



Thermique d'été bois phase 2 : « Evolution des méthodes »

## Tâche 2.1 : Inertie hygroscopique globale

Intégration d'un modèle d'inertie hygroscopique dans la méthode TH-BCE et impact sur la thermique d'été des bâtiments bois

COSNIER Matthieu

Juillet 2017



Thermique d'été Bois phase 2 :  
« Evolution des méthodes »

## Tâche 2.1 : Inertie hygroscopique globale

Intégration d'un modèle d'inertie  
hygroscopique dans la méthode TH-BCE  
et impact sur la thermique d'été des  
bâtiments bois

Rapport final

COSNIER Matthieu

Université Paris-Est, Centre scientifique et technique du bâtiment, DEE / CBP, GRENOBLE

DEE-CBP 2017.042RR

Juillet 2017

© 2017 CSTB



Ce texte est distribué sous les termes de la licence **Creative Commons Attribution 3.0 France (CC BY 3.0 FR)**

Le texte complet de la licence est disponible à l'adresse suivante : <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/fr/legalcode>

Résumé des droits et conditions de la licence :

⇒ **Vous êtes libre de :**

- partager (reproduire, distribuer et communiquer) l'œuvre ;
- remixer, adapter l'œuvre ;
- d'utiliser cette œuvre à des fins commerciales.

⇒ **Selon les conditions suivantes :**

**Attribution (paternité, crédit) :** vous devez attribuer l'œuvre de la manière indiquée son auteur ou le titulaire des droits (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous approuvent, vous ou votre utilisation de l'œuvre).

Toute citation d'extraits, reproduction ou utilisation doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : COSNIER M. Intégration d'un modèle d'inertie hygroscopique dans la méthode TH-BCE et impact sur la thermique d'été des bâtiments bois. Projet Thermique d'été bois phase 2, tâche 2.1 : Inertie hygroscopique globale, Juillet 2017

⇒ **Comprenant bien que**

Les droits suivants ne sont en aucune manière affectés par la licence :

- Vos prérogatives issues des exceptions et limitations aux droits exclusifs ou *fair use* ;
- Les droits moraux de l'auteur que rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint.

À chaque réutilisation ou distribution de cette œuvre, vous devez faire apparaître clairement au public la licence selon laquelle elle est mise à disposition. La meilleure manière de l'indiquer est un lien vers cette page web : <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/fr/>

## Résumé

L'adsorption / désorption d'humidité dans les parois ou le mobilier d'un bâtiment génère une inertie dite « hygroscopique » susceptible d'impacter son bilan massique et thermique. L'objectif de cette étude a été d'intégrer un modèle d'inertie hygroscopique dans la méthode TH-BCE et d'étudier son impact sur la thermique d'été des bâtiments bois. Le modèle développé est basé sur la théorie de la profondeur effective de pénétration à deux constantes de temps (journalière et annuelle), il consiste à quantifier le flux de vapeur absorbé/ désorbé à la surface des éléments poreux intérieurs du bâtiment à chaque pas de temps de simulation. Ce modèle a été paramétré puis comparé à l'échelle de la paroi avec les résultats d'un outil de simulation hygrothermique reconnu, WUFI. Une étude de sensibilité à l'échelle de la maison individuelle a ensuite été menée à partir de l'outil COMETH. L'impact de la météo, le type de paroi, sa surface mise en jeu, la prise en compte des ossatures ou la présence d'un revêtement de surface sur les indicateurs de confort d'été ont été quantifiés. Les résultats attestent d'une baisse possible de la température intérieure conventionnelle (Tic) pouvant atteindre jusqu'à 1 degré, le type de parement des parois étant le principal responsable de cette réduction.

**Mots clés** : Inertie hygroscopique, confort d'été, bilan thermique, bilan massique, modèle simplifié, bâtiment

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>8</b>
<b>1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET DESCRIPTION DU MODÈLE</b> .....	<b>9</b>
1.1 CONTEXTE.....	9
1.2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....	10
1.3 DESCRIPTION DU MODÈLE RETENU .....	11
1.3.1 CAS GÉNÉRAL.....	11
1.3.2 CAS DES ÉLÉMENTS POREUX HÉTÉROGÈNES.....	13
1.4 CONCLUSIONS .....	15
<b>2. VALIDATION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ À L'ÉCHELLE DE L'ÉLÉMENT POREUX</b> .....	<b>17</b>
2.1 SOLlicitATIONS PÉRIODIQUES EN HUMIDITÉ RELATIVE.....	17
2.1.1 MILIEU HOMOGENÈ ET SEMI-INFINI .....	17
2.1.2 MILIEU HOMOGENÈ D'ÉPAISSEUR FINIE.....	19
2.1.3 MILIEU HÉTÉROGENÈ .....	21
2.1.4 PRÉSENCE D'UN REVÊTEMENT.....	24
2.2 SOLlicitATIONS NON PÉRIODIQUES .....	24
2.2.1 PAROIS INTÉRIEURES .....	25
2.2.2 PAROIS EXTÉRIEURES .....	26
2.3 CONCLUSIONS.....	29
<b>3. INTÉGRATION DU MODÈLE EMPD À LA MÉTHODE TH-BCE</b> .....	<b>30</b>
3.1 MODIFICATION DES FICHES ALGORITHMIQUES .....	30
3.2 DESCRIPTION DES ÉLÉMENTS POREUX .....	31
3.3 VALIDATION DU MODÈLE SIMPLIFIÉ POUR UNE SOLlicitATION TH-E.....	31
3.4 IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE.....	34
3.5 CONCLUSION .....	36
<b>4. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ À L'ÉCHELLE DU BATIMENT</b> .....	<b>37</b>
4.1 CHOIX DU BATIMENT DE RÉFÉRENCE .....	37
4.2 VARIABLES DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ .....	38
4.2.1 HYGROSCOPICITÉ DES PAROIS .....	38
4.2.2 OSSATURES .....	40
4.2.3 SURFACES D'ÉCHANGE .....	41
4.2.4 REVÊTEMENT DE SURFACE.....	41
4.2.5 CLIMATS.....	41
4.2.6 PLAN DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ .....	41
4.3 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ.....	43
4.3.1 MÉTHODE TH-E (TIC ET TIC <sub>REF</sub> ) .....	43
4.3.2 MÉTHODE TH-D (DIES).....	50
4.3.3 MÉTHODE TH-B (BBIO).....	54
4.4 CONCLUSION .....	57
<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>58</b>
<b>PERSPECTIVES</b> .....	<b>59</b>
<b>LISTE DES RÉFÉRENCES</b> .....	<b>61</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Propriétés hydriques et profondeurs de pénétrations d'éléments poreux homogènes pour deux plages de variations d'humidité relative : [30-50%] et [50-70%] .....	12
Tableau 2 : Propriétés hydriques et profondeurs de pénétration équivalentes d'éléments poreux hétérogènes.....	15
Tableau 3 : Profondeur de pénétration pour différentes épaisseurs d'éléments poreux .....	19
Tableau 4 : Epaisseurs minimales valides et flux de vapeur et de chaleur maximum associés.....	21
Tableau 5 : Ecart relatif des flux calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différents couple parement / isolant et une épaisseur d'isolant de 2,5cm. ....	24
Tableau 6 : Ecart relatif des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différentes configurations de cloisons intérieures .....	26
Tableau 7 : Ecart relatif des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différentes configurations de parois extérieures .....	28
Tableau 8 : Ecart relatif des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différentes configurations de parois extérieures et un exemple de climat de la méthode TH-E.....	32
Tableau 9 : Ecart relatif des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différentes configurations de parois extérieures et un exemple de climat de la méthode TH-E. Comparaison des méthodes utilisées pour définir les paramètres du modèle.....	34
Tableau 10 : Comparaison des paramètres d'entrée du modèle en fonction de la méthode utilisée pour les définir. A) méthode simplifiée, B) méthode détaillée (identification).....	35
Tableau 11 : Descriptif des configurations de bâtiments retenues .....	37
Tableau 12 : Compositions des parois verticales au regard du modèle EMPD, pour différents niveaux d'hygroscopicité.....	39
Tableau 13 : Compositions des parois horizontales au regard du modèle EMPD, pour différents niveaux d'hygroscopicité.....	40
Tableau 14 : Propriétés hygroscopiques des matériaux composants les différentes parois pour deux plages de variation en humidité relative .....	40
Tableau 15 : Compositions des parois au droit des ossatures au regard du modèle EMPD, pour différents niveaux d'hygroscopicité .....	40
Tableau 16 : Surfaces d'échanges mises en jeu pour chaque configuration de bâtiments .....	41
Tableau 17 : Plan de l'étude de sensibilité pour le climat de Nice .....	42
Tableau 18 : Paramètres des simulations de référence (sans prise en compte des échanges de vapeur) .....	43
Tableau 19 : Ecart globaux entre le modèle EMPD et WUFI en fonction de la méthode de choix des paramètres pour différentes simulation (n°3 et n°27) et les 4 configurations de maisons .....	48

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue schématique du modèle EMPD .....	11
Figure 2 : Sollicitations périodiques retenues a) période journalière, b) période annuelle .....	17
Figure 3 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différents matériaux d'épaisseur infinie. a) sollicitation journalière, b) sollicitation annuelle .....	18
Figure 4 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différents matériaux d'épaisseur finie (15 ou 7.5 cm). a) sollicitation journalière, b) sollicitation annuelle.....	20
Figure 5 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI en fonction de l'épaisseur pour différents matériaux. ....	20
Figure 6 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différents couples parement / isolants. a) sollicitation journalière, b) sollicitation annuelle .....	22
Figure 7 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI en fonction de l'épaisseur d'isolant pour différents couples parement / isolant.....	23
Figure 8 : Sollicitation non périodique retenue. Climat de Nancy, W/n de 5 g/m3.....	25
Figure 9 : Comparaison des flux échangés calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur une semaine d'été pour différents couples parement / isolants et une sollicitation non périodique .....	25
Figure 10 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur une année pour différents couples parement / isolants et une sollicitation non périodique.....	26
Figure 11 : Configurations de parois extérieures .....	27

Figure 12 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur une semaine d'été pour différents configurations de parois extérieures et une sollicitation non périodique.....	27
Figure 13 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur une année pour différentes configurations de parois extérieures et une sollicitation non périodique .....	29
Figure 14 : Paramètres à renseigner dans COMETH pour chaque élément poreux distinctif .....	31
Figure 15 : Exemple de variation d'humidité relative été de température intérieure selon la méthode TH-E .....	32
Figure 16 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur la dernière journée de simulation et un climat TH-E pour deux configurations de parois extérieures.....	33
Figure 17 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur la dernière journée de simulation et un climat TH-E pour deux configurations de parois extérieures. Comparaison des méthodes utilisées pour définir les paramètres du modèle .....	35
Figure 18 : Plan du bâtiment de référence utilisé pour l'étude de sensibilité .....	37
Figure 19 : Vue en coupe des murs extérieurs .....	38
Figure 20 : Vue en coupe des parois horizontales. a) plafond b) plancher .....	39
Figure 21 : Radars des impacts sur Tic et Ticref par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour chaque simulation et chaque configuration de bâtiment.....	43
Figure 22 : Comparaison des résultats pour 3 simulations (n°2, n°3 et n°49) pour la configuration de bâtiment à inertie quotidienne légère (MI n°25). a) température et humidité relative b) température et flux de chaleur latente .....	45
Figure 23 : Comparaison des résultats pour 3 simulations (n°36, n°48 et n°50) pour deux configurations de bâtiment d'inertie quotidienne différentes (MI n°1 et MI n°25) .....	46
Figure 24 : Radars des impacts sur Tic et Ticref par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour le cas le plus favorable et chaque configuration de bâtiment en fonction de la zone climatique .	47
Figure 25 : Comparaison des impacts du choix de la plage de variation d'humidité relative intérieure pour le calcul de la capacité hydrique des matériaux sur la Tic pour chaque simulation et chaque configuration de bâtiment .....	48
Figure 26 : Impact du choix de la méthode de définition des paramètres sur quelques cas de simulations et chaque configuration de maison individuelle.....	49
Figure 27 : Variation de l'humidité relative annuelle pour les 2 climats étudiés et chaque configuration de maison individuelle .....	50
Figure 28 : Variation de température opérative intérieure et d'humidité relative pour 3 cas de simulation et le climat de Nice .....	51
Figure 29 : Radars des impacts sur la DIES par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour chaque simulation et chaque configuration de bâtiment .....	52
Figure 30 : Radars des impacts sur la DIES par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour le cas le plus favorable et chaque configuration de bâtiment en fonction de la zone climatique.....	53
Figure 31 : Radars des impacts sur Bbio par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour chaque simulation et chaque configuration de bâtiment .....	55
Figure 32 : Radars des impacts sur Bbio par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour le cas le plus favorable et chaque configuration de bâtiment en fonction de la zone climatique .....	56

## INTRODUCTION

Les calculs réglementaires se doivent de prendre en compte les différentes physiques rencontrées dans le Bâtiment de sorte d'évaluer au plus proche de la réalité son bilan énergétique. Parmi-celles-ci, un bilan en humidité dans le bâtiment est aujourd'hui réalisé permettant de quantifier les charges latentes liées à la déshumidification de l'air en présence de refroidissement. Sont ainsi pris en compte dans le bilan, les sources d'humidité par les occupants, et les transferts d'humidité via le réseau aéraulique (ventilation entre pièce adjacentes ou vers l'environnement extérieur).

Cependant d'autres phénomènes liés à la propagation d'humidité pourraient être pris en compte parmi lesquels :

- L'absorption / désorption d'humidité avec les parois intérieures ou le mobilier
- La condensation en surface des parois froides
- Les transferts à travers les parois

L'adsorption/désorption d'humidité dans les parois ou le mobilier d'un bâtiment génère une inertie dite « hygroscopique » impactant son bilan massique en modulant les variations d'humidité relative intérieure. Ces phénomènes s'accompagnent par ailleurs d'échanges de chaleur latente (endo / exothermiques) susceptibles d'impacter également le bilan thermique.

Avec l'essor de matériaux de construction hygroscopiques tels que le bois ou autres matériaux biosourcés, il convient d'être en mesure de quantifier les effets de ces échanges dans un calcul réglementaire.

L'objet de cette étude est donc de développer un modèle de tampon hygroscopique intégré dans l'environnement COMETH, cœur de calcul en convention ouverte de la réglementation thermique, pour évaluer l'impact de celui-ci sur les indicateurs règlementaires à l'échelle du Bâtiment. Le présent rapport est articulé en 4 parties.

La première synthétise la bibliographie sur le sujet et décrit le modèle choisi. La seconde détaille la validation du modèle à l'échelle de la paroi. La troisième présente l'intégration du modèle de paroi hygroscopique à l'environnement Cometh. La dernière traite des impacts sur les indicateurs règlementaires à l'échelle du Bâtiment.

## 1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET DESCRIPTION DU MODÈLE

### 1.1 CONTEXTE

L'intégration d'un modèle de tampon hygroscopique dans le bilan massique d'une ambiance intérieure consiste à soustraire (respectivement ajouter) à celui-ci un flux de vapeur d'eau échangé entre l'ambiance intérieure et chaque surface d'élément poreux absorbant (respectivement désorbant). Ce flux peut être calculé de la manière suivante :

$$G_{buffer} = \sum_k \beta_k A_k (p_{vi,k} - p_{vs,k}) \quad (1)$$

Avec  $\beta_k$  (s.m-1) un coefficient d'échange convectif surfacique de vapeur,  $A_k$  (m<sup>2</sup>) la surface d'échange,  $p_{vi,k}$  (Pa) la pression de vapeur de l'ambiance intérieure et  $p_{vs,k}$  (Pa) la pression de vapeur à la surface de l'élément poreux  $k$ .

Le flux de chaleur latente associé à ce flux de vapeur peut être calculé par :

$$Q_{buffer} = L_{vap} G_{buffer} \quad (2)$$

Avec  $L_{vap}$  la chaleur latente de vaporisation (J.kg-1.K-1), car l'hypothèse est couramment faite que celle-ci équivaut à la chaleur latente de sorption.

Le calcul de ces flux nécessite donc de connaître la pression de vapeur en surface de l'élément poreux. Pour cela, il convient de résoudre le bilan massique de chaque élément poreux [1] :

$$\frac{\partial w_k}{\partial t} = -\nabla(g_{vap,k} + g_{liq,k}) \quad (3)$$

Avec  $w_k$  la teneur en eau de l'élément poreux (kg/m<sup>3</sup>),  $g_{vap,k}$  et  $g_{liq,k}$  les flux d'humidité transportés dans l'élément par l'intermédiaire des deux phases en présence, respectivement la phase vapeur et la phase liquide (kg/s.m<sup>2</sup>).

Une première hypothèse du modèle consiste à ne considérer que les transports en phase vapeur dans les éléments poreux, hypothèse valable pour des humidités relatives inférieures à 98%. Il est ici considéré que les matériaux qui contribuent de manière sensible à l'inertie hygroscopique se situent dans les premiers centimètres du côté de l'ambiance intérieure et ne sont de ce fait pas sollicités à des niveaux d'humidité relative extrême dans des applications Bâtiment [2]. L'équation (3) se réduit alors à l'expression suivante (cas monodimensionnel) :

$$\frac{\partial w_k}{\partial t} = \frac{\partial w_k}{\partial \Phi_k} \cdot \frac{\partial \Phi_k}{\partial t} = \xi_k(\Phi_k) \frac{\partial (p_{v,k}/p_{vsat,k})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_k(\Phi_k) \frac{\partial p_{v,k}}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Avec  $\Phi_k$ , l'humidité relative de l'élément poreux (-),  $p_{vsat,k}$  sa pression de vapeur saturante (Pa),  $\xi_k$  sa capacité hydrique, correspondant à la pente de la courbe de sorption (kg/m<sup>3</sup>) et  $\delta_k$  sa perméabilité apparente à la vapeur d'eau (s).

La condition aux limites à la surface de l'élément poreux côté intérieur s'écrit :

$$\beta_k (p_{vi,k} - p_{vs,k}) = g_{vap,s} = -\delta_k(\Phi_k) \frac{\partial p_{v,k}}{\partial x} \Big|_s \quad (5)$$

Ces équations, valables pour chaque élément poreux en présence, nécessitent pour être résolues de diviser chacun d'entre eux en nœuds de calculs élémentaires en utilisant des techniques d'éléments finis. Ces techniques numériques, si elles devaient être intégrées au cœur de calcul réglementaire seraient trop coûteuses en temps de calcul. Il a donc été choisi de se focaliser sur des modèles simplifiés.

## 1.2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Pour cela, une étude bibliographique sur les modèles simplifiés existants a été réalisée. Deux catégories majeures de modèles ont pu être identifiées : les modèles simplifiés sans bilan massique dans les éléments poreux et avec bilan massique. Dans la première, peut être distingué le modèle de Kusuda [3], adapté au mobilier, utilisé notamment dans le cadre des avis techniques des bouches d'extraction hygro-réglables qui calcule à l'échelle d'une pièce un flux échangé à partir de l'humidité relative de la pièce et de la teneur en eau du matériau. Il utilise des coefficients empiriques en fonction du type de pièce concerné (humide ou non). Dans le même ordre d'idée, Ten Wolde a proposé différents modèles permettant de calculer un flux échangé en fonction de l'humidité relative de la pièce mais en considérant l'historique de la variation d'humidité, soit par une moyenne de l'humidité aux pas de temps précédent [4], une moyenne exponentielle [5], puis deux moyennes exponentielles permettant de prendre en considération deux constantes de temps (absorption rapide et lente) [6]. Jones [7] a quant à lui développé un modèle d'admittance hydrique permettant de calculer un flux échangé à partir d'un terme d'absorption calculé à partir de la teneur en eau de l'ambiance intérieure et d'un terme de désorption calculé à partir de la teneur en eau saturante. Divers coefficients (6 au total), qui diffèrent selon la saison sont ainsi nécessaires, sans qu'aucune méthode ne soit proposée pour les définir. Enfin, dans une autre philosophie, peut être distingué le modèle de capacité effective équivalente [8]. Utilisé par le logiciel TRNSYS, il consiste à prendre en compte l'effet de tampon hygroscopique non pas par l'intermédiaire d'un flux échangé entre l'ambiance et les éléments poreux, mais via une capacité hydrique fictive de l'ambiance dans le bilan massique global. Des indications assez vagues sont fournies quant à la définition de cette capacité effective [9,10], certains auteurs proposent des relations pour les calculer à partir des propriétés des matériaux [2,11]. Ce modèle tend toutefois à surestimer l'effet de tampon hygroscopique et ne prend pas en compte les effets transitoires rapides. De manière générale, les modèles énoncés ici ne permettent pas de prendre en compte les propriétés hygroscopiques des matériaux poreux, et souffrent soit d'un manque de validation soit d'un manque d'information quant à leur sens physique ou la valeur des coefficients qu'ils utilisent.

A l'inverse, un modèle simplifié est très largement répandu dans la littérature, le modèle de profondeur effective de pénétration. Il repose sur l'idée que seule une couche superficielle de l'élément poreux, dite couche active, est réellement exposée en cas de variation cyclique de l'humidité intérieure, impliquant de fait que l'échange de vapeur de l'intérieur jusqu'à l'extérieur est négligé [12]. L'épaisseur de cette couche est égale à la profondeur de pénétration de l'onde d'humidité, elle dépend donc des propriétés hygrothermiques de l'élément poreux et de la période des sollicitations [13]. Ce modèle est couramment utilisé dans des variantes différentes. Il est d'ailleurs utilisé dans divers outils de simulation énergétique du Bâtiment (TRNSYS [2], clim2000 [14,15] ou Energyplus [16]) ou de simulation aéraulique (CONTAM [17]). Parmi les variantes possibles, ont été étudiées la prise en compte simultanée de différentes périodes de sollicitation, la présence d'un revêtement non capacitif en surface [18], l'hypothèse d'isothermie des couches actives, les conditions aux limites côté opposé [15, 19, 20] ou la définition des propriétés hygrothermiques des couches actives [11, 21, 22].

Ce type de modèle permet selon certains auteurs de reproduire de manière fiable les échanges entre une ambiance intérieure et les éléments poreux l'entourant, à conditions de rester dans le cadre des hypothèses qui régissent son emploi. C'est la raison pour laquelle ce modèle a été choisi dans le cadre de cette étude. Il est détaillé par la suite.

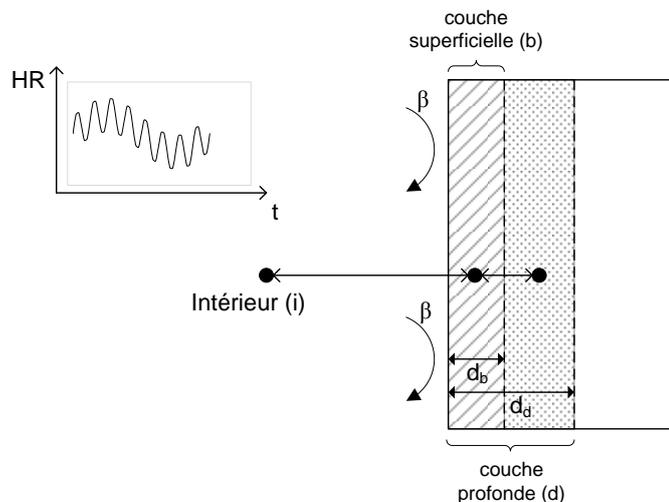
### 1.3 DESCRIPTION DU MODÈLE RETENU

#### 1.3.1 CAS GÉNÉRAL

Le modèle de profondeur effective de pénétration suppose que seule une couche active d'un matériau poreux absorbe et désorbe l'humidité avec l'ambient lorsqu'elle est exposée à une variation cyclique d'humidité. Il considère ainsi que le milieu poreux est semi-infini et que cette couche active possède une teneur en eau et une température uniforme et que son épaisseur est égale à la profondeur effective de pénétration, calculée à partir des propriétés du matériau ( $\delta$ ,  $\xi$ ) et de la période de la sollicitation ( $t_p$ ) de la manière suivante :

$$d = \sqrt{\frac{\delta p_{vsat}(T) t_p}{\xi \pi}}$$

Afin d'être en mesure d'évaluer aussi bien les réponses à des sollicitations journalières que saisonnières, un modèle à deux constantes de temps est retenu. Il consiste à considérer l'élément poreux comme deux couches actives (Figure 1) qui échangent de la vapeur d'eau entre elles: l'une dite « superficielle » répondant aux sollicitations journalières, l'autre dite « profonde » pour les sollicitations saisonnières. Chacune d'elle possède une teneur en eau uniforme, et une épaisseur égale à la profondeur effective de pénétration calculée à partir de la période de la sollicitation à laquelle chacune répond.



**Figure 1 : Vue schématique du modèle EMPD**

Dans ces conditions, les équations 4 et 5 s'écrivent selon les équations 6 et 7, relatives à chacune des couches.

$$\xi(\Phi_b) \cdot d_b \frac{d}{dt} \left( \frac{p_{vb}}{p_{vsat}(T_b)} \right) = \frac{p_{vi} - p_{vb}}{\frac{1}{\beta} + \frac{d_b}{2\delta(\Phi_b)} + \frac{Sd_{rev}}{\delta_{air}}} + \frac{p_{vd} - p_{vb}}{\frac{d_b}{2\delta(\Phi_b)} + \frac{d_d - d_b}{2\delta(\Phi_d)}} \quad (6)$$

$$\xi(\Phi_d) \cdot d_d \frac{d}{dt} \left( \frac{p_{vd}}{p_{vsat}(T_d)} \right) = \frac{p_{vb} - p_{vd}}{\frac{d_b}{2\delta(\Phi_b)} + \frac{d_d - d_b}{2\delta(\Phi_d)}} \quad (7)$$

Dans chaque équation on retrouve le terme de stockage (à gauche) et le terme de transport (à droite). Les indices (b) et (d) correspondent respectivement au nœud de la couche superficielle et de la couche profonde, situés à la moitié de l'épaisseur de la couche pour le premier, et à la moitié de la différence des deux épaisseurs pour le second. Pour la couche superficielle, le terme de transport avec l'ambiance est caractérisé par une résistance superficielle ( $1/\beta$ ) et une résistance à la diffusion de la moitié de la couche ( $d_b/2\delta$ ). Une résistance supplémentaire ( $S_{d_{rev}}/\delta_{air}$ ) permet de représenter la présence éventuelle d'un revêtement de surface non capacitif caractérisé par son coefficient  $S_{d_{rev}}$ . Le terme de transport vers la couche profonde est caractérisé par une résistance à la diffusion de la moitié de la couche superficielle et de la moitié de la différence d'épaisseur entre les deux couches ( $(d_d-d_b)/2\delta$ ). Pour la couche profonde, seul un terme de transport avec la couche superficielle apparaît.

Une hypothèse supplémentaire consiste à supposer que la capacité hydrique ( $\xi$ ) et la perméabilité à la vapeur ( $\delta$ ) de chaque couche est constante dans le temps et indépendante de l'humidité relative. Cette simplification s'avère correcte dans des applications Bâtiment, où la plage de variation de l'humidité relative intérieure correspond plus ou moins à la plage de variation où la courbe de sorption de la plupart des matériaux de construction peut être linéarisée, résultant en une capacité hydrique constante. Enfin, il est supposé que les deux couches se situent à la même température  $T_p$ .

A titre d'exemple, le **Tableau 1** présente les valeurs de profondeur effective de pénétration de chaque type de couche pour différents matériaux choisis, à une température de 20°C ( $p_{vsat}=2343$  Pa) et pour deux plages possibles de variation de l'humidité relative sur lesquelles la courbe de sorption a pu être linéarisée dans le but d'obtenir la valeur de la capacité hydrique de chacun d'entre eux. Les valeurs de capacité hydrique et du facteur de résistance à la diffusion de vapeur ( $\mu$ ) qui y figurent sont tirées de la base de données WUFI.

**Tableau 1 : Propriétés hydriques et profondeurs de pénétrations d'éléments poreux homogènes pour deux plages de variations d'humidité relative : [30-50%] et [50-70%]**

	$\xi$ [kg/m <sup>3</sup> ]		$\mu$ [-]	$d_b$ [cm]		$d_d$ [cm]	
	[30-50%]	[50-70%]		[30-70%]	[30-50%]	[50-70%]	[30-50%]
Epicéa	50	80	4.3	0.77	0.61	14.7	11.6
Plâtre	7.2	10.7	8.3	1.46	1.19	27.8	22.8
Laine de verre	0.6	0.67	1	14.53	13.75	277.6	262.7
Fibre de bois	6.2	12	1.5	3.69	2.65	70.5	50.7
OSB	50	60	175	0.12	0.11	2.3	2.1
Béton	70	70	100	0.13	0.13	2.6	2.6
Chêne	107	150	8	0.38	0.32	7.3	6.2

La résolution des équations (6) et (7) est réalisée par la méthode de Crank-Nicholson. Les solutions de ce système fournissent l'humidité relative de chacune des couches en fonction de leurs valeurs au pas de temps précédent et de la pression de vapeur intérieure :

$$\Phi_b^{(t)} = \frac{\left[ \frac{1}{p_{sat}(T_p(t)) \cdot X_4} \right] \cdot p_{vi}^{(t)} + \frac{X_1 - \frac{1}{2X_2}}{X_2 \left[ X_1 + \frac{1}{2X_2} \right]} \cdot \Phi_d^{(t-\Delta t)} + \left[ X_3 - \frac{1}{2X_4} - \frac{1}{2X_2} \right] \cdot \Phi_b^{(t-\Delta t)}}{X_3 + \frac{1}{2X_4} + \frac{1}{2X_2} - \frac{1}{X_2^2 \left[ X_1 + \frac{1}{2X_2} \right]}} \quad (8)$$

$$\Phi_d^{(t)} = \begin{cases} \frac{\left[ X_1 - \frac{1}{2X_2} \right] \cdot \Phi_d^{(t-\Delta t)} + \left[ \frac{1}{X_2} \right] \cdot \Phi_b^{(t)}}{X_1 + \frac{1}{2X_2}}, & \text{si } d_b < d_d \\ \Phi_b^{(t)}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

Avec

$$X_1 = \frac{\xi_d \cdot d_d}{\Delta t} \quad (10)$$

$$X_2 = \frac{1}{p_{sat}(T_p(t))} \left[ \frac{d_b}{2\delta_b} + \frac{d_d - d_b}{2\delta_d} \right] \quad (11)$$

$$X_3 = \frac{\xi_b \cdot d_b}{\Delta t} \quad (12)$$

$$X_4 = \frac{1}{p_{sat}(T_p(t))} \left[ \frac{1}{\beta} + \frac{d_b}{2\delta_b} + \frac{Sd_{rev}}{\delta_{air}} \right] \quad (13)$$

Ce modèle est adapté à des transferts de type monodimensionnel, où l'élément poreux est sollicité sur une de ses faces tandis que sur l'autre face un flux nul de vapeur est supposé (milieu semi-infini). Dans le cas où l'élément poreux échangerait avec l'ambiance intérieure sur ses deux faces opposées, il convient de ne prendre en compte que la moitié de l'élément poreux dans le sens de l'épaisseur, puisque le front de flux nul se situe dans ce cas à cet endroit. C'est par exemple le cas des parois séparatives intérieures dans des applications Bâtiment.

### 1.3.2 CAS DES ÉLÉMENTS POREUX HÉTÉROGÈNES

Le modèle retenu utilise donc les paramètres hygrothermiques du matériau composant l'élément poreux tels que la capacité hydrique ou la perméabilité à la vapeur. Toutefois, en présence d'un élément poreux constitué de plusieurs couches de matériaux différents, comme c'est le cas des parois de bâtiment par exemple, des couches actives équivalentes, d'épaisseur  $d_{beq}$  (resp.  $d_{deq}$ ), de capacité hydrique équivalente  $\xi_{beq}$  (resp.  $\xi_{deq}$ ) et de perméabilité à la vapeur équivalente  $\delta_{beq}$  (resp.  $\delta_{deq}$ ) doivent être définies de la manière suivante [23].

$$d_{beq} = d_{b,i} + \sum_{j=1}^{i-1} e_j (1 - \delta_{ij}) \left( 1 - \prod_{s=j}^{i-1} \frac{d_{b,s+1}}{d_{b,s}} \right) \quad (14)$$

Avec  $i$  la dernière couche de matériau activées par la sollicitation,  $d_{b,j}$  la profondeur effective de pénétration vis-à-vis d'une sollicitation quotidienne calculée avec les propriétés de chaque couche  $j$ , et  $e_j$  leur épaisseur réelle. La même formule est à utiliser pour le calcul de  $d_{deq}$ .

Cela revient, pour un matériau à 3 couches successives indicées de 1 (couche intérieure) à 3, à la fonction suivante :

Si  $d_1 \leq e_1$  :

$$d_{eq} = d_1$$

Sinon

Si  $d_2 \frac{(d_1 - e_1)}{d_1} \leq e_2$  :

$$d_{eq} = e_1 + d_2 \frac{(d_1 - e_1)}{d_1}$$

Sinon

Si  $d_3 \frac{(d_2 \frac{(d_1 - e_1)}{d_1} - e_2)}{d_2} \leq e_3$  :

$$d_{eq} = e_1 + e_2 + d_3 \frac{(d_2 \frac{(d_1 - e_1)}{d_1} - e_2)}{d_2}$$

Sinon

$$d_{eq} = e_1 + e_2 + e_3$$

Les propriétés hygrothermiques équivalentes sont calculées au prorata de la quantité de matériau présent dans la couche active (superficielle ou profonde). Pour le cas de la couche superficielle, le calcul s'écrit :

$$\xi_{beq} d_{beq} = \sum_{j=1}^i \xi_j e_j^* \quad (15)$$

$$\frac{d_{beq}}{2\delta_{beq}} = \sum_{j=1}^i \frac{e_j^*}{2\delta_j} \quad (16)$$

Avec  $e_j^*$  l'épaisseur de chaque couche  $j$  dans la couche active considérée. Les mêmes relations sont transposables au cas de la couche profonde.

Un autre type d'hétérogénéité qui peut être rencontré dans une application Bâtiment est la présence de barrière à la vapeur au sein même de l'élément poreux. Parce qu'elles possèdent des propriétés extrêmes (capacité hydrique très faible pour une résistance à la diffusion très forte), le calcul de la profondeur effective de pénétration n'est pas adapté pour ce type d'élément notamment pour la définition des propriétés équivalentes d'un élément poreux multicouche. En effet, ces propriétés extrêmes surtout en termes de résistance à la vapeur, impliquent qu'elles écrasent l'influence des autres matériaux présents en aval. Ces barrières à la vapeur ont pour but de stopper les transferts de vapeur et donc de minimiser le flux de vapeur sortant, au même titre que des isolants dans un problème de transferts thermiques. En ce sens, et en nous inspirant de l'annexe A de la norme EN ISO 13786, nous supposons dans notre modèle qu'en présence de barrière à la vapeur au sein d'un élément poreux multicouche, seuls les matériaux constituant les couches situées en amont de la barrière à la vapeur

vis-à-vis de la sollicitation sont réellement susceptibles d'être activées par la sollicitation et peuvent participer au calcul des propriétés équivalentes des deux types de couches actives (superficielle et profonde).

A titre d'exemple, les valeurs des propriétés équivalentes pour différents types de parois composées d'un parement de 13 mm et d'une couche d'isolant de 185 mm sont détaillées dans le **Tableau 2**. Deux types de parement (plaque de plâtre ou épicea) et deux types d'isolants (laine de verre et fibre de bois) sont utilisés dans l'exemple. La présence d'un pare-vapeur juste derrière le parement puis dans l'épaisseur de l'isolant, à 4 cm du parement sont également présentés.

**Tableau 2 : Propriétés hydriques et profondeurs de pénétration équivalentes d'éléments poreux hétérogènes**

Parement	Isolant		Sans pare-vapeur			Pare- vapeur derrière le parement			Pare-vapeur dans l'isolant		
			d <sub>eq</sub> (cm)	ξ <sub>eq</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	μ <sub>eq</sub> (-)	d <sub>eq</sub> (cm)	ξ <sub>eq</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	μ <sub>eq</sub> (-)	d <sub>eq</sub> (cm)	ξ <sub>eq</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	μ <sub>eq</sub> (-)
Plaque de plâtre	Laine de verre	Couche (b)	2.86	3.6	4.3	1.3	7.2	8.3	2.86	3.6	4.3
		Couche (d)	19.8	1	1.5	1.3	7.2	8.3	5.3	2.2	2.8
	Fibre de bois	Couche (b)	1.70	7	6.7	1.3	7.2	8.3	1.70	7	6.7
		Couche (d)	19.8	6.3	1.9	1.3	7.2	8.3	5.3	6.4	3.2
Epicéa	Laine de verre	Couche (b)	0.77	50	4.3	0.77	50	4.3	0.77	50	4.3
		Couche (d)	19.8	3.8	1.2	1.3	50	4.3	5.3	12.7	1.8
	Fibre de bois	Couche (b)	0.77	50	4.3	0.77	50	4.3	0.77	50	4.3
		Couche (d)	19.8	9.1	1.7	1.3	50	4.3	5.3	16.9	2.2

Pour la couche superficielle (b) (en grisé), en présence d'un parement épicea, la profondeur de pénétration (0.77 cm) étant inférieure à l'épaisseur du parement, les matériaux situés derrière (pare vapeur ou isolant) n'ont aucune influence. Seul le parement est activé par la sollicitation. Ce n'est pas par contre pas le cas en présence d'un parement en plaque de plâtre. Pour la couche profonde, la nature très perméable des isolants situés derrière le parement implique que toute l'épaisseur de la paroi jusqu'au pare-vapeur est sollicité quel que soit le parement. En présence d'un pare-vapeur derrière le parement, seul le parement est sollicité, que ce soit vis-à-vis d'une sollicitation journalière ou annuelle.

Un outil basé sur une feuille excel a été construit permettant d'évaluer le flux de vapeur échangé entre un milieu ambiant et un élément poreux. Il consiste à donner les propriétés des différentes couches de matériaux constituant l'élément (épaisseur, capacité hydrique, perméabilité à la vapeur). Les propriétés des deux couches équivalentes, superficielles et profondes, sont alors calculées à partir des hypothèses précédentes. Enfin, en fournissant les conditions intérieures de l'ambiance (humidité relative et température) ainsi que la température de surface de l'élément poreux à un pas de temps fixe, le flux échangé pour chacun d'eux est alors automatiquement calculé.

## 1.4 CONCLUSIONS

Un modèle simplifié, dit de profondeur effective de pénétration de la vapeur (EMPD), a été conçu de sorte de pouvoir quantifier les échanges de vapeur superficiels entre une ambiance soumise à une variation en humidité relative et un élément poreux. Il consiste à supposer que l'élément poreux est constitué de deux couches actives qui répondent chacune à des périodes de sollicitations différentes : journalières et annuelles. Ce modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- Sollicitations périodiques

- Conditions isothermes
- Milieu semi-infini
- Propriétés constantes
- Milieu homogène

Des adaptations ont été proposées pour le cas des éléments poreux hétérogènes, consistant à supposer des couches actives équivalentes au prorata des caractéristiques des matériaux situés entre l'ambiance et une potentielle barrière à la vapeur. La présence d'un revêtement non capacitif en surface de l'élément poreux est également prise en compte.

Une calculatrice excel a été élaborée, elle consiste, pour un élément poreux donné, à calculer les paramètres équivalents d'entrée du modèle ainsi que le flux de vapeur échangé et le flux de chaleur latente associé en fonction de données sur le climat intérieur à renseigner.

## 2. VALIDATION DU MODELE SIMPLIFIE A L'ECHELLE DE L'ELEMENT POREUX

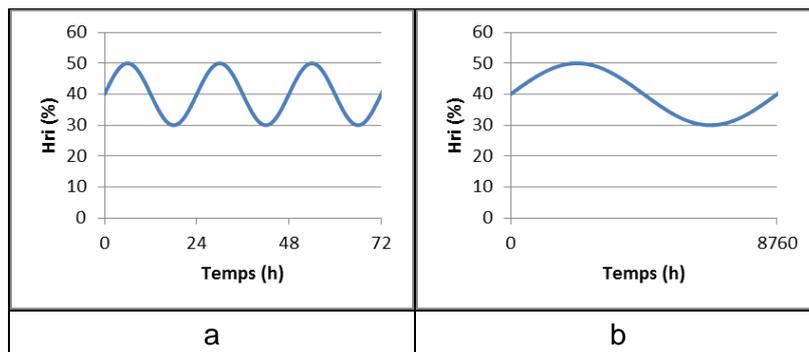
Le modèle conçu, il convient désormais de le valider à l'échelle de l'élément poreux. Pour ce faire, il a été choisi de confronter les résultats avec le logiciel commercial WUFI, logiciel de calculs de transferts hygrothermique largement validé, reconnu et répandu dans le milieu scientifique. La validation s'est faite en complexifiant de manière progressive le problème à résoudre, tant du point de vue de la configuration des parois, que du type de sollicitation rencontré.

### 2.1 SOLLICITATIONS PÉRIODIQUES EN HUMIDITÉ RELATIVE

Le modèle de profondeur effective de pénétration repose sur l'hypothèse que l'élément poreux est soumis à une sollicitation sinusoïdale en humidité relative. Une autre hypothèse forte consiste à supposer que l'élément poreux est milieu homogène semi-infini. C'est dans ces conditions que le modèle est en premier lieu comparé avec le logiciel WUFI.

#### 2.1.1 MILIEU HOMOGÈNE ET SEMI-INFINI

Deux types de sollicitations sont prévus, chacune d'elles est représentée sur la **Figure 2**. Elles correspondent à des sollicitations sinusoïdales en humidité relative de différentes périodes (journalière (a) et annuelle (b)) d'amplitude 10% autour d'une moyenne à 40%. La température ambiante est maintenue à 23°C.

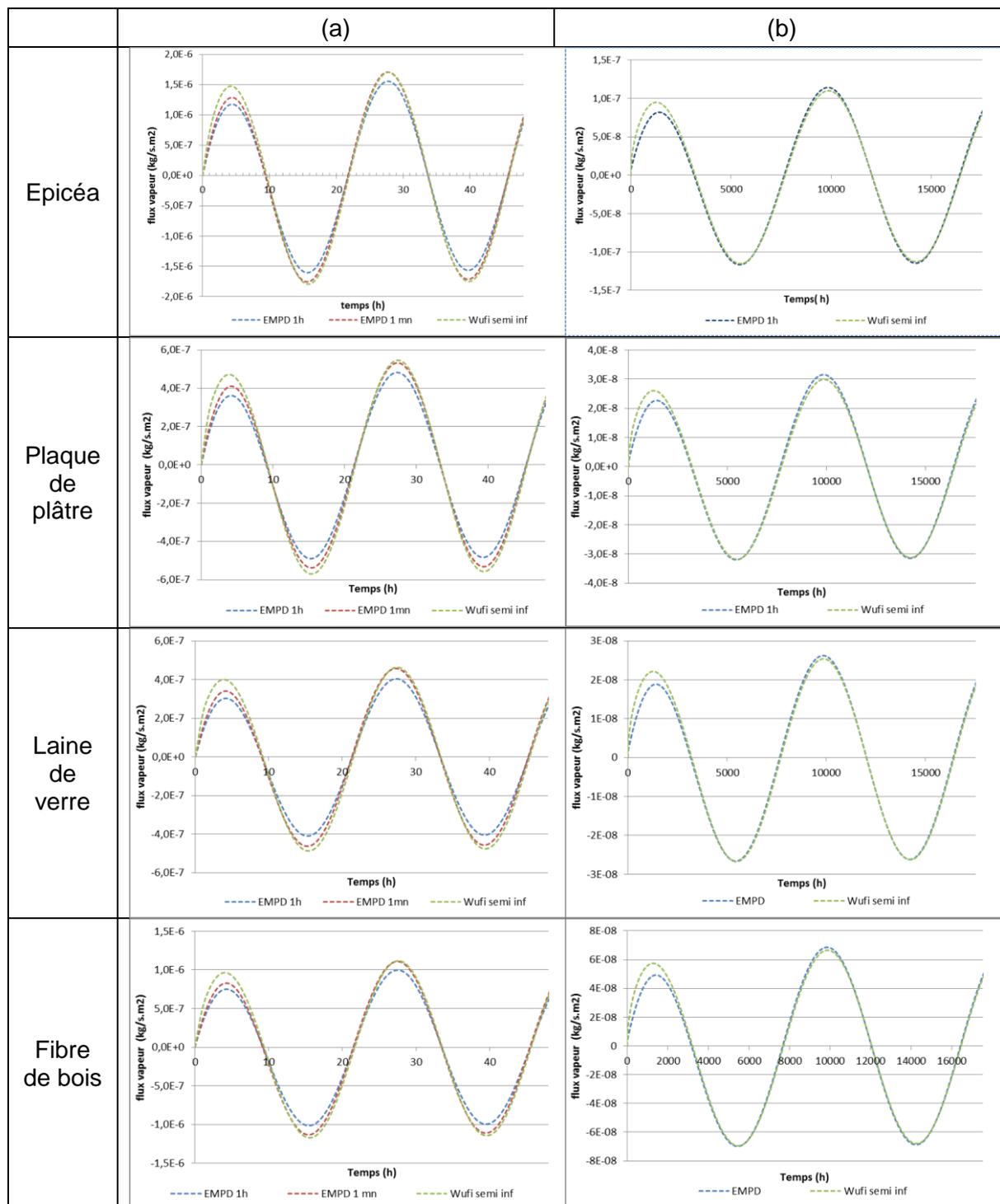


**Figure 2 : Sollicitations périodiques retenues a) période journalière, b) période annuelle**

Les résultats du modèle simplifié sont comparés avec WUFI pour 4 types de matériaux : 2 parements (plaque de plâtre, épicea) et 2 isolants (laine de verre, fibre de bois). Notre modèle étant adapté aux seuls phénomènes d'absorption / désorption de vapeur d'eau en surface intérieure, le flux sur la face opposée à l'ambiance dans WUFI est défini comme nul. L'hypothèse de milieu semi infini est quant à elle imposée en simulant un élément poreux d'épaisseur très grande par rapport à la profondeur de pénétration (1 m pour les parements, 10 m pour les isolants).

Par ailleurs, dans le cas des sollicitations journalières, deux pas de temps de résolution de notre modèle sont évalués : un pas de temps d'une heure, qui est le pas de temps prévu pour l'intégration du modèle au cœur de calcul COMETH, et un pas de temps d'une minute.

La **Figure 3** présente pour chaque matériau et chaque type de sollicitation, les flux de vapeur échangés entre l'ambiance et l'élément poreux, calculés selon WUFI puis selon notre modèle simplifié (EMPD) pour deux pas de temps (1h et 1 mn) dans le cas de la sollicitation journalière, un pas de temps d'une heure pour le cas de la sollicitation annuelle.



**Figure 3 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différents matériaux d'épaisseur infinie. a) sollicitation journalière, b) sollicitation annuelle**

Comme attendu, les résultats montrent que dans le cas d'un élément poreux semi infini et pour un pas de temps suffisamment faible par rapport à la période de la sollicitation, la réponse du modèle simplifié est quasi-identique à celle de WUFI à part dans les premiers temps de simulation en raison de l'influence des conditions initiales du matériau. Dans le cas de la sollicitation journalière (a), la résolution du modèle

simplifié avec un pas de temps d'une heure, génère un écart de l'ordre de 10 à 15% du flux maximal échangé.

Observons par ailleurs que les flux échangés sont d'autant plus faibles que la période de sollicitation est grande, d'un ordre 10 environ entre une sollicitation quotidienne et annuelle.

### 2.1.2 MILIEU HOMOGENE D'ÉPAISSEUR FINIE

Le modèle ayant été vérifié dans le cadre des hypothèses qu'il requiert, il convient désormais d'évaluer dans quelle mesure il s'écarte de la « réalité » lorsque l'élément poreux n'est plus considéré comme semi infini.

Pour rappel, dans le cas d'un milieu d'épaisseur finie, l'épaisseur maximale de la couche active, définie par la profondeur de pénétration, est limitée à l'épaisseur du matériau. Ainsi, le **Tableau 3** détaille les épaisseurs de chaque couche active pour le cas des 4 matériaux utilisés précédemment, pour deux éléments d'épaisseur 15 cm ou 7.5 cm, une température de 20°C et une plage de variation d'humidité relative autour de 50%.

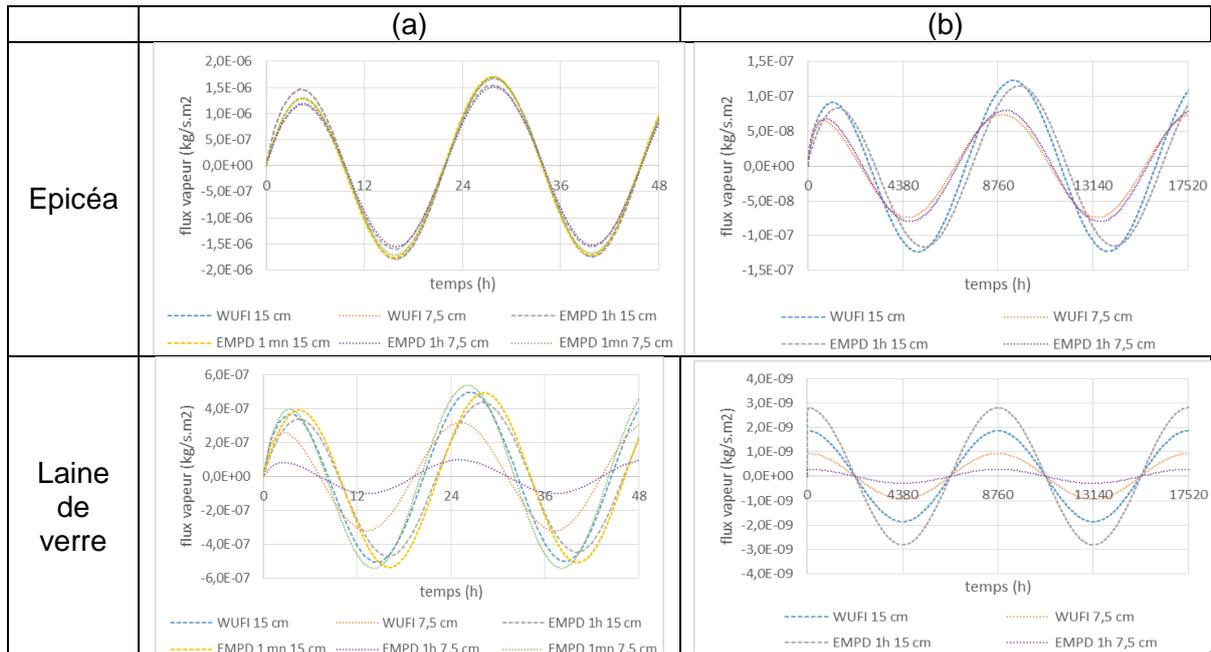
**Tableau 3 : Profondeur de pénétration pour différentes épaisseurs d'éléments poreux**

Epaisseur de l'élément poreux	Couche superficielle $d_b$ (cm)			Couche profonde $d_d$ (cm)		
	infinie	15 cm	7.5 cm	infinie	15 cm	7.5 cm
Epicéa	0.77	0.77	0.77	14.7	14.7	7.5
Plaque de plâtre	1.46	1.46	1.46	27.8	15	7.5
Laine de verre	14.53	14.53	7.5	277.6	15	7.5
Fibre de bois	3.69	3.69	3.69	70.5	15	7.5

Pour l'épicéa, on peut voir que sa profondeur de pénétration est suffisamment faible pour que, pour les épaisseurs choisies, la condition de milieu semi infini reste bonne pour une sollicitation journalière, ce n'est par contre plus le cas pour une sollicitation annuelle. A l'extrême, pour la laine de verre, très perméable, pour les deux types de sollicitation, l'épaisseur de la paroi est limitante, la condition de milieu semi infini n'est alors plus respectée.

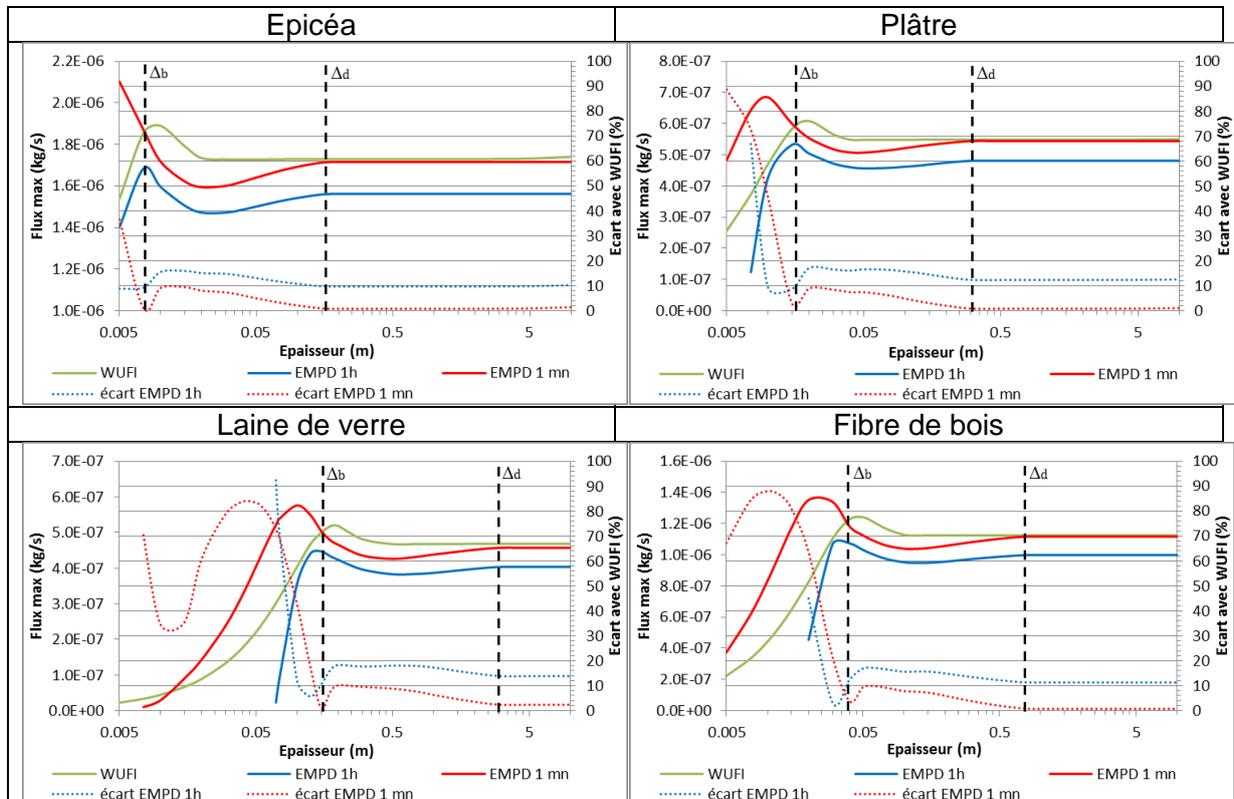
La Figure 4 compare les variations de flux de vapeur pour les deux types de sollicitations, deux matériaux (épicéa et laine de verre), et deux épaisseurs d'élément poreux (15 et 7.5 cm).

Pour les raisons évoquées précédemment, que ce soit pour une épaisseur de 7.5 ou 15 cm, la réponse du modèle à une sollicitation journalière dans le cas de l'épicéa est identique, et quasi parfaite pour un pas de temps de 1 minute. Pour une sollicitation annuelle, l'épaisseur de l'élément devenant limitante, des écarts apparaissent, inférieurs à 10% de la valeur maximale du flux échangé. Un déphasage est observé pour le cas de l'élément de 15 cm d'épaisseur. Pour la laine de verre par contre, dès que l'épaisseur de l'élément est inférieure à la profondeur de pénétration, de forts écarts apparaissent (supérieurs à 50%), mais la phase reste identique, sauf pour le cas de la sollicitation journalière ou un déphasage est observé quel que soit le pas de temps. Les deux cas particuliers pour lesquels un déphasage est observé correspondent à des cas où la profondeur de pénétration est identique à l'épaisseur de la paroi, des investigations plus poussées permettrait de statuer s'il s'agit là ou non d'une coïncidence.



**Figure 4 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différents matériaux d'épaisseur finie (15 ou 7.5 cm). a) sollicitation journalière, b) sollicitation annuelle**

Ces exemples étant insuffisants pour fournir une idée précise de l'influence de l'épaisseur de l'élément poreux sur la réponse du modèle simplifié, une étude paramétrique a été menée.



**Figure 5 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI en fonction de l'épaisseur pour différents matériaux.**

La Figure 5 compare pour les 4 matériaux retenus le flux maximal échangé, calculé selon WUFI et le modèle EMPD avec un pas de temps de résolution d'1h ou de 1 mn. Les écarts relatifs entre le modèle et WUFI sont également indiqués. Seul le cas de la sollicitation journalière a été traité, compte tenu des faibles flux échangés avec la couche profonde.

On observe tout d'abord qu'il existe, que ce soit avec WUFI ou notre modèle simplifié et pour chaque matériau, une valeur d'épaisseur optimale pour laquelle le flux échangé est maximum. Toutefois cette épaisseur spécifique est différente selon que l'outil de calcul est WUFI, l'EMPD avec une résolution d'1h ou l'EMPD avec une résolution d'une minute.

Ensuite, quel que soit le matériau étudié, l'influence de l'épaisseur de paroi sur les écarts entre le modèle EMPD et les simulations WUFI est la même. Le modèle EMPD avec un pas de temps de résolution d'une minute donne des résultats quasi-exacts par rapport aux simulations WUFI pour une épaisseur égale à la profondeur effective de pénétration quotidienne et pour les épaisseurs supérieures à la profondeur effective de pénétration annuelle. Ici encore, des investigations plus poussées permettraient de statuer s'il s'agit là ou non d'une coïncidence. Entre ces deux valeurs, l'erreur se situe en dessous de 10%. Pour des éléments poreux d'épaisseurs inférieures à la profondeur de pénétration quotidienne du matériau les écarts sont plus grands. Dans cette gamme d'épaisseur le modèle EMPD surestime la valeur du flux échangé.

Le modèle EMPD avec un pas de temps de résolution d'une heure suit sensiblement la même allure pour les épaisseurs supérieures à la profondeur effective de pénétration quotidienne mais avec un décalage en amplitude. Ainsi de manière générale les écarts varient entre 10% et 20%. Par contre, pour les épaisseurs inférieures, le modèle EMPD avec un pas de temps d'une heure tend à fournir des résultats proches des simulations WUFI jusqu'à une épaisseur minimale en deçà de laquelle le modèle diverge. Le Tableau 4 reprend ces valeurs d'épaisseur minimale en dessous desquelles le modèle EMPD semble ne pas être adapté. Le flux de chaleur latente est déduit du flux de vapeur.

**Tableau 4 : Epaisseurs minimales valides et flux de vapeur et de chaleur maximum associés**

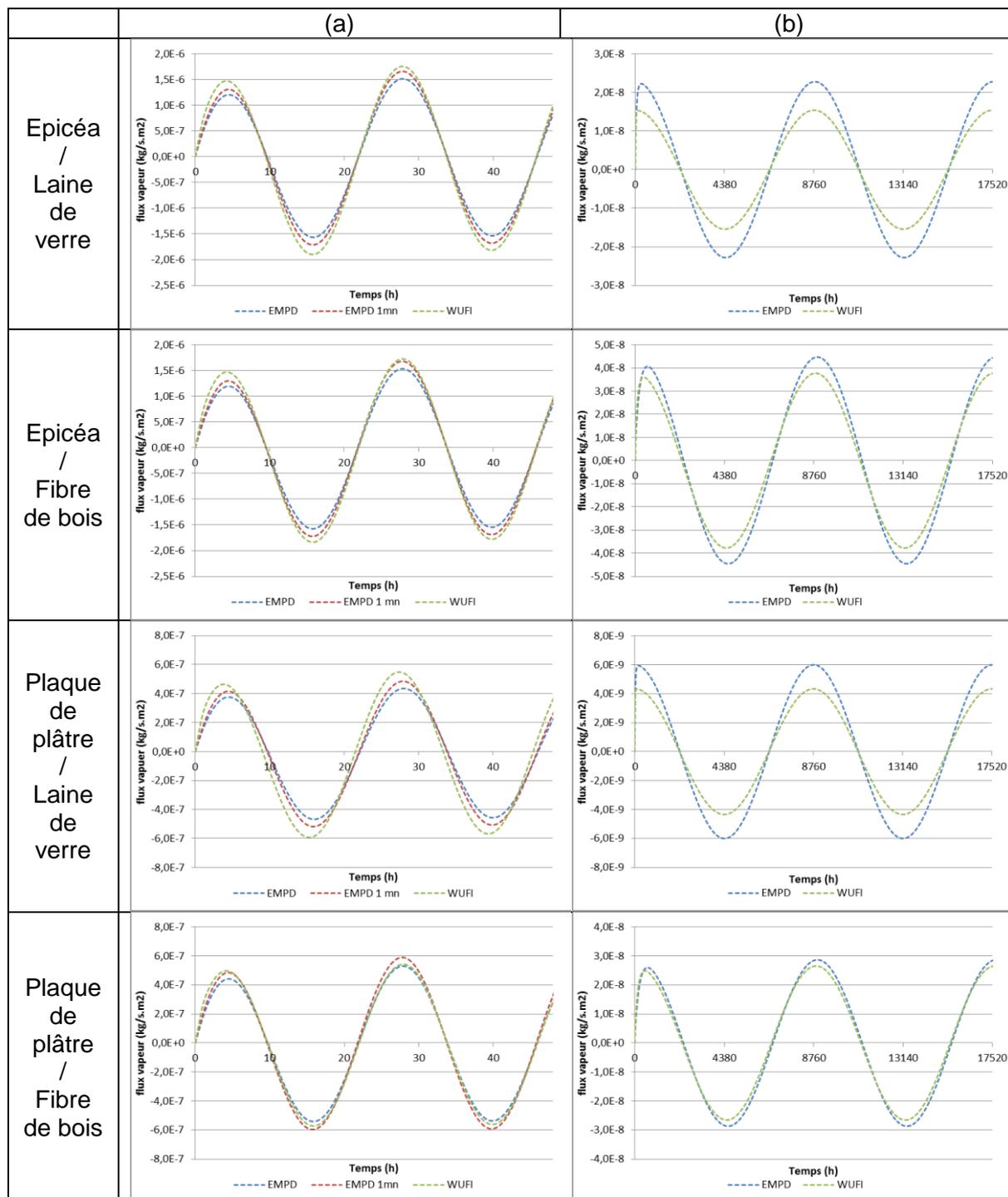
	Epicéa	Plâtre	Laine de verre	Fibre de bois
Epaisseur minimale (mm)	5	10	100	30
Flux de vapeur maximal (kg/s.m <sup>2</sup> )	1.40 10 <sup>-6</sup>	4.70 10 <sup>-7</sup>	3.56 10 <sup>-7</sup>	1.07 10 <sup>-6</sup>
Flux de chaleur latente maximal (W/m <sup>2</sup> )	3.17	0.96	0.80	2.41

En conclusion, le modèle simplifié fourni des écarts par rapport à WUFI d'au maximum 20% pour un pas de temps de résolution d'une heure et 10% pour un pas de temps d'une minute dans le cas d'une sollicitation journalière. Pour une sollicitation annuelle, les écarts peuvent devenir très vite important pour les matériaux possédant de forte profondeur de pénétration, mais ces écarts doivent être ramenés à la valeur absolue extrêmement faible des flux échangés pour ces matériaux. Ainsi, pour la laine de verre, le flux de vapeur maximal échangé est de l'ordre de 10<sup>-9</sup> kg/s.m<sup>2</sup> correspondant à un flux latent insignifiant, de l'ordre de 10<sup>-3</sup> W/m<sup>2</sup>.

### 2.1.3 MILIEU HÉTÉROGÈNE

Comme expliqué dans le premier chapitre, le modèle simplifié est adapté aux milieux homogènes. Quelques rares publications dans la littérature traitent du cas de milieux hétérogènes composés de couches de matériaux différents. Pour chacune d'elles, la modélisation consiste à supposer des couches actives équivalentes, aux propriétés à définir.

De la même manière que précédemment, la réponse du modèle simplifié a été comparée à WUFI, dans le cas d'un matériau hétérogène composé de deux couches de matériaux différents : un parement de 13 mm (plaque de plâtre ou épicea) et un isolant de 20 cm (laine de verre ou fibre de bois). La comparaison des flux de vapeur est présentée dans la **Figure 6**.



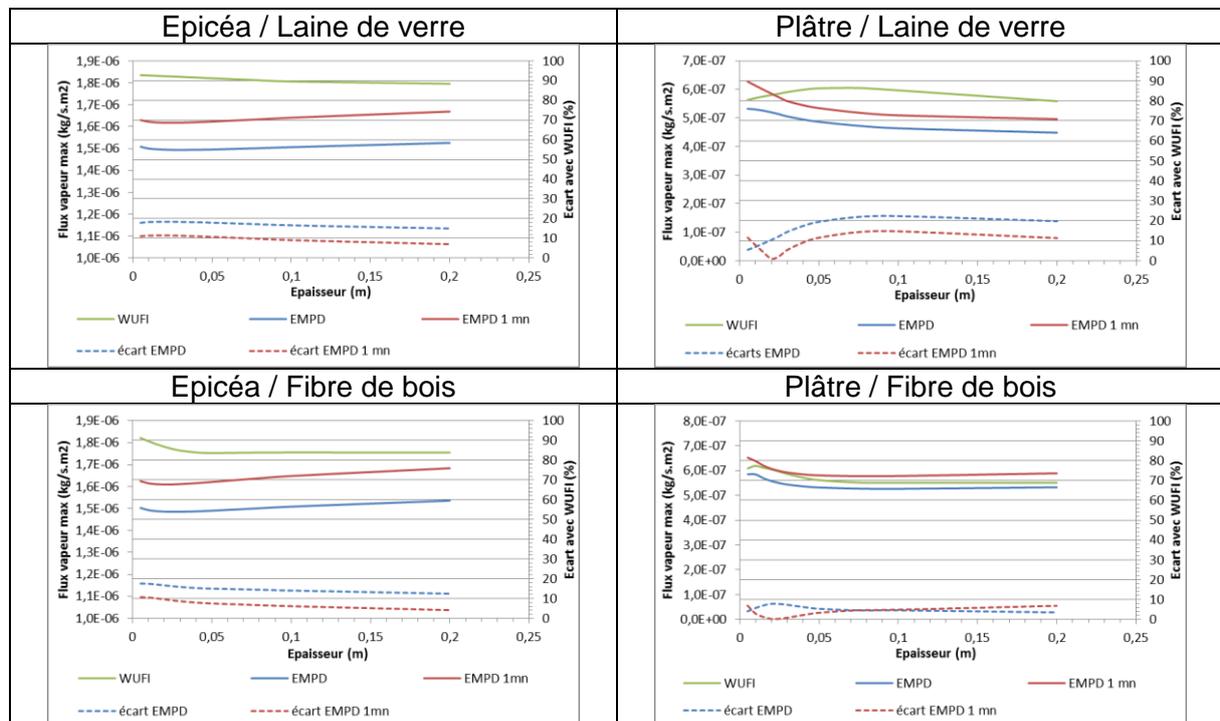
**Figure 6 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différents couples parement / isolants. a) sollicitation journalière, b) sollicitation annuelle**

Les réponses du modèle simplifié sont globalement proches de celles de WUFI, que ce soit en terme de phase ou d'amplitude. Concernant les résultats en cas de sollicitation journalière, les résultats du modèle simplifié en présence d'un parement épicea sont du même ordre de précision que ceux en cas de paroi homogène, car la couche active superficielle reste uniquement composée d'épicéa. Les écarts sont de l'ordre de 10-15% pour un pas de temps d'une heure et 4-7% pour un pas de temps d'une minute. Dans le cas du parement en plaque de plâtre, l'approximation faite engendre un erreur plus

élevée notamment pour le cas de la laine de verre avec une erreur sur le flux maximal de 20% pour un pas de temps d'une heure et 10% pour un pas de temps d'une minute. Dans le cas de l'isolant en fibre de bois, les résultats sont plus proches avec le pas de temps d'une heure, les erreurs sont toutefois faibles inférieures à 6% pour les deux pas de temps.

En ce qui concerne les sollicitations annuelles, les allures restent semblables mais cette fois les écarts en valeurs relatives sont plus élevés, le modèle EMPD ayant tendance à surestimer les flux. Les écarts se situent entre 10 et 50% en fonction des configurations, les plus grands étant relatifs au cas de l'isolant en laine de verre. Ce constat est toutefois à mesurer, par le fait que les écarts en valeurs absolues restent dans ce cas extrêmement faibles, avec des écarts sur les flux échangés de l'ordre de  $10^{-8}$  kg/s.m<sup>2</sup> en flux de vapeur soit bien inférieurs à  $10^{-1}$  W/m<sup>2</sup> en flux de chaleur latente.

Le modèle EMPD a ici été comparé aux simulations WUFI pour un cas de paroi extérieure, épaisse, avec une épaisseur d'isolant de 20 cm. Au même titre que ce qui a pu être étudié dans le cas des parois homogènes, et pour s'assurer que le modèle peut être adapté à des parois multicouches minces comme c'est le cas des partitions intérieures ou du mobilier, l'influence de l'épaisseur de la paroi est ici analysée. Seule l'influence de l'épaisseur de la couche d'isolant est ici évaluée, l'épaisseur de parement restant constante (1.3 cm).



**Figure 7 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI en fonction de l'épaisseur d'isolant pour différents couples parement / isolant.**

Les calculs ont été réalisés pour une sollicitation de type journalière compte tenu du fait que c'est ce type de sollicitation qui génère les plus grands flux de vapeur échangés. Les résultats pour chaque configuration sont présentés dans la **Figure 7**, en termes de valeur absolue des flux maximum échangés pour chaque outil de calcul et d'écart par rapport à WUFI. Deux pas de temps de résolution (1h et 1 min) sont présentés.

Les résultats montrent que pour un pas de temps de résolution d'une heure, les écarts entre le modèle simplifié et WUFI sont toujours inférieurs à 20% quelle que soit l'épaisseur. Avec un pas de temps de résolution d'une minute, les écarts sont inférieurs à 10% sauf pour la configuration plâtre / laine de verre où les écarts maximum peuvent atteindre jusqu'à 15%. A titre d'exemple, dans le cas d'une application

Bâtiment où l'on souhaite quantifier l'échange de vapeur avec des partitions intérieures en plaque de plâtre, le front de flux nul étant au centre de la paroi, les résultats relatifs à une épaisseur d'isolant de 2.5 cm doivent être utilisés. Ils apparaissent dans le **Tableau 5**.

**Tableau 5 : Ecarts relatifs des flux calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différents couple parement / isolant et une épaisseur d'isolant de 2,5cm.**

	Epicéa / Laine de verre	Plâtre / Laine de verre	Epicéa / Fibre de bois	Plâtre / Fibre de bois
Ecart WUFI / EMPD (résolution 1h)	18%	12%	16%	7%
Ecart WUFI / EMPD (résolution 1min)	11%	2%	9%	0.5%

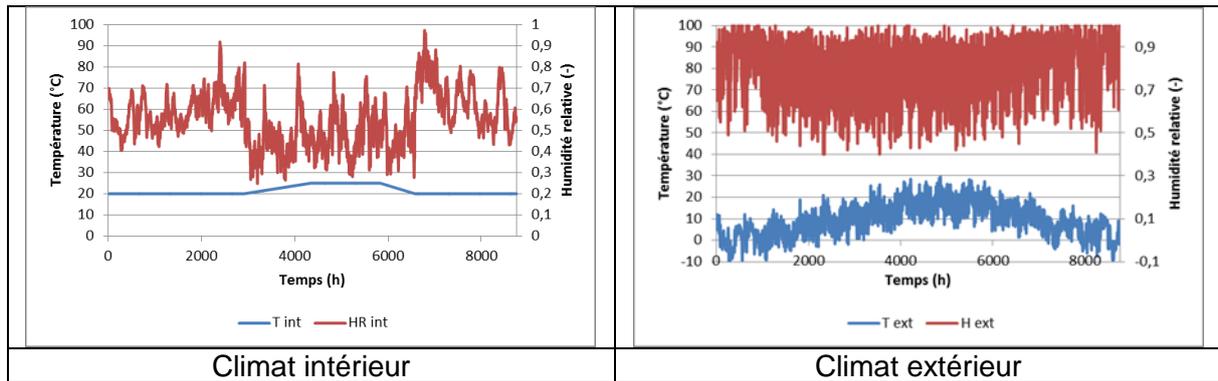
#### 2.1.4 PRÉSENCE D'UN REVETEMENT

Des simulations ont également été menées pour évaluer l'influence de la présence d'un revêtement non capacitif à la surface de l'élément poreux. Deux sortes de revêtements ont été choisis, l'un correspondant à une peinture acrylique ( $S_d=0.2m$ ), l'autre correspondant à une peinture latex ( $S_d=2m$ ). Les valeurs de  $S_d$  sont tirées de [24] pour une humidité relative de 50%. Les comparaisons avec le logiciel WUFI montrent que plus le revêtement de surface est imperméable et plus les écarts avec le modèle simplifié sont faibles. Ceci tient du fait que la présence d'une barrière à la diffusion en surface limite la propagation du flux de vapeur dans l'épaisseur de l'élément poreux, validant dans ces conditions l'hypothèse de couche active superficielle.

## 2.2 SOLLICITATIONS NON PÉRIODIQUES

Les hypothèses de milieu semi infini et d'hétérogénéité des éléments poreux ayant été investiguées, il convient désormais d'évaluer le modèle simplifié vis-à-vis d'une sollicitation non périodique, aussi bien en humidité relative qu'en température.

Pour cela, les climats intérieurs utilisés dans le cadre des études de risques de pathologie dans les parois de bâtiment sont repris. Tirés du REEF Humidité [25], ils consistent, à partir de données climatiques extérieures générées par le logiciel Météonorm à considérer que la teneur en eau de l'air intérieur est égale à la teneur en eau de l'air extérieur à laquelle est ajoutée une source d'humidité en fonction des saisons pour simuler les apports internes. Cette source d'humidité, est caractérisée par un coefficient  $W/n$  ( $g/m^3$ ), avec  $W$  la quantité de vapeur produite par unité de temps et  $n$  le taux de renouvellement d'air intérieur. Cette apport est effectif du 1<sup>er</sup> octobre au 30 avril. En dehors de cette plage, la source d'humidité est supposée nulle puisqu'il est fait l'hypothèse que l'air intérieur et l'air extérieur sont alors en équilibre compte tenu de l'ouverture des fenêtres par les occupants. La température intérieure est quant à elle définie à 20°C du 1<sup>er</sup> octobre au 30 avril, à 25°C du 1<sup>er</sup> juillet au 31 août et par une interpolation linéaire entre ces deux périodes. L'ambiance intérieure correspondant au climat de Nancy avec une source d'humidité de 5  $g/m^3$  (apports internes moyens à fort au sens du DTU 31.2) est choisie. Les variations d'humidité relative et de température intérieure et extérieure sont retranscrites sur la **Figure 8**.



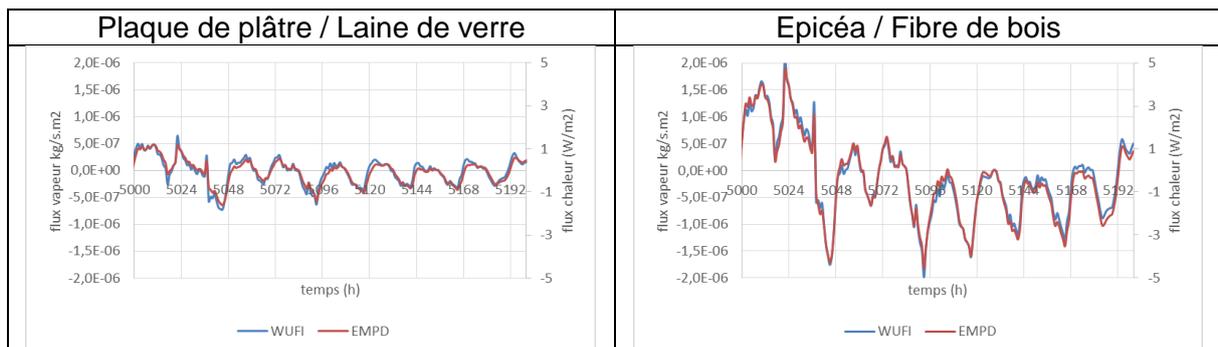
**Figure 8 : Sollicitation non périodique retenue. Climat de Nancy, W/n de 5 g/m<sup>3</sup>**

L'humidité relative intérieure initiale de la paroi sera calculée à partir d'une moyenne des 30 derniers jours de l'année, soit 58% pour le climat de Nancy.

Le modèle simplifié est alors comparé avec les résultats du logiciel WUFI pour des éléments poreux de type parois de bâtiment. Les cas de parois intérieures et de parois extérieures sont distingués.

### 2.2.1 PAROIS INTÉRIEURES

La comparaison des résultats est effectuée dans un premier temps sur une paroi de type « cloison intérieure », c'est à dire en contact sur ses deux faces avec l'ambiance intérieure. Cette configuration est équivalente à une demi-paroi soumise à l'ambiance intérieure d'un côté et à un flux nul (vapeur et chaleur) au centre de la paroi. La paroi simulée est constituée d'un parement de 13 mm et d'un isolant de 5 cm. Comme précédemment, deux types de parements (plâtre et épicea) et deux types d'isolants (laine de verre et fibre de bois) sont évalués. La **Figure 9** compare les deux outils pour deux cas extrêmes : parement plâtre et laine de verre, parement épicea et fibre de bois, dans le cas d'une semaine du mois d'août. Les flux de vapeur et les flux de chaleurs latentes associées sont indiqués en ordonnées.



**Figure 9 : Comparaison des flux échangés calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur une semaine d'été pour différents couples parement / isolants et une sollicitation non périodique**

Les échelles en ordonnées sont identiques pour les deux configurations de sorte de pouvoir comparer l'aptitude de chacune à échanger avec l'ambiance. Les flux sont ainsi nettement supérieurs en présence d'un parement épicea.

Les résultats du modèle simplifié semblent proches de ceux calculés avec le logiciel WUFI dans ces configurations. Une quantification de l'écart sur une année complète a été proposée via le calcul de l'erreur globale :

$$\varepsilon = \frac{\sum_i |y_i - x_i|}{\sum_i |y_i|}$$

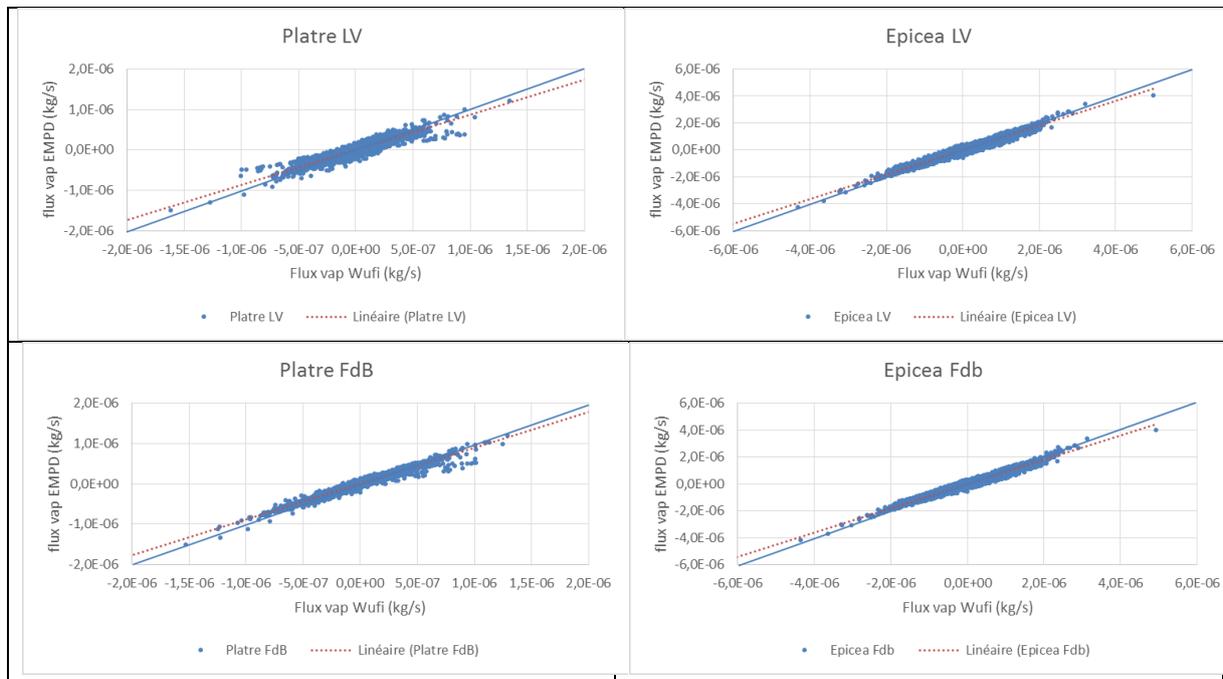
Avec  $i$  chaque pas de temps de simulation sur une année,  $x$ , le flux de vapeur au temps  $i$  calculé par le modèle simplifié et  $y_i$  celui calculé par WUFI.

Pour chaque configuration, les erreurs globales sont détaillées dans le **Tableau 6**.

**Tableau 6 : Ecart relatif des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différentes configurations de cloisons intérieures**

Parement	Epicéa		Plaque de plâtre	
Isolant	Laine de verre	Fibre de bois	Laine de verre	Fibre de bois
Erreur globale	18%	18%	32%	18%

La comparaison pour chaque configuration et chaque pas de temps sur une année complète est présentée sous la forme de nuages de points sur la **Figure 10**.

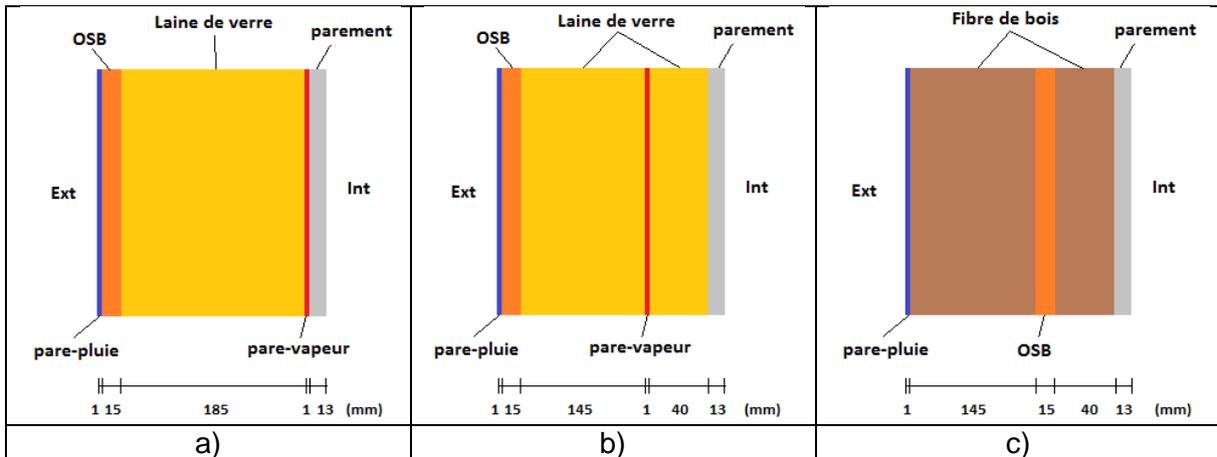


**Figure 10 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur une année pour différents couples parement / isolants et une sollicitation non périodique**

Ce mode de vue, associé à la linéarisation des nuages de points pour chaque outil, permet de montrer que pour chaque configuration, la réponse du modèle simplifié suit bien celle de l'outil WUFI, mais qu'elle a tendance à sous-estimer les effets. La comparaison de la linéarisation des nuages de point de chaque outil indique un écart moyen entre et 10 et 15%.

## 2.2.2 PAROIS EXTÉRIEURES

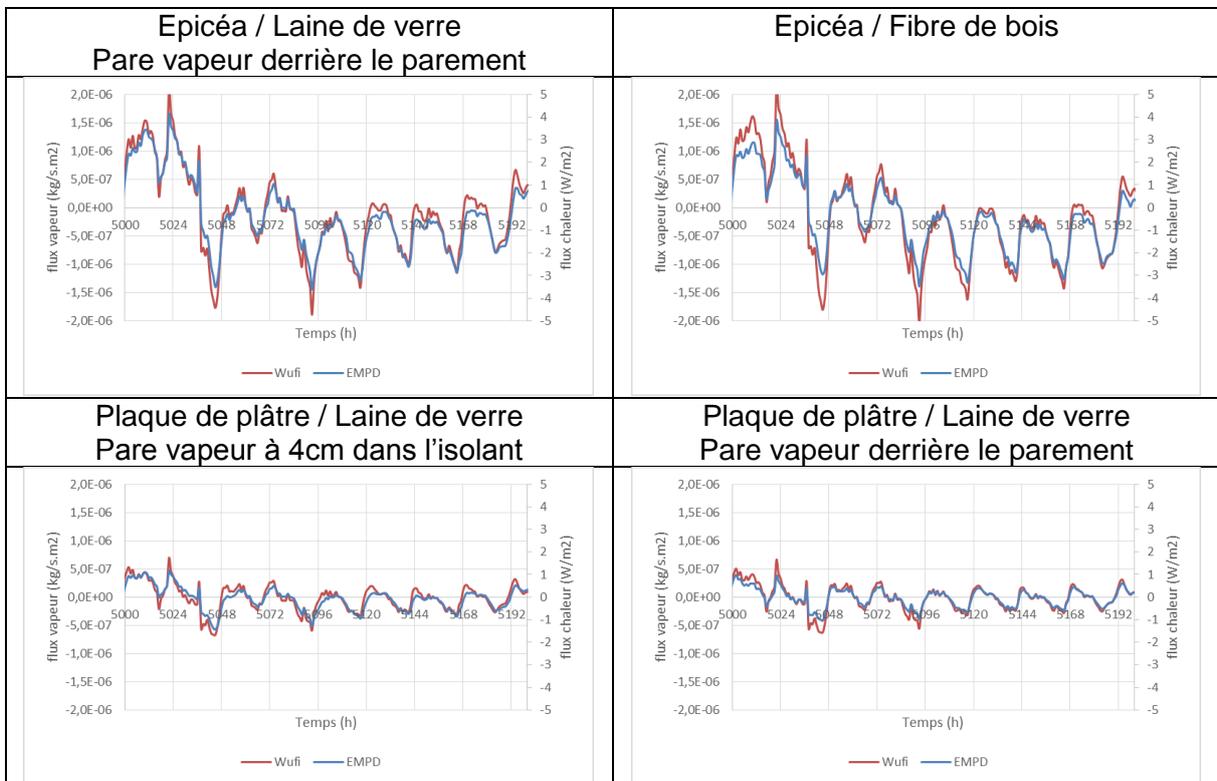
Une nouvelle série de comparaisons a été effectuée cette fois ci dans le cas d'éléments poreux de type paroi extérieure de bâtiment. Compte tenu du cadre du projet dans lequel l'étude a été menée, 3 configurations de parois extérieures rencontrées dans les bâtiments à ossature bois ont été retenues. Elles sont schématisées sur la **Figure 11**.



**Figure 11 : Configurations de parois extérieures**

Ainsi deux configurations de parois courantes avec isolant en laine de verre ont été choisies. Elles se distinguent par la position du pare-vapeur, situé dans un cas derrière le parement et dans l'autre au cœur de l'isolant, à une épaisseur de 4 cm pour respecter la règle du 2/3 – 1/3 exprimées dans le DTU 31.2. La dernière configuration est une paroi à base de fibre de bois, où la barrière à la vapeur est constituée par une épaisseur d'OSB située à 4 cm au cœur de l'isolant. Pour chacune de ces configurations, deux types de parement seront évalués, une plaque de plâtre ou de l'épicéa.

La Figure 12 compare les réponses des deux outils en flux de vapeur et en flux de chaleur latente associé. Seulement 4 cas sur les 6 testés sont ici présentés.



**Figure 12 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur une semaine d'été pour différents configurations de parois extérieures et une sollicitation non périodique**

Si les allures sont proches, on observe ici, dans le cas de paroi plus complexes que les parois intérieures, des écarts avec WUFI plus importants. L'erreur globale calculée dans chaque cas est détaillée dans le **Tableau 7**:

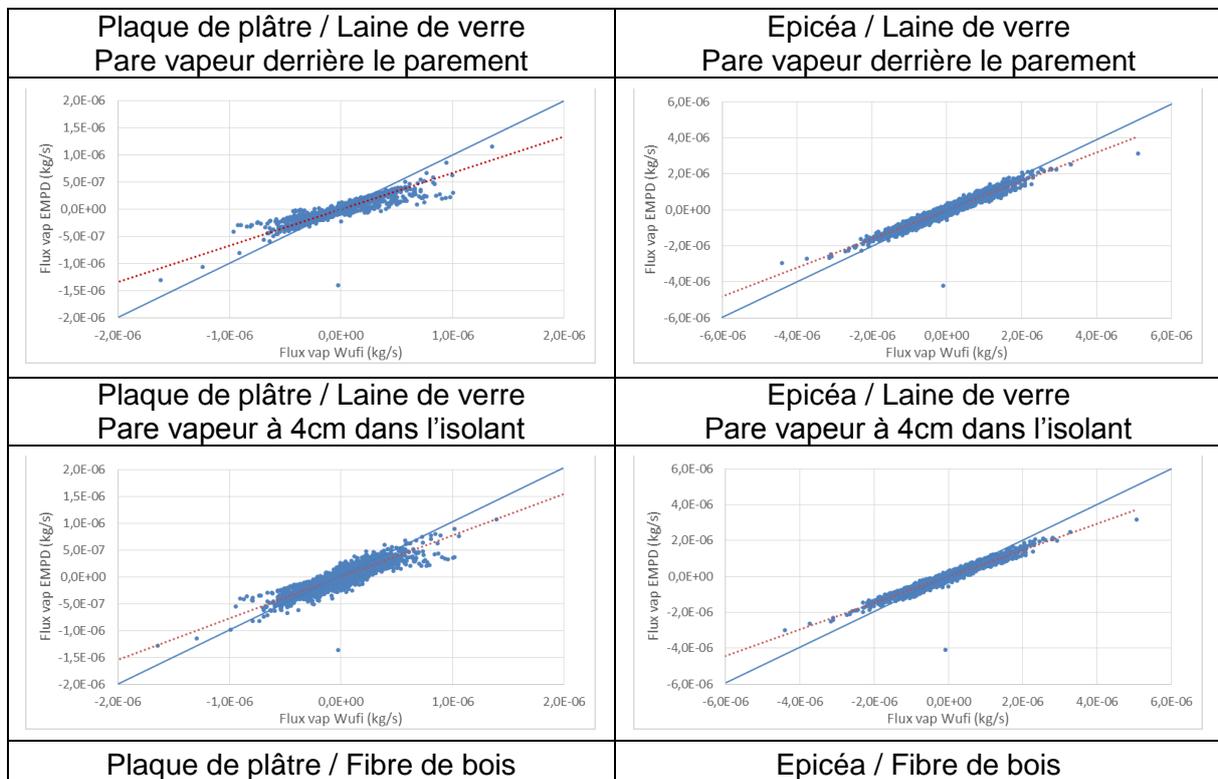
**Tableau 7 : Ecarts relatifs des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différentes configurations de parois extérieures**

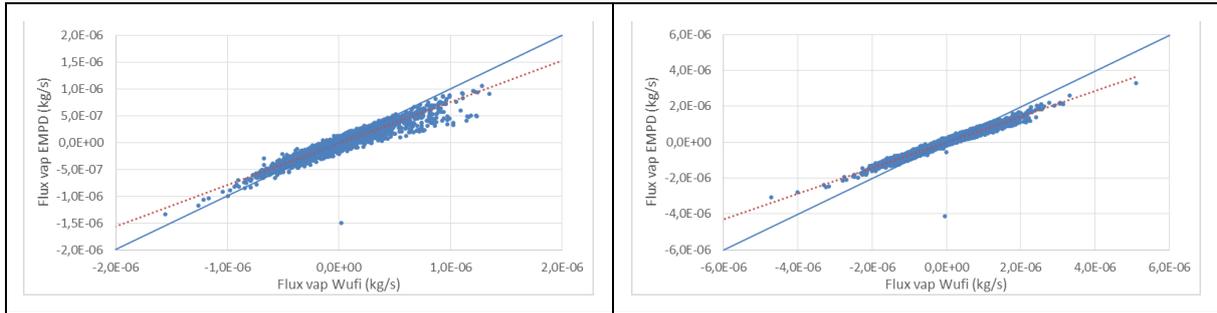
Isolant	Laine de verre		Laine de verre		Fibre de bois	
Position pare vapeur	PV derrière parement		PV dans l'isolant			
Parement	Plaque de plâtre	Epicéa	Plaque de plâtre	Epicéa	Plaque de plâtre	Epicéa
Ecart global	31%	26%	41%	30%	33%	30%

Les écarts globaux augmentent d'environ 10% par rapport à un cas de paroi intérieure.

La comparaison par nuage de point sur tous les pas de temps d'une année entière est représentée sur la **Figure 13**: Ce mode de vue permet de réaliser que le modèle EMPD retranscrit mieux les flux échangés en cas de parement épicea puisque le nuage de point est resserré. Ceci tient au fait que le parement épicea, de par sa profondeur de pénétration, est le lieu de la grande partie des échanges superficiels vis-à-vis des périodes de sollicitation tandis que dans le cas du parement en plaque de plâtre, la vapeur diffuse au-delà de celui-ci. Par contre quelle que soit la configuration, la linéarisation du nuage de point montre une déviation des résultats du modèle simplifié par rapport à WUFI, toujours dans le sens d'une sous-estimation (en valeur absolue) des flux échangés.

En calculant une erreur moyenne entre les droites linéarisées on aboutit à des erreurs entre 20 et 25% pour le parement épicea et entre 25 et 35% pour le parement plâtre.





**Figure 13 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur une année pour différentes configurations de parois extérieures et une sollicitation non périodique**

## 2.3 CONCLUSIONS

Les résultats du modèle simplifié ont été comparés à des simulations réalisées sous WUFI. Cette comparaison s'est faite en dégradant progressivement les conditions de calcul de sorte de s'éloigner progressivement des hypothèses fortes qui régissent la validité du modèle simplifié.

Les résultats montrent tout d'abord que lorsque ces hypothèses sont respectées, les écarts entre le modèle EMPD et les simulations WUFI sont quasiment nuls à conditions que le pas de temps de résolution utilisé soit suffisamment faible par rapport à la période de sollicitation. Ainsi pour des sollicitations de période journalière, un pas de temps de résolution d'une minute donne des écarts de calcul de flux de vapeur échangés quasi nul tandis qu'un pas de temps d'une heure donne des écarts de l'ordre de 10% du flux maximal échangé. Les dynamiques sont dans les deux cas identiques aux simulations WUFI. La présence d'un revêtement de surface limitant les échanges de vapeur avec la paroi, permet également de réduire les écarts liés au pas de temps de résolution.

Lorsque la paroi n'est plus considérée comme un milieu semi infini et que son épaisseur réelle devient limitante, les écarts peuvent augmenter. Ils se situent entre 10 et 20% du flux maximal échangé pour un pas de temps de résolution d'une heure si l'épaisseur reste supérieure à la profondeur effective de pénétration quotidienne. Si l'épaisseur de paroi est très inférieure à la profondeur de pénétration les écarts augmentent. Il existe même une épaisseur minimale, variable selon le matériau, en dessous de laquelle le modèle n'est pas adéquat.

Le cas des parois non homogènes, composées d'un parement et d'une couche d'isolant a été étudié. Le modèle consiste dans ce cas à considérer la paroi comme une paroi homogène avec des propriétés équivalentes. Les écarts avec les simulations WUFI se situent autour de 20% du flux maximal échangé. L'influence de l'épaisseur de l'isolant a révélée de faibles variations des erreurs engendrées par le modèle. Les résultats montrent que le parement est le siège de la quasi-totalité des échanges, son incidence est majeure.

Enfin, des comparaisons ont été menées dans le cas de sollicitations non périodiques et pour des configurations d'éléments poreux du type de parois couramment rencontrées dans les bâtiments à ossature bois. Si les dynamiques des flux de vapeur calculés sont très proches des résultats WUFI, les écarts globaux calculés entre les deux outils peuvent toutefois apparaître élevés, variant entre 20 et 40% selon les configurations. Les comparaisons par nuages de point montrent toutefois que ces écarts sont toujours dans le sens d'une minimisation des effets.

### 3. INTEGRATION DU MODELE EMPD A LA METHODE TH-BCE

L'objectif de l'étude est d'intégrer le modèle simplifié précédemment décrit et comparé, dans le cœur de calcul de la méthode TH-BCE. Cette intégration doit se faire à deux niveaux : via le bilan massique pour prendre en compte les transferts de vapeur entre l'ambiance et les éléments poreux et via le bilan thermique pour prendre en compte cette fois le flux de chaleur latente associé.

Les fiches algorithmique « C-Emi-Bilan\_hydrigue » et « C\_BAT\_comportement thermique d'un groupe » ont donc été modifiées.

#### 3.1 MODIFICATION DES FICHES ALGORITHMIQUES

A l'heure actuelle, le bilan hydrique dans la méthode TH-BCE a pour but d'alimenter les échanges aérauliques entre groupes et de calculer les charges de refroidissement par le biais des consommations de chaleur latente par déshumidification. Il fait intervenir les échanges aérauliques entre groupes et avec l'extérieur, la déshumidification et les apports internes. Seuls les apports internes liés à la présence des occupants sont considérés pour les bâtiments à usage d'habitation.

L'intégration du modèle simplifié dans ce bilan hydrique se fait par l'ajout des termes d'échanges avec chaque élément poreux, dernier terme au numérateur dans l'équation (17):

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\sum_j Q_{maj}(\omega_{maj} - \omega_{i,g}) + A_{\omega_{int}} + \sum_{em \in gr} Q_{m\_recirc\_eff}^{em} \times MIN(0; \omega_{sat}^{em} - \omega_{i,g}) + \sum_{k \in gr} \beta^k \times A^k \times \left( p_{v\_surf}^k - \frac{P_{atm} \cdot \omega_{i,g}}{0.622} \right)}{(V \times \rho_{i,g})} \quad (17)$$

A chaque pas de temps, l'humidité relative de la couche superficielle et de la couche profonde de chaque élément poreux est calculée selon les équations (8) et (9) décrites dans le premier chapitre en fonction des conditions du pas de temps précédent. Des routines internes permettent alors de résoudre le bilan (17) et de calculer l'humidité absolue de l'ambiance à la fin du pas de temps.

La résolution du système nécessite d'appliquer une température de paroi pour calculer la pression de vapeur saturante de celle-ci. Nous avons supposé que la température de chaque couche était égale à la température du nœud de température dans le schéma RC à laquelle l'élément poreux se rapporte. Ainsi, parmi les caractéristiques de l'élément poreux, il est demandé de renseigner si l'élément poreux est une paroi de type « légère » auquel cas la température appliquée est la température du nœud  $\theta_s$ , ou une paroi de type « lourde » auquel cas le nœud de température  $\theta_m$  est choisi.

A l'issue du calcul de l'humidité spécifique à la fin du pas de temps, la chaleur latente associée au flux de vapeur échangé,  $\Phi_{hygro\_lat}$ , est calculée par :

$$\Phi_{hygro\_lat}(h) = L_{v\_eau} \times 1000 \times \sum_{k \in gr} \frac{1}{P_{sat}(\theta_p^{k(t)}(h)) \times X_4^k} \times A^k \times \left( p_i^{(t-1)} - p_{sat}(\theta_p^{k(t)}(h)) \times \phi_b^{k(t)} \right) \quad (18)$$

Avec  $X_4$  calculé selon l'équation (13).

Ce flux de chaleur est ensuite intégré dans le bilan thermique en ajoutant une composante dans les flux de chaleurs internes au nœud  $\theta_{la}$  (parois légères autre que les baies) et au nœud  $\theta_m$  au prorata des types de parois. Les flux de chaleur internes deviennent ainsi :

$$\phi_{la}(h) = f_{rld} \cdot (1 - f_{sa}) \cdot F_{s1}(h) + f_{rl,int} \cdot \left( \phi_{int-rad}(h) + \phi_{int,occ-rad}(h) + \phi_{recup-rad}(h) + F_{ecl\_r}(h) \right) + f_{l,hygro} \cdot \phi_{hygro\_lat}(h) \quad (19)$$

$$\phi_{mq}(h) = f_{rmd} \cdot (1 - f_{sa}) \cdot F_{s1}(h) + f_{rm} \cdot \left( \phi_{int-rad}(h) + \phi_{int,occ-rad}(h) + \phi_{recup-rad}(h) + F_{ecl\_r}(h) \right) + f_{m,hygro} \cdot \phi_{hygro\_lat}(h) \quad (20)$$

Avec

$$f_{l,hygro} = \frac{\sum_{k \in gr} A^k}{\sum_{k \in gr} A^k} \quad (21)$$

$$f_{m,hygro} = \frac{\sum_{k \in gr} A^k}{\sum_{k \in gr} A^k} \quad (22)$$

### 3.2 DESCRIPTION DES ÉLÉMENTS POREUX

De manière factuelle, la prise en compte du modèle simplifié dans un projet COMETH, suppose d'ajouter au niveau de chaque groupe, les objets « parois hygroscopiques » correspondants à chaque élément poreux distinctif. Pour chaque objet ajouté, les paramètres d'entrée à renseigner sont décrits dans la **Figure 14**:

<b>Nom de l'objet</b>			
Name	<input type="text"/>		
<b>Surface de la paroi</b>			
A	<input type="text"/> m²	Min: 0	Max: +infini
<b>Coefficient d'échange superficiel</b>			
beta	<input type="text"/> kg/(Pa.m².s)	Min: 0	Max: +infini
<b>Capacité humide volumique de la couche de surface</b>			
Capacite_b	<input type="text"/> kg/m³	Min: 0	Max: +infini
<b>Perméabilité à la vapeur de la couche de surface</b>			
Permeabilite_b	<input type="text"/> kg/(Pa.m.s)	Min: 0	Max: +infini
<b>Profondeur de pénétration de la couche de surface</b>			
Profondeur_b	<input type="text"/> m	Min: 0	Max: +infini
<b>Capacité humide volumique de la couche profonde</b>			
Capacite_d	<input type="text"/> kg/m³	Min: 0	Max: +infini
<b>Perméabilité à la vapeur de la couche profonde</b>			
Permeabilite_d	<input type="text"/> kg/(Pa.m.s)	Min: 0	Max: +infini
<b>Profondeur de pénétration de la couche profonde</b>			
Profondeur_d	<input type="text"/> m	Min: 0	Max: +infini
<b>Sd du matériau du revêtement de surface (0 s'il n'y a pas de revêtement de surface)</b>			
Sd	<input type="text"/> m	Min: 0	Max: +infini
<b>Humidité relative initiale</b>			
HR_init	<input type="text"/> -	Min: 0	Max: 1
<b>Type de paroi</b>			
Type_paro	<input type="text" value="2 -&gt; Paroi lourde"/> <input type="text" value="1 -&gt; Paroi légère"/> <input type="text" value="2 -&gt; Paroi lourde"/>		
			<input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Ok"/>

**Figure 14 : Paramètres à renseigner dans COMETH pour chaque élément poreux distinctif**

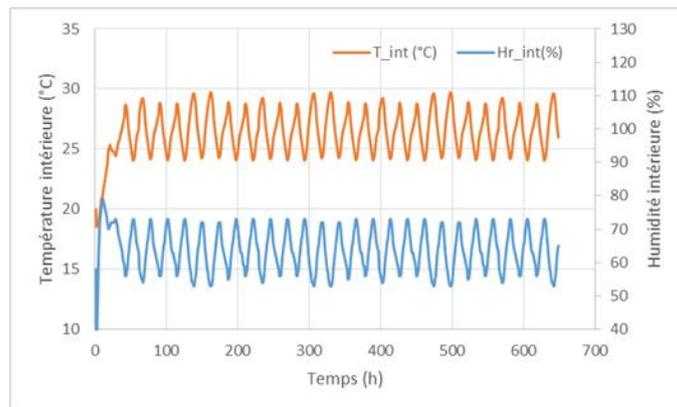
Ainsi, peuvent être distingués la surface d'élément, le coefficient d'échange, les paramètres hygroscopiques équivalents des couches superficielle et profonde calculés préliminairement (épaisseur, capacité hydrique et perméabilité à la vapeur), le coefficient Sd du revêtement en surface si il y a lieu, l'humidité relative initiale de l'élément et le type de paroi (légère/lourde) auquel il se rapporte.

### 3.3 VALIDATION DU MODELE SIMPLIFIE POUR UNE SOLlicitATION TH-E

En complément des comparaisons entre les résultats du modèle simplifié et ceux de l'outil WUFI détaillés dans le chapitre précédent, le même type d'exercice a été réalisé dans le cas particulier des climats intérieurs de la méthode TH-E.

Pour rappel, dans la méthode TH-BCE, le calcul de la température intérieure conventionnelle (Tic) repose sur la mise en place d'un calcul particulier dit « TH-E », qui consiste à soumettre le bâtiment à un climat extérieur conventionnel, caractérisé entre autre par une répétition de 28 jours identiques pour lesquels la température extérieure varie sinusoidalement, l'humidité extérieure absolue est constante et le rayonnement régit par un tableau de valeur [26]. Ce climat extérieur associé à des conventions particulières pour les apports internes entraine un climat intérieur spécifique pour lequel il convient de tester notre modèle simplifié.

Pour ce faire, le climat particulier de la maison individuelle de référence du catalogue construction bois a été utilisé. Le climat extérieur de Nice a été imposé. La **Figure 15** détaille les variations en humidité relative et en température intérieure de cet exemple.



**Figure 15 : Exemple de variation d'humidité relative été de température intérieure selon la méthode TH-E**

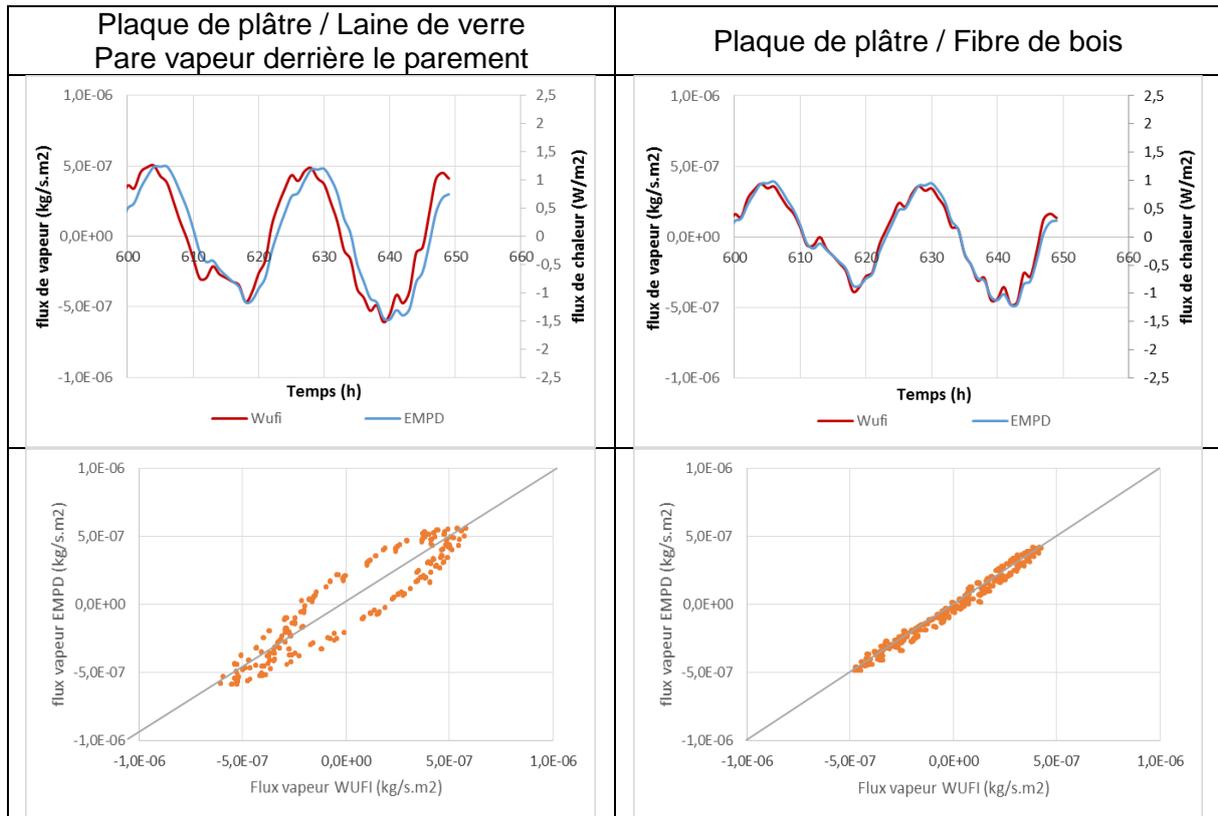
Cette sollicitation a été imposée dans le logiciel WUFI et notre modèle simplifié pour les 6 configurations de parois extérieures proposées dans le chapitre précédent. Compte tenu des niveaux de variation de l'humidité relative intérieure, entre 50 et 80%, les propriétés des matériaux constituant ces configurations, nécessaires au calcul selon le modèle EMPD, ont été prises sur cette plage de variation.

Le **Tableau 8** présente les écarts globaux entre WUFI et notre modèle simplifié pour chacune de ces configurations.

**Tableau 8 : Ecart relatif des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différentes configurations de parois extérieures et un exemple de climat de la méthode TH-E**

Isolant	Laine de verre		Laine de verre		Fibre de bois	
Position pare vapeur	PV derrière parement		PV dans l'isolant			
Parement	Plaque de plâtre	Epicéa	Plaque de plâtre	Epicéa	Plaque de plâtre	Epicéa
Ecart global	35%	23%	29%	23%	13%	20%

La comparaison des flux de vapeur échangés sur la dernière journée dans le cas des deux configurations extrêmes en termes d'écarts par rapport à WUFI est présentée dans la **Figure 16**. La comparaison des résultats sous la forme de nuage de points est également proposée.



**Figure 16 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur la dernière journée de simulation et un climat TH-E pour deux configurations de parois extérieures**

Dans le cas particulier d'une sollicitation de type TH-E, des écarts importants peuvent ici encore apparaître entre le modèle simplifié et un modèle complet comme WUFI. Si les raisons de ces écarts ont pu être explicitées précédemment, il n'en reste pas moins que ceux-ci peuvent nuire à la validité du modèle dans une approche réglementaire.

D'après les figures précédentes, le modèle simplifié donne toutefois des tendances satisfaisantes, qui laissent à penser que le modèle en lui-même est correct mais que c'est dans la caractérisation des paramètres de celui-ci que des améliorations pourraient être apportées. Toutefois, aucun exemple de littérature scientifique n'a proposé jusqu'ici de méthode dans ce but. Une piste de réflexion qui n'a pas pu être explorée dans le cadre de ce projet pourrait être d'appliquer les méthodes utilisées dans le cadre de la norme EN ISO 13786 pour les transferts thermiques aux phénomènes de diffusion de vapeur.

Il a alors été décidé de chercher à identifier les paramètres du modèle qui permettent de fournir une réponse du modèle EMPD à l'échelle de paroi proche des résultats de WUFI.

### 3.4 IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE

L'idée est ici de fournir à l'utilisateur du futur outil réglementaire, deux niveaux de précisions du modèle de tampon hygroscopique : une méthode simplifiée, basée sur la définition des paramètres comme expliquée au premier chapitre, une méthode détaillée, basée sur l'identification des paramètres du modèle.

Cette méthode d'identification a été explorée sur les configurations présentées précédemment. Elle consiste dans un premier temps à réaliser un calcul des flux échangés entre l'ambiance et l'élément poreux avec le logiciel WUFI pour une sollicitation intérieure tirée du calcul COMETH. Puis par un outil d'identification, à définir les paramètres qui permettent de minimiser l'erreur globale entre le modèle simplifié et WUFI.

Dans notre cas, l'outil GENOPT [27] a été utilisé. La fonction à minimiser est la suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sum_i |y_i - x_i|}{\sum_i |y_i|}$$

Avec  $i$  chaque pas de temps de simulation sur la dernière journée,  $x$ , le flux de vapeur au temps  $i$  calculé par le modèle simplifié et  $y$ , celui calculé par WUFI.

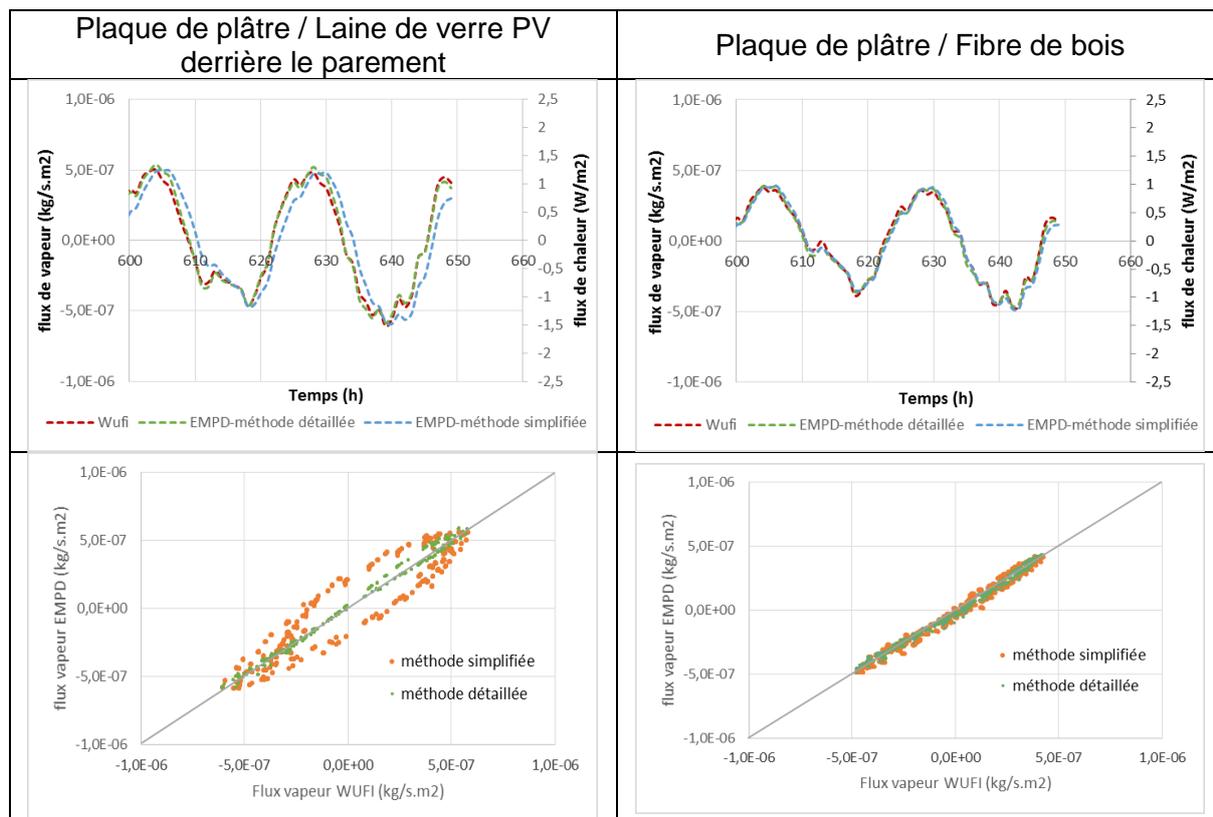
Les variables du problème sont les paramètres équivalents des couches superficielle et profonde :  $d_{eqb}$ ,  $d_{eqd}$ ,  $\xi_{eqb}$ ,  $\xi_{eqd}$ ,  $\mu_{eqb}$ ,  $\mu_{eqd}$ . La méthode de minimisation choisie est la méthode de Hookes & Jeeves.

Les résultats dans le cas de la même sollicitation que précédemment sont fournis dans le Tableau 9. Les résultats par la méthode simplifiée  $y$  figurent également pour permettre la comparaison.

**Tableau 9 : Ecart relatif des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI pour différentes configurations de parois extérieures et un exemple de climat de la méthode TH-E. Comparaison des méthodes utilisées pour définir les paramètres du modèle.**

Isolant	Laine de verre		Laine de verre		Fibre de bois	
	PV derrière parement		PV dans l'isolant			
Parement	Plaque de plâtre	Epicéa	Plaque de plâtre	Epicéa	Plaque de plâtre	Epicéa
« méthode simplifiée »	35%	23%	29%	23%	13%	20%
« méthode détaillée »	8%	5%	6%	5%	8%	5%

Les résultats de l'identification permettent ainsi de réduire l'erreur globale à une valeur de 8% au maximum. La Figure 17 compare les résultats sur la dernière journée de simulation, pour les mêmes cas que précédemment.



**Figure 17 : Comparaison des flux de vapeur calculés selon le modèle EMPD et WUFI sur la dernière journée de simulation et un climat TH-E pour deux configurations de parois extérieures. Comparaison des méthodes utilisées pour définir les paramètres du modèle**

Ces comparaisons montrent que le modèle EMPD permet de reproduire fidèlement les résultats d'une approche complète par un logiciel tel que WUFI à condition que la définition des paramètres soit adéquate. Ainsi, le Tableau 10 compare les paramètres du modèle obtenus par identification (B) et ceux obtenus par la méthode simplifiée (A).

**Tableau 10 : Comparaison des paramètres d'entrée du modèle en fonction de la méthode utilisée pour les définir. A) méthode simplifiée, B) méthode détaillée (identification)**

Isolant	Laine de verre				Laine de verre				Fibre de bois			
	PV derrière parement				PV dans l'isolant							
Position pare vapeur	PV derrière parement				PV dans l'isolant							
Parement	Plaque de plâtre		Epicéa		Plaque de plâtre		Epicéa		Plaque de plâtre		Epicéa	
	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)
$d_{eqb}$	1,2	0,9	0,6	0,4	1,2	1,1	0,6	0,4	1,2	1	0,6	0,5
$d_{eqd}$	1,3	3	1,3	1,8	5,3	4,7	5,3	5,4	5,3	5,3	5,3	3,9
$\zeta_{eqb}$	10,7	14,5	80	149	10,7	13	80	146,7	10,7	10,2	80	132,7
$\zeta_{eqd}$	10,7	2,5	80	50,9	3,1	1,8	20,1	17,1	11,7	5,8	28,7	46,7
$\mu_{eqb}$	8,3	3,8	4,3	4,3	8,3	5	4,3	4,3	8,3	5	4,3	4,3
$\mu_{eqd}$	8,3	14	4,3	6,6	2,8	6,7	1,8	1,7	3,2	4,5	2,2	3,1

D'une manière générale, l'identification aboutie à réduire l'épaisseur de la couche superficielle, augmenter sa capacité hydrique et sa perméabilité à la vapeur. Pour la configuration où le pare vapeur se situe derrière le parement, l'identification prend en compte les matériaux situés après le pare vapeur, en augmentant l'épaisseur de la couche profonde au-delà de l'épaisseur du parement, mais en réduisant les capacités hydriques et la perméabilité de celle-ci par rapport au parement seul.

Pour les configurations avec pare vapeur dans la laine de verre, l'identification valide le fait que le pare vapeur soit une barrière puisque la couche profonde est du même ordre d'épaisseur qu'avec la méthode simplifiée, de même pour le cas fibre de bois où la barrière à la vapeur est dans ce cas l'OSB dans la fibre de bois. Par contre pour ces cas, l'identification conduit à réduire la capacité hydrique et la perméabilité de la couche profonde.

### 3.5 CONCLUSION

Le modèle simplifié de paroi hygroscopique a été codé dans l'environnement COMETH de sorte de pouvoir intervenir dans le bilan de masse par un terme de flux de vapeur échangé et le bilan thermique par un terme de flux de chaleur latente échangé dans la paroi. Chaque élément poreux distinctif est caractérisé par une surface d'échange et les paramètres hygroscopiques des couches superficielles et profondes qui le constituent.

Une comparaison des résultats à l'échelle de la paroi entre le modèle simplifié et WUFI sur un climat intérieur issu de la méthode TH-E a montré que, si les allures étaient proches, des écarts relatifs important sur les flux de vapeur calculés pouvaient subsister.

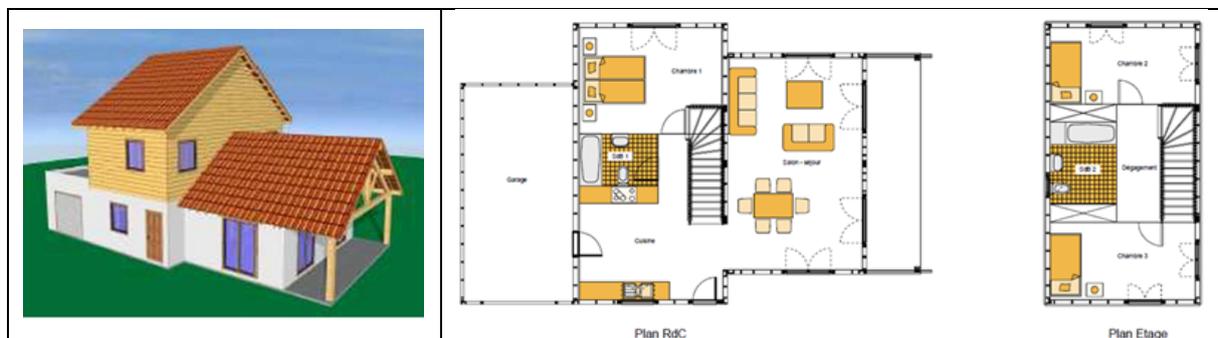
Une nouvelle méthode de définition des paramètres a alors été proposée. Elle consiste à identifier les paramètres d'entrée du modèle en minimisant les écarts entre un calcul WUFI initial et le modèle EMPD. Dans un hypothétique calcul réglementaire dans le futur, celle-ci pourrait être vue comme une méthode détaillée alors que la méthode initiale serait qualifiée de simplifiée. Les résultats ont montré que cette méthode d'identification assurait une bonne précision du modèle avec des écarts globaux relatifs compris entre 5 et 8% pour chaque configuration testée.

#### 4. ETUDE DE SENSIBILITE A L'ECHELLE DU BATIMENT

Une fois le modèle EMPD testé à l'échelle de la paroi et implémenté dans le cœur de calcul COMETH, une étude de sensibilité des impacts de la prise en compte des échanges superficiels de vapeur à l'échelle du bâtiment peut être menée. Elle consiste, pour un bâtiment donné, à réaliser des simulations selon la méthode TH-BCE en testant différents paramètres tels que la nature des parois, leur surface, le climat etc... de sorte de quantifier l'impact du modèle de tampon hygroscopique sur les indicateurs réglementaires.

##### 4.1 CHOIX DU BÂTIMENT DE RÉFÉRENCE

Dans un souci de continuité par rapport au reste du projet dans lequel a été menée cette étude, il a été choisi de conserver la maison individuelle de référence du catalogue construction bois comme bâtiment d'étude. La **Figure 18** donne un aperçu de sa géométrie.



**Figure 18 : Plan du bâtiment de référence utilisé pour l'étude de sensibilité**

Dans le cadre du WP1 du projet dans lequel s'inscrit notre étude, de nombreuses configurations de bâtiments (72 au total) avaient été élaborées sur la base du cas de référence cité ci-dessus, en modifiant la nature de l'enveloppe, en supprimant l'étage ou en modifiant le type de comble. Parmi celles-ci, il a été choisi d'en retenir 4 : les cas n°1, n°13, n°25 et n°49.

**Tableau 11 : Descriptif des configurations de bâtiments retenues**

	MI n°1	MI n°13	MI n°25	MI n°49
Nombre de niveaux	1 niveau	1 niveau	2 niveaux	2 niveaux
Type de combles	rampants	perdus	rampants	Perdus
Volume total (m <sup>3</sup> )	272	183	377	286
Surfaces planchers (m <sup>2</sup> )	75	75	112	112
Surface verticale murs extérieure (m <sup>2</sup> )	95	71	181	137
Surface verticale partitions intérieures (m <sup>2</sup> )	114	76	185	145
Surface plafond (m <sup>2</sup> )	84	75	121	112
Surface totale d'échange (m <sup>2</sup> )	368	297	599	505
Ratio vitrage (%)	22,4	22,4	18,5	18,4
Inertie quotidienne	Moyenne	Moyenne	Très légère	Très légère
Inertie séquentielle	Très légère	Légère	Très légère	Très légère

Leur description est détaillée dans le livrable du WP1 [28]. Elles possèdent la même enveloppe et se distinguent par la présence ou non d'un étage et le type de toiture : combles rampants ou combles perdus.

Absente dans le cadre de l'étude thermique, mais essentielle lorsque l'on souhaite prendre en compte les échanges entre ambiance intérieure et surfaces hygrosco-piques, la description des partitions intérieures (cloisons, portes) a dû être ajoutée en se basant sur les plans donnés dans le catalogue construction bois. La surface d'échange qu'elles apportent est du même ordre de grandeur que celle des murs extérieurs. Le Tableau 11 reprend le métré pour chaque configuration. Les niveaux d'inertie quotidienne et séquentielle y sont également indiqués.

Ces configurations se distinguent finalement par leurs volumes et leurs surfaces d'échange avec l'ambiance, ainsi que par leur inertie (quotidienne principalement). Les maisons de plain-pied ont une inertie qualifiée de moyenne au sens de la réglementation thermique, tandis que les maisons à deux niveaux ont une inertie quotidienne très légère.

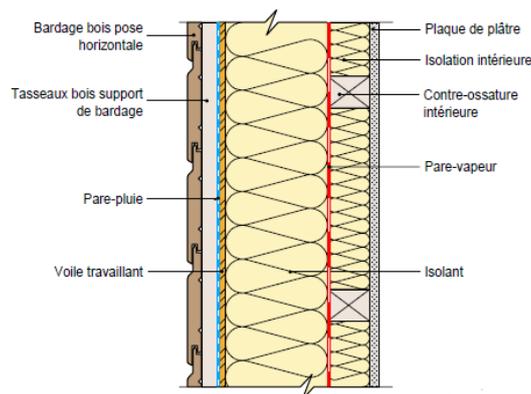
## 4.2 VARIABLES DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Outre les configurations de bâtiments présentées précédemment, l'étude de sensibilité portera sur l'hygrosco-picité des parois vis-à-vis de l'ambiance, la surface des parois prises en compte, la prise en compte ou non des éléments d'ossature, la présence d'un revêtement de surface et le climat.

### 4.2.1 HYGROSCOPICITÉ DES PAROIS

Trois niveaux d'hygrosco-picité des parois ont été retenus. Ils ont été choisis en s'inspirant des compositions des parois de l'étude thermique, en modifiant la nature des matériaux qui les constituent.

Ainsi, les murs extérieurs sont composés d'une ossature principale de 145x45 mm + 40 mm d'isolant intérieur. Un pare-vapeur est présent derrière la surisolation comme indiqué en rouge sur la **Figure 19**. Pour rappel seuls les matériaux présents entre l'ambiance et le pare vapeur sont considérés par notre modèle simplifié.



**Figure 19 : Vue en coupe des murs extérieurs**

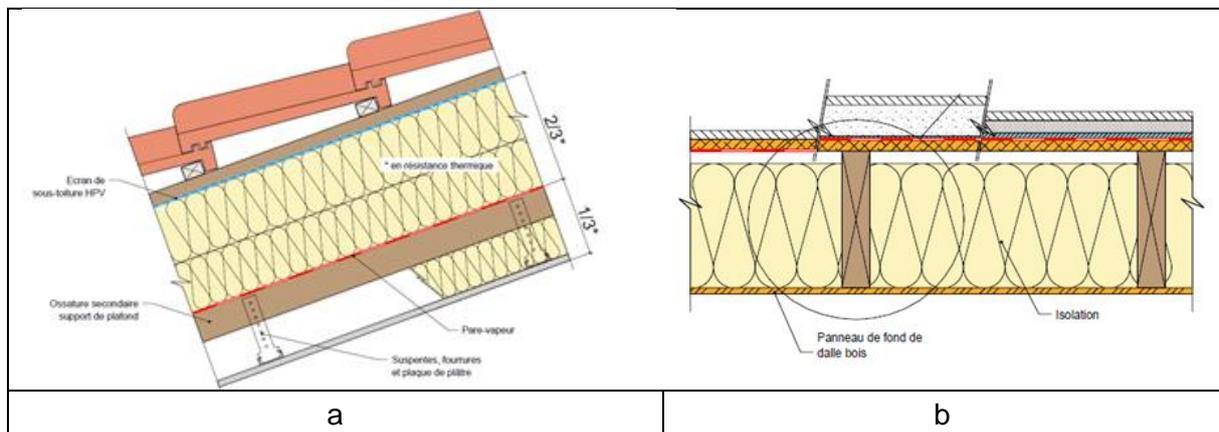
Les murs intérieurs sont, au même titre que ceux étudiés dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, supposés être constitués d'un parement et d'un isolant de 5 cm entre ossature. Les portes, supposées en épicéa sont également prises en compte. Pour rappel, dans le cas des éléments poreux intérieurs, la présence d'un axe de symétrie avec flux nul au centre de la paroi implique que seuls les matériaux situés entre l'ambiance et le milieu de la paroi sont considérés dans le modèle simplifié.

Compte tenu de ces approximations, le **Tableau 12** décrit les compositions de chaque type de paroi vues par notre modèle simplifié pour 3 niveaux d'hygroscopicité différents.

**Tableau 12 : Compositions des parois verticales au regard du modèle EMPD, pour différents niveaux d'hygroscopicité**

Niveau d'hygroscopicité	Mur extérieur		Mur intérieur		Porte
Faible	Plaque de plâtre 13 mm	Laine de verre 40 mm	Plaque de plâtre 13 mm	Laine de verre 25 mm	Epicéa 15 mm
Moyen	Plaque de plâtre 13 mm	Fibre de bois 40 mm	Plaque de plâtre 13 mm	Fibre de bois 25 mm	Epicéa 15 mm
Elevé	Epicéa 13 mm	Fibre de bois 40 mm	Epicéa 13 mm	Fibre de bois 25 mm	Epicéa 15 mm

Les planchers hauts sont supposés identiques quel que soit le type de comble retenu pour la configuration. Il est composé d'un isolant entre chevron de 220x45 mm avec doublage intérieur de 100mm. Un pare-vapeur est présent derrière la surisolation comme présenté en rouge sur la **Figure 20a**.



**Figure 20 : Vue en coupe des parois horizontales. a) plafond b) plancher**

Le plancher bas est supposé de type solive bois comme indiqué sur la **Figure 20b**. La nature du plancher distingue les différents niveaux d'hygroscopicité et la position du pare-vapeur. Celui-ci est positionné sous la chape en présence de chape, ou sous le plancher OSB en l'absence de chape. Ainsi, du fait de la présence d'un pare-vapeur et au même titre que pour les murs extérieurs, les compositions de ces parois vues par le modèle simplifié pour 3 niveaux d'hygroscopicité différents sont réduites à celle décrites dans le **Tableau 13**.

**Tableau 13 : Compositions des parois horizontales au regard du modèle EMPD, pour différents niveaux d'hygroscopicité**

Niveau d'hygroscopicité	Plancher haut		Plancher bas	
Faible	Plaque de plâtre 13 mm	Laine de verre 100 mm	OSB 18 mm	
Moyen	Plaque de plâtre 13 mm	Fibre de bois 100 mm	Chape béton 50 mm	
Elevé	Epicéa 13 mm	Fibre de bois 100 mm	Parquet Chêne 14 mm	Chape béton 50 mm

Les propriétés hygroscopiques des matériaux retenus pour caractériser les différentes parois sont détaillées dans le **Tableau 14**. La capacité hydrique est fournie pour deux plages de variation en humidité relative : [30-50] et [50-80%].

**Tableau 14 : Propriétés hygroscopiques des matériaux composants les différentes parois pour deux plages de variation en humidité relative**

	Plaque de plâtre	Epicéa	Laine de verre	Fibre de bois	OSB	Béton (chape)	Chêne (parquet)
$\xi_{[30-50\%]}$ (kg/m <sup>3</sup> )	7,2	50	0,6	6,2	50	70	107
$\xi_{[50-80\%]}$ (kg/m <sup>3</sup> )	10,7	80	0,7	12	60	70	150
$\mu$ (-)	8,3	4,3	1	1,5	175	100	8

#### 4.2.2 OSSATURES

Les bâtiments à base de bois se caractérisent par la présence de nombreuses ossatures et contre ossatures susceptibles d'échanger de la vapeur. Ainsi, la prise en compte ou non de ces ossatures sera quantifiée dans l'étude de sensibilité. Pour ce faire, les surfaces de parois courantes seront distinguées des surfaces de parois au droit des ossatures. Un rapport de 10% de surface d'ossature par rapport à la surface totale de parois est appliqué.

**Tableau 15 : Compositions des parois au droit des ossatures au regard du modèle EMPD, pour différents niveaux d'hygroscopicité**

Niveaux d'hygroscopicité	Faible	Moyen	Elevé
Ossature Mur intérieur	Plaque de plâtre 13 mm	Plaque de plâtre 13 mm	Epicéa 13 mm
	Epicéa 25 mm	Epicéa 25 mm	Epicéa 25 mm
Contre ossature mur extérieur	Plaque de plâtre 13 mm	Plaque de plâtre 13 mm	Epicéa 13 mm
	Epicéa 40 mm	Epicéa 40 mm	Epicéa 40 mm
Ossature secondaire plancher haut (rampant)	Plaque de plâtre 13 mm	Plaque de plâtre 13 mm	Epicéa 13 mm
	Laine de verre 40mm	Fibre de bois 40mm	Fibre de bois 40mm
	Epicéa 60 mm	Epicéa 60 mm	Epicéa 60 mm

La composition des parois au droit des ossatures dépend du niveau d'hygroscopicité et du type de paroi. Ainsi, dans le cas des murs intérieurs l'ossature principale située derrière le parement est prise jusqu'à la moitié de l'épaisseur de la paroi. Pour les murs extérieurs, la présence du pare vapeur implique que

seules des contre ossatures de 40 mm sont retenues (**Figure 19**). Enfin pour le plancher haut, seule l'ossature secondaire est prise en compte (**Figure 20a**), elle est séparée du parement par une couche d'isolant. La composition des parois au droit des ossatures est détaillée dans le **Tableau 15**. Les ossatures sont supposées en épicea.

#### 4.2.3 SURFACES D'ÉCHANGE

La surface d'échange entre l'ambiance et les éléments poreux est également une variable de l'étude de sensibilité. Il a été ici décidé de prendre en compte seulement les parois verticales dans le calcul ou l'ensemble des parois, planchers et plafonds compris. Les surfaces mises en jeu dans chaque cas sont détaillées dans le **Tableau 16** pour chaque configuration de bâtiment.

**Tableau 16 : Surfaces d'échanges mises en jeu pour chaque configuration de bâtiments**

	MI n°1	MI n°13	MI n°25	MI n°49
Surfaces verticales seules (m <sup>2</sup> )	209	147	366	282
Surfaces totales (m <sup>2</sup> )	368	297	599	505

#### 4.2.4 REVÊTEMENT DE SURFACE

Le revêtement de surface, non renseigné dans les études thermiques peut avoir une incidence forte sur les échanges de vapeur. Il a donc été choisi ici de prendre en compte son influence. Ainsi les simulations seront menées alternativement pour des cas de parois brutes, sans revêtement et des cas de parois revêtues. Dans ce cas, un revêtement de type peinture acrylique avec un Sd de 0.2 m est appliqué pour les parois verticales et les plafonds, un revêtement de type sol PVC avec un Sd de 2m est appliqué pour les planchers.

#### 4.2.5 CLIMATS

Enfin, deux climats extérieurs de la méthode TH-BCE seront appliqués aux simulations, représentatifs de la ville de Nice (H3) et de Nancy (H1b).

#### 4.2.6 PLAN DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Les variables présentées précédemment seront appliquées tour à tour à chaque simulation selon le plan détaillé dans le **Tableau 17** pour le climat de Nice. Le même plan est appliqué pour le climat de Nancy, les numéros de simulation s'incrémentant.

**Tableau 17 : Plan de l'étude de sensibilité pour le climat de Nice**

N° simulation	Niveau d'hygroscopicité des parois	Prise en compte des ossatures	Nature des surfaces d'échanges	Valeur Sd du revêtement intérieur	Climat
1	Faible	Sans	Verticales	0	Nice
2	Moyen	Sans	Verticales	0	Nice
3	Fort	Sans	Verticales	0	Nice
4	Faible	Avec	Verticales	0	Nice
5	Moyen	Avec	Verticales	0	Nice
6	Fort	Avec	Verticales	0	Nice
7	Faible	Sans	Toutes	0	Nice
8	Moyen	Sans	Toutes	0	Nice
9	Fort	Sans	Toutes	0	Nice
10	Faible	Avec	Toutes	0	Nice
11	Moyen	Avec	Toutes	0	Nice
12	Fort	Avec	Toutes	0	Nice
13	Faible	Sans	Verticales	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
14	Moyen	Sans	Verticales	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
15	Fort	Sans	Verticales	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
16	Faible	Avec	Verticales	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
17	Moyen	Avec	Verticales	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
18	Fort	Avec	Verticales	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
19	Faible	Sans	Toutes	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
20	Moyen	Sans	Toutes	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
21	Fort	Sans	Toutes	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
22	Faible	Avec	Toutes	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
23	Moyen	Avec	Toutes	Sd=0,2m ou 2 m	Nice
24	Fort	Avec	Toutes	Sd=0,2m ou 2 m	Nice

Au total, 48 simulations sont réalisées et traitées pour les 4 configurations de maisons individuelles retenues.

En complément, pour permettre la comparaison des différents cas, une simulation sans prise en compte des parois hygroscopiques est réalisée pour les deux climats retenus. Les paramètres de ces simulations sont détaillés dans le **Tableau 18**.

**Tableau 18 : Paramètres des simulations de référence (sans prise en compte des échanges de vapeur)**

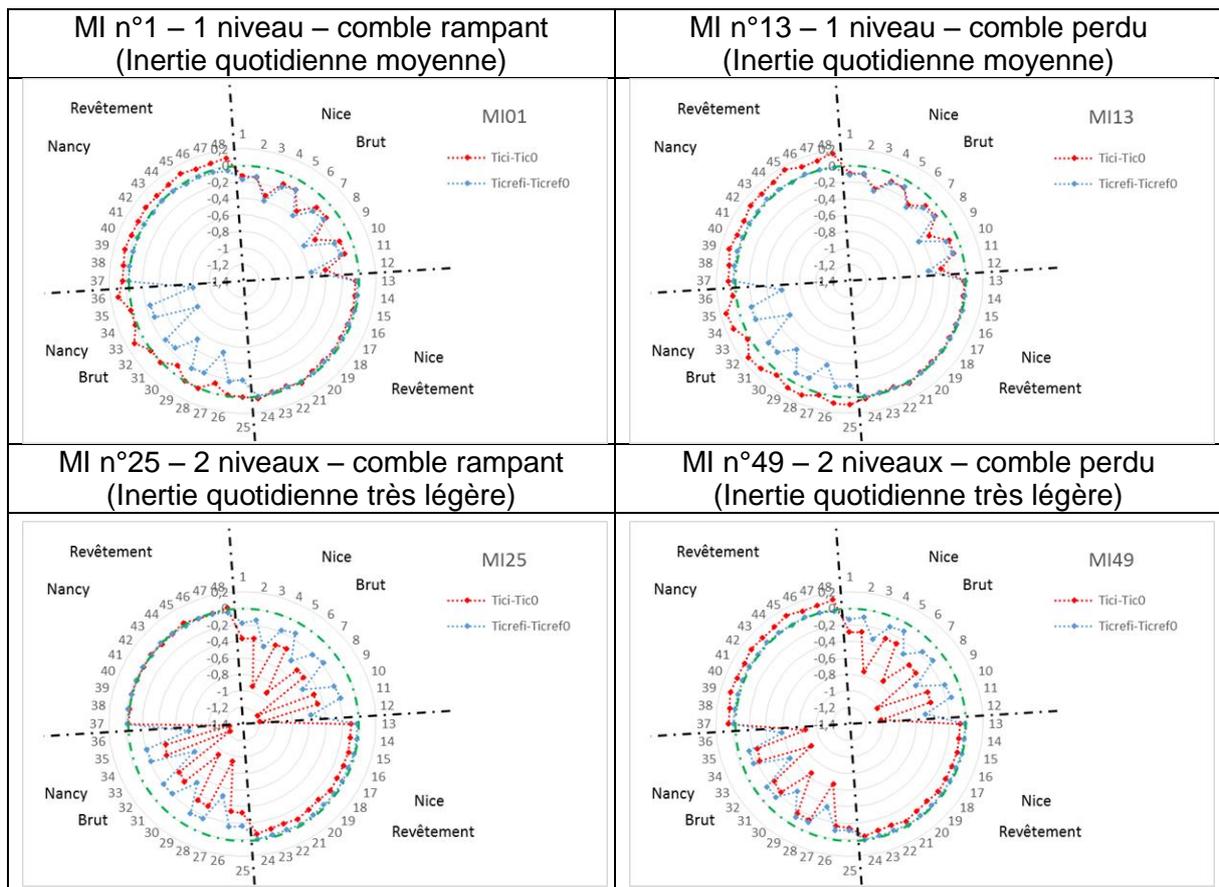
N° simulation	Niveau d'hygroscopicité des parois	Prise en compte des ossatures	Nature des surfaces d'échanges	Valeur Sd du revêtement intérieur	Climat
49	Aucune paroi	-	-	-	Nice
50	Aucune paroi	-	-	-	Nancy

### 4.3 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Le projet s'appliquant à la thermique d'été, l'étude de sensibilité est menée en premier lieu selon la méthode TH-E pour quantifier l'impact sur la Tic et la Tic<sub>ref</sub>. De sorte de prévoir les futures réglementations thermiques, le calcul selon la méthode TH-D, qui permet le calcul de la DIES, un indicateur pressenti pour devenir le futur indicateur réglementaire du confort d'été sera également réalisé. Enfin, l'étude sera également appliquée à la méthode TH-B pour calculer l'impact sur l'indicateur BBio. A chaque méthode correspond un climat extérieur particulier et donc des sollicitations intérieures différentes.

#### 4.3.1 MÉTHODE TH-E (TIC ET TIC<sub>REF</sub>)

Les résultats de l'étude de sensibilité selon la méthode TH-E sont décrits sur les diagrammes de la **Figure 21** représentant les solutions de chaque simulation indicées selon le **Tableau 17**.



**Figure 21 : Radars des impacts sur Tic et Ticref par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour chaque simulation et chaque configuration de bâtiment**

Les impacts sur la Tic et la  $T_{ic,ref}$  sont présentés par le biais de l'écart par rapport à la solution sans prise en compte du phénomène de tampon hygroscopique (notée  $T_{ic0}$  et  $T_{ic,ref0}$ ). Les écarts négatifs indiquent une réduction de l'indicateur par rapport au cas sans prise en compte des transferts de vapeur. Un écart nul est représenté par le cercle pointillé vert. Les quartiers représentés par les lignes pointillées noires regroupent les simulations par climat et par type de revêtement intérieur.

D'après ces simulations, les impacts sur la Tic peuvent varier entre  $+0.2^\circ$  et  $-1.2^\circ\text{C}$ . En parallèle, la  $T_{ic,ref}$  subit également des réductions variant entre 0 et  $-0,8^\circ\text{C}$ .

En préambule, rappelons que dans le cas particulier de la méthode TH-E, le climat extérieur est un climat conventionnel, correspondant à 28 jours successifs identiques. L'humidité absolue de l'air extérieur est constante, et une surventilation par ouverture de fenêtre s'exerce lorsque la température intérieure atteint une valeur seuil. De ce fait, en présence de surventilation, l'humidité absolue intérieure est quasi constante, la variation de température des parois et de l'ambiance est donc le principal moteur des échanges de vapeur. Au contraire, en l'absence de surventilation, les échanges sont générés par l'action couplée de la variation de l'humidité absolue intérieure du fait des apports internes et de la variation de la température ; ces phénomènes moteurs pouvant avoir des effets antagonistes sur les échanges de vapeur entre l'ambiance et les parois. Or, pour les cas présentés plus haut, la surventilation est constamment appliquée dans le cas du climat de Nice, tandis qu'elle est intermittente dans le cas de Nancy : coupée pendant quelques heures au petit matin. Pour cette raison nous analyserons les résultats pour les deux climats de façon séparée.

#### 4.3.1.1 Analyses des simulations n°1 à n°12 (Nice sans revêtement de surface)

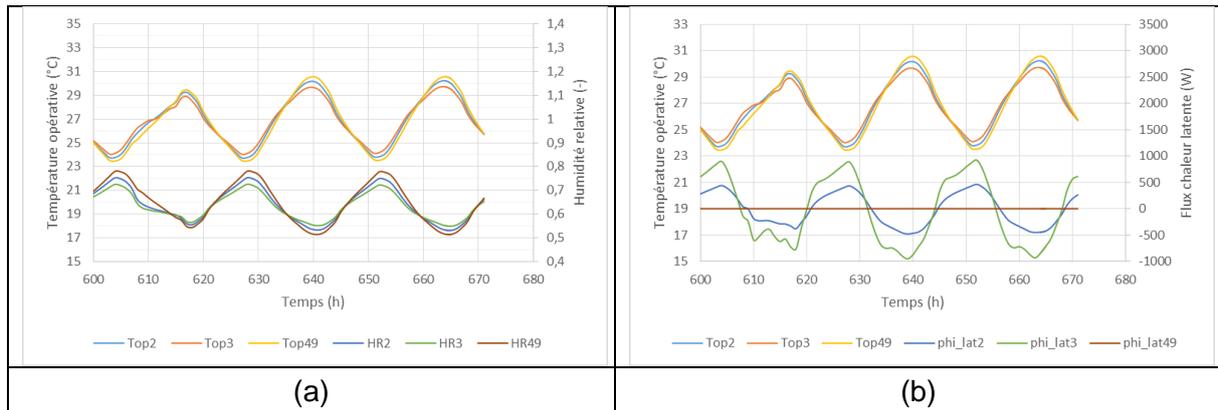
Attardons nous premièrement sur les cas du climat de Nice, pour des parois brutes, sans revêtement de surface (quartier haut gauche des radars de la **Figure 21**; simulations n°1 à 12).

Ainsi comme expliqué ci-avant, si des réductions de la Tic peuvent être observées dans certains cas, celles-ci s'accompagnent toujours d'une réduction de la  $T_{ic,ref}$  simultanément. L'impact sur la  $T_{ic,ref}$  ( $-0,8^\circ\text{C}$  au maximum) est même plus important que celui sur la Tic ( $-0.4^\circ\text{C}$  au maximum) dans le cas des configurations avec inertie moyenne. En second lieu, les impacts sur la Tic sont nettement plus élevés pour les configurations à inertie légère ( $-1,2^\circ\text{C}$  au maximum) que pour les configurations à inertie moyenne ( $-0,4^\circ\text{C}$  au maximum). Comme expliqué plus haut, les variations de température sont ici le principal moteur des échanges : plus elles sont grandes, plus les effets sont importants.

Parmi les cas simulés, l'incidence de l'hygroscopicité des parois et même exclusivement des parements est essentielle : réduction de Tic de  $-1.2^\circ\text{C}$  au maximum pour un parement épicea (hygroscopicité forte) contre une baisse de  $-0,2^\circ\text{C}$  au maximum pour les cas avec parement en plaque de plâtre (hygroscopicité faible et moyenne). L'hygroscopicité de l'isolant derrière le parement n'a quasi aucun effet sur le Tic. C'est par ailleurs ce qui explique pourquoi l'impact de la prise en compte ou non des ossatures (située derrière le parement) est quasi nulle. Enfin, comme attendu, la surface d'échange impacte sur le résultat, l'effet étant tout de même beaucoup plus marqué pour les configurations avec inertie légère.

Ces résultats sont tout de même à mesurer compte tenu du fait que le climat dans la méthode TH-E consiste en une répétition de 28 jours identiques. La période de variations des potentiels moteurs est uniquement journalière (pas d'effet annuel), seule la couche superficielle, majoritairement composée de parement, est activée sur cette période.

La **Figure 22**, compare les variations en température opérative, humidité relative de l'ambiance et les flux de chaleur latente échangés pour une maison à inertie légère (MI n°25) avec le climat de Nice pour 3 cas : le cas sans paroi hygroscopique (n°49) et deux cas d'hygroscopicité différente : moyenne (n°2) et forte (n°3). Les 3 dernières journées de la simulation sont représentées.



**Figure 22 : Comparaison des résultats pour 3 simulations (n°2, n°3 et n°49) pour la configuration de bâtiment à inertie quotidienne légère (MI n°25). a) température et humidité relative b) température et flux de chaleur latente**

Ces tracés montrent bien l'amortissement en température et en humidité relative apporté par la prise en compte du tampon hygroscopique. Les flux de chaleur latente absorbés (-) ou désorbés (+) atteignent jusqu'à 1000W pour le cas avec hygroscopicité forte des parois (simulation n°2), contre 500W pour une hygroscopicité moyenne (simulation n°3). La paroi absorbe la chaleur aux moments les plus chauds de la journée pour la désorber la nuit.

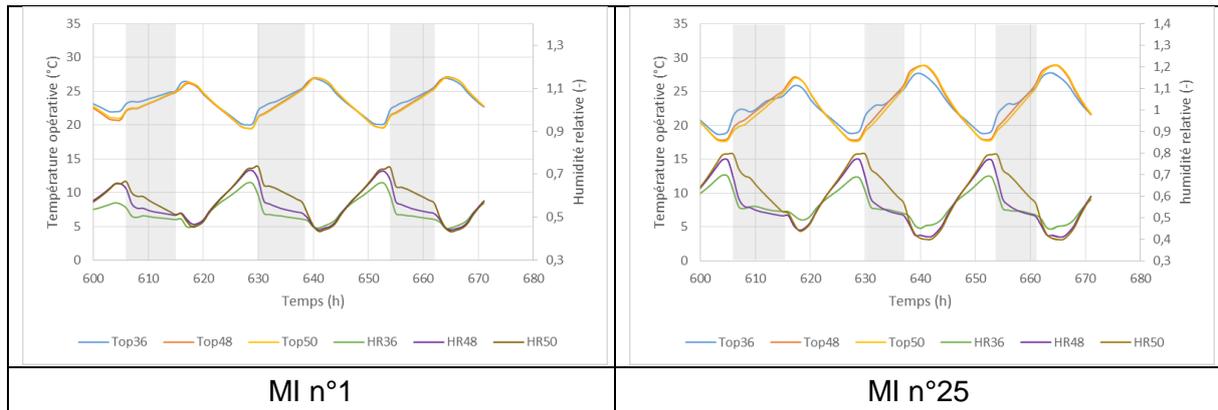
#### 4.3.1.2 Analyse des simulations n°13 à n°24 (Nice avec revêtement de surface)

En présence d'un revêtement de surface (quartier bas gauche des radars de la **Figure 21**; simulations n°13 à 24), les effets du tampon hygroscopique sont très fortement réduits quelles que soient les configurations, avec une réduction quasi nulle pour les maisons avec inertie moyenne et une baisse d'environ 0,1°C au maximum pour les maisons à inertie légère. La présence d'un revêtement stoppe les échanges de vapeurs sur une période journalière.

#### 4.3.1.3 Analyses des simulations n°25 à n°48 (Nancy)

Dans le cas du climat de Nancy cette fois-ci (moitié droite des radars de la **Figure 21**; simulations n°25 à 48), les effets de la prise en compte des parois hygroscopiques sont plus délicats à mesurer, l'intermittence de la surventilation en étant certainement la cause.

Ainsi, les **Figure 23** représentent les variations en température opérative et humidité relative de l'ambiance pour les 3 dernières journées de simulation dans le cas du climat de Nancy pour deux configurations de maisons individuelles d'inertie différente (MI n°1 et MI n°25). 3 types de simulation sont comparés, sans paroi hygroscopique (n°50), avec des parois sans revêtement et une hygroscopicité forte (n°36) et avec des parois d'hygroscopicité forte en présence d'un revêtement de surface (n°48). Les éléments grisés indiquent les périodes de la simulation où la surventilation par ouverture des fenêtres est absente.



**Figure 23 : Comparaison des résultats pour 3 simulations (n°36, n°48 et n°50) pour deux configurations de bâtiment d'inertie quotidienne différentes (MI n°1 et MI n°25)**

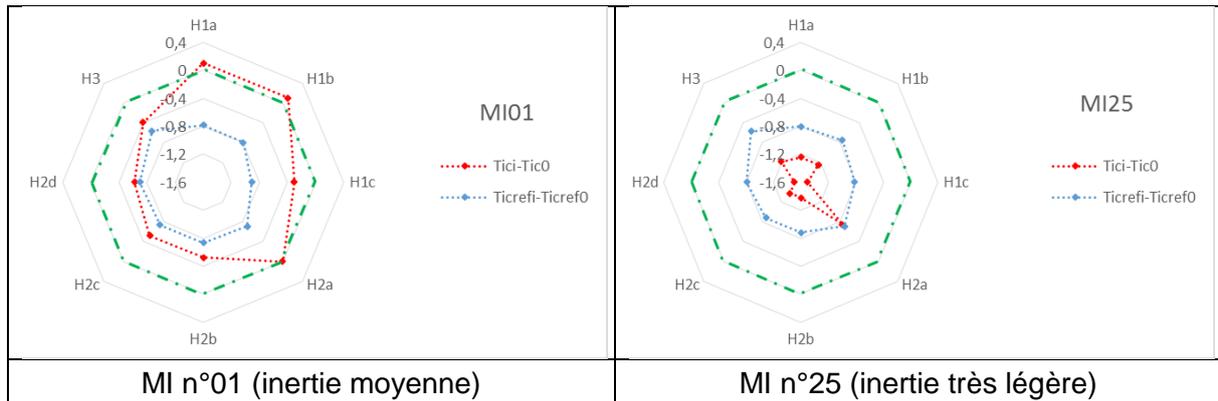
En présence de surventilation, en dehors des zones grisées, les variations de température et d'humidité relative suivent le même comportement que dans le cas du climat de Nice décrit précédemment avec un amortissement pour les cas les plus hygroscopiques. Par contre, lorsque la fermeture des fenêtres intervient, les apports d'humidité par l'air extérieurs étant sensiblement réduits, l'humidité relative chute brusquement, les parois imposent alors leur humidité à l'ambiance, les flux échangés sont alors réduits, et gouvernés de manière antagoniste par les apports internes d'une part et les variations de température d'autre part.

En parallèle, la température augmente brusquement à la fermeture des fenêtres par l'arrêt de la surventilation d'une part, mais aussi du fait de l'inertie du phénomène d'absorption de chaleur latente qui augurait au pas de temps précédent, résultant déjà en un niveau de température plus élevé en présence de parois hygroscopique que sans. Des lors, les échanges en absence de surventilation étant plus faibles, l'air intérieur peine à se refroidir tant et si bien qu'il se peut, selon la durée de fermeture de fenêtre et l'amplitude de variation de la température intérieure, que celle-ci soit plus élevée au moment le plus chaud de la journée en présence de parois hygroscopiques que sans.

C'est la raison pour laquelle, pour le climat de Nancy, peuvent être observés des Tic plus élevées en présence de parois hygroscopiques que sans. C'est notamment le cas pour les configurations de maisons individuelles où l'inertie est moyenne avec des augmentations de Tic de l'ordre de 0,1°C. Lorsque les amplitudes de variations de température sont plus élevées, comme c'est le cas pour les maisons d'inertie légère ou pour le calcul de la  $T_{ic,ref}$ , l'hygroscopicité des parois implique une baisse de la Tic jusqu'à -1,2°C et de la  $T_{ic,ref}$  jusqu'à -0,8°C. L'impact du revêtement est ici encore essentiel, impliquant plutôt des légères hausse de température (+0,1°C), quel que soit le type de paroi.

#### 4.3.1.4 Influence du climat

L'influence du climat et de l'intermittence possible de l'ouverture de fenêtre étant prépondérante, il a été décidé de comparer, pour le cas le plus favorable à savoir celui où l'hygroscopicité de la paroi est forte et sans revêtement de surface, les impacts de la prise en compte des effets hygroscopiques pour toutes les zones climatiques de la réglementation thermique. Les résultats sont présentés sur la **Figure 24** pour deux inerties de maison individuelles différentes (MI n°1 et MI n°25).



**Figure 24 : Radars des impacts sur Tic et Ticref par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour le cas le plus favorable et chaque configuration de bâtiment en fonction de la zone climatique**

Les impacts de la prise en compte des échanges hygroscopiques sur la  $Tic_{ref}$  sont à peu près constants quel que soit le type de climat et de maison, avec une réduction comprise entre  $-0,7^{\circ}\text{C}$  et  $-0,9^{\circ}\text{C}$ . Par contre pour la Tic, l'inertie de la maison impacte fortement. Pour une maison d'inertie moyenne, les parois hygroscopiques génèrent une augmentation de  $+0,1^{\circ}\text{C}$  pour les climats H1a et H1b, et une réduction comprise entre  $-0,3^{\circ}\text{C}$  pour le climat H1c et  $-0,7^{\circ}\text{C}$  pour le climat H2d. La valeur nulle pour le climat H2a ne doit pas ici être prise en compte car il s'avère que la température opérationnelle n'atteint jamais  $26^{\circ}\text{C}$  pour ce cas particulier, la Tic est donc forcée à  $26^{\circ}$  qu'il y ait ou non des parois hygroscopiques à prendre en compte. Dans le cas de la maison à inertie très légère, les réductions de la Tic varient entre  $-0,8^{\circ}\text{C}$  pour le climat H2a et  $-1,5^{\circ}\text{C}$  pour les climats H2d et H1c.

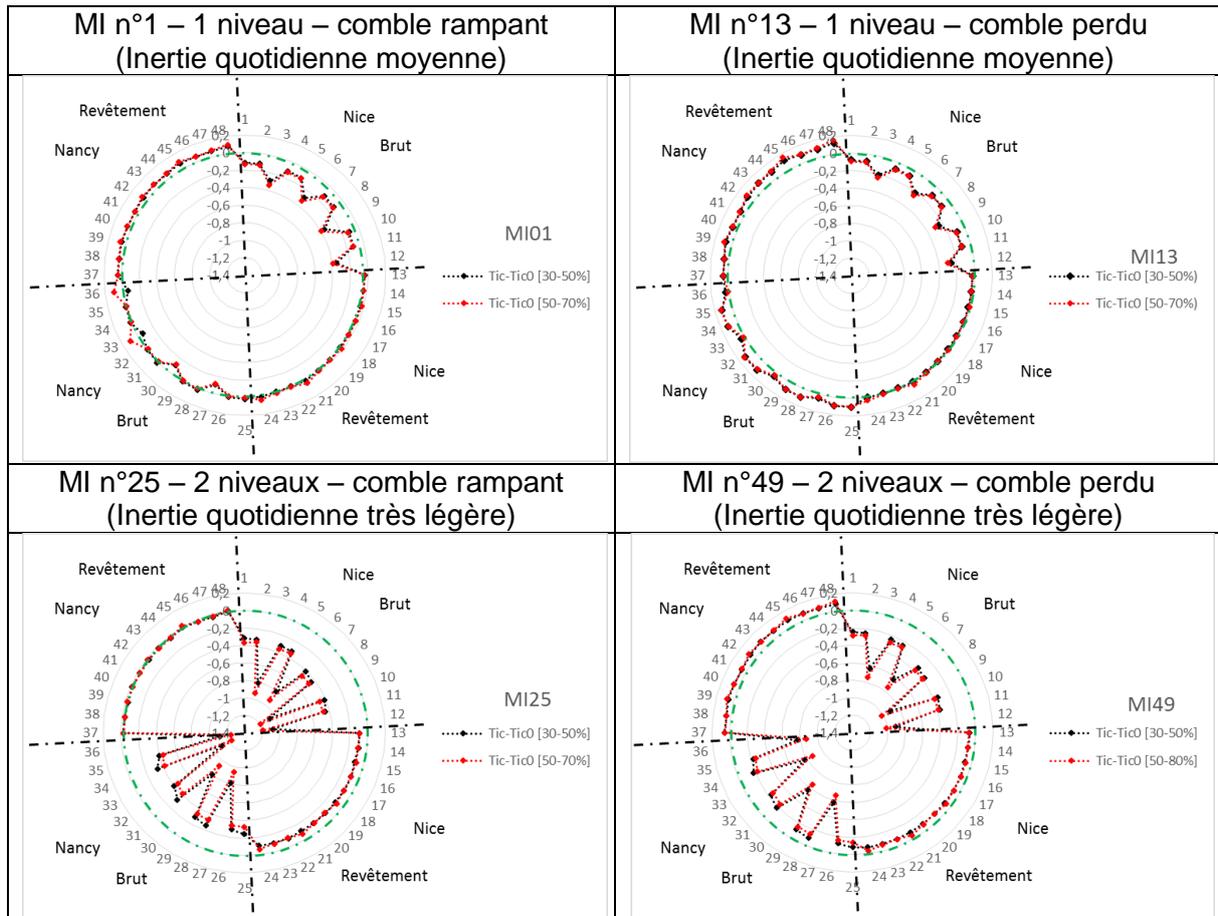
#### 4.3.1.5 Influence de la précision des données d'entrée

Comme expliqué dans les chapitres précédents, la définition des propriétés des couches superficielle et profonde dépend d'une part de la plage de variation d'humidité relative choisie initialement et de la méthode utilisée pour définir ces propriétés équivalentes de chaque couche. Il convient donc d'évaluer les impacts des hypothèses choisies sur le calcul à l'échelle du bâtiment.

La **Figure 25** compare pour chaque simulation réalisée et chaque configuration de maison individuelle, l'influence de la plage de variation en humidité relative choisie pour le calcul de la capacité hydrique de chaque constituant de l'élément poreux (pente de la courbe de sorption sur une plage de variation donnée). Deux plages de variation sont évaluées : [30-50%] et [50-70%]. Seul l'impact sur la Tic est ici représenté.

Les résultats montrent que quelle que soit la configuration, l'impact du choix initial de la plage de variation en humidité relative permettant le calcul de la capacité hydrique des matériaux constituant des parois, est faible, avec un écart inférieur à  $0,15^{\circ}\text{C}$  sur la réduction de la Tic, l'impact étant le plus élevé pour les cas générant les plus fortes réductions de Tic.

L'impact du choix de la méthode (simplifiée ou détaillée) à l'échelle du bâtiment permet d'évaluer l'incidence des écarts engendrés par le modèle simplifié à l'échelle de l'élément poreux par rapport aux simulations WUFI sur le bilan global du bâtiment. En effet, comme nous avons pu le voir dans le second chapitre, la méthode simplifiée génère à l'échelle de l'élément poreux des écarts élevés par rapport à WUFI sur le calcul des flux échangés, tandis que la méthode détaillée, par identification des paramètres du modèle permet de quasiment coller aux résultats de WUFI.



**Figure 25 : Comparaison des impacts du choix de la plage de variation d'humidité relative intérieure pour le calcul de la capacité hydrique des matériaux sur la Tic pour chaque simulation et chaque configuration de bâtiment**

Ainsi, la méthode détaillée a été appliquée pour seulement quelques cas parmi les simulations présentées, correspondant aux simulations n°3 et n°27 (parois verticales seules, hygroscopicité forte, sans ossature, sans revêtement surfacique, climats de Nice et Nancy).

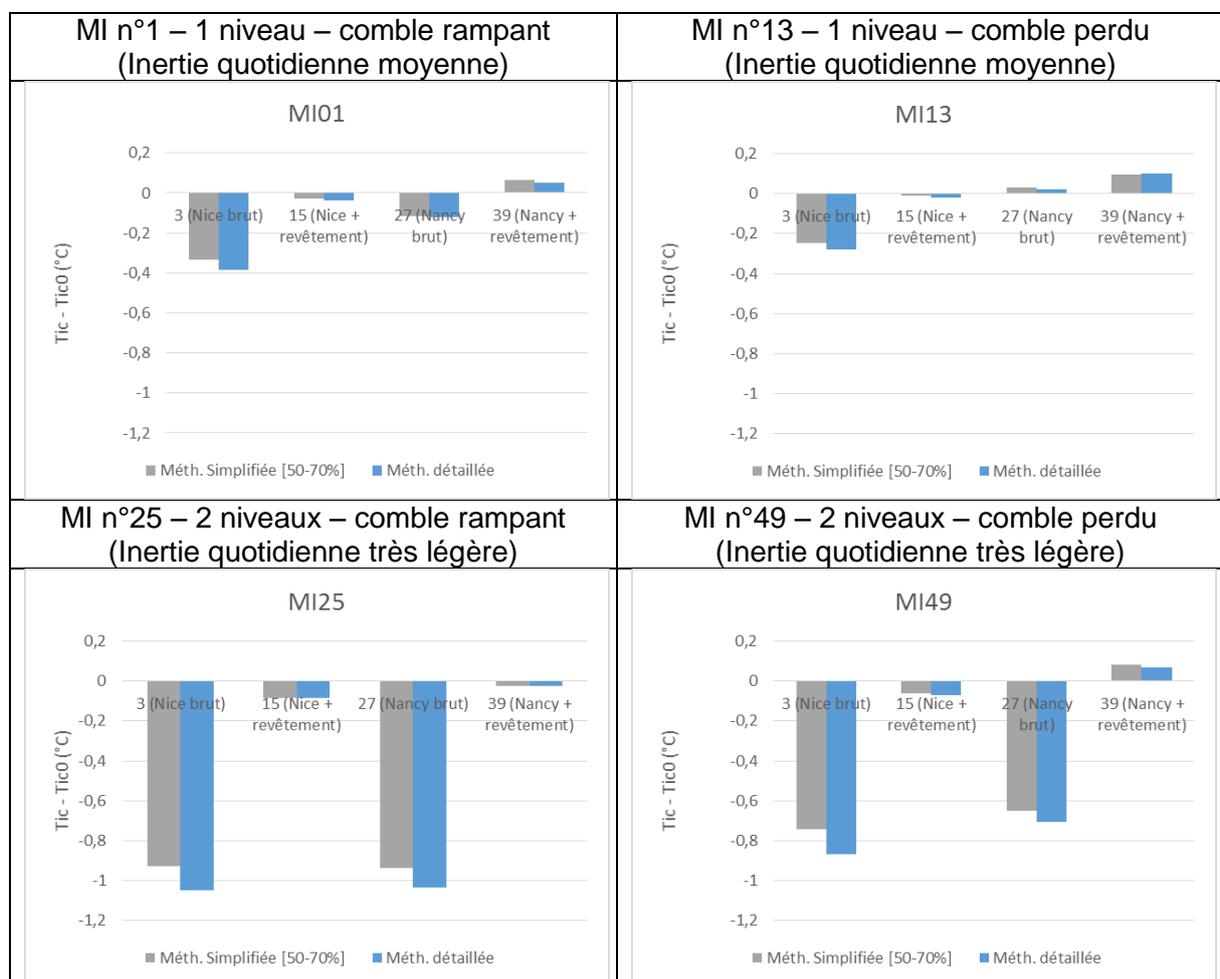
**Tableau 19 : Ecart globaux entre le modèle EMPD et WUFI en fonction de la méthode de choix des paramètres pour différentes simulation (n°3 et n°27) et les 4 configurations de maisons**

		Mur extérieur		Mur intérieur	
		Méthode simplifiée	Méthode détaillée	Méthode simplifiée	Méthode détaillée
MI n°01	Nice (n°3)	32,2%	5,0%	19,1%	4,7%
	Nancy (n°27)	14,0%	5,0%	14,0%	4,6%
MI n°13	Nice (n°3)	33,1%	5,9%	20,3%	5,6%
	Nancy (n°27)	27,5%	5,6%	14,3%	5,0%
MI n°25	Nice (n°3)	34,8%	6,9%	21,8%	6,0%
	Nancy (n°27)	27,2%	3,4%	14,2%	3,6%
MI n°49	Nice (n°3)	35,5%	6,6%	22,7%	6,4%
	Nancy (n°27)	27,8%	3,4%	15,0%	3,9%

Le **Tableau 19**, compare les écarts globaux sur les flux de vapeur calculés entre le modèle EMPD avec les paramètres définis selon les deux méthodes et WUFI, pour chaque configuration retenue. Pour ces configurations, deux éléments poreux sont à distinguer : mur intérieurs et murs extérieurs.

Au même titre que dans le chapitre précédent, la méthode détaillée permet de réduire très fortement les écarts globaux par rapport aux résultats de WUFI, avec des écarts compris entre 3,4% et 6,9% contre 14% à 35% avec la méthode simplifiée.

L'impact de la précision de la méthode choisie sur la réduction de la Tic par rapport à un cas sans prise en compte des échanges de vapeur est reporté sur la **Figure 26** pour chaque configuration de maison individuelle. Les résultats en présence d'un revêtement de surface sont également indiqués. Nous faisons ici l'hypothèse que les paramètres identifiés des parois sans revêtement peuvent être appliqués aux parois revêtues avant l'ajout de la résistance surfacique générée par le revêtement par l'intermédiaire de son coefficient Sd.



**Figure 26 : Impact du choix de la méthode de définition des paramètres sur quelques cas de simulations et chaque configuration de maison individuelle**

Les résultats montrent que le choix de la méthode et donc la précision du modèle à l'échelle de la paroi par rapport à WUFI entraîne des écarts maximum de 0,15°C sur la réduction de la Tic par rapport à un cas sans échange de vapeur, l'impact étant le plus élevé pour les cas générant les plus fortes réductions de Tic. Comme expliqué au chapitre précédent, la méthode simplifiée minimise les effets par rapport à la méthode détaillée.

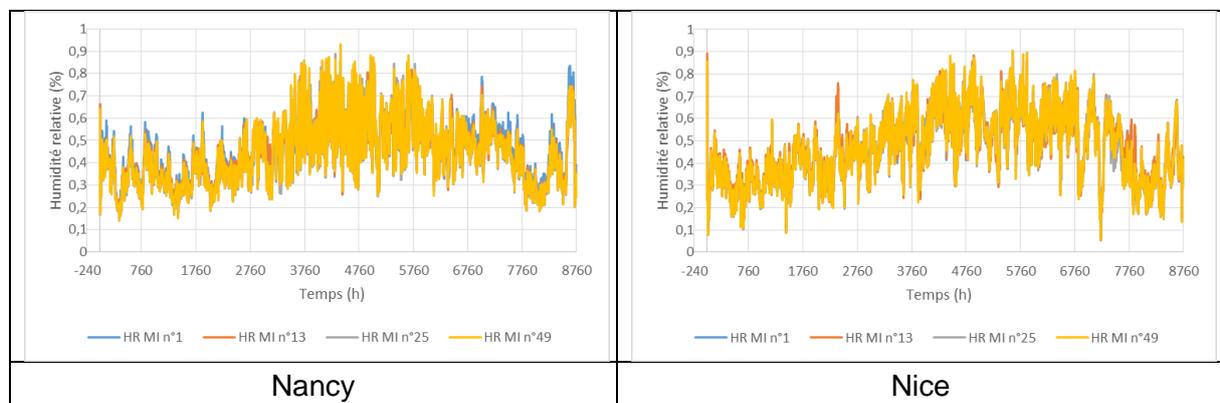
Il peut donc être déduit de ces comparaisons que si les écarts engendrés par le modèle simplifié par rapport à WUFI à l'échelle de la paroi peuvent paraître très élevés, ils n'induisent finalement que peu d'écart à l'échelle du bâtiment sur le calcul de la Tic.

#### 4.3.2 MÉTHODE TH-D (DIES)

Dans l'objectif d'harmoniser les exigences des futures réglementations thermiques, il a été décidé d'évaluer le confort d'été dans les bâtiments via un nouveau critère absolu basé sur les mêmes conventions que le Bbio et le Cep et calculé au fil du temps. Les données d'entrée, dont le climat, restent identiques à celles d'un calcul Bbio/Cep. Ce nouvel indicateur de confort d'été, nommé DIES (Durée d'Inconfort en Été Statistique) est égal au nombre d'heures pondérées par le pourcentage d'insatisfaits au-delà d'une zone de confort, pendant la période d'observation. Autrement dit, on intègre à chaque pas de temps sur la période d'observation le pourcentage d'insatisfaits au-delà de 10%. La période d'observation démarre au premier jour de l'année où la température moyenne journalière est supérieure à 16°C et se termine au dernier jour où cette condition est respectée. Seules les périodes où le bâtiment est occupé sont également considérées.

Ce nouvel indicateur est encore à ce jour en cours d'élaboration, aussi, si la méthode de calcul semble être actée, les seuils à atteindre pour qualifier le confort des bâtiments dans les futures réglementations thermiques ne sont pour l'heure pas définis. Ainsi, l'impact de la prise en compte des échanges de vapeur sur ce nouvel indicateur, ne peut être évalué que de façon relative par rapport à un calcul de DIES sans prise en compte de ces échanges.

En préambule, notons que le climat utilisé dans la méthode TH-D est un climat réel, différent des climats conventionnels de la méthode TH-E. Il convient dans un premier temps de chercher à définir sur quelle plage l'humidité relative intérieure est susceptible de varier de sorte d'adapter les paramètres du modèle EMPD en conséquence. Pour ce faire, l'humidité relative intérieure de chaque configuration de maison individuelle sans prise en compte de l'effet d'inertie hygroscopique est tracée sur la **Figure 27** pour chacun des climats étudiés.

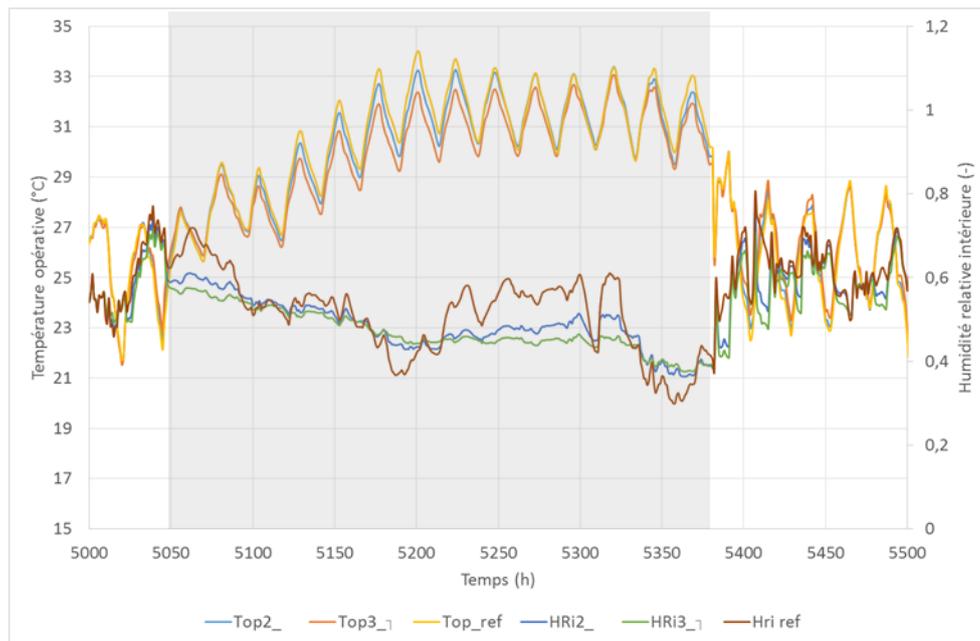


**Figure 27 : Variation de l'humidité relative annuelle pour les 2 climats étudiés et chaque configuration de maison individuelle**

A la différence du climat de la méthode TH-E, l'humidité relative intérieure varie très fortement entre 20 et 90% au cours de l'année. Durant la période estivale, que ce soit pour le climat de Nancy ou de Nice, la variation de l'humidité relative se situe entre 40 et 90% avec une moyenne autour de 50% à Nancy et 60% à Nice. Dès lors, dans le cadre de l'étude de sensibilité du modèle d'inertie hygroscopique sur le résultat de la méthode TH-D, les résultats seront présentés simultanément pour deux plages de variation d'humidité relative [30-50%] et [50-80%] sur lesquelles sont définis les paramètres du modèle.

En second lieu, l'utilisation d'un climat réel complexifie l'analyse des résultats par rapport à la méthode TH-E. En effet, les effets liés à l'intermittence de ventilation, à la variation de l'humidité absolue

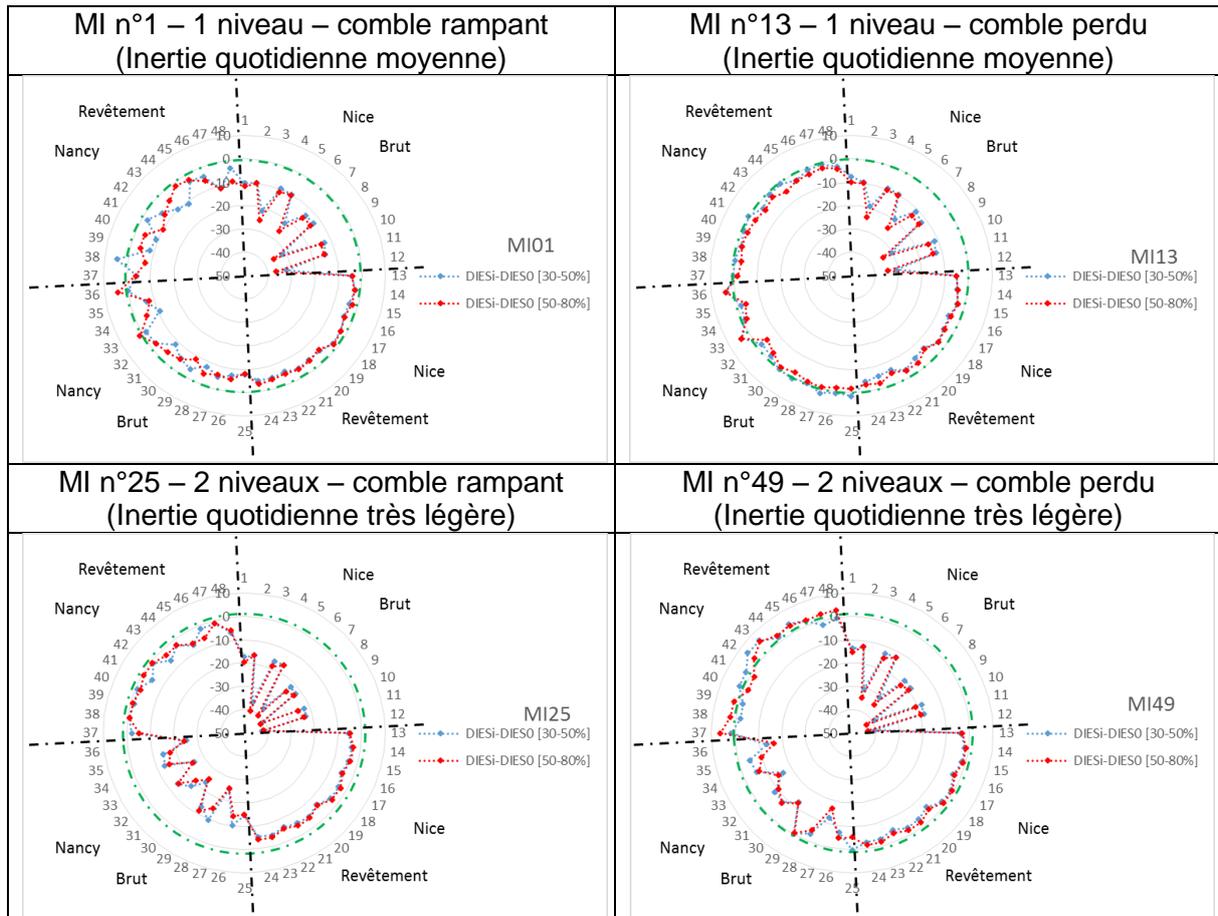
extérieure ou de la température intérieure peuvent se combiner ou s'annuler selon les conditions intérieures très variables. Ceci peut être illustré sur la **Figure 28** qui reprend les variations de température intérieure et d'humidité relative dans différents cas de simulations à Nice : parois verticales d'hygroscopicité moyenne (n°2), d'hygroscopicité forte (n°3) et sans paroi hygroscopique (ref) sur une période incluant une semaine de vacances pour laquelle les apports interne et la surventilation sont nuls. Dans ce cas, la variation de température intérieure est le principal moteur des échanges entre la paroi et l'ambiance.



**Figure 28 : Variation de température opérative intérieure et d'humidité relative pour 3 cas de simulation et le climat de Nice**

Durant la période grisée correspondant aux vacances, l'effet d'inertie hygroscopique est bien visible tant au niveau des températures opératives que des humidités relatives, avec un lissage des variations de cette dernière proportionnel à l'hygroscopicité des parois et une réduction des pics de température intérieure. Par contre, en dehors de cette période, les effets de l'inertie hygroscopique sont clairement moins différenciables, avec tour à tour des augmentations ou des réductions possibles des pics de chaleurs en fonction des conditions intérieures.

La **Figure 29** présente les résultats de l'étude de sensibilité sur l'indicateur DIES pour chaque configuration de maison individuelle. Les paramètres du modèle EMPD sont définis via la méthode simplifiée pour deux plages de variation en humidité relative.



**Figure 29 : Radars des impacts sur la DIES par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour chaque simulation et chaque configuration de bâtiment**

Au même titre que pour l'analyse de sensibilité pour la méthode TH-E, les résultats de l'étude pour la méthode TH-D sont très variables selon le climat et la présence d'un revêtement de surface.

#### 4.3.2.1 Analyses des simulations n°1 à n°12 (Nice sans revêtement de surface)

Attardons nous premièrement sur les cas du climat de Nice, pour des parois brutes, sans revêtement de surface (quartier haut gauche des radars de la Figure 21; simulations n°1 à 12).

Comme pour la méthode TH-E, c'est dans ces conditions que les effets de la prise en compte de l'inertie hygroscopique se font les plus ressentir, avec des niveaux variables selon l'inertie de la maison et l'hygroscopicité des parois. On observe ainsi des réductions de la DIES par rapport au cas sans prise en compte des effets hygroscopiques compris entre 10 et 35% pour les maisons à inertie moyenne et entre 10 et 45% pour les maisons à inertie légère.

L'hygroscopicité des parois et essentiellement du parement est un paramètre majeur avec, pour les parois à parement épicea, des réductions de la DIES comprises entre 25 et 35% pour les maisons à inertie moyenne et autour de 40% pour celles à inertie légère. En présence d'un parement plâtre les réductions sont comprises entre 10 et 25%, l'impact de la nature des matériaux derrière le parement étant quasi nul. C'est également la raison pour laquelle le choix de prendre en compte ou non l'ossature derrière le parement n'a aucun effet sur le résultat. Ainsi, même en présence de sollicitations intérieure autres que journalières, seul le parement a un effet sur les résultats.

#### 4.3.2.2 Analyse des simulations n°13 à n°24 (Nice avec revêtement de surface)

Comme pour la méthode TH-E, en présence d'un revêtement de surface (quartier bas gauche des radars de la **Figure 21**; simulations n°13 à 24), les effets du tampon hygroscopique sont très fortement réduits quelles que soient les configurations, avec une réduction maximale inférieure à 10% de la DIES sans prise en compte des effets hygroscopiques. Les variables de l'étude de sensibilité ont très peu d'influence sur le résultat, la couche de revêtement réduisant fortement les échanges de vapeur avec les matériaux situés en aval.

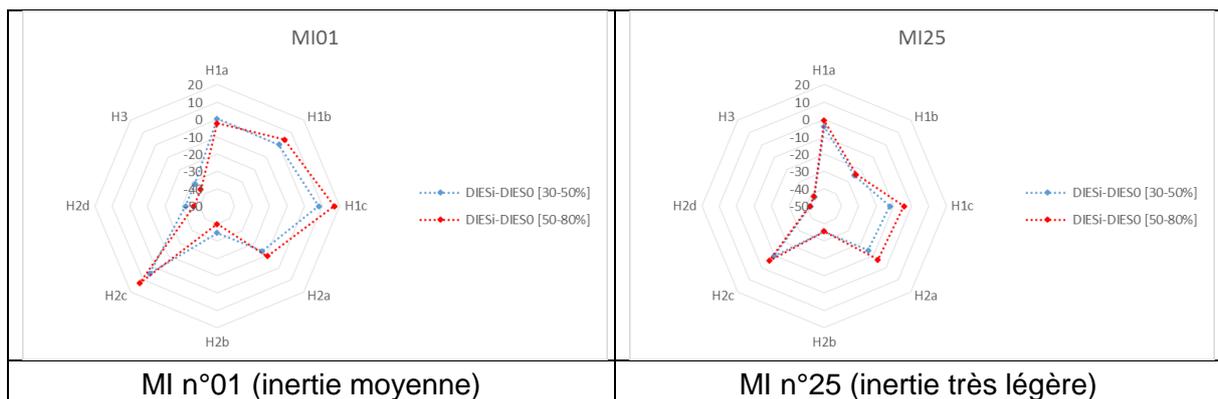
#### 4.3.2.3 Analyses des simulations n°25 à n°36 (Nancy sans revêtement de surface)

Dans le cas du climat de Nancy cette fois-ci (moitié droite des radars de la **Figure 21**; simulations n°25 à 48), les effets de la prise en compte des parois hygroscopiques ne sont uniquement mesurables que pour le cas des maisons à inertie très légère, sans présence de revêtement de surface avec des réductions de la DIES entre 0 et 25%, ici encore les parois avec un parement épicea étant celles pour lesquelles l'effet est le plus important, compris entre 10 et 25%. Les cas avec parements plâtre apportent une réduction maximale de 15%.

Pour toutes les autres configurations, c'est-à-dire en présence d'un revêtement de surface ou pour les maisons à inertie très légères, les impacts sont difficilement mesurables, soit parce qu'ils sont quasi nuls voire même qu'ils conduisent à des augmentations légères de l'inconfort, soit parce qu'aucune logique ne permet de les analyser. On suppose que pour ces cas, les impacts sur la température opérative intérieurs sont tellement faibles et dépendant des conditions de surventilation ou d'occupation que leur intégration sur la période d'inconfort aboutit à des résultats illogiques, on se situe alors dans une zone d'incertitude quant aux effets de l'inertie hygroscopique.

#### 4.3.2.4 Influence du climat

L'influence du climat étant possiblement responsable des résultats précédents, un cas de simulations, celui où l'hygroscopicité de la paroi est forte et sans revêtement de surface a été reproduit pour chaque zone climatique de la réglementation thermique actuelle et chaque configuration de maison individuelle. Les résultats sont présentés sur la **Figure 30** pour deux inerties de maison individuelles différentes (MI n°1 et MI n°25).



**Figure 30 : Radars des impacts sur la DIES par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour le cas le plus favorable et chaque configuration de bâtiment en fonction de la zone climatique**

Les résultats suivent la même allure en fonction du type d'inertie. Ainsi pour une inertie moyenne, la prise en compte des échanges de vapeur permet, pour le cas de parois le plus favorable, des réductions franche de la DIES de l'ordre de 40% pour les zones climatiques H2b, H2d et H3. La réduction est plus faible, de l'ordre 10% la zone H2a, tandis que pour les autres zones, des augmentations franches sont observées pour les zones H1c et H2c pouvant aller jusqu'à 60% dans le cas de

la maison individuelle MI n°13 non représentée ici. Ceci est en contradiction avec les résultats de la méthode TH-E pour lesquels des réductions franches de la Tic étaient observées pour la zone H2c.

Dans le cas d'une maison d'inertie légère, la DIES est réduite pour toutes les zones : faiblement pour les zones H1a, H1c, H2a et H2c avec une réduction inférieure à 10%, mais de manière plus prononcée pour les zones H1b (25%) et jusqu'à 45% pour les zones H2b, H2d et H3.

#### 4.3.2.5 Influence de la précision des données d'entrée

Dans le cas de la méthode TH-D, seul l'impact du choix de la plage de variation de l'humidité relative aboutissant au calcul des paramètres intrinsèques du modèle a pu être évalué. La méthode détaillée consistant à identifier les paramètres du modèle par rapport à une simulation WUFI n'a pu être réalisée faute de temps dans ce cas.

Ainsi, d'après les graphiques de la **Figure 29**, le choix de la plage de variation entraîne, pour les cas où les effets de la prise en compte de l'inertie hygroscopique sont mesurables, des différences sur la réduction de la DIES inférieure à 5%, les impacts les plus grands ayant lieu pour les cas où la réduction de la DIES est la plus forte. Pour les autres cas, notamment ceux de Nancy pour les maisons d'inertie moyenne, les différences selon le choix de la plage de variation d'humidité relative intérieure peuvent être à certains moments bien différentes, avec notamment des impacts opposés en fonction de l'hygroscopicité selon qu'une plage ou l'autre soit choisie. Ceci fait partie de ce qui a été qualifié d'illogique dans le paragraphe précédent.

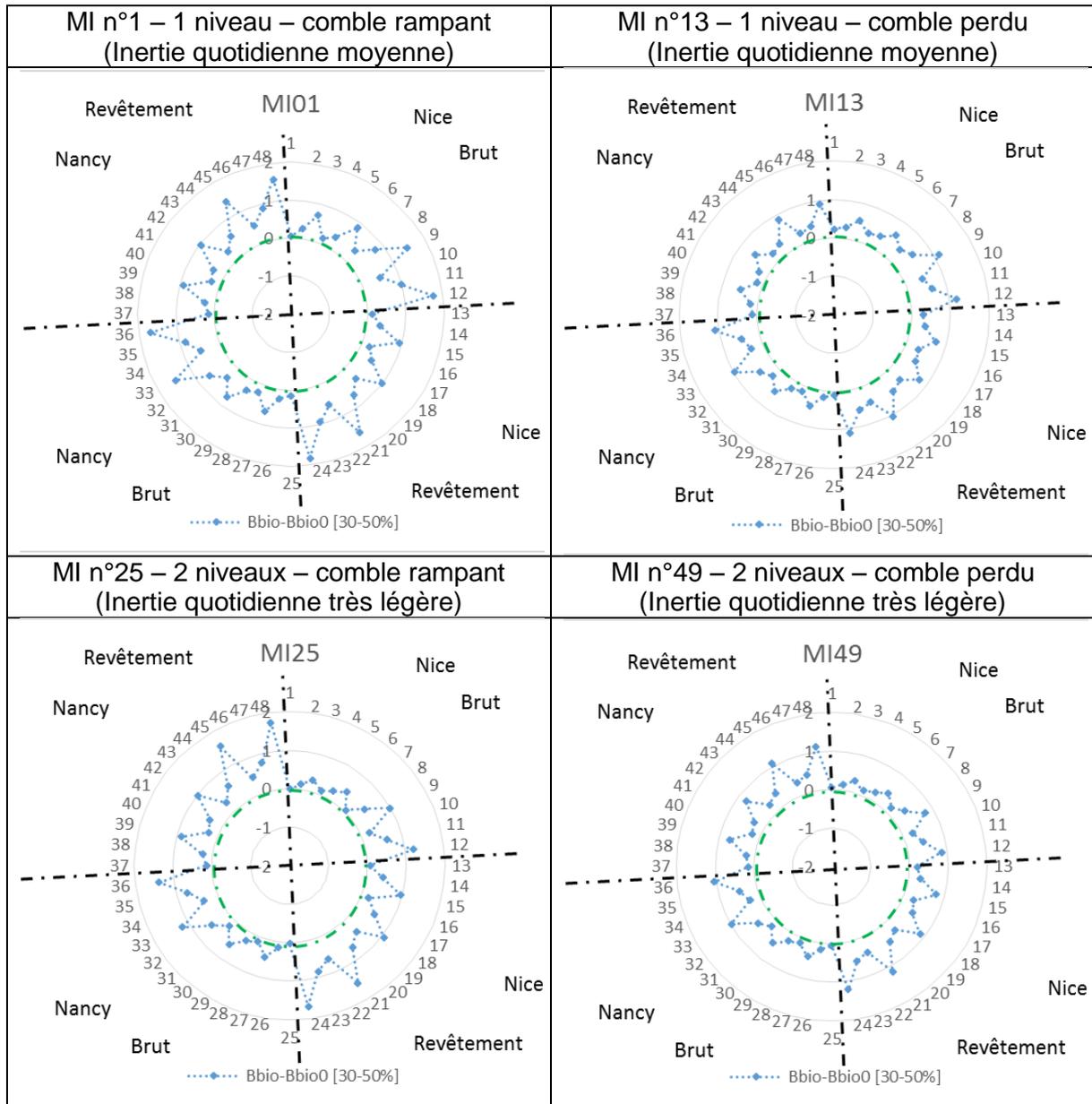
#### 4.3.3 MÉTHODE TH-B (BBIO)

Si la présente étude s'est surtout focalisée sur la thermique d'été, il a semblé tout de même intéressant d'évaluer l'impact du modèle d'inertie hygroscopique en période de chauffe, via le calcul de l'indicateur Bbio selon la méthode TH-B.

En premier lieu, il convient d'évaluer la plage de variation de l'humidité relative intérieure sur la période de chauffe de sorte de définir les paramètres adéquats du modèle. D'après la **Figure 27**, pour les deux climats étudiés et les 4 configurations de maisons individuelles, la plage de variation [30-50%] semble être la plus adaptée pour l'étude.

Notons en préambule que la méthode TH-B se caractérise par un climat extérieur plutôt sec, une ventilation constante et une régulation de la température intérieure à 19°C en période d'occupation (19h-10h) et à 16°C en période d'occupation (11h-18h). Par conséquent, pour une journée type, la température de paroi est constante jusqu'à 10h, chute en évolution libre (sans appel de puissance) en journée, puis remonte à 19h via un appel en puissance de chauffage. L'indicateur BBio intègre les besoins de chauffage sur la période.

Les résultats de l'étude de sensibilité sur l'indicateur Bbio sont détaillés sur la **Figure 31**. Ils sont représentés par la différence entre les besoins de chauffage calculés pour chaque cas de simulation et ceux du cas sans prise en compte des échanges de vapeur (Bbio0).



**Figure 31 : Radars des impacts sur Bbio par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour chaque simulation et chaque configuration de bâtiment**

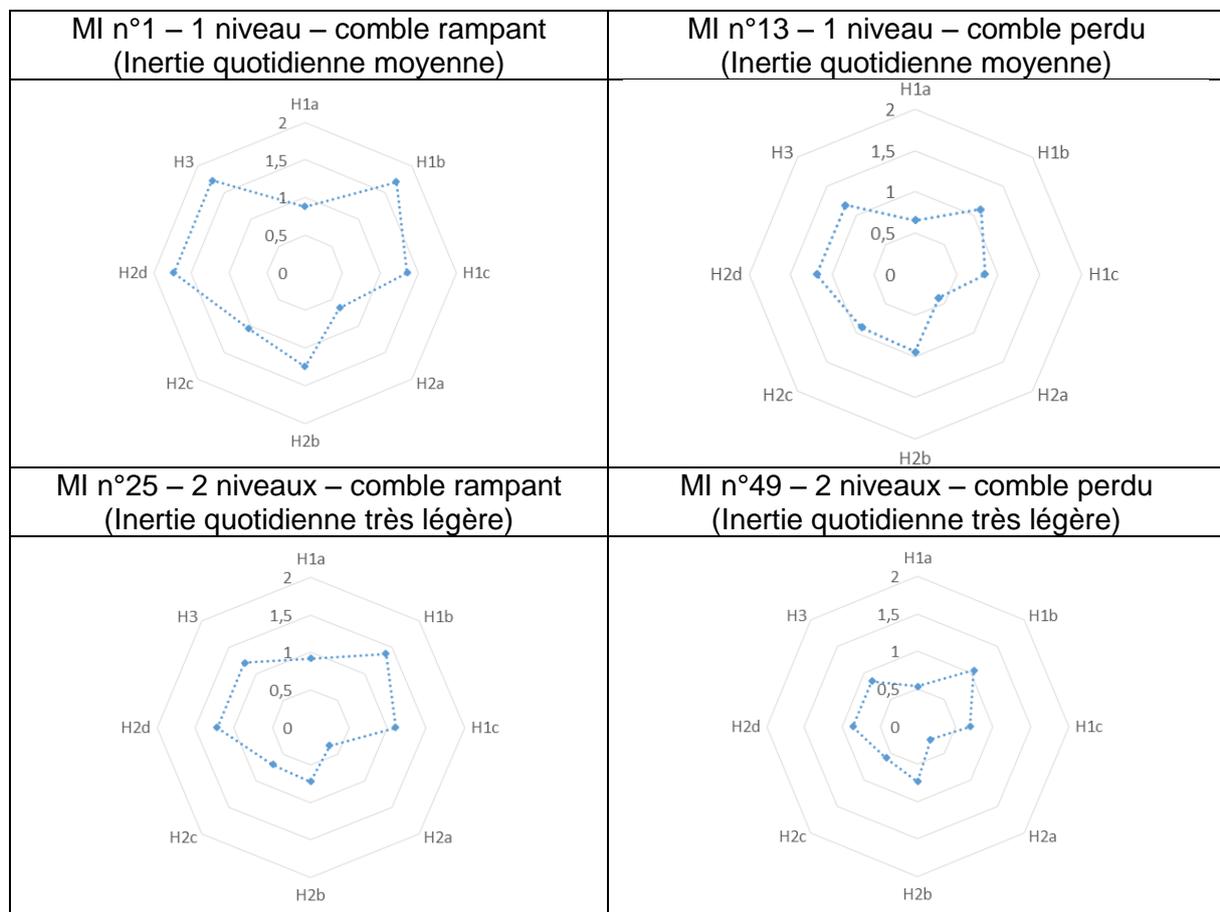
Ces résultats montrent tout d'abord que quel que soit le cas simulé, la prise en compte des échanges de vapeur superficiels implique toujours une augmentation générale du BBio, comprise entre 0 et 2 points selon les cas. Les parois avec parement épicea génèrent l'augmentation la plus nette, mais, à la différence des résultats en analyse de confort d'été, un impact, faible, des matériaux derrière le parement est ici visible. Les impacts sont équivalents selon les climats alors que les besoins totaux sont 3 fois plus élevés à Nancy qu'à Nice.

L'analyse de ce résultat est difficile à réaliser, compte tenu des effets simultanés et contradictoires des potentiels moteurs des échanges que sont la variation d'humidité absolue et la température. Ainsi, cette augmentation du Bbio pourrait être expliquée par le fait qu'au moment de la demande en puissance de chauffage, les parois montent en température par un effet convectif et radiatif, désorbant alors la vapeur d'eau qu'ils contiennent. Cette désorption est alors accompagnée d'un refroidissement de la paroi, qui augmenterait les besoins. Cependant, en parallèle lorsque la température de la paroi chute celle-ci

absorbe de la vapeur d'eau et se réchauffe, ce qui doit diminuer les besoins potentiels lors de la mise en route du chauffage. D'autres effets liés aux variations en humidité absolue sont également certainement à l'origine de ces résultats. C'est peut-être d'ailleurs pour cette raison que l'impact de l'inertie de la maison n'a ici pas d'influence, tandis que son volume semble être prépondérant, les impacts étant plus forts en combles rampants qu'en comble perdus.

Il est également à noter qu'en présence d'un revêtement de surface, les impacts sur le Bbio sont du même ordre de grandeur que sans revêtement et même légèrement supérieurs. Existe-t-il ici des effets séquentiels plus importants qu'en thermique d'été qui gommant l'effet de la résistance superficielle ? Est-ce un effet dû à l'absence d'effet tampon sur l'humidité intérieure par la présence d'un revêtement de surface qui implique des variations d'humidité intérieure plus fortes et des flux dans la paroi plus élevés malgré la résistance au transfert ? Ce qui peut être observé sur les résultats est qu'en présence d'un revêtement, le flux de chaleur latente est faible en valeur absolue, mais quasi toujours négatif, impliquant un refroidissement constant. Au contraire en l'absence d'un revêtement, les flux sont plus élevés en valeur absolues mais tour à tour positifs et négatifs. Des investigations supplémentaires sont à mener pour consolider les résultats obtenus et mieux comprendre ce comportement.

Enfin, l'influence du climat a également ici été évaluée pour le cas le plus favorable sans revêtement de surface. La **Figure 32** détaille les résultats.



**Figure 32 : Radars des impacts sur Bbio par rapport aux simulations sans échange de vapeur pour le cas le plus favorable et chaque configuration de bâtiment en fonction de la zone climatique**

Selon la zone climatique de la réglementation thermique et le type de Bâtiment, une augmentation du Bbio comprise entre 0,4 et 1,7 est possible en présence d'élément poreux d'hygroscopicité forte sans revêtement. Les zones H1b, H1c, H2d et H3 sont celles pour lesquelles l'augmentation est la plus forte. L'augmentation du Bbio est plus faible pour les zones H1a et H2a.

#### 4.4 CONCLUSION

Une étude de sensibilité a été menée pour quantifier l'impact de la prise en compte du modèle d'inertie hygroscopique sur les indicateurs réglementaires. 4 Bâtiment de référence différenciés par leurs volumes ou leur inertie quotidienne ont été étudiés. L'influence du climat, de l'hygroscopicité des parois, de leur surface, de la prise en compte des ossatures derrière le parement et la présence d'un revêtement de surface ont également été évalués.

Les impacts ont été quantifiés vis-à-vis de trois indicateurs réglementaires ou en passe de l'être : la Tic et la DIES en confort d'été, le Bbio en période de chauffe.

Les résultats en confort d'été montrent que la prise en compte des transferts de vapeur superficiels peut être susceptible de générer une baisse de l'inconfort allant jusqu'à 1,5°C sur la Tic et 45% sur la DIES. La valeur de la  $Tic_{ref}$  diminue également simultanément. Les effets sont d'autant plus forts que l'inertie du Bâtiment est légère, la variation de température de la paroi étant un moteur prépondérant des échanges. Le parement des parois est le seul constituant responsable des effets, à condition qu'il ne soit pas recouvert par un revêtement imperméabilisant. La présence d'une peinture acrylique annule totalement les effets. L'intermittence de la surventilation est également susceptible de minimiser les effets voire même d'induire des augmentations légères de l'inconfort. La précision des données d'entrée a été évaluée. Des écarts sur la réduction de la Tic jusqu'à 0,2°C ont été observés selon la méthode employée pour définir les paramètres du modèle : simplifiée ou détaillée (plus précise). La méthode simplifiée demeure sécuritaire.

En parallèle, les résultats en période de chauffe montrent que la prise en compte des effets hygroscopiques implique invariablement une augmentation du Bbio pouvant aller jusqu'à 2 points. Ces augmentations sont proportionnelles à l'hygroscopicité de la paroi, les constituant derrière le parement pouvant impacter le résultat. Par contre ici, la présence d'un revêtement de surface sur les parois n'a que peu d'influence, il génère même des besoins légèrement plus élevés qu'en cas de parois brutes. Ces résultats sont difficiles à analyser compte tenus des effets concomitants de la variation d'humidité absolue et de la température. Des études supplémentaires doivent être menées pour consolider ces résultats.

## CONCLUSIONS

L'objet de cette étude était de développer un modèle de tampon hygroscopique intégré dans l'environnement COMETH, cœur de calcul en convention ouverte de la réglementation thermique, pour évaluer l'impact de celui-ci sur les indicateurs réglementaires à l'échelle du Bâtiment.

Suite à une étude bibliographique synthétisée dans le premier chapitre du document, un modèle simplifié, dit de profondeur effective de pénétration de la vapeur (EMPD), a été conçu de sorte de pouvoir quantifier les échanges de vapeur superficiels entre une ambiance soumise à une variation en humidité relative et un élément poreux. Il consiste à supposer que l'élément poreux est constitué de deux couches actives qui répondent chacune à des périodes de sollicitations différentes : journalière et annuelle. Ce modèle, prévu pour les matériaux homogènes a été adapté aux éléments poreux hétérogènes, en supposant des couches actives équivalentes au prorata des caractéristiques des matériaux situés entre l'ambiance et une potentielle barrière à la vapeur. La présence d'un revêtement non capacitif en surface de l'élément poreux est également prise en compte. Une calculatrice excel a alors été élaborée, elle consiste, pour un élément poreux donné, à calculer les paramètres équivalents d'entrée du modèle ainsi que le flux de vapeur échangé et le flux de chaleur latente associé en fonction de données sur le climat intérieur à renseigner.

Les résultats du modèle simplifié ont été comparés à des simulations réalisées sous WUFI dans le deuxième chapitre. Cette comparaison s'est faite en dégradant progressivement les conditions de calcul de sorte de s'éloigner progressivement des hypothèses fortes qui régissent la validité du modèle simplifié. Les résultats montrent tout d'abord que lorsque ces hypothèses sont respectées, les écarts entre le modèle EMPD et les simulations WUFI sont quasiment nuls à conditions que le pas de temps de résolution utilisé soit suffisamment faible par rapport à la période de sollicitation. Lorsque la paroi n'est plus considérée comme un milieu semi infini et que son épaisseur réelle devient limitante, les écarts peuvent augmenter. Ils se situent entre 10 et 20% pour un pas de temps de résolution d'une heure si l'épaisseur reste supérieure à la profondeur effective de pénétration quotidienne. Si l'épaisseur de paroi est très inférieure à la profondeur de pénétration les écarts augmentent. Le cas des parois non homogènes, composées d'un parement et d'une couche d'isolant a ensuite été étudié. Les écarts avec les simulations WUFI se situent autour de 20%. Les résultats montrent que le parement est le siège de la quasi-totalité des échanges, son incidence est majeure. Enfin, des comparaisons ont été menées dans le cas de sollicitations non périodiques et pour des configurations d'éléments poreux du type de parois couramment rencontrées dans les bâtiments à ossature bois. Si les dynamiques des flux de vapeur calculés sont très proches des résultats WUFI, les écarts globaux estimés entre les deux outils peuvent toutefois apparaître élevés, variant entre 20 et 40% selon les configurations. Les comparaisons par nuages de point montrent toutefois que ces écarts sont toujours dans le sens d'une minimisation des effets.

Le modèle simplifié a ensuite été codé dans l'environnement COMETH de sorte de pouvoir intervenir dans le bilan de masse et le bilan thermique. Chaque élément poreux distinctif est alors caractérisé par une surface d'échange et les paramètres hygroscopiques équivalents des couches superficielles et profondes qui le constituent. Une comparaison des résultats à l'échelle de la paroi entre le modèle simplifié et WUFI sur un climat intérieur issu de la méthode TH-E a montré que, si les allures étaient proches, des écarts relatifs importants sur les flux de vapeur calculés pouvaient subsister. Une nouvelle méthode de définition des paramètres a alors été proposée. Elle consiste à identifier les paramètres d'entrée du modèle en minimisant les écarts entre un calcul WUFI initial et le modèle EMPD. Dans un hypothétique calcul réglementaire dans le futur, celle-ci pourrait être vue comme une méthode détaillée alors que la méthode initiale serait qualifiée de simplifiée. Les résultats ont montré que cette méthode d'identification assurait une bonne précision du modèle avec des écarts globaux relatifs compris entre 5 et 8% pour chaque configuration testée.

Enfin, la dernière partie a consisté à mener une étude de sensibilité à l'échelle du bâtiment pour quantifier l'impact de la prise en compte du modèle d'inertie hygroscopique sur les indicateurs réglementaires. L'influence de l'inertie du bâtiment, du climat, de l'hygroscopicité des parois, de leur surface, de la prise en compte des ossatures et la présence d'un revêtement de surface a été évaluée.

Les impacts ont été quantifiés vis-à-vis de trois indicateurs réglementaires ou en passe de l'être : la Tic et la DIES en confort d'été, le Bbio en période de chauffe. Les résultats en confort d'été montrent que la prise en compte des transferts de vapeur superficiels peut être susceptible de générer une baisse de l'inconfort allant jusqu'à 1,5°C sur la Tic et 45% sur la DIES. La valeur de la  $Tic_{ref}$  diminue également simultanément. Les effets sont d'autant plus forts que l'inertie du bâtiment est légère. Le parement des parois est le seul constituant responsable des effets, à condition qu'il ne soit pas recouvert par un revêtement imperméabilisant. La présence d'une peinture acrylique annule totalement les effets. L'intermittence de la surventilation est également susceptible de minimiser les effets voire même d'induire des augmentations légères de l'inconfort. La précision des données d'entrée a été évaluée. Des écarts sur la réduction de la Tic jusqu'à 0,2°C ont été observés selon la méthode employée pour définir les paramètres du modèle : simplifiée ou détaillée (plus précise). La méthode simplifiée demeure sécuritaire. En parallèle, les résultats en période de chauffe montrent que la prise en compte des effets hygroscopiques implique invariablement une augmentation du Bbio pouvant aller jusqu'à 2 points. Ces augmentations sont proportionnelles à l'hygroscopicité de la paroi, les constituant derrière le parement pouvant impacter le résultat. Par contre ici, la présence d'un revêtement de surface sur les parois n'a que peu d'influence, il génère même des besoins légèrement plus élevés qu'en cas de parois brutes.

Le tableau suivant synthétise les résultats obtenus en fonction de critères sur le bâtiment étudié ou la composition de la paroi. Les impacts sur la Tic, la DIES et le Bbio de la prise en compte du modèle de tampon hygroscopique sont indiqués.

Présence d'un revêtement de surface peu perméable à la vapeur	Inertie du bâtiment	Présence d'un parement hygroscopique sur les parois intérieures	Intermittence de la surventilation par ouverture de fenêtre	Impact sur Tic	Impact sur $Ti_{Cref}$	Impact relatif sur DIES	Impact sur Bbio
non	légère	oui		<-1,5°C	<-0,7°C	<-40%	+2pts
		non		<-0,5°C	Pas d'effet	<-20%	+1pt
	moyenne	oui	non		Pas d'effet	<-0,7°C	Pas d'effet
		non	oui	<-10%		+1 pt	
oui		Oui		Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet	+2 pts
		non					+1 pt

## PERSPECTIVES

A l'issue de ce travail, des travaux supplémentaires restent à faire avant de réfléchir à une possible intégration du modèle à la réglementation thermique.

Concernant la définition des paramètres du modèle par exemple, les écarts observés en utilisant la méthode simplifiée peuvent nuire à la validité des résultats. Une nouvelle méthode de définition des paramètres équivalents du modèle mériterait d'être développée. Pour cela, il pourrait être envisagé d'adapter les méthodes de calcul des caractéristiques thermiques dynamiques de la norme ISO 13786 aux transferts hygroscopiques. En complément, une base de données de référence des propriétés hydriques de matériaux pour diverses gammes de variation d'humidité relative intérieure doit être conçue et couvrir l'ensemble des produits de bâtiment.

Concernant les résultats à l'échelle du bâtiment ensuite, ils doivent être consolidés soit par des comparaisons avec d'autres logiciels de simulations hygrothermiques du bâtiment, soit par des observations expérimentales. Dans le cadre de ce projet, une tentative de comparaison a été effectuée avec le logiciel TRNSYS, mais les nombreuses conventions et hypothèses de calcul de la méthode TH-BCE ainsi que la définition des paramètres hygroscopiques dans TRNSYS ont rendu difficile l'analyse des résultats. Des études sur d'autres types d'usages de bâtiment et notamment en présence de système de refroidissement doivent également être menées.

Enfin, de nombreuses questions restent en suspens quant à une future intégration dans la réglementation thermique. Ainsi, les revêtements de surface intérieurs, le mobilier, la présence de livres ou de tapis ne sont pour l'heure pas renseignés et sont fortement dépendants de l'occupant, alors qu'ils ont un impact essentiel sur les effets d'inertie hygroscopique. Les scénarios d'apports internes de vapeur doivent également être revus puisqu'ils n'intègrent pour l'heure que ceux liés aux occupants. Le choix du futur indicateur de confort d'été n'étant toujours pas acté, se pose la question des seuils réglementaires. Doit-on rester sur la notion de  $T_{iCref}$  et dans ce cas doit-on considérer dans le calcul de référence des parois hygroscopiques communes ou les mêmes parois que le projet ? Si la DIES doit être retenue, l'effet de tampon hygroscopique doit-il être intégré lors de la définition des futurs seuils réglementaires et si oui, les mêmes questions se posent alors ?

Pour finir, doit-on s'arrêter à la prise en compte des effets du tampon hygroscopique, qui semble pouvoir améliorer le confort d'été ? En effet, la prise en compte des transferts de vapeur suppose aussi de pouvoir prendre en compte la dépendance de la conductivité thermique des matériaux en fonction de leur teneur en eau. Or celle-ci pourrait avoir un impact négatif important sur les indicateurs Bbio et Cep.

## LISTE DES REFERENCES

- [1] Abelé C. et al. Transfert d'humidité à travers les parois. Guide technique. Editions CSTB. Septembre 2009.
- [2] Steeman M. Hygrothermal modelling for building energy simulation applications. PhD Thesis. Gent University. 2010.
- [3] Millet J.R., Villenave J.G., Mansson L., De Gids W. IEA Annex 27 Evaluation and demonstration of Domestic Ventilation systems - Volume 2 Indoor Air Quality.
- [4] TenWolde, A. 1988. A mathematical model for indoor humidity in houses during winter. Proceedings of Symposium on Air Infiltration, Ventilation and Moisture Transfer. Washington, DC: Building Thermal Envelope Coordinating Council.
- [5] TenWolde A. Ventilation, humidity and condensation in manufactured houses during winter. ASHRAE Transaction V100, 1994.
- [6] Plathner P., Littler J., Cripps A. Modelling water vapour conditions in dwellings. Third international symposium on humidity and moisture, National Physical Laboratory, London, Vol 2, p 64-74, 1998.
- [7] Jones, R. 1993. Modelling water vapour conditions in buildings. Building Services Engineering Research and Technology. 14(3):99–106.
- [8] Documentation TRNSYS.
- [9] Woods J., Winkler J., Christensen D. Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in Buildings. Technical report NREL/TP-5500-57441 NREL, January 2013.
- [10] Woods J., Winkler J, Christensen D. Moisture Modeling: Effective moisture penetration depth versus effective capacitance. Proceedings of Thermal performance of the Exterior envelopes of Whole building XII International conference.
- [11] Janssen H., Roels S. Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures. Energy and Building 41(4):382-394, 2009.
- [12] Cunningham M.J. The building volume with hygroscopic materials – an analytical study of a classical building physics problem. Building and Environment, 38(2):329-337, 2003
- [13] Janssens A., De Paepe M. Effect of moisture inertia models on the predicted indoor humidity in a room. Proceedings of the 26th AIVC Conference, Brussels, Belgium, 2005.
- [14] Duforestel T., Dalicieux P. A model of hygroscopic buffer to simulate the indoor air humidity behaviour in transient conditions. Proceedings of European Conference on Energy performance and indoor climate in Buildings, volume 3, p 791-794, Lyon , France, 1994.
- [15] Woloszyn M. Modelisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones Proposition d'une stratégie de résolution du système couplé. Thèse INSA-Cethil, Lyon, 1999.
- [16] Karagiozis A., Gu L. The EMPD model. IEA ECBCS Annex 41 Meeting, Glasgow, 2004.
- [17] G.N Walton. Contam 96 User Manual. Buildings and fire research laboratory, National Institute of Standards and technology, 1997.

- [18] Carmeliet J., Derome D., Guyer R., Stochastic analysis of moisture buffering in rooms. IEA-EXCO Energy conservation in buildings and community systems, Annex 41 « Moist-Eng » working meeting, Porto, Portugal, 2007.
- [19] Lucas F., Miranville F., Bastide A. Modelling of hydrous and thermal transfers in tropical climates and buffering moisture with hygroscopic materials. 9th International IBPSA Conference, Montreal, Canada, 2005.
- [20] Hens H. Impact of hygric inertia on indoor climate: simple models. IEA-EXCO Energy conservation in Buildings and Community Systems, Annex 41 « Moist-Eng », Trondheim, 2005.
- [21] Janssens A., Woloszyn M., Rode C., Sasic-Kalagasidis A., De Paepe M. From EMPD to CFD – overview of different approaches for heat air and moisture modeling in IEA Annex 41. IEA ECBCS Annex 41 Closing seminar, Copenhagen, 2008.
- [22] Abadie M.O., Cordeiro Mendonça K. Moisture performance of building materials: from material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value concept. Building and environment 44:388-401, 2009.
- [23] Pontrelli G., DeMonte F., A multi-layer wall model for coronary drug eluting stents. International journal of heat and mass transfer n°53, pp 3629-3637, 2010.
- [24] James C., Simonson C.J., Talukdar P., Roels S. Numerical and experimental data set for benchmarking hygroscopic buffering models, International journal of Heat and Mass transfer 53 : 3638-3654, 2010.
- [25] CSTB. Diffusion de vapeur au travers des parois. REEF – Volume II Sciences du Bâtiment. 1980.
- [26] CSTB. Méthode de calcul TH-BCE 2012, 2011.
- [27] Wetter M. GenOpt, generic optimisation program, user manual, version 2.0.0. Technical report LBNL- 54199, Lawrence Berkeley National Laboratory; 2004.
- [28] FCBA, CSTB, Nobatek, CEREMA. Thermique d'été bois – Evaluation du confort thermique des constructions à ossature bois. Thermique d'été bois phase 1 Rapport final, 2015.



## Le futur en construction

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, exerce quatre activités clés : la recherche et expertise, l'évaluation, la certification et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de la transition énergétique dans le monde de la construction. Son champ de compétence couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec plus de 900 collaborateurs, ses filiales et ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le groupe CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.

### **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment**

Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Tél. : +33 (0)1 64 68 82 82 – [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / NANTES / SOPHIA ANTIPOLIS