# Évaluation du taux de renouvellement d'air sous un bardage ventilé à l'aide de calculs hygrothermiques et de mesures

**Amandine Piot*[1], Arnaud Jay[1]**

**[1] Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, INES, ITE INES.2S, 73375 Le Bourget du Lac, France**
***amandine.piot@cea.fr**

*RESUME. Dans les calculs hygrothermiques concernant des parois munies d'un bardage ventilé, la question du taux de renouvellement d'air se pose. En effet, cette valeur conditionne la possibilité pour la paroi d'évacuer de l'humidité vers l'extérieur. Cependant, cette valeur n'est pas une caractéristique connue à l'avance, comme peuvent l'être les propriétés des matériaux, et est complexe à modéliser. Dans le présent article, nous utilisons des mesures réalisées sur une maison expérimentale en vrai grandeur et en conditions météo réelles afin d'évaluer le taux de ventilation sous un bardage. Pour ce faire, un outil de modélisation hygrothermique est utilisé, et les résultats de calculs pour différents taux de renouvellement d'air sont comparés aux mesures. Les conclusions montrent que le taux de ventilation peut être approché de cette manière. De plus, un modèle simplifié issu de la littérature s'avère pertinent également.*

*MOTS-CLÉS : bardage, taux de renouvellement d'air, simulations hygrothermiques*

*ABSTRACT. When calculating hygrothermal behaviour of walls with ventilated cladding, the question of the air change rate arises. Indeed, this value describes the capacity of the wall to dry out towards the exterior side. However, this value is not a known characteristic such as material properties, and is complex to model. In the present paper, we use measurements done on an experimental house in real climate in order to estimate the air change rate behind a ventilated cladding. To do so, a hygrothermal modelling tool was used and calculation results with various air change rates are compared to measurements. The conclusions show that the air change rate can be evaluated by this way. Moreover, a simplified model taken in the literature also proves to be relevant.*

*KEYWORDS : cladding; air change rate; hygrothermal calculations*

## 1. INTRODUCTION

L'utilisation d'un bardage ventilé permet une protection efficace des façades contre la pluie battante, tout en ayant une fonction de finition esthétique. La finition en bardage ventilé est également utile à l'évacuation de l'excès d'humidité diffusant depuis l'intérieur des murs (Finch et Straube 2007; Mundt Petersen et Harderup 2013).

La ventilation sous le bardage peut être décrite par un taux de renouvellement d'air (ACH pour *air change rate*) ou par une vitesse d'air. Le taux de renouvellement d'air peut s'étendre sur plusieurs ordres de grandeur ; par exemple, (Rahiminejad et Khovalyg 2021) citent des valeurs dans la littérature allant de 10 à 1800 vol/h, pour des vitesses d'air comprises entre 0.1m/s et 3m/s.

(Finch et Straube 2007) décrivent plusieurs méthodes pour modéliser l'effet d'une lame d'air ventilée sur des calculs hygrothermique 1D. Une approche courante est de considérer la ventilation comme

source/puits de chaleur et d'humidité. Cette approche est détaillée plus loin dans cet article. Dans ce cas, le taux de renouvellement d'air est considéré comme une donnée d'entrée, et doit donc être estimé.

Dans le cas où l'on dispose d'un dispositif expérimental, plusieurs techniques permettent de déterminer ce taux de renouvellement d'air ; toutefois, ces méthodes peuvent s'avérer complexes et conserver une forte marge d'incertitude. (Langmans et Roels 2015) comparent quatre méthode de mesures : par gaz traceur, par mesure de pression, par mesure directe de la vitesse d'air, et par une méthode originale basée sur des mesures de température et d'humidité. Cette dernière méthode n'est applicable que pour les parements de type brique (qui se saturent vite à l'absorption d'eau de pluie mais sont en dehors de cela très peu hygroscopiques). La méthode par gaz traceur permet d'estimer un ordre de grandeur du taux de ventilation, mais ne représente qu'une mesure ponctuelle. La méthode par mesure de vitesse d'air permet un relevé continu, mais n'est adaptée que pour des forts taux de ventilation ; par ailleurs le résultat tend à sur-estimer le taux effectif de renouvellement d'air en raison des fluctuations de l'air autour du capteur, et une correction de 5% à 40%, comme proposée par (Falk et Sandin 2013), est recommandée par les auteurs. Enfin, la détermination du taux de ventilation par mesure de pression nécessite en amont la caractérisation du réseau hydraulique constitué par la cavité ventilée.

(Tariku et Iffa 2019) proposent un modèle par régression polynomiale donnant un taux de renouvellement d'air en fonction des mesures de température et de pression dans la cavité.

Dans le présent article, nous présentons une autre approche, basée sur la mesure des températures et humidité dans la paroi, et l'utilisation d'un modèle de calculs hygrothermiques. En complément, nous comparerons nos résultats au modèle proposé par (Falk, Molnár, et Larsson 2014), qui évalue un taux de renouvellement d'air en fonction du rayonnement solaire et de la vitesse du vent.

## 2. INSTALLATION EXPÉRIMENTALE

Le bardage ventilé étudié ici est la finition d'un élément d'isolation rapportée préfabriquée en vue d'une rénovation thermique lourde. Il est constitué d'une ossature bois, isolée entre montants, et est destiné à être fixée côté extérieur de la façade du bâtiment à rénover où il assure également la fonction d'étanchéité à l'air. La finition est assurée par une vêture sur lame d'air ventilée. C'est celle-ci qui est l'objet de la présente étude.

L'expérimentation s'est déroulée sur la zone d'expérimentation en plein air de l'INES au Bourget du Lac (Savoie), sur l'une des maisons INCAS (Spitz et al. 2012). L'une des maisons du site a été dépouillée de son isolation pour ne laisser que la structure en béton banché. Les modules de parois préfabriqués ont été installés sur cette structure. La composition de la paroi après travaux est donnée sur la Figure 1.

La Figure 1 donne un aperçu du dispositif expérimental de gauche à droite : pose d'un panneau, zoom sur un thermo-hygromètre, positionnement des capteurs dans l'épaisseur de la paroi, maison terminée.

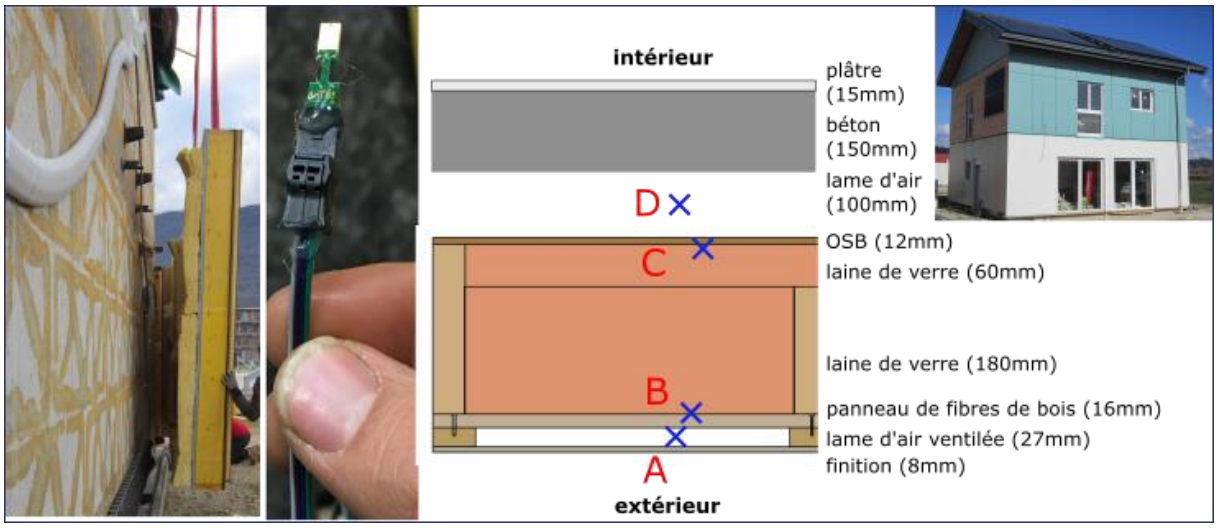


*Figure 1 : Description du dispositif expérimental*

Des thermohygromètres de type SHT85 ont été utilisés pour mesurer la température et l'humidité relative à différents emplacements dans la paroi : dans la lame d'air ventilée, contre le panneau de fibre de bois, contre l'OSB, et dans le vide technique non ventilé. Leur précision est de 1,5% HR, et 0,1°C sur la gamme de mesures attendues. Cette instrumentation a été installée à plusieurs positions dans la façade Sud (visible sur la photo Figure 1), malheureusement de nombreuses défaillances sont survenues. Seul un profil complet était disponible pour la validation des calculs. Deux autres capteurs positionnés en B et C permettent toutefois de conforter les mesures.

Des capteurs situés dans la maison permettent également de mesurer les conditions de température et d'humidité dans le volume. En outre, une station météo sur le site enregistre les valeurs de température d'air, rayonnement solaire, humidité relative, vitesse et direction du vent, et rayonnement grandes longueurs d'ondes de la voûte céleste. Les mesures se sont déroulées de novembre 2020 à juillet 2021.

## 3. MODÈLE NUMÉRIQUE

Le logiciel Wufi, basé sur les travaux de (Künzel 1995; Künzel et Kiessl 1996), a été utilisé. La paroi a été modélisée de manière monodimensionnelle. Le travail de modélisation a été fait en deux temps : tout d'abord, les mesures en A et D (voir Figure 2, étape 1) ont été utilisées comme conditions aux limites, afin d'estimer au mieux les caractéristiques des matériaux de l'enveloppe rapportée. Dans un second temps, les conditions mesurées à la station météo et côté intérieur ont permis de modéliser l'ensemble de la paroi, en particulier la lame d'air ventilée (étape 2).

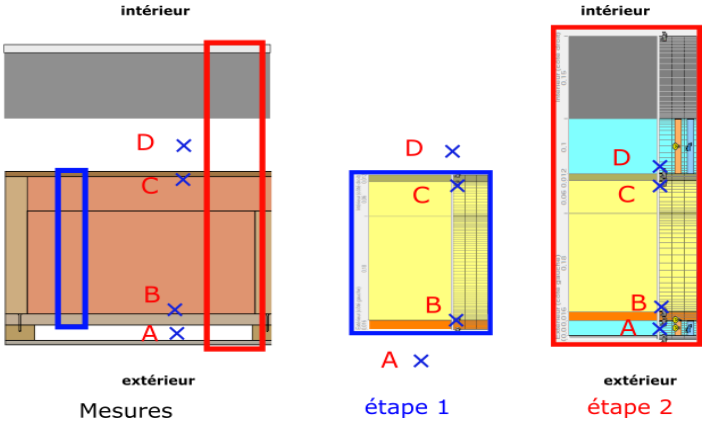


*Figure 2 : étapes de modélisation et points de comparaison mesures-calcul*

Les résultats ont été analysés à partir de février, les premières semaines de calcul permettant de s'affranchir des conditions initiales. La Figure 3 présente les résultats obtenus sur 10 jours en mars, aux emplacements B et C (à l'intérieur du panneau), et pour deux positions du capteur dans la hauteur, en termes de Température et de pression de vapeur. La dynamique d'ensemble et les variations jour/nuit sont représentées de manière satisfaisante, même si des écarts au niveau des pics de maximum de pression de vapeur persistent.

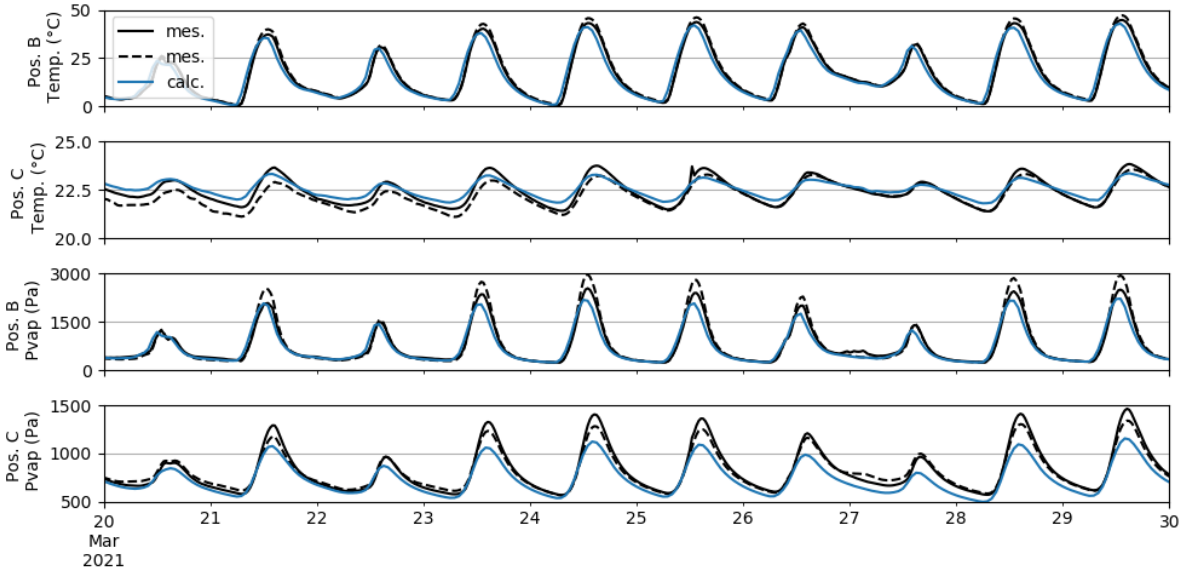


*Figure 3 : température et pression de vapeur mesurées et calculées*

L'écart moyen quadratique (RMSE) sur la période a été calculé (équation 3) et est donné plus bas, Figure 6, à titre de comparaison avec les autres calculs effectués.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum (mesure - calcul)^2} \tag{2}$$

Dans un second temps, nous avons modélisé la paroi complète en tenant compte des conditions aux limites météorologiques (température d'air, vitesse et direction du vent, rayonnement solaire) et du climat intérieur. Cette étape nous a permis, par la confrontation des mesures de température en A avec les calculs, de fixer les paramètres donnés dans le Tableau 1. Ces paramètres ont été approximés pour un taux de renouvellement d'air de 100vol./h, sans bouclage itératif par la suite.

| | |
|---|---|
| absorptivité solaire | 0,6 |
| albedo | 0,6 |
| coefficient d'échange convectif (sous le vent) | $0{,}33 \cdot U + 11$ [W/m²K] |
| coefficient d'échange convectif (au vent) | $1{,}6 \cdot U + 11$ [W/m²K] |

*Tableau 1 : Paramètres utilisés pour les conditions aux limites extérieures*

## 4. ÉTUDE DU TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR DANS LA LAME D'AIR

Le renouvellement d'air dans une lame d'air est considéré dans le modèle comme une source de chaleur et d'humidité ajoutée dans le bilan des nœuds considérés, qui s'écrivent alors :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla \mathrm{T}) + \frac{ACH}{3600} \cdot dx \cdot C_{p,air} \cdot (T_{ext} - \overline{T_{cavité}}) \tag{3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla(\delta \nabla P_v) + \frac{ACH}{3600} \cdot dx \cdot (r_{ext} - \overline{w_{cavité}}) \quad (4)$$

Dans le cas présent, nous avons choisi d'appliquer cette source à toute l'épaisseur des lames d'air.

Le logiciel wufi accepte comme valeur un taux de renouvellement d'air constant, ou bien issu d'un fichier : il peut alors s'agir soit de valeurs fixes en alternance jour/nuit, soit d'une valeur par pas de temps.

Pour la lame d'air sous la vêture, l'air entrant est pris aux conditions de température et d'humidité extérieures. Plusieurs valeurs constantes de taux de renouvellement d'air ont été testées :

- 0 vol/h (absence de ventilation)
- 10 vol/h
- 100vol/h

Ces valeurs ont été choisies en référence aux valeurs recommandées dans le guide (Pacte 2021), en cours de rédaction au moment des calculs.

De plus, une alternance jour nuit a été modélisée : 500 vol/h de 6h à 18h, 100 vol/h de 18h à 6h. Enfin, le modèle proposé par (Falk, Molnár, et Larsson 2014) a également été implémenté. Le taux de renouvellement d'air est alors calculé en fonction de la vitesse du vent U et du rayonnement incident sur la façade I (équations 5 et 6). Ce modèle a été calé expérimentalement pour un bardage avec des liteaux verticaux, une épaisseur de lame d'air de 25 mm, et un panneau de finition rouge sombre (« cavity 1 »).

$$ACH_{jour} = 46.7 \times I^{0.43} \quad \text{si I}\neq 0 \quad (5)$$

$$ACH_{nuit} = 55.4 \times U^{1.35} \quad \text{si I}=0 \quad (6)$$

La Figure 4 présente les valeurs du taux de renouvellement d'air calculées par ce modèle, pour une semaine en avril. La nuit, le taux de renouvellement d'air est nettement plus faible (de 20 à 200 vol/h), et le jour il peut atteindre 1000 vol/h. Par ailleurs, les valeurs calculées en été sont plus élevées qu'en hiver, où le taux maximal d'ACH atteint 400 vol/h.

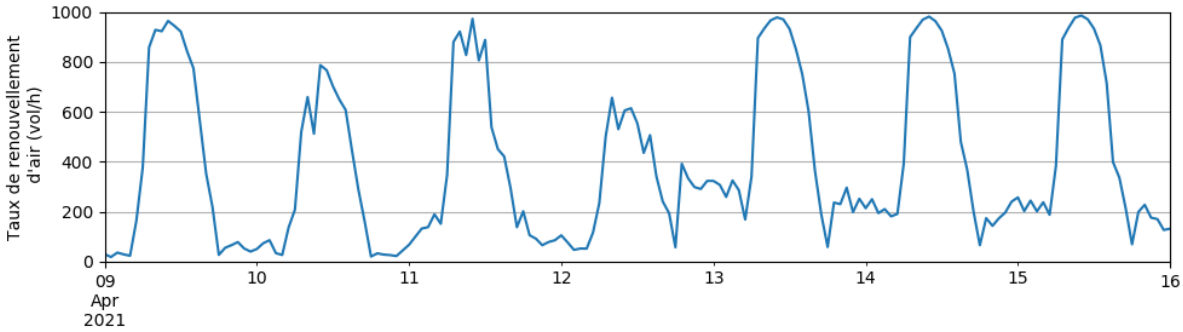


*Figure 4 : taux de renouvellement d'air calculé (équations 5 et 6)*

La Figure 5 présente les résultats en termes de température et pression de vapeur dans la lame d'air (capteur A) sur une semaine en avril à titre d'illustration. Des écarts persistent dans toutes les configurations en température dans la lame d'air. La modélisation 1D simplifiée ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des phénomènes en jeu (stratification des températures, variabilité du vent inférieur au pas horaire etc). Toutefois, le comportement général est bien représenté.

En termes d'humidité, on constate clairement qu'un taux de ventilation élevé est nécessaire pour approcher les valeurs mesurées (supérieur à 100vol/h). En journée en particulier, le pic de pression de vapeur est nettement trop important si le taux de ventilation reste trop faible. De plus, la prise en compte d'un taux différent le jour et la nuit permet de mieux rendre compte de l'évolution de la pression de vapeur la nuit.

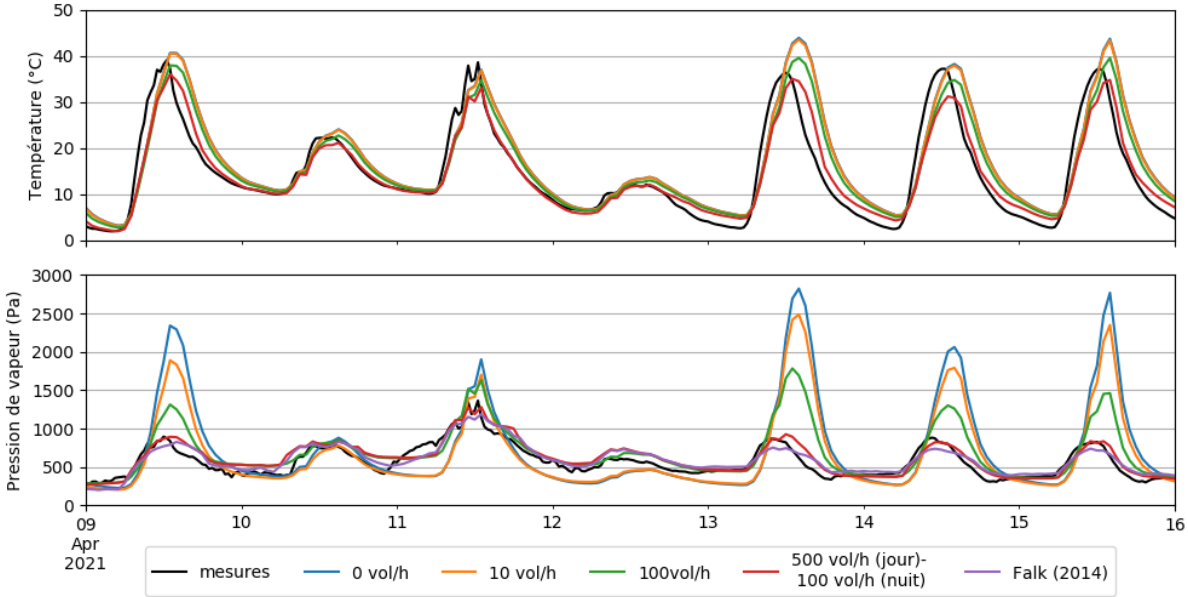


*Figure 5 : Température et pression de vapeur dans la lame d'air : mesures et calculs pour différents taux de renouvellement d'air*

La Figure 6 présente les RMSE aux différents emplacements dans la paroi (Figure 1), calculés pour la température, la pression de vapeur, ainsi que l'humidité relative. Pour les capteurs placés à l'intérieur du panneau rapporté (B et C), le RMSE a également été évalué pour les calculs faits en utilisant les mesures dans la lame d'air comme conditions aux limites (cf. §3), en guise de référence. Ces valeurs sont calculées sur les résultats du 1er février au 7 août.

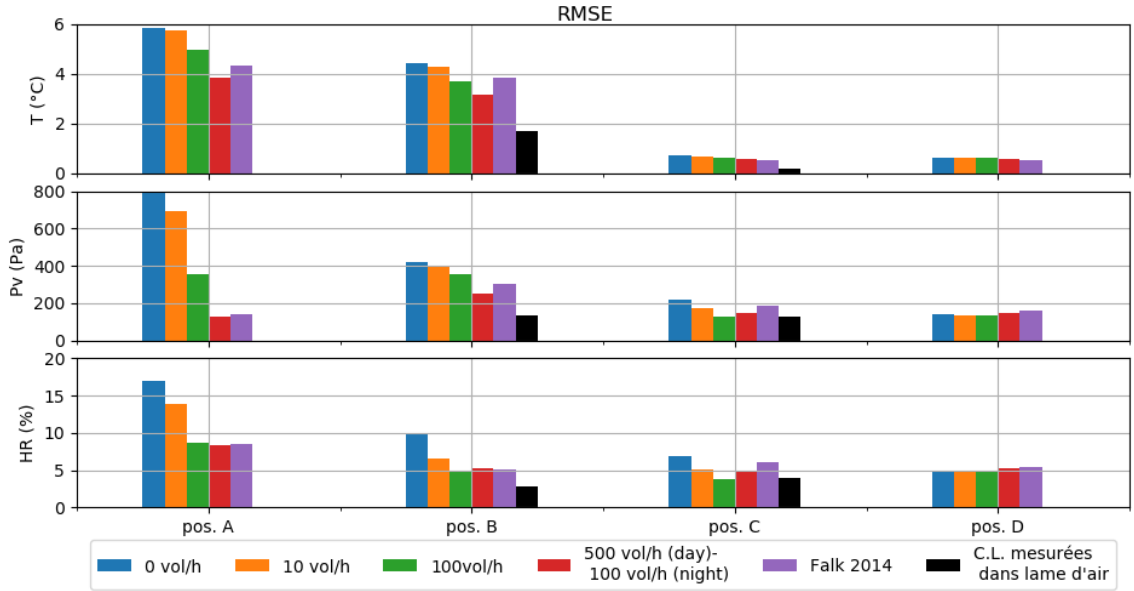


*Figure 6 : Écart quadratique moyen pour différents choix de modélisation*

Ces résultats confirment que, sur l'ensemble de la période étudiée, un taux de ventilation trop faible conduit à d'importantes surestimations de l'humidité dans la lame d'air ventilée. Cet écart se propage à l'intérieur de la paroi, même s'il est moins marqué dès que le taux de ventilation choisi n'est pas nul. L'utilisation du modèle proposé par (Falk, Molnár, et Larsson 2014) aboutit à des écarts comparables à ce qu'on obtient avec deux valeurs fixes (500/100 vol/h), les écarts en température restant légèrement supérieurs.

## 5. CONCLUSIONS

Le présent article propose une méthode de détermination du taux de renouvellement d'air sous le bardage à l'aide d'une instrumentation de type température et humidité relative, complétée par des calculs hygrothermiques dynamiques. Cette méthode permet d'estimer le taux de ventilation même en l'absence d'anémomètre, qui peuvent s'avérer délicats à exploiter. En l'absence de mesures, le modèle proposé par (Falk, Molnár, et Larsson 2014) permet lui aussi d'approcher ce taux de renouvellement d'air, à l'aide des simples données météorologiques. Toutefois, ce modèle n'est adapté qu'à certains types de bardage, et n'a pu être validé que pour une orientation Sud.

L'approche présentée ici n'a pas pour but de décrire finement les échanges aérauliques, mais permet d'évaluer l'ordre de grandeur du taux de renouvellement d'air sous la vêture. Il apparait clairement que le taux de renouvellement d'air est important, l'ordre de grandeur se situant autour de quelques centaines de volumes par heure, correspondant plutôt à la fourchette haute des recommandations professionnelles (Pacte 2021).

Le modèle proposé par (Falk, Molnár, et Larsson 2014) permet d'obtenir des résultats satisfaisants pour cette configuration géométrique (épaisseur de lame d'air, orientation sud). L'avantage de ce modèle est sa simplicité, il permet en outre de calculer un taux de ventilation « à l'aveugle », et est donc utilisable en calculs hygrothermiques de dimensionnement (sans mesures pour valider). Ce modèle pourrait avantageusement être complété par d'autres configurations, en particulier nous n'avons pas pu le valider sur une orientation Nord.

## 6. NOMENCLATURE

| | | |
|---|---|---|
| Cp | chaleur spécifique | J/kg.K |
| I | rayonnement solaire total incident sur la façade | W/m² |
| r | concentration en vapeur d'eau dans l'air | kg/m³ |
| T | température | °C ou K |
| U | vitesse du vent | m/s |
| ρ | masse volumique | kg/m³ |
| dx | épaisseur d'une maille | m |
| w | teneur en eau volumique | kg/m3 |
| λ | conductivité thermique | W/m.K |
| H | enthalpie | J/m3 |
| Pv | pression de vapeur | Pa |
| δ | perméabilité à la vapeur | s |

## 7. REMERCIEMENTS

Les travaux présentés ont été réalisés en grande majorité dans le cadre du projet ES'OPE financé par l'ADEME et ont bénéficié d'une aide de l'État au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant

la référence ANR-10-IEED-0014-01. La conception, construction et pose du panneau préfabriqué ont été assurées par l'entreprise Chanel Lyon.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

Falk, Jörgen, Miklós Molnár, et Oskar Larsson. 2014. « Investigation of a simple approach to predict rainscreen wall ventilation rates for hygrothermal simulation purposes ». *Building and Environment* 73 : 88-96. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.025.

Falk, Jörgen, et Kenneth Sandin. 2013. « Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces ». *Building and Environment* 59 : 164-76. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.017.

Finch, Graham, et John Straube. 2007. « Ventilated wall claddings: Review, field performance, and hygrothermal modeling ». Clearwater Beach, FL.

Künzel, H. M. 1995. « Simultaneous heat and moisture transport in building components - One- and two-dimensional calculation using simple parameters ». PhD, University of Stuttgart.

Künzel, H. M., et K. Kiessl. 1996. « Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40 (1) : 159 – 167. https://doi.org/DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00084-1.

Langmans, Jelle, et Staf Roels. 2015. « Experimental analysis of cavity ventilation behind rainscreen cladding systems: A comparison of four measuring techniques ». *Building and Environment* 87 (0) : 177 – 192. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.030.

Mundt Petersen, Solof, et Lars-Erik Harderup. 2013. « Moisture safety in wood frame constructions – What do we know today? – A literature overview ». Dans *Proceedings of SB13 Oulu - Sustainable procurement in urban regeneration and renovation Northern Europe and North-West Russia*. .

Pacte, Programme. 2021. « Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiment ». https://programmepacte.fr/sites/default/files/pdf/gsimhubatoct21222web.pdf.

Rahiminejad, Mohammad, et Dolaana Khovalyg. 2021. « Review on ventilation rates in the ventilated air-spaces behind common wall assemblies with external cladding ». *Building and Environment* 190 : 107538. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107538.

Spitz, Clara, Laurent Mora, Etienne Wurtz, et Arnaud Jay. 2012. « Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house ». *Energy and Buildings* 55 : 459-70. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.013.

Tariku, Fitsum, et Emishaw Iffa. 2019. « Empirical model for cavity ventilation and hygrothermal performance assessment of wood frame wall systems: Experimental study ». *Building and Environment* 157 : 112-26. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.020.