

Étude thermohydrrique pour la prédiction de la durabilité d'une paroi de bâtiment isolée par l'extérieur

Mathieu BENDOUMA*, Thibaut COLINART*, Patrick GLOUANNEC*

*Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne (LIMATB)

Rue de Saint-Maudé – 56100 Lorient, FRANCE

(Auteur correspondant : mathieu.bendouma@univ-ubs.fr)

Résumé - L'ajout d'un système d'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) peut venir modifier l'équilibre hygrothermique des parois du bâti et engendrer des pathologies (condensation, corrosion, moisissures, etc.) pouvant altérer la performance et la durabilité des ouvrages. Cette communication concerne le suivi hygrothermique d'une paroi d'un lycée rénové à l'aide de systèmes préfabriqués d'ITE. L'analyse des données expérimentales montre l'existence d'un risque lié à l'humidité, que ce soit pour des parois exposées au nord ou au sud. Enfin, un modèle thermique a été développé et la confrontation des simulations avec l'expérience est satisfaisante.

Nomenclature

Symboles latins :

cp	Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
ep	Épaisseur, m
Es	Éclairement solaire, $W.m^{-2}$
h	Enthalpie, $J.kg^{-1}$
hc	Coefficient d'échange par convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$
R_{th}	Résistance thermique, $K.W^{-1}$
S	Surface, m^2
T	Température, K
V	Volume, m^3

Symboles grecs :

α	Coefficient d'absorption
ε	Émissivité
Φ	Densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
σ	Constante de Stefan Boltzmann
μ	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur

Indices et exposants :

$bard$	Bardage
bet	Béton
cav	Cavité
CLO	Courte longueur d'onde
$cond$	Conduction
$conv$	Convection
d	État sec
ext	Extérieur
GLO	Grande longueur d'onde
in	Entrant
$isol$	Isolant
lav	Lame d'air ventilée
out	Sortant
pp	Pare pluie

1. Introduction

Dans un contexte de crise et de précarité énergétique, la réduction de la consommation d'énergie dans le bâtiment est un enjeu considérable. L'isolation thermique par l'extérieur (ITE) présente de nombreux avantages (réduction des ponts thermiques, optimisation de l'inertie thermique...) pour y parvenir, sans impacter l'espace habitable.

Actuellement, il existe deux grandes techniques : l'ITE sous enduit [1] (ou système ETICS composé d'un isolant polystyrène sous enduit) et l'ITE sous bardage [2]. Ce dernier se compose en général d'un isolant, d'un panneau de contreventement, d'une membrane d'étanchéité et d'un bardage, soit métallique, soit organique (bois). La première technique d'ITE sous enduit a fait l'objet de nombreuses études, tant sur l'analyse du comportement hygrothermique [1] que

sur les questions de pathologies et de durabilité des ouvrages [3], [4]. Il apparaît en particulier que l'enduit, qui est directement sujet à des conditions climatiques sévères (pluie, vent, ensoleillement), peut constituer un point de faiblesse. La seconde technique d'ITE sous bardage possède une lame d'air ventilée qui permet de limiter l'impact des conditions extérieures sur le système d'isolation [2]. Cependant, Langmans et al. [5] ont montré récemment que le dimensionnement et le choix des matériaux doit se faire non seulement au regard de la thermique, mais aussi de l'humidité.

Dans cette étude, on s'intéresse au comportement hygrothermique et à la durabilité d'une paroi d'un lycée réhabilité avec un système d'ITE sous bardage. Une instrumentation composée de thermocouples, de sondes hygrothermiques et de fluxmètres permettra ainsi de juger des risques de pathologie au sein de la paroi et fournira une base de données expérimentale servant à la validation de modèle thermique, voire hygrothermique.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Dispositif expérimental

L'étude porte sur un lycée situé à Lorient (zone climatique H2a). Le bâtiment construit en 1959 possède une enveloppe composée d'une paroi de béton de 16 cm. Lors d'une phase de réhabilitation lourde du bâtiment en 2015, des panneaux préfabriqués d'ITE ont été rapportés sur l'enveloppe existante (Figure 1). La paroi et son système d'ITE sont composés (de l'extérieur vers l'intérieur) d'un bardage métallique, d'une lame d'air ventilée, d'une membrane pare pluie, d'une première couche de laine minérale, d'un panneau de contreventement (OSB), d'une seconde couche de laine minérale, d'une cavité d'air fermée et de la paroi en béton initiale (Figure 2). L'originalité du mode constructif tient dans le fait que l'étanchéité à l'air du bâtiment est réalisée par l'extérieur à l'aide de la membrane pare pluie, alors que l'étanchéité à la vapeur est assurée par l'OSB. Les propriétés et les épaisseurs des matériaux sont présentées en Tableau 1.



Figure 1 : Aperçus de la façade extérieure du lycée pendant la phase de réhabilitation

Une instrumentation a été mise en place, dès la pose des panneaux préfabriqués, dans la partie courante des parois sud et nord du lycée (Figure 2). Elle se compose de thermocouples de type K ($\Delta T = \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$), de thermohygromètres de type Sensirion SHT75 ($\Delta HR = \pm 2 \%$; $\Delta T = \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) et de fluxmètres ($\Delta \varphi = \pm 0.63 \text{ W/m}^2$). Une station météo, placée à proximité du lycée, permet de relever les conditions climatiques extérieures (T, HR, précipitation, vent et ensoleillement solaire reçu sur un plan horizontal) et des thermohygromètres et des capteurs de CO2 permettent d'accéder aux conditions intérieures. Tous les capteurs ont une période d'acquisition de 10 minutes.

	Béton	Laine minérale	OSB	Laine minérale	Pare pluie
ep (m)	0.16	0.12	0.01	0.122	0.0005
R_{th} ($K.W^{-1}.m^{-2}$)	0.06	3.4	0.07	3.6	-
μ_d (-)	140	1.5	290	1.5	160

Tableau 1 : Propriétés hygrothermiques des matériaux

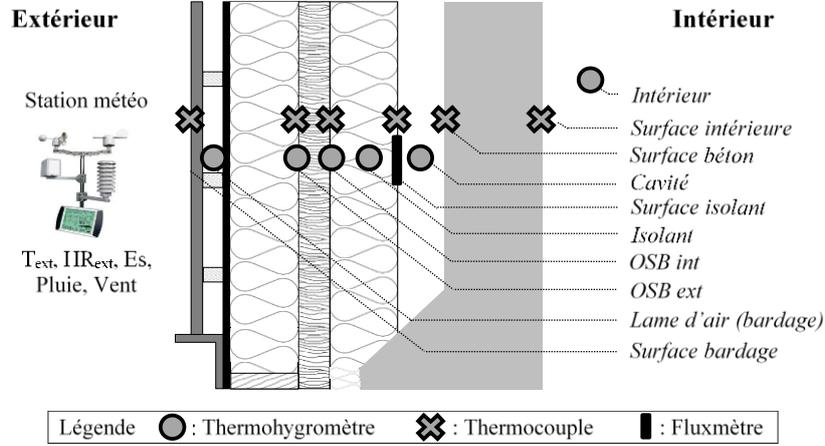


Figure 2 : Schéma de la paroi et positionnement de l'instrumentation

2.2. Modèle numérique

Le modèle numérique vise à prédire l'évolution des températures dans la paroi et, de fait, ne prend pas en compte les phénomènes liés à l'humidité. En supposant des transferts monodimensionnels et des contacts parfaits entre les différentes couches, l'équation de la chaleur (1) s'écrit dans les matériaux :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(-\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) \quad (1)$$

Dans la cavité d'air fermée, un bilan énergétique (2) est effectué en considérant les échanges par convection avec l'isolant et le béton :

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{\partial T_{cav}}{\partial t} = h_c^{cav} \cdot S \cdot (T_{bet} - T_{cav}) + h_c^{cav} \cdot S \cdot (T_{isol} - T_{cav}) \quad (2)$$

Au niveau de la lame d'air ventilée du bardage, un bilan énergétique (3) est également effectué en considérant les échanges par convection avec le bardage et la membrane pare-pluie, ainsi qu'un terme puits/source qui tient compte de l'extraction/apport d'énergie provenant de l'air extérieur (4) :

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{\partial T_{lav}}{\partial t} = h_c^{lav} \cdot S \cdot (T_{bard} - T_{lav}) + h_c^{lav} \cdot S \cdot (T_{pp} - T_{lav}) + \Phi_{lav} \quad (3)$$

$$\Phi_{lav} = Q_v \cdot \rho_{air} \cdot (c_{p_{ext}} \cdot T_{ext} - c_{p_{lav}} \cdot T_{lav}) \quad (4)$$

Au niveau de la cavité d'air fermée et de la lame d'air ventilée, les échanges GLO entre les surfaces sont aussi pris en compte (5) :

$$\Phi_{ray}^{GLO} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{mat2}^4 - T_{mat}^4) \quad (5)$$

Aux interfaces avec les ambiances intérieures (6) et extérieures (7), des conditions de convection et de rayonnement GLO (et CLO pour l'extérieur) sont imposées :

$$\Phi_{int} = h_c \cdot (T_{int} - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{ray-int}^4 - T^4) \quad (6)$$

$$\Phi_{ext} = h_c^{ext} \cdot (T_{ext} - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{ray-ext}^4 - T^4) + \alpha \cdot E_s \quad (7)$$

Où E_s est l'éclairement solaire sur un plan vertical et $h_c^{ext} = 4 + 4 \cdot v_{vent}$ le coefficient d'échange par convection à l'extérieur [6]. Hormis l'émissivité du bardage qui a été mesurée au laboratoire ($\varepsilon=0.95$), les propriétés sont tirées de la littérature [7], [8]. Enfin, les températures

mesurées sont utilisées et extrapolées sur toute l'épaisseur de la paroi pour fixer les conditions initiales.

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats expérimentaux

L'étude porte sur une période hivernale (du 25/12/2015 au 4/1/2016) durant laquelle le bâtiment n'est ni occupé ni chauffé. Les évolutions de la température, de l'humidité relative extérieure et du rayonnement solaire sont présentées sur la Figure 3. La température extérieure moyenne est comprise entre 10 et 13 °C avec une amplitude diurne moyenne de 5°C. Une température maximale de 15,7 °C est atteinte en début de période et une température minimale de 4,6 °C est atteinte en fin de période. Les valeurs d'éclairement solaire sont comprises entre 100 (journées couvertes) et 370 W/m² (journées plus ensoleillées). Enfin, l'humidité relative présente des niveaux compris entre 80 et 100 %, hormis pour le 31/12/2015 où un minimum à 60 % est atteint. Sur la base de ces observations, on focalisera la suite de l'étude sur la période du 29/12/2015 au 2/1/2015 durant laquelle on note de grandes variations de température, d'humidité relative et d'éclairement solaire.

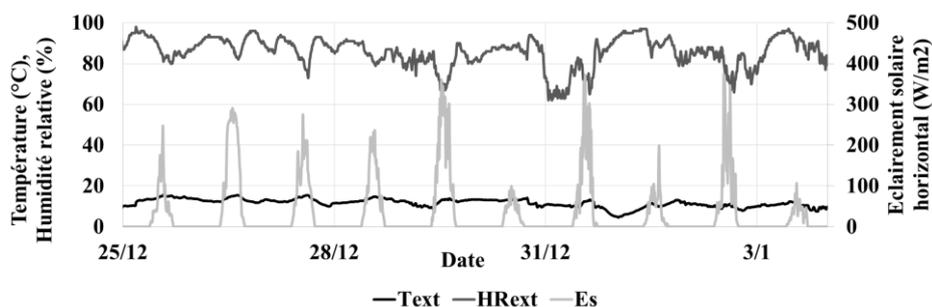


Figure 3 : Conditions climatiques extérieures sur la période du 25/12/2015 au 4/1/2016

La Figure 4 présente l'évolution des températures dans la paroi sud. Durant une journée ensoleillée, on observe que les températures en surface de bardage atteignent des valeurs supérieures à 30 °C, avec pour conséquence de réchauffer de l'air extérieur circulant dans la lame d'air ventilée de 5 à 15 °C et de solliciter thermiquement le reste de la paroi. Les valeurs présentées dans le Tableau 2 indiquent un déphasage et un amortissement de plus en plus important de l'onde thermique dans le complexe d'ITE. Cependant, la température dans la cavité d'air fermée ne présente pas une évolution répondant à la sollicitation thermique provenant de l'extérieur, mais plutôt une évolution similaire à la température intérieure : cela s'explique par la forte inertie thermique du béton qui régule la température dans cette cavité d'air. Durant les journées couvertes et les périodes nocturnes, les températures extérieures, de surface de bardage et de lame d'air ventilée sont du même ordre de grandeur : on constate une légère baisse des températures dans la paroi et la cavité d'air en raison des déperditions.

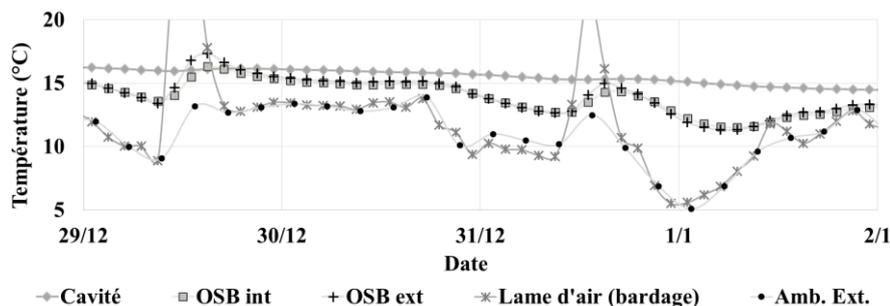


Figure 4 : Évolution des températures dans la paroi sud

La Figure 5 présente l'évolution des humidités relatives et des pressions de vapeur dans la paroi sud. En l'absence d'éclairement solaire, les humidités relatives, extérieures et dans la lame d'air ventilée, présentent des évolutions similaires. En revanche, en présence d'éclairement solaire (le 31/12/2015), on observe une diminution de l'humidité relative plus importante dans la lame d'air ventilée que dans l'air extérieur. Néanmoins, les variations de pressions de vapeur restent similaires et ces dernières passent de 1400 à 800 Pa. En conséquence, on observe une diminution des pressions de vapeur dans le système d'ITE, en raison d'une légère baisse conjointe des températures et des humidités relatives. Cependant, on peut noter au niveau de l'OSB que l'amortissement reste faible en raison de la membrane pare-pluie et que les cinétiques sont nettement plus lentes que celles observées pour les températures (cf. Tableau 2). Enfin, on observe également une diminution de la pression de vapeur dans la cavité intérieure en phase avec celle observée dans l'isolant et décorrélée de celle mesurée dans l'ambiance intérieure : cela indique l'absence d'infiltrations entre la cavité d'air et l'ambiance intérieure : cela indique l'absence d'infiltrations entre la cavité d'air et l'ambiance intérieure et que la sollicitation en humidité provient de l'extérieur.

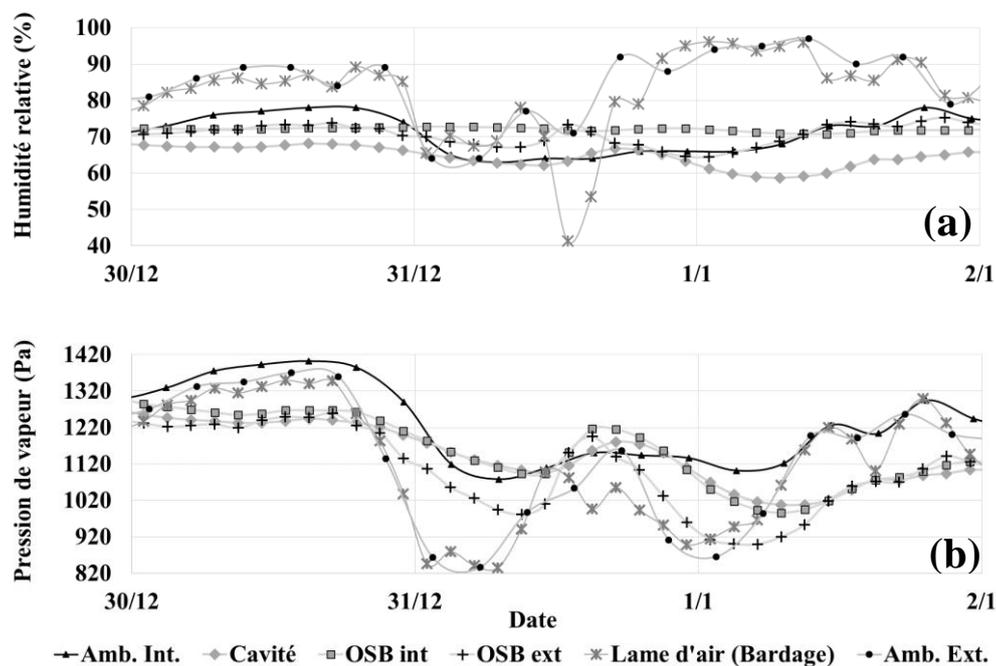


Figure 5 : Évolutions des (a) humidités relatives et (b) pressions de vapeur dans la paroi sud

Position	Température		Pression de vapeur	
	Déphasage	$\Delta T_{mat}/\Delta T_{lav}$	Déphasage	$\Delta p_{v_{mat}}/\Delta p_{v_{lav}}$
OSB ext	3h	17%	4h	62%
OSB int	3h	12%	4h40	50%
Cavité	4h10	$\approx 0\%$	7h	34%

Tableau 2 : Déphasage et amplitude des variations en températures (journée du 31/12) et des pressions de vapeur (nuit du 31/12 au 1/1)

Même si les évolutions de l'humidité relative sont lentes et faibles dans la paroi, on note des hausses ponctuelles, rapides (1 heure et demie en moyenne) et notables (de l'ordre de 10 %) au niveau de l'OSB, qui sont corrélées avec les évolutions de température. À titre de comparaison, ces évolutions d'humidité relative sont confrontées à celles mesurées à la même position au niveau de la paroi nord (cf. Figure 6). Au nord, on observe certes des évolutions, mais moins rapide et moins amples. Une possible explication de ces évolutions tient dans le fait que l'OSB est un matériau hygroscopique, dont les isothermes de sorption dépendent de la température.

En effet, contrairement à l'air humide, une augmentation de température à teneur en eau constante induit une augmentation de l'humidité relative, en raison de l'évaporation de l'humidité contenue dans la structure poreuse du matériau. L'humidité ainsi libérée peut alors soit migrer vers des zones de plus faible pression de vapeur si la température est stabilisée, soit se recondenser si la température est amenée à diminuer. Au final, ce phénomène induit des hausses ponctuelles de l'humidité relative supérieures à 80 %, ce qui peut potentiellement altérer la durabilité de la paroi.

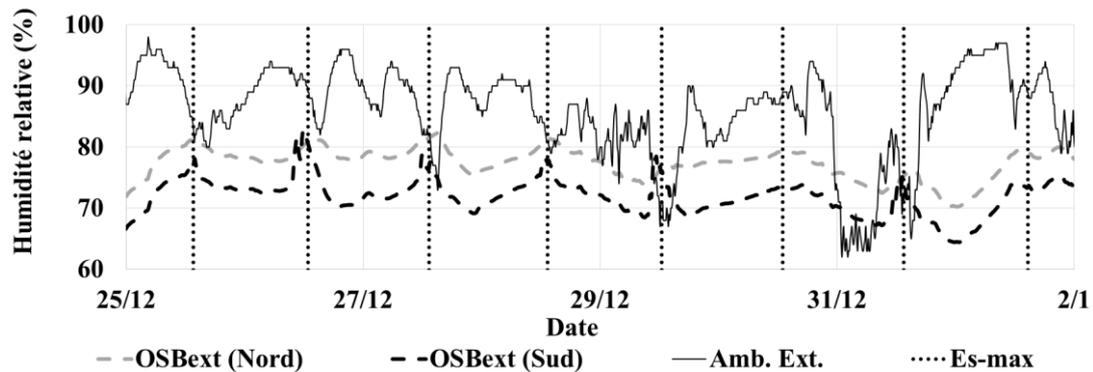


Figure 6 : Évolutions des humidités relatives proches de l'OSB, du côté extérieur, au nord et au sud et de l'humidité relative extérieure

Pour évaluer ces risques liés à l'humidité, les évolutions conjointes de température et d'humidité peuvent être directement comparées à des isocourbes [9]. Cette courbe définit la limite entre les conditions favorables et défavorables à un développement de moisissures. À titre d'exemple, les évolutions de l'OSB au nord et au sud sont tracées sur la Figure 7 pour toute la période d'étude (du 25/12/2015 au 4/1/2016). En termes d'occurrence, la paroi nord dépasse plus fréquemment l'isocourbe que la paroi sud (26h contre 3h). En revanche, les risques semblent plus importants au sud si l'on s'en réfère à l'éloignement de l'isocourbe.

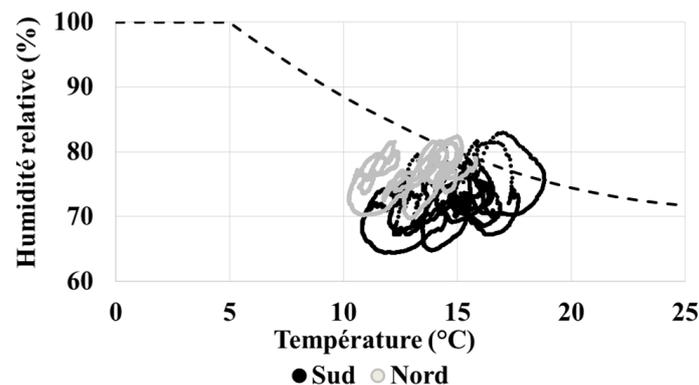


Figure 7 : Courbe de croissance limite appliquée à l'OSB côté extérieur, au nord et au sud

3.2. Résultats numériques

Le comportement thermique de la paroi sud a été simulé sur l'ensemble de la période étudiée (du 25/12/2015 au 4/1/2016) et une analyse de sensibilité est effectuée sur la vitesse d'air dans la lame d'air ventilée. En effet, Falk [10] et Langmans et al. [11] ont montré que celle-ci était variable, dépendait de paramètres comme la nature et le mode constructif du bardage, le nombre et la taille des ouvertures ou l'orientation par rapport au vent dominant et pouvait atteindre des valeurs de l'ordre de 1 m.s^{-1} . Dans cette étude, la vitesse est considérée constante et égale à $0,2$ ou 1 m.s^{-1} . Pour des raisons de lisibilité, seules les températures dans la lame d'air ventilée et

de part et d'autre de l'OSB sont présentées sur la Figure 8 pour la période du 29/12/2015 au 2/1/2015.

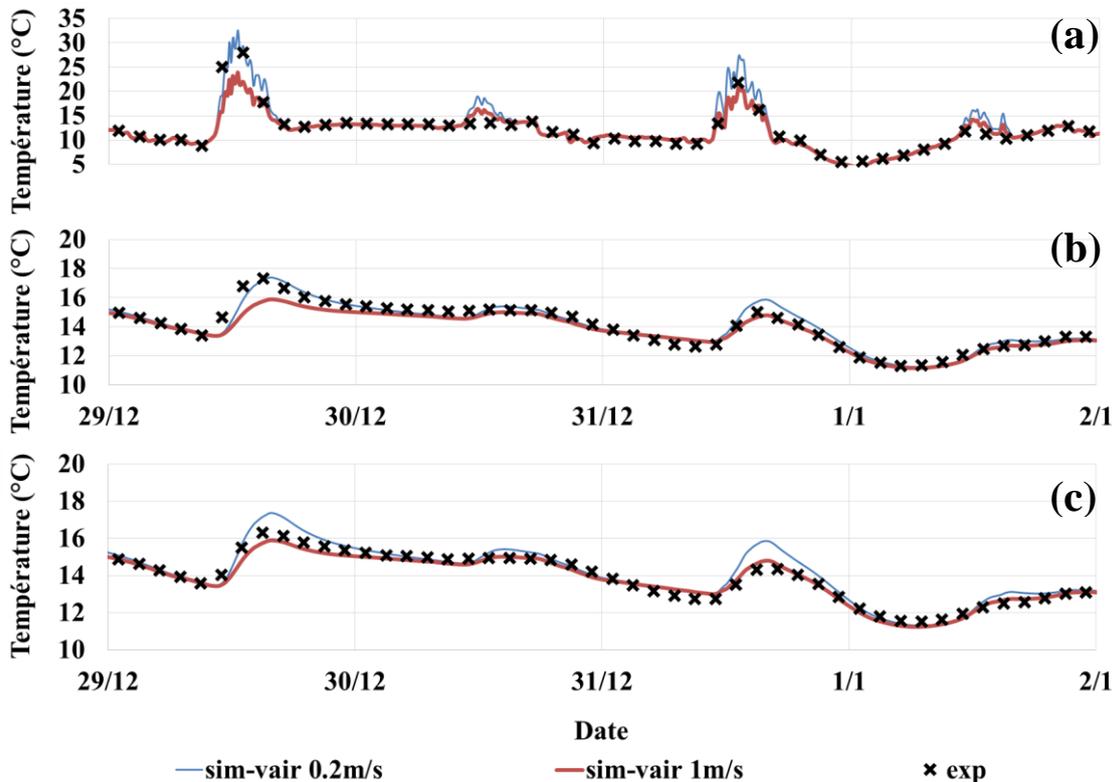


Figure 8 : Comparaison des températures simulées et mesurées et influence de la vitesse d'air dans la lame d'air ventilée ((a) : Lame d'air ventilée ; (b) : OSB côté ext. ; (c) OSB côté int.)

Durant les périodes diurnes, lorsque la paroi est sollicitée thermiquement par l'éclairement solaire, la vitesse d'air influence le bilan énergétique (3) au niveau de la lame d'air ventilée : on observe des écarts entre les simulations allant jusqu'à 9,5 °C au niveau de la lame d'air ventilée, 1,5 °C en surface d'OSB côté extérieur et 0,9°C côté intérieur, la température la plus élevée étant logiquement obtenue pour une vitesse d'air la plus faible. On note par ailleurs que le meilleur accord avec l'expérience est généralement obtenu pour une vitesse d'air de 0,2 m.s⁻¹ au niveau de la lame d'air ventilée et en surface d'OSB côté extérieur, mais pas en surface d'OSB côté intérieur où la température simulée est surestimée. Ces écarts sont dus à la non-prise en compte des phénomènes de condensation-évaporation dans le modèle. Lors des changements de phase constatés expérimentalement, une partie de l'énergie est absorbée, limitant ainsi l'élévation de température en surface d'OSB côté intérieur et dans le reste de la paroi. Enfin, lorsque le bardage n'est plus sollicité thermiquement, on observe que la sensibilité des températures à la vitesse d'air diminue et que les températures simulées convergent vers les températures mesurées.

4. Conclusion

Cette communication a présenté le suivi hygrothermique d'une paroi d'un lycée rénové à l'aide de systèmes préfabriqués d'Isolation Thermique par l'Extérieur. L'analyse des données expérimentales a montré l'existence d'un risque lié à l'humidité pour la paroi exposée au nord, mais également pour celle exposée au sud en raison des phénomènes d'évaporation dans les matériaux hygroscopiques. Par ailleurs, un modèle thermique a été développé : si la

confrontation des simulations avec l'expérience est satisfaisante, le modèle présente une grande sensibilité à la vitesse d'air dans la lame d'air ventilée durant les périodes diurnes.

Plusieurs perspectives peuvent être données à ce travail. Dans un premier temps, l'analyse des données expérimentales sur une année complète doit permettre d'identifier les conditions climatiques conduisant à des risques de pathologies dans la paroi. Dans un second temps, la simulation peut être améliorée en affinant le modèle : d'une part au niveau de la lame d'air ventilée et d'autre part en tenant compte des transferts hydriques. Les résultats pourront ensuite être confortés par des analyses de sensibilité.

Références

- [1] E. Barreira et V.P. De Freitas, « Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) », *Building and Environment*, p. 31-39, 2013.
- [2] M. Salonvarra, A. N. Karagiozis, M. Pazera, et W. Miller, « Air Cavities Behind Claddings : What Have We Learned ? », *Buildings X*, 2007.
- [3] B. Amaro, D. Saraiva, J. de Brito, et I. Flores-Colen, « Inspection and diagnosis system of ETICS on walls », *Construction and Building Materials*, p. 1257-1267, 2013.
- [4] B. Amaro, D. Saraiva, J. de Brito, et I. Flores-Colen, « Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of ETICS in walls », *Civil Engineering and Management*, p. 511-526, 2014.
- [5] J. Langmans, R. Klein, et S. Roels, « Hygrothermal risks of using exterior air barrier systems for highly insulated light weight walls : A laboratory investigation », *Building and Environment*, p. 192-202, 2012.
- [6] F. P. López, R. L. Jensen, P. Heiselberg, et M. Ruiz de Adana Santiago, « Experimental analysis and model validation of an opaque ventilated facade », *Building and Environment*, vol. 56, p. 265-275, oct. 2012.
- [7] H. Hens, *Applied building physics : boundary conditions, building performance and material properties*. John Wiley & Sons, 2010.
- [8] 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*, p. 1038-1046, 2011.
- [9] P. Johansson, T. Svensson, et A. Ekstrand-Tobin, « Validation of critical moisture conditions for mould growth on building materials », *Building and Environment*, p. 201-209, 2013.
- [10] J. Falk, « Rendered rainscreen walls », Lunds, Sweden, 2014.
- [11] J. Langmans, T. Z. Desta, L. Alderweireldt, et S. Roels, « Field study on the air change rate behind residential rainscreen cladding systems : A parameter analysis », *Building and Environment*, p. 1-12, 2016.