MOB1_TRA_VMC : N° du cas_pari Ville système de ventilation

des résultats montre dans l'ensemble qu'il y a suffisamment de proximité entre certains cas pour considérer que les cas non aboutis ne changeraient pas les tendances générales. Par exemple, nous avons constaté peu d'écart entre les calculs faits à Nancy, à Trappes ou à Rennes : si pour une paroi donnée il manque l'un de ces climats, on peut considérer que les conclusions établis pour les autres climats s'appliquent également.

flux d'air, c'est-à-dire paroi en béton banché, isolée par l'extérieur (laine de roche), située à Nancy, et dans le cas d'une ventilation de type VMC (extraction). Nous ne présenterons que l'analyse du mur de la salle de bain.

bien le cas, la paroi sèche par rapport aux conditions initiales choisies, il n'y a pas d'accumulation d'humidité. Le taux d'accroissement calculé est de -5 % (Tableau 19).

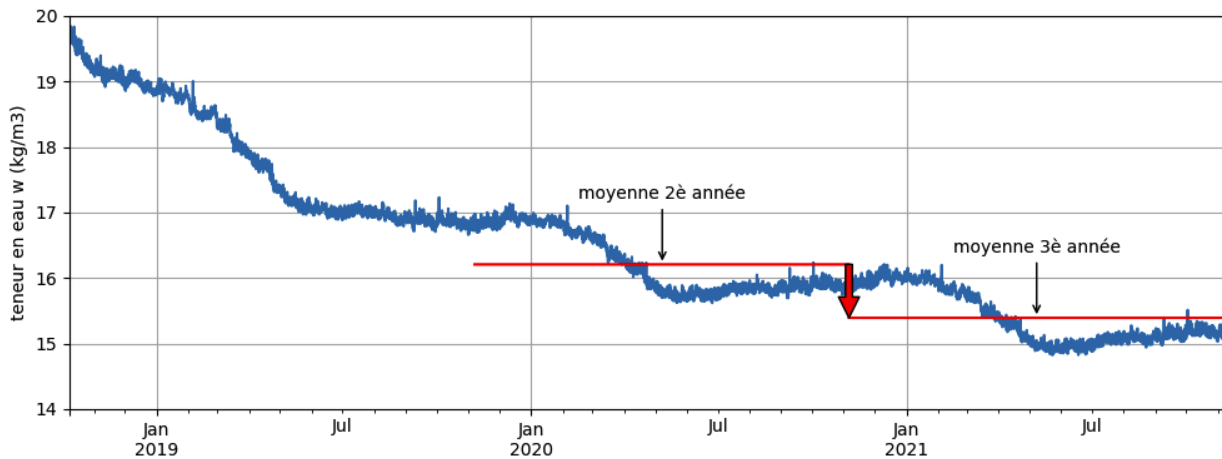


FIGURE 16 Évolution de la teneur en eau totale

Teneur en eau moy. 2 ^{ème} année	Teneur en eau moy. 3 ^{ème} année	taux d'accroissement
16,2 kg/m ³	15,4 kg/m ³	- 5 %

TABEAU 19 Calcul du taux d'accroissement

6.1.2.2 RISQUE DE CONDENSATION

Pour évaluer le risque de condensation dans les matériaux, nous regardons l'humidité relative au sein de la paroi. Chaque fois qu'un nœud (ou plusieurs simultanément) dépasse les 98 % HR, nous considérons qu'il se produit 1h de condensation. La Figure 17 présente l'humidité relative

en quelques points de la paroi, et montre que le seuil est dépassé durant l'hiver par le nœud situé sous l'enduit extérieur ; au total, il se produit dans le cas présent 72h de condensation (autour du 20 février).

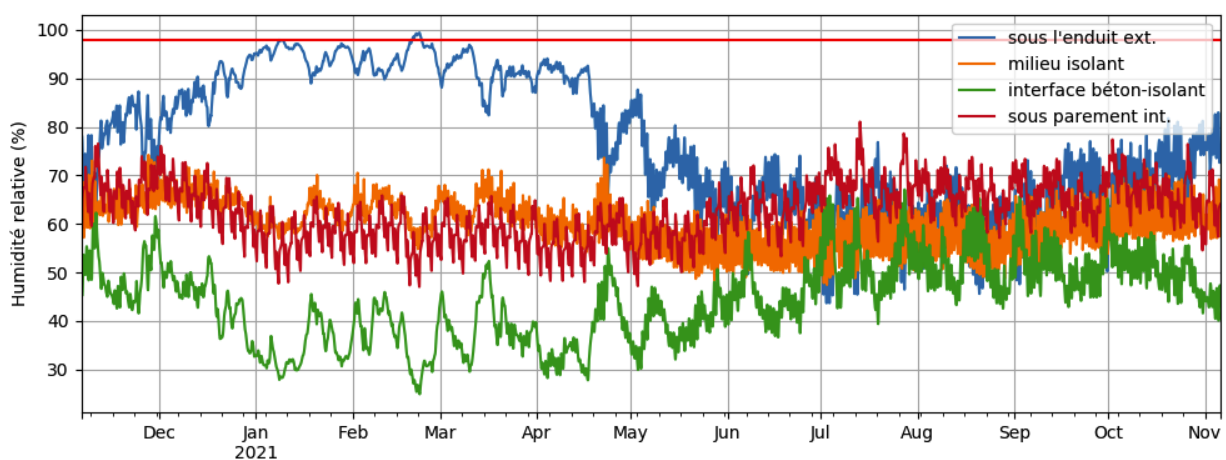


FIGURE 17 Humidité relative en quelques points de la paroi

6.1.2.3 CROISSANCE DE MOISSURES

La Figure 18 présente l'indice de croissance de moisissure tel que défini au §2.2, calculé aux deux interfaces de l'isolant. La valeur maximale atteinte la dernière année reste inférieure à 3, on considérera donc que la croissance de moisissure n'est pas problématique pour cette paroi.

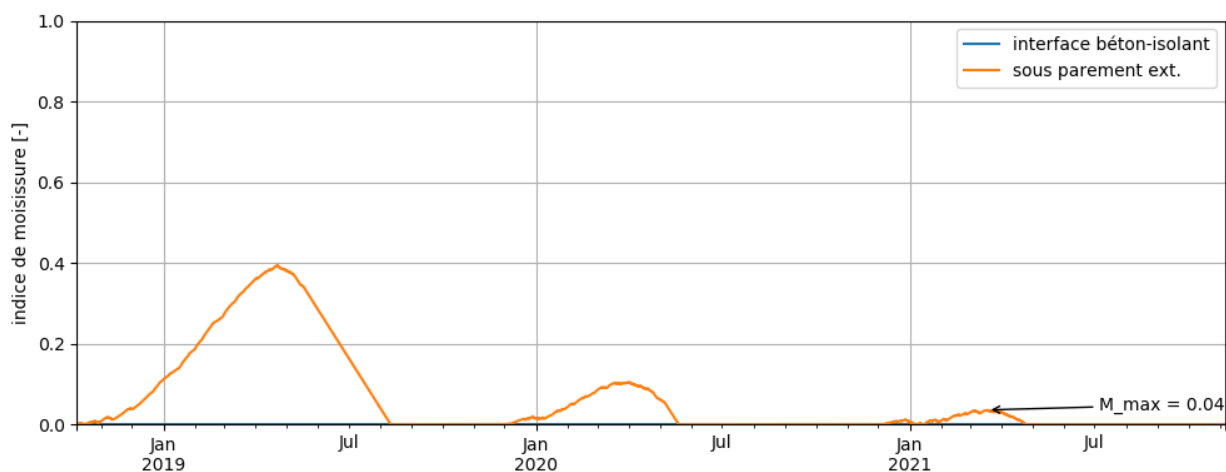


FIGURE 18 Indice de croissance de moisissure

6.1.2.4 TABLEAU DE RÉSULTATS

Pour ce cas, les indicateurs sont résumés dans le Tableau 20.

cas	mur	accroiss. W	indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
4004_BBE1_NAN_VMC	CH1_SUD	-7 %	0,004	0	100 %
4004_BBE1_NAN_VMC	SdB_NORD	-5 %	0,04	71	100 %

TABLEAU 20 Synthèse des résultats pour le cas 4004_BBE1_NAN_VMC, avec flux d'air dans la paroi

L'ensemble des résultats sont présentés en annexe.

6

2

ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans cette partie nous présentons sous forme de graphes certains résultats à titre d'illustration, que nous avons choisis comme étant représentatifs de l'ensemble des résultats. Les résultats figurent en annexe sous forme de tableaux.

6.2.1 COMPARAISONS DE DEUX TYPES DE VENTILATION SANS FLUX D'AIR DANS LA PAROI

Les calculs ont été réalisés sans flux d'air dans la paroi pour un système par extraction (VMC) et un système par insufflation (VIR). La Figure 19 présente par exemple la teneur en eau maximale atteinte dans les isolants biosourcés (pour les parois qui en contiennent). On ne constate

pas d'écart significatif entre les deux systèmes. De plus, aucune paroi ne dépasse le seuil de 23 %-m fixé pour les isolants biosourcés. Ces conclusions se retrouvent pour tous les indicateurs définis au §2.2.

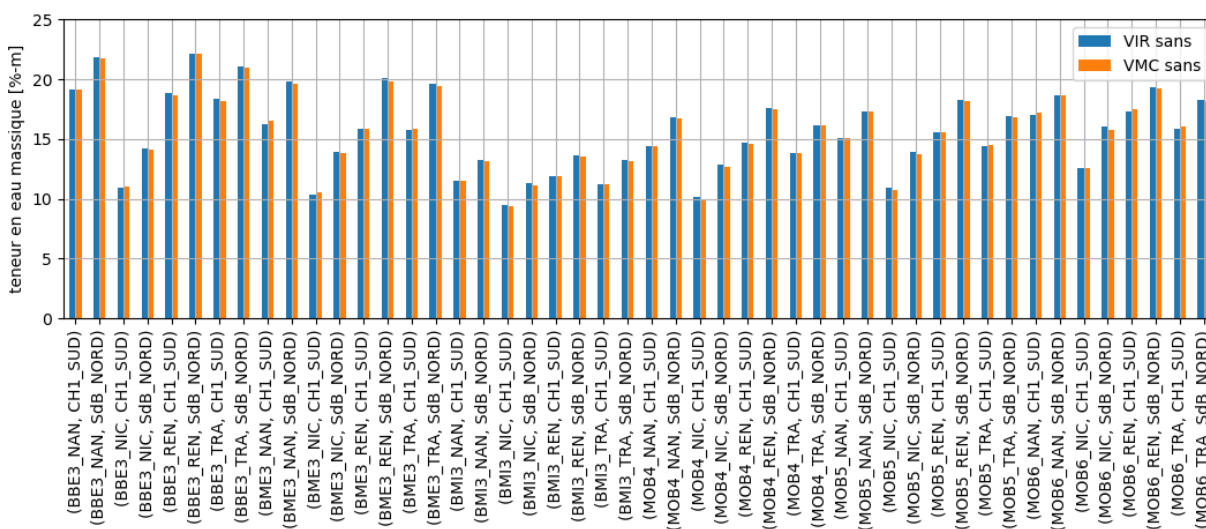


FIGURE 19 Teneur en eau maximale atteinte dans les isolants biosourcés, sans flux d'air dans les parois, pour un système de ventilation par insufflation et un par extraction

En raison de la grande similarité entre les résultats entre VIR et VIC (voir paragraphe 6.2.2.2), et entre VIR et VMC en l'absence de flux d'air, les calculs n'ont pas été réalisés pour les configurations VIC sans flux d'air dans la paroi. Malgré les différences sur le climat intérieur (voir §5.2.3),

en l'absence de fuite aéraulique dans la paroi les résultats sont similaires pour la ventilation par insufflation et par extraction, quel que soit le climat et pour l'ensemble des modes constructifs : on n'observe pas de risque particulier au sein des parois.

6.2.2 IMPACT DE LA PRISE EN COMPTE D'UN FLUX D'AIR

6.2.2.1 VENTILATION PAR EXTRACTION

La Figure 20 présente, à titre d'illustration, l'indice de croissance de moisissure maximal, avec et sans prise en compte d'un flux d'air dans la paroi (ne sont tracées que les configurations pour lesquelles cette valeur est non nulle). Les écarts liés au flux d'air sont négligeables. Ce

résultat se retrouve pour l'ensemble des configurations testées et pour tous les indicateurs.

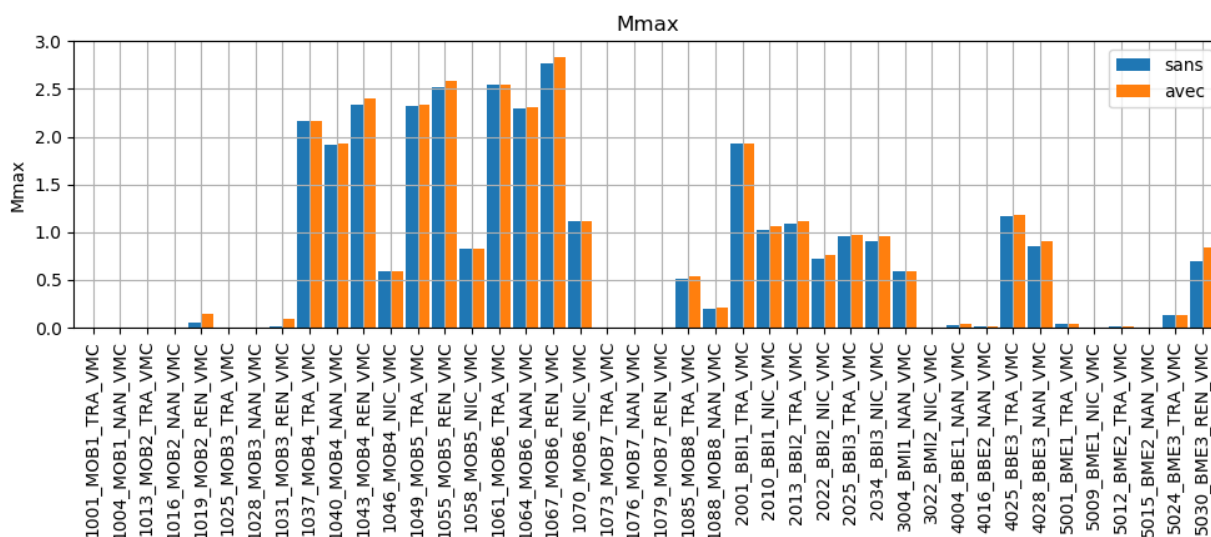


FIGURE 20 Indice de croissance de moisissure en VMC, avec et sans flux d'air dans la paroi ; résultats en Salle de bain (Nord)

Par ailleurs, on constate globalement une grande similarité dans les résultats pour les différents climats « du nord » (Rennes, Trappes, Nancy). Nice se distingue par un niveau d'humidité généralement plus faible. En outre, les niveaux

d'humidité atteints en salle de bain (paroi orientée au nord) sont toujours significativement plus élevés que pour l'usage « chambre ».

6.2.2.2 VENTILATION PAR INSUFFLATION

Dans un premier temps nous comparons les deux types de systèmes de ventilation par insufflation (centralisée, répartie). La Figure 21 présente la teneur en eau massique

dans le panneau extérieur des murs à ossature bois, pour les parois de la salle de bain. Nous pouvons voir qu'il y a très peu d'écart entre les deux configurations.

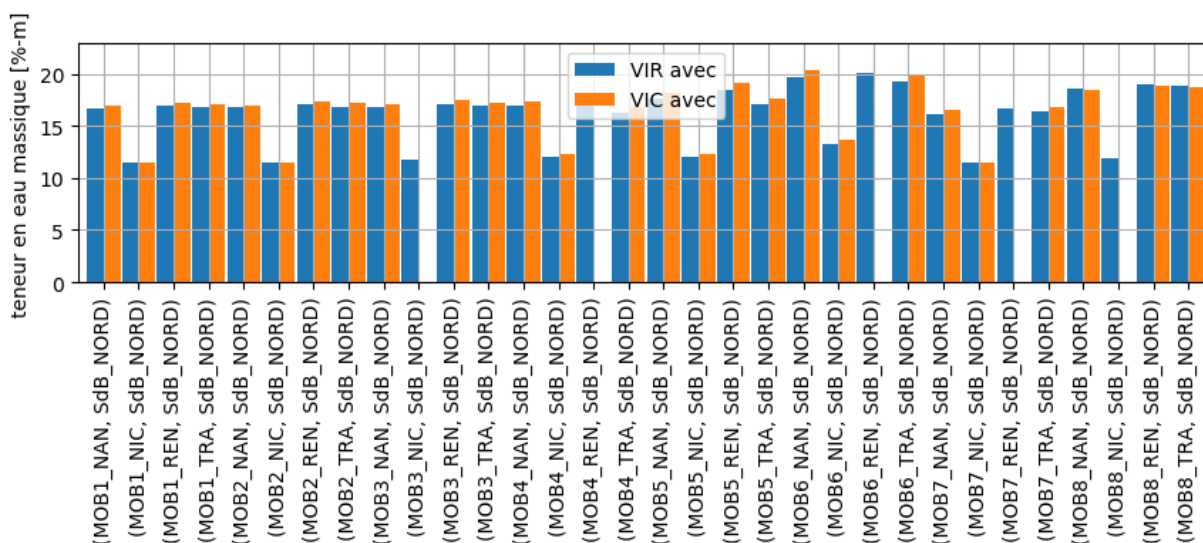


FIGURE 21 Teneur en eau maximale du panneau extérieur pour les deux systèmes par insufflation (centralisée, répartie), avec prise en compte du flux d'air dans la paroi ; résultats pour la salle de bain (Nord)

La Figure 22 présente les teneurs en eau maximales atteintes dans l'isolant biosourcé pour les cas de ventilation par insufflation répartie, avec et sans flux d'air au travers des parois (en salle de bain).

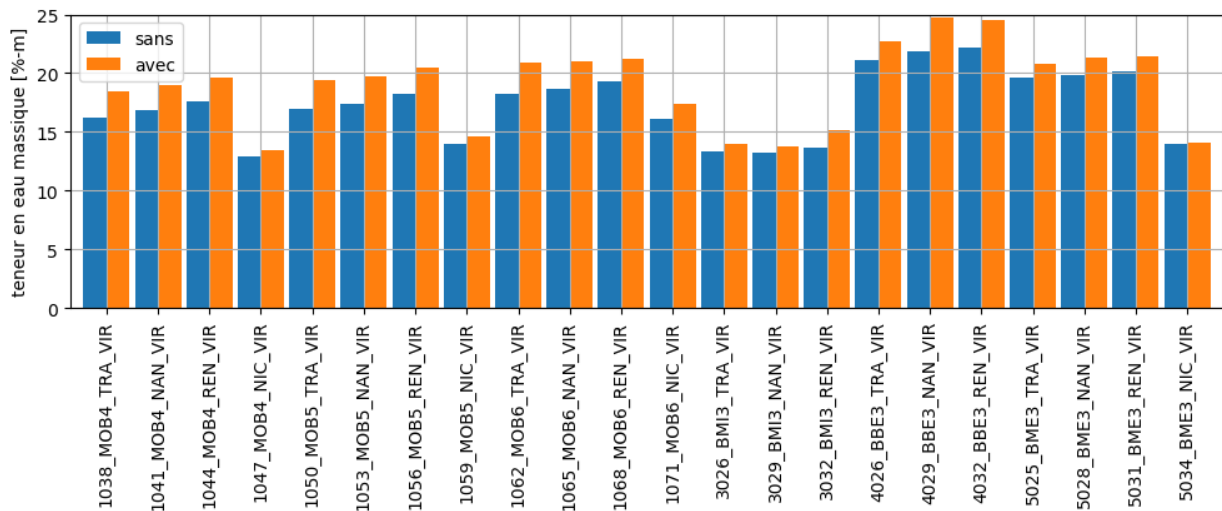


FIGURE 22 Teneur en eau massique dans les isolants biosourcés en ventilation par insufflation répartie avec et sans flux d'air dans les parois ; résultats pour la salle de bains (nord)

On constate une augmentation de la teneur en eau lorsque l'on prend en compte des flux d'air au travers de la paroi. Cette augmentation, toutefois, reste peu importante et surtout n'entraîne en général pas de risques associés : l'augmentation n'est pas suffisante pour être critique. En effet, même dans les cas d'isolation par l'extérieur sur maçonnerie en béton banché (BBE3), où la teneur en eau maximale dépasse le seuil des 23 %, la durée pendant laquelle ce seuil est dépassé (au maximum 347h, voir tableau en annexe) reste très inférieure à la durée tolérée de 8 semaines (1344h). Par ailleurs on n'atteint jamais le seuil critique de 30 %m.

On note tout de même une augmentation du risque de condensation (Figure 23) dans le cas d'isolants non-biosourcés (moins hygroscopiques) lorsque l'on tient compte des flux d'air dans la paroi, uniquement dans le cas d'un usage salle de bain. Il faut noter que cette condensation se produit sous l'enduit extérieur, et va dépendre, en pratique, des caractéristiques de celui-ci (perméabilité à la vapeur, capillarité). Il est donc délicat de parler de risque, mais cette configuration favorise un surplus d'humidité.

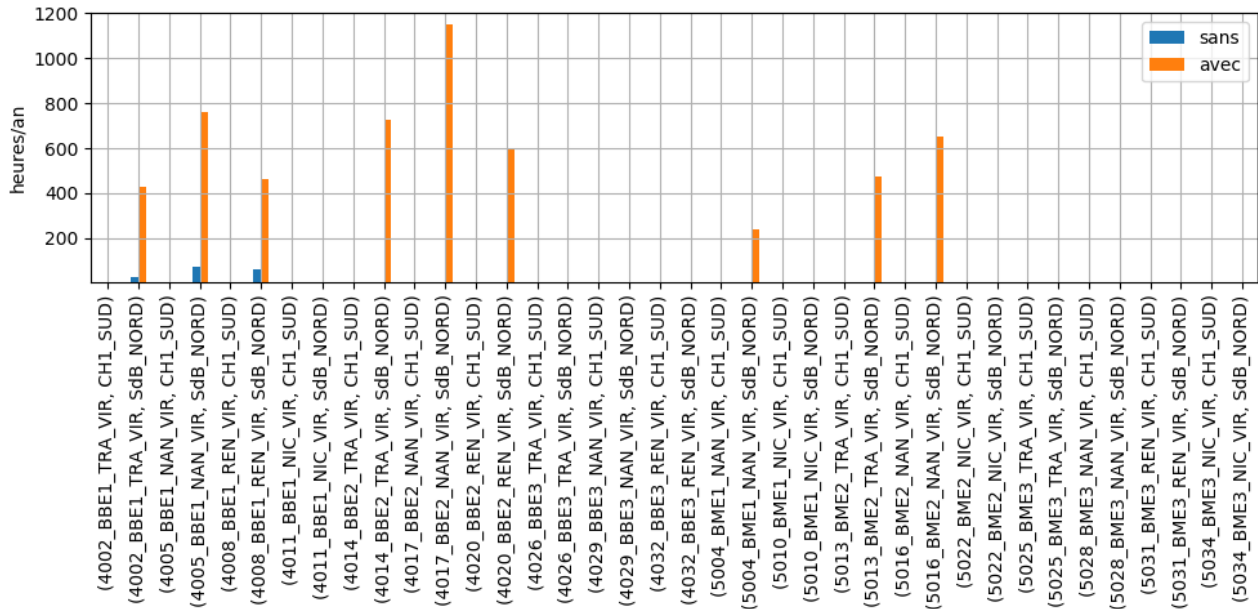


FIGURE 23 Nombre d'heures de condensation en ventilation par insufflation répartie avec et sans flux d'air dans les parois

Enfin, l'analyse des parois isolées par l'intérieur sur maçonnerie en béton banché montre une humidité en augmentation dans la paroi (pas de stabilisation) : dans ce cas, la paroi même sans flux d'air est très sensible, et le surplus

d'humidité lié au flux d'air « poussé » par la ventilation par insufflation va générer un risque de dommages, ceci en dehors de la zone climatique H3, et pour l'usage « salle de bain » uniquement.

6

3

SYNTHÈSE PAR TYPE CONSTRUCTIF

6.3.1 OSSATURE BOIS

- Pas de risque structurel identifié
- Augmentation du risque de croissance de micro-organisme dans les isolants biosourcés en cas de ventilation par insufflation en zone H1a, H1b, H2a.

Type d'isolant	Zones climatiques	Recommandations particulières suivant type de ventilation	
		extraction	insufflation
biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	Légère augmentation du risque de développement fongique suivant sensibilité du matériau choisi
	H3	✓	✓
Non biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	✓
	H3	✓	✓

6.3.2 MAÇONNERIE TYPE BÉTON BANCHÉ

- L'isolation thermique par l'intérieur sur une maçonnerie en béton peut conduire à de la condensation à l'interface entre le béton et l'isolant dans certains cas ; les isolants biosourcés nécessitent alors une étude au cas par cas.

Type d'isolation	Zones climatiques	Recommandations particulières suivant type de ventilation	
		extraction	insufflation
ITE : biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	Légère augmentation du risque de développement fongique suivant sensibilité du matériau choisi
	H3	✓	✓
ITE : non biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	Risque d'humidification sous l'enduit extérieur, qui doit préférentiellement être très perméable à la vapeur
	H3	✓	✓
ITI : non biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	Risque élevé de condensation dans la paroi en pièce humide (type salle de bain)
	H3	✓	✓

6.3.3 MAÇONNERIE TYPE BRIQUE MONOMUR

- Maçonnerie relativement isolante, perméable à la vapeur d'eau et capable de stocker l'humidité sans dommage, donc paroi peu à risque.

Type d'isolation	Zones climatiques	Recommandations particulières suivant type de ventilation	
		extraction	insufflation
ITE : biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	✓
	H3	✓	✓
ITE : non biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	Risque d'humidification sous l'enduit extérieur, qui doit préférentiellement être très perméable à la vapeur
	H3	✓	✓
ITE : biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	✓
	H3	✓	✓
ITI : non biosourcé	H1a, H1b, H2a	✓	✓
	H3	✓	✓

7

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail a permis le développement d'un modèle de flux d'air au sein d'une paroi de bâtiment et son implémentation dans le code de calcul Mathis. Ce développement permet de disposer d'un outil permettant le calcul thermo-hygro-aéroulrique à l'échelle du logement complet, avec en particulier un bilan des pressions et des débits d'air liés aux systèmes de ventilation et le couplage à l'échelle « paroi ». L'outil ainsi développé permet d'estimer l'apport d'humidité (ou le séchage) lié aux fuites d'air dans les parois, en fonction du régime de pression (fonctionnement du système de ventilation, vent, tirage thermique etc) et de l'usage des pièces.

Cet outil a été utilisé pour évaluer les risques hygrothermiques liés à différents types de systèmes de ventilation à simple flux (extraction, insufflation répartie, insufflation centralisée), pour plusieurs typologies constructives (ossature bois, maçonneries isolées par l'intérieur, par l'extérieur). Les risques analysés ont été en particulier l'accumulation d'humidité dans la paroi, la condensation, le développement de moisissures et la dégradation des matériaux bois ou biosourcés.

Les calculs ont montré qu'en cas de parfaite étanchéité à l'air les configurations étudiées ne présentaient pas de risque hygrothermique particulier. En outre, les parois se comportent de manière similaire pour les trois types de ventilation étudiés. Cette base permet ensuite de comparer l'effet des systèmes de ventilation lorsque des flux d'air se produisent dans la paroi.

L'étude a ainsi mis en évidence les points principaux suivants, en considérant un flux d'air traversant la paroi à hauteur de 10 % de la perméabilité totale du logement :

- **Absence de risque particulier en zone climatique H3, quelle que soit la configuration**
- **Absence de risque particulier en usage « pièce de vie » ; les risques sont concentrés dans les pièces humides**

- **Avec la ventilation par extraction, les jeux de pression et flux d'air ne génèrent pas d'augmentation du risque hygrothermiques, y compris en pièce humide.**

- En ventilation par insufflation, les conclusions sont plus nuancées :

- **La surpression créée par le système de ventilation tend à augmenter l'humidité dans la paroi, mais ce surplus d'humidité est rarement suffisant pour augmenter significativement les risques.**

- Dans certains cas, une augmentation des risques existe tout de même : ce sont des parois déjà sensibles à la base, et qui ne peuvent tolérer un surplus d'humidité sans présenter des risques de dégradation.

- Ces risques concernent principalement l'isolation par l'intérieur sur maçonnerie en béton banché, qui présente une accumulation d'humidité continue dans le cas d'une pièce humide. Cette configuration n'est donc pas recommandée pour l'installation d'une ventilation par insufflation, sauf à prévoir une évacuation spécifique de l'humidité (extraction ponctuelle, ouverture de fenêtre).

- **Les résultats ont montré, en cas de ventilation par insufflation, l'importance de soigner particulièrement l'étanchéité à l'air (traversées, jonction des menuiseries etc.) En effet, en l'absence d'infiltration d'air, il n'y a pas de risque particulier observé.**

Les limites de validité de ces conclusions sont liées aux choix faits en termes de niveau d'étanchéité à l'air du logement et à la proportion d'air traversant effectivement les parois, ainsi qu'aux matériaux étudiés. En outre, des études complémentaires sont nécessaires pour étendre les conclusions à d'autres zones climatiques.

8

RÉFÉRENCES

- [1] HUMIBATEX 1, « Impact de l'humidité dans le bâtiment : diagnostics et retours d'expériences Partie I – Bâtiments : typologies et pathologies ». CSTB, 2016.
- [2] S. Geving et S. Uvsløkk, « Moisture conditions in timber frame roof and wall structures – Test house measurements for verification of heat-, air and moisture transfer models », Byggforsk (Institut de recherche norvégien sur le bâtiment), 2000.
- [3] A. Janssens, « Reliable Control of Interstitial Condensation in Leightweight Roof Systems », Katholieke Universiteit Leuven, 1998.
- [4] D. Derome, « Moisture Accumulation in Cellulose Insulation Caused by Air Leakage in Flat Wood Frame Roofs », *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 28, n° 3, p. 269-287, 2005, doi: 10.1177/1097196305048597.
- [5] G. Desmarais, D. Derome, et P. Fazio, « Mapping of Air Leakage in Exterior Wall Assemblies », *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 24, n° 2, p. 132-154, 2000, doi: 10.1106/BWH8-9D3J-R939-957E.
- [6] T. Kalamees et J. Kurnitski, « Moisture Convection Performance of External Walls and Roofs », *Journal of Building Physics*, vol. 33, n° 3, p. 225-247, 2010, doi: 10.1177/1744259109343502.
- [7] T. Z. Desta, J. Langmans, et S. Roels, « Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes », *Building and Environment*, vol. 46, n° 5, p. 1038-1046, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.11.002>.
- [8] 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 », *Building and Environment*, vol. 94, Part 2, p. 457 – 466, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.009>.
- [9] H. Künzel, D. Zirkelbach, et B. Schafaczek, « Modelling the Effect of Air Leakage in Hygrothermal Envelope Simulation », Atlanta, 2012. [En ligne]. Disponible sur: <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzl,%20Zirkelbach%20et%20al%202012%20-%20Modelling%20the%20Effect%20of%20Air.pdf>
- [10] CSTB, « CSTB / Mathis – GitLab. » <https://gitlab.com/CSTB/mathis> [consulté le juin 10, 2021].
- [11] F. Demouge, « MATHIS – Guide Technique. CSTB, rapport n° EN-CAPE 17.053 L – VO/FR. » 2017.
- [12] NF EN ISO 13788, « Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments – Température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse – Méthodes de calcul ». 2013.
- [13] NF EN 15026, « Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique ». 2008.
- [14] NF DTU 31-2, « Travaux de bâtiment – Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois – Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types (CCT)– Partie 1-2 : Critères généraux de choix des matériaux (CGM) – Partie 2 : Cahier des clauses administratives spéciales types (CCS) ». 2019.
- [15] N. EN 335, « Durabilité du bois et des matériaux à base de bois – Classes d'emploi : définitions et application au bois massif et aux matériaux à base de bois ». 2013.
- [16] J. Berger, S. Guernouti, M. Woloszyn, et C. Buhe, « Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation », *Journal of Building Engineering*, vol. 3, p. 1 – 15, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.04.008>.
- [17] K. Calle et N. Van Den Bossche, « Sensitivity of the hygrothermal behaviour of homogeneous masonry constructions: from Sobol indices to decision trees », présenté à 12th Nordic Symposium on Building Physics, 2020. doi: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202017207001>.
- [18] K. Viljanen, X. Lü, et J. Puttonen, « Hygrothermal Behaviour of Ventilation Cavities in Highly Insulated Envelopes », présenté à 12th Nordic Symposium on Building Physics, 2020. doi: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202017207003>.
- [19] K. Lähdesmäki *et al.*, « Development of an improved model for mould growth: Laboratory and field experiments », 2008.
- [20] P. Johansson et T. Svensson, « Predicting mould growth on building materials– the PJ-model », présenté à 12th Nordic Symposium on Building Physics, 2020. doi: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202017220001>.
- [21] P. Johansson, L. Lång, G. Bok, et C.-M. Capener, « Threshold values for mould growth: Critical moisture level of 21 different building materials », présenté à 12th Nordic Symposium on Building Physics, 2020. doi: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202017220002>.

- [22] T. K. Hansen, N. Feldt Jensen, E. Møller, E. Jan de Place Hansen, et R. Peuhkuri, « Monitored conditions in wooden wall plates in relation to mold and wood decaying fungi », présenté à 12th Nordic Symposium on Building Physics, 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202017220004.
- [23] CSTB et FCBA, *étude hygrothermique de l'influence de plusieurs paramètres dans des parois à ossature bois - Rapport final*. 2012.
- [24] H. Viitanen, M. Krus, T. Ojanen, V. Eitner, et D. Zirkelbach, « Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models », *Energy Procedia*, vol. 78, p. 1425 - 1430, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.165>.
- [25] A. Hukka et H. A. Viitanen, « A mathematical model of mould growth on wooden material », *Wood Science and Technology*, vol. 33, n° 6, p. 475-485, déc. 1999, doi: 10.1007/s002260050131.
- [26] T. Ojanen, H. Viitanen, R. Peuhkuri, K. Lähdesmäki, J. Vinha, et K. Salminen, « Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials », Florida, 2010.
- [27] S. N. Shoukry, G. W. William, B. Downie, et M. Y. Riad, « Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 2, p. 688-696, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.020>.
- [28] Guohui Zhang, Xiaohang Li, et Zongli Li, « Experimental Study on Static Mechanical Properties and Moisture Contents of Concrete Under Water Environment », *Sustainability*, n° 2962, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/su1102962>.
- [29] P. G. Ranjith, D. Jasinge, J. Y. Song, et S. K. Choi, « A study of the effect of displacement rate and moisture content on the mechanical properties of concrete: Use of acoustic emission », *Mechanics of Materials*, vol. 40, n° 6, p. 453-469, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2007.11.002>.
- [30] N. Sathiparan et U. Rumeskumar, « Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry », *Journal of Building Engineering*, vol. 17, p. 23-31, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.01.015>.
- [31] E. Franzoni, C. Gentilini, G. Graziani, et S. Bandini, « Compressive behaviour of brick masonry triplets in wet and dry conditions », *Construction and Building Materials*, vol. 82, p. 45-52, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.052>.
- [32] V. Vitiello, R. Castelluccio, et M. D. R. Merino, « Experimental research to evaluate the percentage change of thermal and mechanical performances of bricks in historical buildings due to moisture », *Construction and Building Materials*, vol. 244, p. 118107, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118107>.
- [33] IBP, « WUFI-Corr: Wufi corrosion model, user guide ».
- [34] R. Rodrigues, S. Gaboreau, J. Gance, I. Ignatiadis, et S. Betelu, « Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring », *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121240, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240>.
- [35] X. Zhou, J. Carmeliet, et D. Derome, « Assessment of risk of freeze-thaw damage in internally insulated masonry in a changing climate », *Building and Environment*, vol. 175, p. 106773, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106773>.
- [36] C. Feng, S. Roels, et H. Janssen, « Towards a more representative assessment of frost damage to porous building materials », *Building and Environment*, vol. 164, p. 106343, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106343>.
- [37] H. M. Kunzel, « Simultaneous heat and moisture transport in building components - One- and two-dimensional calculation using simple parameters », PhD, University of Stuttgart, 1995.
- [38] C. Xu, S. Li, et K. Zou, « Study of heat and moisture transfer in internal and external wall insulation configurations », *Journal of Building Engineering*, vol. 24, p. 100724, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.016>.
- [39] C.-E. Hagentoft, « HAMSTAD PROJECT - Heat, Air and Moisture STAndards Development - WP2 Modeling - Report R-02:8 ». Department of Building Physics, Chalmers University of Technology, 2002.
- [40] C.-E. Hagentoft, « HAMSTAD PROJECT - Heat, Air and Moisture STAndards Development - WP2 Modeling - Report R-02:9 ». Department of Building Physics, Chalmers University of Technology, 2002.
- [41] GroupeSpécialisé14.5, « VMC Simple Flux Hygroréglable - Règles de calculs pour l'instruction d'une demande d'Avis Technique. CCFA ». 2016.
- [42] P. Kölsch, H. Kunzel, et Daniel Zirkelbach, « Konvektiver Feuchteeintrag in Leichtbaukonstruktionen - Leckagearten, Tauwasserverteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis », *Bauphysik*, p. 269-278, oct. 2019.
- [43] CSTB, « Méthode de calcul Th-BCE 2012. annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012. » 2012.

9

ANNEXES

9

1

MODELE DE DIFFUSION – CAS DE RÉFÉRENCE N°1

9.1.1 OBJET

Une couche homogène est analysée dans des conditions isothermes dans une dimension. La couche est initialement en équilibre d'humidité avec l'air ambiant, ayant une humidité relative constante. Au temps zéro, il y a un changement soudain de l'humidité relative de l'air ambiant. La structure est parfaitement étanche.

Puisque les conditions sont isothermes, et que les propriétés λ et δ sont indépendantes de l'humidité), les équations

de conservation de l'humidité et de l'énergie sont découplées. Pour donner un poids très réduit au terme de flux latent dans l'équation de l'énergie, le benchmark fournit une valeur très réduite de la chaleur latente ($L_v = 56,8 \text{ J/kg}$ au lieu de $L_v = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$).

La simulation est réalisée sur 1000 heures et est comparée à une solution analytique de référence.

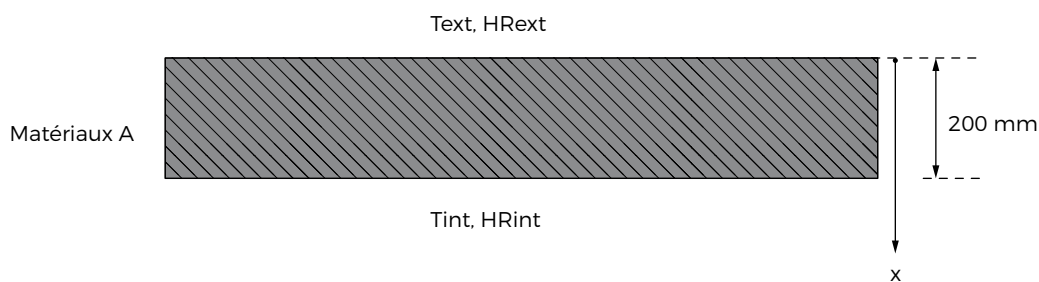


FIGURE 24 Schéma de la structure analysée (« homogeneous wall », [Hagentoft, 2002])

9.1.2 CONDITIONS AUX LIMITES

$T_{ext} = 20^\circ\text{C}$, $T_{int} = 20^\circ\text{C}$
 $HR_{ext} = 45 \%$, $HR_{int} = 60 \%$

9.1.3 CONDITIONS INITIALES AU SEIN DE LA STRUCTURE

$T_{ini} = 20^\circ\text{C}$, $HR_{ini} = 95 \%$ (soit une teneur en eau $w = 84,77 \text{ kg/m}^3$)

9.1.4 DONNÉES DU MATÉRIAU

Masse volumique : $\rho = 525 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

Chaleur spécifique : $C_p = 800 \text{ (J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$

Conductivité thermique : $\lambda = 0.15 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$

Isotherme de sorption : $w = \frac{116}{(1 - \frac{1}{0.118} \ln(HR))^{0.8869}} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$

(donnée tabulée selon un pas de 0,5 HR)

Perméabilité à la vapeur d'eau : $\delta = 1.10^{-15} \text{ (s)}$

Diffusivité hydrique : $D_w = 6.10^{-10} \text{ (m}^2\text{.s}^{-1}\text{)}$

9.1.5 RÉSULTATS

La figure ci-dessous présente les résultats obtenus. On constate que les résultats obtenus par MATHIS se super-

posent parfaitement à ceux de la solution analytique.

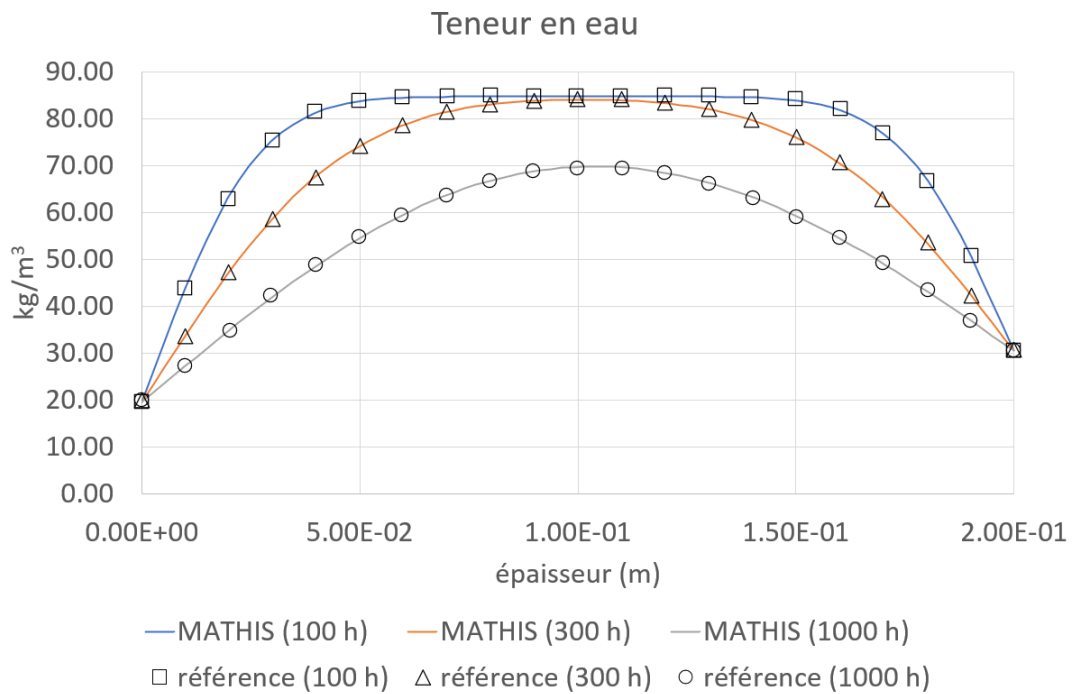


FIGURE 25 Teneur en eau au sein du matériau à différents instant du séchage

9

2

MODÈLE DE DIFFUSION – CAS DE RÉFÉRENCE N°2

9.2.1 OBJET

Une structure de toit isolé est analysée en une dimension. L'isolation thermique fait face à l'intérieur et il y a un pare-vapeur sur la face extérieure. L'assemblage est parfaitement étanche à l'air.

Cette configuration de paroi ne vise pas à être réaliste mais à constituer une situation à risque, notamment vis-à-

vis du risque de condensation à l'interface entre les deux matériaux.

La durée de la simulation est de 5 ans. Des conditions aux limites variables en température et en humidité sont appliquées. Les résultats sont comparés à d'autres modèles ayant participé au benchmark.

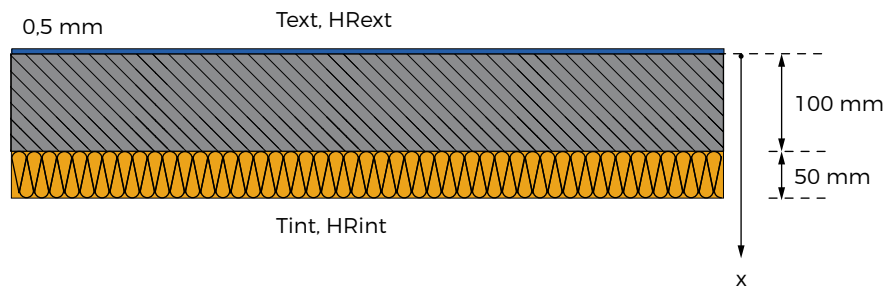


FIGURE 26 Schéma de la structure analysée (« insulated roof », [CITATION HAM02 \l 1036])

9.2.2 CONDITIONS AUX LIMITES

Les figures ci-dessous présentent les évolutions de température et d'humidité appliquées en conditions aux limites.

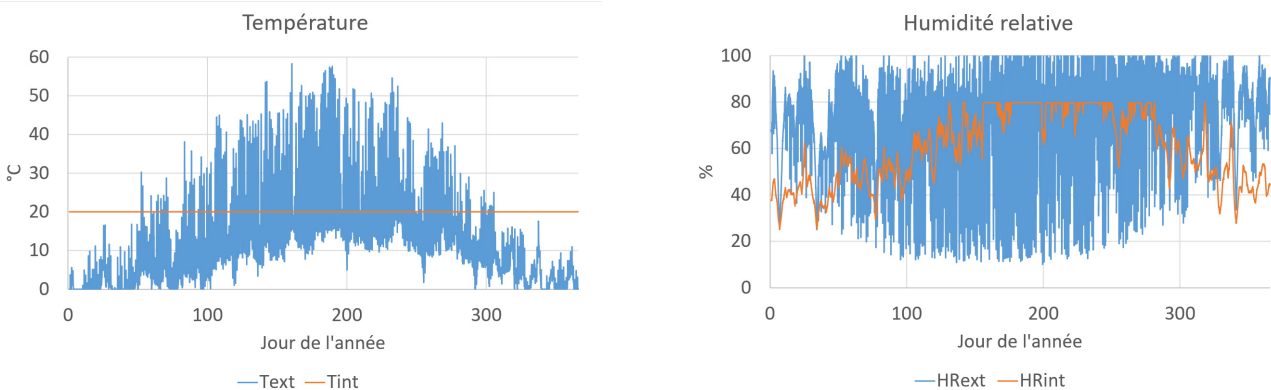


FIGURE 27 Conditions aux limites pour le cas de validation n°2

9.2.3 CONDITIONS INITIALES AU SEIN DE LA STRUCTURE

Structure porteuse (layer A) : $T = 10^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 99.3\%$

Isolant (layer B) : $T = 10^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 60\%$

9.2.4 DONNÉES DES MATÉRIAUX

Les caractéristiques thermo-hydriques des matériaux sont définies sous forme de formules par les données du benchmark. Ces dernières sont tabulées en fonction de l'humidité relative (selon un pas de 0.5% HR) pour être transmises au modèle MATHIS.

9.2.4.1 DONNÉES DU MATÉRIAU DE LA STRUCTURE PORTEUSE

Masse volumique : $\rho = 2280$ (kg/m³)

Chaleur spécifique : $C_p = 800$ (J.kg⁻¹.K⁻¹)

Conductivité thermique : $\lambda = 1.5 + \frac{15.8}{1000} w$ (W.m⁻¹.K⁻¹)

Isotherme de sorption : $W = \frac{146}{(1 + (-8.10^{-4} \cdot \frac{RT_p}{M_w} \ln(\text{HR}))^{1.6})^{0.375}}$ (kg.m⁻³)

Perméabilité à la vapeur d'eau : $\delta = \frac{M_w}{RT} \frac{26.1 \cdot 10^{-4}}{200} \frac{1 - \frac{w}{146}}{0.503(1 - \frac{w}{146})^2 + 0.497}$ (s)

Perméabilité à l'eau liquide :

$$K = \exp[-39.2619 + 0.0704(w - 73) - 1.7420 \cdot 10^{-4}(w - 73)^2 - 2.7953 \cdot 10^{-6}(w - 73)^3 - 1.1566 \cdot 10^{-7}(w - 73)^4 + 2.5969 \cdot 10^{-9}(w - 73)^5] \text{ (s)}$$

9.2.4.2 DONNÉES DU MATÉRIAU DE L'ISOLANT

Masse volumique : $\rho = 73.9$ (kg/m³)

Chaleur spécifique : $C_p = 1000$ (J.kg⁻¹.K⁻¹)

Conductivité thermique : $\lambda = 0.033 + \frac{0.59}{1000} w$ (W.m⁻¹.K⁻¹)

Isotherme de sorption : $W = \frac{900}{(1 + (-2.10^{-4} \cdot \frac{RT_p}{M_w} \ln(\text{HR}))^2)^{0.5}}$ (kg.m⁻³)

Perméabilité à la vapeur d'eau : $\delta = \frac{M_w}{RT} \frac{26.1 \cdot 10^{-4}}{9.6} \frac{1 - \frac{w}{900}}{0.503(1 - \frac{w}{900})^2 + 0.497}$ (s)

Perméabilité à l'eau liquide : $K = 0$ (s)

Remarque : dans MATHIS, on ne fournit pas en donnée d'entrée la perméabilité à l'eau liquide K mais la diffusivité hydrique du matériau D_w définie à partir de la perméabilité

à l'eau liquide et de la courbe isotherme de sorption par :

$$D_w = K \frac{RT_{\text{ref}} \rho_w}{HR M_w \frac{\partial W}{\partial \text{HR}}} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$$

9.2.5 RÉSULTATS

Les résultats obtenus sont comparés ci-après avec ceux de différents modèles de la littérature. Si une dispersion entre modèles est notable, notamment concernant la quantité d'eau dans la structure porteuse,

les résultats de MATHIS sont cohérents avec les autres simulations. On note qu'ils se situent plutôt sur la borne basse des modèles en termes de teneur en eau prédite.

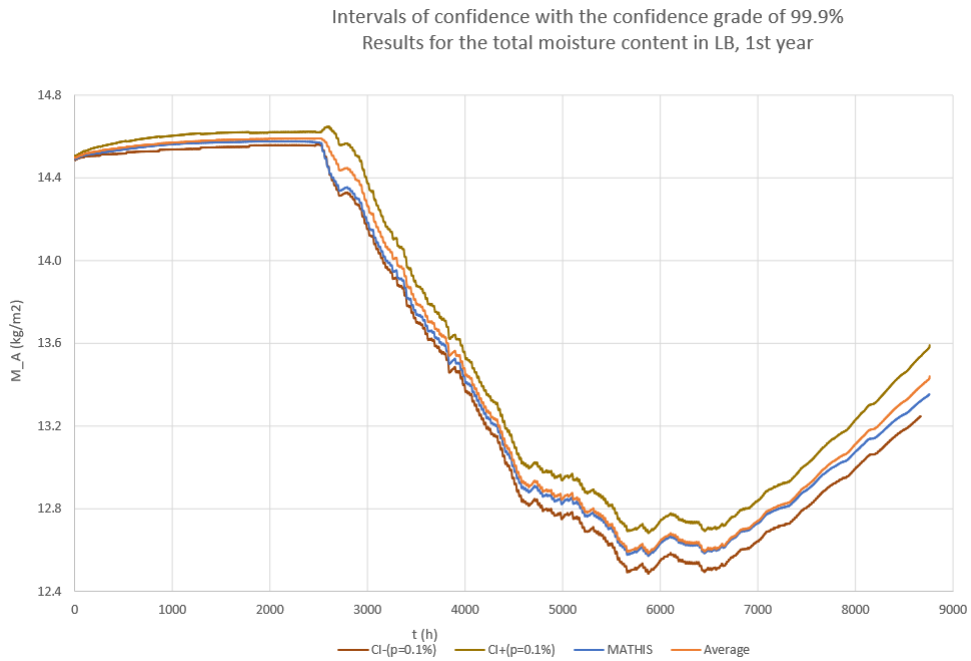


FIGURE 28 Teneur en eau de la structure porteuse - 1^{ère} année

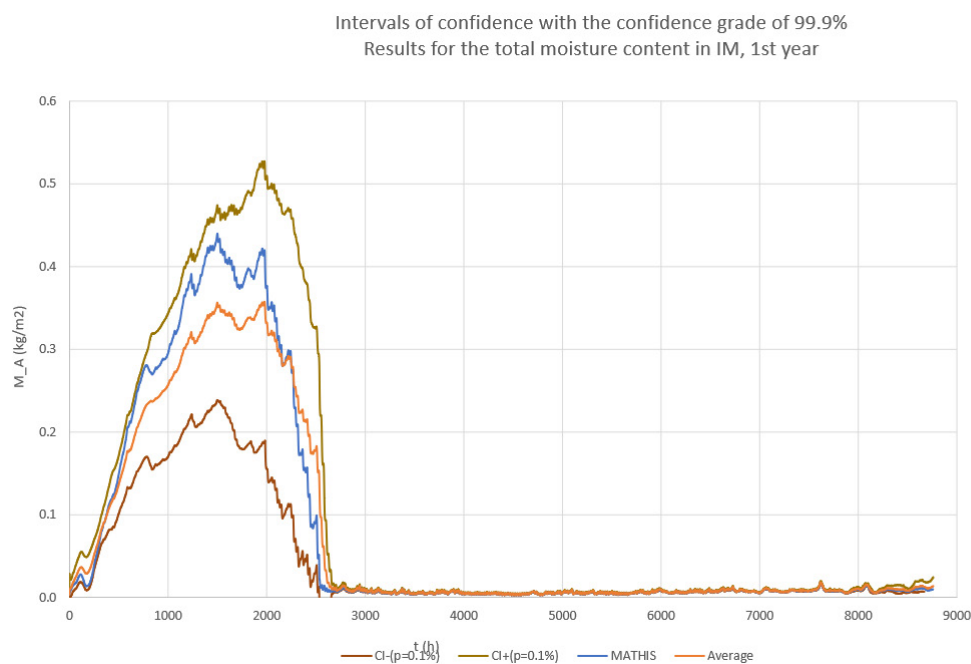


FIGURE 29 Teneur en eau de l'isolant - 1^{ère} année

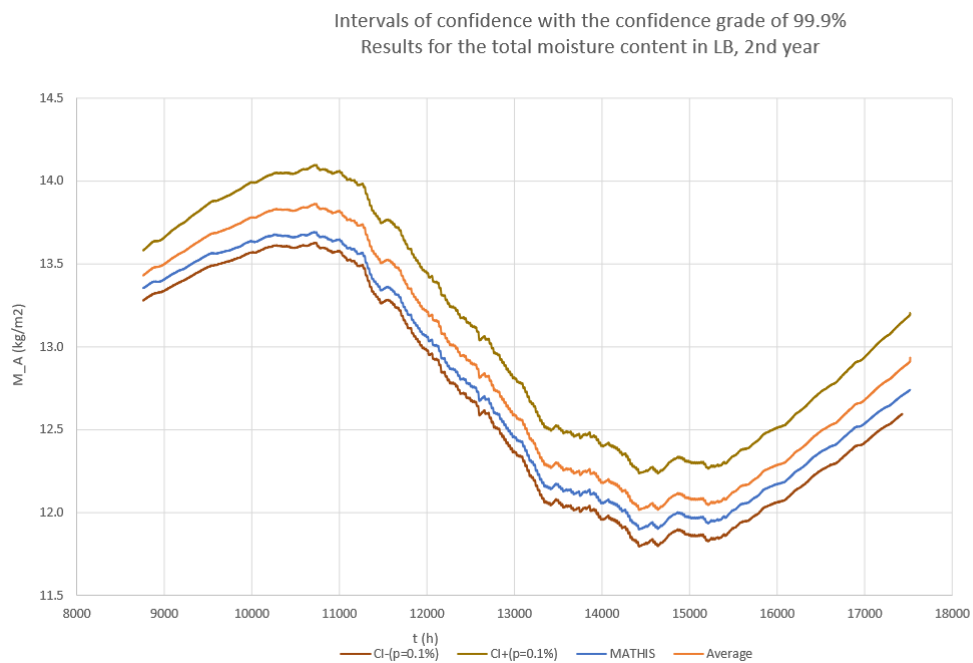


FIGURE 30 Teneur en eau de la structure porteuse - 2^{ème} année

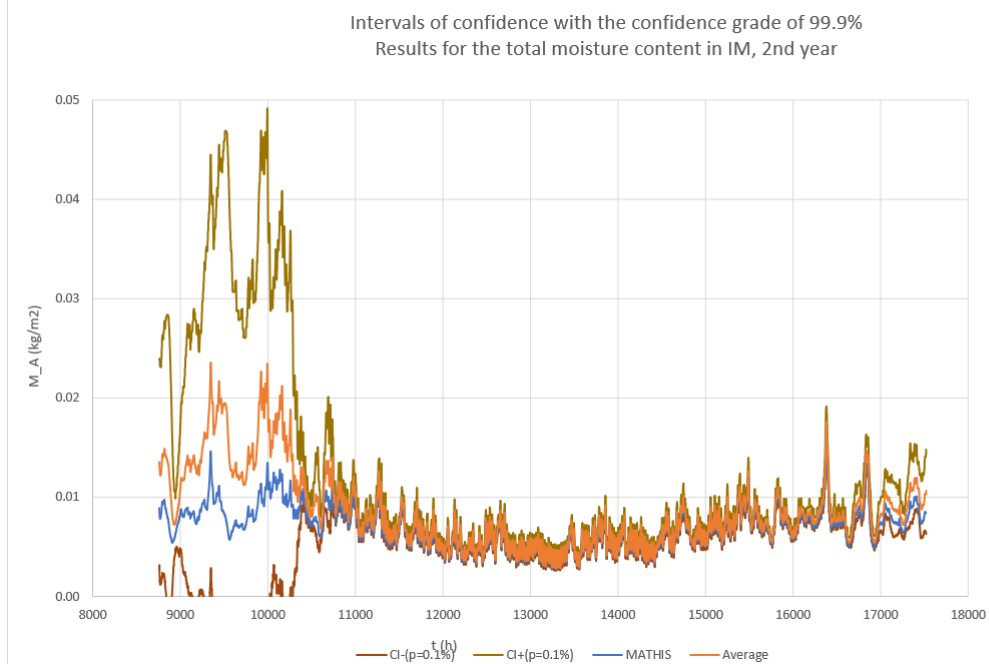


FIGURE 31 Teneur en eau de l'isolant - 2^{ème} année

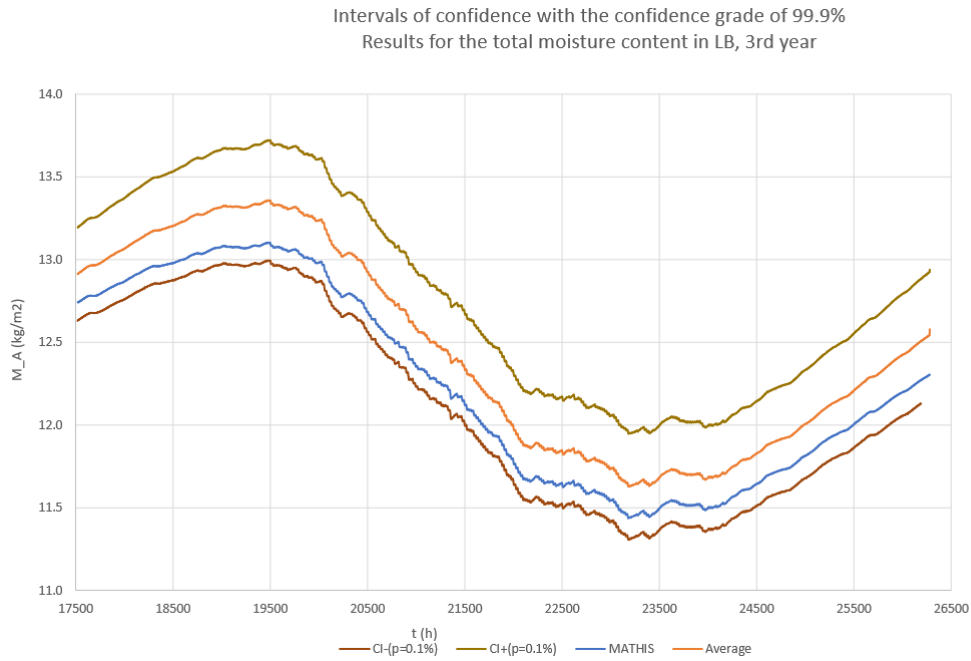


FIGURE 32 Teneur en eau de la structure porteuse - 3^{ème} année

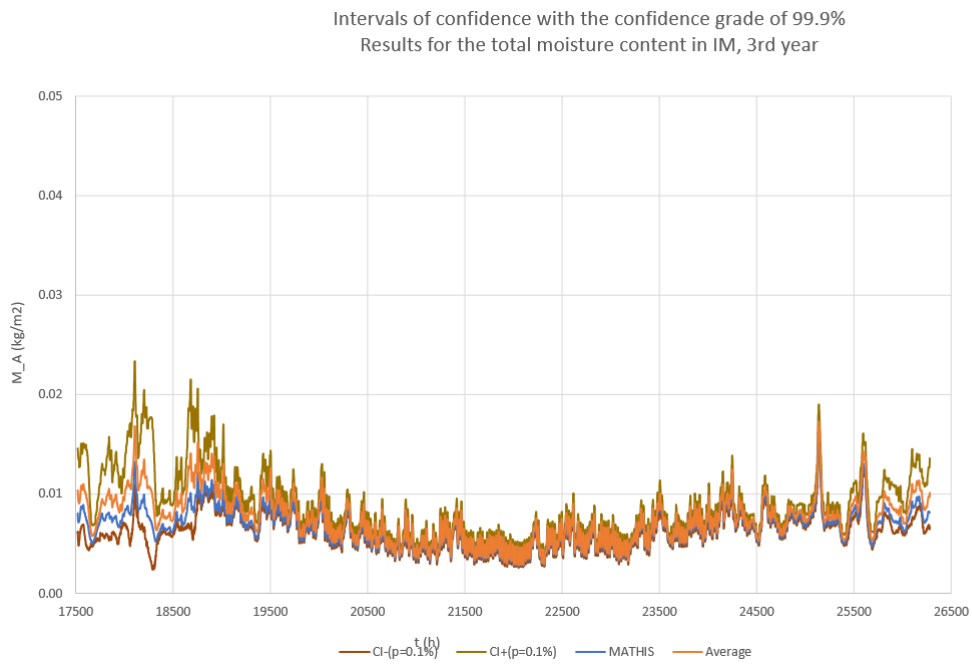


FIGURE 33 Teneur en eau de l'isolant - 3^{ème} année

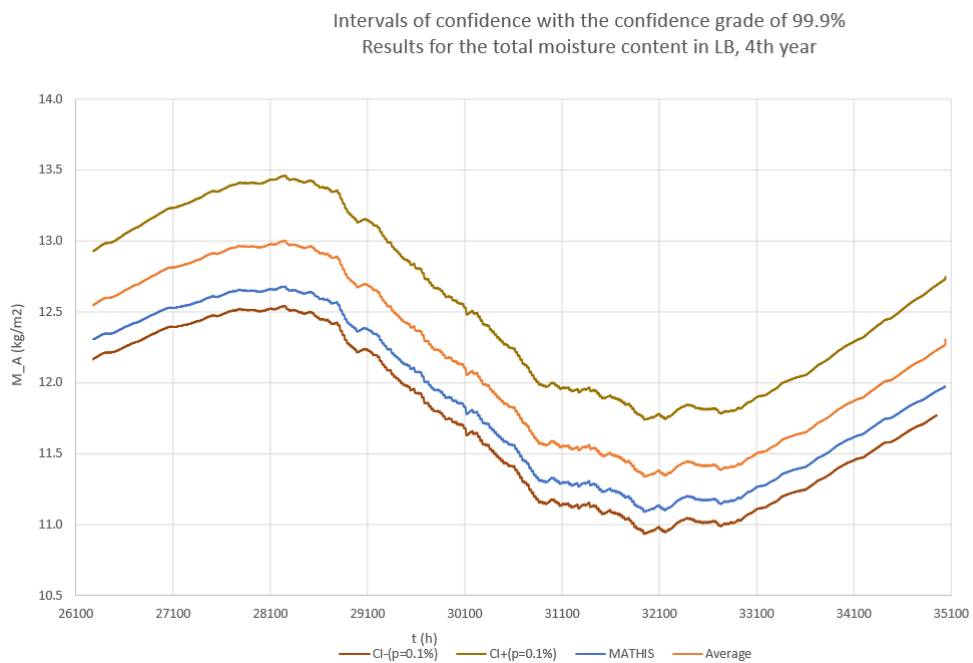


FIGURE 34 Teneur en eau de la structure porteuse - 4^{ème} année

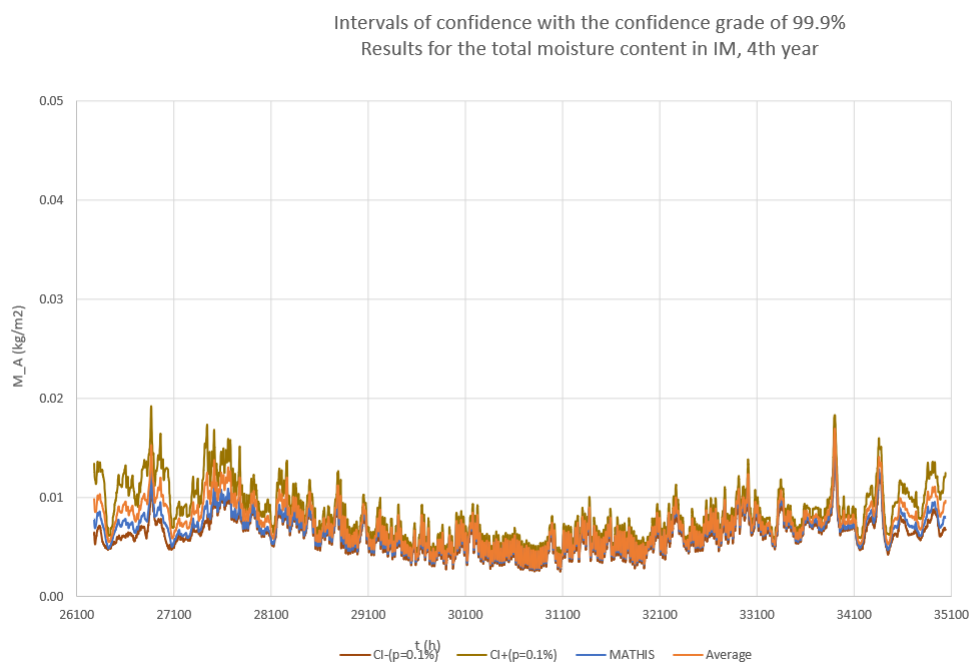


FIGURE 35 Teneur en eau de l'isolant - 4^{ème} année

Intervals of confidence with the confidence grade of 99.9%
Results for the total moisture content in LB, 5th year

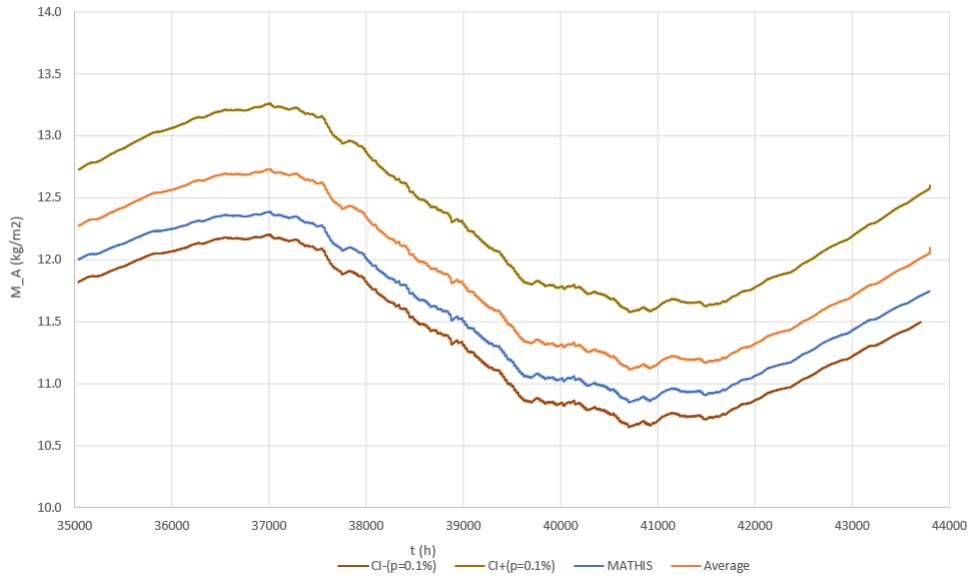


FIGURE 36 Teneur en eau de la structure porteuse - 5^{ème} année

Intervals of confidence with the confidence grade of 99.9%
Results for the total moisture content in IM, 5th year

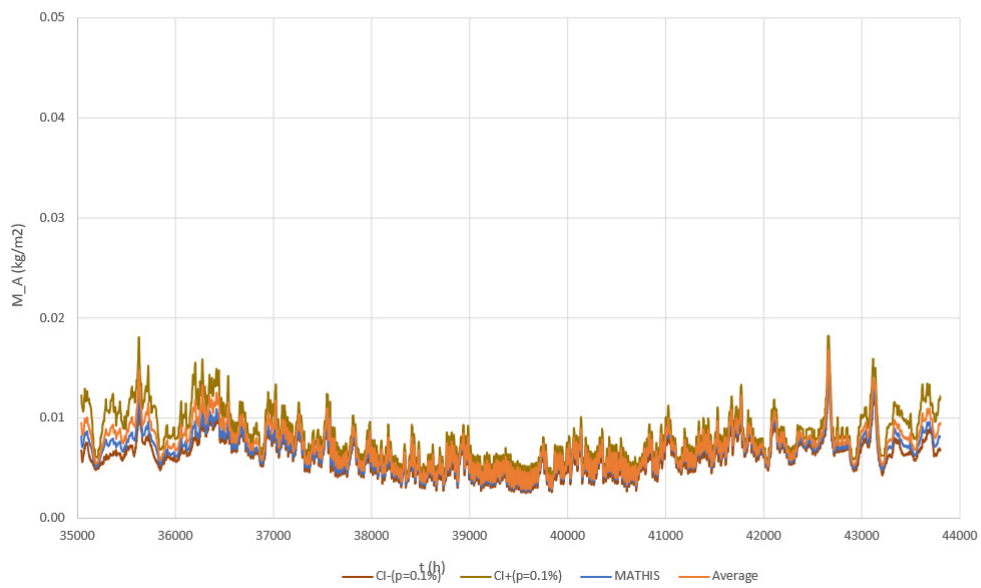


FIGURE 37 Teneur en eau de l'isolant - 5^{ème} année

9

3

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX POUR LES CALCULS

Le Tableau 21 récapitule les caractéristiques prises pour réaliser les calculs. La conductivité thermique, la résistance à la diffusion de vapeur, la teneur en eau ainsi que la conductivité hydrique sont données à différentes humidités relatives (0 %, 80 % et 100 %).

	Densité ρ [kg/m ³]	Conductivité thermique λ [W/mK]			Chaleur spécifique Cp [J/kgK]	μ [-]		Teneur en eau w [kg/m ³]		Dw [m ² /s]	
	sec	sec	80 %	100 %	sec	20 %	80 %	80 %	100 %	80 %	100 %
panneau 1	600	0,1	0,1	0,1	1400	20	12	76	610	2,20E-14	4,00E-09
panneau 2	600	0,1	0,1	0,1	1400	130	130	76	610	2,20E-14	4,00E-09
panneau 3	600	0,1	0,1	0,1	1400	520	520	76	610	2,20E-14	4,00E-09
Laine de verre	25	0,035	0,035	0,08	840	1	1	0,46	255	0	0
fibre de bois ITI	53	0,039	0,039	0,064	2100	1,35	1,58	7,0	180	7,71E-10	2,07E-08
fibre de bois ITE	140	0,039	0,042	0,090	1400	3	3	21	350	2,64E-12	1,74E-10
plâtre	700	0,2	0,2	0,2	1000	10	4	6,3	400	1,00E-09	1,00E-06
béton	2300	2,3	2,3	2,3	850	150	80	85	150	2,50E-11	1,30E-10
brique	650	0,13	0,16	0,486	850	15	15	15	178	2,50E-10	1,00E-06
laine de roche	166	0,036	0,036	0,04	850	1	1	1,01	73,9	0	0

TABEAU 21 Caractéristiques hygrothermiques des matériaux

9

4

PARAMÈTRES POUR LE MODÈLE VTT

matériau 1	matériau 2	sensibilité	déclin
laine de verre/de roche	panneau bois	<i>sensitive</i>	<i>almost no decline</i>
laine de verre/de roche	béton	<i>medium resistant</i>	<i>relative low decline</i>
laine de verre/de roche	brique	<i>medium resistant</i>	<i>almost no decline</i>
laine de verre/de roche	pare-vapeur	<i>medium resistant</i>	<i>relative low decline</i>
polystyrène	béton	<i>medium resistant</i>	<i>relative low decline</i>
polystyrène	brique	<i>medium resistant</i>	<i>almost no decline</i>
fibre de bois	panneau bois	<i>sensitive</i>	<i>significant decline</i>
fibre de bois	béton	<i>sensitive</i>	<i>significant decline</i>
fibre de bois	brique	<i>sensitive</i>	<i>significant decline</i>
fibre de bois	pare-vapeur	<i>sensitive</i>	<i>significant decline</i>
laine de verre/de roche	enduit	<i>medium resistant</i>	<i>relative low decline</i>
fibre de bois	enduit	<i>sensitive</i>	<i>significant decline</i>
polystyrène	enduit	<i>medium resistant</i>	<i>significant decline</i>

TABLEAU 22 Paramètres pour les calculs de développement de moisissures à l'interface entre deux matériaux

9

5

CLIMATS INTÉRIEURS POUR CALCULS HYGROTHERMIQUES DANS LES PAROIS

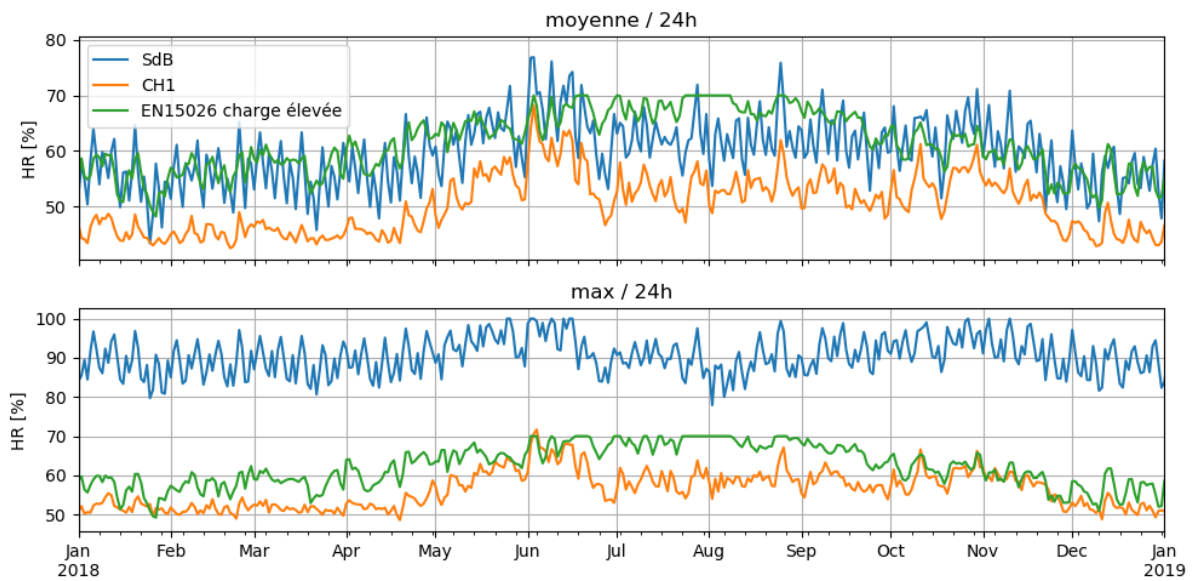


FIGURE 38 Humidité relative intérieure moyenne journalière (en haut) et maximum quotidienne (en bas), calculée par MATHIS et comparée à la norme EN15026

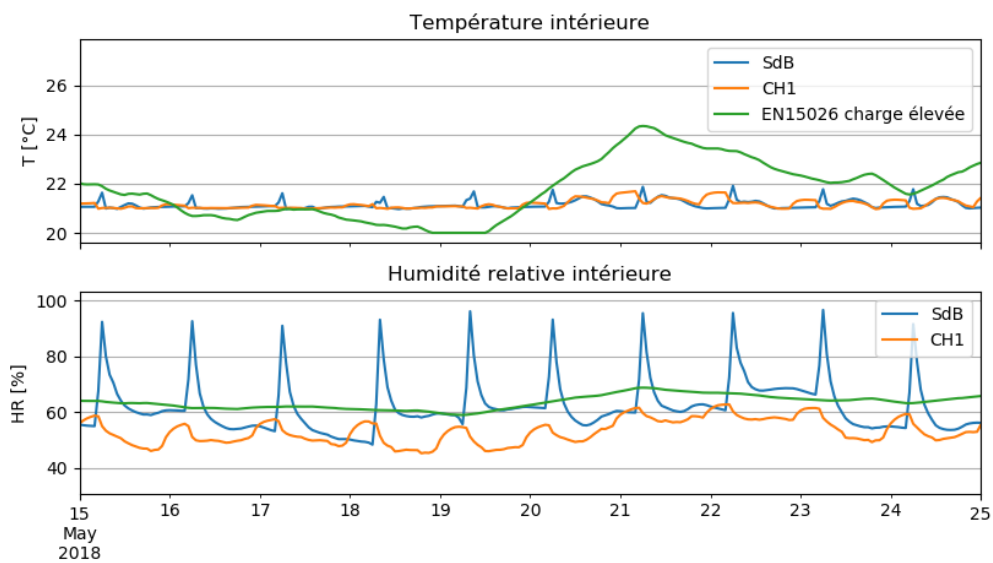


FIGURE 39 Zoom sur 10 jours : température et humidité relative intérieure calculée par Mathis et comparée à la norme EN15026

9

6

TABLEAUX DE RÉSULTATS COMPLETS

Les tableaux ci-dessous donnent les valeurs calculées pour les indicateurs de dommages pour l'ensemble des configurations évaluées avec flux d'air dans la paroi.

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 %		W_max		indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
			panneau	biosourcé	panneau	biosourcé			
1001_MOB1_TRA_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1001_MOB1_TRA_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	14 %	N/A	0,00	0	100 %
1002_MOB1_TRA_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1002_MOB1_TRA_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,78	0	100 %
1003_MOB1_TRA_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1003_MOB1_TRA_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,01	0	100 %
1004_MOB1_NAN_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1004_MOB1_NAN_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	14 %	N/A	0,00	0	100 %
1005_MOB1_NAN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1005_MOB1_NAN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,25	0	100 %
1006_MOB1_NAN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1006_MOB1_NAN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,30	0	100 %
1008_MOB1_REN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1008_MOB1_REN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,30	0	100 %
1009_MOB1_REN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1009_MOB1_REN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,44	0	100 %
1010_MOB1_NIC_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1010_MOB1_NIC_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1011_MOB1_NIC_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1011_MOB1_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1012_MOB1_NIC_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1012_MOB1_NIC_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1013_MOB2_TRA_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1013_MOB2_TRA_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	14 %	N/A	0,00	0	100 %
1014_MOB2_TRA_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1014_MOB2_TRA_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,06	0	100 %
1015_MOB2_TRA_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1015_MOB2_TRA_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,18	0	100 %
1016_MOB2_NAN_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 %		W_max		indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
			panneau	biosourcé	panneau	biosourcé			
1016_MOB2_NAN_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	14 %	N/A	0,00	0	100 %
1017_MOB2_NAN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1017_MOB2_NAN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,50	0	100 %
1018_MOB2_NAN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1018_MOB2_NAN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,64	0	100 %
1019_MOB2_REN_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1019_MOB2_REN_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	15 %	N/A	0,15	0	100 %
1020_MOB2_REN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1020_MOB2_REN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,48	0	100 %
1021_MOB2_REN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1021_MOB2_REN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,65	0	100 %
1022_MOB2_NIC_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1022_MOB2_NIC_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1023_MOB2_NIC_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1023_MOB2_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1024_MOB2_NIC_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1024_MOB2_NIC_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1025_MOB3_TRA_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1025_MOB3_TRA_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	14 %	N/A	0,00	0	100 %
1026_MOB3_TRA_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1026_MOB3_TRA_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,19	0	100 %
1027_MOB3_TRA_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1027_MOB3_TRA_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,31	0	100 %
1028_MOB3_NAN_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1028_MOB3_NAN_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	13 %	N/A	0,00	0	100 %
1029_MOB3_NAN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1029_MOB3_NAN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,76	0	100 %
1030_MOB3_NAN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1030_MOB3_NAN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,89	0	100 %
1031_MOB3_REN_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1031_MOB3_REN_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	15 %	N/A	0,09	0	100 %
1032_MOB3_REN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1032_MOB3_REN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,67	0	100 %
1033_MOB3_REN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1033_MOB3_REN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,85	0	100 %
1034_MOB3_NIC_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 %		W_max		indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
			panneau	biosourcé	panneau	biosourcé			
1034_MOB3_NIC_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1035_MOB3_NIC_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1035_MOB3_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1037_MOB4_TRA_VMC	CH1_SUD	-2 %	0	0	12 %	14 %	1,01	0	95 %
1037_MOB4_TRA_VMC	SdB_NORD	-4 %	0	0	14 %	16 %	2,16	0	95 %
1038_MOB4_TRA_VIR	CH1_SUD	-2 %	0	0	13 %	14 %	1,03	0	95 %
1038_MOB4_TRA_VIR	SdB_NORD	-4 %	0	0	16 %	18 %	2,75	0	95 %
1039_MOB4_TRA_VIC	CH1_SUD	-2 %	0	0	12 %	14 %	1,04	0	95 %
1039_MOB4_TRA_VIC	SdB_NORD	-5 %	0	0	17 %	19 %	2,82	0	95 %
1040_MOB4_NAN_VMC	CH1_SUD	-2 %	0	0	13 %	14 %	0,88	0	95 %
1040_MOB4_NAN_VMC	SdB_NORD	-4 %	0	0	15 %	17 %	1,93	0	95 %
1041_MOB4_NAN_VIR	CH1_SUD	-2 %	0	0	13 %	15 %	0,91	0	95 %
1041_MOB4_NAN_VIR	SdB_NORD	-4 %	0	0	17 %	19 %	2,50	0	95 %
1042_MOB4_NAN_VIC	CH1_SUD	-2 %	0	0	13 %	15 %	0,92	0	95 %
1042_MOB4_NAN_VIC	SdB_NORD	-5 %	0	0	17 %	19 %	2,59	0	95 %
1043_MOB4_REN_VMC	CH1_SUD	-2 %	0	0	13 %	15 %	0,94	0	95 %
1043_MOB4_REN_VMC	SdB_NORD	-4 %	0	0	16 %	18 %	2,40	0	95 %
1044_MOB4_REN_VIR	CH1_SUD	-2 %	0	0	13 %	15 %	0,98	0	95 %
1044_MOB4_REN_VIR	SdB_NORD	-4 %	0	0	18 %	20 %	2,98	0	94 %
1046_MOB4_NIC_VMC	CH1_SUD	-1 %	0	0	10 %	10 %	0,00	0	95 %
1046_MOB4_NIC_VMC	SdB_NORD	-1 %	0	0	12 %	13 %	0,59	0	95 %
1047_MOB4_NIC_VIR	CH1_SUD	-1 %	0	0	10 %	10 %	0,00	0	95 %
1047_MOB4_NIC_VIR	SdB_NORD	-1 %	0	0	12 %	13 %	0,74	0	95 %
1048_MOB4_NIC_VIC	CH1_SUD	-1 %	0	0	10 %	10 %	0,00	0	95 %
1048_MOB4_NIC_VIC	SdB_NORD	-1 %	0	0	12 %	14 %	0,73	0	95 %
1049_MOB5_TRA_VMC	CH1_SUD	-4 %	0	0	12 %	15 %	1,18	0	95 %
1049_MOB5_TRA_VMC	SdB_NORD	-6 %	0	0	15 %	17 %	2,33	0	95 %
1050_MOB5_TRA_VIR	CH1_SUD	-4 %	0	0	13 %	15 %	1,21	0	95 %
1050_MOB5_TRA_VIR	SdB_NORD	-6 %	0	0	17 %	19 %	2,90	0	94 %
1051_MOB5_TRA_VIC	CH1_SUD	-5 %	0	0	12 %	15 %	1,21	0	95 %
1051_MOB5_TRA_VIC	SdB_NORD	-6 %	0	0	18 %	20 %	3,01	0	94 %
1053_MOB5_NAN_VIR	CH1_SUD	-4 %	0	0	13 %	16 %	1,12	0	95 %
1053_MOB5_NAN_VIR	SdB_NORD	-6 %	0	0	18 %	20 %	2,73	0	94 %
1054_MOB5_NAN_VIC	CH1_SUD	-4 %	0	0	13 %	15 %	1,10	0	95 %
1054_MOB5_NAN_VIC	SdB_NORD	-6 %	0	0	18 %	20 %	2,84	0	94 %
1055_MOB5_REN_VMC	CH1_SUD	-4 %	0	0	13 %	16 %	1,21	0	95 %

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 %		W_max		indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
			panneau	biosourcé	panneau	biosourcé			
1055_MOB5_REN_VMC	SdB_NORD	-5 %	0	0	16 %	18 %	2,58	0	95 %
1056_MOB5_REN_VIR	CH1_SUD	-4 %	0	0	13 %	16 %	1,26	0	95 %
1056_MOB5_REN_VIR	SdB_NORD	-5 %	0	0	18 %	20 %	3,22	0	94 %
1057_MOB5_REN_VIC	CH1_SUD	-4 %	0	0	13 %	16 %	1,23	0	95 %
1057_MOB5_REN_VIC	SdB_NORD	-5 %	0	0	19 %	21 %	3,31	0	94 %
1058_MOB5_NIC_VMC	CH1_SUD	-3 %	0	0	10 %	11 %	0,00	0	95 %
1058_MOB5_NIC_VMC	SdB_NORD	-3 %	0	0	12 %	14 %	0,83	0	95 %
1059_MOB5_NIC_VIR	CH1_SUD	-3 %	0	0	10 %	11 %	0,00	0	95 %
1059_MOB5_NIC_VIR	SdB_NORD	-3 %	0	0	12 %	15 %	0,98	0	95 %
1060_MOB5_NIC_VIC	CH1_SUD	-3 %	0	0	10 %	11 %	0,00	0	95 %
1060_MOB5_NIC_VIC	SdB_NORD	-3 %	0	0	12 %	15 %	1,07	0	95 %
1061_MOB6_TRA_VMC	CH1_SUD	-8 %	0	0	13 %	16 %	1,46	0	95 %
1061_MOB6_TRA_VMC	SdB_NORD	-7 %	0	0	16 %	18 %	2,55	0	95 %
1062_MOB6_TRA_VIR	CH1_SUD	-8 %	0	0	13 %	16 %	1,50	0	95 %
1062_MOB6_TRA_VIR	SdB_NORD	-5 %	0	0	19 %	21 %	3,25	0	94 %
1063_MOB6_TRA_VIC	CH1_SUD	-8 %	0	0	13 %	16 %	1,49	0	95 %
1063_MOB6_TRA_VIC	SdB_NORD	-5 %	1	0	20 %	21 %	3,39	0	94 %
1064_MOB6_NAN_VMC	CH1_SUD	-8 %	0	0	13 %	17 %	1,33	0	95 %
1064_MOB6_NAN_VMC	SdB_NORD	-8 %	0	0	16 %	19 %	2,31	0	95 %
1065_MOB6_NAN_VIR	CH1_SUD	-8 %	0	0	14 %	18 %	1,36	0	95 %
1065_MOB6_NAN_VIR	SdB_NORD	-6 %	0	0	20 %	21 %	3,12	0	94 %
1066_MOB6_NAN_VIC	CH1_SUD	-8 %	0	0	13 %	17 %	1,36	0	95 %
1066_MOB6_NAN_VIC	SdB_NORD	-6 %	220	0	20 %	21 %	3,23	0	94 %
1067_MOB6_REN_VMC	CH1_SUD	-7 %	0	0	13 %	18 %	1,57	0	95 %
1067_MOB6_REN_VMC	SdB_NORD	-6 %	0	0	17 %	19 %	2,84	0	94 %
1068_MOB6_REN_VIR	CH1_SUD	-7 %	0	0	13 %	18 %	1,61	0	95 %
1068_MOB6_REN_VIR	SdB_NORD	-5 %	16	0	20 %	21 %	3,51	0	94 %
1070_MOB6_NIC_VMC	CH1_SUD	-9 %	0	0	10 %	13 %	0,38	0	95 %
1070_MOB6_NIC_VMC	SdB_NORD	-4 %	0	0	12 %	16 %	1,12	0	95 %
1071_MOB6_NIC_VIR	CH1_SUD	-10 %	0	0	10 %	13 %	0,38	0	95 %
1071_MOB6_NIC_VIR	SdB_NORD	-2 %	0	0	13 %	17 %	1,34	0	94 %
1072_MOB6_NIC_VIC	CH1_SUD	-9 %	0	0	10 %	12 %	0,41	0	95 %
1072_MOB6_NIC_VIC	SdB_NORD	-2 %	0	0	14 %	18 %	1,45	0	94 %
1073_MOB7_TRA_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1073_MOB7_TRA_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1074_MOB7_TRA_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1074_MOB7_TRA_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	16 %	N/A	0,89	0	100 %

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 %		W_max		indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
			panneau	biosourcé	panneau	biosourcé			
1075_MOB7_TRA_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1075_MOB7_TRA_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,11	0	100 %
1076_MOB7_NAN_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1076_MOB7_NAN_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1077_MOB7_NAN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1077_MOB7_NAN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	16 %	N/A	0,35	0	100 %
1078_MOB7_NAN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1078_MOB7_NAN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,58	0	100 %
1079_MOB7_REN_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1079_MOB7_REN_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	14 %	N/A	0,00	0	100 %
1080_MOB7_REN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1080_MOB7_REN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	1,32	0	100 %
1082_MOB7_NIC_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	9 %	N/A	0,00	0	100 %
1082_MOB7_NIC_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1083_MOB7_NIC_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	9 %	N/A	0,00	0	100 %
1083_MOB7_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	11 %	N/A	0,00	0	100 %
1084_MOB7_NIC_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	9 %	N/A	0,00	0	100 %
1084_MOB7_NIC_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1085_MOB8_TRA_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	13 %	N/A	0,00	0	100 %
1085_MOB8_TRA_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	17 %	N/A	0,53	0	100 %
1086_MOB8_TRA_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	13 %	N/A	0,00	0	100 %
1086_MOB8_TRA_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	19 %	N/A	1,88	0	100 %
1087_MOB8_TRA_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	13 %	N/A	0,00	0	100 %
1087_MOB8_TRA_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	19 %	N/A	1,80	0	100 %
1088_MOB8_NAN_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	13 %	N/A	0,00	0	100 %
1088_MOB8_NAN_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	16 %	N/A	0,21	0	100 %
1089_MOB8_NAN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	13 %	N/A	0,00	0	100 %
1089_MOB8_NAN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	19 %	N/A	1,34	0	100 %
1090_MOB8_NAN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1090_MOB8_NAN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	18 %	N/A	1,25	0	100 %
1092_MOB8_REN_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	13 %	N/A	0,00	0	100 %
1092_MOB8_REN_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	19 %	N/A	2,49	0	100 %
1093_MOB8_REN_VIC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	13 %	N/A	0,00	0	100 %
1093_MOB8_REN_VIC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	19 %	N/A	2,40	0	100 %
1094_MOB8_NIC_VMC	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1094_MOB8_NIC_VMC	SdB_NORD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %
1095_MOB8_NIC_VIR	CH1_SUD	0 %	0	N/A	10 %	N/A	0,00	0	100 %
1095_MOB8_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	0	N/A	12 %	N/A	0,00	0	100 %

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 % (biosourcés)	w_max biosourcé	indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
2001_BBI1_TRA_VMC	CH1_SUD	-2 %	N/A	N/A	0,03	0	100 %
2001_BBI1_TRA_VMC	SdB_NORD	1 %	N/A	N/A	1,93	0	100 %
2002_BBI1_TRA_VIR	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
2002_BBI1_TRA_VIR	SdB_NORD	3 %	N/A	N/A	2,72	0	100 %
2003_BBI1_TRA_VIC	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
2003_BBI1_TRA_VIC	SdB_NORD	2 %	N/A	N/A	2,56	0	100 %
2005_BBI1_NAN_VIR	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
2005_BBI1_NAN_VIR	SdB_NORD	2 %	N/A	N/A	2,50	0	100 %
2006_BBI1_NAN_VIC	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
2006_BBI1_NAN_VIC	SdB_NORD	2 %	N/A	N/A	2,27	0	100 %
2008_BBI1_REN_VIR	CH1_SUD	-2 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
2008_BBI1_REN_VIR	SdB_NORD	3 %	N/A	N/A	2,92	0	100 %
2009_BBI1_REN_VIC	CH1_SUD	-2 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
2009_BBI1_REN_VIC	SdB_NORD	3 %	N/A	N/A	2,83	0	100 %
2010_BBI1_NIC_VMC	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
2010_BBI1_NIC_VMC	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	1,07	0	100 %
2011_BBI1_NIC_VIR	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
2011_BBI1_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	1,88	0	100 %
2013_BBI2_TRA_VMC	CH1_SUD	-2 %	N/A	N/A	0,01	0	99 %
2013_BBI2_TRA_VMC	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	1,11	0	99 %
2014_BBI2_TRA_VIR	CH1_SUD	-2 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
2014_BBI2_TRA_VIR	SdB_NORD	2 %	N/A	N/A	2,25	5	99 %
2015_BBI2_TRA_VIC	CH1_SUD	-2 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
2015_BBI2_TRA_VIC	SdB_NORD	2 %	N/A	N/A	2,27	0	99 %
2017_BBI2_NAN_VIR	CH1_SUD	-2 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
2017_BBI2_NAN_VIR	SdB_NORD	2 %	N/A	N/A	1,98	2	99 %
2018_BBI2_NAN_VIC	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
2018_BBI2_NAN_VIC	SdB_NORD	2 %	N/A	N/A	1,98	0	99 %
2022_BBI2_NIC_VMC	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
2022_BBI2_NIC_VMC	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	0,76	0	99 %
2023_BBI2_NIC_VIR	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
2023_BBI2_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	1,59	0	99 %

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 % (biosourcés)	w_max biosourcé	indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
3002_BMI1_TRA_VIR	CH1_SUD	-6 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3002_BMI1_TRA_VIR	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	0,66	0	89 %
3003_BMI1_TRA_VIC	CH1_SUD	-6 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
3003_BMI1_TRA_VIC	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	0,31	0	90 %
3004_BMI1_NAN_VMC	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3004_BMI1_NAN_VMC	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	0,59	0	89 %
3005_BMI1_NAN_VIR	CH1_SUD	-6 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3005_BMI1_NAN_VIR	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	0,47	0	89 %
3006_BMI1_NAN_VIC	CH1_SUD	-6 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
3006_BMI1_NAN_VIC	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	0,16	0	90 %
3008_BMI1_REN_VIR	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3008_BMI1_REN_VIR	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	1,08	0	88 %
3011_BMI1_NIC_VIR	CH1_SUD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
3011_BMI1_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	0,02	0	92 %
3014_BMI2_TRA_VIR	CH1_SUD	-18 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3014_BMI2_TRA_VIR	SdB_NORD	-4 %	N/A	N/A	0,01	0	92 %
3015_BMI2_TRA_VIC	CH1_SUD	-19 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3015_BMI2_TRA_VIC	SdB_NORD	-4 %	N/A	N/A	0,01	0	92 %
3017_BMI2_NAN_VIR	CH1_SUD	-18 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3017_BMI2_NAN_VIR	SdB_NORD	-4 %	N/A	N/A	0,00	0	92 %
3018_BMI2_NAN_VIC	CH1_SUD	-19 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3018_BMI2_NAN_VIC	SdB_NORD	-4 %	N/A	N/A	0,00	0	92 %
3020_BMI2_REN_VIR	CH1_SUD	-13 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3020_BMI2_REN_VIR	SdB_NORD	-3 %	N/A	N/A	0,02	0	92 %
3021_BMI2_REN_VIC	CH1_SUD	-14 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3021_BMI2_REN_VIC	SdB_NORD	-3 %	N/A	N/A	0,02	0	92 %
3022_BMI2_NIC_VMC	CH1_SUD	-20 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
3022_BMI2_NIC_VMC	SdB_NORD	-12 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3023_BMI2_NIC_VIR	CH1_SUD	-19 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
3023_BMI2_NIC_VIR	SdB_NORD	-9 %	N/A	N/A	0,00	0	93 %
3025_BMI3_TRA_VMC	CH1_SUD	-18 %	0	11 %	0,00	0	93 %
3025_BMI3_TRA_VMC	SdB_NORD	-10 %	0	13 %	0,00	0	92 %
3026_BMI3_TRA_VIR	CH1_SUD	-18 %	0	11 %	0,00	0	93 %
3026_BMI3_TRA_VIR	SdB_NORD	-6 %	0	14 %	0,00	0	92 %
3027_BMI3_TRA_VIC	CH1_SUD	-19 %	0	11 %	0,00	0	93 %
3027_BMI3_TRA_VIC	SdB_NORD	-6 %	0	14 %	0,02	0	92 %
3028_BMI3_NAN_VMC	CH1_SUD	-18 %	0	12 %	0,00	0	93 %
3028_BMI3_NAN_VMC	SdB_NORD	-11 %	0	13 %	0,00	0	92 %
3029_BMI3_NAN_VIR	CH1_SUD	-18 %	0	12 %	0,00	0	93 %
3029_BMI3_NAN_VIR	SdB_NORD	-6 %	0	14 %	0,00	0	92 %
3030_BMI3_NAN_VIC	CH1_SUD	-19 %	0	11 %	0,00	0	93 %
3030_BMI3_NAN_VIC	SdB_NORD	-6 %	0	14 %	0,00	0	92 %
3032_BMI3_REN_VIR	CH1_SUD	-14 %	0	12 %	0,00	0	93 %
3032_BMI3_REN_VIR	SdB_NORD	-4 %	0	15 %	0,02	0	91 %
3036_BMI3_NIC_VIC	CH1_SUD	-26 %	0	9 %	0,00	0	94 %
3036_BMI3_NIC_VIC	SdB_NORD	-9 %	0	13 %	0,00	0	93 %

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 % (biosourcés)	w_max biosourcé	indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
4002_BBE1_TRA_VIR	CH1_SUD	-7 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
4002_BBE1_TRA_VIR	SdB_NORD	-5 %	N/A	N/A	0,23	430	100 %
4003_BBE1_TRA_VIC	CH1_SUD	-8 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
4003_BBE1_TRA_VIC	SdB_NORD	-5 %	N/A	N/A	0,27	564	100 %
4004_BBE1_NAN_VMC	CH1_SUD	-7 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
4004_BBE1_NAN_VMC	SdB_NORD	-5 %	N/A	N/A	0,04	71	100 %
4005_BBE1_NAN_VIR	CH1_SUD	-7 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
4005_BBE1_NAN_VIR	SdB_NORD	-5 %	N/A	N/A	0,18	759	100 %
4006_BBE1_NAN_VIC	CH1_SUD	-8 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
4006_BBE1_NAN_VIC	SdB_NORD	-5 %	N/A	N/A	0,22	957	100 %
4008_BBE1_REN_VIR	CH1_SUD	-6 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
4008_BBE1_REN_VIR	SdB_NORD	-4 %	N/A	N/A	0,28	463	100 %
4011_BBE1_NIC_VIR	CH1_SUD	-7 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
4011_BBE1_NIC_VIR	SdB_NORD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	100 %
4014_BBE2_TRA_VIR	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4014_BBE2_TRA_VIR	SdB_NORD	-3 %	N/A	N/A	0,02	727	99 %
4015_BBE2_TRA_VIC	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4015_BBE2_TRA_VIC	SdB_NORD	-3 %	N/A	N/A	0,03	895	99 %
4016_BBE2_NAN_VMC	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4016_BBE2_NAN_VMC	SdB_NORD	-4 %	N/A	N/A	0,01	0	99 %
4017_BBE2_NAN_VIR	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4017_BBE2_NAN_VIR	SdB_NORD	-3 %	N/A	N/A	0,02	1153	99 %
4018_BBE2_NAN_VIC	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4018_BBE2_NAN_VIC	SdB_NORD	-3 %	N/A	N/A	0,02	1568	99 %
4020_BBE2_REN_VIR	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4020_BBE2_REN_VIR	SdB_NORD	-3 %	N/A	N/A	0,05	603	99 %
4021_BBE2_REN_VIC	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4021_BBE2_REN_VIC	SdB_NORD	-3 %	N/A	N/A	0,06	730	99 %
4022_BBE2_NIC_VMC	CH1_SUD	-5 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4022_BBE2_NIC_VMC	SdB_NORD	-4 %	N/A	N/A	0,00	0	99 %
4025_BBE3_TRA_VMC	CH1_SUD	-7 %	0	18 %	0,01	0	95 %
4025_BBE3_TRA_VMC	SdB_NORD	-5 %	0	21 %	1,17	0	94 %
4026_BBE3_TRA_VIR	CH1_SUD	-7 %	0	19 %	0,03	0	95 %
4026_BBE3_TRA_VIR	SdB_NORD	-5 %	0	23 %	2,19	0	94 %
4027_BBE3_TRA_VIC	CH1_SUD	-7 %	0	18 %	0,02	0	95 %
4027_BBE3_TRA_VIC	SdB_NORD	-5 %	56	23 %	2,56	0	94 %
4028_BBE3_NAN_VMC	CH1_SUD	-7 %	0	19 %	0,04	0	95 %
4028_BBE3_NAN_VMC	SdB_NORD	-5 %	0	22 %	0,90	0	94 %
4029_BBE3_NAN_VIR	CH1_SUD	-7 %	0	19 %	0,05	0	95 %
4029_BBE3_NAN_VIR	SdB_NORD	-5 %	135	25 %	1,91	0	94 %
4030_BBE3_NAN_VIC	CH1_SUD	-7 %	0	19 %	0,04	0	95 %
4030_BBE3_NAN_VIC	SdB_NORD	-5 %	347	27 %	2,35	0	94 %
4032_BBE3_REN_VIR	CH1_SUD	-6 %	0	19 %	0,11	0	94 %
4032_BBE3_REN_VIR	SdB_NORD	-4 %	82	24 %	2,89	0	94 %
4033_BBE3_REN_VIC	CH1_SUD	-6 %	0	19 %	0,09	0	94 %
4033_BBE3_REN_VIC	SdB_NORD	-4 %	280	27 %	3,27	0	94 %
4034_BBE3_NIC_VMC	CH1_SUD	-7 %	0	11 %	0,00	0	95 %
4034_BBE3_NIC_VMC	SdB_NORD	-5 %	0	14 %	0,00	0	95 %

cas	mur	accroiss. W	nb d'heures > 23 % (biosourcés)	w_max biosourcé	indice Max de moisiss.	nb d'heures de condensation	ratio d'isolation
5001_BME1_TRA_VMC	CH1_SUD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5001_BME1_TRA_VMC	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	0,04	0	94 %
5002_BME1_TRA_VIC	CH1_SUD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5002_BME1_TRA_VIC	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	0,20	143	94 %
5004_BME1_NAN_VIR	CH1_SUD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5004_BME1_NAN_VIR	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	0,12	239	94 %
5005_BME1_NAN_VIC	CH1_SUD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5005_BME1_NAN_VIC	SdB_NORD	-1 %	N/A	N/A	0,16	458	94 %
5009_BME1_NIC_VMC	CH1_SUD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5009_BME1_NIC_VMC	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
5010_BME1_NIC_VIR	CH1_SUD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5010_BME1_NIC_VIR	SdB_NORD	0 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
5012_BME2_TRA_VMC	CH1_SUD	-10 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
5012_BME2_TRA_VMC	SdB_NORD	-11 %	N/A	N/A	0,01	0	93 %
5013_BME2_TRA_VIR	CH1_SUD	-8 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5013_BME2_TRA_VIR	SdB_NORD	-9 %	N/A	N/A	0,01	475	93 %
5014_BME2_TRA_VIC	CH1_SUD	-7 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5014_BME2_TRA_VIC	SdB_NORD	-8 %	N/A	N/A	0,02	558	93 %
5015_BME2_NAN_VMC	CH1_SUD	-9 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
5015_BME2_NAN_VMC	SdB_NORD	-11 %	N/A	N/A	0,01	0	94 %
5016_BME2_NAN_VIR	CH1_SUD	-7 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5016_BME2_NAN_VIR	SdB_NORD	-9 %	N/A	N/A	0,01	654	93 %
5017_BME2_NAN_VIC	CH1_SUD	-6 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5017_BME2_NAN_VIC	SdB_NORD	-8 %	N/A	N/A	0,01	981	93 %
5020_BME2_REN_VIC	CH1_SUD	-8 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5020_BME2_REN_VIC	SdB_NORD	-6 %	N/A	N/A	0,04	630	93 %
5021_BME2_NIC_VMC	CH1_SUD	-4 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5021_BME2_NIC_VMC	SdB_NORD	-11 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
5022_BME2_NIC_VIR	CH1_SUD	-3 %	N/A	N/A	0,00	0	95 %
5022_BME2_NIC_VIR	SdB_NORD	-9 %	N/A	N/A	0,00	0	94 %
5024_BME3_TRA_VMC	CH1_SUD	-1 %	0	16 %	0,00	0	91 %
5024_BME3_TRA_VMC	SdB_NORD	-2 %	0	19 %	0,14	0	90 %
5025_BME3_TRA_VIR	CH1_SUD	-1 %	0	16 %	0,00	0	92 %
5025_BME3_TRA_VIR	SdB_NORD	-4 %	0	21 %	1,11	0	90 %
5026_BME3_TRA_VIC	CH1_SUD	-1 %	0	16 %	0,00	0	92 %
5026_BME3_TRA_VIC	SdB_NORD	-3 %	0	21 %	1,18	0	90 %
5028_BME3_NAN_VIR	CH1_SUD	-1 %	0	17 %	0,00	0	92 %
5028_BME3_NAN_VIR	SdB_NORD	-3 %	0	21 %	0,70	0	90 %
5029_BME3_NAN_VIC	CH1_SUD	-1 %	0	16 %	0,00	0	92 %
5029_BME3_NAN_VIC	SdB_NORD	-4 %	0	22 %	0,73	0	90 %
5030_BME3_REN_VMC	CH1_SUD	-1 %	0	16 %	0,00	0	91 %
5030_BME3_REN_VMC	SdB_NORD	-4 %	0	20 %	0,84	0	90 %
5031_BME3_REN_VIR	CH1_SUD	-1 %	0	16 %	0,00	0	91 %
5031_BME3_REN_VIR	SdB_NORD	-4 %	0	21 %	1,92	0	90 %
5032_BME3_REN_VIC	CH1_SUD	-1 %	0	16 %	0,00	0	91 %
5032_BME3_REN_VIC	SdB_NORD	-4 %	0	22 %	2,13	0	90 %
5034_BME3_NIC_VIR	CH1_SUD	0 %	0	10 %	0,00	0	92 %
5034_BME3_NIC_VIR	SdB_NORD	-1 %	0	14 %	0,00	0	91 %

TABLE DES MATIÈRES

○	RÉSUMÉ EXÉCUTIF	4
	NOMENCLATURE	5
①	INTRODUCTION	6
	1.1 L'humidité	6
	1.2 Lien avec la ventilation et modélisation	6
②	ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE : CRITÈRES D'ANALYSE DES RÉSULTATS DE CALCULS HYGROTHERMIQUES	7
	2.1 Normes	7
	2.2 Littérature scientifique	7
③	DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE UNIDIMENSIONNEL DE TRANSFERTS HYDRIQUES	10
	3.1 Description du modèle	10
	3.2 Implémentation dans MATHIS	10
	3.3 Validation	12
④	DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE FUITE D'AIR THERMO-HYGRO-AÉRAULIQUE	13
	4.1 Description du modèle	13
	4.2 Implémentation dans MATHIS	14
	4.3 Validation	16
	4.3.1 Expérimentation	16
	4.3.2 Modélisation	17
	4.3.3 Confrontation	18
	4.3.4 Etude de sensibilité	19
⑤	DESCRIPTION DES CAS D'ÉTUDE	22
	5.1 Scénario	22
	5.1.1 Logement	22
	5.1.2 Perméabilité à l'air	23
	5.1.3 Occupation	23
	5.1.4 Chauffage	23
	5.1.5 Zones climatiques	23
	5.2 Systèmes de ventilation	24
	5.2.1 Principes	24
	5.2.2 Dimensionnement	26
	5.2.3 Résultats	27
	5.3 Typologie des parois	31

TABLe DES MATIÈRES

6	RÉSULTATS	33
6.1	Démarche de travail	33
6.1.1	Aspect numérique	33
6.1.2	Sens physique des indicateurs	33
6.2	Analyse des résultats	36
6.2.1	Comparaisons de deux types de ventilation sans flux d'air dans la paroi	36
6.2.2	Impact de la prise en compte d'un flux d'air	36
6.3	Synthèse par type constructif	39
6.3.1	Ossature bois	39
6.3.2	Maçonnerie type béton banché	39
6.3.3	Maçonnerie type brique monomur	40
7	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	41
8	RÉFÉRENCES	42
9	ANNEXES	44
9.1	Modele de diffusion – cas de référence n°1	44
9.1.1	Objet	44
9.1.2	Conditions aux limites	44
9.1.3	Conditions initiales au sein de la structure	44
9.1.4	Données du matériau	45
9.1.5	Résultats	44
9.2	Modèle de diffusion – Cas de référence n°2	46
9.2.1	Objet	46
9.2.2	Conditions aux limites	46
9.2.3	Conditions initiales au sein de la structure	47
9.2.4	Données des matériaux	47
9.2.5	Résultats	48
9.3	Caractéristiques des matériaux pour les calculs	53
9.4	Paramètres pour le modèle VTT	54
9.5	Climats intérieurs pour calculs hygrothermiques dans les parois	55
9.6	Tableaux de résultats complets	56

NOTES

A series of horizontal dashed lines for taking notes.

RÉSUMÉ