

**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 « λ_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 λ_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 λ_{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.

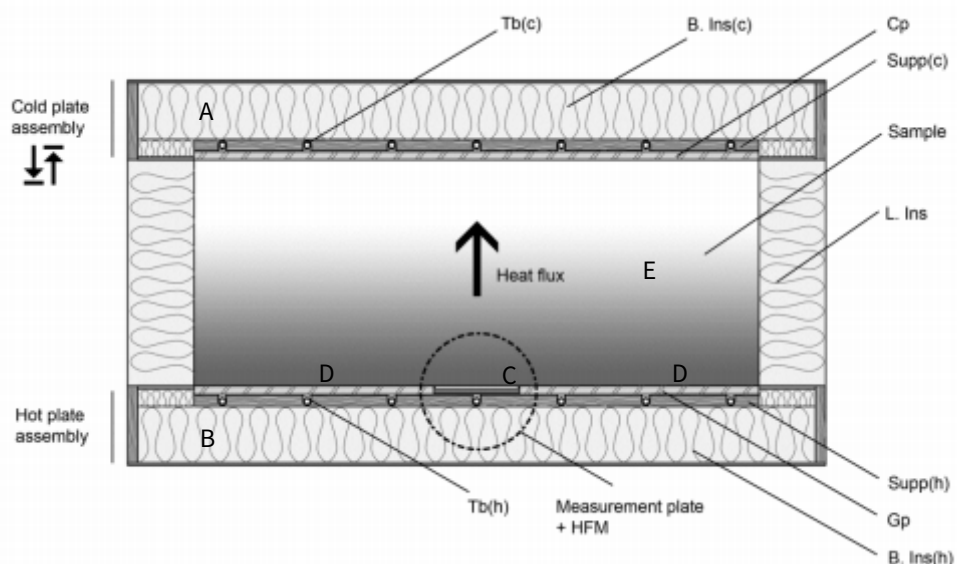


Figure 2 : coupe transversale d'une plaque chaude gardée et des éléments la composant. (A) Plaque froide, (B) plaque chaude, (C) zone de mesure, (D) zone de garde, (E) échantillon testé. (Source : "Design, Construction and Validation of a Guarded Hot Plate Apparatus for Thermal Conductivity Measurement 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 « λ » 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 λ_{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_{λ} est calculé comme suit :

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

Dans laquelle :

λ_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 :

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

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

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.

3. ET L'HYGROTHERMIE... ?

Le point précédent nous a permis de comprendre d'où venait la conductivité thermique déclarée et ce qu'elle représente par rapport aux performances réelles d'un produit. Chaque acteur renseigné initialement devrait donc s'y retrouver ; l'entreprise dispose de son ATG, l'organisme de contrôle peut attester des performances d'un matériau supplémentaire et les architectes et bureaux d'études disposent d'une fiche technique, laquelle renseigne la valeur à considérer pour leurs études.

Vraiment ?

Si vous avez tenu le coup jusque-là, c'est maintenant que vous devriez comprendre que, pour « l'hygrothermicien », ces nombreuses démarches n'apportent en fait, aucune solution.

Pour rappel, les logiciels de simulation hygrothermique nécessitent une conductivité thermique à l'état sec. Sur la base de celle-ci, ils peuvent extrapoler une évolution en fonction de la teneur en eau du matériau. En retournant quelques pages en arrière, on peut constater que les mesures réalisées par l'organisme de contrôle et de certification le sont sur des échantillons conditionnés à 23°C et 50% d'humidité relative... et non à l'état sec. Pour l'ensemble des études hygrothermiques, les données nécessaires sont donc la plupart du temps absentes des fiches techniques et ATG, et limitent ainsi le champ de l'étude...sans pour autant rendre celle-ci impossible, nous sommes bien d'accord.

QUELLES SOLUTIONS POUR D'AVANTAGE DE PRÉCISION ?

Il existe malheureusement peu de solutions à l'heure actuelle. La norme NBN EN ISO 10456 actuellement en vigueur permet bien de déterminer un « coefficient de conversion pour l'humidité », celui-ci permettant d'extrapoler une conductivité thermique à X% de teneur en eau du matériau. Cependant, cette méthode repose sur la connaissance de deux valeurs : une conductivité thermique de type $\lambda_{10,(23,50)}$ et une conductivité thermique... à l'état sec. En résumé, selon les informations actuellement en notre possession, sans campagne de mesures de conductivités thermiques à l'état sec sur plusieurs types de matériaux d'isolation, peu de solutions fiables semblent disponibles.

Cependant, en quittant le cadre réglementaire belge, on peut se référer à certains travaux internationaux. Ainsi, les développeurs de logiciels de simulations hygrothermiques (tels WUFI (Fraunhofer) ou DELPHIN (Institut für Bauklimatik)) disposent généralement de laboratoires dans lesquels ils effectuent de nombreux tests en vue d'alimenter la base de données de leur(s) logiciel(s). Des conductivités thermiques sont ainsi mesurées à l'état sec et un coefficient de conversion pour l'humidité est également déterminé dans la plupart des cas afin de retrouver la conductivité thermique du matériau à différents stades d'humidité. Le logiciel « DELPHIN » du *Institut für Bauklimatik* à Dresden, Allemagne, a la particularité de présenter un outil intégré qui, sur la base des données de leur laboratoire, permet de retrouver une conductivité thermique à X% d'humidité pour la plupart des matériaux.

Il convient toutefois de conserver à l'esprit que l'ensemble de ces valeurs repose sur les performances de matériaux produits et testés à l'étranger. Les produits présents sur le marché belge ne sont donc pas représentés à travers cette solution.

BON, ET GLOBALEMENT, C'EST GRAVE ?

Le Tableau 2 ci-dessous reprend des conductivités thermiques à 0%, 30%, 60% et 90% d'humidité relative pour un ensemble de matériaux d'isolation thermique standards.

Tableau 2 : exemples d'évolution de conductivités thermiques en $W/(m^2.K)$ à différentes humidités relatives pour quelques matériaux d'isolation standards [Source : Base de données du logiciel DELPHIN 5]

| MATERIAU | λ @ 0% d'HR | λ @ 30% d'HR | λ @ 50% d'HR | λ @ 90% d'HR |
|---|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Cellulose insufflée (55kg/m ³) | 0,040 | 0,041 | 0,042 | 0,045 |
| Panneau fibres de bois (160 kg/m ³) | 0,039 | 0,043 | 0,047 | 0,052 |
| Laine minérale (67kg/m ³) | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 |

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Panneau polystyrène extrudé (16kg/m ³) | 0,036 | 0,036 | 0,036 | 0,037 |
|---|-------|-------|-------|-------|

La première tendance qui en ressort est que, sans grande surprise, les matériaux « inertes », qui ne présentent pas de comportements hygroscopiques, voient leurs conductivités thermiques rester relativement stables (voir exemple de la laine minérale et du panneau polystyrène extrudé dans le Tableau 2 ci-dessus). Pour peu que la conductivité thermique déclarée soit proche de la moyenne des mesures effectuées (chose cependant difficile à vérifier...), on pourrait considérer la valeur déclarée comme valeur à l'état sec dans les logiciels de simulation. Ce raccourci ne devrait pas générer de problèmes importants compte tenu de la faible influence de l'humidité relative sur la teneur en eau du matériau et sur l'évolution de sa conductivité thermique. En effet, pour ce type de matériaux, la variation de la conductivité thermique entre 0 et 90% d'humidité relative n'est que de l'ordre de 3% au maximum.

Toutefois, une grande tendance du marché de la construction belge est de s'orienter vers des comportements « éco-responsables » et ainsi privilégier des matériaux dont l'analyse du cycle de vie présente de faibles impacts sur l'environnement. Sans faire de trop grands raccourcis, il n'est pas rare de constater que ces mêmes matériaux sont composés de fibres naturelles et peuvent, dès lors, présenter un comportement hygroscopique. Le matériau présente alors des performances variables en fonction de sa teneur en eau. Cette dernière peut être caractérisée par l'isotherme de sorption, mesuré en laboratoire, qui établit la relation entre l'humidité relative et la teneur en eau du matériau. Pour de tels matériaux, la conductivité thermique varie sensiblement au fur et à mesure que celui-ci se charge en humidité.

Il convient donc de se pencher sur les performances hygroscopiques générales du matériau (isotherme de sorption et évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau (kg/m³)) afin de savoir si celui-ci est susceptible de faire varier fortement le coefficient thermique « U » global de la paroi.

4. L'EXPLICATION PAR L'EXEMPLE

Prenons l'exemple d'une ossature bois d'épaisseur conventionnelle (184mm), laquelle est contreventée par un panneau OSB intérieur de 12mm. À l'extérieur, un panneau de fibres de bois de 30mm ferme le caisson pour l'insufflation de cellulose et offre un complément d'isolation. Une membrane pare-pluie ouverte à la diffusion de vapeur complète la paroi. Un bardage bois ajouré sur lattage et contre-lattage pourrait, par exemple, finir le complexe. Dans le cas simulé ci-dessous, l'hypothèse prise néglige le bardage bois afin de visualiser l'impact du soleil sur l'évolution du comportement hygrothermique de la paroi, objectif recherché dans cette note technique. WUFI Pro ne permet malheureusement pas de gérer une partie d'ombrage comme celui généré par un bardage vertical largement ajouré. Une prochaine étude pourrait se pencher sur le comparatif entre la situation actuelle et la même paroi non soumise au rayonnement solaire.

La Figure 3 ci-dessous représente la paroi telle qu'encodée dans le logiciel de simulation utilisé (ici, WUFI Pro 6).

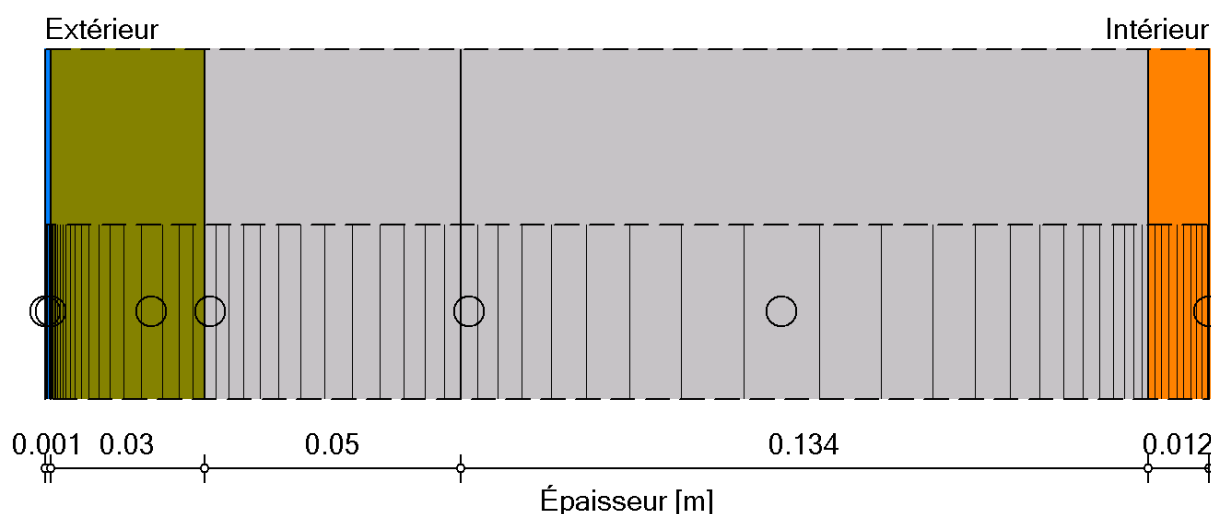


Figure 3 : Représentation de la paroi étudiée dans le logiciel de simulation (WUFI Pro 6.0)



Il est important de noter que le calcul du coefficient « U » de la paroi avec des conductivités thermiques identiques, dans les logiciels PHPP et PEB, donnent des résultats respectifs de $0,201 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ et $0,205 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. L'écart entre les deux types de logiciel (voir ci-dessous) se justifie par la méthode de calcul considérée. Les normes de référence sont identiques, mais la méthode PEB fait usage d'une simplification.

La même paroi encodée dans le logiciel WUFI présente une valeur « U » sèche de $0,172 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Dans cet exemple, les deux matériaux isolants sont la cellulose et le panneau de fibres de bois. Examinons leurs propriétés hygrothermiques.

4.1. LA CELLULOSE

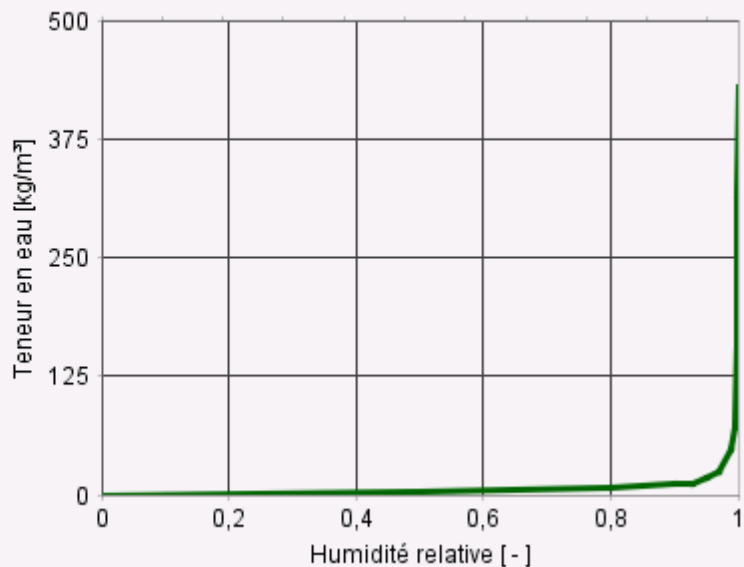
Densité [kg/m^3] : **50**

Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur [-] : **1,2**

Conductivité thermique sèche [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$] : **0,037**

Isotherme de sorption :

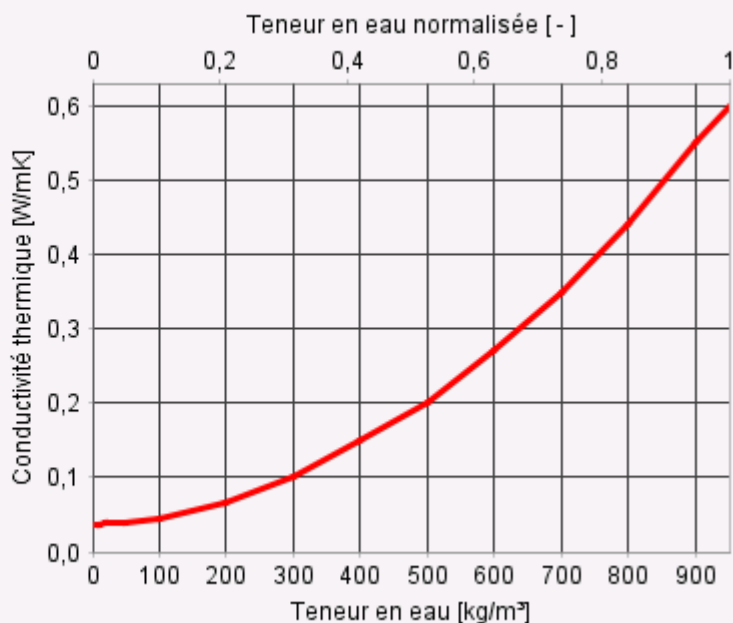
| N° | HR [-] | Teneur en ... [kg/m ³] |
|----|--------|------------------------------------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0,5 | 3,1 |
| 3 | 0,8 | 7,8 |
| 4 | 0,9 | 10,8 |
| 5 | 0,93 | 12,5 |
| 6 | 0,95 | 17,2 |
| 7 | 0,97 | 24,4 |
| 8 | 0,99 | 47,5 |
| 9 | 0,995 | 71,1 |
| 10 | 0,999 | 158 |
| 11 | 0,9995 | 207 |
| 12 | 0,9999 | 315 |
| 13 | 1 | 430 |



Dans la configuration actuelle de la paroi, la cellulose devrait être relativement peu sollicitée par des humidités relatives élevées, de par la présence des panneaux extérieurs en fibres de bois. Retenons tout de même qu'à 90% d'humidité relative, la teneur en eau au sein du matériau sera de 10,8 kg/m³.

Évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau :

| N° | Teneur en ... [kg/m ³] | Cond. therm. [W/mK] |
|----|------------------------------------|---------------------|
| 1 | 0 | 0,037 |
| 2 | 10 | 0,037 |
| 3 | 20 | 0,038 |
| 4 | 50 | 0,04 |
| 5 | 100 | 0,045 |
| 6 | 200 | 0,065 |
| 7 | 300 | 0,1 |
| 8 | 400 | 0,15 |
| 9 | 500 | 0,2 |
| 10 | 600 | 0,27 |
| 11 | 700 | 0,35 |
| 12 | 800 | 0,44 |
| 13 | 900 | 0,55 |
| 14 | 950 | 0,6 |



Comme mentionné précédemment, la cellulose ne devrait pas être fortement sollicitée en termes d'humidité. Pour une teneur en eau de 10kg/m³ (~90% d'HR, ce qui est déjà élevé), la conductivité thermique de la cellulose sélectionnée reste inchangée. Elle subira une légère augmentation (0,038 W/m.K) pour une teneur en eau de 20kg/m³, laquelle correspond à une humidité relative de +/- 96%. Un tel taux d'humidité ne devrait pas être atteint dans une paroi correctement conçue.

4.2. LE PANNEAU DE FIBRES DE BOIS

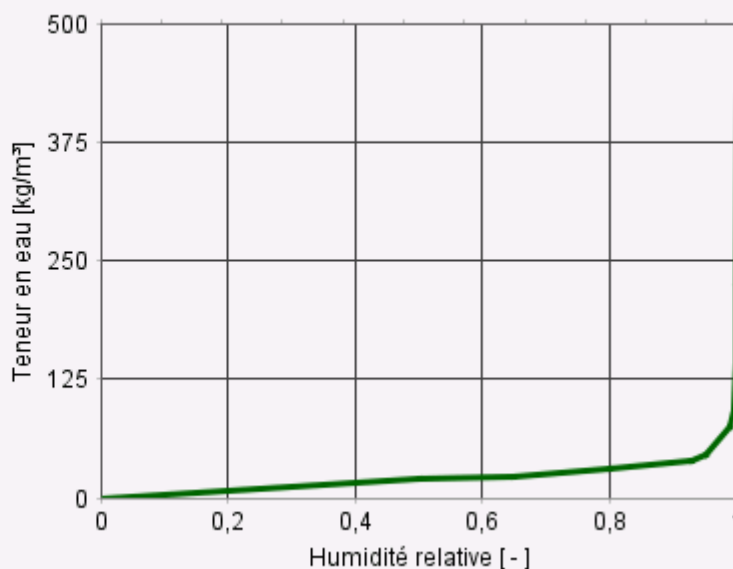
Densité [kg/m³] : **226**

Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur [-] : **3,4**

Conductivité thermique sèche [W/m.K] : **0,047**

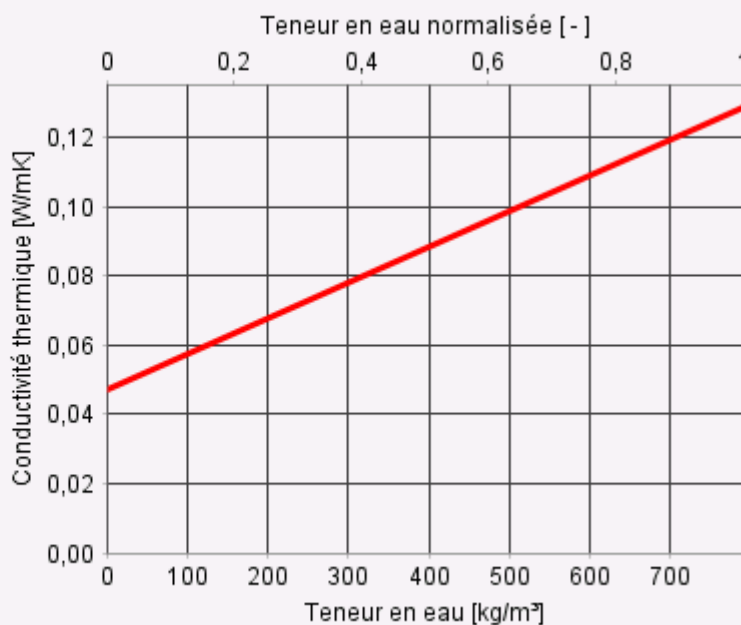
Isotherme de sorption :

| N° | HR [-] | Teneur en ... [kg/m ³] |
|----|--------|------------------------------------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0,5 | 19,1 |
| 3 | 0,65 | 22 |
| 4 | 0,8 | 30 |
| 5 | 0,93 | 39,7 |
| 6 | 0,95 | 45,6 |
| 7 | 0,99 | 75,6 |
| 8 | 0,995 | 92,5 |
| 9 | 0,999 | 141 |
| 10 | 0,9995 | 166 |
| 11 | 0,9999 | 227 |
| 12 | 1 | 427 |



Évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau :

| N° | Teneur en ... [kg/m ³] | Cond. therm. [W/mK] |
|----|------------------------------------|---------------------|
| 1 | 0 | 0,047 |
| 2 | 790 | 0,12914602 |



Située en partie extérieure de la paroi, la fibre de bois sera davantage sollicitée que la cellulose. Selon la logique du gradient de température, des températures très faibles seront enregistrées dans les parties les plus extérieures de la fibre de bois. De ce fait, de hautes humidités relatives seront observées et dépasseront très certainement les 90%. À 93%, la teneur en eau de ces panneaux sera de 39,7 kg/m³. À la différence de la cellulose, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau est ici définie sur la base de deux points, chaque valeur

intermédiaire étant interpolée. Le manque de précision que procure cette méthode est discutable, mais selon le Fraunhofer, les valeurs considérées sont des « *valeurs standards spécifiques au matériau* »¹. Sur la base de la droite générée, on peut déduire qu'à +/- 40kg/m³, la conductivité thermique à considérer sera de 0,051 W/(m.K).

4.3. LA SIMULATION HYGROTHERMIQUE

Penchons-nous à présent sur les résultats de la simulation hygrothermique. Celle-ci prend place sur 3 ans et exploite les données climatiques de la station d'Uccle, Bruxelles en Belgique. Les conditions d'humidité de départ sont très standards et fixées à 80% d'humidité relative dans chacun des matériaux. La paroi étudiée est orientée au nord, orientation disposant le moins de l'action du soleil et étant généralement celle où la proportion de parois opaques (par rapport aux surfaces vitrées) est la plus importante.

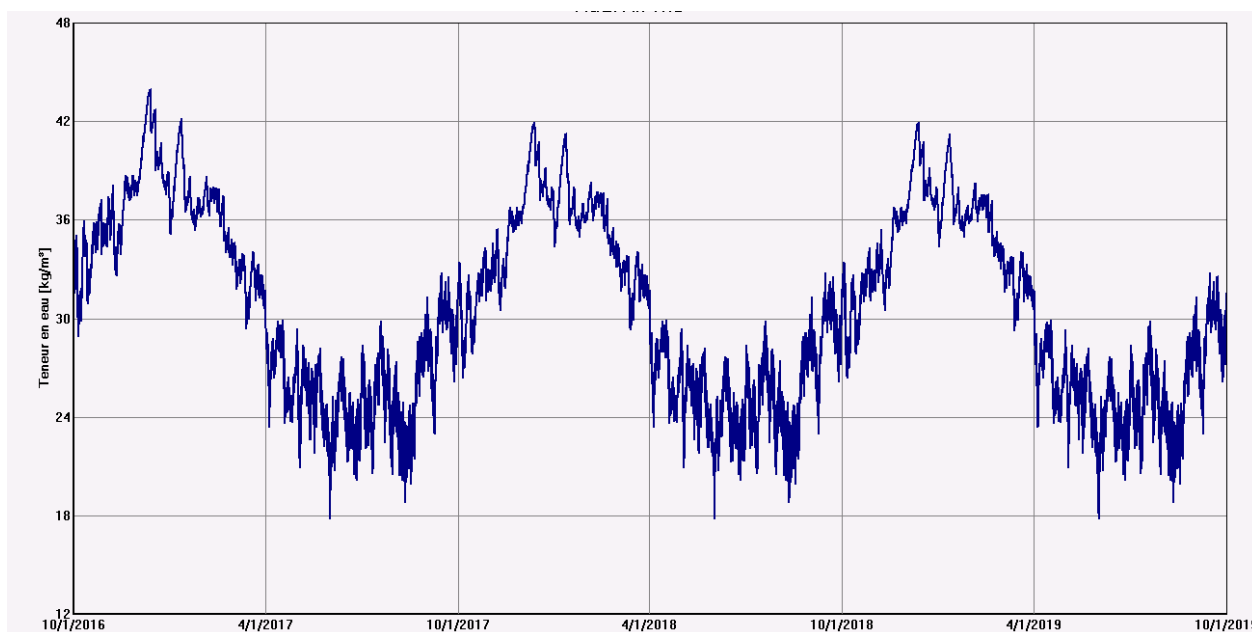


Figure 4 : Évolution de la teneur en eau (kg/m³) au sein des panneaux extérieurs en fibres de bois



Figure 5 : Évolution de la teneur en eau (kg/m³) au sein des 5 premiers centimètres de cellulose (depuis l'extérieur)

¹ Complément d'information à la base de données du logiciel WUFI Pro 6

Les Figure 4 et Figure 5 nous permettent de constater que les teneurs en eau considérées dans les points 4.1 et 4.2 ci-dessus ne sont pas si éloignées que ça des résultats de la simulation. La cellulose présente des pics de teneur en eau de l'ordre de $7,5 \text{ kg/m}^3$ en hiver. Cette valeur est légèrement inférieure aux 10 kg/m^3 considérés, mais sachant que la conductivité thermique de ce matériau n'évolue pas dans cette tranche d'humidité, il n'y a pas lieu de se repositionner. Le panneau de fibres de bois quant à lui présente des pics de l'ordre de 42 kg/m^3 en hiver, soit relativement proches des 40 kg/m^3 estimés précédemment.

Les Figure 6 et Figure 7 renforcent l'analyse en affichant des pics d'humidité relative à $\sim 90\%$ au milieu du panneau de fibres de bois et à $\sim 86\%$ à l'extérieur de la cellulose.

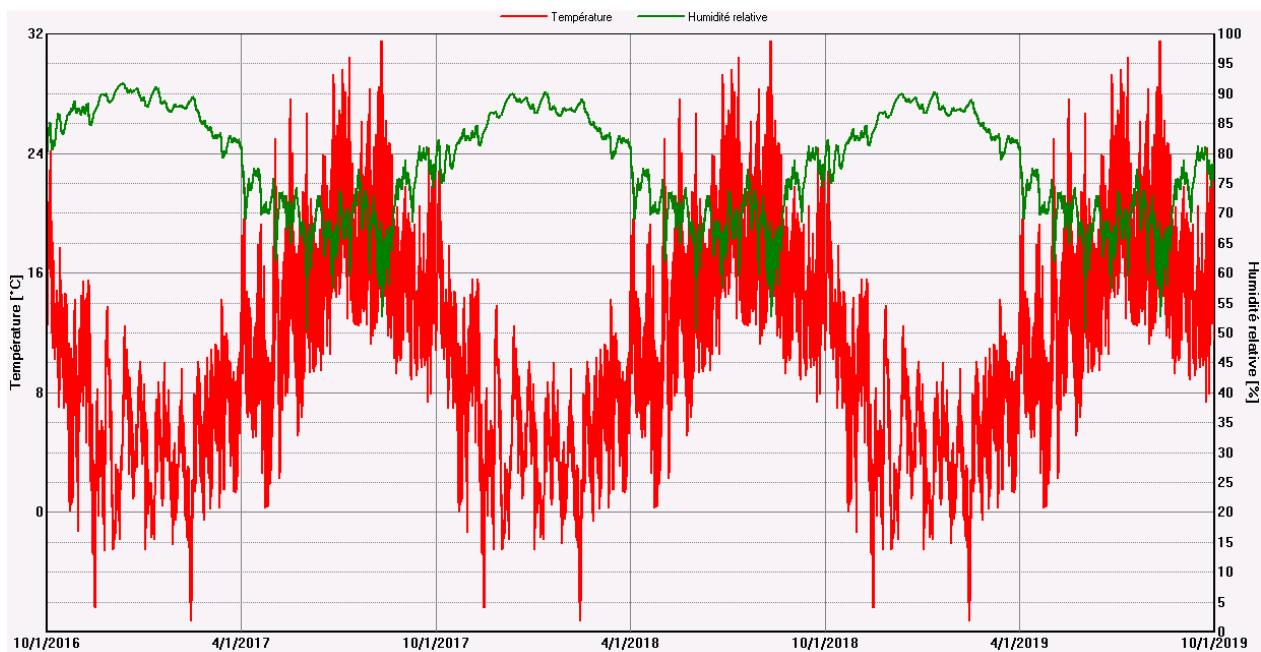


Figure 6 : Évolution de la température et de l'humidité relative au milieu du panneau extérieur en fibres de bois

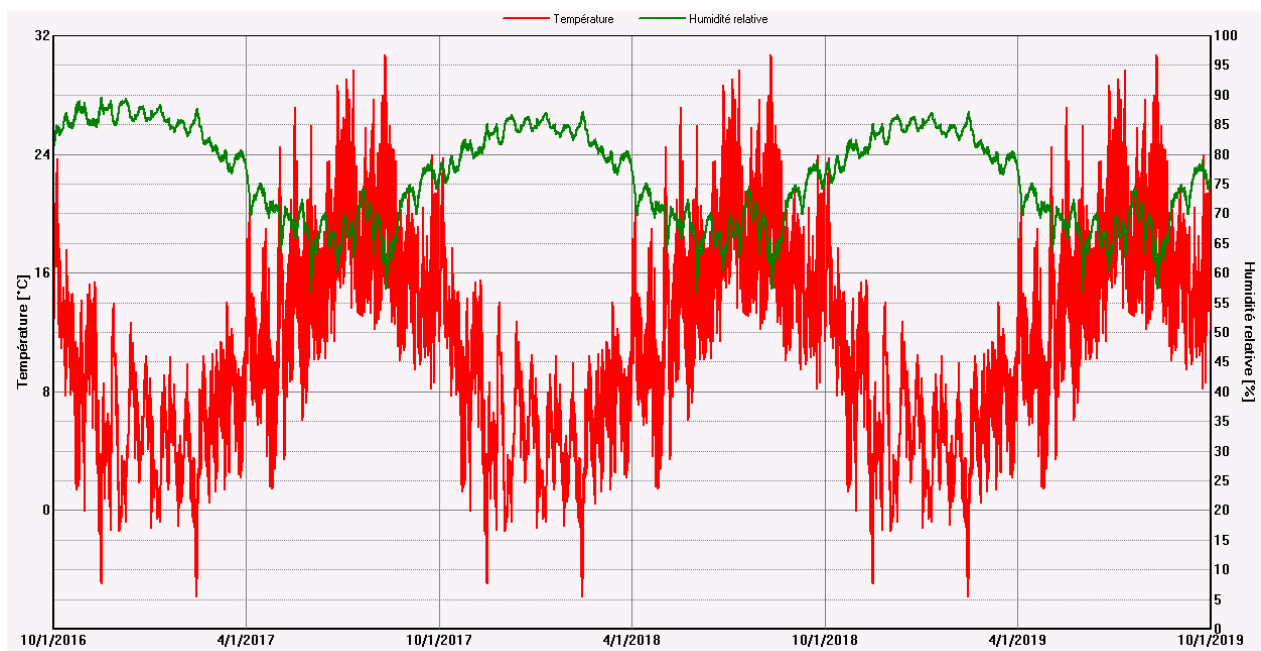


Figure 7 : Évolution de la température et de l'humidité relative à l'interface entre le panneau de fibres de bois et la cellulose

Les résultats présentés ci-dessus ont donc tendance à confirmer que la conductivité thermique des matériaux isolants étudiés est susceptible de varier selon leurs performances hygrothermiques et leur position dans la paroi (=

sollicitation différente en termes d'humidité relative et de température). Mais quel est réellement l'impact de ces variations sur un bilan thermique ?

Le logiciel WUFI Pro 6 intègre un module permettant d'analyser les comportements thermiques de la paroi. Parmi les fonctions disponibles, l'une d'entre elles exploite les résultats de la simulation dans un calcul inverse permettant de déterminer une valeur « U » mensuelle équivalente. Nous connaissons tous la méthode « traditionnelle » permettant de calculer une valeur « U » (l'inverse de la somme des résistances thermiques de la paroi). Celle-ci permettra, par la suite, de déterminer le flux de chaleur passant à travers 1m² de paroi en considérant une différence de température, de part et d'autre de celle-ci. Ce module complémentaire exploite une logique inverse en déterminant une valeur « U » mensuelle sur base de la formule suivante :

$$U = \frac{(-Q)}{\Delta T_a}$$

Dans laquelle :

Q [W/m²] : est la valeur moyenne mensuelle du flux de chaleur passant à travers la paroi intérieure (considérée, par défaut, d'une surface égale à 1 m²)

ΔT_a [K] : est la valeur moyenne mensuelle de la différence entre la température de l'air intérieur et celle de l'air extérieur.

La particularité de cette méthode est que le flux thermique mensuel moyen [Q] calculé par le logiciel tient compte de l'ensemble des conditions hygrothermiques propres à ce type d'étude, à savoir :

- la variabilité des propriétés des matériaux en fonction de l'évolution de leur teneur en eau (en particulier, l'effet de l'évolution de la teneur en eau sur la conductivité thermique) ;
- les processus de transfert de chaleur additionnel (tels que le transfert de chaleur latente due aux flux de vapeur d'eau) ;
- les sources de chaleur additionnelles (telles que le rayonnement solaire) ;
- les paramètres dépendant des conditions liées à l'environnement de la simulation (pluie, vitesse du vent et paramètres influencés par celle-ci, comme les résistances thermiques d'échange superficiel).

Par la logique inverse, les valeurs « U » calculées sont donc des valeurs fluctuantes dans le temps et fonction de l'hygrothermie ambiante (des valeurs U « dynamiques » et « hygrothermiques ») Afin de s'y retrouver par la suite, nous noterons ces valeurs U « U_{hygro} ».

Observons à présent la variation de ces valeurs « U_{hygro} » pour différentes compositions et variations de parois.

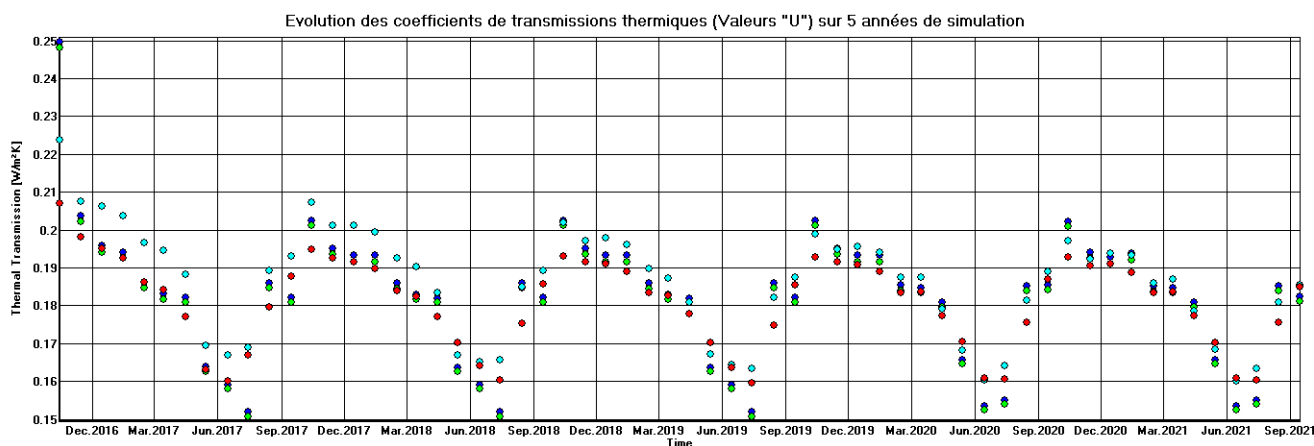


Figure 8 : Évolution des coefficients de transmissions thermiques sur 5 années de simulation et pour 4 cas différents, chacun étant orienté Nord.

Sur la Figure 8 ci-dessus :

- **Cas 1, Les points bleus** représentent les valeurs mensuelles de la simulation n°1 : la paroi telle que décrite au début du point 4 ci-dessus.
- **Cas 2, Les points verts** représentent les valeurs mensuelles de la simulation n°2 : la paroi est toujours identique à celle du cas précédent, si ce n'est que la conductivité thermique est considérée constante. Elle ne varie donc pas en fonction de la teneur en eau du matériau.
- **Cas 3, Les points turquoise** représentent les valeurs mensuelles de la simulation n°3. Dans cette simulation, le panneau en fibres de bois extérieur est remplacé par un panneau de polystyrène extrudé. La paroi est jugée « mal conçue », celle-ci étant davantage fermée à la diffusion de vapeur du côté extérieur. L'humidité présente en début de simulation (= à la construction) met beaucoup plus de temps à quitter la paroi. Une teneur en eau élevée dans les 5 premiers centimètres de la cellulose (depuis l'extérieur) est donc observable les premières années (35% en masse la 2^{ème} année) et tend à diminuer au fur et à mesure de la simulation (20% en masse après 5 ans).
- **Cas 4, Les points rouges** représentent les valeurs mensuelles de la simulation n°4. Dans cette simulation, la paroi est composée de manière à ne présenter aucun comportement hygroscopique ; panneau de polystyrène extrudé et laine minérale sont utilisés. Un freine-vapeur ($S_d = 50m$) est mis en œuvre côté intérieur afin de prévenir une migration de vapeur qui ne pourrait être gérée correctement par la paroi.

Tableau 3 : Synthèse des valeurs " U_{hygro} " (en $W/m^2.K$) calculées pour chacun des cas au cours de la première et dernière année de simulation

| | ANNEE 1 | | | ANNEE 5 | | |
|-----------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | CAS 1 | CAS 3 | CAS 4 | CAS 1 | CAS 3 | CAS 4 |
| JANVIER | 0,194 | 0,204 | 0,192 | 0,194 | 0,193 | 0,189 |
| FÉVRIER | 0,186 | 0,197 | 0,186 | 0,185 | 0,186 | 0,183 |
| MARS | 0,183 | 0,195 | 0,184 | 0,185 | 0,187 | 0,184 |
| AVRIL | 0,182 | 0,188 | 0,177 | 0,181 | 0,179 | 0,177 |
| MAI | 0,164 | 0,170 | 0,163 | 0,166 | 0,169 | 0,170 |
| JUIN | 0,159 | 0,167 | 0,160 | 0,154 | 0,160 | 0,161 |
| JUILLET | 0,152 | 0,169 | 0,167 | 0,155 | 0,163 | 0,160 |
| AOÛT | 0,186 | 0,189 | 0,180 | 0,185 | 0,181 | 0,175 |
| SEPTEMBRE | 0,182 | 0,193 | 0,188 | 0,185 | 0,185 | 0,187 |
| OCTOBRE | 0,203 | 0,207 | 0,195 | 0,202 | 0,197 | 0,193 |
| NOVEMBRE | 0,204 | 0,208 | 0,198 | 0,194 | 0,192 | 0,190 |
| DÉCEMBRE | 0,196 | 0,206 | 0,195 | 0,193 | 0,194 | 0,191 |
| MIN | 0,152 | 0,167 | 0,160 | 0,154 | 0,160 | 0,160 |
| MAX | 0,204 | 0,208 | 0,198 | 0,202 | 0,197 | 0,193 |
| MOYENNE | 0,183 | 0,191 | 0,182 | 0,181 | 0,182 | 0,180 |

Ces valeurs « U_{hygro} », déjà particulières en soi, ne permettent pas toujours de réellement se rendre compte de ce qu'elles impliquent du point de vue des déperditions thermiques d'un bâtiment. Sur la base d'une série

d'hypothèses décrites ci-dessous, des flux thermiques moyens annuels sont calculés pour chaque cas et présentés dans la Figure 9.

- températures moyennes mensuelles extérieures issues des données IRM à Uccle ;
- températures moyennes mensuelles intérieures évoluant en fonction de la température extérieure (min 20°C ; max 24°C) ;
- surface opaque de 1m² orientée Nord (paroi étudiée dans WUFI jusqu'à présent) ;
- flux thermique calculé au moyen de la formule simplifiée suivante : $Q = U \times A \times \Delta T^\circ$.
- observation sur la première année (humidité de construction) et dernière année (équilibre) de simulation

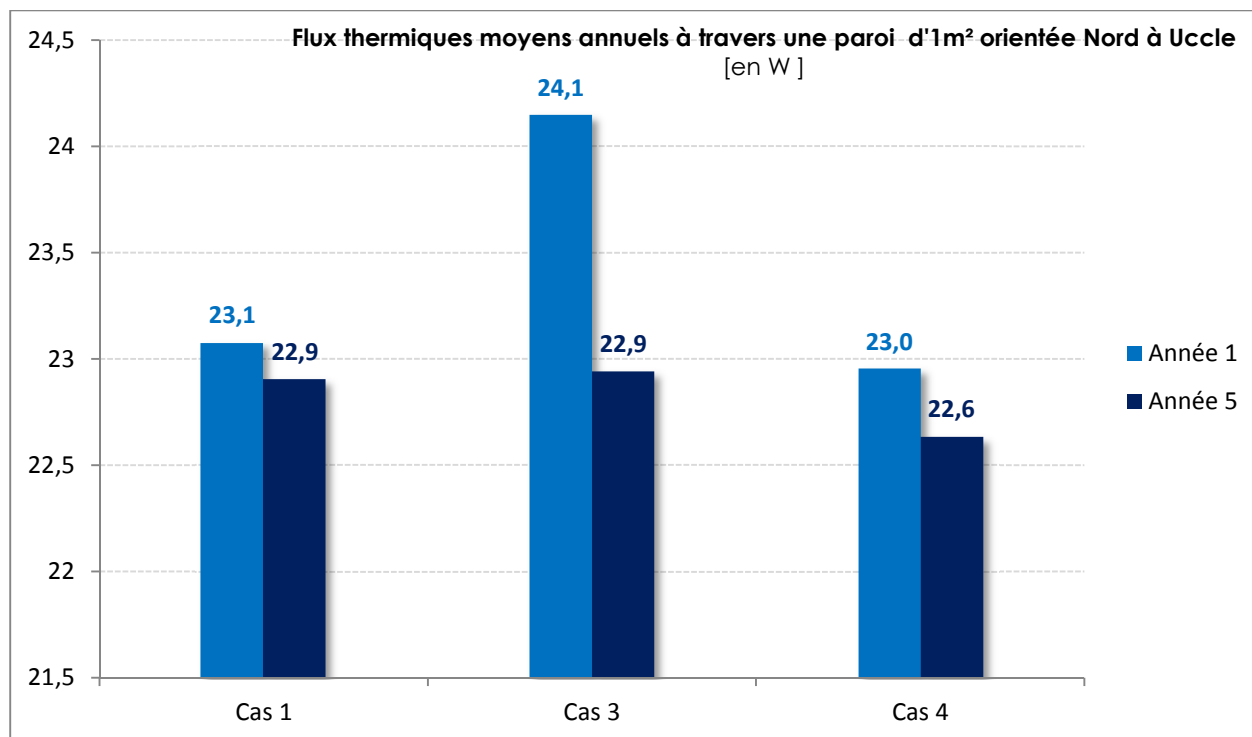


Figure 9 : Comparaison des flux thermiques à travers une paroi orientée Nord pour 3 cas de simulation

Le **cas 1** et le **cas 4** qui, pour rappel, sont respectivement les parois que nous qualifierons d'hygroscopique et de non-hygroscopique, présentent des résultats très similaires.

La première année, les deux parois présentent des valeurs « U_{hygro} » très proches avec quelques écarts au niveau des extrêmes (hiver/été) (voir Tableau 3). En hiver, la paroi « hygroscopique » voit sa teneur en eau augmenter, principalement au sein des matériaux isolants. Les phénomènes hygroscopiques en jeu (variation de la conductivité thermique, diffusion de vapeur et accumulation au sein du matériau, ...) contribuent à la légère augmentation de la valeur « U_{hygro} ». On observe ainsi pour le mois de janvier une valeur « U_{hygro} » de 0,194 W/(m².K) pour le **cas 1** et 0,192 W/(m².K) pour le **cas 4**.

En été, les différences se marquent un peu plus. La possibilité que possède la paroi du **cas 1** de « respirer » lui permet de se décharger plus rapidement de l'humidité de construction présente et de restituer celle-ci aux ambiances intérieures et/ou extérieures. Sa valeur « U_{hygro} » chute alors à 0,152 W/(m².K) au mois de juillet. Lors de ce même mois, la valeur « U_{hygro} » de la paroi étudiée dans le **cas 4** est de 0,167 W/(m².K).

Lors de la **dernière année** simulée, les parois ont trouvé leur équilibre hygrothermique respectif. Il est intéressant d'observer qu'au cours des 5 années simulées, la paroi du **cas 4** présente des amplitudes été-hiver moins importantes au niveau de sa valeur « U_{hygro} ». Ce phénomène peut s'expliquer par l'absence de comportement hygroscopique du complexe.

Il est encore possible d'observer certaines différences entre les parois du **cas 1** et du **cas 4**. Notamment au mois d'avril où les valeurs sont respectivement de $0,181 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ contre $0,177 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. La majorité du temps, la paroi étudiée dans le **cas 1** présente des valeurs « U_{hygro} » supérieures à celles du **cas 4** de $0,005 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ en moyenne avec un maximum de $0,010 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Seuls les mois de mai, juin et juillet présentent une tendance inverse où la paroi du **cas 1** présente des valeurs « U_{hygro} » inférieures à celles du **cas 4** de $0,005 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Le **cas 3** a été simulé afin de visualiser l'impact sur ces mêmes valeurs « U_{hygro} » d'une teneur en eau élevée au sein du matériau isolant principal. Pour rappel, les teneurs en eau au sein des 5 centimètres extérieurs de la cellulose atteignent plus de 40% la première année ($20 \text{ kg}/\text{m}^3$), 35% la seconde ($17,5 \text{ kg}/\text{m}^3$) et 20% la 5^{ème} ($10 \text{ kg}/\text{m}^3$). Pour rappel, ces pics résultent d'une mauvaise conception de paroi et d'une humidité relative de construction de 80%. Il n'est pas encore question, à ce stade, d'une mauvaise mise en œuvre, laquelle entraînerait des teneurs en eau élevées en raison d'infiltration d'eau. Pour des matériaux comme la cellulose, il est généralement recommandé de ne pas excéder 20 à 25% de teneur en eau en masse. Pour ce cas particulier, les valeurs « U_{hygro} » s'avèrent légèrement plus élevées la première année mais reviennent rapidement à des grandeurs comparables au **cas 1** et au **cas 4** au fur et à mesure des années. Ce comportement peut s'expliquer en partie par la (très) légère variation de la conductivité thermique pour des teneurs en eau de l'ordre de $20 \text{ kg}/\text{m}^3$ (voir point 4.1). Si cette augmentation de conductivité thermique est loin d'être alarmante, d'autres phénomènes non simulés dans le cas présent doivent cependant être considérés, comme le tassement du matériau (pour des teneurs en eau très élevée) ou l'évolution d'autres propriétés hygrothermiques (ex : le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur en fonction de l'humidité relative).

La Figure 9 ci-dessus permet de visualiser l'impact des variations de ces valeurs « U_{hygro} » sur une année complète, pour une paroi d' 1 m^2 orientée plein Nord. Le calcul réalisé est une simple réflexion sur les flux thermiques annuels moyens d'une paroi au comportement dynamique, et ce sur la base d'hypothèses détaillées précédemment. On peut de cette manière observer la quasi-équivalence des performances des parois étudiées dans le **cas 1** et le **cas 4** tant en début qu'en fin de simulation.

Résultat autrement plus fiable, *WUFI Pro* calcule également le flux de chaleur traversant la paroi durant la simulation. En se concentrant sur la dernière année de simulation, laquelle présente un complexe à l'équilibre, on obtient ainsi une déperdition thermique de $18,17 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{paroi}} \cdot \text{an})$ pour le **cas 1** et $17,83 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{paroi}} \cdot \text{an})$ pour le **cas 4**, toujours pour une paroi orientée plein Nord. Soit une différence en déperdition de $0,34 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{paroi}} \cdot \text{an})$ entre une paroi hygroscopique et non-hygroscopique.

Les nombreux calculs et simulations réalisés jusqu'ici tiennent principalement compte d'une orientation Nord. La Figure 10 ci-dessous pousse la réflexion sur les valeurs « U_{hygro} » du **cas 1** jusqu'à un comparatif des variations par orientation. On peut ainsi observer l'action du rayonnement solaire sur la paroi et ses performances hygrothermiques au cours d'une année civile type.

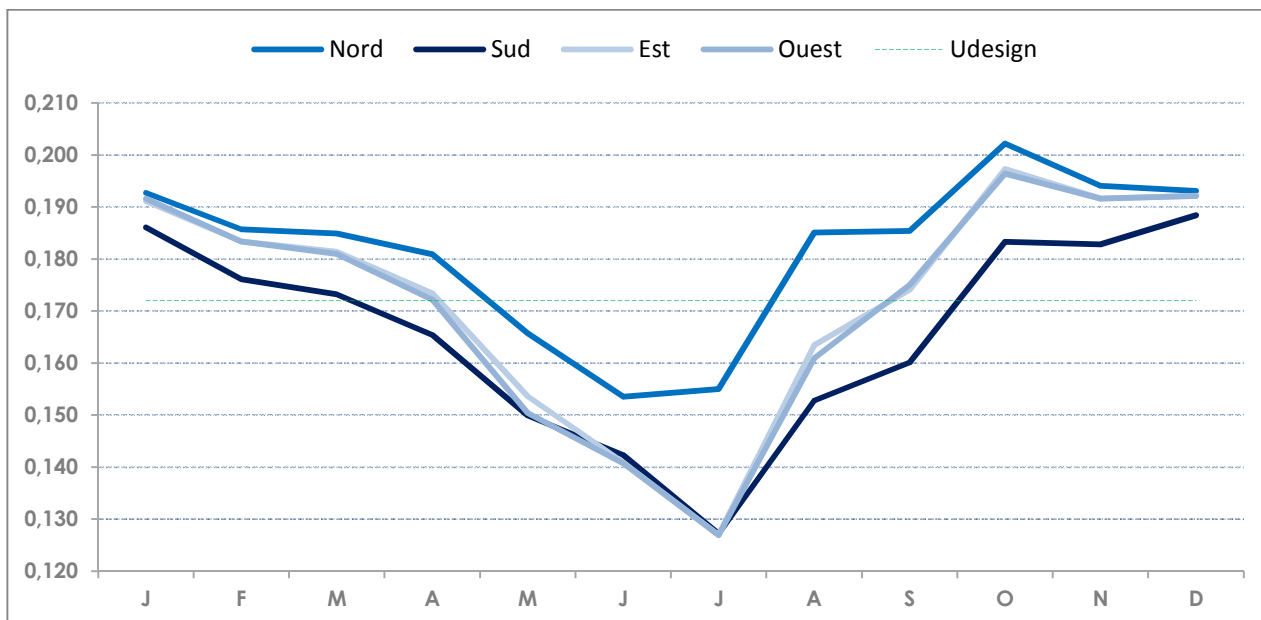


Figure 10 : Évolution de la valeur " U_{hygro} " de la paroi étudiée dans le cas 1 (cellulose et fibres de bois) durant une année civile type et selon les 4 orientations. La valeur de référence ($0,172 W/(m^2.K)$) est représentée par la droite pointillée verte)

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des extrêmes et moyennes des valeurs " U_{hygro} " par orientation pour la paroi hygroscopique du cas 1.

| ORIENTATION | U_{DESIGN} [$W/(M^2.K)$] | MOYENNE [$W/(M^2.K)$] | MIN [$W/(M^2.K)$] | MAX [$W/(M^2.K)$] |
|-------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| NORD | 0,172 | 0,182 | 0,154 | 0,202 |
| SUD | | 0,166 | 0,127 | 0,188 |
| EST | | 0,172 | 0,127 | 0,197 |
| OUEST | | 0,172 | 0,127 | 0,196 |

À titre de comparaison, ces mêmes données sont présentées pour les 4 orientations de la paroi « non hygroscopique » à travers la Figure 11 et le Tableau 5 ci-dessous.

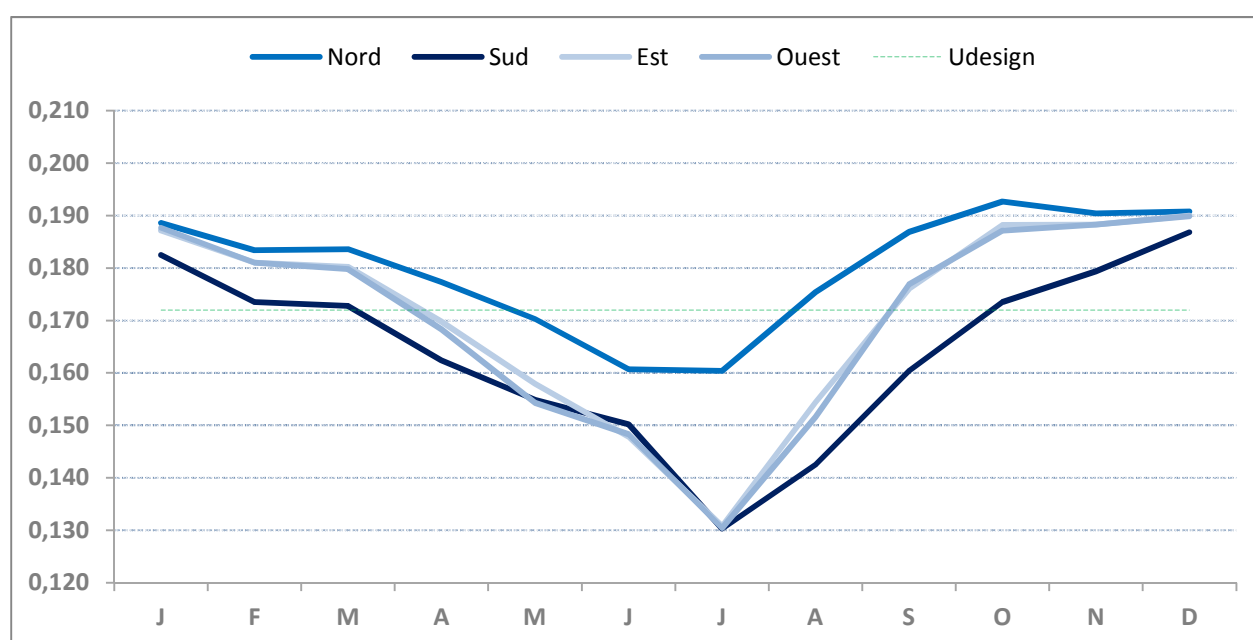


Figure 11 : Évolution de la valeur " U_{hygro} " de la paroi étudiée dans le cas 4 (XPS et laine minérale) durant une année civile type et selon les 4 orientations. La valeur de référence (0,172 W/(m².K)) est représentée par la droite pointillée verte

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des extrêmes et moyennes des valeurs " U_{hygro} " par orientation pour la paroi non hygroskopique du cas 4.

| ORIENTATION | UDESIGN [W/M ² .K] | MOYENNE [W/M ² .K] | MIN [W/M ² .K] | MAX [W/M ² .K] |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| NORD | 0,172 | 0,180 | 0,160 | 0,193 |
| SUD | | 0,164 | 0,130 | 0,187 |
| EST | | 0,171 | 0,131 | 0,190 |
| QUEST | | 0,170 | 0,130 | 0,190 |

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 3 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.

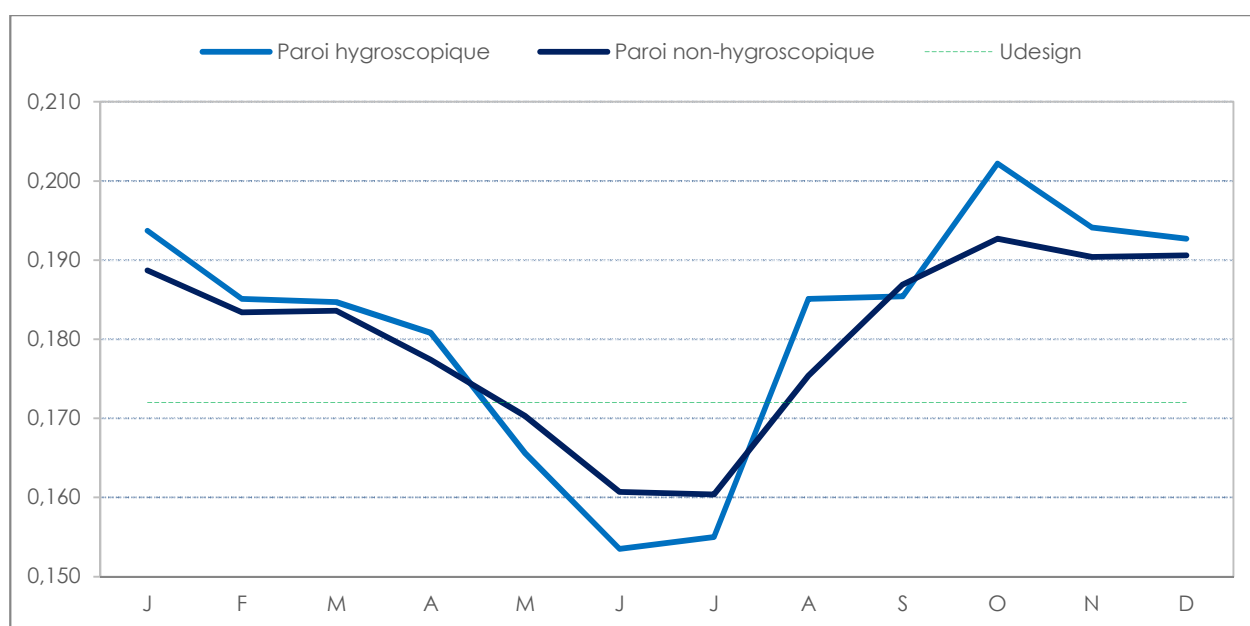


Figure 12 : Évolution des valeurs " U_{hygro} " de parois hygroscopiques et non hygroscopiques sur la 5ème année de simulation pour une orientation Nord.

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 Figure 10 et Figure 11 présentent l'évolution des valeurs « U_{hygro} » des parois étudiées par rapport à une valeur « U_{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_{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_{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°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_{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_{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_{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_{hygro} » au fil des saisons en lieu et place d'une valeur « U_{design} » constante sur toute l'année ? Ne pourrait-on pas intégrer ces valeurs « U_{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...