

# HYGROTHERMIE

by pmp

## DATE

JUILLET 2016

## REDACTION

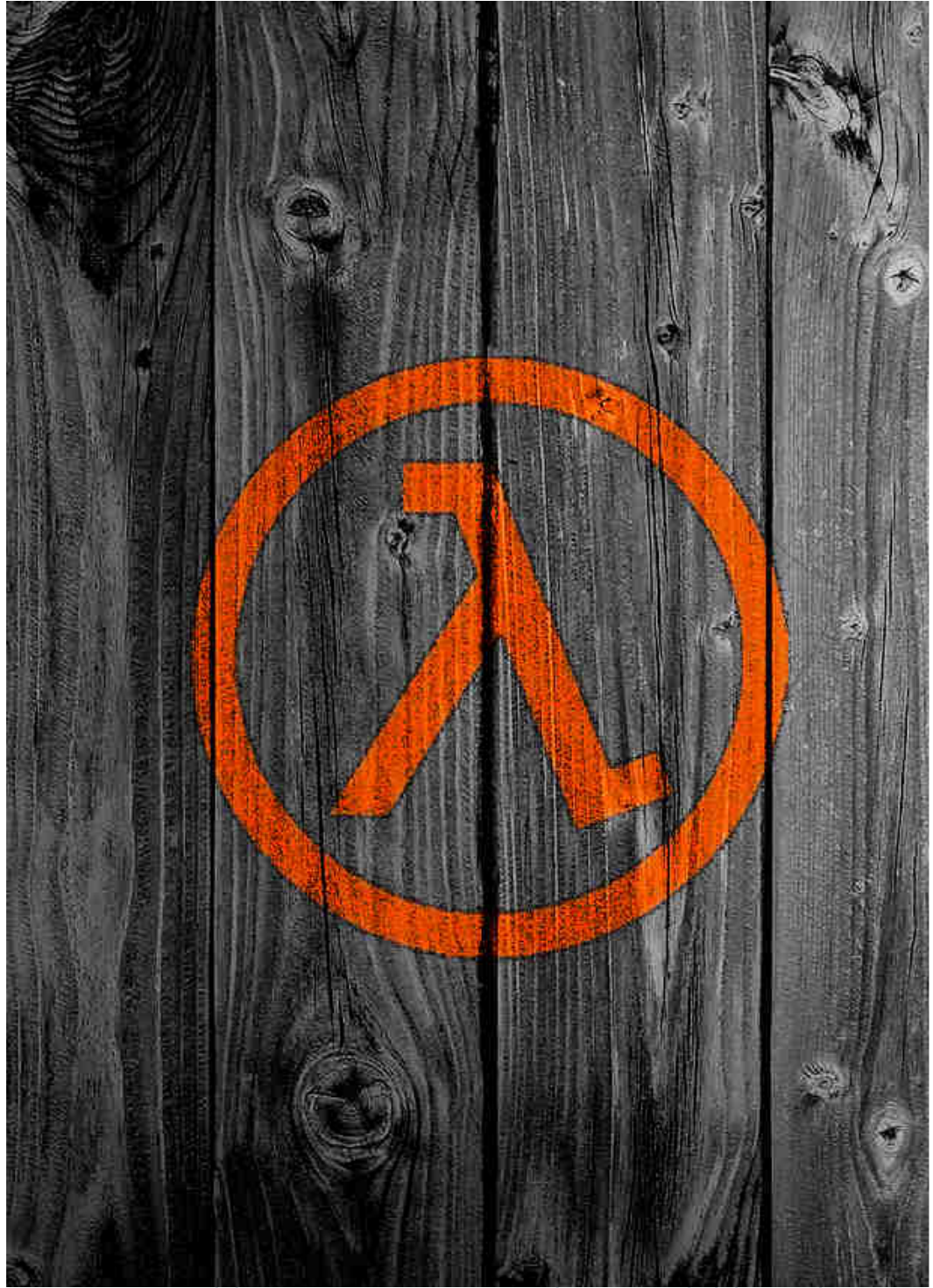
BENJAMIN BIOT

## REVISION

REV. 3 OCTOBRE 2016

NT04

# ABSTRACT



COMPRENDRE ET EXPLOITER LES CONDUCTIVITES  
THERMIQUES DE MATERIAUX ISOLANTS ET LEURS  
IMPACTS DANS LE CADRE D'EXPERTISES  
HYGROTHERMIQUES

# 1. LA PROBLEMATIQUE

La conductivité thermique des matériaux isolants de construction est une donnée clé que bon nombre d'architectes et/ou bureaux d'études manient au quotidien. Autrefois considérée comme secondaire, voire négligeable, elle est, aujourd'hui, au centre des attentions dans tout projet se voulant énergétiquement performant. La réglementation PEB exploite ces valeurs en permanence, de même que d'autres méthodes de bilan énergétique comme le PHPP ou les simulations thermiques dynamiques, par exemple. Les études hygrothermiques n'échappent pas à la règle en exigeant de l'expert qu'il définisse au maximum les propriétés réelles du matériau qu'il modélise dans son logiciel.

Cependant, comme son nom l'indique, les études hygrothermiques intègrent tant la notion de comportement thermique que de comportement hygrométrique des matériaux. Il convient dès lors de considérer que certaines propriétés de ces matériaux varient en fonction de la température et de l'humidité relative à laquelle ils sont soumis. Là où les logiciels de bilan énergétique (PEB, PHPP,...) considèrent une conductivité thermique invariable et équivalente à celle d'un matériau placé dans une ambiance à 10°C de moyenne, les logiciels de simulations hygrothermiques (WUFI, DELPHIN, MOIST,...) doivent quant à eux considérer que cette conductivité thermique évolue en fonction de la teneur en eau du matériau étudié. Cette particularité nécessite donc de connaître une valeur de base, *la conductivité thermique à l'état sec*.

ET JE TROUVE ÇA OÙ ?

Là est le problème. La procédure actuelle de certification des matériaux isolants de construction ne renseigne généralement qu'un seul type de valeur : la conductivité thermique *déclarée*, notée «  $\lambda_D$  ». Il est très rare de disposer d'informations sur la façon dont cette valeur peut évoluer lorsque le matériau est soumis à une variation d'humidité relative (laquelle, dans les parois d'un bâtiment peut varier de 40-50 à ...95% en cas de mauvaise conception). Qui plus est, lorsque ces informations sont, dans de très rares cas, disponibles, elles ne peuvent être directement exploitées. Pourquoi ? Parce qu'une conductivité thermique déclarée n'est qu'une valeur statistique qui ne reflète pas toujours la performance réelle du matériau.

J'AI DU MAL À SUIVRE.

Pas de panique ! Afin de faciliter la compréhension des différentes valeurs de conductivité thermique qu'un technicien peut rencontrer, le point suivant détaille la manière dont ces mesures sont réalisées, de l'entrée du matériau dans le laboratoire jusqu'à l'émission du document final attestant de la valeur « déclarée ».

Par la suite, des exemples issus de simulations démontreront l'impact de l'hygrothermie des parois sur les valeurs « U » utilisées dans la méthode de calcul du bilan énergétique du bâtiment. Le lecteur sera ainsi invité à visualiser la variation de ces valeurs « U » au regard de phénomènes tels que l'évolution de la conductivité thermique en fonction de l'humidité relative, l'impact de phénomènes extérieurs (pluie, vent, soleil,...), etc.

## 2. LES CONDUCTIVITES THERMIQUES

Dans le but de fournir une réflexion large et complète, le présent point sera développé selon la vision de 3 acteurs de terrains différents : le fabricant de matériaux isolants, l'organisme de certification et l'architecte ou le bureau d'études en charge de « l'exploitation » du produit final. Chacun d'entre eux dispose d'une vision et d'une attente particulière par rapport aux performances du matériau étudié.

### 2.1. LES ACTEURS

#### LE FABRICANT DE MATERIAUX ISOLANTS



Le fabricant de matériaux isolants s'inquiète généralement de connaître les performances réelles et mesurées de son produit. Sa démarche vise, la plupart du temps, à répondre à une question de type « *Si je place mon matériau dans une paroi, quelle(s) performance(s) va-t-il réellement présenter ? Comment va-t-il évoluer ?* »

#### L'ORGANISME DE CERTIFICATION



L'organisme de certification répond généralement à un besoin d'informations et de données pour un cadre réglementaire bien défini. Typiquement, en Belgique, la réglementation PEB s'encadre d'une batterie de normes, lesquelles définissent de manière très précise la façon de déterminer les performances énergétiques de tous les composants d'un bâtiment. Ce cadre réglementaire se veut très exhaustif de manière à garantir la comparabilité des bâtiments construits sur le territoire. L'organisme de certification doit, dès lors, fournir une valeur répondant à un cadre précis, restrictif et exhaustif dans les situations qu'elle englobe. Cette valeur est plus communément connue sous le nom de « conductivité thermique déclarée », et notée  $\lambda_D$

#### L'ARCHITECTE – LE BUREAU D'ETUDES



L'architecte ou le bureau d'études agit tant dans un cadre réglementaire (PEB) que dans un cadre volontaire pour le compte de son client. Dans ce cas de figure, il peut être amené à assurer la certification de performances énergétiques allant au-delà de la réglementation, la vérification du bon fonctionnement ou de la bonne conception d'une paroi, la validation du comportement d'un matériau spécifique dans le cas particulier du projet, etc. Ses missions peuvent être nombreuses et chacune d'entre elles peut exiger des données de différents types selon la méthode de calcul utilisée.

### 2.2. DETERMINER UNE CONDUCTIVITE THERMIQUE

Comme expliqué précédemment, le vaste cadre réglementaire de la PEB repose sur une série de normes. Ces normes définissent tant la manière de mesurer ou calculer des propriétés de matériaux que le matériel à utiliser pour déterminer ces mêmes propriétés. La Figure 1 ci-dessous illustre le cadre réglementaire relatif à la conductivité thermique des matériaux d'isolations et les normes qui s'y rapportent.



Figure 1 : Schéma de principe du cadre réglementaire pour la certification des performances hygrothermiques de matériaux d'isolation dans le bâtiment

La première étape du processus de certification nécessite, en toute logique, que l'entreprise fabriquant le matériau remette un certain nombre d'échantillons à l'organisme de certification. Ces échantillons doivent généralement refléter l'ensemble de la production sur une ou plusieurs années afin de tenir compte de légères variations dans la composition ou la « formation » du produit en lui-même. Dans le cas d'un produit issu de la pétrochimie, on veillera donc à sélectionner des échantillons issus de « batch » (mélanges de composants) de production différents. Dans le cas d'un produit constitué de fibres naturelles, on veillera à sélectionner des échantillons contenant des fibres d'origine différente afin d'en tester la diversité.

Une fois les échantillons remis à l'organisme de contrôle et de certification, ceux-ci seront conditionnés. La nature du test détermine le conditionnement à réaliser. Pour la mesure d'une conductivité thermique sèche, les échantillons seront séchés dans un four pendant plusieurs heures jusqu'à atteindre l'obtention d'une humidité relative proche de 0% et une variation de masse quasi-nulle durant plusieurs heures. Dans le cadre de la réglementation PEB, la conductivité thermique utile intérieure, notée  $\lambda_{ui}$  et correspondant à un matériau mis en œuvre dans un environnement sec non-exposé à la pluie, se mesure sur des échantillons conditionnés à 23°C et 50% d'humidité relative.

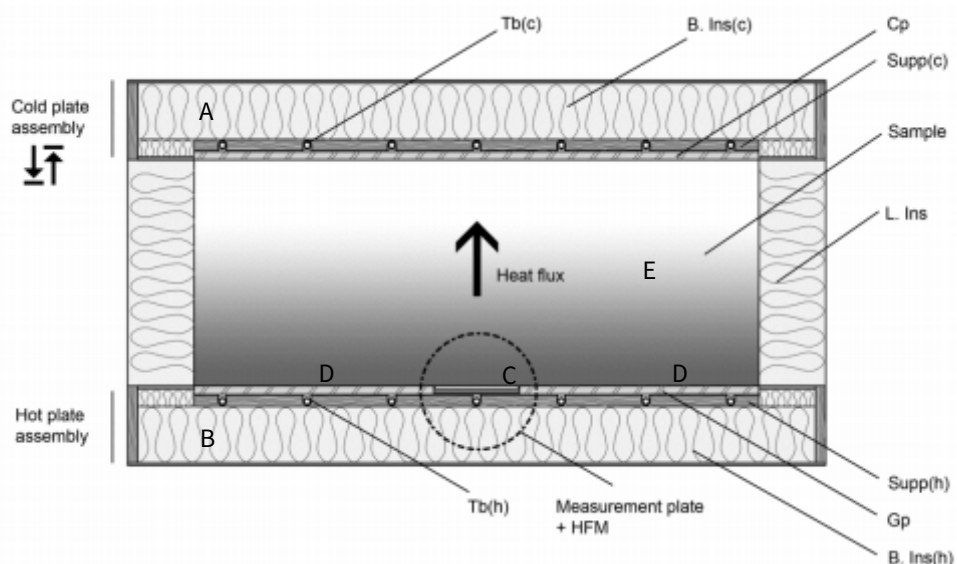


Figure 2 : coupe transversale d'une plaque chaude gardée et des éléments la composant. (A) Plaque froide, (B) plaque chaude, (C) zone de mesure, (D) zone de garde, (E) échantillon testé. (Source : "Design, Construction and Validation of a Guarded Hot Plate Apparatus for Thermal Conductivity Measurement of High Thickness Crop-Based Specimens", S. Dubois & F. Lebeau, 2013)

La mesure en elle-même peut s'effectuer au moyen de plusieurs types d'appareil. Le plus répandu est la « plaque/boite chaude gardée » (Guarded Hot Box/Plate), comme illustré sur la Figure 2 ci-dessus. Sans rentrer dans le fonctionnement de ce type d'appareil, ni dans la manière dont en est issue la valeur «  $\lambda$  » mesurée, vulgarisons son principe à la présence de 2 plaques ; l'une froide (A), l'autre chaude (B). Chacune d'entre elles présente une température réglable. Dans le cas spécifique de la réglementation PEB, la NBN EN ISO 10456 impose une température moyenne de l'essai de 10°C. La plaque froide sera donc à 5°C et le plaque chaude à 15°C, ceci afin de garantir une température moyenne, dans l'échantillon testé, de 10°C. Au centre de ces plaques, une zone de mesure (C) de dimensions réduites est chargée de mesurer et réguler les variations de flux. Ces zones de mesures sont entourées d'une zone de garde (D), laquelle isole la partie mesurée du matériau de l'ambiance extérieure qui pourrait influencer la précision du test. Dans certains cas, l'appareil est entouré d'une épaisse couche d'isolant afin de l'isoler complètement de l'ambiance extérieure. Dans d'autres, on peut aller jusqu'à placer l'appareil de mesure dans une chambre climatique chargée de reproduire les mêmes conditions de température et d'humidité que celles du test.

À l'issue de plusieurs dizaines (voire centaines) d'heures de mesure, une valeur de conductivité thermique est calculée. Cette conductivité thermique, mesurée à 10°C de moyenne sur un échantillon préalablement conditionné à 23°C et 50% d'humidité relative, sera notée  $\lambda_{10,(23,50)}$ . Cette dénomination permet également d'identifier d'autres types de mesure comme :

- $\lambda_{10,(23,80)}$  correspondant à une mesure réalisée à 10°C de moyenne sur un échantillon préalablement conditionné à 23°C et 80% d'humidité relative. Cette mesure sert de base pour déterminer les  $\lambda_{ue}$  que l'on retrouve dans la PEB.
- $\lambda_{10,dry}$  correspondant à une mesure réalisée sur un échantillon préalablement séché au four jusqu'à obtention d'une masse constante durant plusieurs heures et d'une humidité relative proche de 0%. C'est cette valeur qu'il faudrait idéalement considérer comme base pour déterminer une conductivité thermique sèche déclarée pour des simulations hygrothermiques. Mais nous y reviendrons...

Comme expliqué précédemment, les propriétés de différents échantillons issus d'un même procédé de fabrication peuvent présenter de légères différences. Afin de tenir compte de la variabilité de ces propriétés, il est nécessaire d'établir une valeur statistique qui servira de référence et protégera les différents acteurs de mauvaises surprises dues à des valeurs inattendues (ex : un isolant qui s'avère « moins isolant » que prévu). Sur la base d'un nombre prédéterminé de mesures, les valeurs  $\lambda_{10,(23,50)}$  sont donc traitées de manière statistique. On détermine ainsi une nouvelle valeur appelée  $\lambda_{10,90/90}$  et définie comme étant une valeur statistique de la conductivité thermique, calculée de manière à garantir que, dans 90% des cas, 90% de la production aura une valeur inférieure ou égale à la conductivité thermique déclarée. Cette valeur  $\lambda_{10,90/90}$  est calculée comme suit :

$$\lambda_{10,90/90} = \lambda_{moyenne} + k * S_{\lambda}$$

Dans laquelle :

$\lambda_{moyenne}$  est la conductivité thermique moyenne de l'ensemble des mesures réalisées par l'organisme de contrôle [W/(m.K)]

$k$  est un coefficient issu de la norme NBN EN ISO 10456 et est fonction du nombre de tests effectués.

$S_{\lambda}$  est calculé comme suit :

$$S_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_{moyenne})^2}{n - 1}}$$

Dans laquelle :

$\lambda_i$  est la conductivité thermique mesurée de chaque échantillon [W/(m.K)]

$n$  est le nombre d'échantillons mesurés

Une fois la valeur  $\lambda_{10,90/90}$  celle-ci sera arrondie selon des règles décrites dans la norme NBN EN ISO 10456. La valeur ainsi obtenue sera la valeur dite « déclarée ».

PFIQU. T'AS PAS PLUS SIMPLE ?

Prenons l'exemple d'une entreprise « X », productrice d'un matériau isolant pour la construction. Désireuse de connaître les performances de son matériau et de l'introduire sur le marché, elle décide d'obtenir un agrément technique attestant, entre autres, de la conductivité thermique du matériau.

Elle fournit donc 10 échantillons à l'organisme de contrôle, lequel les conditionnera à 23°C et 50% d'humidité relative en vue d'effectuer une série de mesures à 10°C. Le matériau, de nature hétérogène, présente des valeurs de conductivité thermique dispersées, comme en témoigne le Tableau 1ci-dessous.

Tableau 1: Exemple fictif de résultats de mesures de conductivité thermique sur 10 échantillons différents

MESURES	$\lambda_{10(23,50)}$ [W/m.K]
1	0,043
2	0,042
3	0,045
4	0,044
5	0,041
6	0,045
7	0,043
8	0,045
9	0,042
10	0,044
MOYENNE	0,0434

La valeur statistique de ces résultats, notée  $\lambda_{10,90/90}$ , peut donc être déterminée comme suit :

$$s_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\lambda_i - 0,0434)^2}{10 - 1}}$$

$$s_{\lambda} = 0,0014$$

Pour un total de 10 mesures, la norme NBN EN ISO 10456 renseigne une valeur k de 2,07.

$$\lambda_{10,90/90} = 0,0434 + 2,07 * 0,0014$$

$$\lambda_{10,90/90} = 0,046$$

Enfin, la règle des arrondis s'applique, toujours selon la norme de référence, et permet ainsi de définir la valeur de la conductivité thermique déclarée, laquelle sera affichée sur l'agrément technique. Dans le cas d'un matériau isolant, cette règle stipule que la valeur doit être arrondie au millièème supérieur :

$$\lambda_D = 0,046 + 0,001$$

$$\lambda_D = 0,047 \text{ W/(m.K)}$$

Grâce au contrôle de l'organisme de certification, l'entreprise « X » peut présenter une conductivité thermique déclarée à tout client potentiel et faire valoir cette performance dans des bases de données officielles, exploitées par les logiciels de réglementation. Toutefois, il reste intéressant de constater les différences observées entre la moyenne résultant des mesures sur les échantillons fournis (0,0434 W/(m.K)) et le résultat final de la conductivité thermique déclarée (0,047 W/(m.K)). Ces résultats peuvent paraître comparables, mais dans un marché où la plus petite valeur déclarée fait loi, elle pourrait en contrarier plus d'un.

MAIS, C'EST DINGUE CE TRUC!

Pas tout à fait... L'exemple repris ci-dessus utilise volontairement des valeurs de conductivité thermique mesurées relativement éloignées les unes des autres. Il est fréquent que les différences soient moins marquées. Dès lors, la valeur déclarée ne présente pas un tel écart avec la moyenne des mesures. On peut tout de même encore constater des écarts de l'ordre de 0,004 W/m.k pour certains matériaux.

Quoi qu'il en soit, cette valeur statistique de la conductivité thermique peut apporter deux choses. Premièrement, la garantie que le fabricant ne sera pas exposé à des cas de figure où son produit s'avère moins performant qu'annoncé. Deuxièmement, qu'une variation importante dans les mesures réalisées peut témoigner d'un processus de fabrication à optimiser.

# ABSTRACT

VOUS LISEZ UNE VERSION LIMITEE DE CE DOCUMENT.

POUR VISUALISER LA NOTE TECHNIQUE DANS SON ENSEMBLE, RENDEZ-VOUS DANS VOTRE **ESPACE MEMBRE** !



## 5. CONCLUSION

La conductivité thermique des matériaux est une donnée manipulée quotidiennement par un grand nombre d'architectes et de bureaux d'études. Cependant, celle-ci est majoritairement présentée sous une forme dite « déclarée », laquelle ne permet pas de répondre aux besoins des simulations hygrothermiques. A travers cette note technique, les notions de conductivité thermique sont plus largement abordées et rattachées aux propriétés hygrothermiques générales de certains matériaux. Le point **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** de ce document permet ainsi de visualiser que pour certains matériaux dits « hygroscopiques », la conductivité thermique peut augmenter de 12,5% à 30% entre 0 et 90% d'humidité relative alors que d'autres matériaux dits « non hygroscopiques » présentent une augmentation de seulement 3% dans les mêmes conditions.

De tels extrêmes sont cependant rares car l'humidité relative de référence doit être constante dans toute l'épaisseur du matériau, ce qui est rarement le cas dans une paroi correctement conçue. En effet, le gradient de température au sein de la paroi entraîne un gradient d'humidité relative, lequel entraîne ce que l'on pourrait appeler, de manière théorique, un « gradient de conductivité thermique ».

Afin de simplifier cette approche, des valeurs  $U$  « hygrothermiques » (notées «  $U_{hygro}$  ») ont été déterminées à l'aide du logiciel *WUFI Pro 6.0* pour deux types de paroi. La première est constituée de matériaux hygroscopiques tels que la fibre de bois et la cellulose, la seconde est constituée de matériaux dits non-hygroscopiques tels que le polystyrène extrudé et la laine minérale. À l'aide d'une logique inverse reposant sur le calcul d'un flux hygrothermique par *WUFI*, les valeurs «  $U$  » standards des parois sont recalculées de manière à tenir compte des phénomènes hygrothermiques affectant les propriétés des matériaux qui les composent. Une valeur «  $U_{hygro}$  » est ainsi obtenue et varie de mois en mois en fonction des conditions climatiques.

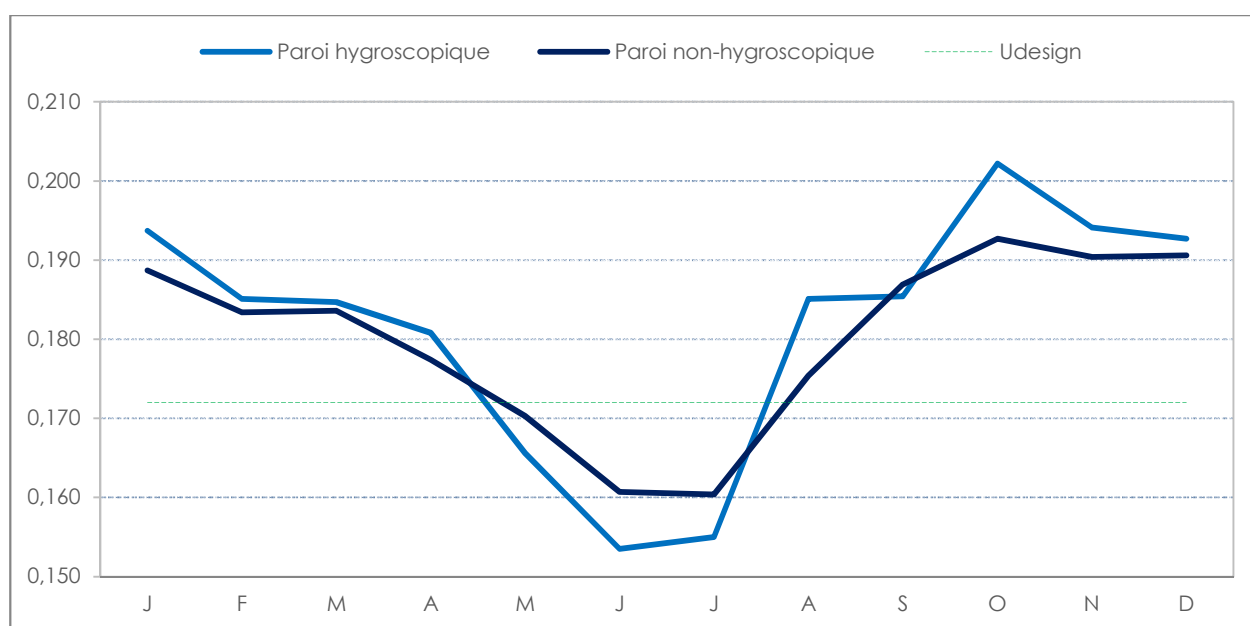


Figure 3 : Évolution des valeurs " $U_{hygro}$ " de parois hygroscopiques et non hygroscopiques sur la 5ème année de simulation pour une orientation Nord.

Les fluctuations, relativement importantes d'un mois ou d'un cas à l'autre, pourraient soulever des questions quant à l'utilité de se tourner vers des matériaux dits « hygroscopiques ». En analysant les données dans le détail, on peut cependant remarquer que ces valeurs extrêmes ne nuisent pas aux performances de la paroi pour autant. En effet, une paroi hygroscopique est, au final, simplement à considérer comme un complexe qui échange et évolue en fonction de l'environnement auquel il est soumis. Ce comportement lui permet ainsi de capter, gérer et réémettre certaines quantités de vapeur d'eau. À l'inverse, une paroi « non hygroscopique » adoptera quant à elle un comportement plus « inerte » et ne présentera pas de gestion particulière de l'humidité ambiante. Malgré ces différences de

comportement, les performances globales des deux parois restent similaires, comme le démontrent les simulations réalisées, avec un écart de seulement  $0,34 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{paroi}}.\text{an})$  entre les deux cas d'études et pour une orientation Nord.

Bien que, par rapport aux méthodes statiques habituelles, davantage de paramètres aient été considérés dans cette étude, certains phénomènes physiques ont été négligés. À titre d'exemple, l'évolution de l'isotherme de sorption, qui établit la liaison entre la teneur en eau au sein d'un matériau et l'humidité relative à laquelle il est soumis. Comme son nom l'indique, cette isotherme est valable pour une température donnée. Or, la température au sein du matériau varie constamment en fonction des conditions climatiques intérieures et extérieures. Pour une approche rigoureuse de la présente thématique, un matériau hygroscopique devrait être étudié en fonction de ses isothermes de sorption, chose que *WUFI Pro* ne permet pas à l'heure actuelle. Nous pourrions également citer le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur susceptible, lui aussi, de varier en fonction de l'humidité relative. Beaucoup de phénomènes entrent en jeu dès qu'une paroi dite « hygroscopique » (plus communément appelée « respirante ») est mise en œuvre. Malgré la complexité de ce type de paroi, il est important de multiplier les études à leur sujet afin de repousser les limites actuelles, de faciliter la compréhension des phénomènes inhérents aux matériaux hygroscopiques et permettre à un secteur en constante évolution de s'approprier de nouveaux outils de conception et/ou de décision.

## STATIQUE VERSUS DYNAMIQUE

Les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présentent l'évolution des valeurs «  $U_{\text{hygro}}$  » des parois étudiées par rapport à une valeur «  $U_{\text{design}}$  » de référence, telle que celle calculée dans des logiciels statiques comme la PEB ou le PHPP. On peut ainsi observer la présence d'extrêmes allant de  $0,127 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  à  $0,202 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  pour une valeur «  $U_{\text{design}}$  » de référence de  $0,172 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . Ces écarts peuvent soulever certaines interrogations quant à la nécessité de se tourner vers des valeurs « dynamiques » pour établir le bilan énergétique d'un bâtiment, par exemple. Il est supposé ici que les conductivités thermiques de référence considérées pour le calcul du «  $U_{\text{design}}$  » tiennent compte d'un comportement « moyen » de la paroi, sur une année. Comme détaillé dans la présente note, les mesures de conductivité thermique se font sur des échantillons conditionnés à  $23^\circ\text{C}$  et 50% d'humidité relative. Il est correct de considérer que ce taux d'humidité relative correspond à un niveau moyen au sein de la paroi sur les 12 mois de l'année et à travers les différentes saisons. Les valeurs moyennes des parois orientées « Est » et « Ouest » et issues des réflexions menées à travers ce document reflètent avec une assez bonne précision les valeurs «  $U_{\text{design}}$  » calculées dans la PEB ou le PHPP.

Toutefois, il est intéressant d'observer les valeurs moyennes des parois orientées « Sud » et « Nord », lesquelles présentent des extrêmes allant de  $0,164 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  à  $0,182 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . L'écart est déjà un peu plus important par rapport aux valeurs «  $U_{\text{design}}$  » calculées. Celles-ci mériteraient d'être considérées à l'échelle du bâtiment dans les réflexions bioclimatiques en esquisse de projet, les compositions de parois en avant-projet, voire dans les calculs de dimensionnement de la puissance de chauffage en phase d'exécution.

## RÉGULATION HYGROSCOPIQUE, BILAN ÉNERGÉTIQUE SEMI-DYNAMIQUE...

La réalisation de cette note technique a apporté certaines réponses quant à la manière de considérer les conductivités thermiques de matériaux d'isolation thermique, mais également l'impact de leur évolution en fonction de la teneur en eau de ces matériaux au sein de la paroi au fil des saisons et événements climatiques. Davantage de questions ont cependant été soulevées au fur et à mesure des résultats générés. Les matériaux d'isolation voient-ils leur(s) performance(s) hygrothermiques varier de manière similaire à ceux présentés dans cette note ? La paroi hygroscopique présente des valeurs «  $U_{\text{hygro}}$  » différentes de la paroi non hygroscopique en raison de sa capacité à réguler la vapeur d'eau. Mais quelle quantité de vapeur d'eau régule-t-elle réellement ? Est-ce représentatif à l'échelle d'un bâtiment ? Que devient le bilan énergétique d'un bâtiment lorsque l'on considère l'évolution des valeurs «  $U_{\text{hygro}}$  » au fil des saisons en lieu et place d'une valeur «  $U_{\text{design}}$  » constante sur toute l'année ? Ne pourrait-on pas intégrer ces valeurs «  $U_{\text{hygro}}$  » dans un PHPP et effectuer un comparatif avec la méthode statique habituelle ?

Un ensemble de questions que pmp ne compte bien entendu pas laisser sans réponses...