

Influence d'un défaut d'étanchéité à l'air sur la teneur en eau de quatre types de murs traditionnels rénovés

Élodie Héberlé*¹, Julien Borderon¹, Julien Burholzer¹, Richard Cantin²

¹ CEREMA – Direction Territoriale Est – Laboratoire de Strasbourg
11, rue Jean Mentelin, BP9, 67035 Strasbourg Cedex 2
[*elodie.heberle@cerema.fr](mailto:elodie.heberle@cerema.fr)

² ENTPE – Université de Lyon – LGCB, 3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx en Velin
Cedex

RESUME. A l'aide d'un logiciel de simulation hygrothermique dynamique en 2D (WUFI 2D), différents complexes de parois anciennes isolées par l'intérieur sont modélisés avec la pose de membranes pare-vapeur ou frein-vapeur hygro-variable, en continuité parfaite ou avec la modélisation d'un défaut de mise en œuvre. L'apport d'humidité induit par le défaut a des conséquences variables suivant les combinaisons de complexes étudiés. Les résultats montrent l'impact d'une isolation par l'intérieur sur l'équilibre hygrothermique des parois étudiées. Ensuite la prise en compte par le modèle des défauts d'étanchéité de la membrane met en évidence une augmentation de la teneur en eau dans certains matériaux et de ce fait il est possible de conclure sur la durabilité de ces solutions d'isolation en cas de mise en œuvre imparfaite.

MOTS-CLÉS : simulation hygrothermique dynamique, isolation par l'intérieur, défaut d'étanchéité à l'air

ABSTRACT. Different traditional walls insulated from inside have been modeled with a dynamic simulation tool, WUFI 2D. The installation of vapor shield or moisture control barrier with perfect continuity or with imperfections has been additionally simulated. The humidity coming through the flaw has consequences depending on the different combination of initial walls and renovation material, i.e. 4 types of traditional walls including stones, rammed earth, ... insulation materials, rock wool or cellulose and vapor shield or vapor retarder. The results show the impact of the thermal insulation scenarios on the hygrothermal balance of the traditional walls. Then the simulations of models with flaws in the moisture control barrier show a rise of the water content of some materials and that change the conclusion about the durability of the renovation solution.

KEYWORDS : dynamic hygrothermal simulation, indoor thermal insulation, airtightness imperfection

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE DU BATI ANCIEN A RENOVER ET PROBLEMATIQUE

Le parc de bâtiment résidentiel français est constitué pour un tiers de bâtiments construits avant 1948 (Cantin et al. 2010). Ce bâti, dit ancien, se distingue par plusieurs aspects du parc contemporain, mais aussi du parc de bâtiments précédant la première réglementation thermique (1948-1973). Les techniques constructives sont traditionnelles et les matériaux utilisés sont locaux, naturels et souvent sensibles à l'humidité. La nécessité d'intervenir sur l'ensemble du parc existant pour réduire les consommations d'énergie est inscrite fortement dans le contexte politique et réglementaire actuel. Cela pose la question de l'isolation des parois anciennes et de la modification d'équilibres hygrothermiques parfois centenaires.

L'humidité dans le bâtiment et dans les parois peut engendrer des pathologies lorsqu'elle n'est pas maîtrisée (Berger et al. 2012). La littérature scientifique comporte peu d'études traitant des conséquences hygrothermiques de l'isolation des parois du bâti ancien. (Dugué et al. 2012) ont étudié les risques hygrothermiques liés à l'isolation par l'intérieur de trois bâtiments anciens, dans le cas d'une mise en œuvre parfaite de l'isolation, et notamment de la membrane gérant l'apport de vapeur.

Un travail de recherche traitant de l'influence des défauts d'étanchéité à l'air sur les transferts hygrothermiques dans le bâti ancien rénové par l'intérieur a été entrepris. L'objectif est d'évaluer par l'influence de la prise en compte ou non de ces défauts, par ailleurs bien observés sur le terrain.

1.2. PAROIS ANCIENNES ETUDIEES

Quatre types de parois anciennes ont été étudiés : une paroi en terre crue, une paroi en brique de terre cuite et mortier de chaux, une paroi en pierre calcaire et mortier de chaux et une paroi en pan de bois et torchis. Les matériaux constitutifs de ces parois sont sensibles à l'humidité, i.e. ont des propriétés capillaires, hygroscopiques et perméables à la vapeur d'eau. Les procédés d'isolation pris en compte sont l'isolation par l'intérieur avec différents revêtements de surfaces intérieurs et extérieurs. Les matériaux isolants testés sont la laine de roche et la ouate de cellulose.

1.3. MEMBRANES PARE-VAPEUR POUR L'ISOLATION PAR L'INTERIEUR

Les membranes gérant l'apport de vapeur peuvent être de type pare-vapeur ($S_d > 5$ m, i.e. s'opposant au passage de la vapeur comme 5 m d'air), frein-vapeur ($1 \text{ m} < S_d < 5 \text{ m}$) ou frein-vapeur hygro-variable qui se comporte comme un filtre passe-haut. Ces membranes sont complémentaires d'un isolant thermique perméable à l'air et à la vapeur d'eau pour assurer l'étanchéité à l'air de la paroi et empêcher la condensation interne entre l'isolant et la maçonnerie froide. L'efficacité est conditionnée par une pose parfaitement continue, pourtant peu courante en rénovation.

2. METHODE

Ce travail s'appuie sur le logiciel de simulation dynamique hygrothermique WUFI 2D (Fraunhofer – Institut für Bauphysik 2014). Il s'agit d'étudier des parois anciennes isolées par l'intérieur ou non, avec ou sans défaut de mise en œuvre au niveau de la membrane gérant l'apport de vapeur.

2.1. ELABORATION DES MODELES

2.1.1. Les outils de modélisation retenus

Les transferts couplés d'humidité, d'air et de chaleur sont régis par un système d'équations couplés : un bilan d'air, un bilan d'humidité et un bilan de chaleur. Le modèle de Kunzel (Kunzel 1995) considère la convection au travers des matériaux comme négligeable, ce qui a pour effet de simplifier la résolution numérique du système d'équations, en éliminant notamment le bilan d'air. Le logiciel WUFI 2D est basé sur ce modèle et permet de réaliser des simulations hygrothermiques dynamiques.

Cependant, la convection au travers des défauts d'étanchéité d'une membrane gérant l'apport de vapeur peut ne pas être négligeable. L'hypothèse de la continuité de cette membrane conduit à négliger le risque de condensation interne due aux infiltrations d'air au travers de ces défauts d'étanchéité. Ce risque induit localement une hausse de la quantité d'humidité dans le mur isolé, ce qui peut entraîner des pathologies. En conséquence, le protocole de simulation mis en place pour ce travail s'attachera à prendre en compte des défauts d'étanchéité de la membrane pour l'évaluation de l'équilibre hygrothermique du mur isolé.

2.1.2. Principe du modèle prédisant le risque de condensation interne due à un défaut d'étanchéité à l'air de la membrane

Prenons le cas d'un mur isolé par l'intérieur avec un isolant perméable à la vapeur et supposons que la membrane gérant l'apport de vapeur présente des défauts d'étanchéité. Lorsque l'intérieur du bâtiment est en surpression par rapport à l'extérieur, un flux d'air humide provenant de l'intérieur peut s'engouffrer, au travers des défauts d'étanchéité, dans la cavité accueillant l'isolant. Le débit volumique (Q_v en $\text{m}^3_{\text{air}} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) de ce flux d'air se calcule grâce à la loi d'orifice :

$$Q_v = C_d * A * \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

Où A est la surface de l'orifice en m^2 , ΔP est la surpression intérieure par rapport à l'extérieur en Pa, ρ est la masse volumique de l'air en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et C_d est le coefficient de décharge en fonction du type de défaut d'étanchéité étudié, qui est sans unité (Schmidt 2010). Pour la suite, celui-ci est pris égal à 0,61 ce qui correspond à un orifice à bords vifs. ΔP est calculé au pas de temps horaire à partir des fichiers de climat intérieur et extérieur (températures, vitesse et de direction du vent) et de la hauteur du bâtiment, afin de déterminer le tirage thermique et la pression du vent, dans le cas où il n'y a pas de VMC active. Enfin, le calcul de la surface A repose sur les hypothèses de (Zirkelbach et al. 2009) à partir de la surface déperditive et de la perméabilité à l'air. La quantité d'humidité saturante c_{sat} ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{m}^3_{\text{air}}$) à l'interface entre l'isolant et le mur ne dépend que de la température à cette interface. Cette température est obtenue, au pas de temps horaire, par une simulation sans défauts d'étanchéité. La quantité d'eau liquide obtenue par condensation est la différence entre c_{hum} et c_{sat} lorsque c_{hum} devient supérieur à c_{sat} . Avec ces hypothèses, le débit massique d'eau de condensation pour 1m^2 de surface verticale $Q_{m,cond}$ avec membrane imparfaitement étanche est ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) :

$$Q_{m,cond} = Q_v * (c_{hum} - c_{sat}) \quad (2)$$

Pour le cas d'étude présenté dans le tableau 1, les résultats annuels du calcul de $Q_{m,cond}$ sont tracés sur la figure 1.

Climat	Surface	Hauteur sous plafond	Composition	Perméabilité à l'air	Surface des murs verticaux	Surface A du défaut par m^2 de paroi	Orientation de la paroi étudiée
Nancy	110 m^2	2,5 m	2 niveaux	$I_4=1.7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$	150 m^2	$0,26 \text{ cm}^2$	Nord

Tableau 1 : Caractéristiques du cas d'étude

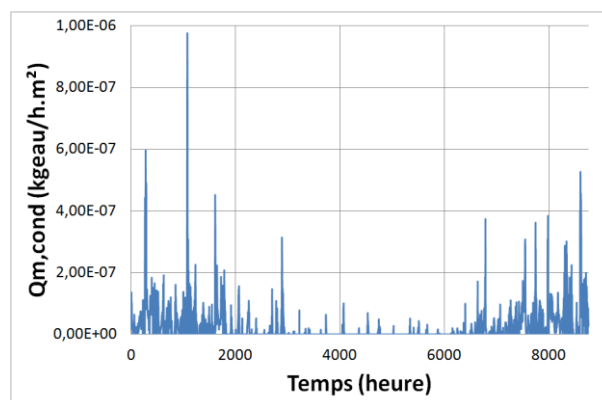


Figure 1 : Evolution du débit massique d'eau de condensation au cours du temps.

2.1.3. Limite du modèle

Ce modèle constitue une première approche du calcul de la condensation interne due aux défauts d'étanchéité de la membrane. Il fait notamment l'hypothèse que le flux d'air humide provenant de l'intérieur et qui s'engouffre dans la cavité au travers du défaut d'étanchéité de la membrane se propage le long d'un cylindre rempli d'air dont la section est de la forme et de la surface du défaut d'étanchéité considéré. D'autre part, le choix du coefficient de décharge C_d ne correspond pas forcément à la typologie des défauts d'étanchéité rencontrés sur chantier (clou, coup de cutter, non-recouvrement des lés) et mériterait d'être affiné.

2.1.4. Caractéristiques hygrothermiques des matériaux modélisés

	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur μ (-)	Epaisseur e (m)	Epaisseur équivalente d'air S_d (m)	Teneur en eau de référence w_{80} (kg/m ³)	Absorptivité A (kg/m ² .s ^{0,5})
Pisé*	10	0,5	5	20	0,62
Brique de terre cuite	15	0,22	3,3	5	0,36
Mortier chaux*	15	0,42	6,3	7	0,15
Torchis*	12	0,12	1,5	18	0,18
Bois	140	0,04	5,6	115	0,0007
Pierre calcaire dure	140	0,42	58,8	3	0,00
Enduit ciment*	85	0,02	1,7	35	0,0076
Enduit chaux*	7	0,02	0,14	30	0,0470
Plaque de plâtre*	8	0,02	0,166	6	0,2870
Laine de roche	1	0,12	0,132	0	0
Ouate de cellulose	2	0,12	0,216	6	0,3000
Papier peint vinyle	11970	0,0002	2,4	0	0

Tableau 2 : Caractéristiques hygrothermiques des matériaux étudiés.

Le tableau 2 présente les caractéristiques hygrothermiques des matériaux étudiés. Ces données sont issues du logiciel WUFI 2D, mais ont été validées dans le cadre du projet HYGROBA (CETE de l'Est et al. 2013) par des mesures*.

2.2. PROTOCOLE DE SIMULATION


Chacun des 4 murs anciens étudiés est modélisé en 2D, afin de prendre en compte l'hétérogénéité des parois anciennes (présence de mortier ou de pan de bois). Les simulations sont effectuées au pas de temps horaire sur un horizon de 10 ans. Le climat extérieur est issu du logiciel meteonorm (METEOTEST 2014) pour la ville de Nancy et le facteur d'absorption de la pluie en façade est fixé à 70 %. Le climat intérieur a été calculé en fonction du climat extérieur et de la température intérieure pour un local à forte hygrométrie (CSTB 2006).

En plus de la configuration de base (sans isolation), 4 configurations d'isolation par l'intérieur sont étudiées pour chaque paroi ancienne. Toutes ces simulations sont faites sous 2 axes de modélisation :

- avec une mise en œuvre sans défaut des membranes, modèle WUFI ;
- avec modélisation de défauts d'étanchéité à l'air, modèle WUFI avec introduction d'un débit massique d'eau de condensation entre l'isolant et la paroi ancienne (voir paragraphe 2.1.2).

Deux approches de la rénovation hygrothermique sont étudiées : l'approche perméable à l'humidité, dite P, qui regroupe des matériaux sensibles à l'humidité, i.e. perméables à la vapeur et généralement capillaires et / ou hygroscopiques ; l'approche étanche à l'humidité, dite E, qui regroupe les matériaux peu sensibles à l'humidité, i.e. peu perméables à la vapeur et généralement peu capillaires et / ou peu hygroscopiques.

Les différentes approches sont déclinées à la fois à l'extérieur et à l'intérieur de la paroi ancienne, ce qui donne au total 4 configurations : E à l'extérieur – E à l'intérieur (E-E) ; E à l'extérieur – P à l'intérieur (E-P) ; P à l'extérieur – E à l'intérieur (P-E) ; P à l'extérieur – P à l'intérieur (P-P). La figure 2 illustre les configurations E-E et P-P de la paroi ancienne en pisé.

	Configuration type	Extérieur « Etanche »	Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »		
		Matériaux retenus (*)	Enduit ciment		Laine de roche	Frein-vapeur
	Epaisseur (mm)	20		120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée		Faible	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Moyenne		Faible	Elevée	Moyenne
	Capillarité	Faible		Faible	-	Moyenne


	Configuration type	Extérieur « Perméable »	Paroi ancienne	Intérieur « Perméable »		
		Matériaux retenus (*)	Enduit chaux		Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygro-variable
	Epaisseur (mm)	20		120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée		Moyenne	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Faible		Faible	Moyenne à Elevée	Faible
	Capillarité	Moyenne		Elevée	-	Elevée

Figure 2 : Deux exemples de configuration

Au total, 40 simulations ont été réalisées (4 murs anciens, 4 configurations d'isolation par l'intérieur et 1 configuration de base, 2 axes de modélisation) pour l'étude de l'isolation par l'intérieur.

2.3. CRITERES D'ANALYSES

2.3.1. Degré de saturation

Le degré de saturation est défini comme le rapport entre la teneur en eau et la teneur en eau à saturation, c'est-à-dire pour une humidité relative de 100 %. Il a été défini afin de pouvoir comparer entre eux des matériaux aux propriétés hygroscopiques différentes.

Le degré de saturation dans la paroi ancienne constitue le critère d'analyse principal. Un objectif est de déterminer quelles sont les configurations le plus performantes du point de vue hygrothermique, c'est-à-dire celles ayant un degré de saturation stabilisé dans le temps (cycles annuels) à des valeurs d'humidité faibles. La comparaison entre les résultats avec ou sans prise en compte des défauts d'étanchéité à l'air des membranes permet d'observer les conséquences de la mauvaise étanchéité à l'air de celles-ci sur la performance hygrothermique de la paroi.

2.3.2. Valeur moyenne et stabilisation

Afin de comparer les courbes de degrés de saturation entre elles, deux sous-critères ont été définis : la valeur moyenne VM%, qui se calcule à partir du degré de saturation au temps zéro et au bout de 10 ans et la stabilisation S%, qui est le ratio des degrés de saturation au bout de 9 ans et au bout de 10

ans. Des couleurs ont été attribuées à chaque plage de variation de ces deux sous-critères (cf. figure 3) et le plus défavorable est conservé.

	si VM%<15		si S%<0,4
	si 15<VM%<70		si 0,4<S%<2
	si VM%>70		si S%>2

Figure 3 : Plage de variation des sous-critères valeur moyenne et stabilisation et couleurs associées

3. RESULTATS ET ANALYSES

3.1. DEGRES DE SATURATION POUR LA BRIQUE SANS ET AVEC DEFAUTS D'ETANCHEITE

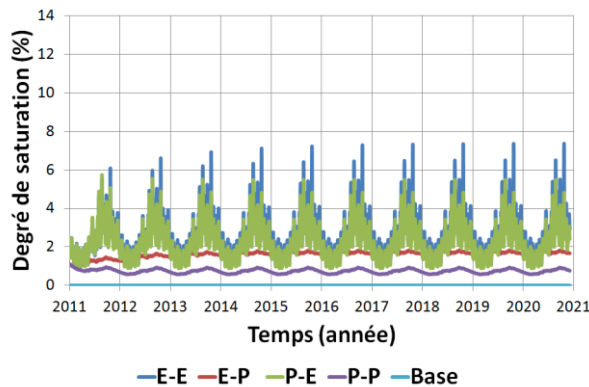


Figure 4a : Degré de saturation dans la brique sans défauts d'étanchéité.

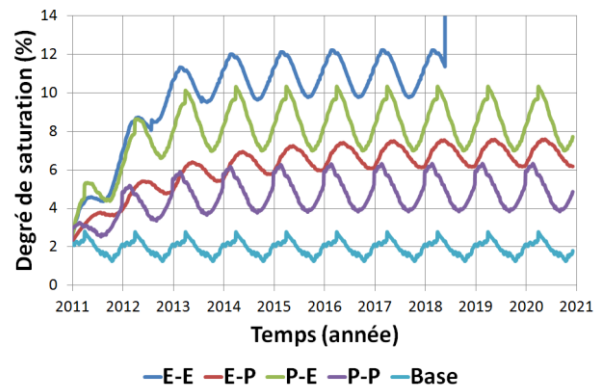


Figure 4b : Degré de saturation dans la brique avec défauts d'étanchéité.

La figure 4a présente l'évolution du degré de saturation au cours du temps pour la brique lorsque les défauts d'étanchéité à l'air de la membrane ne sont pas pris en compte. Par rapport à la configuration de base, le degré de saturation augmente mais se stabilise au bout de 3 ans pour toutes les configurations étudiées.

La figure 4b présente l'évolution du degré de saturation lorsque les défauts d'étanchéité à l'air de la membrane sont pris en compte. Rappelons que la prise en compte de ces défauts se traduit par l'introduction d'un débit massique d'eau de condensation (cf. figure 1.) à l'interface entre l'isolant et la paroi ancienne. Ce même débit massique a également été pris en compte dans la configuration de base, afin d'observer les conséquences de l'introduction involontaire d'eau dans la paroi. Toutes les configurations voient leurs degrés de saturation augmenter de 3 % à 9 % par rapport à la configuration de base, puis se stabiliser. La configuration P-P est celle dont le degré de saturation se rapproche le plus, en valeur moyenne, de la configuration de base, tandis que la configuration E-E est celle qui s'en éloigne le plus.

La figure 5a comprend les courbes de degré de saturation dans le torchis de la paroi pan de bois – torchis pour les différentes configurations sans défaut d'étanchéité. La nature du matériau fait que le degré de saturation de la configuration initiale (base) est plus élevé que celui de la brique. La configuration E-P est celle qui met le plus de temps à se stabiliser, soit 8 ans, et à une valeur moyenne

un peu plus élevée que les autres configurations, soit 20 % au lieu de 15 %. La configuration E-E atténue fortement l'amplitude des cycles saisonniers d'humidification / séchage de la paroi.

La figure 5b représente les cas simulés avec défaut d'étanchéité à l'air. Les configurations P-E et P-P se stabilisent à une valeur moyenne de 18 %, soit 3 % de plus que la configuration de base. Mais l'équilibre hygrothermique est respecté et les cycles de séchage suivent bien les cycles d'humidification. Par contre, pour les configurations avec étanchéité coté extérieur (E-E et E-P), il y a une forte augmentation de la valeur moyenne de degré de saturation, et même une absence de stabilisation pour la configuration E-E. Cela traduit une difficulté de la paroi à évacuer l'eau arrivée en son sein par les défauts d'étanchéité.

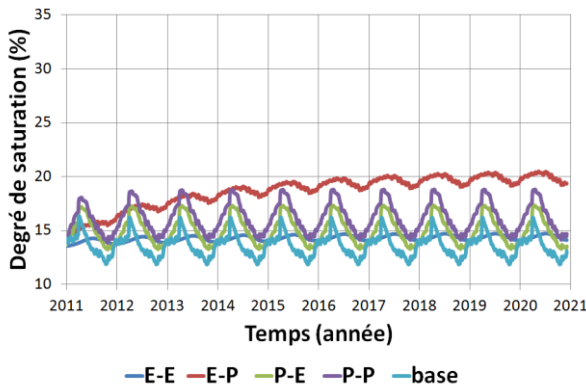


Figure 5a : Degré de saturation dans le torchis sans défauts d'étanchéité.

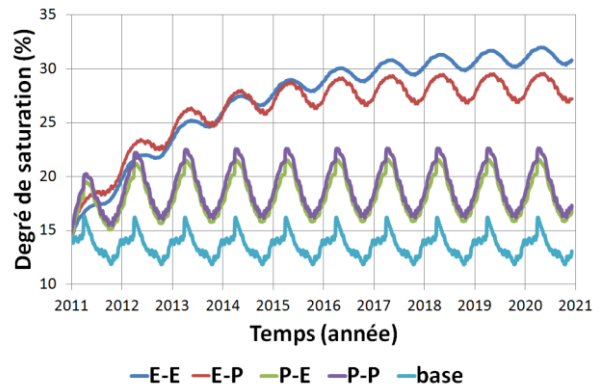


Figure 5b : Degré de saturation dans le torchis avec défauts d'étanchéité.

Pour les parois en pisé et en pierre, également étudiées, les résultats montrent des divergences pour les configurations étanches selon que les défauts d'étanchéité à l'air sont ou non pris en compte.

3.2. PERFORMANCE HYGROTHERMIQUE AVEC MISE EN ŒUVRE PARFAITE ET IMPARFAITE DES MEMBRANES

	Terre crue		Brique de terre cuite		Pierre dure		Pan de bois et	
	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec
Défauts d'étanchéité								
Base	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert
E-E	Jaune	Rouge	Jaune	Rouge	Rouge	Rouge	Vert	Rouge
E-P	Jaune	Rouge	Jaune	Rouge	Jaune	Rouge	Jaune	Jaune
P-E	Vert	Jaune	Vert	Rouge	Vert	Rouge	Vert	Jaune
P-P	Vert	Jaune	Vert	Jaune	Vert	Rouge	Vert	Jaune

Figure 6 : Synthèse des résultats selon les sous-critères valeur moyenne et stabilisation

La non-prise en compte des défauts d'étanchéité à l'air de la membrane gérant l'apport de vapeur modifie les conclusions de l'étude de la performance hygrothermique des quatre configurations, et ce, pour toutes les parois anciennes étudiées. Elle conduit à sous-estimer le risque hygrothermique associé à l'isolation par l'intérieur du bâti ancien, notamment en l'absence de VMC qui permettrait d'avoir un bâtiment fonctionnant plutôt en dépression.

Par ailleurs, les configurations E-E présentent dans tous les cas des risques hygrothermiques plus forts que les configurations P-P, qui sont donc à privilégier.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La modélisation de la convection due aux défauts d'étanchéité de la membrane a permis de montrer qu'en isolation par l'intérieur, la teneur en eau dans les murs anciens augmentait plus fortement lorsque la membrane présentait des défauts d'étanchéité à l'air. Cette augmentation modifie l'équilibre hygrothermique de la paroi ancienne et l'expose à des pathologies dues à l'excès d'humidité.

Il est donc nécessaire de soigner l'étanchéité à l'air des membranes gérant l'apport de vapeur ou d'utiliser des matériaux perméables à l'humidité à l'intérieur et à l'extérieur, qui permettent à la paroi ancienne d'évacuer l'humidité et de revenir à une teneur en eau plus proche de sa teneur en eau d'origine.

Ces résultats de simulation sont à confirmer par des études expérimentales. D'autre part, il existe peu d'études rassemblant les niveaux de teneur en eau déclenchant des pathologies pour un grand nombre de matériaux. Des travaux en cours ou à venir pourront proposer ces éclairages supplémentaires.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Berger, J., Tasca-Guernouti, S., Woloszyn, M., Buhe, C. 2012. « L'humidité dans les bâtiments : Pathologies et paramètres gouvernants ». *XXXème Rencontres AUGC - IBPSA Chambéry 2012*.
- Cantin, R., Burgholzer, J., Guarracino, G., Moujalled, B., Tamelikecht, S., Royet, B.G. 2010. « Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France ». *Building and Environment* (45), 473-484.
- CETE de l'Est, LRA – ENSA de Toulouse, LMDC – INSA de Toulouse, Maisons Paysannes de France. 2013. « HYGROBA : étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes ». www.cete-est.developpement-durable.gouv.fr
- CSTB. 2006. « Classement des locaux en fonction de l'exposition à l'humidité des parois et nomenclature des supports pour revêtements muraux intérieurs ». Cahiers du CSTB n°3567.
- Dugué, A., Betbeder, F., Lopez, J., Lagièrre, P. 2010. « Evaluation des risques liés à l'humidité dans le cas d'une isolation thermique par l'intérieur de murs anciens : étude de cas ». *IBPSA France 2010*.
- Fraunhofer Institut für Bauphysik. 2014. « WUFI 2D Manual ». Manuel d'utilisation. www.wufi.de
- Künzel, H. M. 1995. « Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components - One- and two-dimensional calculation using simple parameters ». Thèse de doctorat. Fraunhofer IBP.
- METEOTEST. 2014. « Handbook Part 1 : Software. Meteonorm ». Manuel d'utilisation. www.meteonorm.com
- Schmidt, J. et Kornadt, O. 2010. « Convective moisture transfer through walls and wall components ». *Aquametry 2010 - Weimar*.
- Zirkelbach, D., Künzel, H. M., Scafaczek, B., Borsch-Laaks, R. 2009. « Dampfkonzektion wird berechenbar ». *4th International Symposium on Building and Ductwork Air tightness – 30th AIVC Conference « Trends in High Performance Buildings. October 1-1, 2009, Berlin / Germany*.