

HUNSPACH - BÂTIMENT RÉNOVÉ

Étude WUFI



Sommaire

1	HYPOTHÈSES	3
1.1	MATÉRIAUX	3
1.2	CONDITIONS INITIALES	4
1.3	CLIMAT EXTÉRIEUR	4
1.3.1	Température et humidité relative	4
1.3.2	Pluviométrie	5
1.4	CLIMAT INTÉRIEUR	6
1.5	CRITÈRES D'INTERPRÉTATION	7
2	TESTS DES MATÉRIAUX - MAISON HUNSPACH	8
2.1	PORTION DE MUR ÉTUDIÉE	8
2.2	RÉSULTATS ISOLANTS FIBREUX	9
2.2.1	Teneur en eau dans toute la paroi	9
2.2.2	Teneur en eau dans le torchis	11
2.2.3	Teneur en eau dans la poutre bois	13
2.2.4	Teneur en eau dans l'isolant laine	17
2.3	RÉSULTATS PANNEAU SILICATE DE CHAUX (TYPE MULTIPOR)	19
2.3.1	Teneur en eau dans toute la paroi	19
2.3.2	Teneur en eau dans la poutre bois	20
2.3.3	Teneur en eau dans le torchis	22
2.3.4	Teneur en eau dans le Multipor	24
2.4	RÉSULTATS PSE	26
2.4.1	Teneur en eau dans toute la paroi	26
2.4.2	Teneur en eau dans la poutre bois	27
2.4.3	Teneur en eau dans le torchis	29
3	DIMENSIONNEMENT DES MATÉRIAUX – MAISON HUNSPACH	30
3.1	DIMENSIONNEMENT ISOLANTS FIBREUX	30
3.1.1	Teneur en eau dans l'isolant laine	30
3.1.2	Teneur en eau dans la poutre	34
3.1.3	Bilan dimensionnement isolants fibreux :	37
3.2	DIMENSIONNEMENT PANNEAU SILICATE DE CHAUX (TYPE MULTIPOR)	38
3.2.1	Teneur en eau dans le multipor	38
3.2.2	Teneur en eau dans la poutre	40
3.2.3	Bilan dimensionnement panneau de silicate de chaux	43
4	REPLISSAGE DES COLOMBAGES PAR DU BÉTON CELLULAIRE	44
4.1	SITUATION ÉTUDIÉE	44
4.2	MULTIPOR DE REPLISSAGE	45
4.3	POUTRE BOIS	46
4.4	ISOLANT LAINE	47
4.5	BILAN REPLISSAGE COLOMBAGES PAR BÉTON CELLULAIRE	49
5	CONCLUSION GÉNÉRALE – MAISON D'HUNSPACH	50

1 HYPOTHÈSES

1.1 MATÉRIAUX

○ Le mur – Hunspach :

Composition paroi	μ (-)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Torchis	11	1000	1514	0,6
Bois (chêne)	140	1500	685	0,13
Enduit chaux	7	850	1600	0,7

○ Le mur – Ludwigswinkel :

Composition paroi	μ (-)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Grès Oberkirchner	32	850	2150	2,3
Enduit chaux	7	850	1600	0,7

○ Les isolants :

Les isolants fibreux se comportent sensiblement de la même manière. Nous avons choisi un matériau aux caractéristiques moyennes (laine de lin).

De même, polystyrène expansé, extrudé et polyuréthane ont le même comportement hygrométrique. Les tests sur le polystyrène expansé permettent donc d'obtenir des conclusions pour ces trois matériaux.

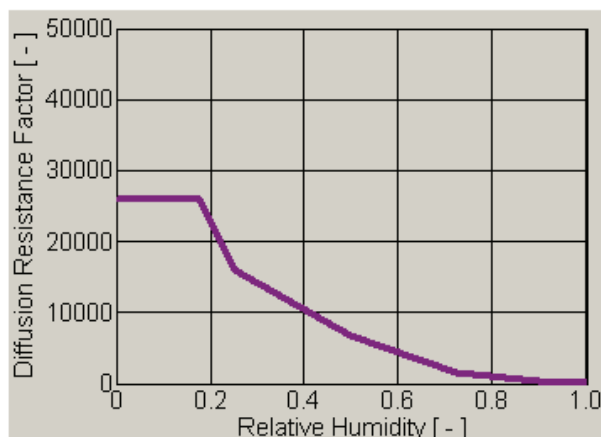
Composition paroi	μ (-)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Multipor	4,1	850	115	0,04
Colle Multipor	15,1	850	833	0,155
Laine	1,5	1660	38	0,036
Polystyrène expansé	21,7	1500	20	0,04

Pour les tests avec le Multipor et le PSE, on a pris en compte une couche de colle de 6 mm entre l'isolant et le mur.

○ Pare-vapeur et freine-vapeur :

Composition paroi	Sd (m)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Pare-vapeur	50	2300	130	2,3
Pare-vapeur non jointif (simulé par le pare-vapeur précédent avec un trou de 1mm)				
Freine-vapeur	4	2300	130	2,3
Pare-vapeur hygrovariable	0 à 26	2500	115	2,4

Le pare-vapeur de type Intello a une résistance à la vapeur qui varie avec l'humidité relative de l'air environnant. Sur le graphique ci-dessous est représenté le facteur de résistance à la diffusion de vapeur du pare-vapeur intelligent. Dans nos simulations, on introduit ce matériau sous la forme d'une couche d'1 mm, ainsi on obtient un Sd variant de 26 (26000 * 1 mm) à 0.



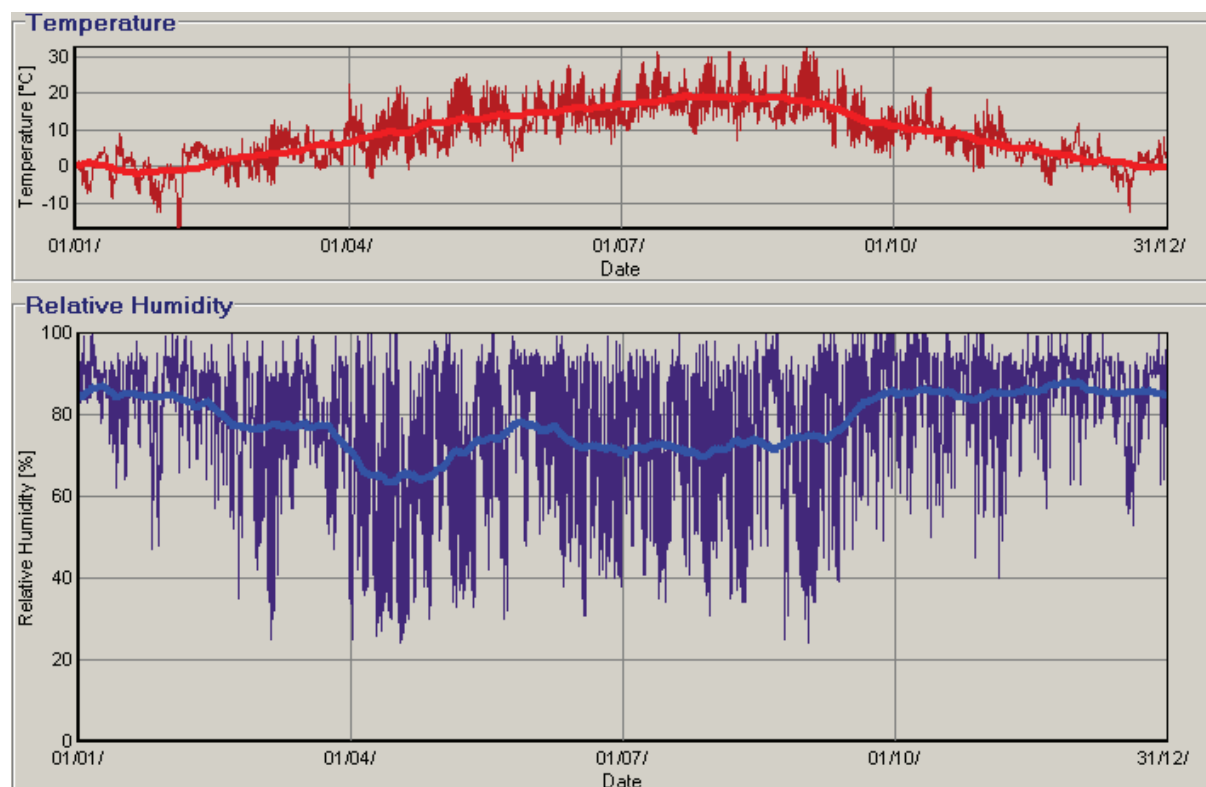
1.2 CONDITIONS INITIALES

Nous avons fixé une valeur initiale en eau telle que les matériaux soient en équilibre avec un air à 20°C et ayant une humidité relative de 80%. Ces conditions initiales sont défavorables et permettent de vérifier si les matériaux s'assèchent ou non au fil du temps.

1.3 CLIMAT EXTÉRIEUR

Le logiciel WUFI est d'origine allemande, la base de données météorologique concerne uniquement des villes allemandes. Nous avons choisi Würzburg comme climat extérieur de référence dont la latitude est voisine de celle de Strasbourg. Ce climat présente également un comportement pluviométrique moyen.

1.3.1 TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE

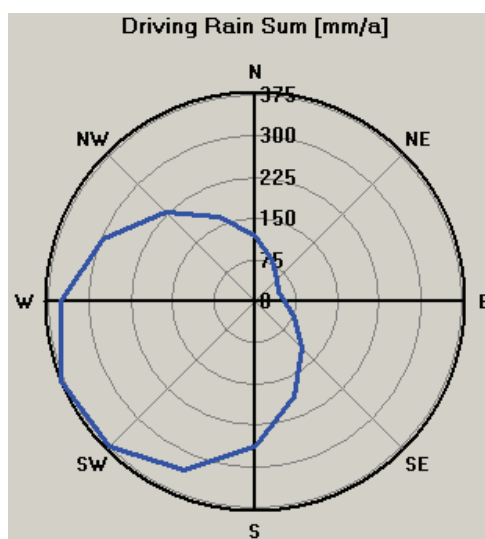


Le climat de Würzburg, lors de l'année de référence de 1991 a les caractéristiques suivantes :

	Température [°C]	Humidité relative [%]
Maximum	32,6	100
Minimum	-16,9	24
Moyenne	9	78

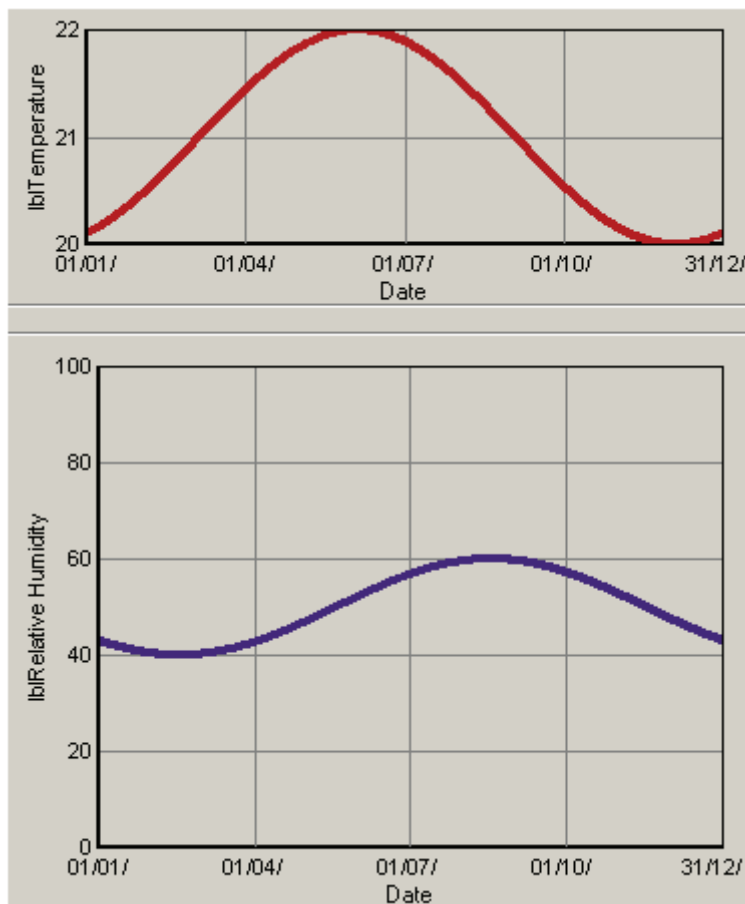
1.3.2 PLUVIOMÉTRIE

Le graphique ci-dessous représente la quantité de pluie reçue par orientation. L'orientation Ouest reçoit la quantité de pluie maximum. Nous avons pris comme hypothèse pour la suite une orientation Nord-Ouest de la portion de mur étudiée, afin de se placer dans le cas le plus défavorable à la fois du point de vue de la pluie (Ouest) et du rayonnement solaire (Nord).



1.4 CLIMAT INTÉRIEUR

Pour l'air intérieur, nous avons choisi les recommandations WTA¹ (Association scientifique et technique pour la préservation du patrimoine bâti). Cela correspond à un profil sinusoïdal pour la température intérieure, comprise entre 20°C en hiver et 22,5°C en été, et pour l'humidité relative, qui oscille entre 40 et 60% au cours de l'année.



¹ Wissenschaft- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege

1.5 CRITÈRES D'INTERPRÉTATION

- **Evolution de la quantité d'eau dans toute la paroi**

Pour s'assurer de la pérennité des composants d'une paroi, la teneur en eau dans la paroi globale doit se stabiliser au fil des ans. Ainsi on saura si la paroi accumule de l'eau au fil des années ou si au contraire elle évacue l'eau qu'elle contient et parvient chaque année à sécher.

- **Teneur en eau dans les matériaux**

Les valeurs seuils considérées sont issues de différentes sources, dont la note technique d'Enertech et le livre « L'isolation thermique écologique » de Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey.

	Critères - valeurs seuils
Matériau	% de la masse sèche
Bois	20% de la masse sèche
Multipor	23% de la masse sèche
Laine minérale	13% de la masse sèche
Laine de bois	18% de la masse sèche
Cellulose	15% de la masse sèche
Laine de mouton	30% de la masse sèche

Le rapport final du CSTB de l'« Etude hygrothermique de l'influence de plusieurs paramètres dans les parois à ossature bois » donne une autre limite de teneur en eau pour le bois : moins de 8 semaines par an au-dessus de 23% de masse sèche. Au-delà, il y aurait des risques de développement fongique.

2 TESTS DES MATÉRIAUX - MAISON HUNSPACH

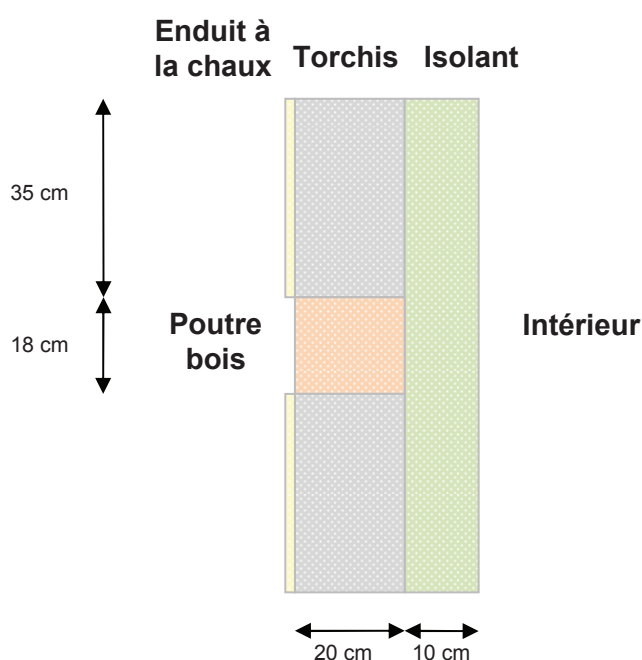
2.1 PORTION DE MUR ÉTUDIÉE

Dans cette partie, nous présentons les tests effectués en mur courant avec différents matériaux en isolation intérieure. Ainsi on sera en mesure de dégager les matériaux envisageables en isolation intérieure, en fonction de leur comportement hygrométrique.

Les tests d'isolation intérieure effectués sont :

- Isolants fibreux avec :
 - o Pare-vapeur d'un Sd de 50 m, posé parfaitement
 - o Pare-vapeur d'un Sd de 50 m, posé de façon imparfaite : trou d'1 mm
 - o Frein-vapeur d'un Sd de 4 m
 - o Pare-vapeur hygrovariable
- Multipor ou générique de même type (béton cellulaire ou panneaux de silicate de chaux)
- Polystyrène expansé

Nous avons considéré une portion de mur courant, orientée NO. Ainsi nous nous plaçons dans le cas le plus défavorable. En effet une paroi orientée NO met plus de temps à s'assécher en été (maximum de pluie à l'ouest et minimum de rayonnement solaire au Nord).

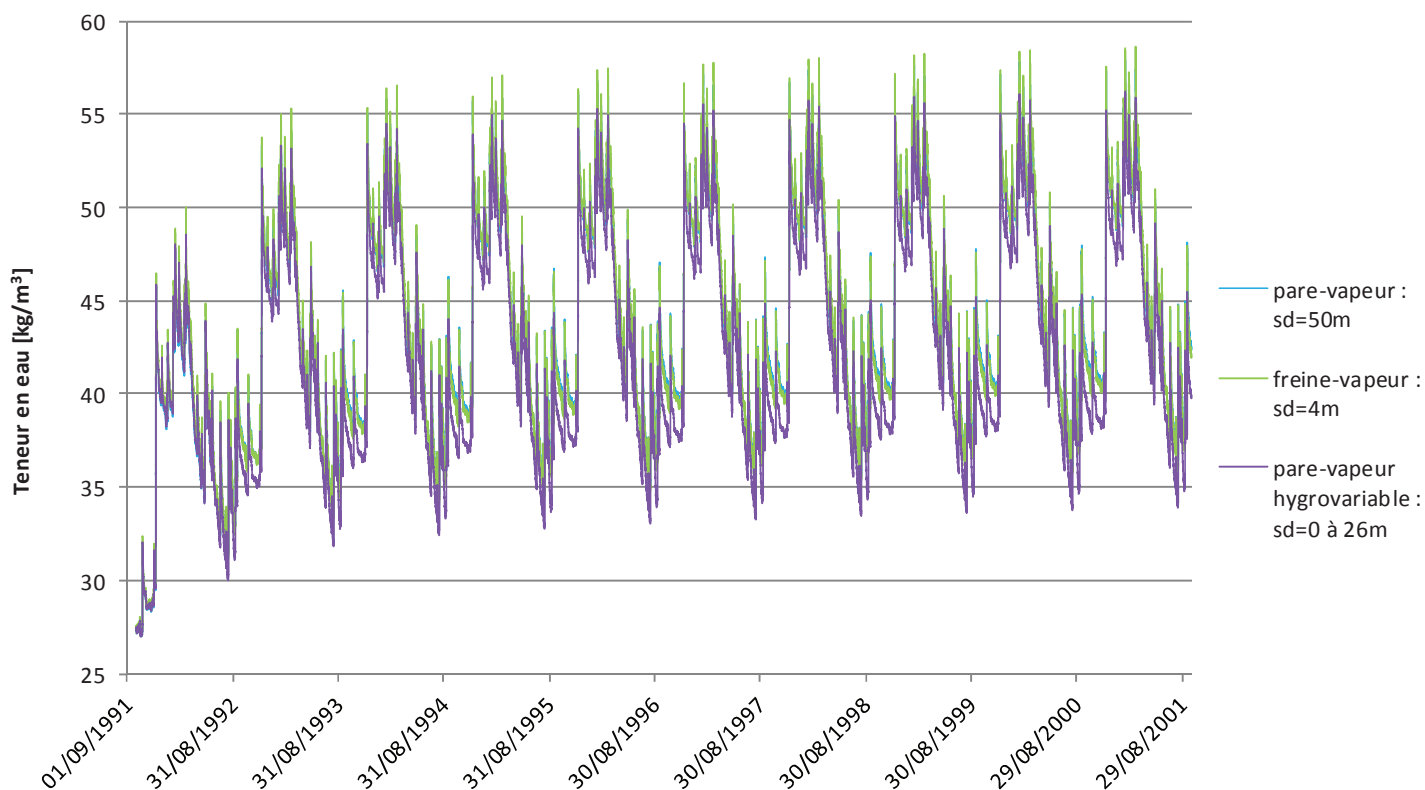


2.2 RÉSULTATS ISOLANTS FIBREUX

2.2.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

On a effectué les simulations avec 10 cm d'isolant laine et on obtient l'évolution de la teneur en eau dans toute la paroi sur 10 ans :

Teneur en eau de toute la paroi

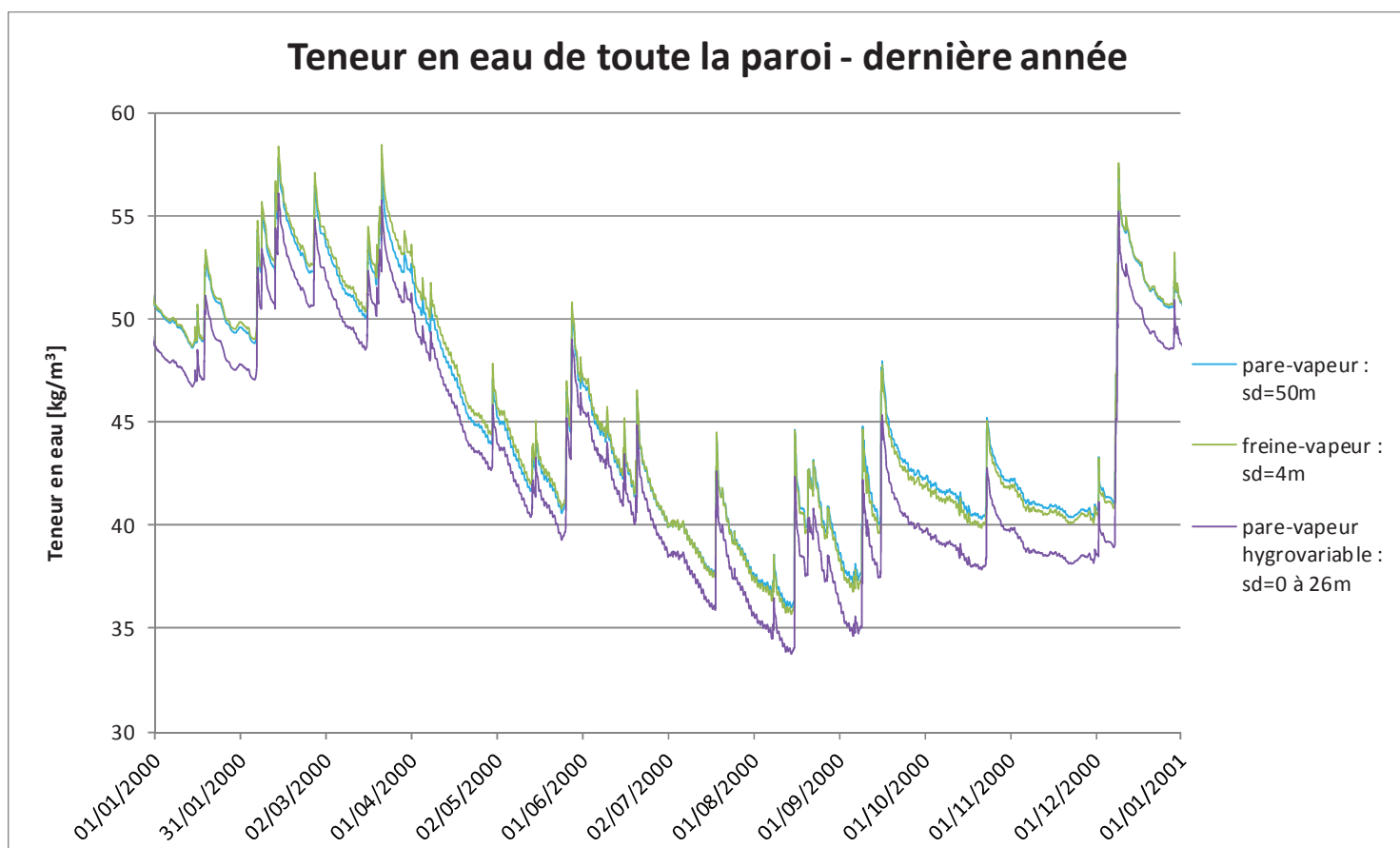


La teneur en eau de toute la paroi augmente jusqu'à atteindre à peu près l'équilibre périodique au bout des 10 années de simulation. Elle continue d'augmenter très légèrement, comme indiqué dans le tableau ci-dessous, pour le pare-vapeur classique ($S_d = 50$ m).

	01/03/1994	01/03/1995	01/03/1996	01/03/1997	01/03/1998
Teneur en eau (kg/m³)	52,1	52,7	53,1	53,4	53,7

Cette augmentation ne nous permet pas de conclure à un risque pour la pérennité des matériaux. Il y a une certaine diminution du pas de croissance d'une année à l'autre, mais cette tendance à la stabilisation n'est pas très claire. Nous nous intéressons donc par la suite à d'autres zones particulières de la paroi.

D'abord, on regarde le détail du graph précédent sur une période d'une année (la dernière année de simulation) :

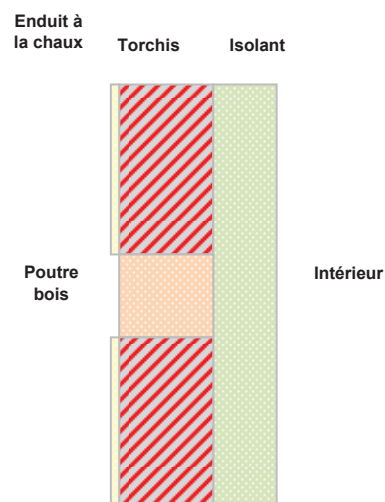


On constate que la teneur en eau dans la paroi est plus faible avec un pare-vapeur hygrovariable qu'avec un freine-vapeur ou pare-vapeur classique : elle peut être jusqu'à 2,5 kg/m³ en dessous. Mais cette différence reste limitée : 2,5 kg/m³ correspondent au plus à 10% de l'amplitude de variation de la teneur en eau de la paroi.

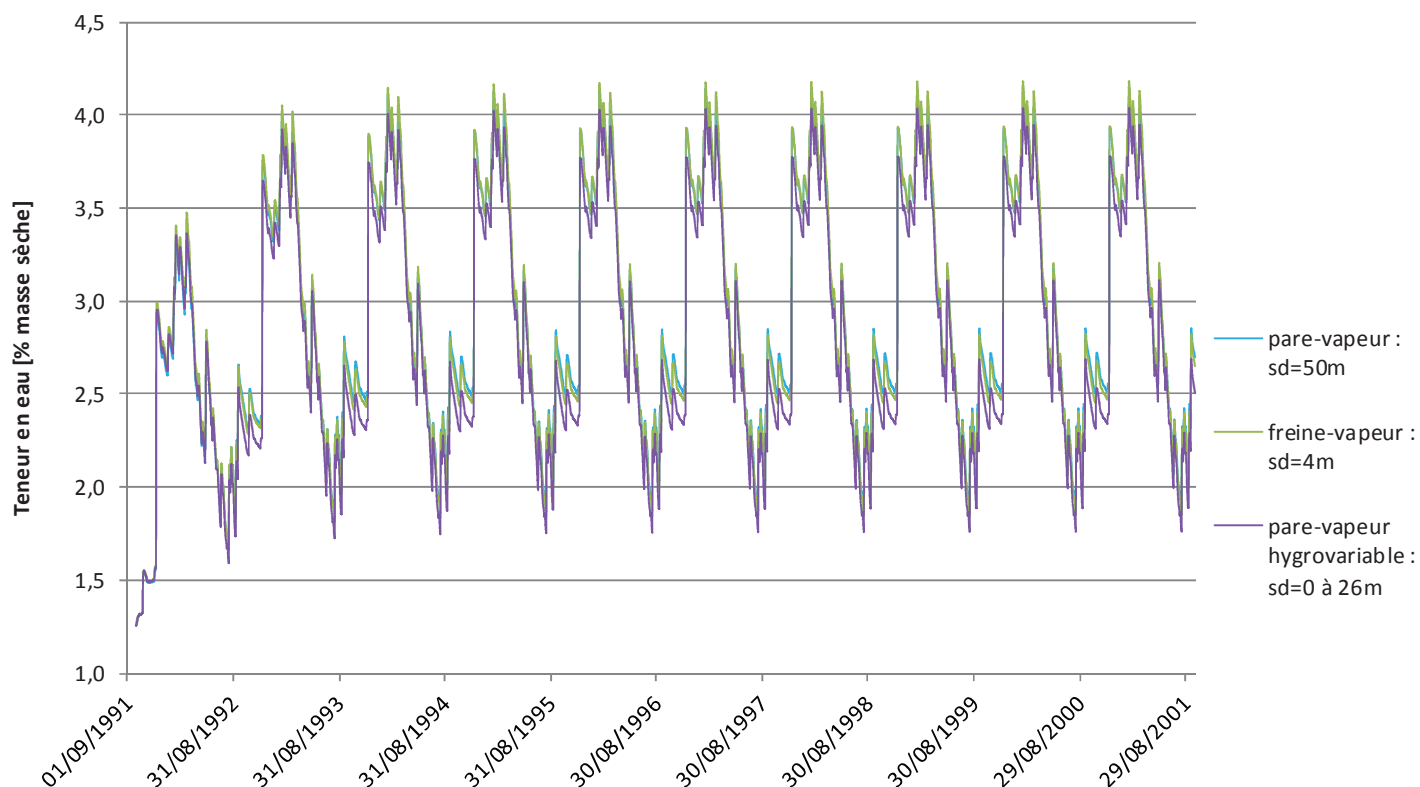
2.2.2 TENEUR EN EAU DANS LE TORCHIS

Comme pour le grès de la maison Ludwigswinkel, nous n'avons pas de seuil fiable dont le dépassement signifierait que la pérennité du torchis est mise en danger. En revanche, nous pouvons étudier l'allure de la courbe d'évolution de la teneur en eau. En cas de chargement d'eau, on pourra conclure à un risque.

Ci-dessous, la teneur en eau de la globalité du torchis sur 10 ans et le détail sur la dernière année de simulation :

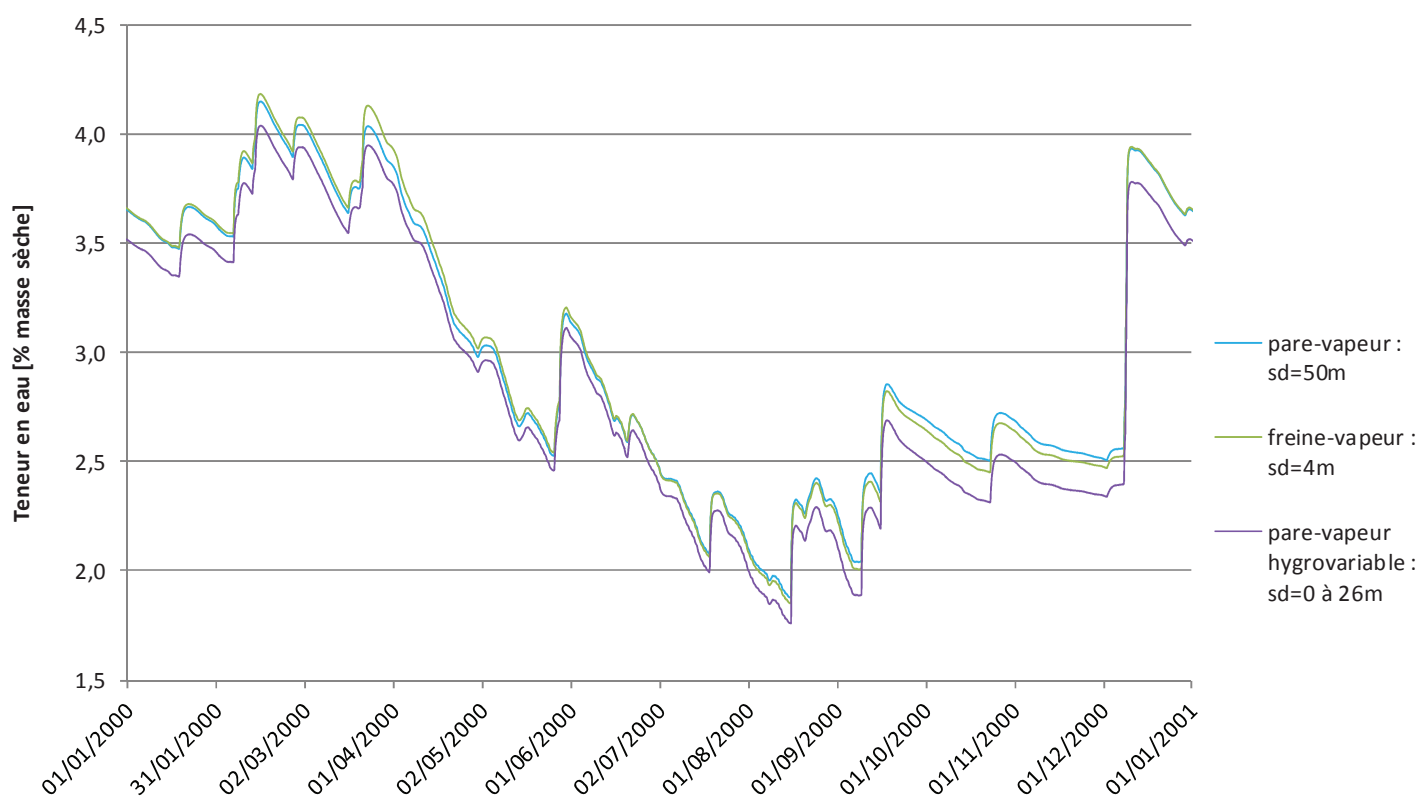


Teneur en eau du torchis



La teneur en eau du torchis atteint l'équilibre périodique très rapidement (3 ans).

Teneur en eau du torchis - dernière année



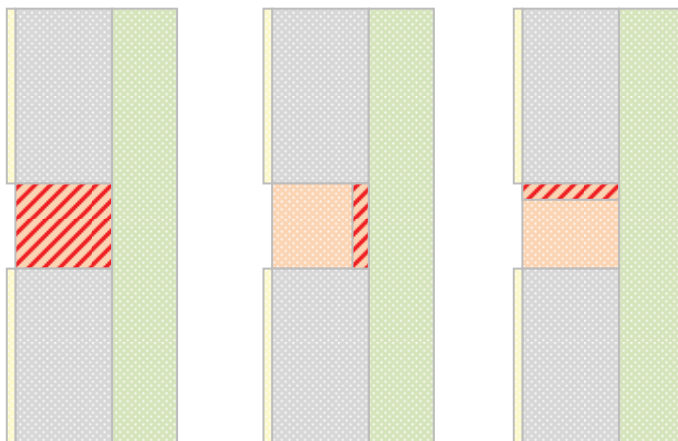
Utiliser un pare-vapeur hygrovariable permet de réduire légèrement la teneur en eau dans le torchis.

Bien que nous n'ayons pas de seuil pour le torchis, sa teneur en eau en moyenne de 3% (en pourcentage de masse sèche) est faible. De plus, cette teneur n'augmente pas d'année en année.

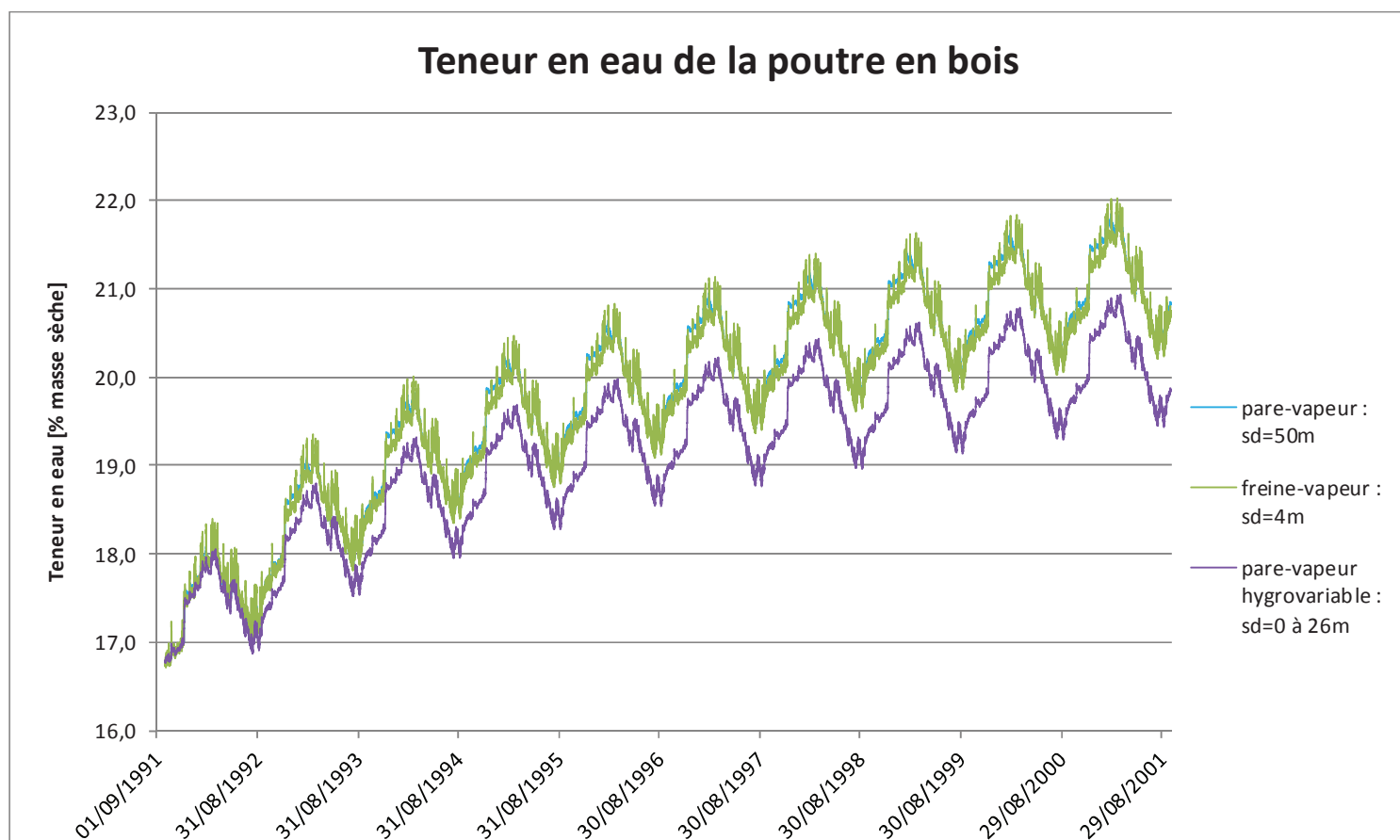
2.2.3 TENEUR EN EAU DANS LA POUTRE BOIS

On s'intéresse à la quantité d'eau dans la poutre de bois :

- en moyenne sur la totalité de la poutre (schéma ci-dessous à gauche)
- à l'interface avec l'isolant laine (schéma ci-dessous au milieu)
- à l'interface avec le torchis (schéma ci-dessous à droite)

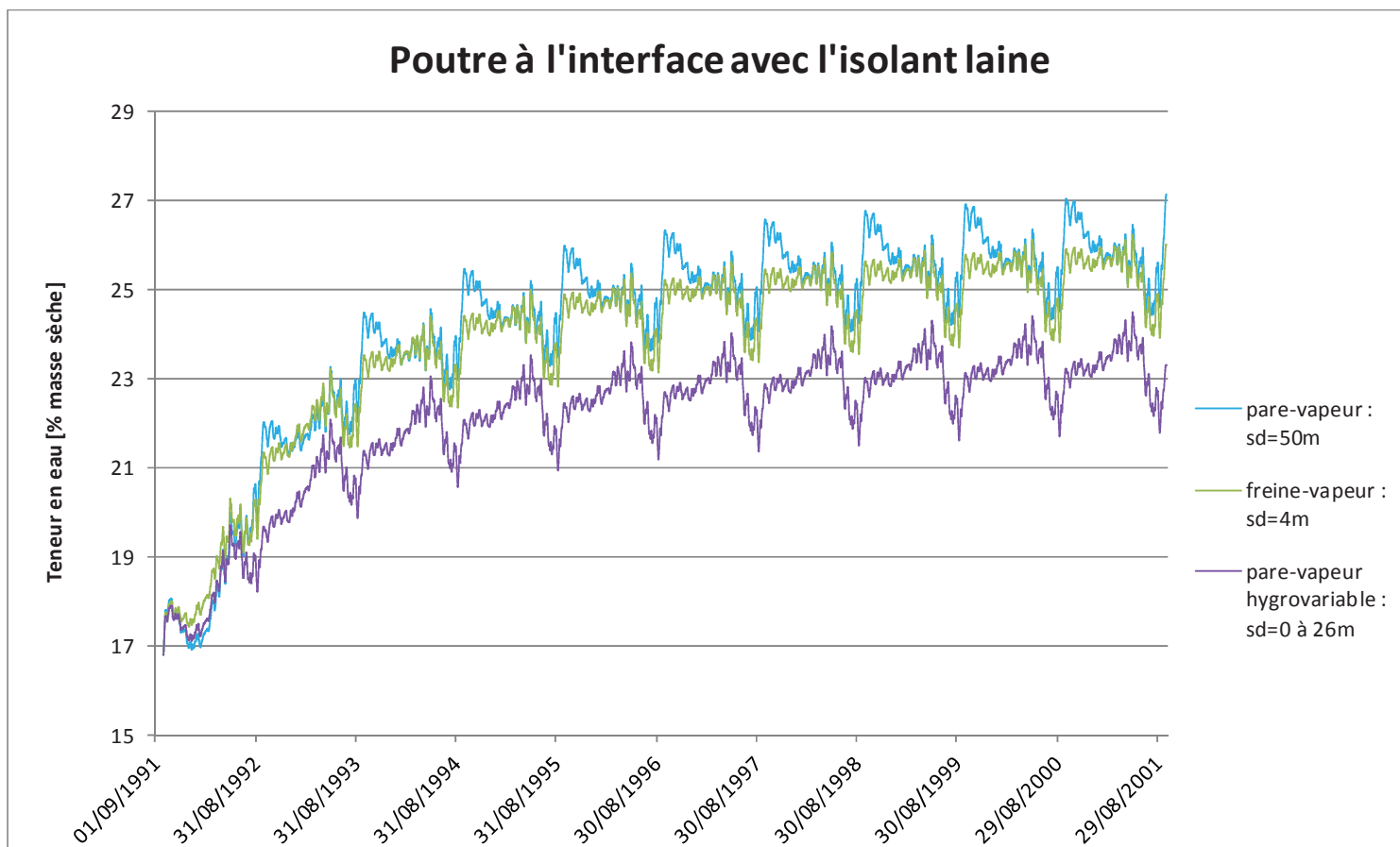


Ci-dessous la teneur en eau en moyenne dans la totalité de la poutre sur 10 années :



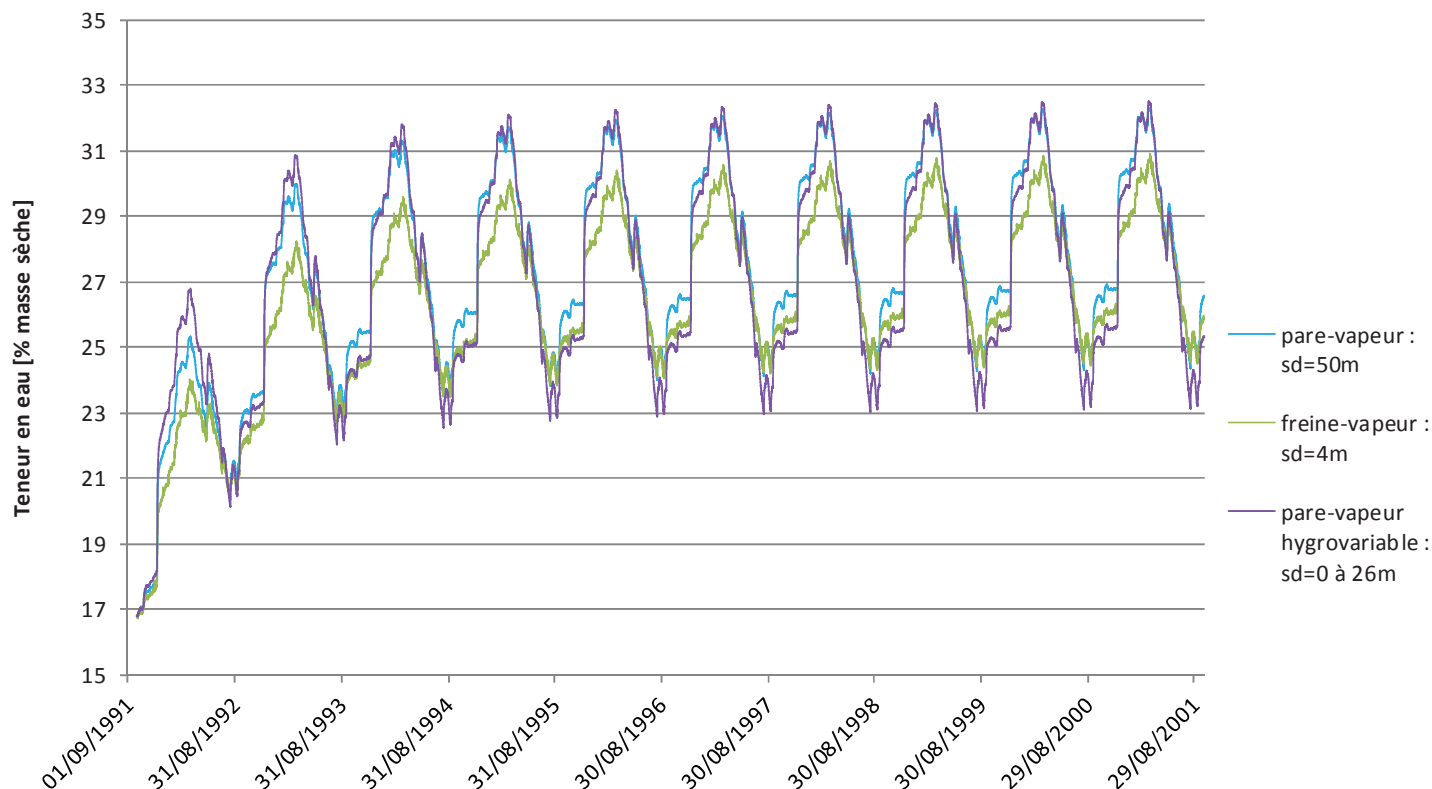
- La teneur en eau augmente au fil des années sans clairement se stabiliser (du moins dans les 10 années de simulation) bien que l'accroissement diminue chaque année.
- Avec un pare-vapeur ou un freine-vapeur classiques, la limite des 20% de masse sèche est atteinte dès la 4^{ème} année. Avec un pare-vapeur hygrovariable, elle l'est à partir de la 6^{ème} année.
- En revanche, la teneur en eau limite préconisée par le CSTB (23%) n'est pas dépassée, quel que soit le pare-vapeur envisagé.

Ci-dessous la teneur en eau de la poutre à l'interface avec l'isolant laine :



- La teneur en eau de la poutre à l'interface avec l'isolant atteint presque l'équilibre périodique au bout des 10 années de simulation.
- Encore une fois, l'utilisation d'un pare-vapeur hygrovariable est préférable à un freine-vapeur ou pare-vapeur (la teneur en eau est réduite d'environ 2% dans cette zone).
- Les 20% de masse sèche sont atteints dès la 2^{ème} année pour le freine et le pare-vapeur classique, et dès la 3^{ème} pour le pare-vapeur de type Intello.
- A partir la 3^{ème} année, les 23% du rapport du CSTB sont largement dépassés avec un freine ou un pare-vapeur traditionnel. Avec le pare-vapeur hygrovariable, on s'en approche dès la 5^{ème} année. Elle est ensuite dépassée, même si le dépassement est de moins grande ampleur qu'avec les films classiques.

Poutre à l'interface avec le torchis



- On constate que la teneur en eau se stabilise et atteint un équilibre périodique.
- Comme pour l'interface avec le bois, la teneur en eau dans cette zone de la poutre est très élevée. Elle est bien supérieure aux seuils fixés des 20% ou des 23% qui garantissent sa pérennité.

Regardons le détail des courbes précédentes sur la dernière année de simulation.

Poutre à l'interface avec le torchis - dernière année



Cette zone de la poutre bois se charge plus en eau pendant l'automne et l'hiver avec un pare-vapeur hygrovariable qu'avec les pare et freine vapeur-classiques. En revanche, elle sèche plus pendant le printemps et l'été avec un pare-vapeur hygrovariable qu'avec les autres. Ça s'équilibre donc sur l'année.

Bilan poutre bois :

D'après nos résultats, les poutres en bois risquent de se détériorer assez rapidement, du moins en surface. Ce n'est pourtant pas ce qui se passe sur le terrain (en tout cas pas à court terme). Plusieurs raisons expliquent ces résultats :

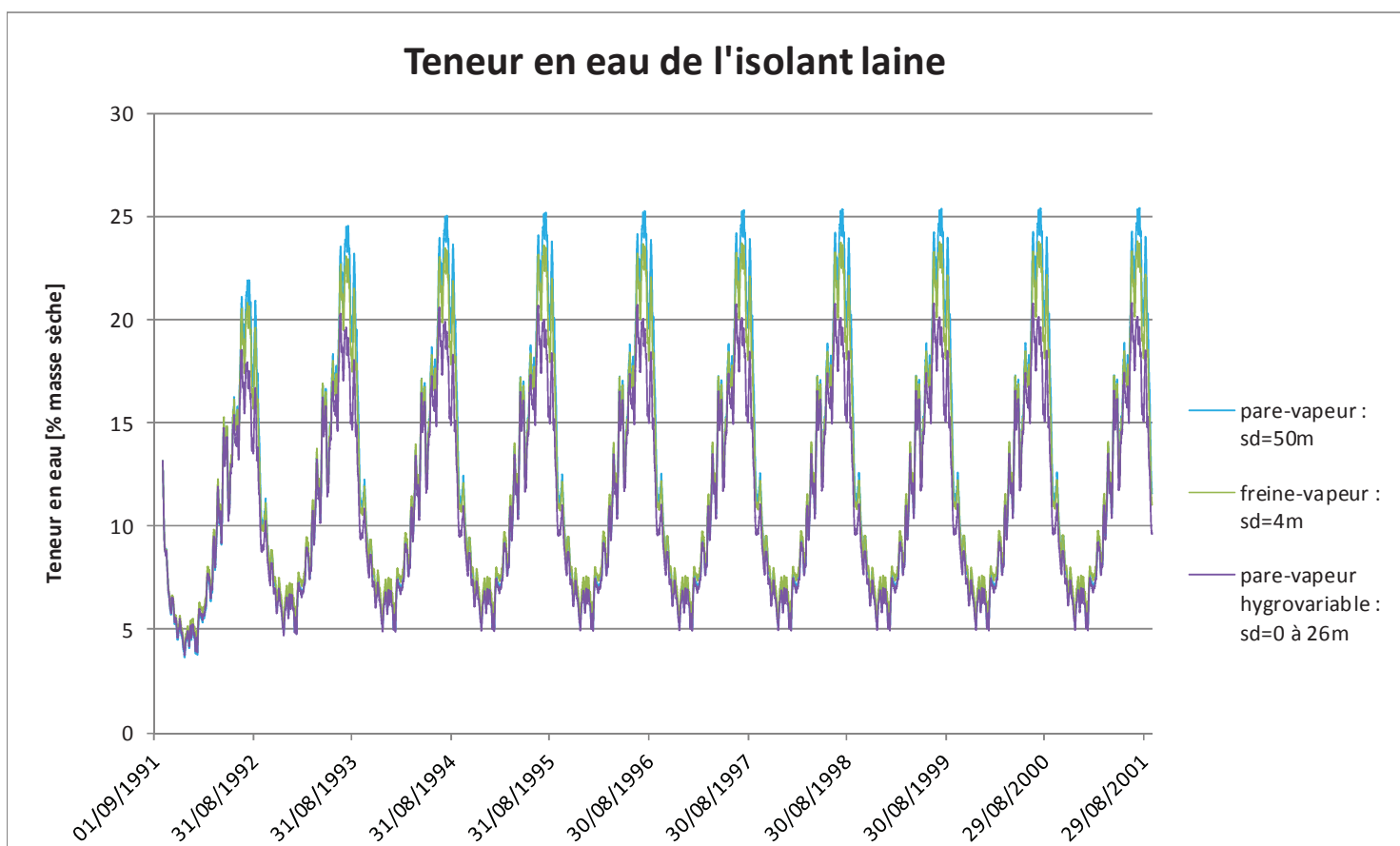
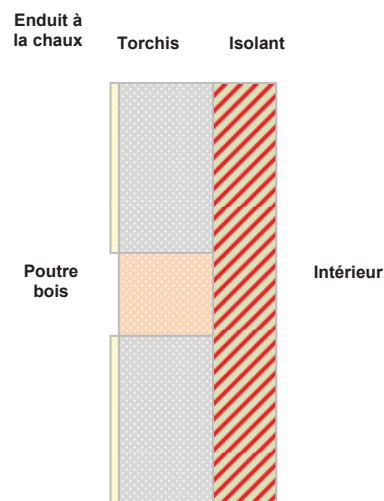
- Tout d'abord, ce problème dans la poutre bois n'a pas lieu dans l'état existant avec les mêmes conditions de simulation. C'est donc bien lié à l'isolation par l'intérieur, qui engendre des problèmes de migration d'humidité et de condensation dans les parois. Le moyen le plus sûr d'éviter cela est de privilégier tant que possible l'isolation par l'extérieur.
- Le transport de l'eau liquide dans les matériaux est décrit par un coefficient de transport capillaire. Dans WUFI, ce coefficient se partage en deux coefficients. Chaque matériau est défini par deux coefficients, l'un qui décrit la succion d'eau extérieure (pluie principalement) par le matériau et l'autre qui décrit la redistribution de l'eau dans le matériau. Lorsqu'il pleut, c'est le 1^{er} qui est pris pour **toutes les mailles** de ce matériau, et ce pour **tous les matériaux**. Dès qu'il cesse de pleuvoir, c'est le 2nd qui est utilisé. Or la valeur du 1^{er} coefficient de succion est élevée pour le torchis (naturellement très hygroscopique) par rapport à celui des autres matériaux. Lorsqu'il pleut dans WUFI, il y a donc d'importants flux d'eau liquide dans tout le torchis, qui ne correspondent pas forcément à la réalité. La façon qu'a WUFI de traiter le transport d'eau liquide amplifie le caractère hygroscopique naturel du torchis et l'importance de la pluie. Cela peut expliquer l'importante quantité d'eau dans le bois à proximité du torchis. C'est pourquoi il est difficile de tirer des conclusions de l'évolution de la teneur en eau dans les couches limites des matériaux à l'interface avec le torchis.
- Partant de ce constat, nous avons réfléchi à réduire la pluie reçue par la paroi. Nous avons par exemple simulé le même modèle en réduisant de moitié la quantité de pluie qui atteint la surface extérieure de la paroi, le seuil des 20% de masse sèche dans la poutre n'est alors pas dépassé même à l'interface avec le torchis. Mais réduire la pluie de cette façon est très arbitraire, d'autant plus que les coefficients de réduction pris jusque-là sont des valeurs moyennes recommandées soit par les créateurs de WUFI, soit par des normes. Ces valeurs ne représentent pas de cas particulièrement pessimiste mais seulement un cas moyen.
Les débords de toit présents sur beaucoup de maisons alsaciennes peuvent constituer une protection contre la pluie. Nous avons considéré un pan de mur de la maison qui n'est pas sous la protection d'un de ces débords (en milieu ou en bas d'étage par exemple).
- Nous nous sommes certes placés dans des hypothèses pessimistes pour d'autres aspects encore (orientation Nord-Ouest par exemple) mais c'était nécessaire pour la démarche scientifique de cette étude.

En conclusion, il est difficile de s'attacher aux valeurs absolues fournies par nos simulations. Celles-ci correspondent en effet au cas précis simulé. On peut cependant comparer les différentes solutions d'isolation entre elles, et s'attacher plutôt aux valeurs relatives.

Et dans le cas présent, un pare-vapeur hygrovariable donne des résultats bien plus satisfaisants qu'un freine-vapeur ou pare-vapeur classique.

2.2.4 TENEUR EN EAU DANS L'ISOLANT LAINE

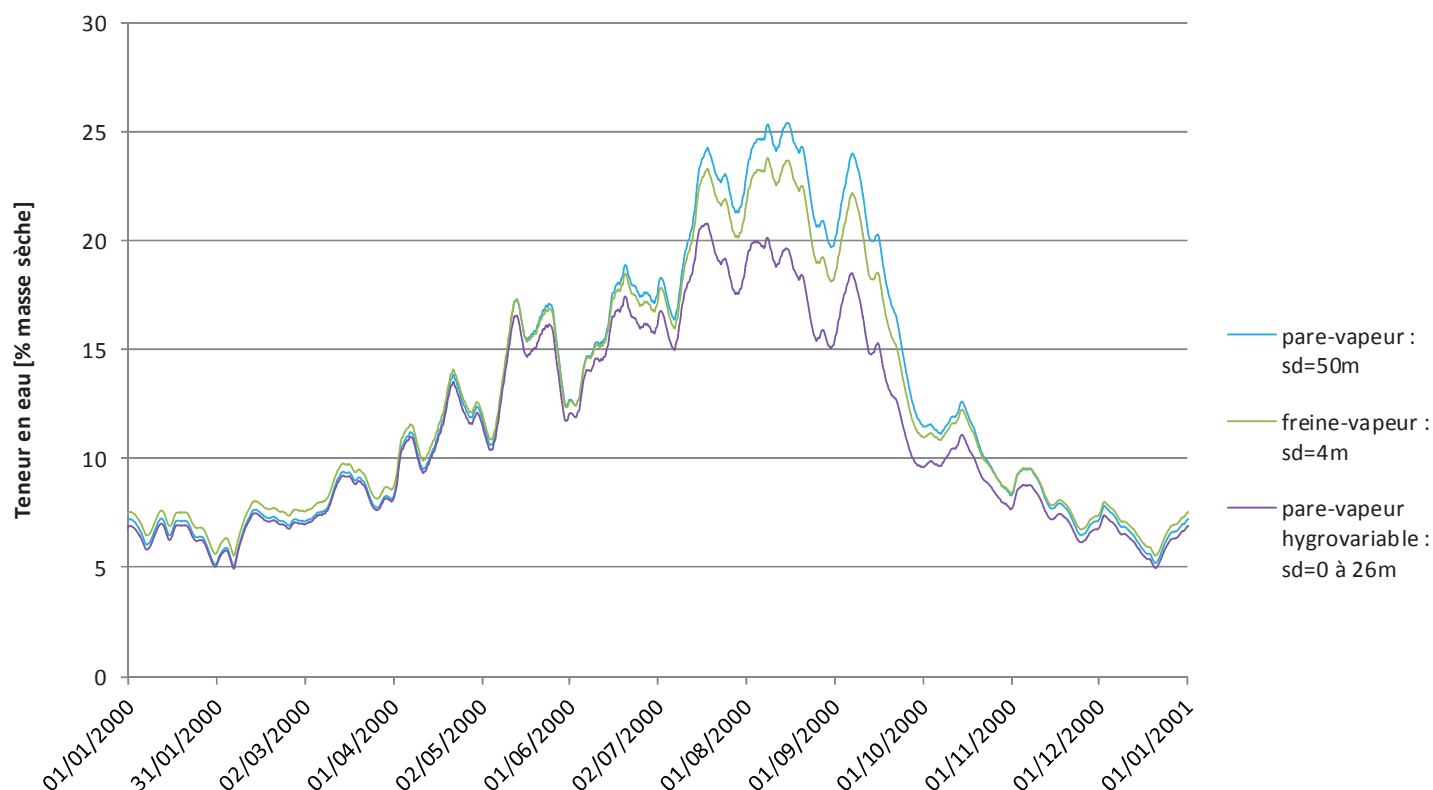
Ci-dessous, la teneur en eau dans l'isolant laine en moyenne dans sa totalité, sur 10 années de simulation :



La teneur en eau se stabilise rapidement (quelques années).

Si l'on zoom sur la dernière année de simulation :

Teneur en eau de l'isolant laine - dernière année



Encore une fois, le pare-vapeur hygrovariable est à privilégier.

En faisant abstraction de la non-pérennité de la paroi de par la teneur en eau de la poutre, on constate que seule la laine de mouton ne voit pas son seuil dépassé (seuil de 30% de masse sèche).

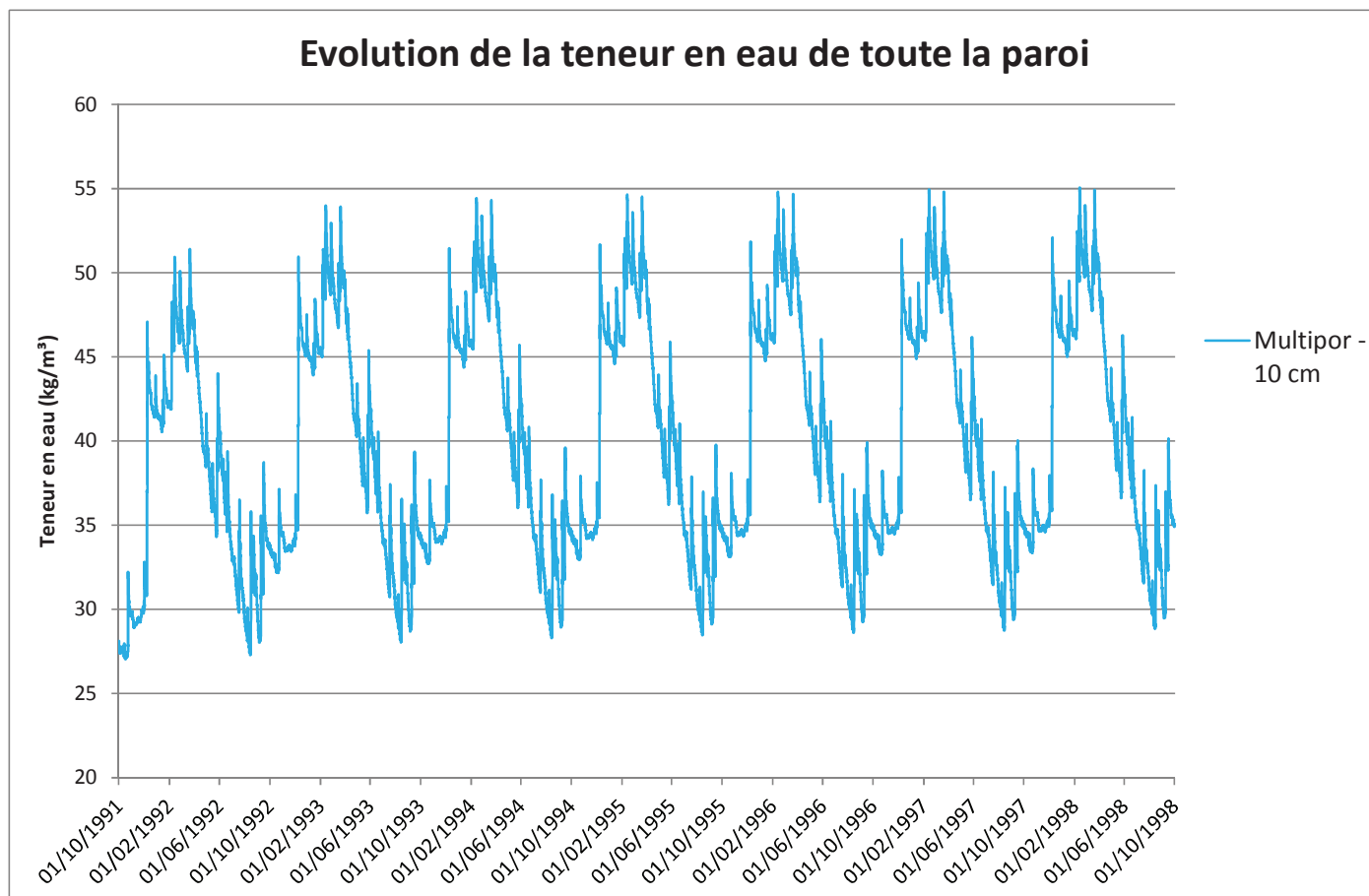
La laine de bois voit son seuil de 18% dépassé pendant quelques semaines par an seulement. Le seuil de la cellulose (15%) est lui dépassé pendant 3 mois consécutifs et celui de la laine minérale (13%) pendant 5 mois consécutifs. Même s'il est difficile de se baser sur les valeurs absolues de nos résultats, on voit en comparant entre eux les matériaux que les laines de bois et de mouton sont les plus pérennes.

Dans cette partie, nous voyons que l'élément de la paroi le plus restrictif n'est pas l'isolant mais la poutre en bois de par nos conditions climatiques. Nous verrons l'influence de l'épaisseur d'isolant sur cette dernière dans la partie dimensionnement.

2.3 RÉSULTATS PANNEAU SILICATE DE CHAUX (TYPE MULTIPOR)

2.3.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

On a effectué les simulations avec un panneau en silicate de chaux de 10 cm fixé au mur en colombages avec de la colle en plots (10 cm tous les 20 cm). On obtient l'évolution de la teneur en eau dans toute la paroi sur 7 ans :



- Tout d'abord, la teneur en eau moyenne est plus élevée que dans le cas de la maison de Ludwigswinkel. Cela tient aux propriétés mêmes des matériaux : on peut voir sur leurs courbes de sorption (**Annexes**) que le torchis et le chêne peuvent contenir bien plus d'eau que le grès Obernkirchner.
- La première année de simulation ne semble pas révélatrice du comportement de la paroi à l'équilibre. On voit que l'équilibre semble atteint plutôt à partir de la 3^{ème} année.
- La quantité d'eau dans la paroi est ensuite relativement stable d'année en année. Il y a une infime augmentation de la teneur en eau, comme indiqué dans le tableau suivant.

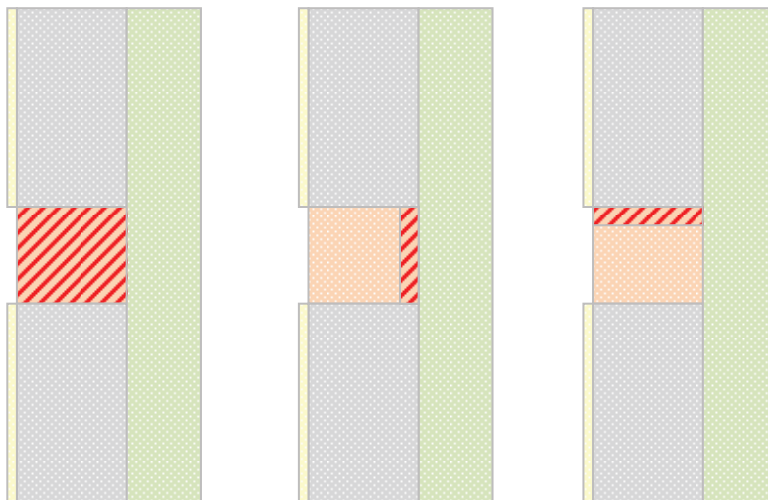
	01/03/1994	01/03/1995	01/03/1996	01/03/1997	01/03/1998
Teneur en eau (kg/m ³)	51,06	51,27	51,43	51,56	51,68

Cette tendance est cependant de très faible ampleur, et ne permet pas de conclure de façon certaine sur un quelconque danger pour les matériaux. Nous étudions pour cela d'autres régions de la paroi.

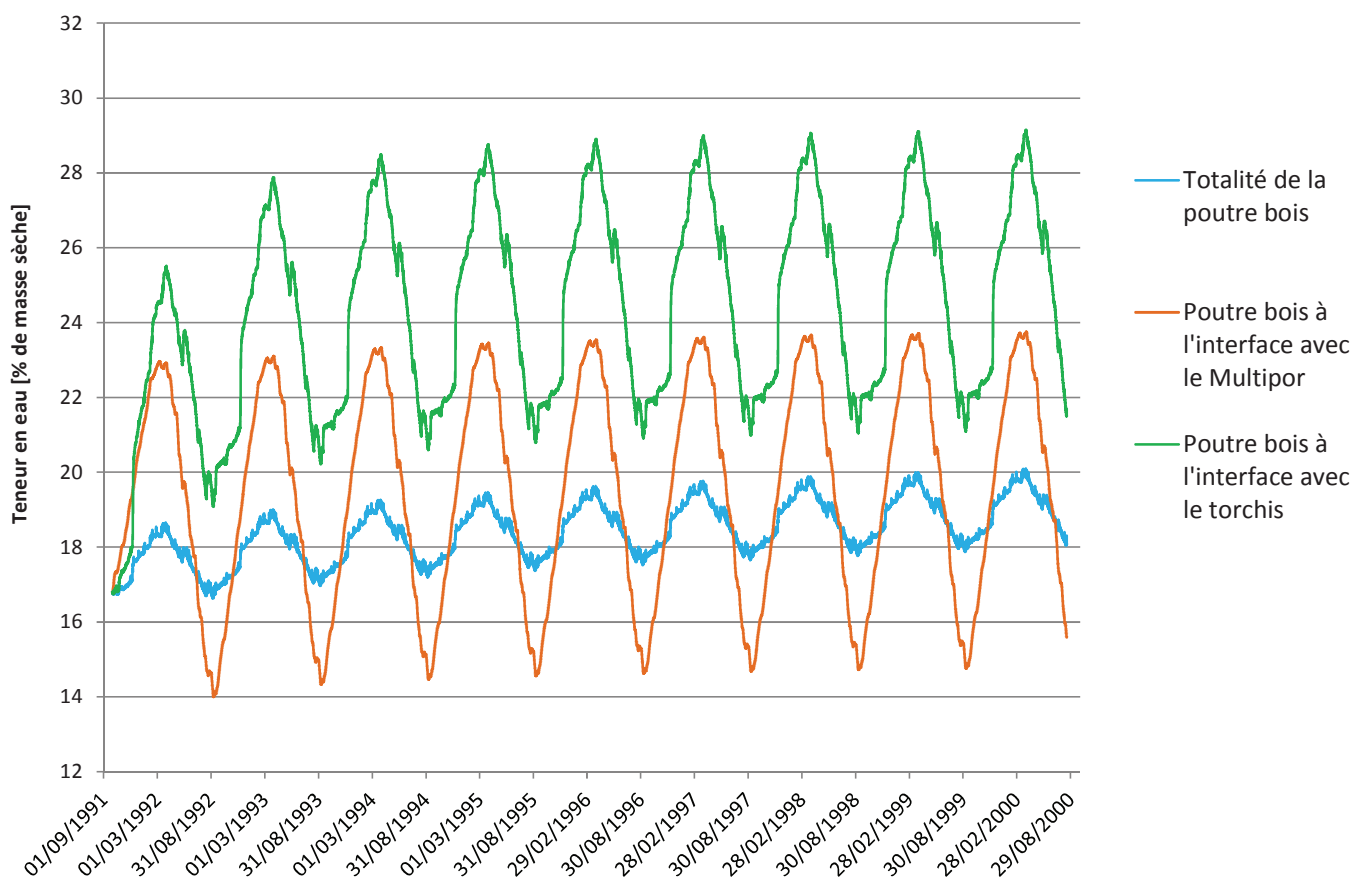
2.3.2 TENEUR EN EAU DANS LA POUTRE BOIS

On s'intéresse à la quantité d'eau dans la poutre de bois :

- sur la totalité de la poutre (schéma ci-dessous à gauche)
- à l'interface avec le Multipor (schéma ci-dessous au milieu)
- à l'interface avec le torchis (schéma ci-dessous à droite)



Teneur en eau dans la poutre de bois



- Sur la globalité de la poutre et au bout de 7 ans, la teneur en eau reste en dessous de la limite des 20% de masse sèche. Cependant, la quantité d'eau augmente d'année en année. À terme cette valeur seuil sera atteinte. Il semble y avoir un risque pour la pérennité des poutres bois du mur orienté Nord-Ouest. En

revanche, la valeur seuil au-delà de laquelle de la moisissure pourrait se développer (23% plus de 8 semaines d'affilée) n'est pas dépassée et semble difficilement atteignable.

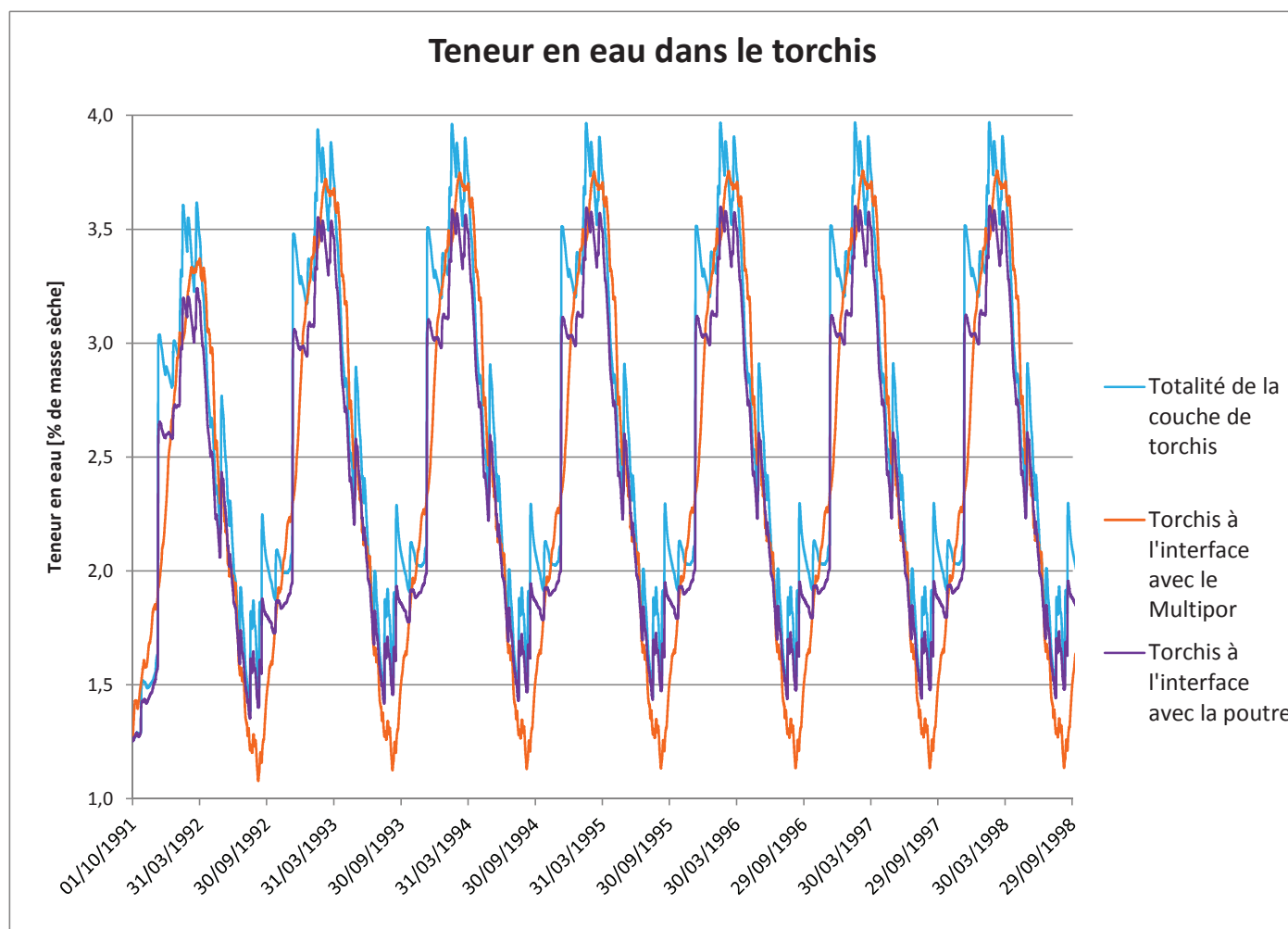
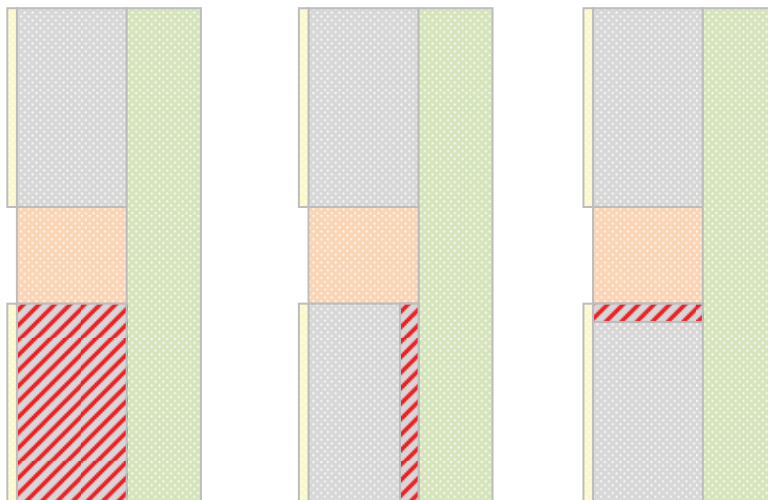
Comme indiqué au paragraphe 5.1., il est difficile de se prononcer sur les valeurs absolues. On peut tout de même constater que l'augmentation de la teneur en eau est d'environ 0,3% de masse sèche par an, ce qui est limité.

- Pour ce qui est de la zone de la poutre à l'interface avec le Multipor, la limite générale des 20% de masse sèche est atteinte chaque année sur de relativement longues périodes (6 mois). En revanche, la valeur limite pour le développement fongique (23%) n'est atteinte que sur les dernières années.
Là encore il est plus prudent d'étudier les résultats relativement aux autres. Or sur les dernières années de simulation, la teneur en eau de 23% de masse sèche est dépassée pendant 8 mois avec un isolant laine protégé d'un pare-vapeur hygrovariable, et pendant 3 mois avec du Multipor.
En revanche, on note que la teneur en eau dans la poutre à l'interface avec l'isolant se stabilise pendant les dernières années de simulation, avec la laine et le Multipor. On voit en effet que cette zone sèche chaque printemps/été jusqu'à atteindre la même teneur en eau minimale chaque année. On verra que ça n'est pas le cas avec du polystyrène en isolation intérieure.
- Enfin, dans la poutre à l'interface avec le torchis, les quantités d'eau sont élevées. La limite générale des 20% est largement dépassée et celle des 23%, au-delà de laquelle il peut y avoir développement de champignons, l'est également pendant 6 mois consécutifs.
Comme énoncé précédemment, WUFI rend probablement le rôle du transport d'eau liquide par capillarité dans le torchis trop important. Il est donc difficile de garantir l'exactitude des valeurs absolues des résultats.

2.3.3 TENEUR EN EAU DANS LE TORCHIS

On regarde maintenant ce qu'il se passe dans le torchis :

- sur la totalité du pan de torchis (schéma ci-dessous à gauche)
- à l'interface avec le Multipor (schéma ci-dessous au milieu)
- à l'interface avec la poutre bois (schéma ci-dessous à droite)



- Nous ne disposons pas de valeur seuil bien définie de la quantité d'eau dans le torchis pour déterminer de façon certaine s'il y a un risque de dégradation. On peut simplement observer que sur la totalité de la couche de torchis, la quantité d'eau n'augmente mais au contraire reste stable.

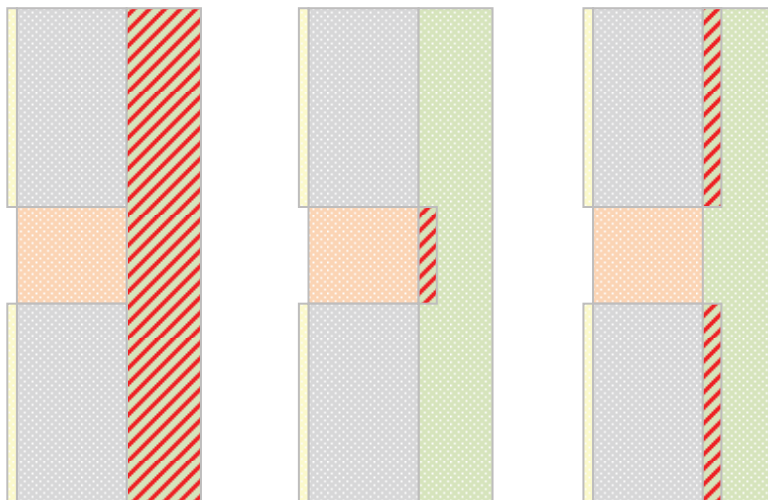
- De plus les teneurs en eau des différentes zones (interface avec l'isolant et avec la poutre bois) sont très homogènes, elles sont similaires à l'évolution de la teneur en eau de la couche de torchis dans sa globalité. Cela s'explique par le fait que le torchis est naturellement très respirant, il est capable de transporter d'importantes quantités de vapeur d'eau. La teneur en eau du torchis s'équilibre donc sur la globalité de sa couche, l'eau ne s'accumule pas dans certaines zones du torchis.

Attention, comme indiqué plus haut, le choix de modélisation du phénomène de transport de vapeur dans WUFI (coefficients de succion et de redistribution de l'eau liquide pour toutes les mailles du matériau) accroît cette capacité du torchis à diffuser l'eau. Cela peut conduire à un rôle trop important de ce phénomène pour le torchis sans que cela corresponde forcément à la réalité.

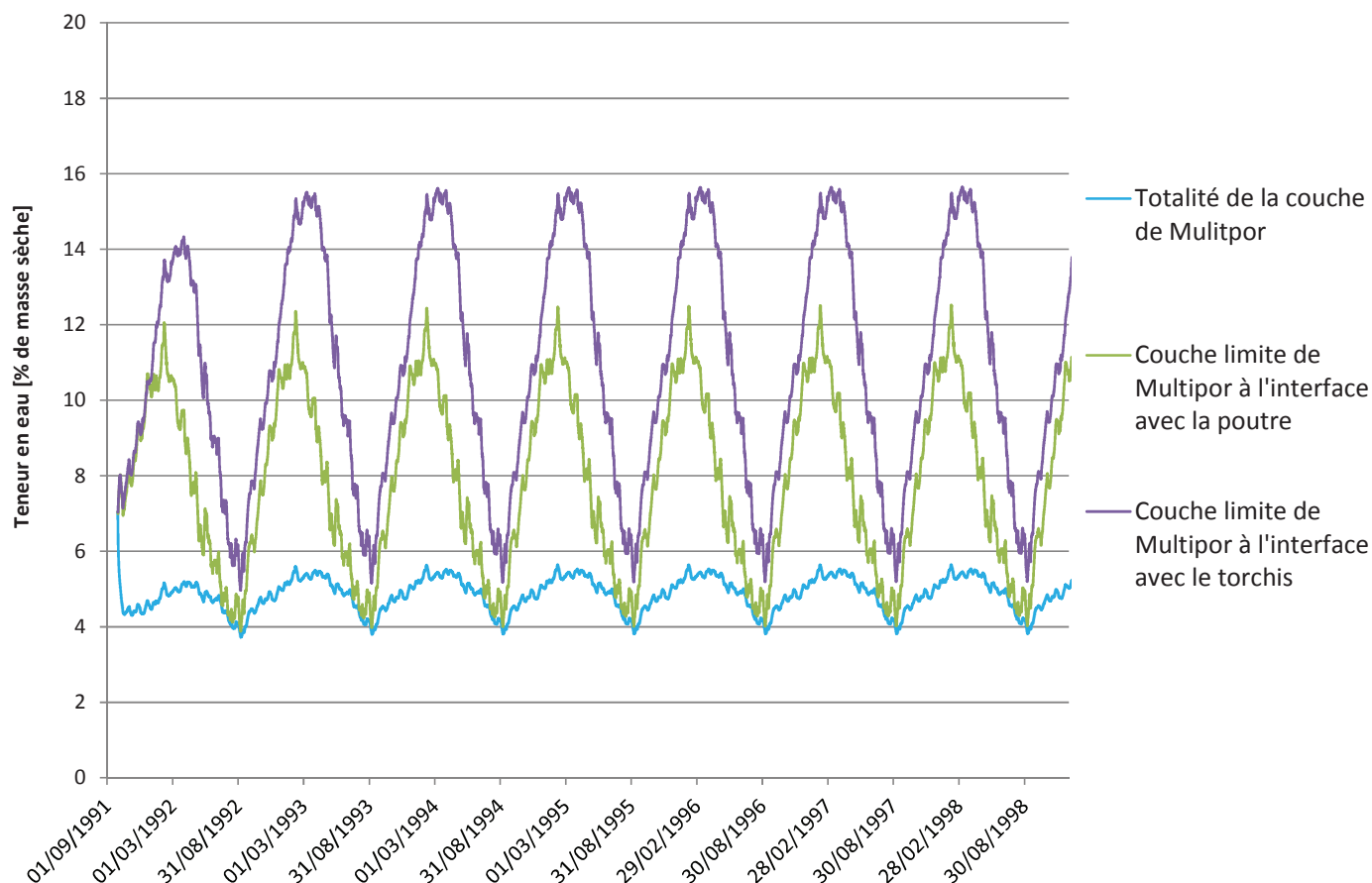
2.3.4 TENEUR EN EAU DANS LE MULTIPOR

On s'intéresse au comportement du Multipor :

- Sur l'intégralité de la couche d'isolant (schéma ci-dessous à gauche)
- A l'interface avec la poutre bois (schéma ci-dessous au milieu)
- A l'interface avec un pan de torchis (schéma ci-dessous à droite)



Teneur en eau dans le Multipor



- Tout d'abord, quel que soit l'endroit de la couche d'isolant où on se place, la teneur en eau n'atteint pas la valeur seuil des 23% de la masse sèche. Il n'y a donc aucun risque de dégradation du Multipor. **Le Multipor est une bonne**

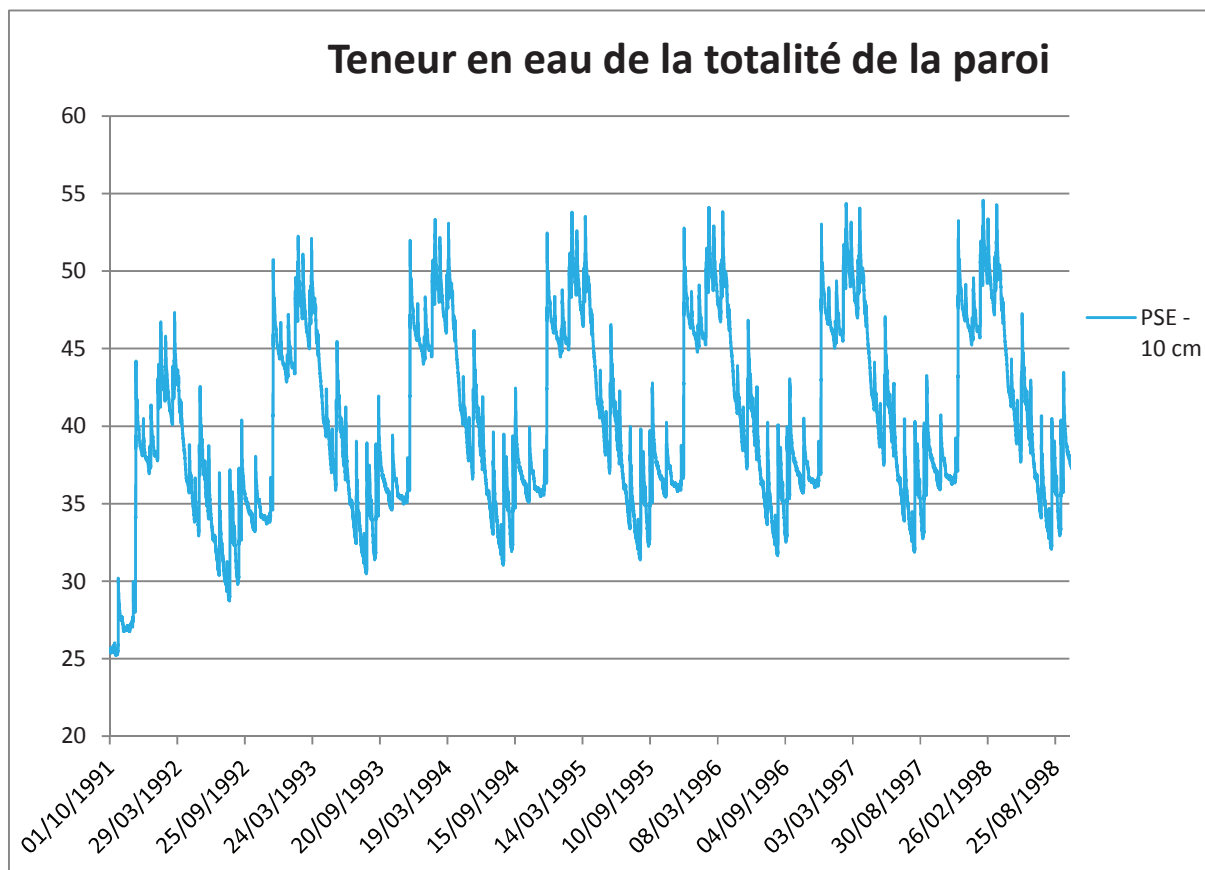
alternative d'isolation par l'intérieur des murs en colombage de la maison d'Hunspach.

- Ensuite, la différence de quantité d'eau entre l'interface avec le torchis et l'interface avec le bois s'explique par les caractéristiques physiques des matériaux.
En effet, on voit sur la courbe de sorption des matériaux (**Annexes**) que le chêne peut contenir plus d'eau que le torchis. Cela s'en ressent au niveau de l'interface de ces matériaux avec le Multipor : le Multipor contient plus d'eau à l'interface avec le torchis qu'à l'interface avec le chêne.
Puis les coefficients de succion et de redistribution caractérisant le transport d'eau liquide dans les matériaux sont plus élevés pour le torchis que pour le chêne et le Multipor. Le torchis transporte plus d'eau liquide que le chêne, cela peut constituer une autre raison quant à la quantité d'eau dans le Multipor plus importante dans le voisinage du torchis que près du bois.
- Comme indiqué plus haut, nous sommes obligés de prendre une certaine distance avec les résultats. Mais le graphique précédent montre que, quelle que soit la zone de la couche d'isolant où l'on se place, on dispose d'une marge très confortable avant d'atteindre la teneur en eau limite du Multipor (23%). Cela assure une sécurité quant à l'interprétation des résultats.

2.4 RÉSULTATS PSE

2.4.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

Nous avons effectué les tests avec un panneau de polystyrène expansé (PSE) de 10 cm, fixé au mur en colombages avec de la colle en plots (plots de 10 cm tous les 20 cm). On obtient ainsi l'évolution de la teneur en eau de toute la paroi sur 7 ans :



- L'évolution de la teneur en eau dans la paroi est très similaire à celle de la paroi isolée avec du Multipor. Comme précédemment, la quantité d'eau moyenne est bien supérieure à celle de la maison de Ludwigswinkel isolée avec du PSE, car les matériaux des murs d'Hunspach peuvent contenir beaucoup plus d'eau (voir les courbes de sorption en **Annexes**).
- La teneur en eau augmente jusqu'à relative stabilisation : à partir de la 3^{ème} année elle ne croît plus que très légèrement, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

	01/03/1994	01/03/1995	01/03/1996	01/03/1997	01/03/1998
Teneur en eau (kg/m³)	49,9	50,3	50,6	50,9	51,1

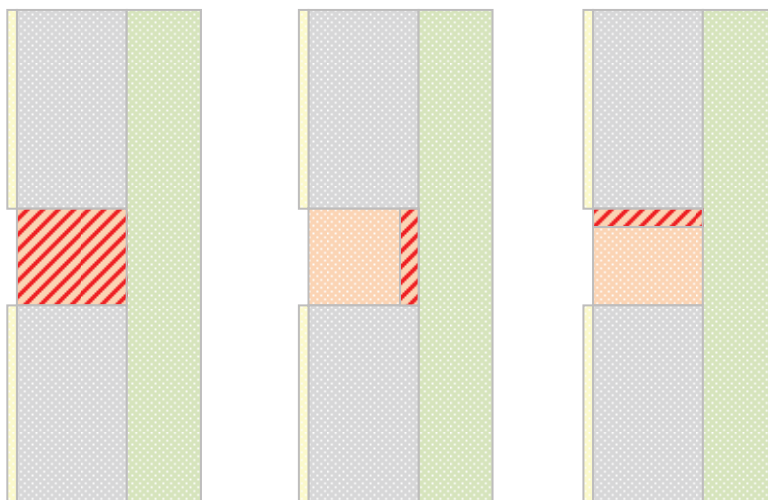
Cette très légère hausse ne permet pas de conclure de façon certaine sur un quelconque danger pour les matériaux. Nous étudions pour cela d'autres régions de la paroi.

Les polystyrènes extrudé et expansé et le polyuréthane sont des matériaux non hygroscopiques, ils ne sont pas capables de fixer de l'eau de leur environnement. Il n'apporte donc rien de regarder l'évolution de la teneur en eau dans le PSE, nous regardons simplement dans le torchis et dans la poutre du mur en colombages.

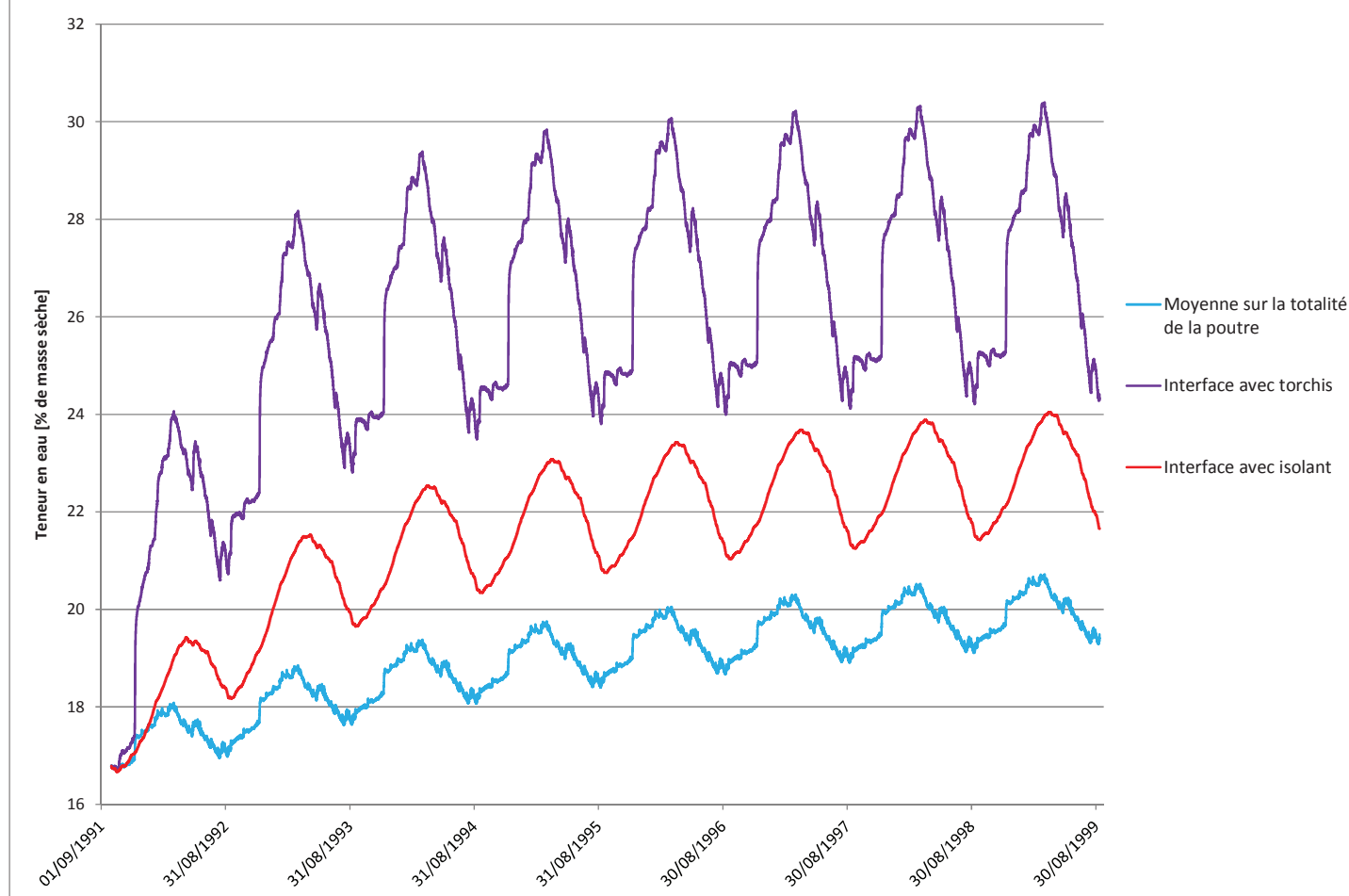
2.4.2 TENEUR EN EAU DANS LA POUTRE BOIS

Nous regardons la teneur en eau de plusieurs zones de la poutre bois :

- Sur la totalité de la poutre (schéma de gauche)
- Dans la couche limite de la poutre à l'interface avec le PSE (schéma du milieu)
- Dans la couche limite de la poutre à l'interface avec le torchis (schéma de droite)



Teneur en eau de la poutre bois sur 7 ans



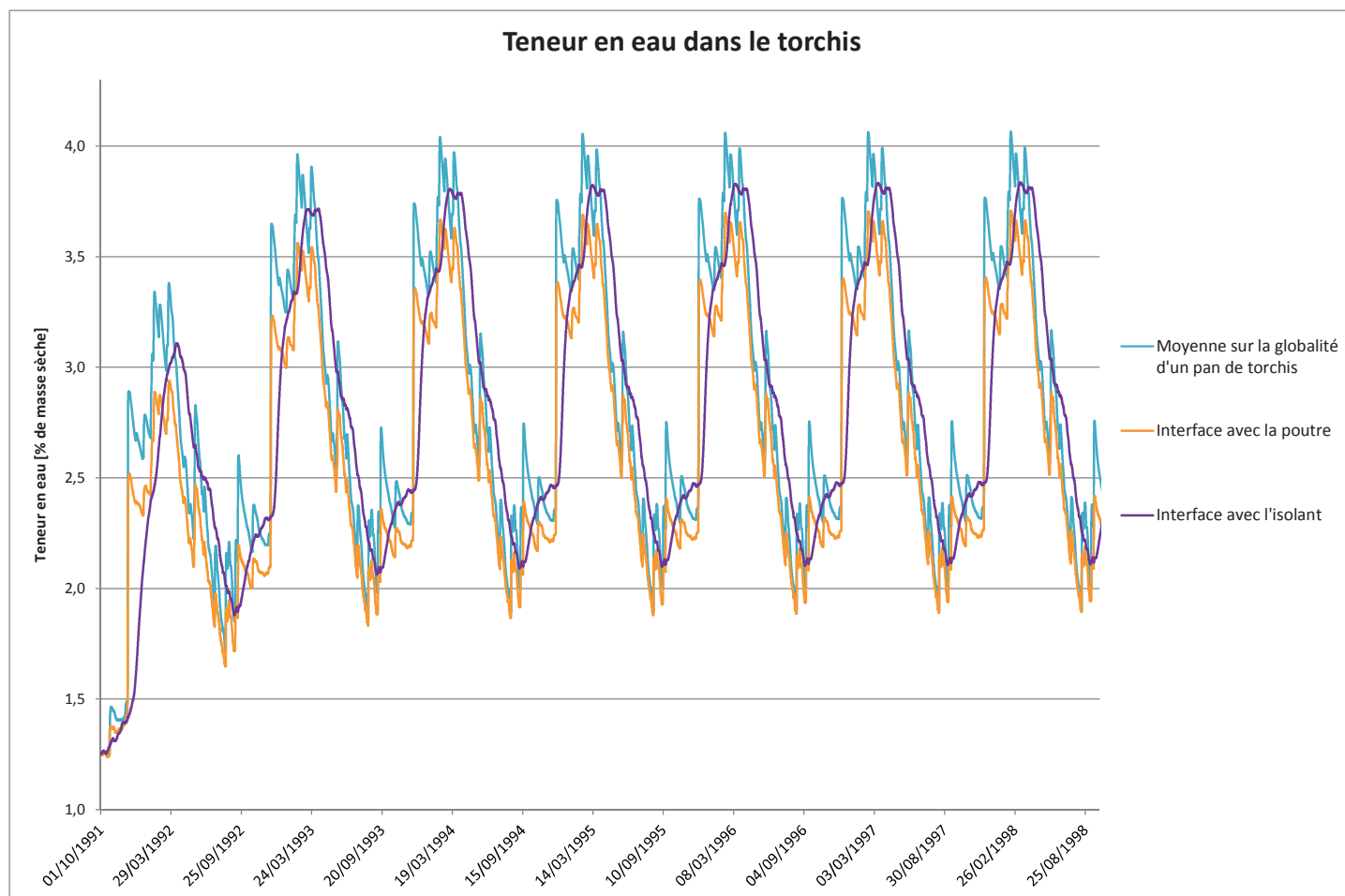
L'évolution de la teneur en eau dans la poutre dans le cas de l'isolation avec du PSE est similaire à celle dans le cas d'une isolation avec du Multipor. Mais les différences suivantes

permettent tout de même de mettre à jour les désavantages d'une isolation avec du polystyrène expansé, extrudé ou du Polyuréthane.

- Sur la globalité de la poutre, la teneur en eau augmente plus rapidement dans le cas de l'isolation avec du PSE. Ainsi, la teneur en eau limite de 20% de masse sèche est atteinte à partir de la 6^{ème} année avec le PSE et ne l'est pas des 9 ans de simulation avec le Multipor.
- Dans la couche limite à l'interface avec le PSE, la teneur en eau de la poutre ne se stabilise pas. On voit que la quantité d'eau après le séchage de l'été est de plus en plus importante d'année en année : **le PSE empêche le bois de se sécher vers l'intérieur**. Ça n'est pas le cas avec le Multipor : chaque année, la couche limite de la poutre à l'interface avec l'isolant sèche jusqu'à atteindre la même valeur (cf. p. 20). De même, isoler avec de la laine et un pare-vapeur hygrovariable permet à cette zone de sécher (cf. p. 14). Ainsi, même si les valeurs de teneur en eau sont élevées dans cette zone quel que soit l'isolant (au-delà de 23% de masse sèche pendant 3 mois pour le Multipor et plus de 6 mois pour la laine et le PSE), un isolant perméable permet à cette zone de ne pas accumuler d'eau.
- Enfin, la teneur en eau de la couche limite de la poutre à l'interface avec le torchis est très élevée, quelle que soit la nature de l'isolant (avec tous les isolants testés dans ce rapport). Nous avons émis précédemment les limites de l'analyse de nos simulations, notamment dans le torchis et dans les matériaux aux interfaces avec le torchis, en raison du poids trop important joué par le transport d'eau liquide dans le torchis. Il est donc difficile de juger des valeurs absolues de la teneur en eau dans ces zones. En revanche, on peut se servir des résultats pour étudier les valeurs relatives et comparer les différents matériaux entre eux. Or dans la couche limite de la poutre à l'interface avec le torchis, c'est avec le Multipor que la teneur en eau est la moins élevée (29% de masse sèche maximum au bout de 9 ans), ensuite vient le PSE (30,4% maximum) et enfin les isolant fibreux (32% maximum).

Les isolants synthétiques de type polystyrène expansé, extrudé et polyuréthane sont à éviter en isolation intérieure, d'autant plus avec des murs d'origine naturellement respirants, ce qui est le cas du torchis.

2.4.3 TENEUR EN EAU DANS LE TORCHIS



- Comme indiqué plus haut, nous ne disposons pas de valeur seuil définie de la teneur en eau au-delà de laquelle il y aurait un risque pour la pérennité du torchis. Nous ne pouvons que constater que la teneur en eau est stable, quel que soit l'endroit où on se place dans la couche de torchis. Le torchis semble pouvoir sécher tous les étés jusqu'à arriver à la même valeur minimum de teneur en eau tous les ans. **Le problème causé par le caractère imperméable du PSE se situe donc davantage dans la poutre et non dans le torchis.**
- On voit que les quantités d'eau sont homogènes quelle que soit la zone du pan de torchis qu'on étudie. Cela est dû à la bonne répartition de l'humidité du torchis : il transporte bien l'eau, ce qui a pour conséquence l'équilibrage de la teneur en eau dans toute la couche.

Attention : Nous avons déjà émis auparavant les réserves quant au transport d'eau liquide dans le torchis : il joue un rôle très important dans WUFI. Il est difficile d'être certains que l'évolution de la teneur en eau dans le torchis telle que présentée dans le graphique précédent corresponde à ce qui se passe en réalité.

3 DIMENSIONNEMENT DES MATÉRIAUX – MAISON HUNSPACH

Dans cette partie, nous étudions les épaisseurs maximales d'isolant qu'il est possible de mettre en œuvre en fonction de l'évolution du comportement hygrométrique, et ceci pour les isolants retenus après l'étude présentée en partie précédente.

Pour cela, nous avons effectué des tests avec le détail constructif de la solive en bois encastrée dans le mur. Nous obtenons sensiblement les mêmes résultats qu'avec la poutre du colombage : ce qui nous permettra de conclure quant à une épaisseur maximale d'isolant intérieur à mettre en œuvre est de façon générale un élément de bois dans le mur. La poutre du colombage suffit donc pour obtenir une conclusion sur l'épaisseur d'isolant.

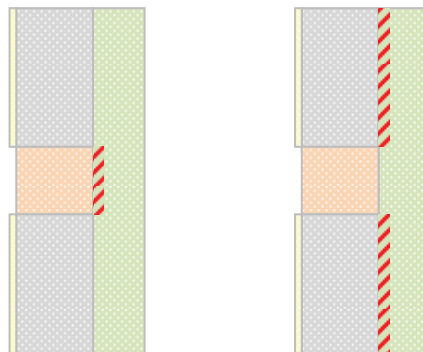
3.1 DIMENSIONNEMENT ISOLANTS FIBREUX

Nous avons simulé les épaisseurs suivantes de l'isolant laine: 4, 6, 8, 10 et 15 cm. Et ce avec un pare-vapeur hygrovariable puisqu'il donnait les meilleurs résultats dans la partie précédente (test des matériaux).

Les simulations ont été faites sur 10 ans sauf pour les épaisseurs de 4 et 10 cm où elles ont été poussées à 20 ans. Il n'a malheureusement pas été possible d'effectuer toutes les simulations sur 20 ans, étant donné le temps de calcul très élevé.

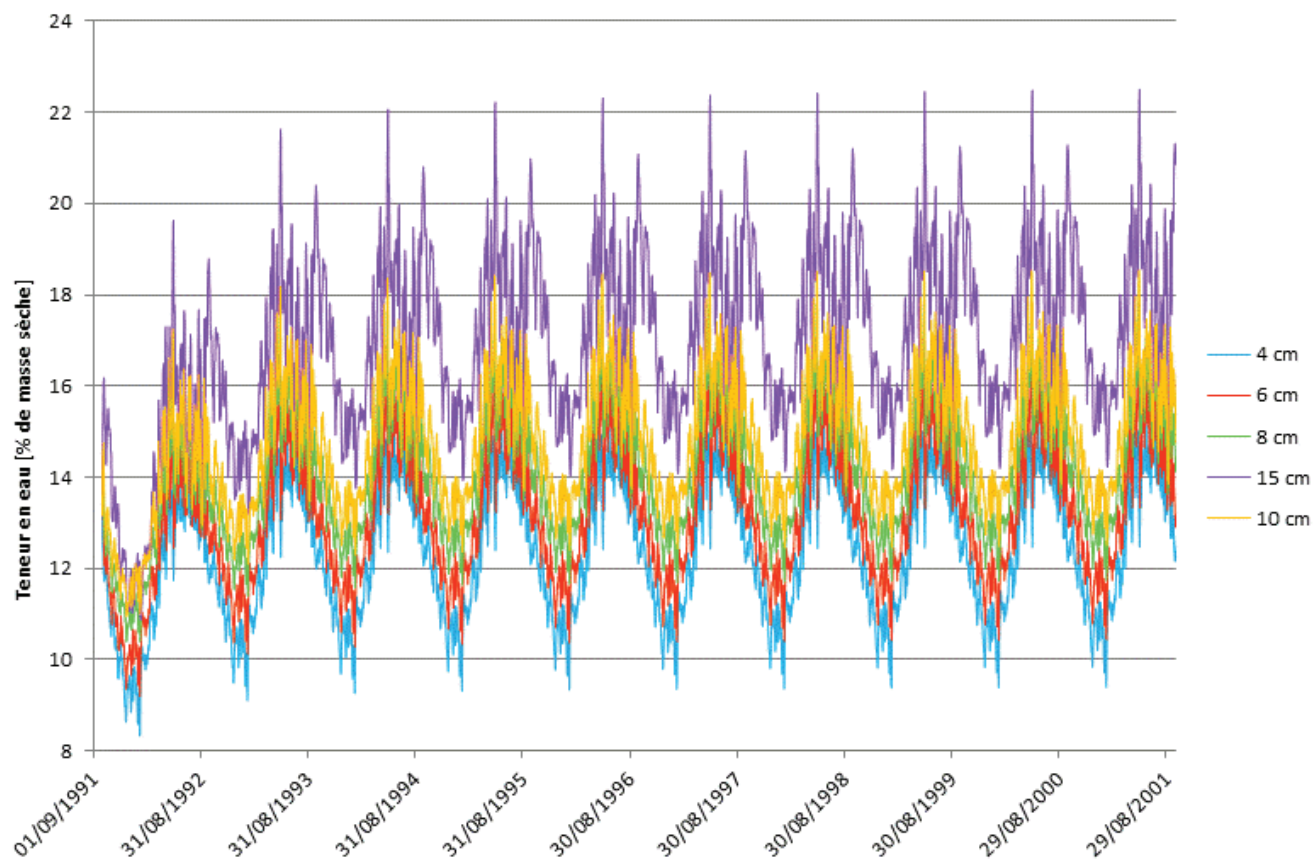
3.1.1 TENEUR EN EAU DANS L'ISOLANT LAINE

On s'intéresse à la teneur en eau dans l'isolant à l'interface avec la poutre (schéma ci-dessous à gauche) et avec le torchis (schéma ci-dessous à droite) :

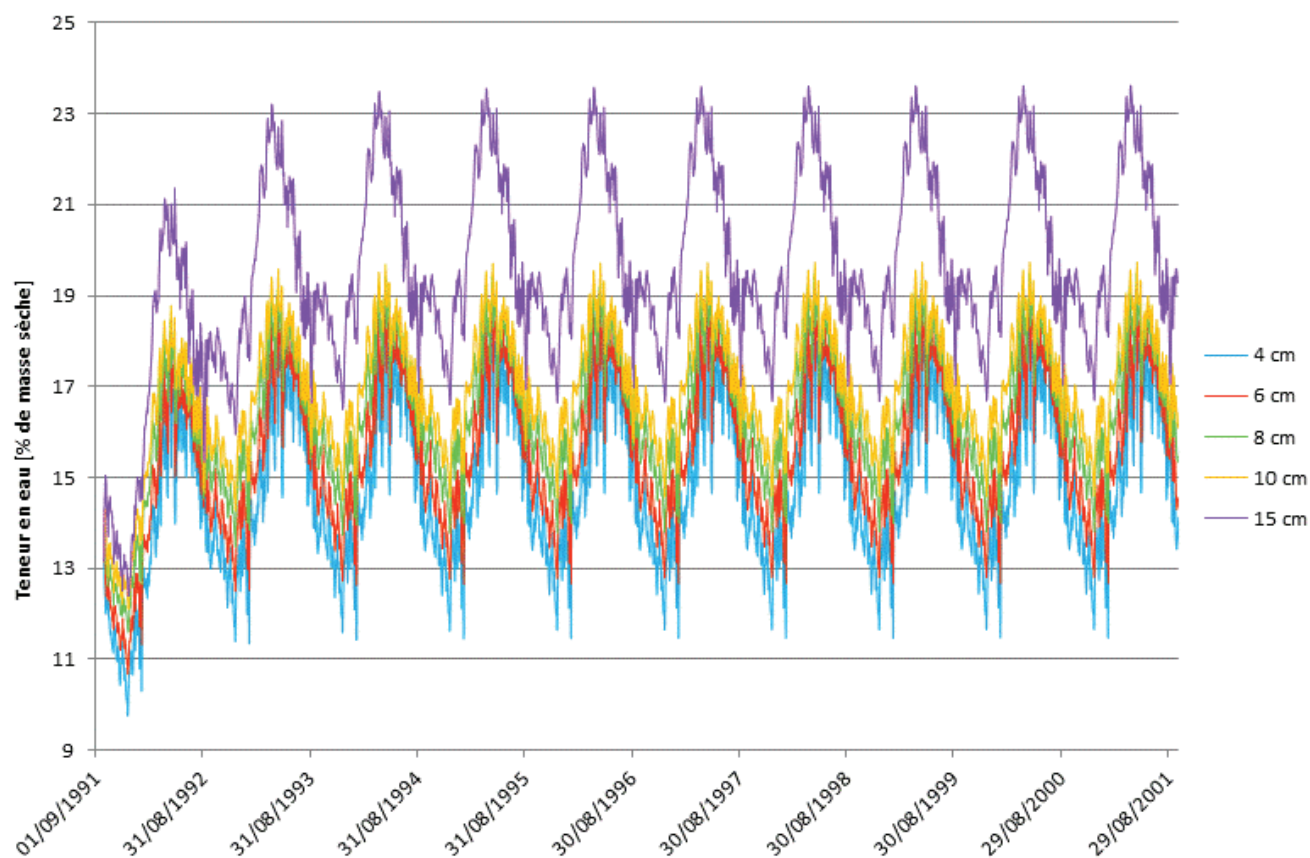


Ci-dessous, la teneur en eau de l'isolant à l'interface avec la poutre (1^{er} graphique) et avec le torchis (2^{ème} graphique) sur 10 années de simulation :

Teneur en eau de l'isolant à l'interface avec la poutre



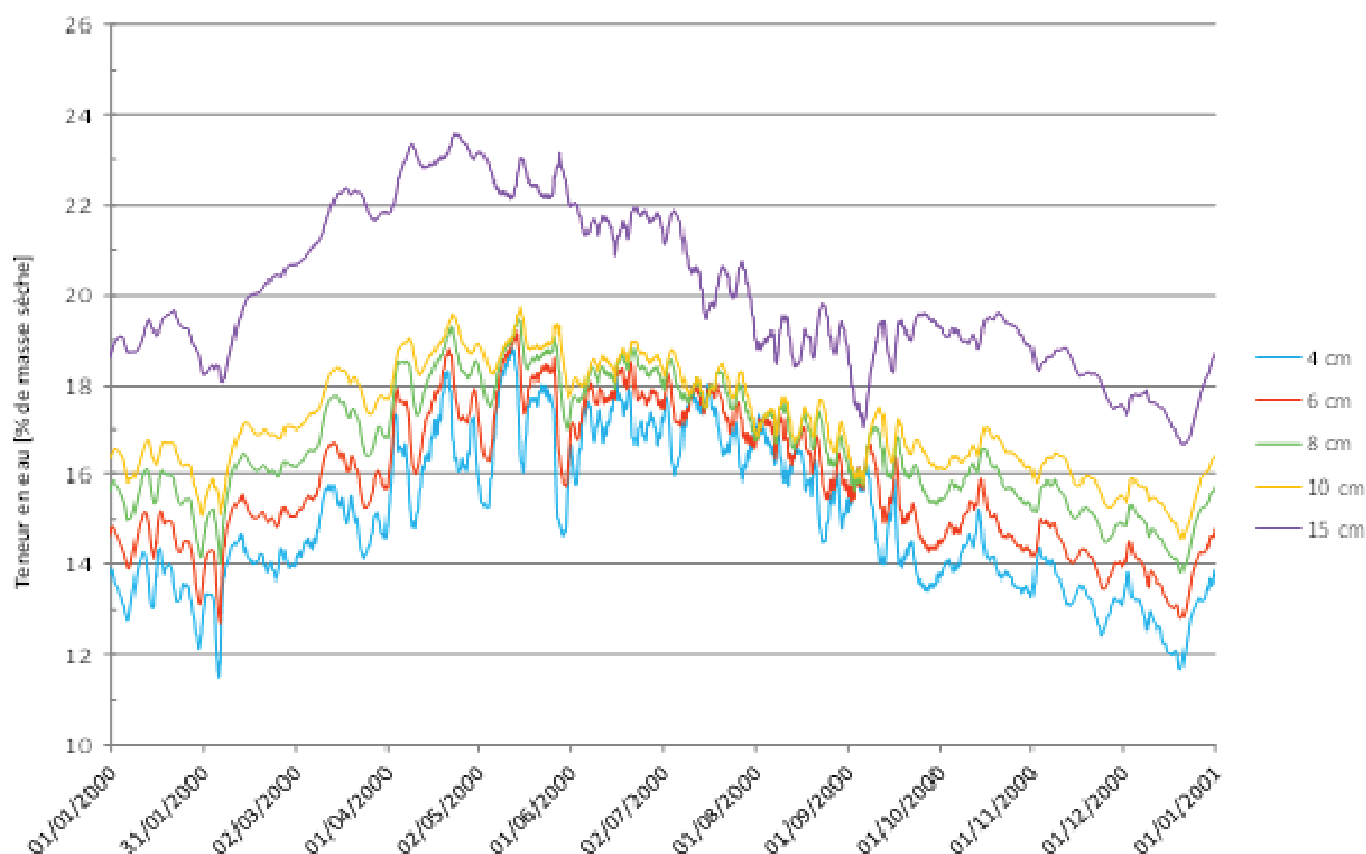
Teneur en eau de l'isolant à l'interface avec le torchis



- On constate que l'on atteint très rapidement l'équilibre périodique (en 2 années) pour les épaisseurs inférieures ou égales à 10 cm, que ce soit à l'interface avec la poutre ou avec le torchis. Il faut 4 à 5 années pour atteindre la stabilisation avec 15 cm d'isolant.
 - Il est inenvisageable de mettre en œuvre plus de 10 cm de laine minérale, cellulose ou laine de bois. En effet, leurs seuils respectifs (13, 15 et 18% de masse sèche) sont déjà atteints avec 10 cm. On verra avec quelle ampleur sur le zoom des courbes sur la dernière année de simulation.
 - En revanche, à ce stade de l'étude il reste envisageable d'aller jusqu'à 15 cm pour la laine de mouton, sa limite de teneur en eau (30%) n'étant que peu dépassée avec cette épaisseur.
 - Des deux zones, c'est à l'interface avec le torchis qu'on trouve les teneurs en eau les plus élevées. C'est donc cette zone qui est la plus restrictive pour l'étude de l'épaisseur.
- Nous regardons donc le détail des courbes du dernier graphique sur la dernière année de simulation.

Ci-dessous l'isolant laine à l'interface avec le torchis sur la dernière année de simulation :

Teneur en eau de l'isolant à l'interface avec le torchis - dernière année



- Tout d'abord, de façon générale, moins l'épaisseur d'isolant est grande, moins il y a d'eau à l'interface avec le torchis. Dans le cas où l'on est contraint d'isoler par l'intérieur, comme à Hunspach, il faut essayer de mettre **l'épaisseur d'isolant la plus faible possible**.
- On observe que pour une isolation inférieure ou égale à **10 cm**, la **laine de bois** et de mouton sont pérennes. En effet, la valeur seuil de la laine de bois (18%) n'est pas dépassée de plus de 2% et le dépassement ne s'étale pas sur plus de deux mois consécutifs. Pour ce qui est de la laine de mouton, sa limite haute de teneur en eau (30%) n'est pas du tout atteinte.
- Si l'on isole avec **15 cm**, seule la laine de mouton reste pérenne puisque son seuil de 30% n'est pas dépassé.

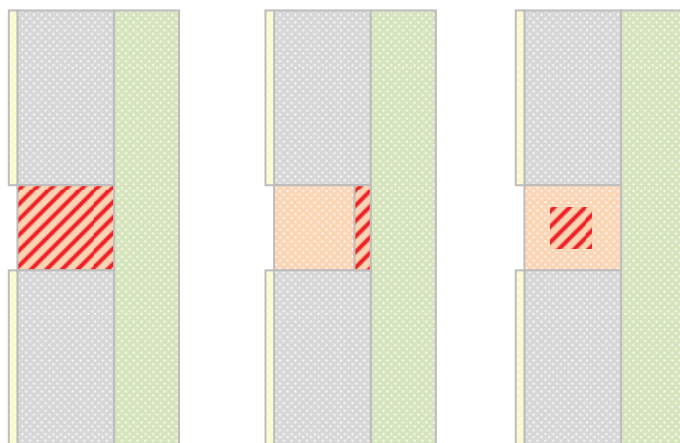
- Quant à la **laine minérale**, sa pérennité semble mise en danger dès **4 cm** : la teneur en eau est au-dessus de 13% de masse sèche pendant la plus grande partie de l'année.
- Enfin, **6 cm** est l'épaisseur maximum envisageable pour la **cellulose**. Au-delà, la valeur limite de 15% de masse sèche est également atteinte pendant plus de 6 mois.

Attention : la courbe de la **teneur en eau de la laine à l'interface avec le torchis** paraît difficilement exploitable pour le cas 15 cm. En effet, le maillage étant différent avec une plus grande couche d'isolant, il était difficile d'obtenir exactement la même couche limite, avec les mêmes dimensions, que pour les autres cas. Or les courbes sont le résultat de la moyenne des valeurs sur les mailles sélectionnées. La sélection effectuée dans le cas 15 cm ne semble pas permettre pas d'obtenir une courbe exploitable au même titre que les autres. De toute façon la plupart des isolants fibreux dépassent les seuils déjà avec 10 cm d'épaisseur.

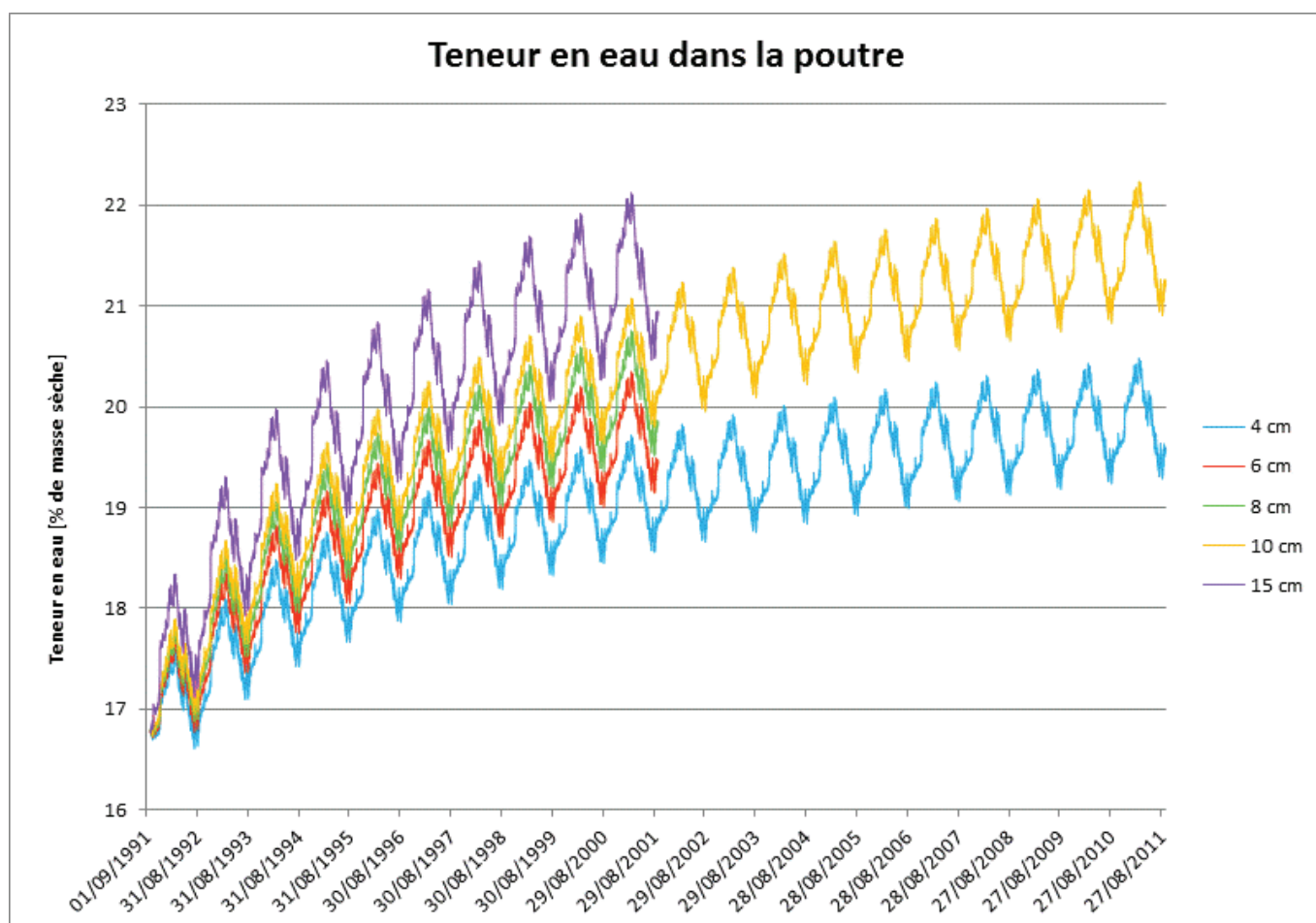
3.1.2 TENEUR EN EAU DANS LA POUTRE

On s'intéresse à la quantité d'eau dans la poutre de bois :

- en moyenne sur la totalité de la poutre (schéma ci-dessous à gauche)
- à l'interface avec l'isolant laine (schéma ci-dessous au milieu)
- dans le cœur de la poutre, une zone de 10x10 cm (schéma ci-dessous à droite)



Ci-dessous, la teneur en eau en moyenne sur la totalité de la poutre :



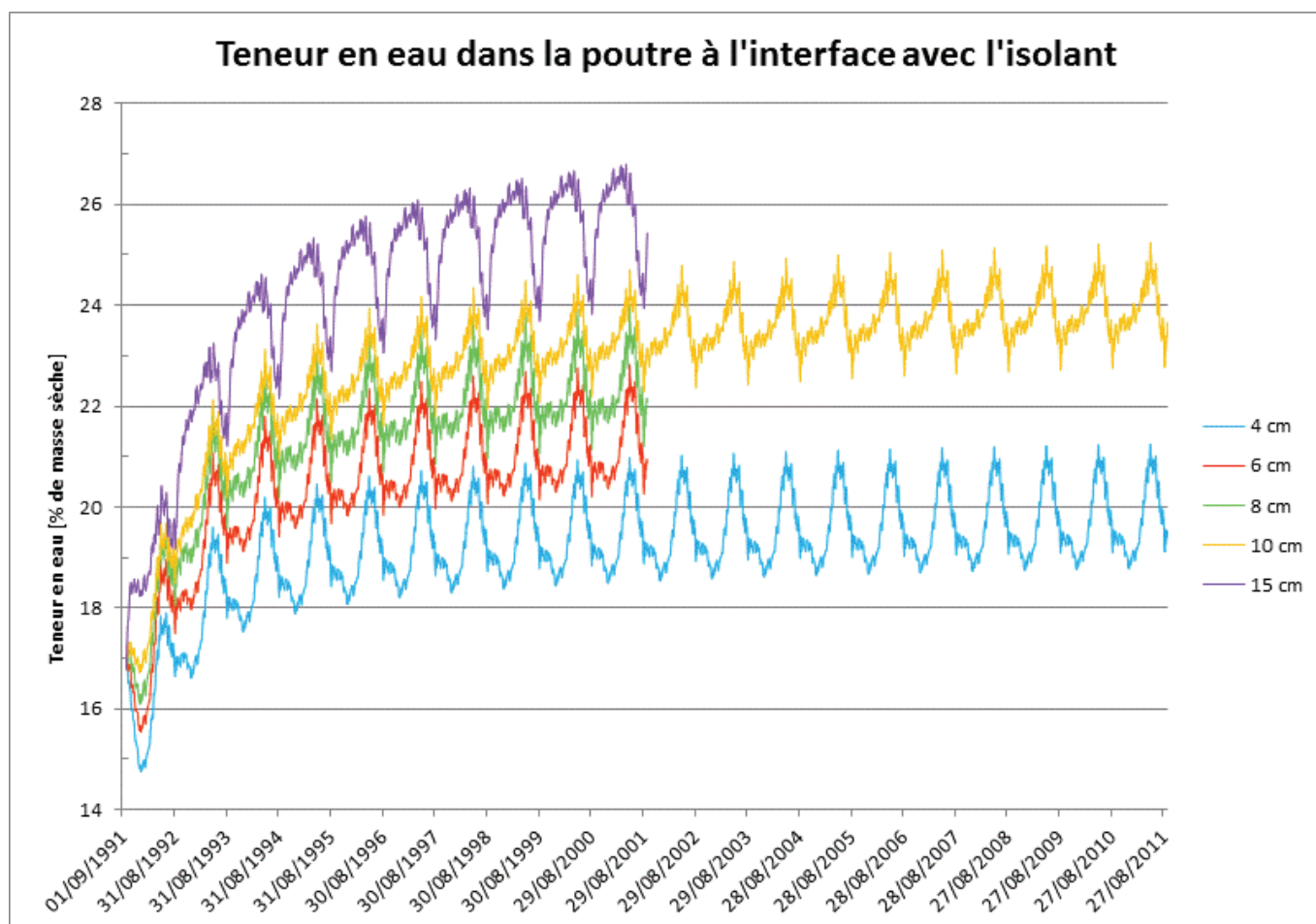
- Plus l'isolant est épais, plus la teneur croît fortement. On constate que l'équilibre périodique n'est pas atteint au bout de 10 ans, ni totalement au bout de 20 ans, bien que l'accroissement diminue chaque année. A titre d'illustration, le tableau suivant présente les valeurs de la teneur en eau de la poutre le même jour 3 années d'affilée, pour trois épaisseurs de laine différentes.

		10/03/1998	10/03/1999	10/03/2000
Laine 6 cm	Teneur en eau (kg/m³)	19,6265	19,8039	19,9633
	Taux d'augmentation	0,90%		0,80%
Laine 10 cm	Teneur en eau (kg/m³)	20,2526	20,4677	20,6611
	Taux d'augmentation	1,05%		0,94%
Laine 15 cm	Teneur en eau (kg/m³)	21,1829	21,4335	21,6581
	Taux d'augmentation	1,17%		1,04%

Plus on met d'isolant, plus le taux de croissance de la teneur en eau de la poutre est élevé. Celui-ci diminue bien d'année en année, l'équilibre sera atteint à un moment, non visible sur nos courbes. Et on note que plus l'épaisseur d'isolant est grande, plus le taux de croissance diminue vite.

- La teneur en eau ne dépasse les 20% qu'à partir de la 4^{ème} année pour 15 cm d'isolant, de la 6^{ème} pour 10 cm, 7^{ème} pour 8 cm, 9^{ème} pour 6 cm et enfin 14^{ème} année pour 4 cm.
- Si on prend le seuil préconisé par le CSTB de 23%, aucune courbe ne l'atteint pendant les 10 premières années, et au vu de leur allure, on peut supposer que les épaisseurs inférieures ou égales à 10 cm ne l'atteindront jamais.

Ci-dessous, la teneur en eau de la poutre à l'interface avec l'isolant laine :

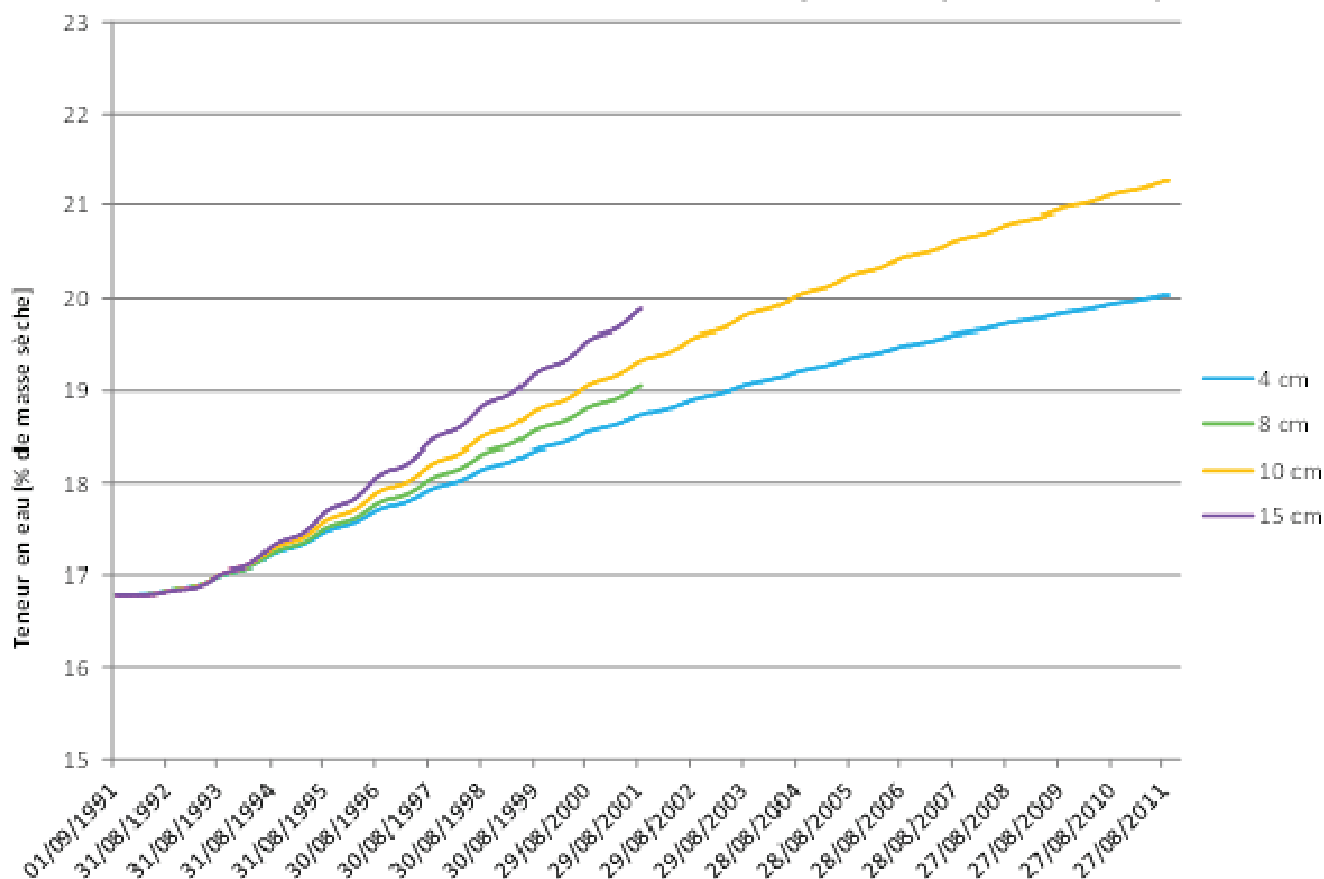


- L'équilibre périodique est presque atteint au bout de 20 ans (pour les simulations faites jusque-là). Au bout de 10 ans, l'accroissement s'atténue pour toutes les épaisseurs.
- Plus l'épaisseur est grande, plus la teneur en eau est grande dans cette zone.
- Le seuil des 20% est dépassé dès la 2^{ème} année pour les épaisseurs supérieures à 4 cm. Pour cette dernière, le seuil est dépassé au bout de 4 ans.

- Les épaisseurs inférieures ou égales à 8 cm semblent rester sous le seuil préconisé par le CSTB de 23% de masse sèche. Dans les conditions de nos simulations, il apparaît qu'il **est préférable de ne pas isoler avec plus de 8 cm d'isolant fibreux**.

Intéressons-nous maintenant à ce qu'il se passe au cœur de la poutre, dans une zone de 10 cm sur 10 cm :

Teneur en eau dans le cœur de la poutre (10 x 10 cm)



- Nous l'avons déjà dit, de par les limitations du logiciel et nos conditions pessimistes, nos résultats montrent les risques quant à la pérennité de la surface de la poutre (surtout à l'interface de la poutre avec le torchis). Si l'on s'intéresse au cœur de la poutre, on peut voir qu'elle n'est pas en danger à court-terme. Le seuil des 20% n'est atteint qu'après 20 ans pour 4 cm d'isolant par exemple, et après 13 ans pour 10 cm.
- Si on prend le seuil du CSTB de 23%, on peut supposer en interpolant l'allure des courbes que pour une épaisseur inférieure à 10 cm, ce seuil ne sera jamais dépassé.
- On remarque comme pour les autres zones que plus l'épaisseur d'isolant est grande, plus l'accroissement est grand et donc plus le risque inhérent à l'humidité dans les matériaux est grand.

3.1.3 BILAN DIMENSIONNEMENT ISOLANTS FIBREUX :

- Il apparaît qu'avec nos conditions pessimistes, l'isolation par l'intérieur d'une maison à colombage et torchis comporte des risques quant à la pérennité des poutres (du moins en surface).
- Si l'on souhaite quand même isoler par l'intérieur, il est préférable de mettre en œuvre la plus faible épaisseur d'isolant possible.
- Les matériaux préconisés sont la laine de bois ou encore mieux la laine de mouton.
- **Une isolation de plus de 8 cm est fortement déconseillée.** Attention, cette valeur est relative aux conditions fixées pour nos simulations.
- **Nous rappelons qu'il est difficile de garantir de l'exactitude des valeurs absolues de nos résultats.** Cependant, en comparant entre eux les résultats de différentes épaisseurs d'isolant, on a pu voir qu'il est risqué de pousser les épaisseurs d'isolation au-delà de 10 cm.

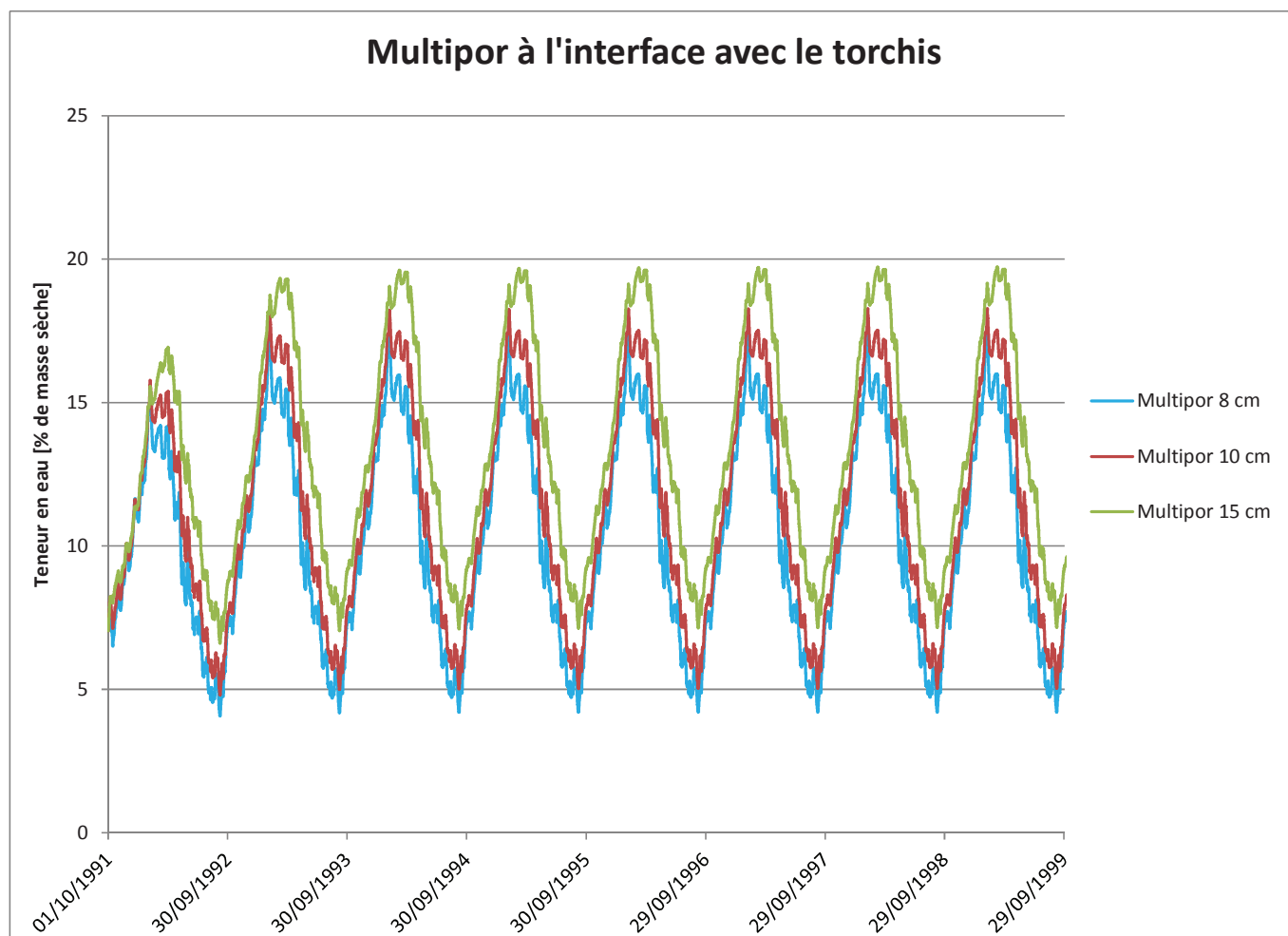
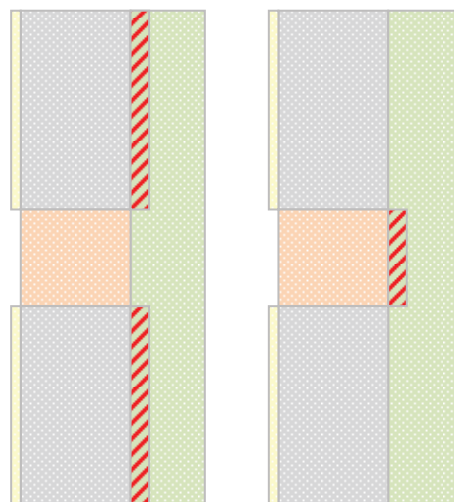
Une autre solution permettant d'isoler par l'intérieur est de remplir les colombages non pas avec du torchis, mais avec du béton cellulaire (type Multipor). Les résultats, très satisfaisant, sont donnés dans la partie 4.

3.2 DIMENSIONNEMENT PANNEAU SILICATE DE CHAUX (TYPE MULTIPOR)

Les tests sur le Multipor ont été effectués avec une couche de colle continue, les plots de colle rallongeant sensiblement le temps de calcul (en raison de la modification du maillage). Nous avons précédemment effectué les simulations avec les plots de colle. En comparant avec la colle continue, on trouve sensiblement les mêmes résultats. Ça n'a donc pas d'influence sur notre étude.

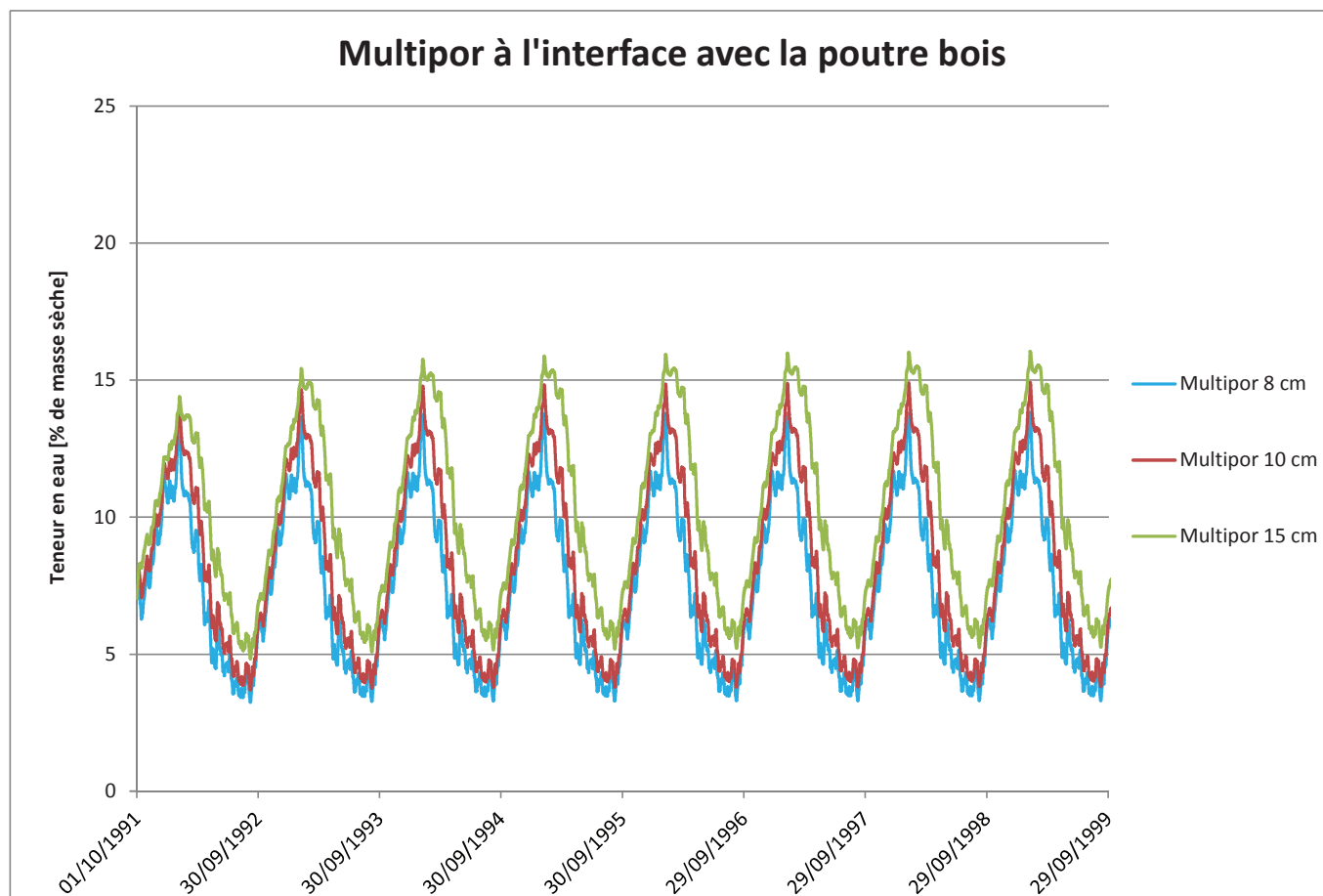
3.2.1 TENEUR EN EAU DANS LE MULTIPOR

Pour plusieurs épaisseurs de Multipor, nous étudions la teneur en eau des couches limites de Multipor à l'interface avec le torchis (schéma ci-contre à gauche) et avec le bois (schéma ci-contre à droite).



- Tout d'abord, les quantités d'eau restent en dessous de la valeur seuil du Multipor (23% de la masse sèche), quelle que soit l'épaisseur envisagée.

- Ensuite on voit que l'évolution de la teneur en eau se stabilise à partir de la 3^{ème} ou de la 4^{ème} année, il n'y a donc pas de risque à prévoir à long terme dans cette zone. Il n'y a en effet pas d'accumulation d'eau, puisque la teneur en eau revient après le séchage de l'été à la même valeur chaque année. Il semble donc que la valeur seuil de 23% de masse sèche ne sera jamais atteinte.
- En conclusion, cette zone de la couche d'isolant n'a pas de caractère limitant permettant de déterminer l'épaisseur maximale d'isolant qui peut être mise en œuvre.

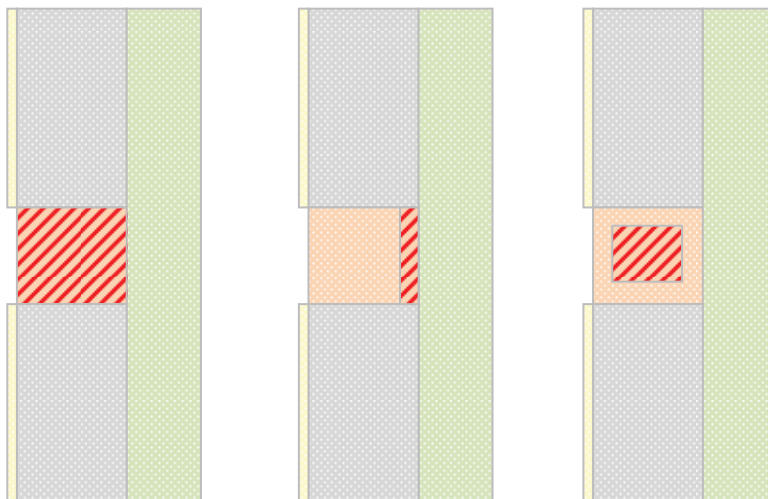


- De même qu'auparavant, la teneur en eau dans la couche limite d'isolant à l'interface avec la poutre ne dépasse pas les 23% de masse sèche des 8 ans de simulation, quelle que soit l'épaisseur de Multipor envisagée.
- De plus, l'évolution de la teneur en eau dans cette zone se stabilise aussi. L'eau ne s'accumule pas dans l'isolant à l'interface avec le bois. Il semble de nouveau que la valeur seuil du Multipor ne pourra jamais être atteinte dans cette couche limite.
- Ce qui se passe dans l'isolant à l'interface avec la poutre ne nous permet pas de conclure quant à l'épaisseur maximale de Multipor qui peut être envisagée, puisque jusqu'ici aucune épaisseur de crée de dégâts.

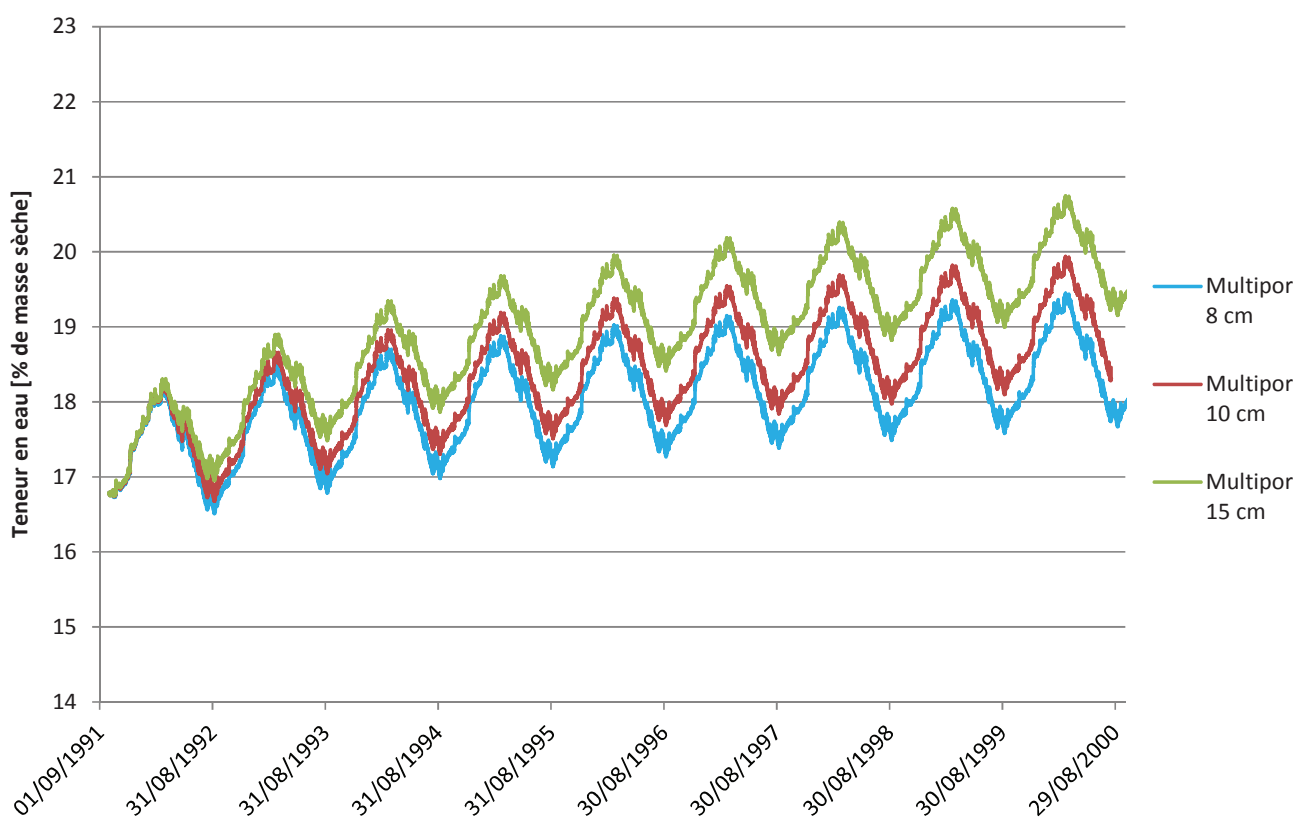
3.2.2 TENEUR EN EAU DANS LA POUTRE

Pour les différentes épaisseurs de Multipor, nous regardons l'évolution de la teneur en eau de la poutre dans différentes zones :

- D'abord sur la totalité de la poutre (schéma ci-dessous de gauche)
- Puis à l'interface avec l'isolant (schéma du milieu)
- Et enfin dans le cœur de la poutre (sur une zone de 10 cm sur 10 cm, symbolisée sur le schéma ci-dessous de droite)



Teneur en eau de toute la poutre bois



- Quelle que soit l'épaisseur de Multipor envisagée, la teneur en eau de la poutre dans son ensemble augmente d'année en année. On ne voit pas d'équilibre atteint sur les 9 ans de simulation.
En réalité, le taux d'augmentation de la teneur en eau diminue d'année en année. Il semble donc qu'à terme, un équilibre sera atteint. Le tableau ci-dessous montre

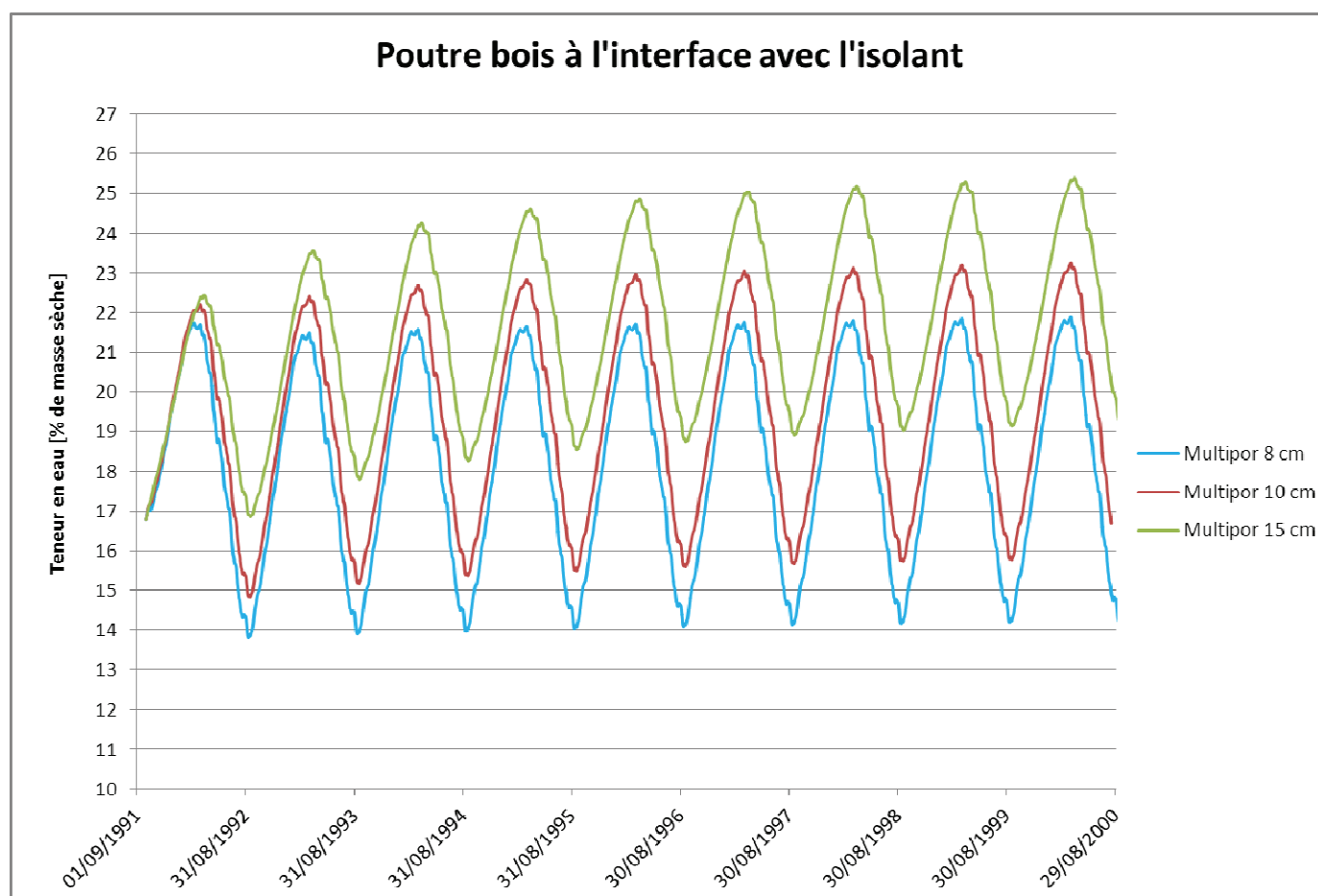
un exemple : on voit la teneur en eau de la poutre à la même date pendant 3 années consécutives, et ce pour les trois épaisseurs de Multipor. En dessous est calculé le pourcentage d'augmentation de 1998 à 1999 puis de 1999 à 2000.

		10/03/1998	10/03/1999	10/03/2000
Multipor 8 cm	Teneur en eau (kg/m ³)	19,0220	19,1214	19,2117
	Taux d'augmentation	0,52%		0,47%
Multipor 10 cm	Teneur en eau (kg/m ³)	19,4427	19,5728	19,6907
	Taux d'augmentation	0,66%		0,60%
Multipor 15 cm	Teneur en eau (kg/m ³)	20,1363	20,3207	20,4872
	Taux d'augmentation	0,91%		0,81%

Tout d'abord, le taux d'augmentation de la teneur en eau est plus élevé avec une épaisseur d'isolant plus élevée. Ensuite, pour les trois épaisseurs, ce taux d'augmentation diminue. Il diminue d'autant plus vite que l'épaisseur d'isolant est élevée.

- Avec 8 et 10 cm de Multipor, les 20% de masse sèche ne sont pas atteints sur les 9 ans de simulation. Avec 15 cm, cette valeur seuil est dépassée dès la 6^{ème} année. **Il paraît donc préférable de ne pas mettre plus de 10 cm de Multipor.**
- Mais **attention**, nous avons déjà évoqué qu'il est difficile de juger avec sûreté des valeurs absolues des résultats. Il est plus sûr de comparer les résultats entre eux. Nous nous penchons donc sur les autres zones de la poutre pour savoir si la comparaison des résultats dans ces zones confirme la conclusion précédente.

Le graphique ci-dessous présente l'évolution de la teneur en eau de la couche limite de la poutre à l'interface avec le panneau isolant de silicate de chaux.



- On voit que pour une épaisseur supérieure à 10 cm, on atteindra la valeur seuil au-delà de laquelle il y a développement fongique (23%). Avec 10 cm, ce seuil est

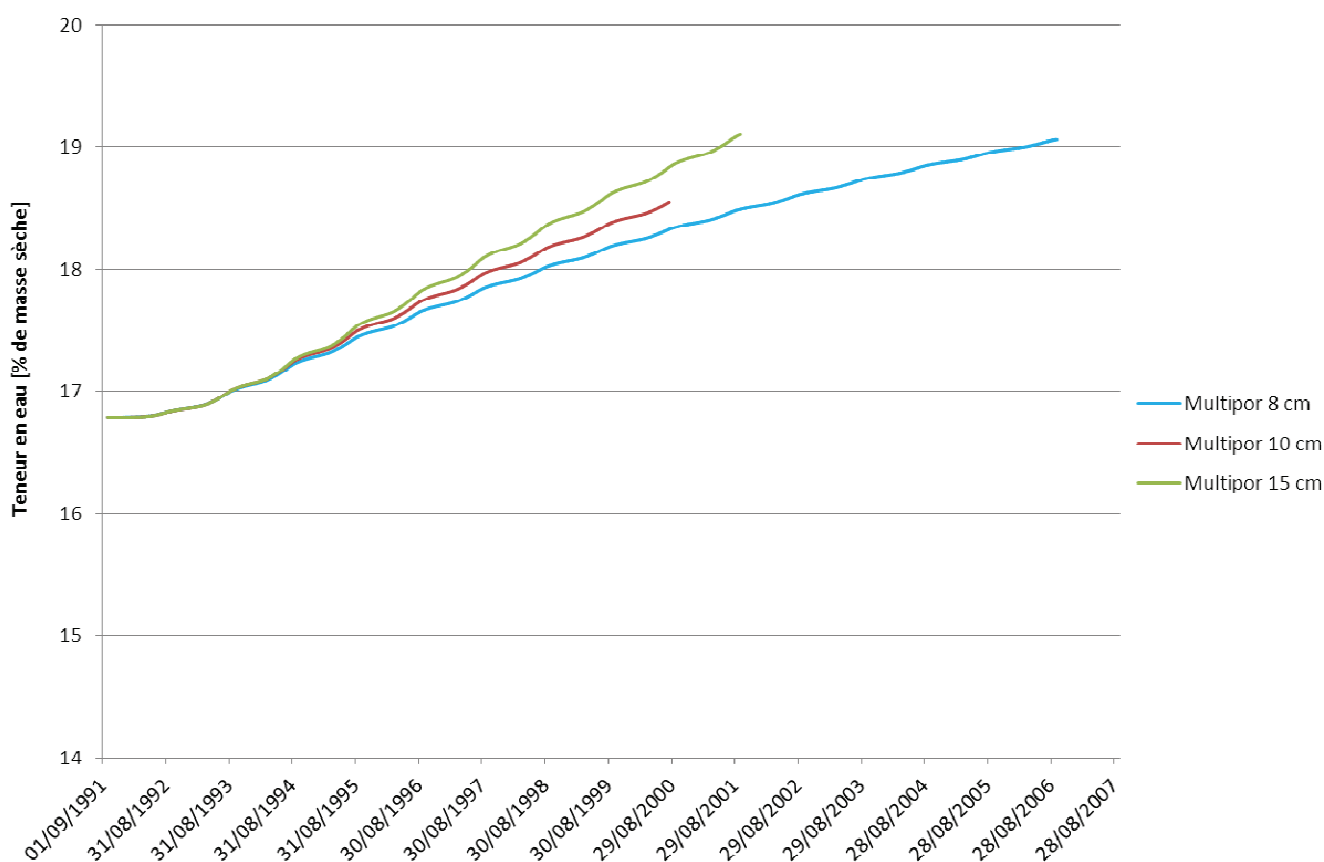
tout juste atteint en fin de simulation. Avec 15 cm, il est dépassé dès la 2^{ème} année.

- Comme il reste tout de même difficile de raisonner en valeurs absolues, on peut simplement comparer l'évolution des courbes entre elles. On voit qu'avec 8 et 10 cm de panneau isolant de silicate de chaux, l'équilibre périodique est atteint à partir de la 5^{ème} ou de la 6^{ème} année. En tout cas à partir de ce moment, l'augmentation est infime. Avec 15 cm, on observe une augmentation plus visible de la courbe d'une année à l'autre.

Cela confirme qu'il n'est pas préconisé de mettre plus de 10 cm de béton cellulaire.

Jusqu'à présent, nos résultats mettent à jour des risques pour la pérennité des poutres des colombages. Ces risques concernent essentiellement les interfaces des poutres avec leur environnement. Nous regardons maintenant ce qu'il se passe au centre de la poutre, pour s'assurer qu'il n'y a pas de risque quant à la pérennité de la construction et à la stabilité de la maison.

Teneur en eau du coeur de la poutre (10 x 10 cm)



- La courbe correspondant à 8 cm d'isolation permet d'observer une tendance à la stabilisation : la teneur en eau au centre de la poutre n'augmentera pas à l'infini. Partant de ce constat, il est difficile de savoir si les 20% seront atteints au bout d'un certain temps. Ça ne semble pas être le cas avec 8 et 10 cm d'isolation.
- En considérant la valeur seuil émise par le CSTB (23%), il semble que celle-ci ne sera jamais atteinte.

En conclusion, il n'y a pas de risque constaté au cœur de la poutre. La tenue de la construction n'est pas mise en danger.

3.2.3 BILAN DIMENSIONNEMENT PANNEAU DE SILICATE DE CHAUX

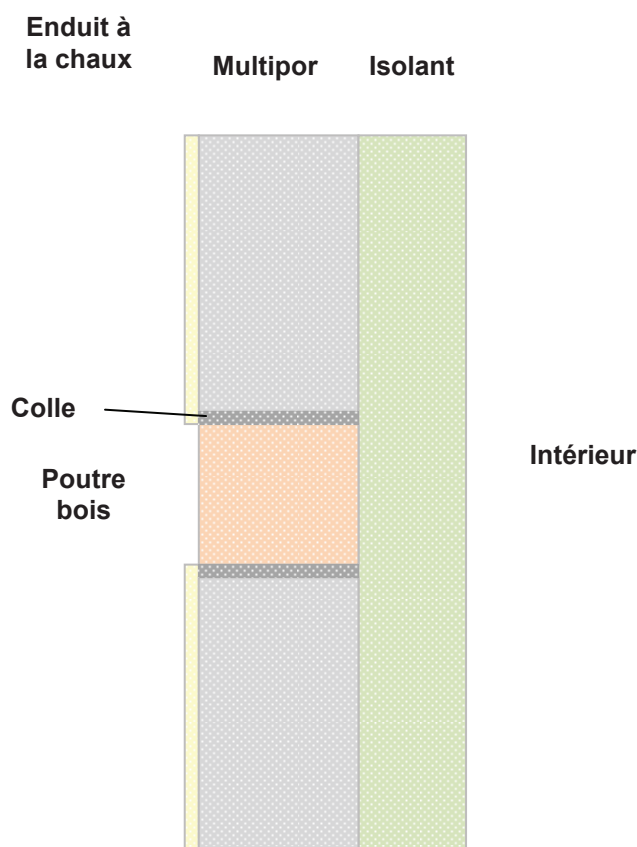
- Il apparaît qu'avec nos conditions pessimistes, l'isolation par l'intérieur d'une maison à colombage et torchis comporte des risques quant à la pérennité des poutres (du moins en surface).
- Si l'on souhaite quand même isoler par l'intérieur, il est préférable de ne pas mettre en œuvre plus d'une dizaine de centimètres de Multopor.
- Cette valeur (10 cm) a été obtenue avec des conditions de simulation définies. Mais on voit de façon générale que plus l'épaisseur de l'isolant est grande, moins la teneur en eau de la poutre et de ses zones particulières se stabilise rapidement. Il est donc plus sûr de ne pas mettre de trop épaisses couches d'isolant en œuvre.

4 REMPLISSAGE DES COLOMBAGES PAR DU BÉTON CELLULAIRE

4.1 SITUATION ÉTUDIÉE

On a vu que l'isolation par l'intérieur d'une maison à colombages remplis au torchis mène à un risque sur la pérennité de la paroi. Si l'on ne souhaite pas isoler par l'extérieur, il existe une autre possibilité qui semble très satisfaisante : le remplissage des colombages par un autre matériau. Nous avons pris l'exemple de panneaux de silicate de chaux (de type Multipor). Des blocs de Multipor sont ainsi maçonnés à la place du torchis.

Toutes les conditions et hypothèses précédentes ont été gardées. Le modèle utilisé pour les simulations est le suivant : le même que dans les tests des matériaux mais dont on a remplacé le torchis par du Multipor, en ajoutant 6mm de colle à l'interface poutre/Multipor :

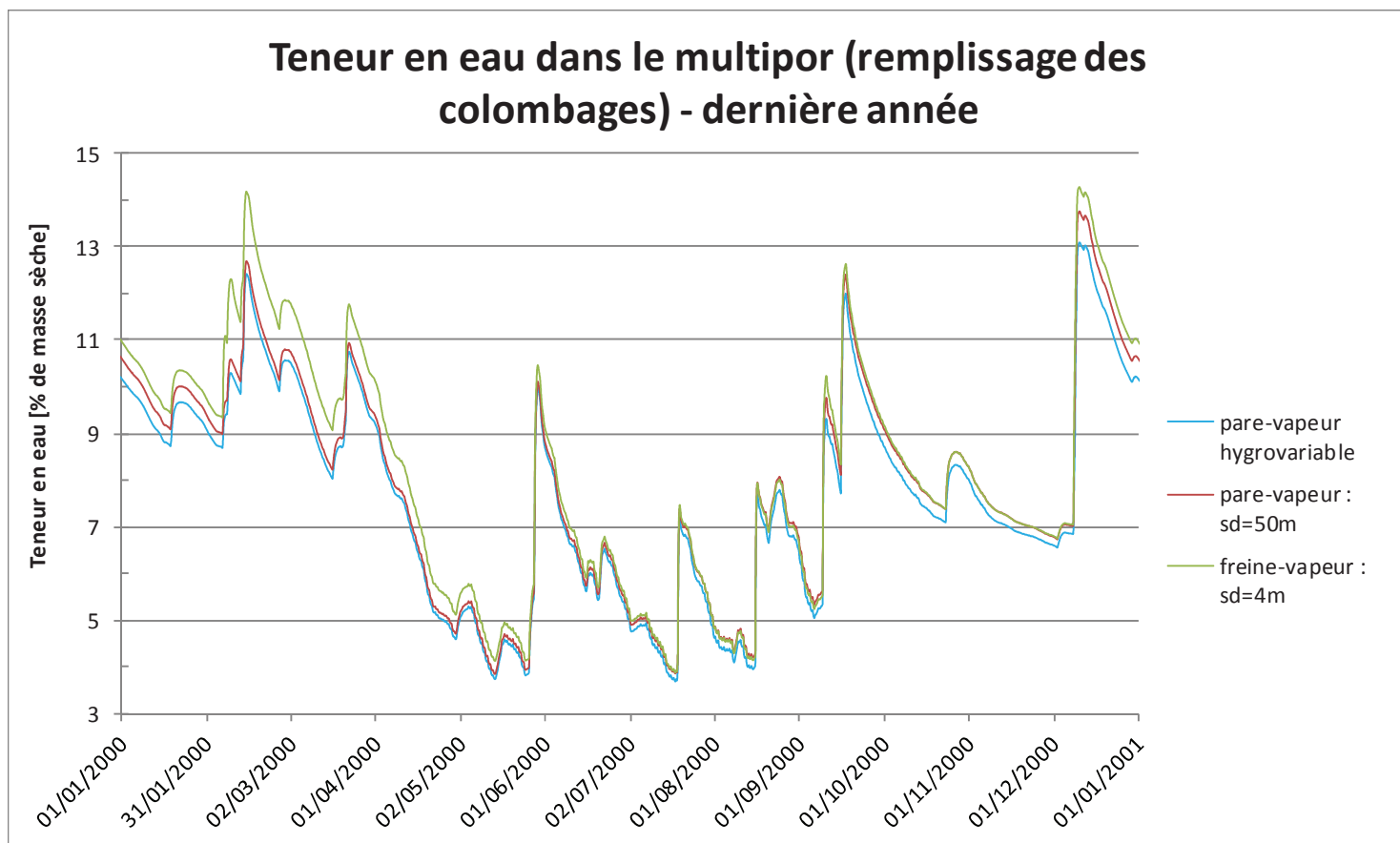


Nous avons fait les simulations avec 10 cm d'isolant fibreux pour 3 membranes différentes :

- Un pare-vapeur hygrovariable
- Un pare-vapeur, $s_d=50m$
- Un freine-vapeur, $s_d=4m$

4.2 MULTIPOR DE REMPLISSAGE

La teneur en eau du Multipor dans sa totalité atteint l'équilibre dès la 2^{ème} année. Ci-dessous, le détail de la dernière année de simulation :

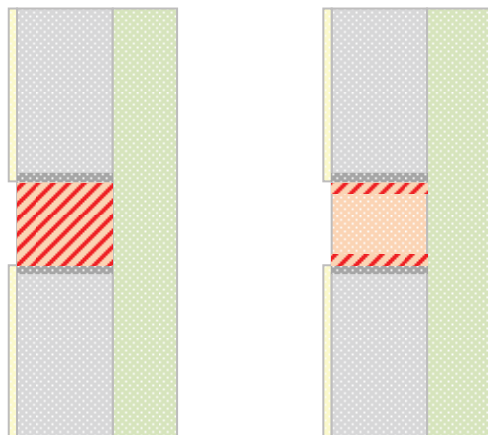


- Le seuil pour le Multipor est de 23%. Pour les 3 membranes, la teneur en eau est largement en dessous, le maximum atteint au cours de l'année est 14% de masse sèche.
- Entre les 3 membranes, il n'y a pas de grande différence dans cette partie de paroi (moins de 1%).
- Le pare-vapeur hygrovariable permet d'obtenir la teneur en eau la plus basse, comme précédemment avec le torchis en remplissage de colombages.

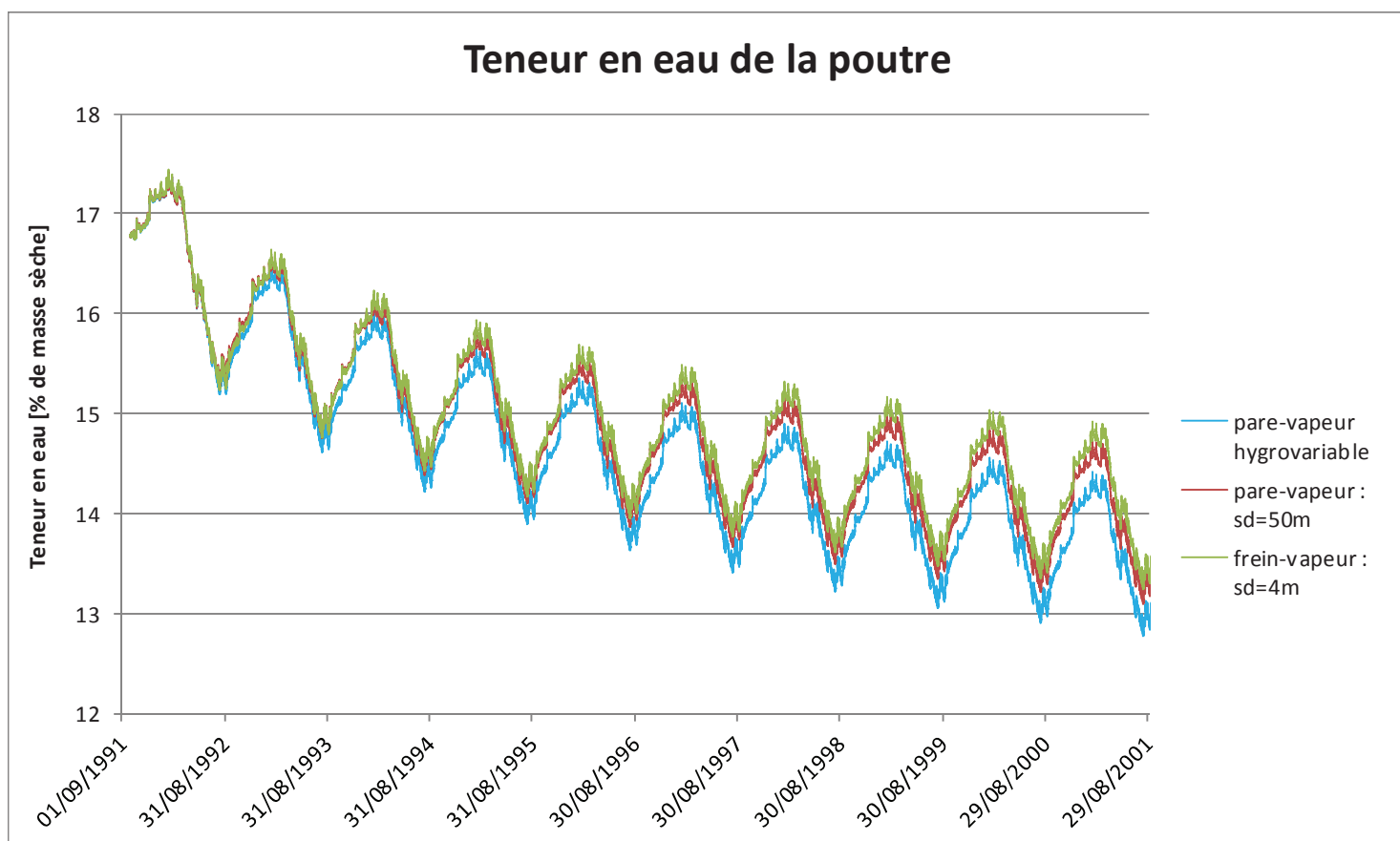
4.3 POUTRE BOIS

On regarde la teneur en eau dans les zones suivantes :

- En moyenne sur la totalité de la poutre (schéma ci-dessous à gauche)
- A l'interface avec le Multipor de remplissage (schéma ci-dessous à droite)



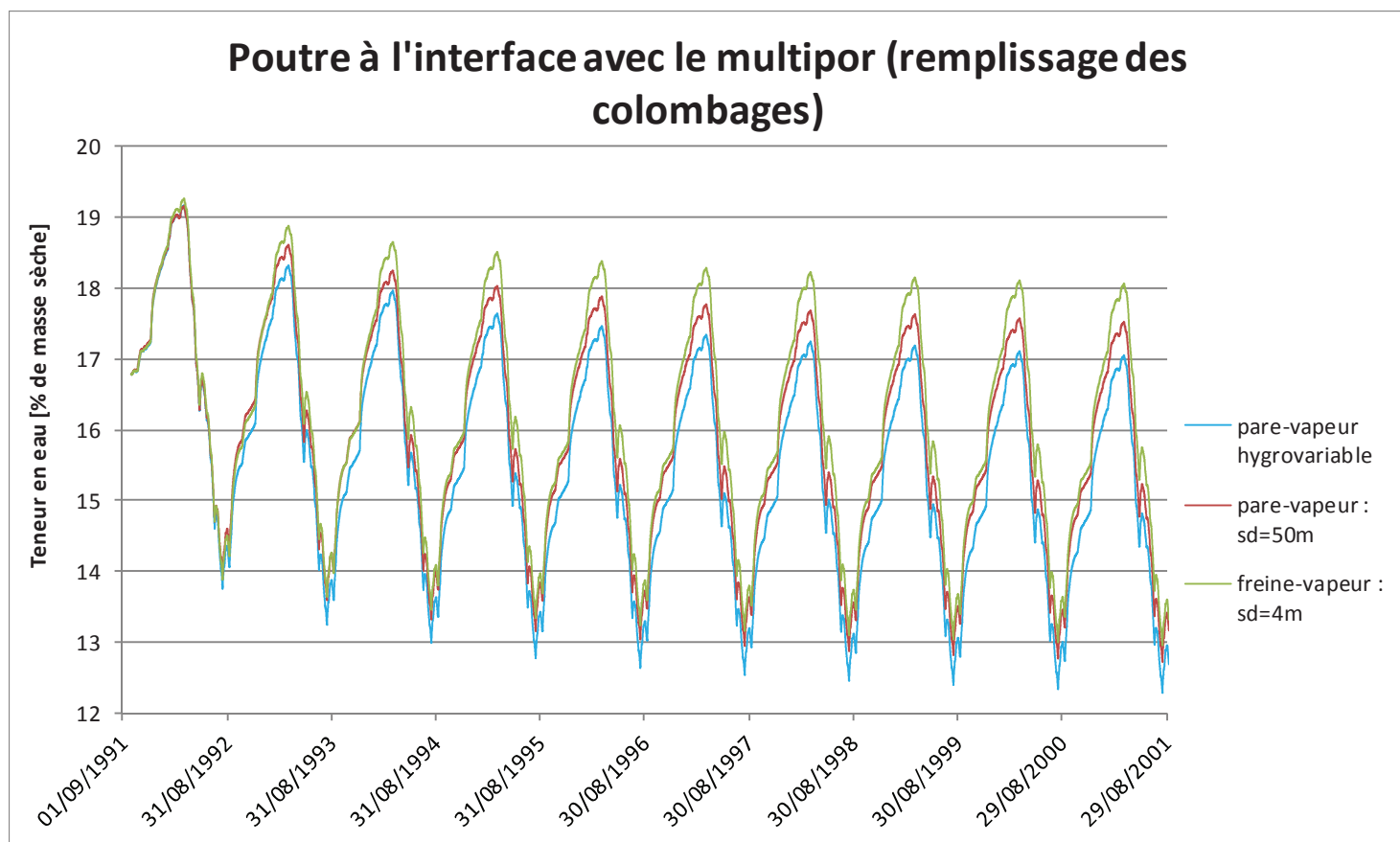
Ci-dessous, l'évolution de la teneur en eau dans la totalité de la poutre :



- D'année en année, la teneur en eau de la poutre baisse.
- On retrouve le même classement des membranes : le pare-vapeur hygrovariable est préférable au pare-vapeur classique ($S_d = 50 \text{ m}$), lui-même préférable au frein-vapeur ($S_d = 4 \text{ m}$). A noter que l'écart entre les pare-vapeur hygrovariable et classique n'est pas de grande ampleur (moins d'un demi pourcent de masse sèche).

Au global de la poutre du colombage, il n'y a aucun risque pour sa pérennité.

Ci-dessous est présentée l'évolution de la teneur en eau de la poutre à l'interface avec le Multipor (remplissage des colombages) :



- La teneur en eau décroît pour les 3 membranes jusqu'à atteindre l'équilibre périodique (après 10 années de simulation).
- Le maximum atteint après 10 années de simulation est une teneur en eau de 18% de masse sèche. Elle est inférieure au seuil du bois de 20%.

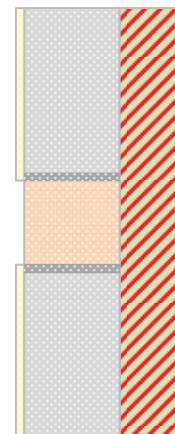
Pour information, à l'interface avec l'isolant, la teneur en eau décroît très rapidement jusqu'à atteindre l'équilibre périodique avec un maximum à 10 ans de 13% de masse sèche.

Il n'y a donc pas non plus de risque de dégradation aux interfaces de la poutre du colombage.

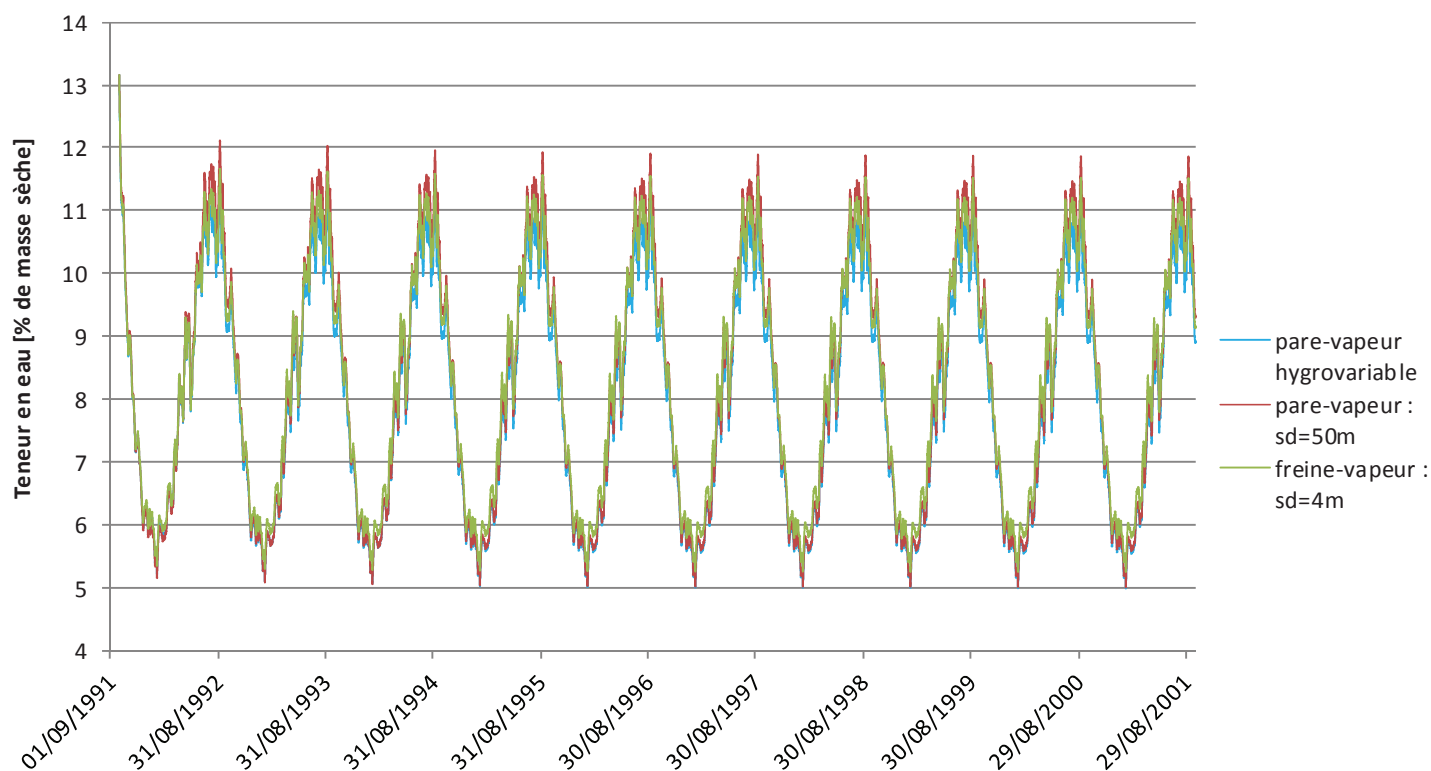
4.4 ISOLANT LAINE

Regardons le comportement de l'isolant laine avec ce modèle.

Ci-dessous, la teneur en eau dans la totalité de l'isolant sur 10 années de simulation :



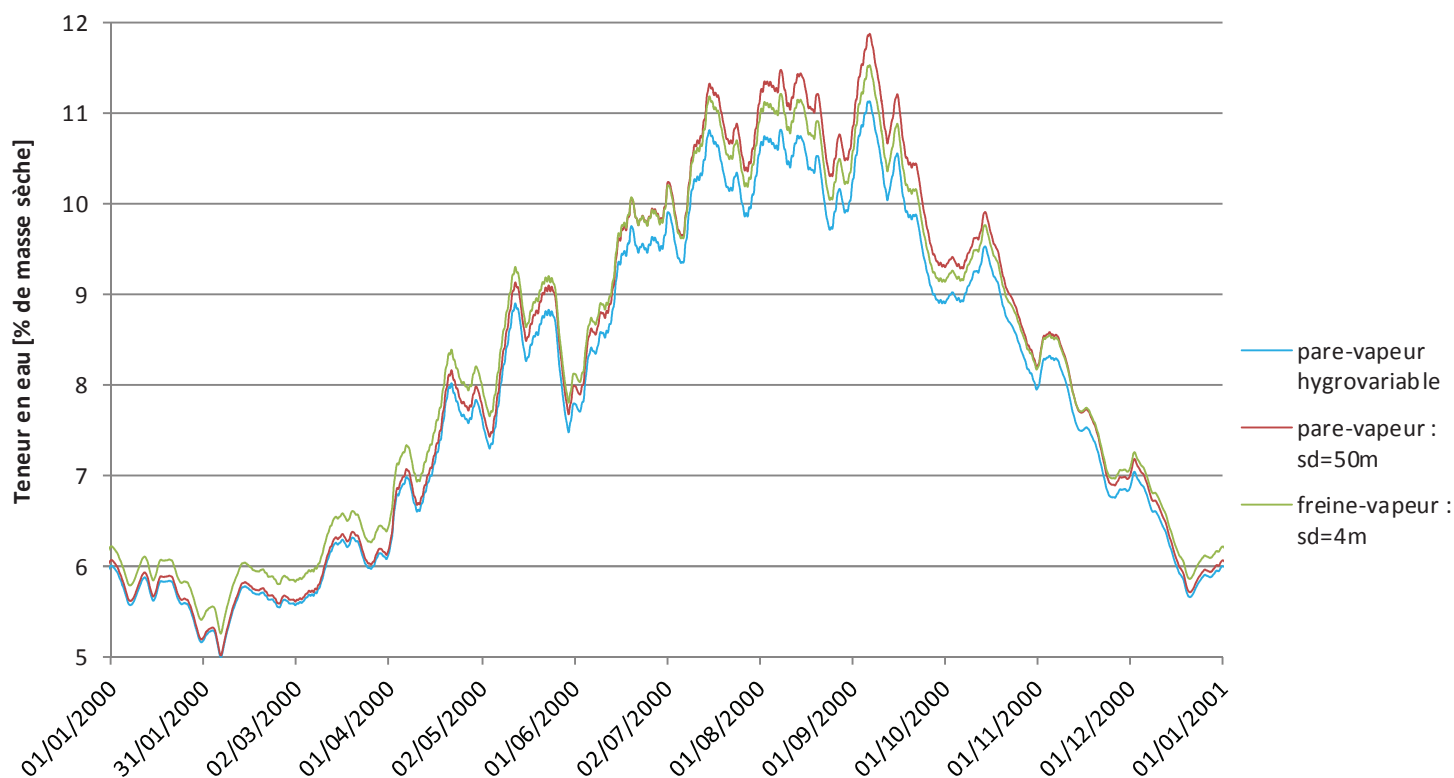
Teneur en eau de l'isolant laine



- L'isolant atteint l'équilibre périodique très rapidement.
- Aucun seuil des différents isolants fibreux n'est atteint.

Ci-dessous, la teneur en eau de l'isolant laine lors de la dernière année de simulation :

Teneur en eau de l'isolant - dernière année



- Encore une fois, le pare-vapeur hygrovariable donne les meilleurs résultats que les pare-vapeurs classique. Mais la différence entre les 3 membranes reste minime (moins de 1%).
- Aucun seuil des isolants de type laine n'est dépassé, même pas celui de la laine minérale (13% de la masse sèche).

La teneur en eau de l'isolant laine à l'interface avec la poutre ou le torchis n'est pas plus élevée que dans la totalité de la couche.

4.5 BILAN REMPLISSAGE COLOMBAGES PAR BÉTON CELLULAIRE

Cette solution présente beaucoup d'avantages par rapport à un remplissage avec le torchis.

- Elle permet d'isoler par l'intérieur et donc de conserver l'esthétique de la façade à colombage.
- Malgré nos conditions défavorables, aucun problème de pérennité n'a lieu dans la poutre.
- On peut donc isoler par l'intérieur sans danger avec des épaisseurs confortables (au moins jusqu'à 10 cm).
- L'utilisation d'un pare-vapeur hygrovariable donne les meilleurs résultats, bien qu'ils restent très proches de ceux obtenus avec un pare-vapeur classique.
- Enfin, le choix du matériau est libre, puisque aucun matériau dont on a les seuils (à 10 cm d'épaisseur) n'est mis en danger.

5 CONCLUSION GÉNÉRALE – MAISON D'HUNSPACH

Résumons la démarche que nous avons suivie tout au long de ce rapport.

Dans la partie 2, de la partie 2.2 à 2.4, nous testons les matériaux en isolation intérieure pour savoir s'ils sont envisageables d'un point de vue hygrothermique.

Nous regardons tout d'abord sur la globalité de la paroi étudiée si la teneur en eau n'augmente pas au fil des années. Ensuite nous regardons dans chaque matériau constitutif de la paroi si les valeurs seuils sont atteintes, et si oui sur quelles durées. Dès le 1^{er} test, il s'avère que c'est moins l'évolution de la teneur en eau dans la couche d'isolant qui permet d'obtenir des conclusions sur la viabilité des systèmes, mais plutôt celle de la poutre en bois du colombage. Les conclusions sont les suivantes :

- La **laine de bois et la laine de mouton** sont les isolants fibreux les plus pérennes. De plus, des différents pare et freine-vapeur testés, c'est le **pare-vapeur hygrovariable** qui permet d'obtenir les meilleurs résultats.
- Le Multipor ou autre **panneau isolant de silicate de chaux** est un isolant pérenne en isolation intérieure.
- Le **PSE n'est pas envisageable** en isolation intérieure dans une maison traditionnelle en colombages. En effet, les deux solutions précédentes permettent une stabilisation de la teneur en eau dans les zones sensibles de la poutre bois. Le PSE ne le permet pas et empêche ces zones de sécher vers l'intérieur en été.

Pour les solutions d'isolation intérieure retenues, nous déterminons en partie 3 l'épaisseur maximale qu'il est possible de mettre en œuvre. Pour cela, nous continuons d'étudier le mur courant et notamment la poutre du colombage : après quelques tests sur le détail d'une solive encastree dans le mur, nous nous sommes rendu compte que cela revenait au même que d'étudier la poutre du mur courant. Les conclusions sont les suivantes :

- Ce qui se passe dans la poutre dicte de ne pas mettre plus de 8 cm d'isolant fibreux en œuvre. Ce qui se passe dans la couche d'isolant impose les limites suivantes :
 - o La **laine minérale n'est pas viable**, même à partir de 4 cm.
 - o On ne peut mettre plus de **6 cm de cellulose**.
 - o La limite de **8 cm pour la laine de bois** est confirmée.
 - o Pas de limite supplémentaire pour la **laine de mouton**. C'est donc la poutre qui a un caractère limitant pour déterminer l'épaisseur de ce matériau. Or d'après la teneur en eau de la poutre à l'interface avec l'isolant, **10 cm** est le grand maximum à envisager.
- De même, l'évolution de la teneur en eau dans le panneau de silicate de chaux (type Multipor) ne permet pas d'obtenir de limite d'épaisseur à mettre en œuvre. C'est la teneur en eau de la poutre, dans sa globalité et à l'interface avec le Multipor, qui indique qu'il est préférable de **ne pas mettre plus de 10 cm**.

Enfin, en partie 4 sont présentés les résultats d'une alternative de rénovation thermique des maisons à colombages : le remplacement du torchis par du béton cellulaire (type Multipor) puis l'isolation par l'intérieur de ce mur avec de laine et un pare-vapeur hygrovariable. Dans cette configuration, la pérennité de la poutre n'est plus du tout en danger.

NB : nos calculs renvoyaient des risques élevés aux interfaces de la poutre du colombage, qui ne correspondent pas forcément à ce qui se passe sur le terrain. Nous avons alors d'une part pris de la distance avec les valeurs absolues de nos résultats. Nous avons privilégié la comparaison des résultats de différentes solutions entre eux. D'autre part, nous avons regardé ce qu'il se passe au cœur de la poutre, pour s'assurer que notre modèle nous donnait les résultats de constructions pérennes (point de vue structure). Or c'est le cas.