

2.6 SIMULATIONS REMONTEES CAPILLAIRES

Les remontées capillaires touchent principalement les fondations puisqu'il s'agit de l'eau contenue dans le sol (remontées de nappes, accumulation d'eau de pluie, etc.) qui remonte par capillarité à travers le mur.

2.6.1 HYPOTHESES

Pour simuler les remontées capillaires à l'aide du logiciel WUFI, le mur de la maison Ludwigswinkel et ses caractéristiques ont été repris. Nous avons créé un climat artificiel pour la surface inférieure du grès, dans lequel la pluie nous sert à simuler la présence d'eau en pied de mur. Ainsi il « pleut » constamment 1 litre d'eau par heure, la surface inférieure du grès est donc en permanence « trempée » (1 litre/h est une valeur suffisante pour que la surface du grès soit saturée en eau).

On a gardé les mêmes caractéristiques climatiques que précédemment pour les surfaces latérales (intérieure et extérieure). Le mur a une hauteur de 3 mètres, le grès a une largeur de 50 cm, les enduits (chaux ou ciment) ont une épaisseur de 1,5 cm et les isolants de 10 cm.

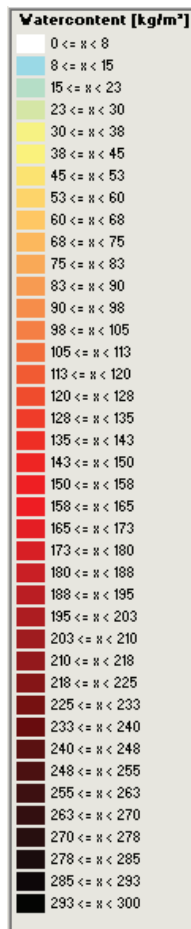
Les simulations ont été faites sur 3 années. Pour toutes les simulations, l'équilibre périodique a été atteint. Les résultats ont donc été pris en janvier et août de la 3^{ème} année. Tous les résultats sont disponibles en **Annexe**.

Pour toutes les simulations (que l'on peut retrouver en annexe), on observe la répartition de la teneur en eau (en kg/m³) dans le mur selon le code couleur ci-contre :

Les résultats sont à relativiser de par nos hypothèses simplificatrices. Tout d'abord, le mur de fondation n'a en pratique d'enduit intérieur et extérieur ou d'isolant qu'à partir du niveau du sol. A cela s'ajoutent les conditions artificielles créées pour simuler une zone d'eau liquide à la base du mur. La quantité d'eau qui y pénètre dépend en réalité de plusieurs facteurs comme la hauteur de la nappe phréatique qui varie d'un endroit à un autre ou encore la pluie qui s'accumule dans cette zone à cause d'un mauvais drainage.

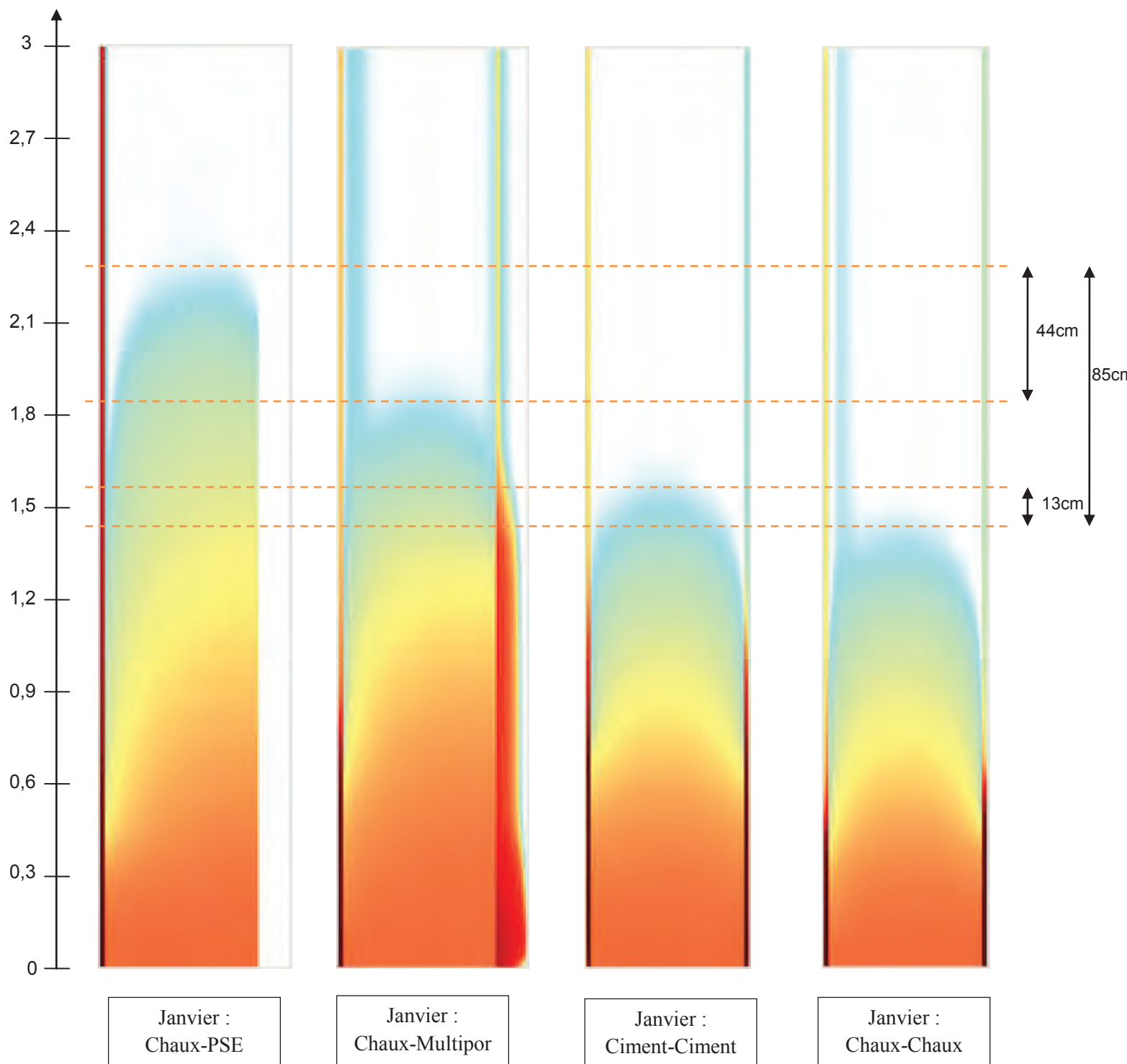
Pour ces raisons, on ne pourra que comparer entre elles le comportement des différentes solutions.

Nous avons simulé deux types d'enduits extérieurs, un enduit à base de chaux ou bien de ciment. A l'intérieur de la paroi, les enduits à base de chaux ou ciment ont été testés ainsi qu'une isolation en Polystyrène Expansé (PSE) et Multipor.



2.6.2 RESULTATS

Hauteur du mur [m]

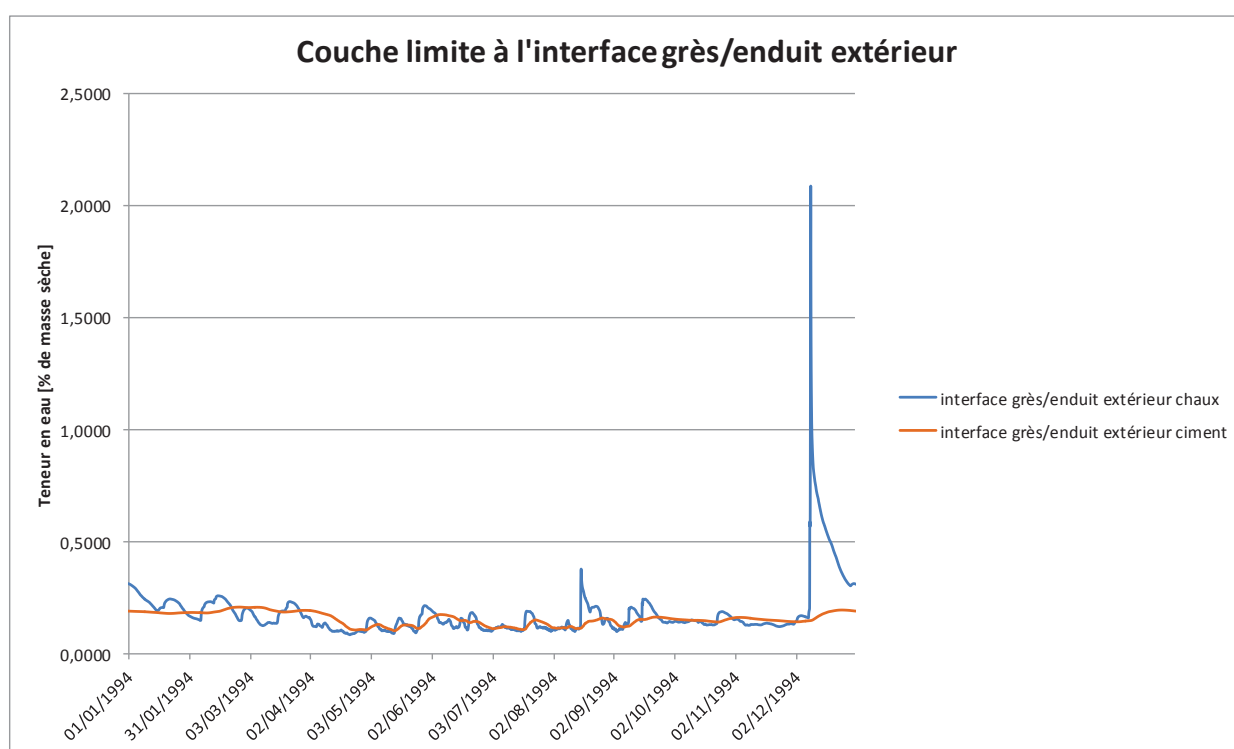


Tout d'abord, on observe que la hauteur du front d'eau est plus basse en hiver qu'en été (les résultats en août sont disponibles en **Annexe**). Cela est dû au flux de vapeur d'eau qui va de l'intérieur vers l'extérieur en hiver et plutôt de l'extérieur vers l'intérieur en été.

La composition des enduits intérieur et extérieur (chaux ou ciment) n'a pas une très grande influence sur la hauteur du front d'eau (quelques centimètres de différence). Le détail des simulations avec les différents types d'enduit intérieur et extérieur se trouve en annexes.

On remarque que l'enduit extérieur à base de chaux laisse légèrement plus passer la pluie par capillarité (partie haute du mur) que l'enduit ciment. Mais comme il est plus perméable à la vapeur d'eau, la pluie qui a pénétré peut être évacuée. La pénétration de la pluie n'a donc pas d'influence au global sur la hauteur du front d'eau, il est même légèrement moins haut avec la chaux qu'avec le ciment. En effet, l'enduit chaux ne piège pas d'humidité à l'intérieur de la paroi, ce qui est le cas de l'enduit ciment.

Ci-dessous, le graphique montrant la teneur en eau de la couche limite de grès (1 ou 2 cm) à l'interface entre le grès et l'enduit extérieur et ce pour l'état existant avec enduit extérieur chaux ou ciment.



L'amplitude de la teneur en eau dans la couche de grès à l'interface avec l'enduit est plus grande avec un enduit à la chaux qu'avec un enduit ciment. L'enduit à la chaux laisse entrer plus de pluie que le ciment mais permet également son évacuation. En cas d'infiltration d'eau par des fissures dans le toit par exemple, l'enduit ciment aura plus de mal à l'évacuer. Un enduit extérieur à la chaux est donc préférable.

Par comparaison aux enduits intérieur et extérieur, les caractéristiques hydriques des isolants jouent un rôle prépondérant dans les phénomènes de remontées capillaires de par leur épaisseur (10 cm dans nos simulations, contre 1,5 pour les enduits). Une isolation par le PSE entraîne un front d'eau de 44 cm plus haut qu'avec le Multipor. Cette différence est due à la grande perméabilité de ce dernier ($S_d = 0,41\text{m}$) par rapport au PSE ($S_d = 2,17\text{m}$). Il y a donc un flux de vapeur d'eau plus important à travers la paroi avec l'isolant Multipor qu'avec le PSE. Elle sèche plus vite et le front d'eau monte donc moins haut.

Utiliser un isolant le plus possible perméable à la vapeur d'eau est donc préconisé contre les remontées capillaires. Mais il faut aussi impérativement qu'il soit capable d'absorber l'eau des remontées (ou d'éventuelles condensations) sans que cela ne constitue un risque pour sa pérennité. C'est pourquoi **un matériau tel que le Multipor ou la laine de mouton paraît préférable au PSE**.

3 DIMENSIONNEMENT - MAISON LUDWIGSWINKEL

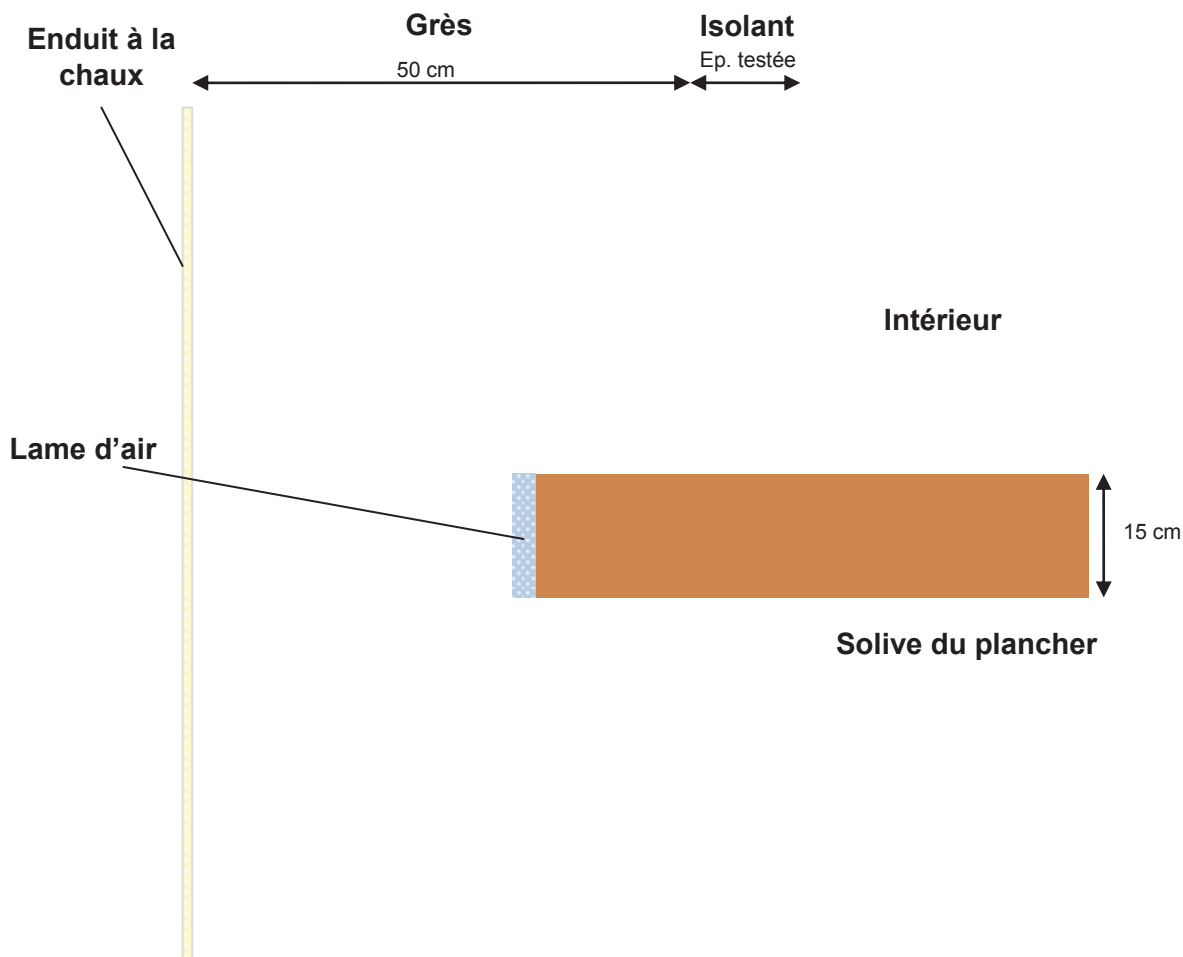
Pour les isolants retenus grâce à l'étude de la partie précédente, nous étudions les épaisseurs que l'on pourra mettre en œuvre en fonction du comportement hygrométrique.

3.1 SITUATION ETUDIEE

Les isolants retenus sont :

- Les isolants fibreux avec un pare-vapeur hygrovariable
- Le Multipor ou générique de même type (béton cellulaire ou panneaux de silicate de chaux)

Différentes épaisseurs de ces isolants sont simulées dans le cadre d'un pont thermique : la jonction entre une solive du plancher (en bois) et le mur. Il est orienté Nord-Ouest et toutes les hypothèses de simulation (climat, matériaux...) restent les mêmes que précédemment.



3.2 RESULTATS ISOLANTS FIBREUX

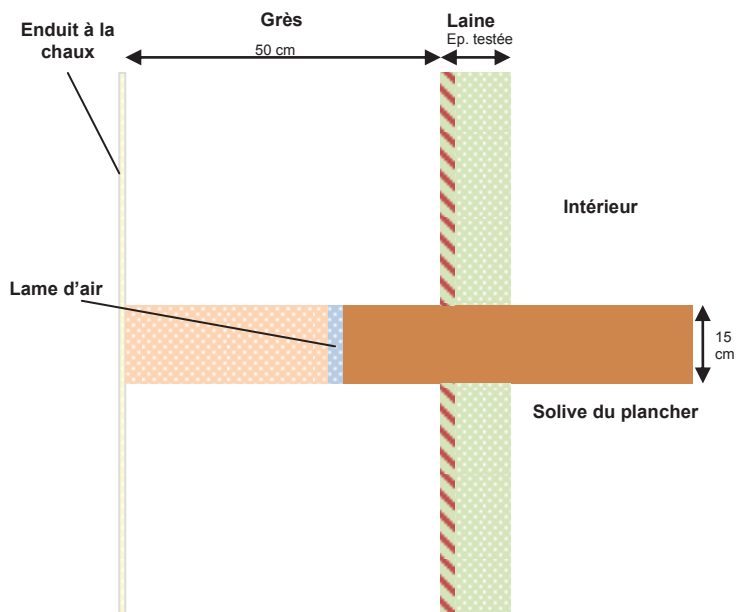
Nous avons testé avec l'isolant laine les épaisseurs suivantes : 6, 8, 10, 15 et 20 cm (sur 10 années de simulation). Et ce avec un pare-vapeur hygrovariable puisqu'il donnait les meilleurs résultats dans la partie précédente.

3.2.1 INTERFACE ISOLANT / GRES

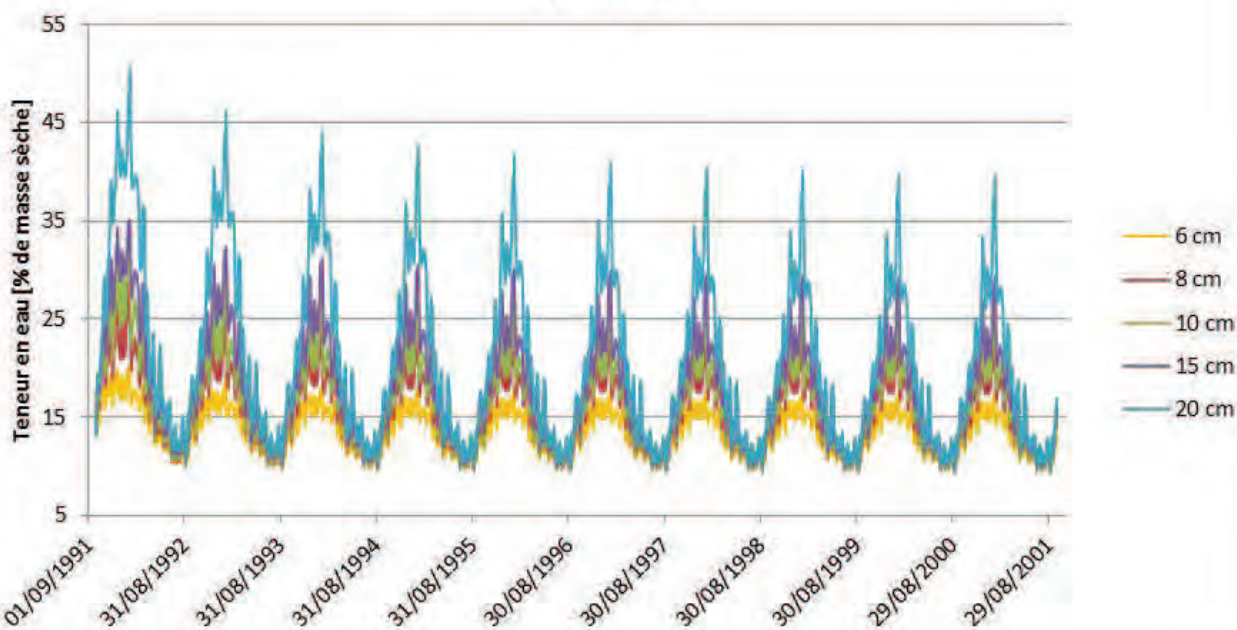
La zone la plus exposée à la condensation est l'interface grès/isolant. Et c'est dans cette zone que la pérennité des matériaux est la plus mise en danger suivant les différentes épaisseurs d'isolation.

En effet, on passe d'un matériau ouvert à la diffusion de vapeur d'eau (isolant) à un matériau plus résistif (mur). De plus, la température de la jonction mur/isolant est basse en hiver, il se peut que la vapeur d'eau contenue dans l'air condense au contact du mur froid.

Ci-dessous, l'évolution de la teneur en eau de la couche limite (1 à 2 cm) à l'interface isolant/grès sur 10 années de simulation.



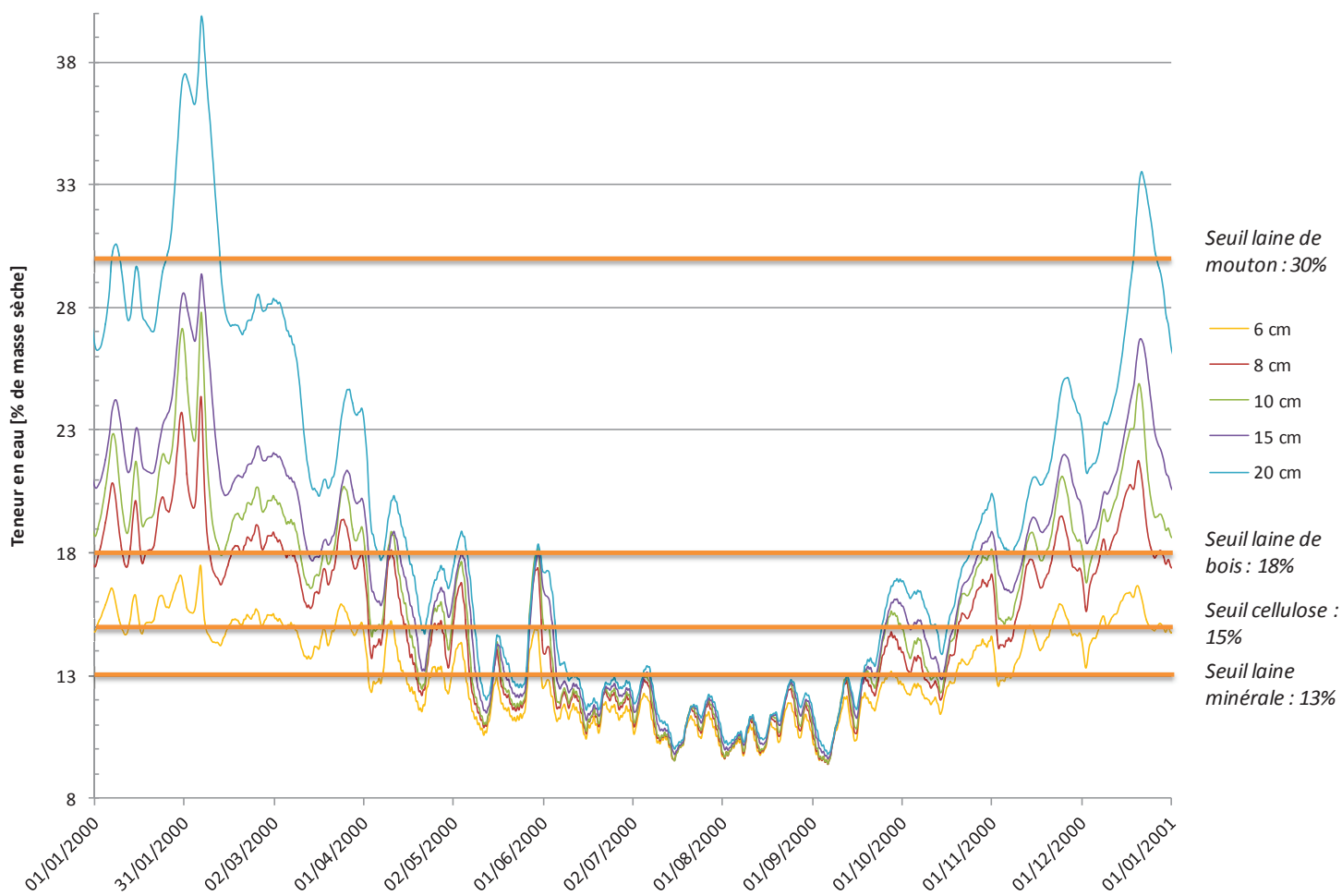
couche limite de l'isolant laine à l'interface avec le grès - sur 10 ans



L'eau dans la couche limite de l'isolant sèche et la teneur en eau atteint l'équilibre périodique au bout de quelques années.

On regarde maintenant son évolution sur la dernière année de simulation :

couche limite de l'isolant à l'interface avec le grès - dernière année



Plus l'épaisseur d'isolant laine est grande, plus la teneur en eau à l'interface isolant/grès augmente en hiver à cause des phénomènes de condensation.

- La **laine minérale n'est pas pérenne** quelle que soit l'épaisseur d'isolant testée. En effet, le seuil des 13% de masse sèche est dépassé pendant un peu plus de 7 mois dans l'année.
- Une isolation inférieure à **6 cm** voire moins est préconisée pour la **cellulose**. En effet, toutes les épaisseurs supérieures à 6 cm sont largement au-dessus du seuil fixé pendant plus de la moitié de l'année. La teneur en eau pour une épaisseur de 6 cm dépasse assez régulièrement ce seuil, mais de peu.
- Une épaisseur d'isolant inférieure ou égale à **8 cm** est préconisée pour la **laine de bois**. En effet, la teneur en eau avec une plus grande épaisseur dépasse le seuil des 18% de masse sèche pendant plus de la moitié de l'année. Le seuil est dépassé régulièrement mais de relativement peu pour une épaisseur d'isolant de 8 cm.
- La **laine de mouton** est pérenne pour toutes les épaisseurs testées, bien que pour 20 cm d'isolant, le seuil des 30% de masse sèche soit dépassé pendant 1 mois.

Il faut maintenant regarder ce qu'il se passe dans la solive pour valider ou affiner les conclusions obtenues précédemment.

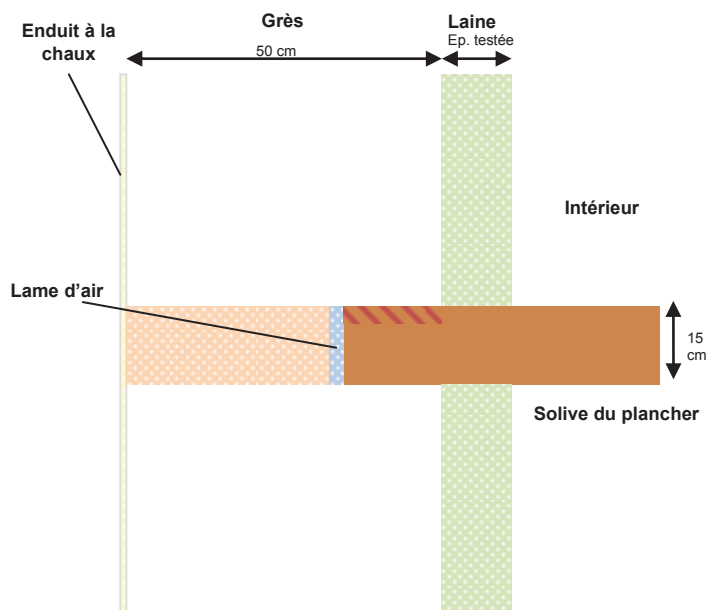
3.2.2 SOLIVE

Les résultats des simulations montrent que la pérennité de la solive n'est jamais en danger quel que soit l'épaisseur d'isolant testée. Au global de la solive, la teneur en eau est constamment sous la limite des 20% de la masse sèche et elle ne cesse de décroître d'année en année.

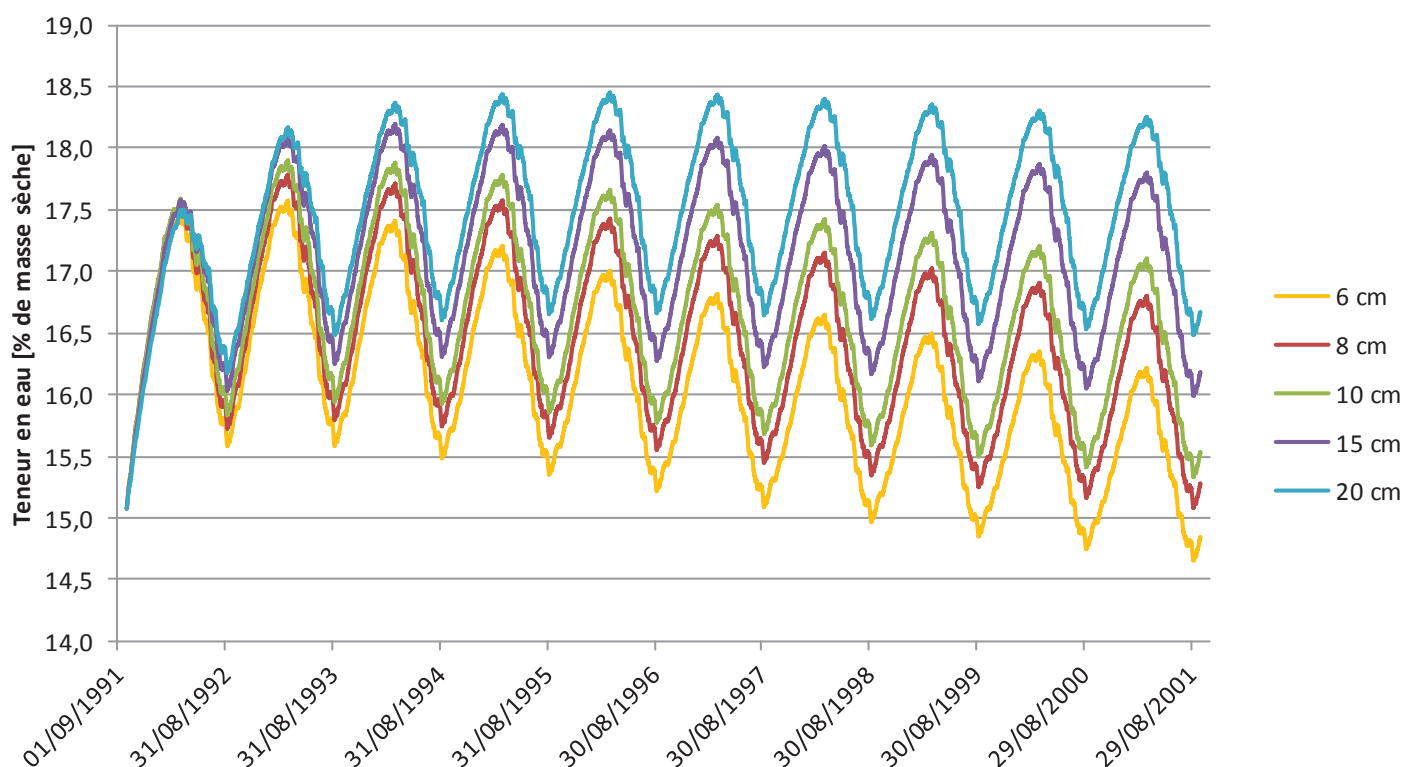
Une autre zone où les risques peuvent être élevés est la jonction entre le mur et la solive encastrée dans le mur, hachurée en rouge sur le schéma ci-contre.

C'est dans la couche limite à l'interface solive/grès que la teneur en eau est la plus élevée.

Le graphique ci-dessous montre l'évolution de la teneur en eau de cette couche limite sur 10 ans :



couche limite de la solive à l'interface avec le grès

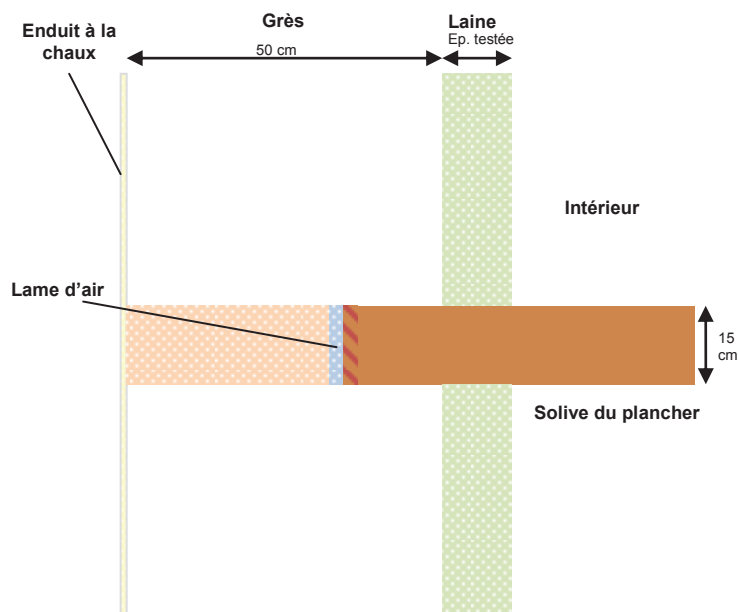


On constate tout d'abord que le seuil des 20% de masse sèche n'est jamais atteint (le maximum est 18,5%, atteint par une isolation de 20 cm d'épaisseur). De plus, la teneur en eau diminue après quelques années de légère augmentation (après plus longtemps pour une plus grande épaisseur). Ainsi avec une épaisseur de 20 cm, la teneur en eau va augmenter pendant 4 ans avant de diminuer progressivement alors qu'avec une épaisseur de 6 cm, la teneur en eau décroît assez fortement au bout d'un an seulement.

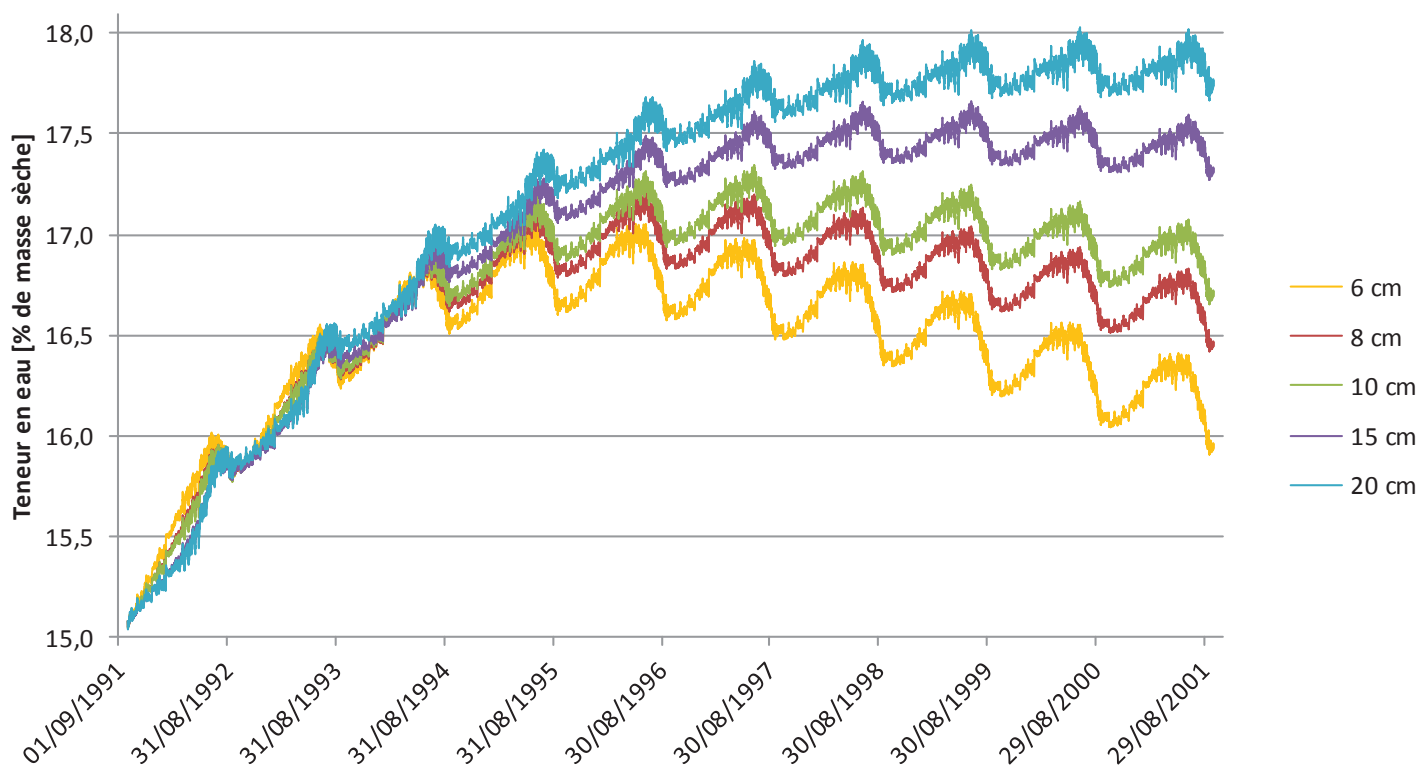
Bien que la teneur en eau dans la solive ne dépasse pas le seuil fixé, il est préférable d'avoir une marge suffisante permettant d'absorber un trop plein d'eau provenant d'une condensation entre l'isolant et le grès, et qui coulerait par gravité et atteindrait la solive. Le logiciel WUFI ne nous permet pas de modéliser ce type de phénomènes puisqu'il ne prend pas la gravité en compte. Ainsi, une teneur en eau qui décroît le plus rapidement possible est conseillée puisqu'elle permettrait d'absorber le surplus d'eau sans voir sa pérennité mise en danger.

Cette prudence est également conseillée dans la couche limite de la solive à l'interface avec la lame d'air, hachurée sur le schéma à droite.

Ci-dessous est présentée l'évolution de la teneur en eau de cette couche limite à l'interface solive/lame d'air :



couche limite de la solive à l'interface avec la lame air



Comme pour la couche limite à l'interface solive/grès, la teneur en eau augmente pendant quelques années puis décroît plus ou moins suivant l'épaisseur de l'isolant. On constate que même après 10 années de simulation, la teneur en eau dans cette couche pour 20 cm d'isolant ne se stabilise pas tout à fait. Alors que pour les autres épaisseurs, elle finit par décroître dans ce laps de temps. Ainsi, **une épaisseur d'isolant de 20 cm est déconseillée** par mesure de sécurité (cette zone ne pourrait pas absorber un surplus d'eau occasionnel avec cette épaisseur). En conclusion, il est conseillé de **ne pas mettre plus de 15 cm de laine de mouton en œuvre**.

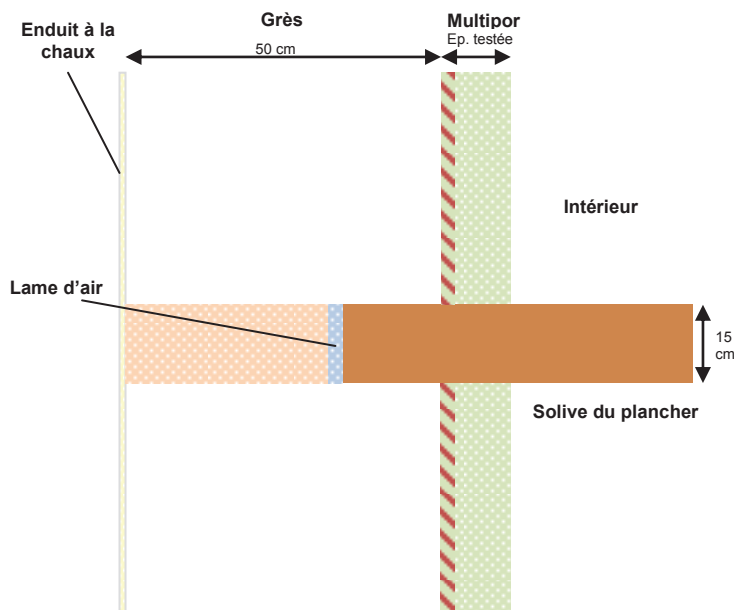
3.3 RESULTATS MULTIPOR

Nous avons testé l'isolation par l'intérieur avec les épaisseurs suivantes de Multipor : 6, 10, 12 et 15 cm. Ces tests ont été effectués avec une couche de colle continue, les plots de colle rallongeant inutilement le temps de calcul (la géométrie étant dans ce cas plus complexe, cela contraignait à augmenter la finesse du maillage).

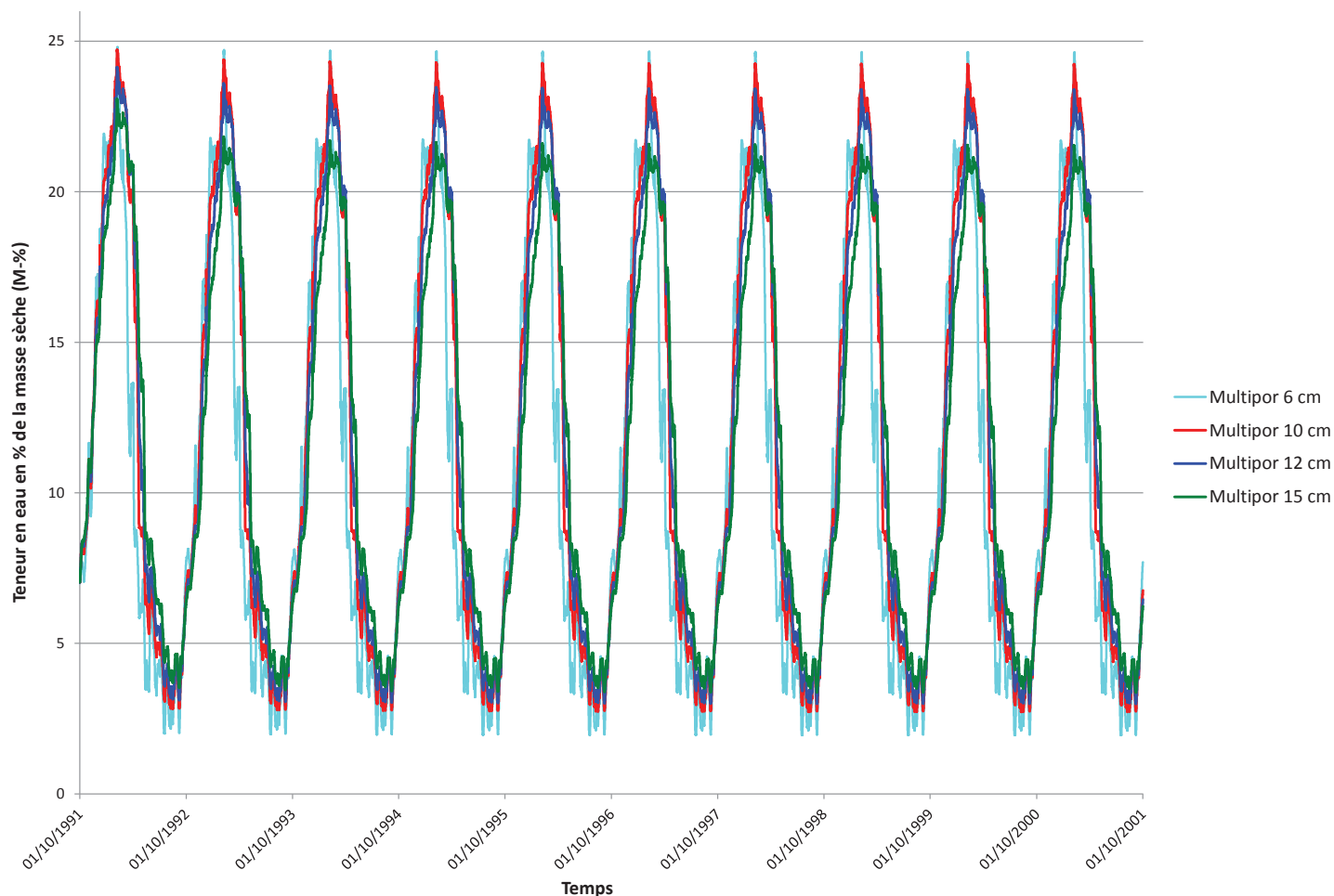
3.3.1 INTERFACE ISOLANT / GRES

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, la jonction avec le grès est la zone où les risques potentiels pour la pérennité de l'isolant sont les plus élevés. Cette zone à risques est hachurée en rouge sur le schéma de droite.

Le graphique suivant présente la teneur en eau du Multipor dans cette zone, sur 10 années de simulation.

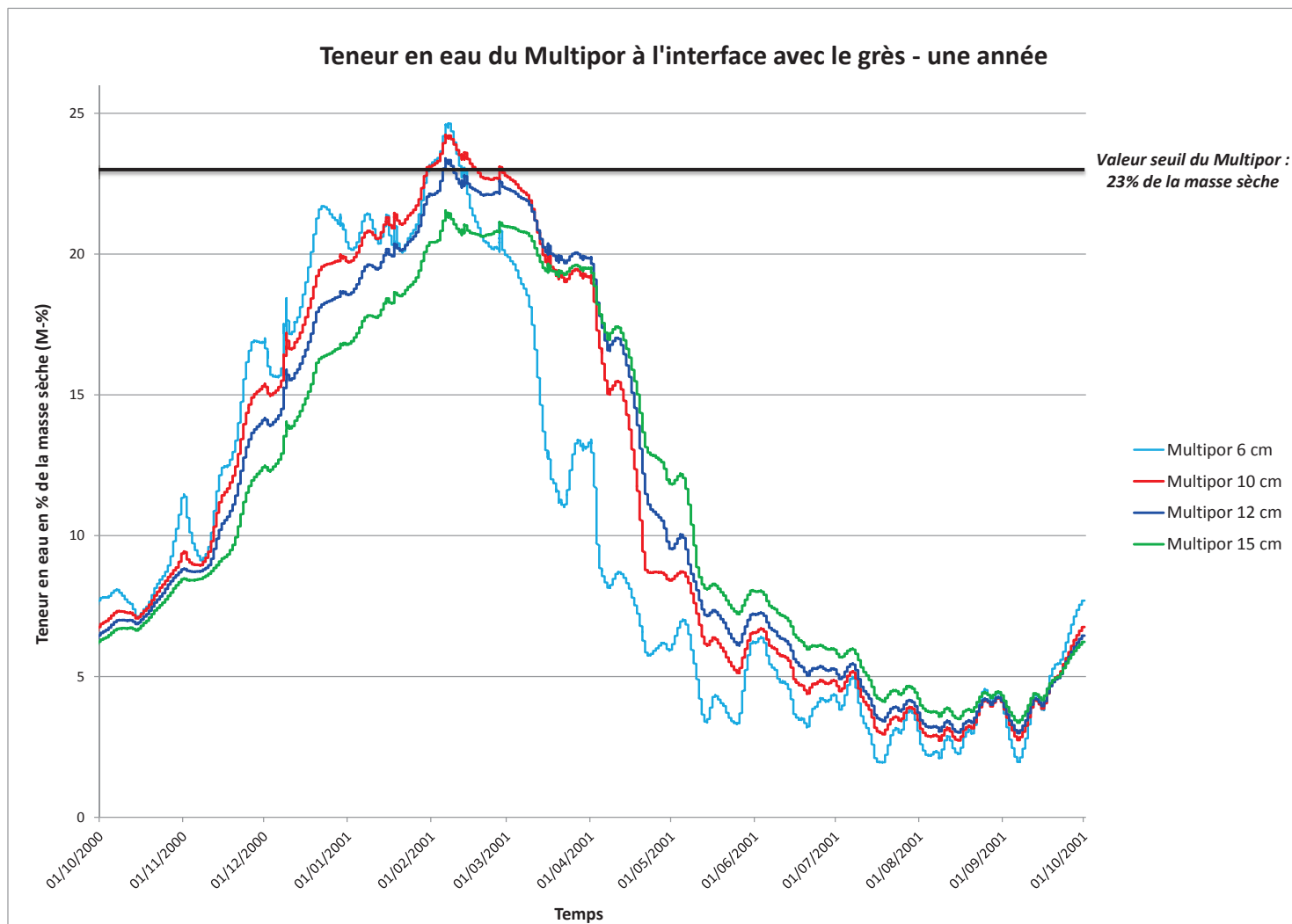


Teneur en eau du Multipor à l'interface avec le grès



- On note tout d'abord que cette zone de l'isolant n'accumule pas d'eau d'année en année : la teneur en eau est stable sur les 10 ans.
- L'amplitude de variation de la quantité d'eau est d'autant plus grande que l'épaisseur d'isolant est petite. En effet, plus on met de Multipor en œuvre, plus la couche d'isolant va pouvoir stocker d'eau, sans forcément continuer à la diffuser (vers le grès dans notre cas). Cela a pour conséquence de « lisser » les variations saisonnières de la teneur en eau à l'interface avec le grès.

Le graphique ci-dessous permet de voir un zoom des courbes précédentes sur la dernière année de simulation.

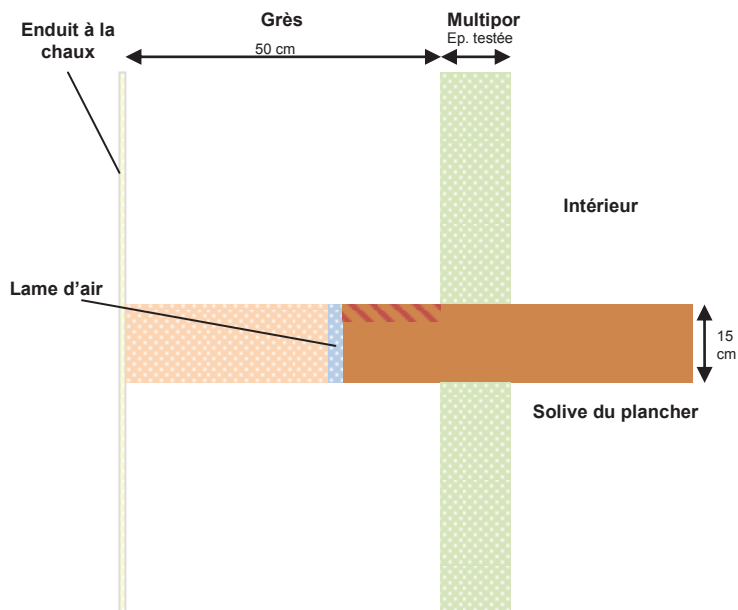


- De façon générale, moins la couche d'isolant est épaisse, moins on connaît cet effet de paroi froide du mur de grès à l'interface avec l'isolant. Cela diminue les risques de condensation. Mais ce n'est pas l'unique phénomène qui a une influence sur ces risques.
Un autre effet joue un rôle : plus on met de Multipor, plus cette couche d'isolant sera capable de stocker de la vapeur d'eau, ce qui diminue les risques. C'est pourquoi on obtient ce classement des épaisseurs de Multipor sur le graphique précédent : moins on met de Multipor, plus on dépasse la valeur seuil de teneur en eau de 23% de la masse sèche.
- Ainsi, on obtient les temps de dépassement de la valeur seuil suivants : 12 jours pour 6 cm, 18 jours pour 10 cm, 4 jours pour 12 cm et pas de dépassement pour 15 cm. Il semble qu'on puisse aller jusqu'à 15 cm de Multipor en isolation intérieure, mais la quantité d'eau de l'isolant à l'interface avec le grès n'est pas le seul critère. Il faut impérativement regarder ce qui se produit dans la solive, car la fonction isolant/grès n'est pas le seul critère de dimensionnement de l'isolant.

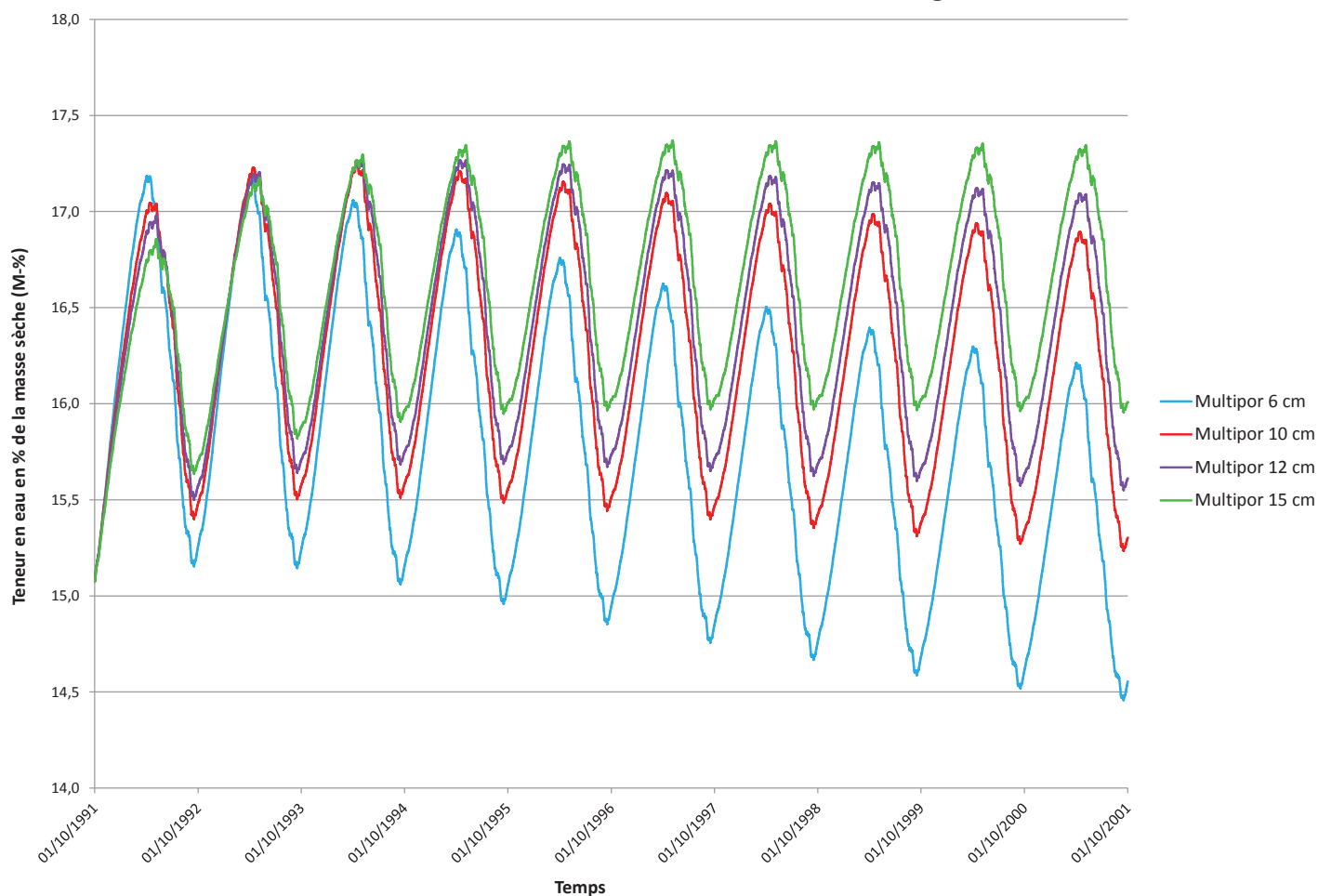
3.3.2 SOLIVE

De même qu'avec les isolants fibreux, il n'y a pas de risques pour la pérennité de la solive. La teneur en eau de la solive complète reste bien en dessous des 20% de masse sèche et décroît d'année en année pendant les 10 ans de simulation.

Il faut tout de même examiner ce qu'il se passe dans des zones particulières où les risques peuvent être accrus. La première est la jonction de la solive avec le mur en grès, indiquée en hachures rouges sur le schéma de droite.



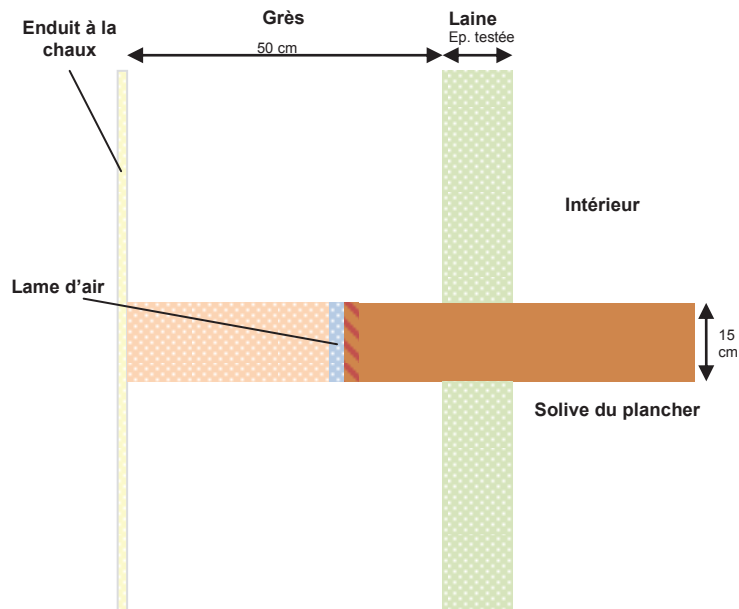
Teneur en eau de la solive à l'interface avec le grès



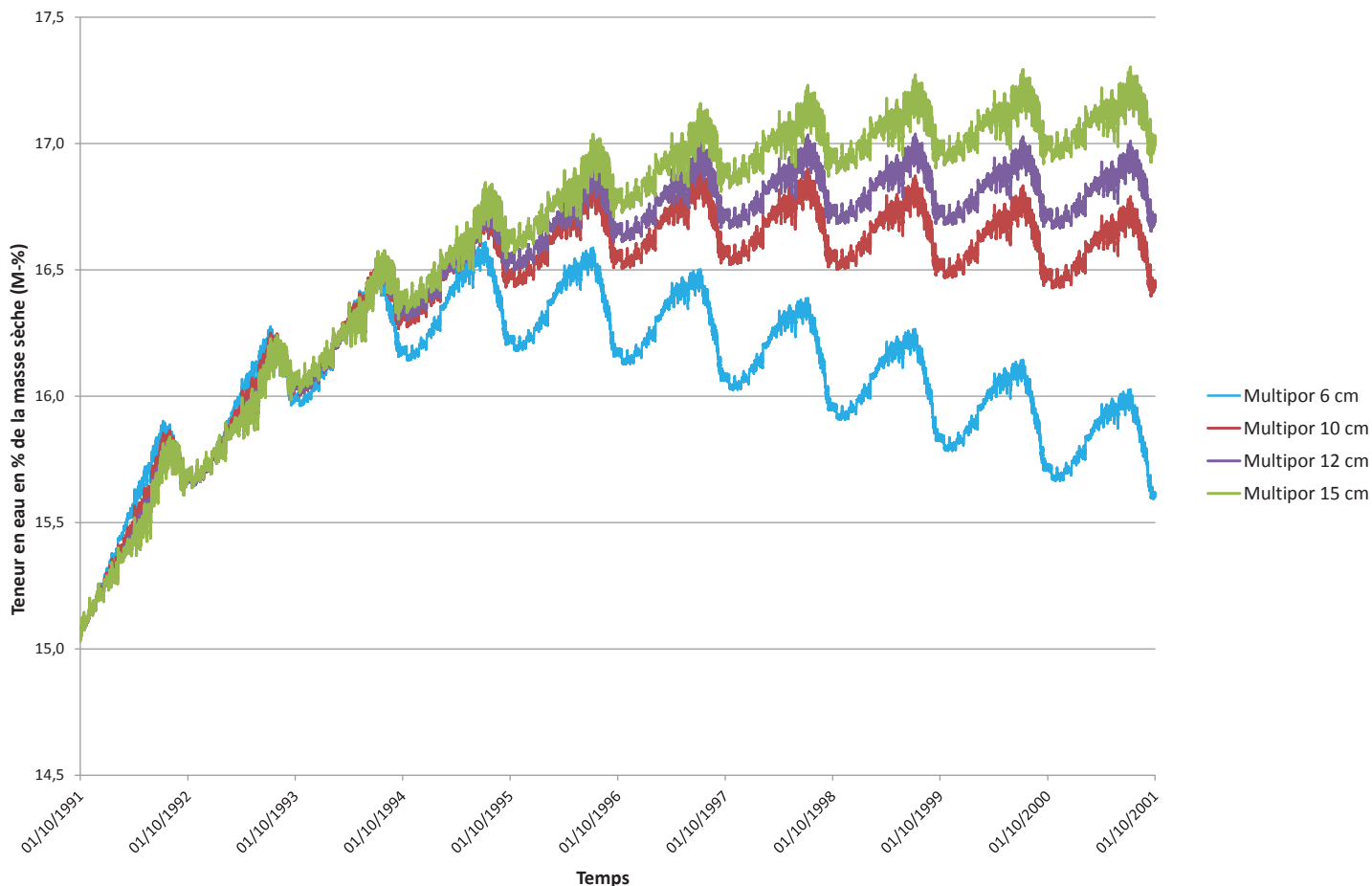
- En premier lieu, la teneur en eau n'atteint pas la limite des 20% de masse sèche, quelle que soit l'épaisseur de Multipor mise en œuvre. Il n'y a apparemment pas de risque de détérioration de la solive dans la couche limite à l'interface avec le mur en grès.
- Pour 6 cm d'isolation intérieure, la teneur en eau diminue d'année en année dès la première année. Pour 10 et 12 cm, elle augmente très légèrement les 3 ou 4 premières années puis diminue ensuite d'année en année, légèrement aussi.

Enfin, pour 15 cm, la quantité d'eau augmente les 4 premières années puis reste stable jusqu'à la fin de la simulation.

- Même si apparemment il n'y pas de risque pour la pérennité de la solive, il est plus prudent de choisir une épaisseur de Multipor avec laquelle la teneur en eau dans la couche limite solive/grès diminue après les premières années. En effet, il faut envisager le cas d'une condensation entre le grès et le Multipor. Dans ce cas, l'eau coule et peut atteindre la solive. Il n'est pas possible de simuler ce cas avec WUFI, qui ne prend pas la gravité en compte. En revanche, il faut prendre cette possibilité en compte, et rendre possible à la solive d'absorber cette eau sans qu'elle se détériore.
- C'est le cas des épaisseurs avec lesquelles la teneur en eau dans la couche limite solive/grès diminue après quelques années : cela laisse la possibilité à la solive de se recharger d'eau de façon ponctuelle. Nous préconisons donc d'isoler avec **12 cm maximum de Multipor**.
- On raisonne de la même façon au niveau de la lame d'air : il est préférable de laisser la possibilité à la solive d'absorber un surplus d'eau occasionnel, afin d'éviter qu'il ne stagne. On regarde donc ce qu'il se passe dans la solive à l'interface avec la lame d'air (zone hachurée en rouge dans le schéma ci-contre).



Teneur en eau de la solive à l'interface avec la lame d'air



- On voit qu'avec 12 cm d'isolation, après quelques années d'augmentation, la teneur en eau commence à décroître. Au contraire, avec 15 cm elle continue d'augmenter doucement au bout des 10 ans de simulation. Il paraît donc plus prudent d'isoler avec **maximum 12 cm de Multipor** pour prévoir les éventuelles recharges ponctuelles de la solive en nez de dalle.

4 CONCLUSION – MAISON LUDWIGSWINKEL

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. En 2.5, nous étudions l'impact d'une rénovation sans amélioration thermique : le remplacement de l'enduit extérieur à la chaux par un enduit au ciment. Pour tous ces tests, nous avons considéré un mur courant de la maison.

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 vérifions si la valeur seuil, caractéristique de chaque matériau isolant, est atteinte d'une part dans toute la couche d'isolant et d'autre part dans la couche limite d'isolant à l'interface avec le mur porteur. Si elle est atteinte, il faut examiner la durée de dépassement. Les conclusions de ces tests sont les suivantes :

- Des isolants fibreux en isolation intérieure, la laine de mouton est le plus pérenne. Des pare et freine-vapeur testés, le pare-vapeur hygrovariable de type Intello donne les résultats les plus satisfaisants.
- Le Multipor ou autre panneau isolant de silicate de chaux est un isolant pérenne en isolation intérieure.
- Le PSE ne semble pas poser de problème, ni l'enduit extérieur ciment. Le cas simulé montre ses limites : les remontées capillaires n'en font pas partie.

Or nous connaissons les dégâts de matériaux étanches face aux remontées capillaires, que ce soit côté intérieur et extérieur. La partie 2.6 présente donc les résultats de simulations de remontées capillaires. La hauteur du front d'eau dans le mur nous permet de conclure que le PSE (ni le XPS ni le PU) n'est pas envisageable en isolation intérieure, et que l'enduit à la chaux est préférable à l'enduit au ciment, aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur.

Pour les isolants retenus, nous déterminons en partie 3 l'épaisseur maximale qu'il est possible de mettre en œuvre. Pour cela, nous étudions le pont thermique de la jonction entre une solive en bois du plancher et le mur. Plusieurs critères entrent en jeu pour le dimensionnement de l'épaisseur maximale d'isolant intérieur. Il faut observer si la valeur seuil de teneur en eau de l'isolant est atteinte à l'interface avec le mur et si oui pendant combien de temps. Ensuite, nous regardons si la valeur seuil de teneur en eau du bois est atteinte dans la solive d'une part dans sa globalité, d'autre part à l'interface avec le mur et enfin à l'interface avec la lame d'air en nez de dalle. Là encore, s'il y a dépassement, on examine la durée de dépassement. Les conclusions de ce dimensionnement sont les suivantes :

- La laine minérale s'avère inenvisageable quelle que soit l'épaisseur testée
- 6 cm maximum pour la cellulose
- 8 cm maximum pour la laine de bois
- 15 cm maximum pour la laine de mouton
- 12 cm maximum pour le Multipor

Il ne faut pas oublier que tant qu'il est possible d'isoler par l'extérieur, c'est la solution à envisager. En effet, en posant l'isolant à l'extérieur, on réchauffe toutes les couches de la paroi. La vapeur d'eau ne se condense qu'au parement extérieur sans aucun risque de dégât dans la paroi.