

LUDWIGSWINKEL - BÂTIMENT RÉNOVÉ

Étude WUFI



Sommaire

1	HYPOTHESES	3
1.1	MATERIAUX	3
1.2	CONDITIONS INITIALES	4
1.3	CLIMAT EXTERIEUR	4
1.3.1	Température et humidité relative	4
1.3.2	Pluviométrie	5
1.4	CLIMAT INTERIEUR	6
1.5	CRITERES D'INTERPRETATION	7
2	TESTS DES MATERIAUX - MAISON LUDWIGSWINKEL	8
2.1	PORTION DE MUR ETUDIEE	8
2.2	RESULTATS ISOLANT FIBREUX	9
2.2.1	Teneur en eau dans toute la paroi	9
2.2.2	Teneur en eau dans le grès	10
2.2.3	Teneur en eau dans l'isolant	12
2.3	RESULTATS MULTIPOR	16
2.3.1	Teneur en eau dans toute la paroi	16
2.3.2	Teneur en eau dans le grès	17
2.3.3	Teneur en eau dans l'isolant	20
2.4	RESULTATS PSE	22
2.4.1	Teneur en eau dans toute la paroi	22
2.4.2	Teneur en eau dans le grès	23
2.5	RESULTATS RENOVATION SANS AMELIORATION THERMIQUE	26
2.6	SIMULATIONS REMONTEES CAPILLAIRES	28
2.6.1	Hypothèses	28
2.6.2	Résultats	29
3	DIMENSIONNEMENT - MAISON LUDWIGSWINKEL	31
3.1	SITUATION ETUDIEE	31
3.2	RESULTATS ISOLANTS FIBREUX	32
3.2.1	Interface Isolant / grès	32
3.2.2	Solive	34
3.3	RESULTATS MULTIPOR	36
3.3.1	Interface isolant / grès	36
3.3.2	Solive	38
4	CONCLUSION – MAISON LUDWIGSWINKEL	41

1 HYPOTHESES

1.1 MATERIAUX

○ Le mur – Hunsbach :

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 Obernkirchner	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.

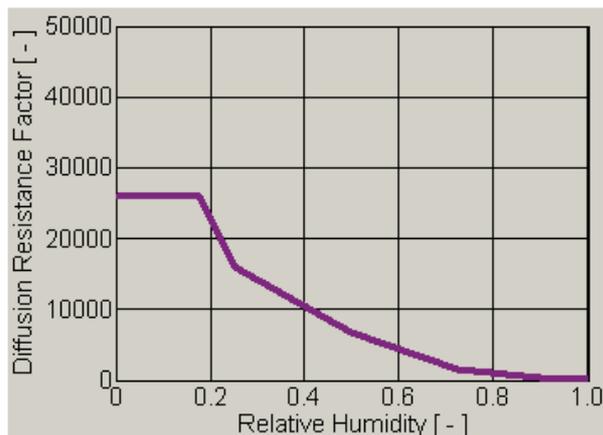
Composition paroi	μ (-)	Cp (j/kg.K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Multipor	4,1	850	115	0,04
Colle Multipor	15,1	850	833	0,155
Laine	1,5	1660	38	0,036
Polystyrène expansé	21,7	1500	20	0,04

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.



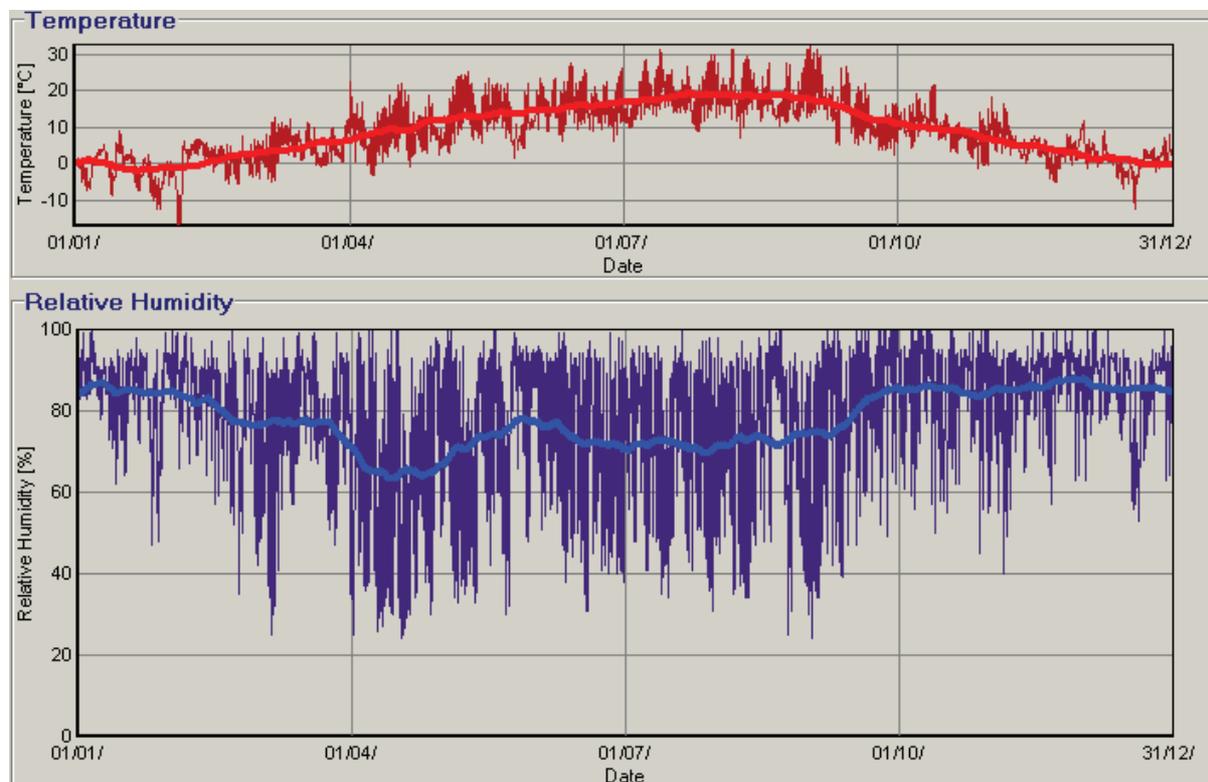
1.2 CONDITIONS INITIALES

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 EXTERIEUR

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 TEMPERATURE ET HUMIDITE RELATIVE

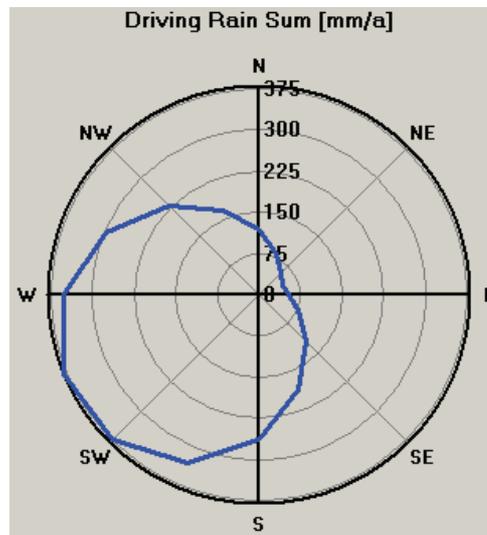


Le climat de Würzburg, lors de l'année de référence de 1991 a les caractéristiques suivantes :

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

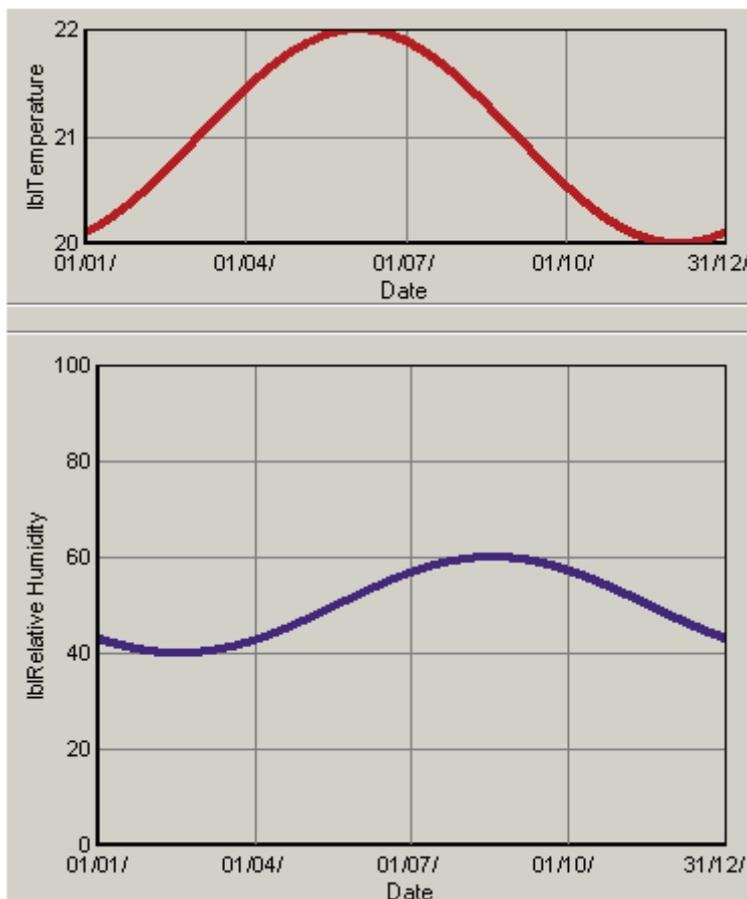
1.3.2 PLUVIOMETRIE

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 INTERIEUR

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 CRITERES D'INTERPRETATION

- **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

2 TESTS DES MATERIAUX - MAISON LUDWIGSWINKEL

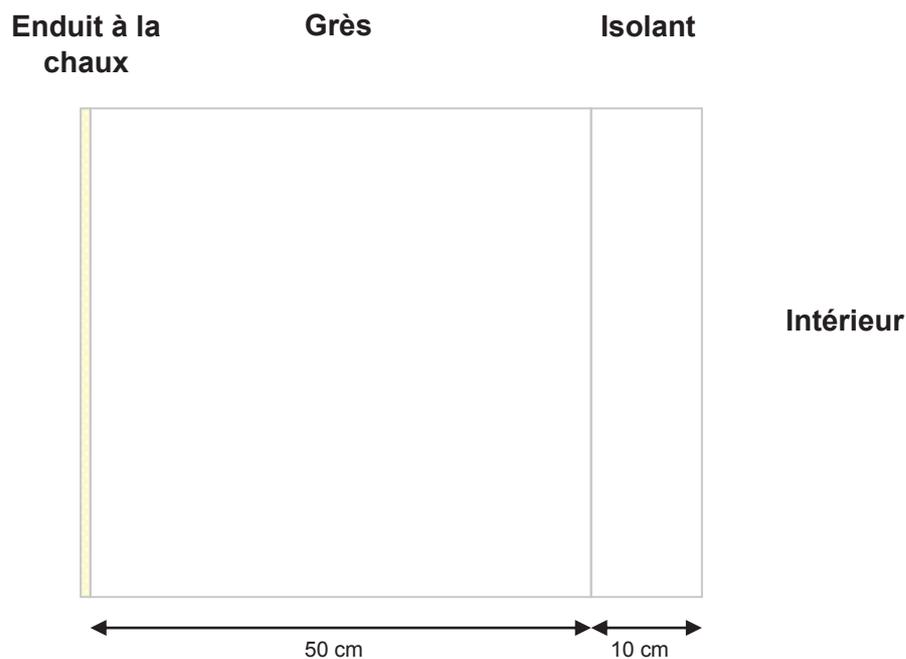
2.1 PORTION DE MUR ETUDIEE

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

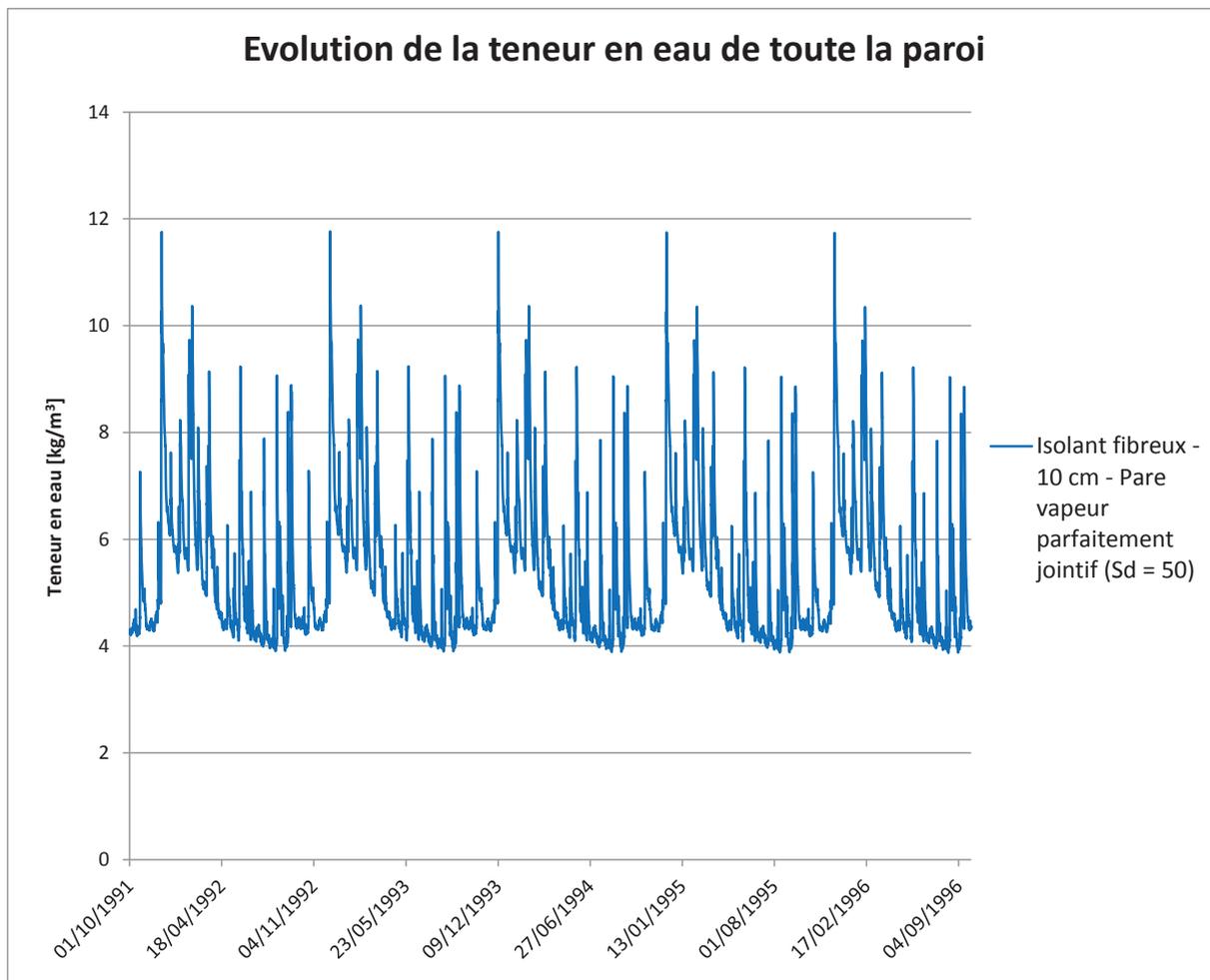
Nous avons considéré une portion de mur courant, orientée NO. Ainsi nous nous plaçons dans le cas le plus défavorable. En effet une paroi orientée NO met plus de temps à s'assécher en été (maximum de pluie à l'ouest et minimum de rayonnement solaire au Nord).



2.2 RESULTATS ISOLANT FIBREUX

2.2.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

On a effectué les simulations sur 5 ans. On obtient ci-dessous l'évolution de la teneur en eau dans toute la paroi, sur 5 ans :

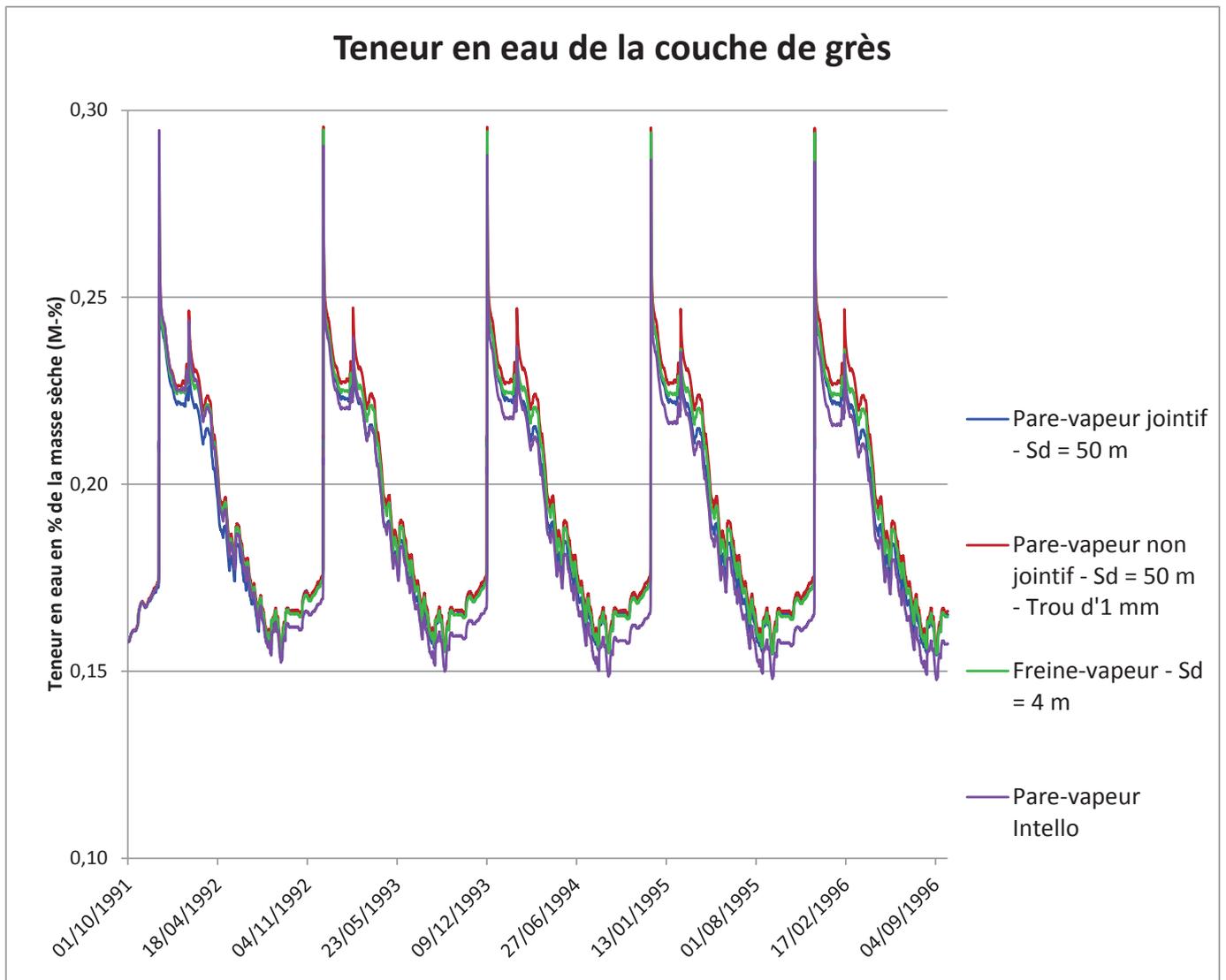


La teneur en eau de toute la paroi reste stable, le mur ne se gorge pas d'eau d'une année à l'autre.

Voyons ce qu'il se passe dans l'épaisseur de la couche de grès.

2.2.2 TENEUR EN EAU DANS LE GRES

Nous étudions la teneur en eau de toute l'épaisseur de grès, comme hachuré sur le schéma ci-dessous.



Sycoparc

Guide de l'éco-rénovation

Nous ne disposons pas de valeur seuil claire de la teneur en eau qui permette de statuer sur une possible dégradation du grès.

En revanche on observe que les quantités d'eau dans le grès restent très faibles (en dessous de 0,3% de la masse sèche de grès). De plus, l'eau ne s'accumule pas d'année en année mais sèche bien périodiquement.

Nous nous intéressons maintenant au comportement de l'isolant.

2.2.3 TENEUR EN EAU DANS L'ISOLANT

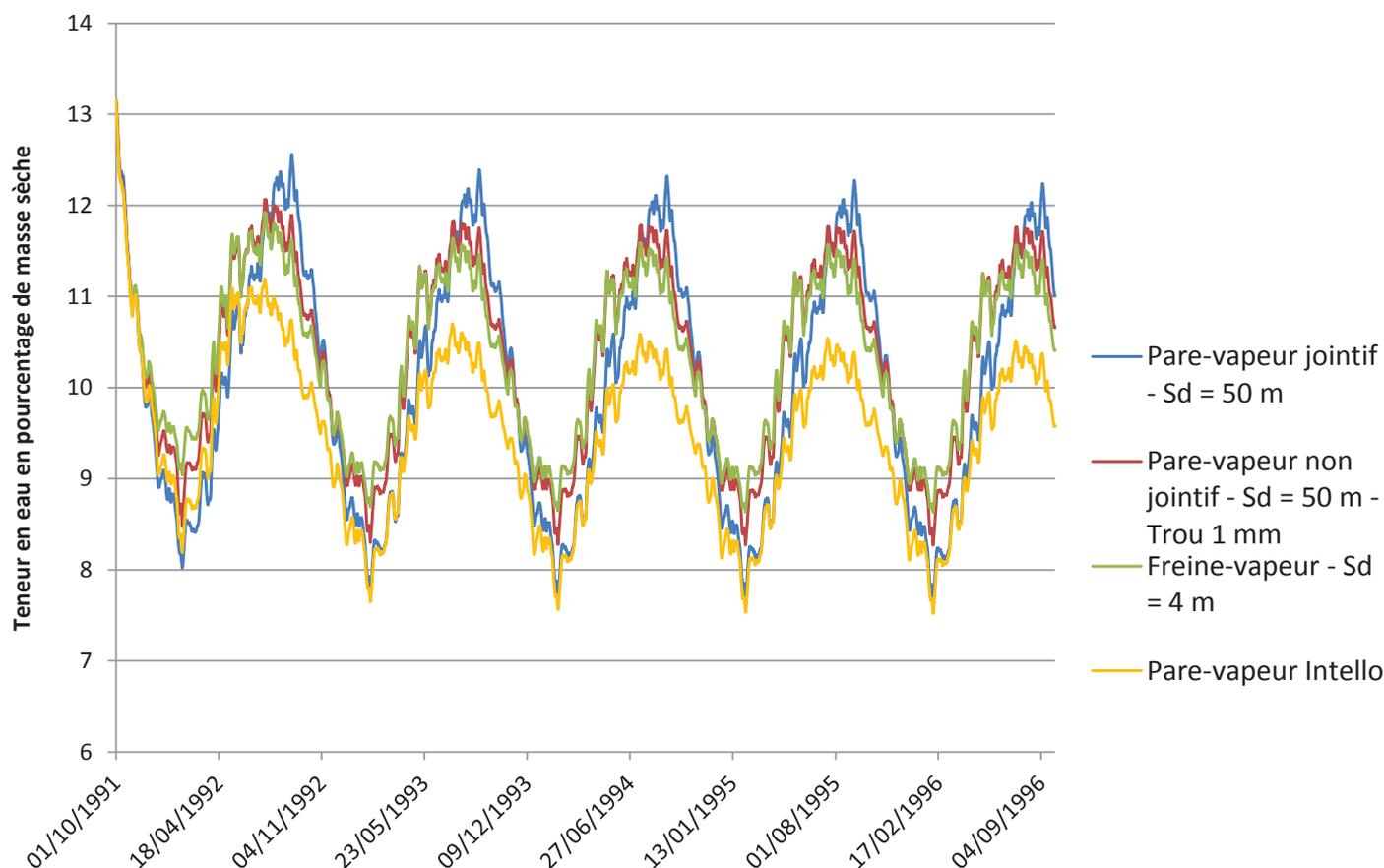
2.2.3.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA COUCHE D'ISOLANT

La zone dont on étudie l'évolution hygrométrique est mise en évidence en rouge dans le schéma ci-dessous :



Le graphique suivant présente l'évolution de la teneur en eau dans toute la couche d'isolant, et ce pour les 4 configurations de pare ou freine vapeur.

Isolant Laine

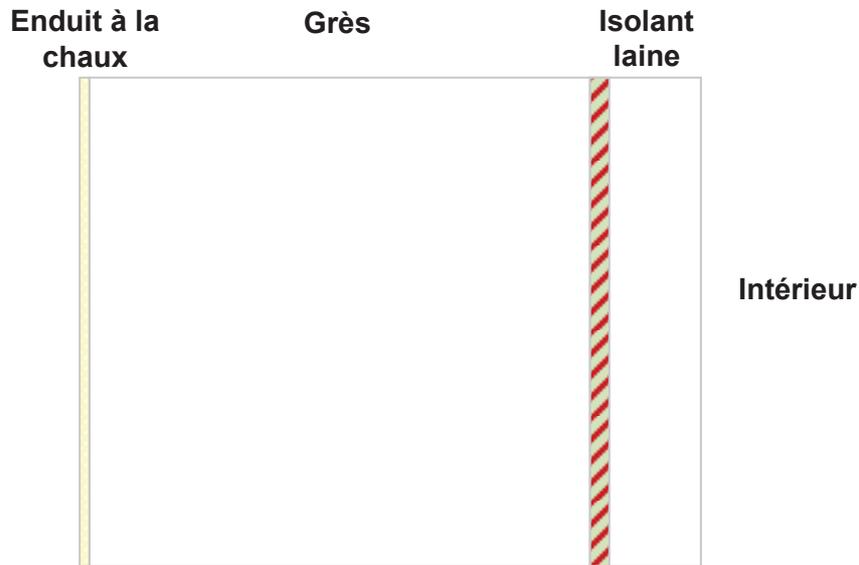


- Au global de la couche d'isolant, c'est avec le pare-vapeur hygrovariable qu'on obtient les quantités d'eau les moins élevées.
- Aucune des valeurs seuils n'est dépassée (13% de la masse sèche pour la laine minérale, 15% pour la cellulose, 18% pour la laine de bois et 30% pour la laine de mouton).

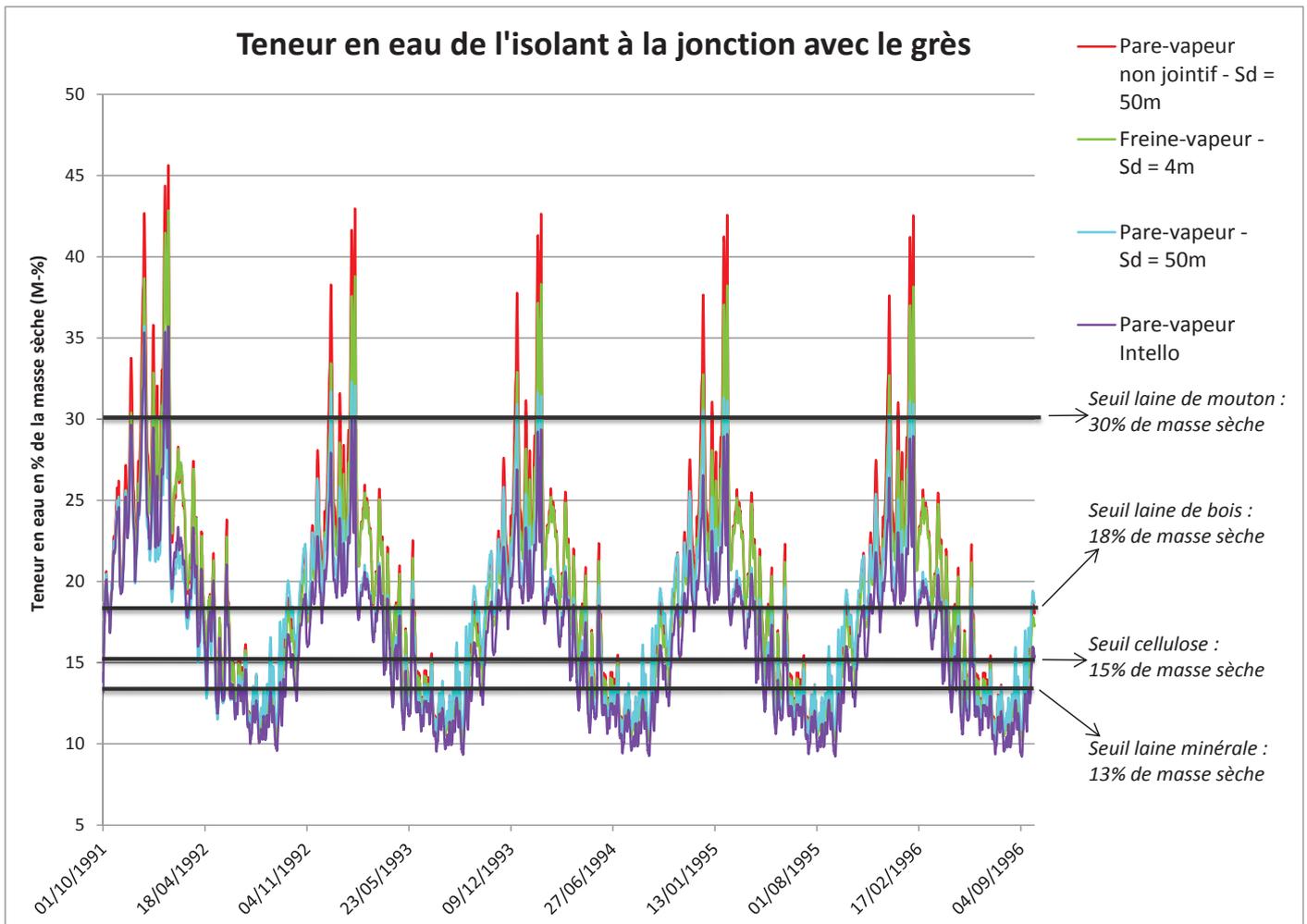
Il ne faut pas oublier de regarder plus en détail la teneur en eau de la couche limite d'isolant à l'interface avec le grès (1 à 2 cm). En effet, ce qui se passe dans cette zone à risques est déterminant pour la pérennité de l'isolant fibreux.

2.2.3.2 TENEUR EN EAU DANS LA COUCHE LIMITE D'ISOLANT A L'INTERFACE AVEC LE GRES

La couche limite d'isolant dont on étudie l'évolution des propriétés hygrométriques est mise en évidence en rouge sur le schéma ci-dessous :

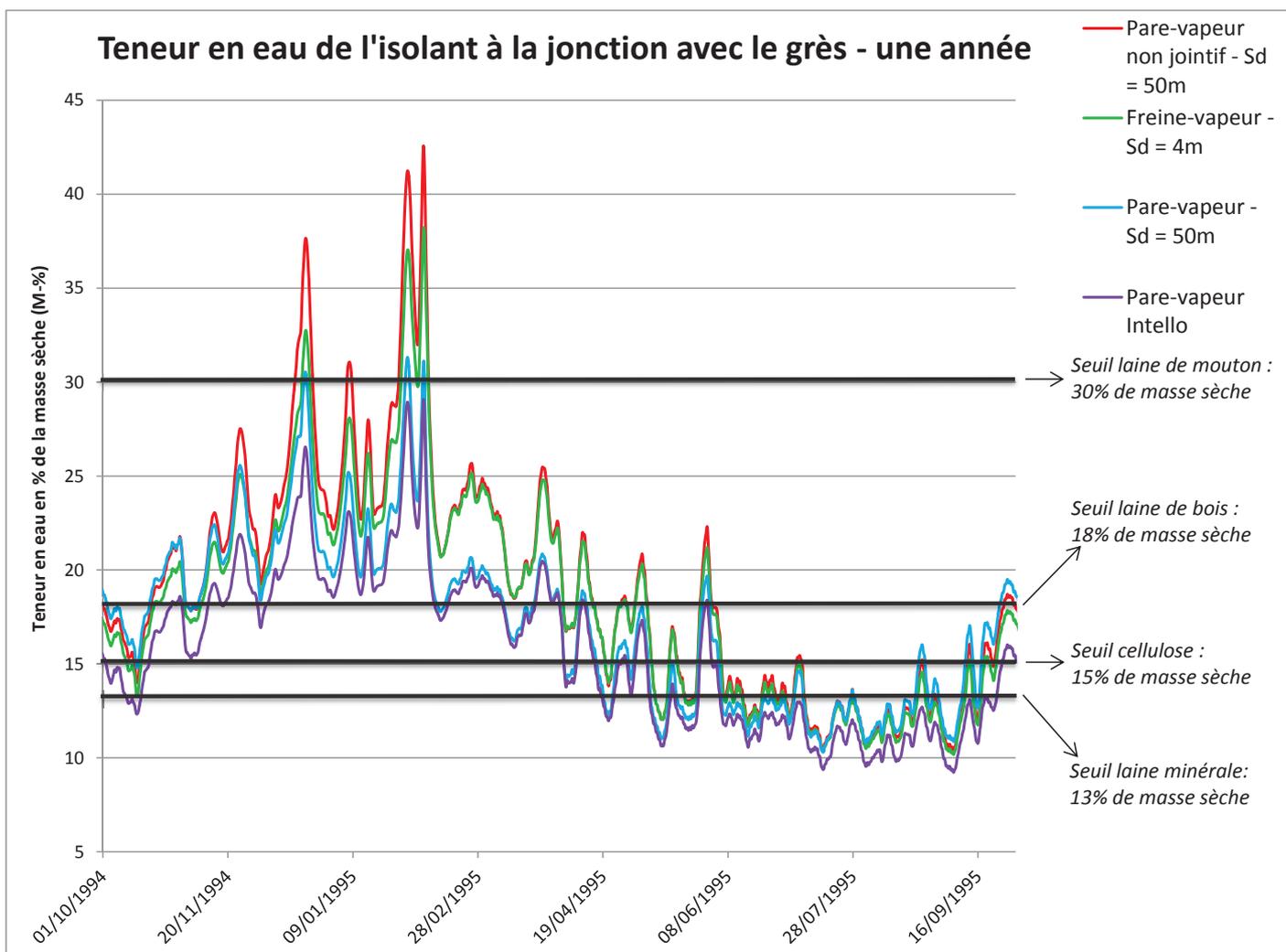


Le graphique ci-dessous présente l'évolution de la teneur en eau de la couche limite de l'isolant, et ce pour les 4 configurations de pare ou freine vapeur.



- Quelle que soit la configuration de pare ou freine vapeur mise en œuvre, les valeurs seuils de la laine minérale, de la cellulose et de la laine de bois sont atteintes tous les ans.
La laine de mouton paraît être l'isolant fibreux à privilégier.
- La limite de teneur en eau pour la laine de mouton est dépassée pour les configurations avec pare-vapeur et freine-vapeur traditionnels, mais pas avec un pare-vapeur hygrovariable.
La configuration avec pare-vapeur hygrovariable apporte les meilleurs résultats.

Le graphique ci-dessous présente un zoom sur un an des courbes précédentes.



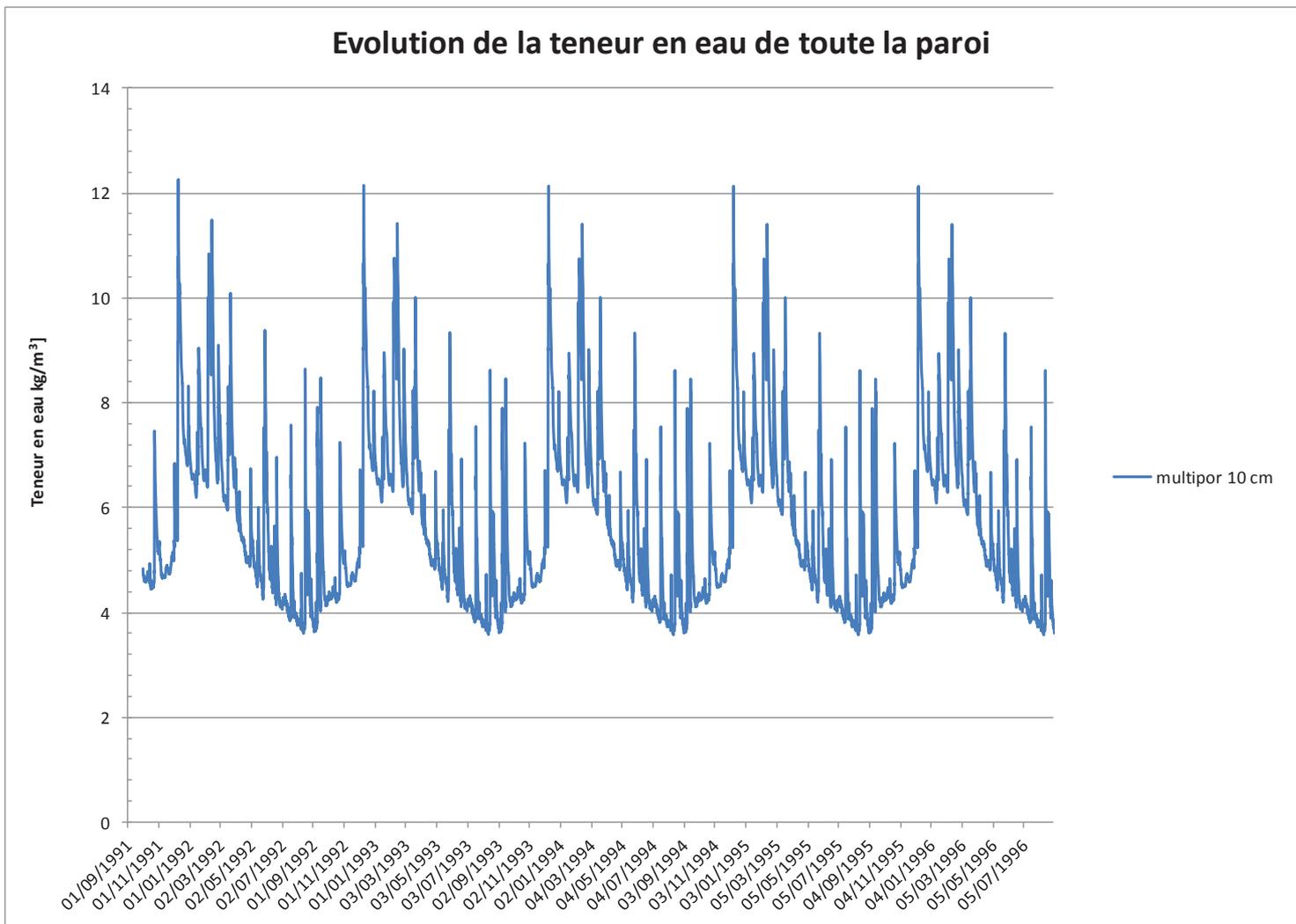
- Selon la configuration de pare ou freine vapeur mise en œuvre, les valeurs seuils de teneur en eau pour la laine minérale et la cellulose sont dépassées au moins 6 mois d'affilée (configuration pare vapeur hygrovariable) voire plus (autres configurations). Cela constitue un risque pour la pérennité de l'isolant.
- De même, le seuil de teneur en eau de la laine de bois est atteint pendant 3 mois consécutifs avec le pare-vapeur hygrovariable et 5 mois avec les autres configurations. La pérennité du matériau peut être menacée.
- En revanche, la quantité d'eau maximale de la laine de mouton n'est dépassée que très ponctuellement :
 - o 2 jours consécutifs maximum dans la configuration avec pare-vapeur classique
 - o 4 jours consécutifs maximum avec un pare-vapeur non jointif ou un freine-vapeur

La laine de mouton paraît être l'isolant fibreux le plus pérenne.

2.3 RESULTATS MULTIPOR

2.3.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

On a effectué les simulations avec 10 cm de Multipor fixé au grès grâce à des plots de colle de 5 mm d'épaisseur (10 cm de colle tous les 20 cm). On obtient ci-dessous l'évolution de la teneur en eau dans toute la paroi, sur 5 ans :

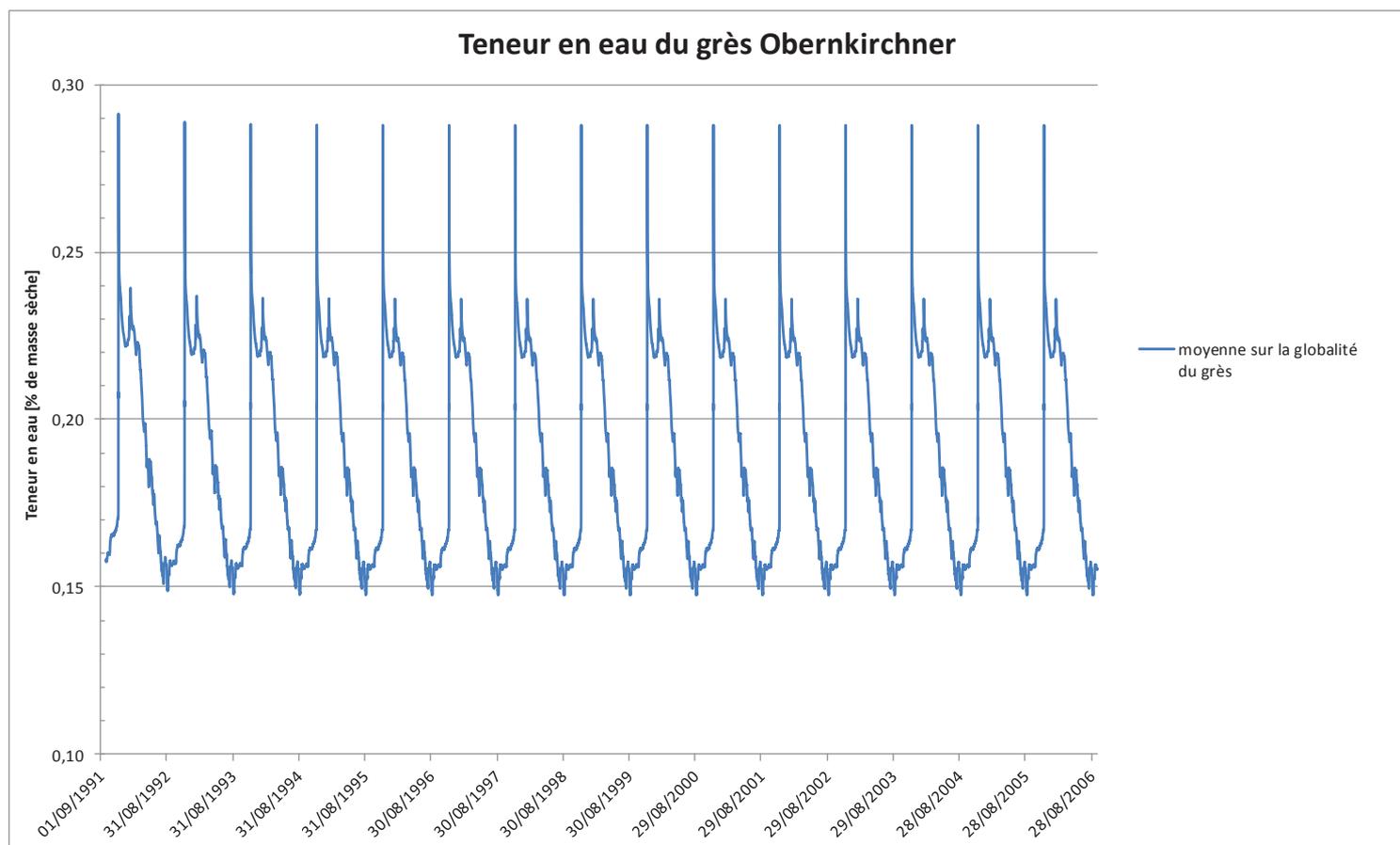


La quantité d'eau dans la paroi reste stable, l'eau ne s'accumule pas d'année en année.

2.3.2 TENEUR EN EAU DANS LE GRES

2.3.2.1 DANS LA TOTALITE DU GRES

On s'intéresse à la teneur en eau dans la globalité du grès comme montré ci-dessous :



Il n'y a pas de seuil de la teneur en eau clairement défini pour le grès, qui indiquerait un risque pour sa pérennité.

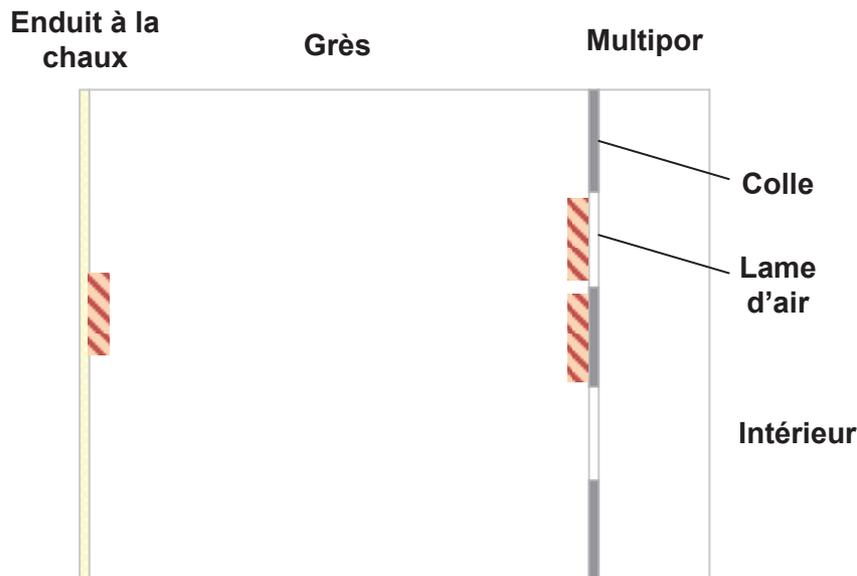
Cependant on voit que la teneur en eau reste en équilibre périodique (les variations de la teneur en eau se répètent d'une année sur l'autre). De plus, les quantités d'eau sont très faibles (moins de 0,3% de la masse sèche du grès).

2.3.2.2 DANS LES COUCHES LIMITES DU GRES

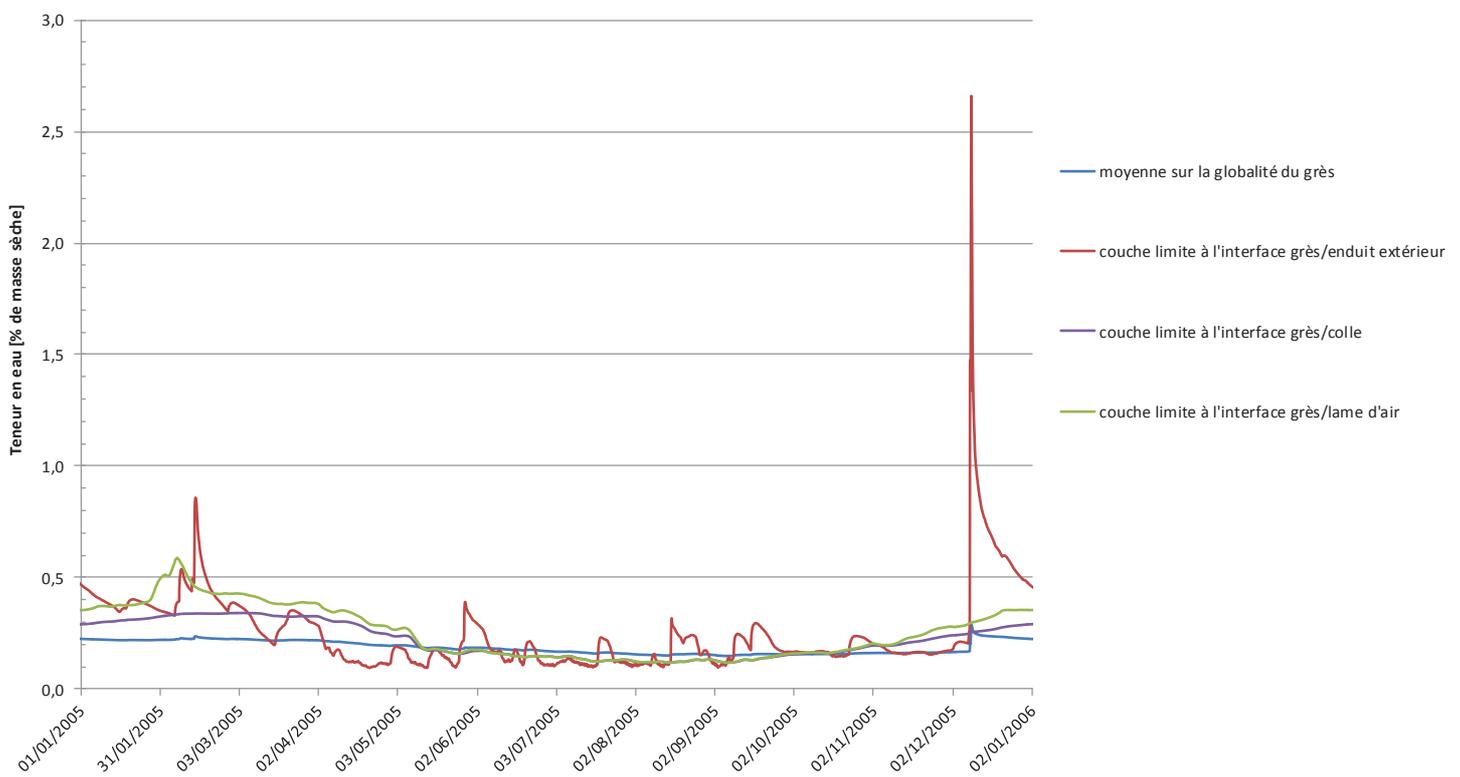
Selon différentes études, les lames d'air entre les plots de colle représentent des zones à risques du point de vue hygrométrique. En effet, la lame d'air constitue une résistance thermique importante ($\lambda = 0,047$), ce qui a pour conséquence de mettre le grès dans une situation de paroi froide. En revanche la lame d'air est perméable à la vapeur d'eau ($\mu = 0,79$). Il y a donc un risque accru que cette vapeur d'eau condense au contact du grès.

Intéressons-nous en détail à l'évolution de la teneur en eau dans le grès sur une année. Et ce pour les zones suivantes :

- Couche limite (1 ou 2 cm d'épaisseur) à l'interface grès/enduit extérieur
- Couche limite à l'interface grès/colle
- Couche limite à l'interface grès/lame d'air



Teneur en eau du grès Obernkirchner sur 1 an



Il n'y a pas de seuil de la teneur en eau clairement défini pour le grès, qui indiquerait un risque pour sa pérennité.

Cependant, on remarque de nouveau que la paroi a en moyenne une faible teneur en eau devant sa masse sèche (entre 0,15 et 0,3%).

La partie du grès la plus à l'extérieur (en contact avec l'enduit extérieur) subit des variations notables suivant les conditions climatiques extérieures. On remarque surtout un pic lors du mois de décembre.

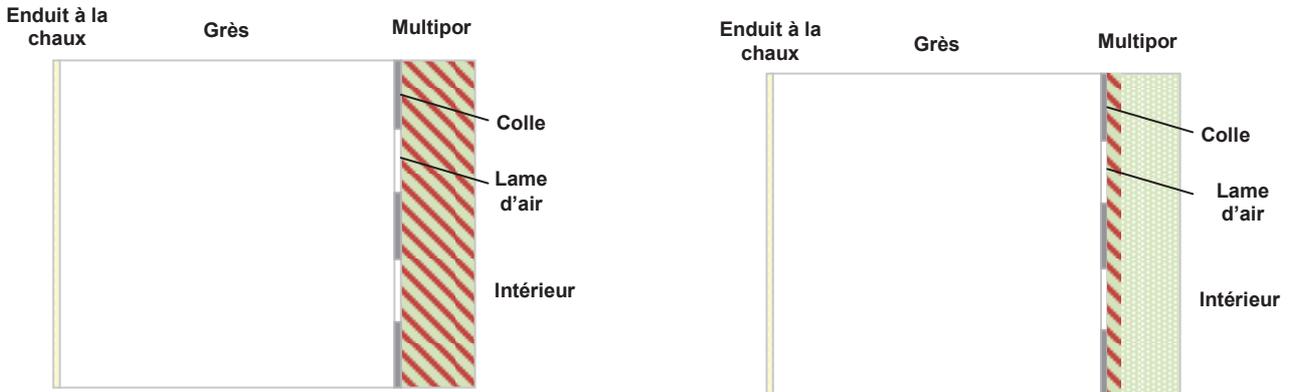
Il peut y avoir un risque de dégradation des surfaces extérieures notamment lors des phases de gel/dégel de l'eau contenue dans le grès, étant donné que cette zone est la plus froide du mur.

Malgré le pic d'eau dans la couche limite à l'interface grès/enduit extérieur, l'utilisation d'un enduit extérieur à base de chaux, perméable à la vapeur d'eau, permet à cette partie de grès de sécher presque aussitôt et de manière importante.

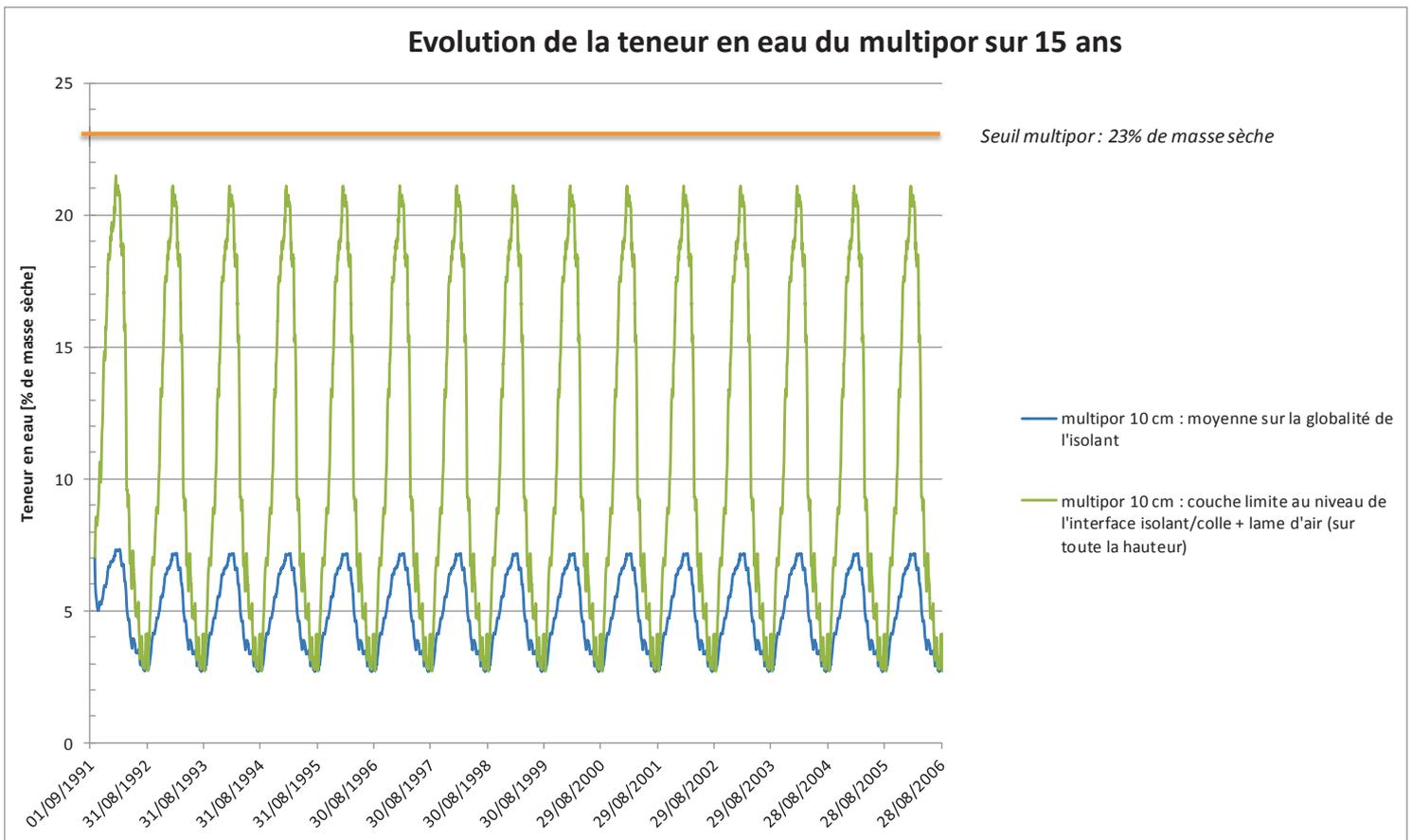
Concernant la couche limite du grès à l'interface avec les lames d'air, elle a une teneur en eau plus élevée que celle à l'interface grès/colle (conformément aux suppositions faites au début de ce paragraphe). Même si ces quantités d'eau restent faibles, **il est préférable d'un point de vue hygrométrique d'étaler la colle de manière uniforme au lieu de fixer l'isolant par des plots de colle.**

2.3.3 TENEUR EN EAU DANS L'ISOLANT

On considère la globalité du Multipor, ainsi que la couche limite à l'interface grès/colle + lame d'air.



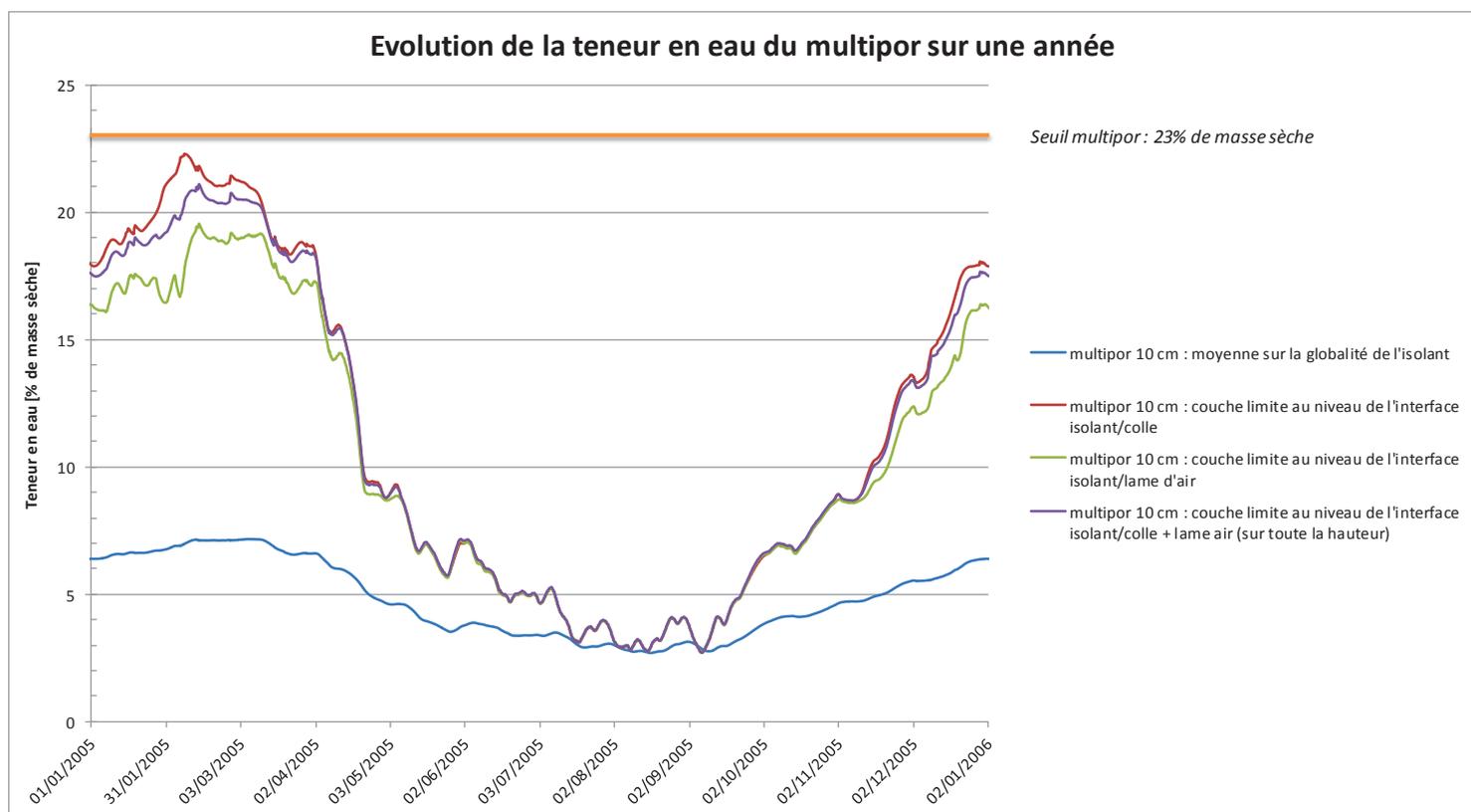
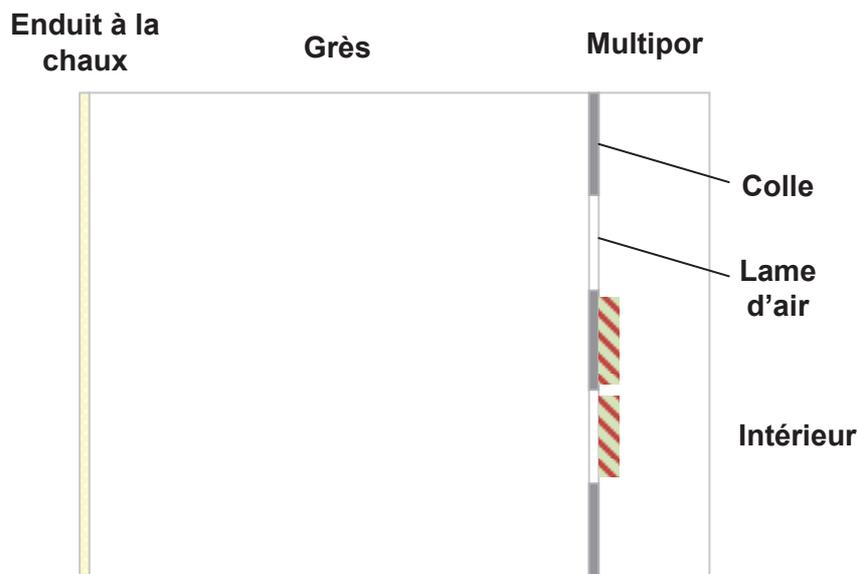
La teneur en eau évolue de la manière suivante :



On constate que les conditions initiales choisies (80% d'humidité relative soit une teneur en eau de 7% de masse sèche du Multipor) sont assez proche de l'équilibre périodique puisque la teneur en eau se stabilise très rapidement.

On s'intéresse en détail à l'évolution de la teneur en eau dans le Multipor sur une année. Et ce pour les zones suivantes :

- Couche limite à l'interface Multipor/colle
- Couche limite à l'interface Multipor/lame d'air
- Couche limite à l'interface Multipor/colle + lame d'air



Même dans les zones avec un risque théorique élevé de condensation (les interfaces avec la colle ou les lames d'air), la teneur en eau du Multipor est inférieure au seuil de 23% de masse sèche.

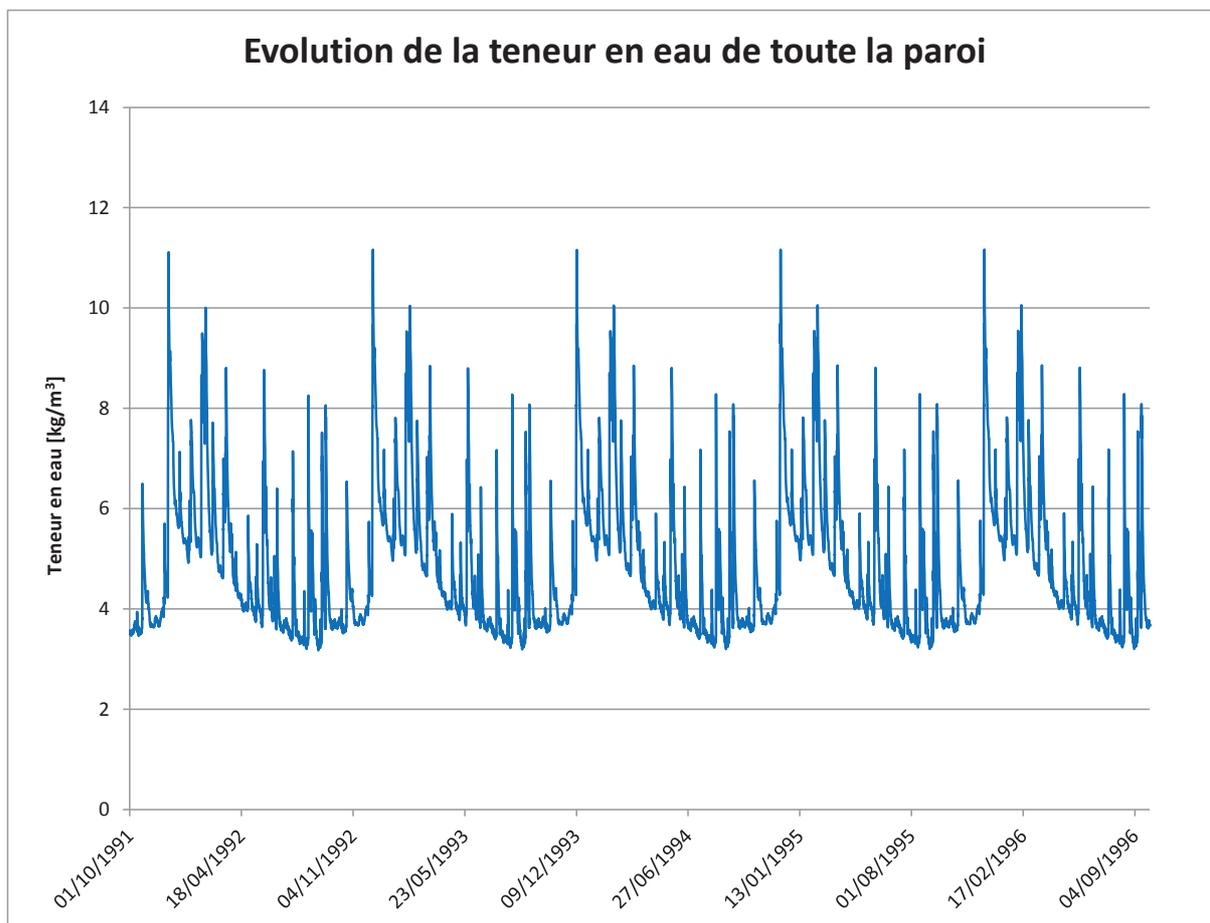
A contrario avec les couches limites du grès, la couche limite à l'interface Multipor/colle contient plus d'eau (en hiver) que celle à l'interface Multipor/air. En effet, en hiver, la vapeur d'eau migre de l'intérieur vers l'extérieur. L'air est plus perméable à la vapeur d'eau que la colle, l'eau y est donc moins « bloquée » à l'interface.

Le Multipor est donc une solution tout à fait pérenne dans le cas de l'isolation par l'intérieur d'un mur en grès.

2.4 RESULTATS PSE

2.4.1 TENEUR EN EAU DANS TOUTE LA PAROI

On a effectué les simulations sur 5 ans, avec 10 cm d'isolation en polystyrène expansé fixé au grès grâce à des plots de colle de 5 mm d'épaisseur (10 cm de colle tous les 20 cm). On obtient ci-dessous l'évolution de la teneur en eau dans toute la paroi, sur 5 ans :



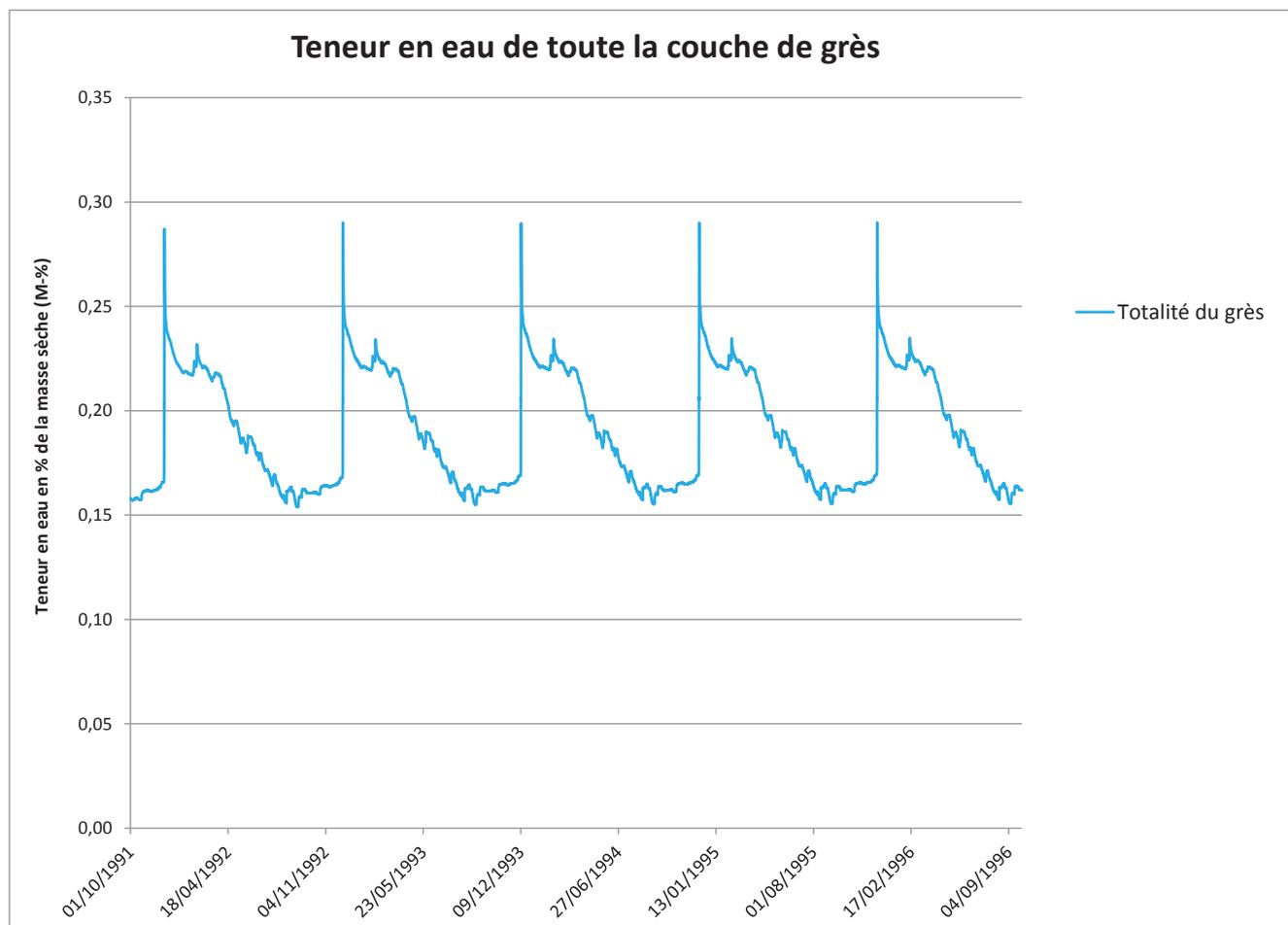
La quantité d'eau dans la paroi reste stable, l'eau ne s'accumule pas d'année en année.

Le polystyrène est un matériau non hygroscopique : il n'a pas la propriété de fixer une certaine quantité de l'humidité contenue dans l'air ou d'eau liquide à son contact. La teneur en eau du polystyrène ne nous aidera en rien pour nos conclusions, ce n'est donc pas un critère déterminant. Nous devons regarder ce qu'il se passe dans le grès.

2.4.2 TENEUR EN EAU DANS LE GRES

2.4.2.1 TENEUR EN EAU DANS LA TOTALITE DU GRES

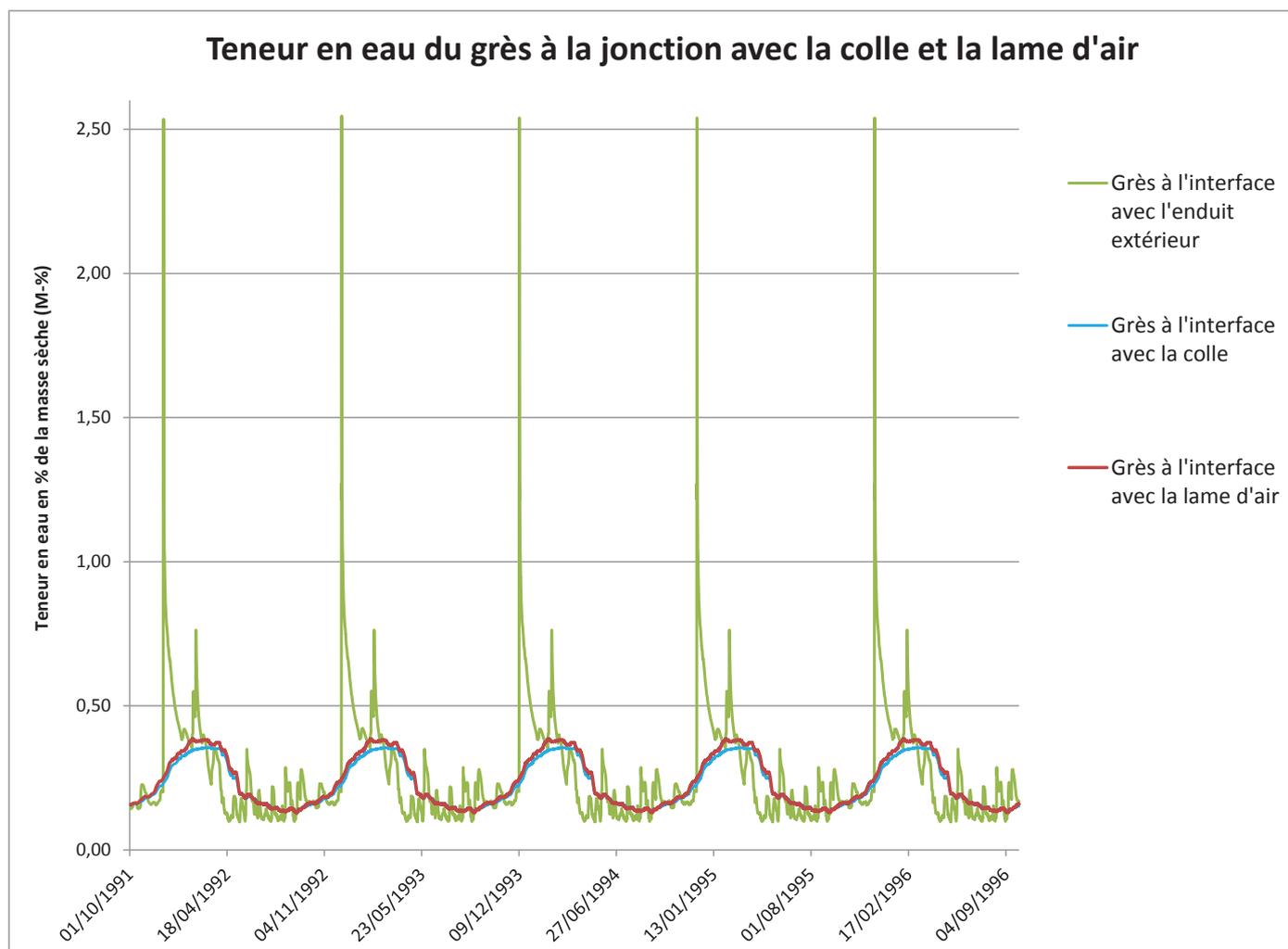
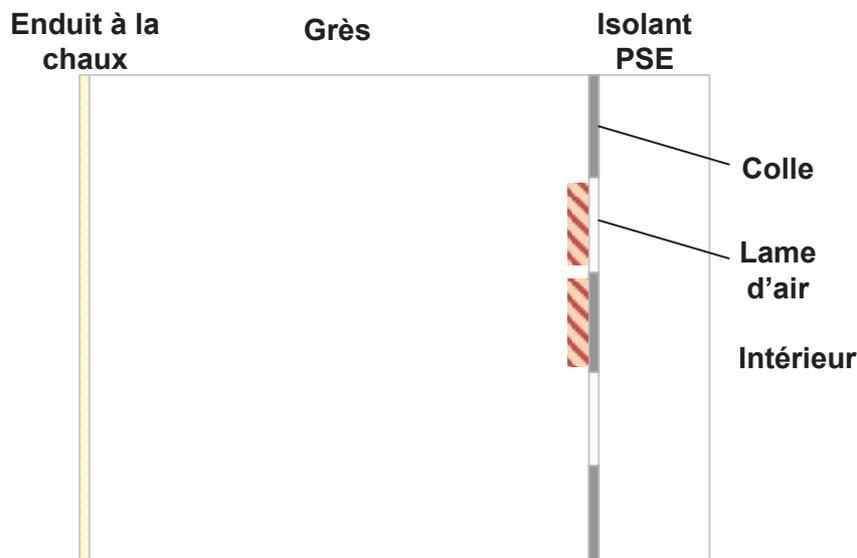
On regarde tout d'abord l'évolution de la quantité d'eau dans toute la couche de grès, comme indiqué en hachuré sur le schéma ci-dessous.



Le comportement de la couche de grès avec PSE en isolation intérieure est très similaire à celui du grès avec Multipor en isolation intérieure. Les quantités d'eau restent faibles et l'eau ne s'accumule pas d'année en année dans le grès.

2.4.2.2 TENEUR EN EAU DANS LA COUCHE LIMITE DE GRES A L'INTERFACE AVEC LA COLLE ET UNE LAME D'AIR

On regarde maintenant ce qu'il se passe d'une part dans la couche limite (2 cm) de grès à l'interface avec la colle et d'autre part dans la couche limite de grès à l'interface avec une lame d'air. Ces deux zones sont hachurées en rouge dans le schéma ci-dessous.



On retrouve les mêmes comportements que dans le cas du Multipor en isolant intérieur :

- La quantité d'eau à l'interface avec la lame d'air est plus importante qu'à l'interface avec la colle. Cela est dû à la conductivité thermique de l'air plus faible que celle

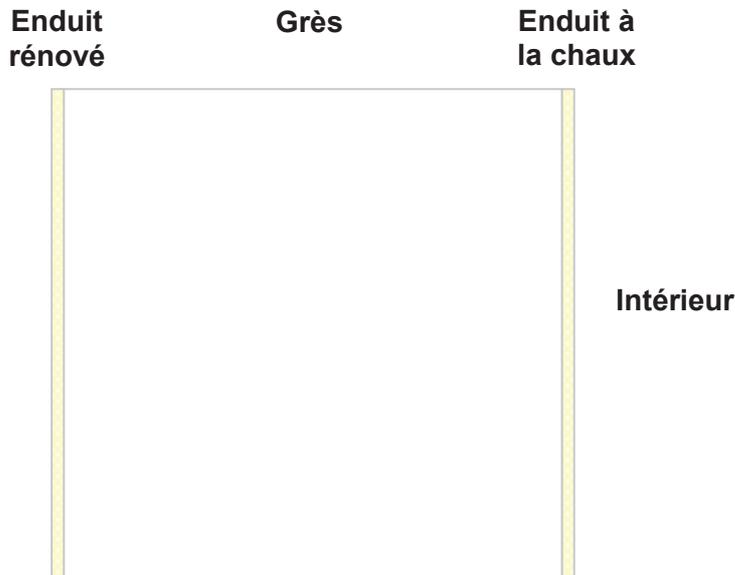
de la colle, combiné à la perméabilité à la vapeur d'eau plus élevée dans l'air que dans la colle.

- La teneur en eau du grès au contact avec l'enduit extérieur connaît des pics importants en hiver. Cependant avec un enduit perméable à la vapeur d'eau, cette couche limite de grès parvient à sécher chaque été de façon significative.

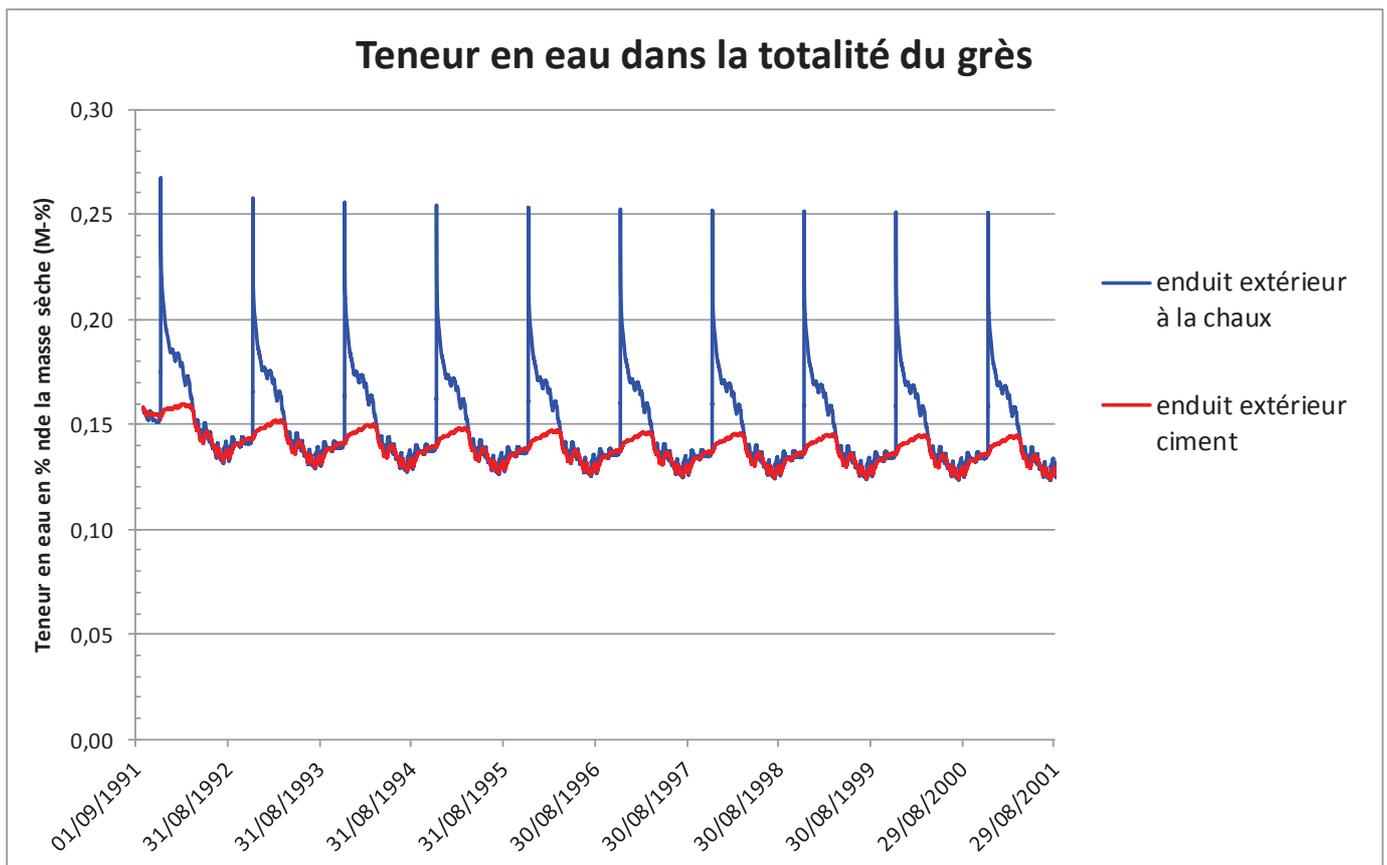
Nos résultats ne nous permettent pas de proscrire le PSE en isolation intérieure. Cependant, le Multipor très hygroscopique, peut absorber une grande quantité d'eau sans que cela mette sa pérennité en danger. Cela est très avantageux dans le cas d'une charge d'eau soudaine du mur (fuite par exemple). Le PSE non hygroscopique ne peut pas absorber d'eau. C'est pourquoi **il nous semble préférable d'employer le Multipor en isolant intérieur plutôt que le PSE.**

2.5 RESULTATS RENOVATION SANS AMELIORATION THERMIQUE

Dans ce paragraphe, nous étudions la rénovation de l'enduit extérieur à la chaux par un enduit à base de ciment.



Nous étudions ce qu'il se passe dans la totalité de la couche de grès.



Tout d'abord, la quantité d'eau dans le grès reste stable d'année en année.

En revanche, la quantité d'eau dans le grès est plus élevée avec un enduit extérieur à la chaux qu'avec un enduit ciment. Le pic rencontré dans le cas de l'enduit extérieur à la chaux est lié aux conditions climatiques extérieures. En effet, l'enduit chaux étant plus perméable que le ciment, il permet à l'eau de pluie d'entrer dans la paroi.

Cependant, il permet aussi à cette eau de sécher pendant l'été, de sorte que la quantité d'eau dans le grès en été est la même quel que soit le type d'enduit extérieur.

Les simulations WUFI ne prennent pas les remontées capillaires en compte. Or cet aspect est particulièrement important dans l'étude de l'impact de la rénovation de l'enduit extérieur. En effet dans le cas d'une remontée d'eau dans le mur, un enduit extérieur à la chaux permettra l'évacuation de cette eau vers l'extérieur, un enduit ciment le permettra moins. La non-prise en compte de ce phénomène donne à la pluie un rôle trop important dans nos simulations, ce qui fausse les conclusions.

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.

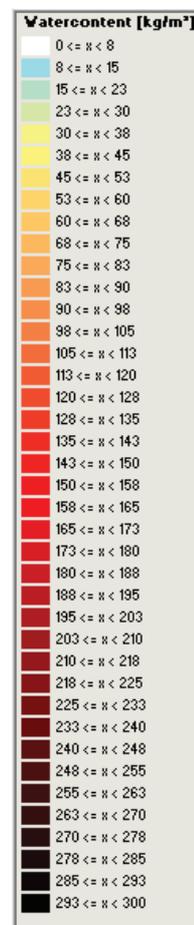
Les simulations ont été faites sur 3 années. Pour toutes les simulations, l'équilibre périodique a été atteint. Les résultats ont donc été pris en janvier et août de la 3^{ème} année. Tous les résultats sont disponibles en **Annexe**.

Pour toutes les simulations (que l'on peut retrouver en annexe), on observe la répartition de la teneur en eau (en kg/m^3) 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.

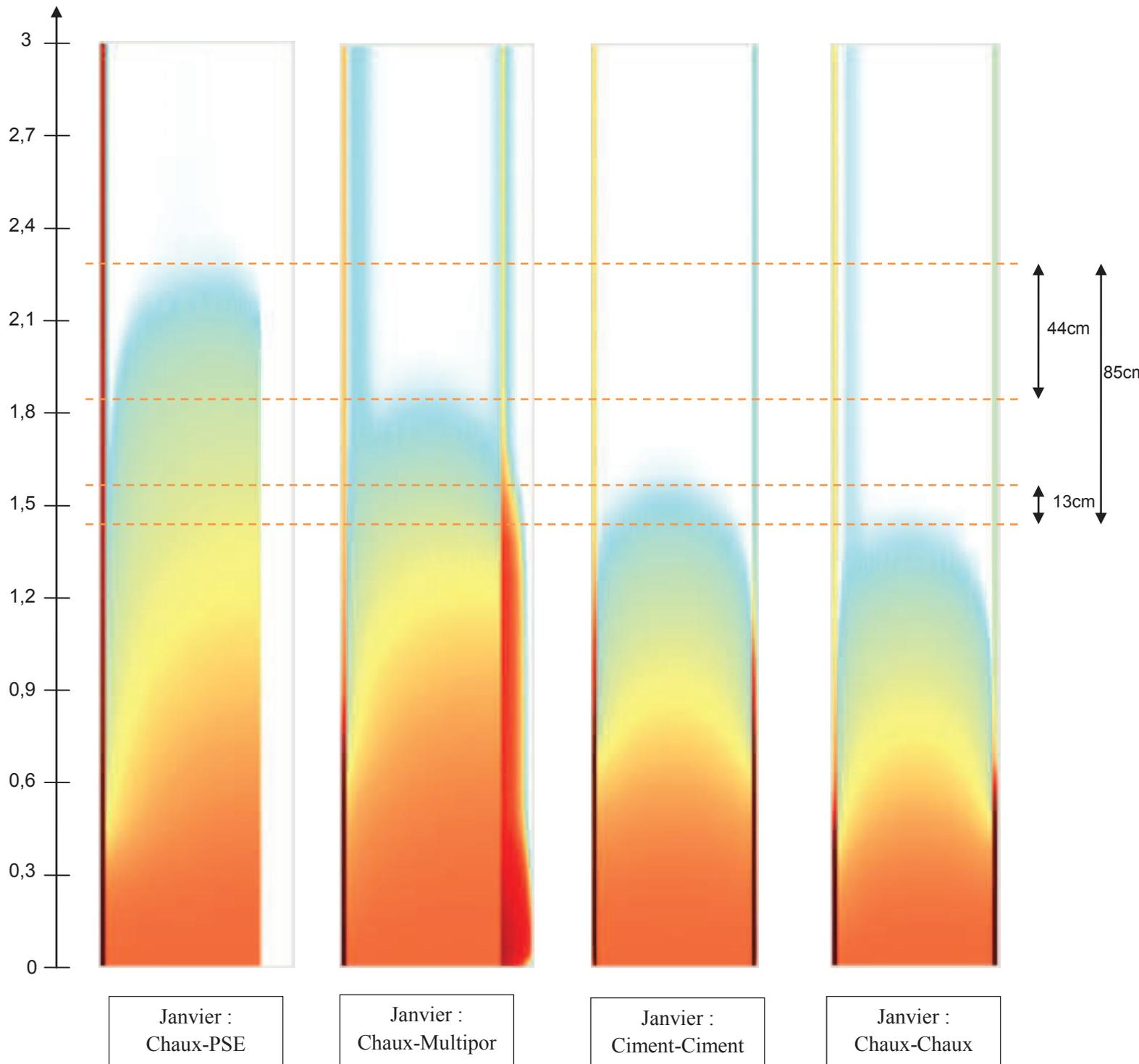
Pour ces raisons, on ne pourra que comparer entre elles le comportement des différentes solutions.

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]

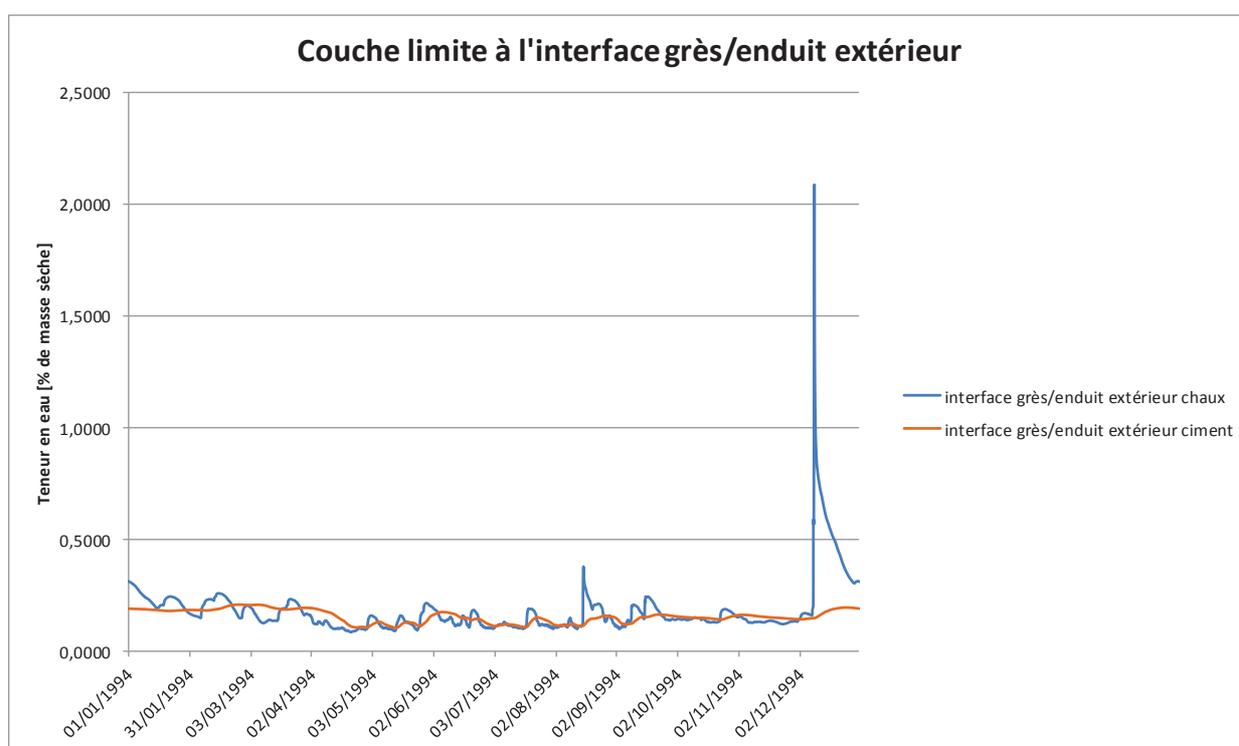


Tout d'abord, on observe que la hauteur du front d'eau est plus basse en hiver qu'en été (les résultats en août sont disponibles en **Annexe**). Cela est dû au flux de vapeur d'eau qui va de l'intérieur vers l'extérieur en hiver et plutôt de l'extérieur vers l'intérieur en été.

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

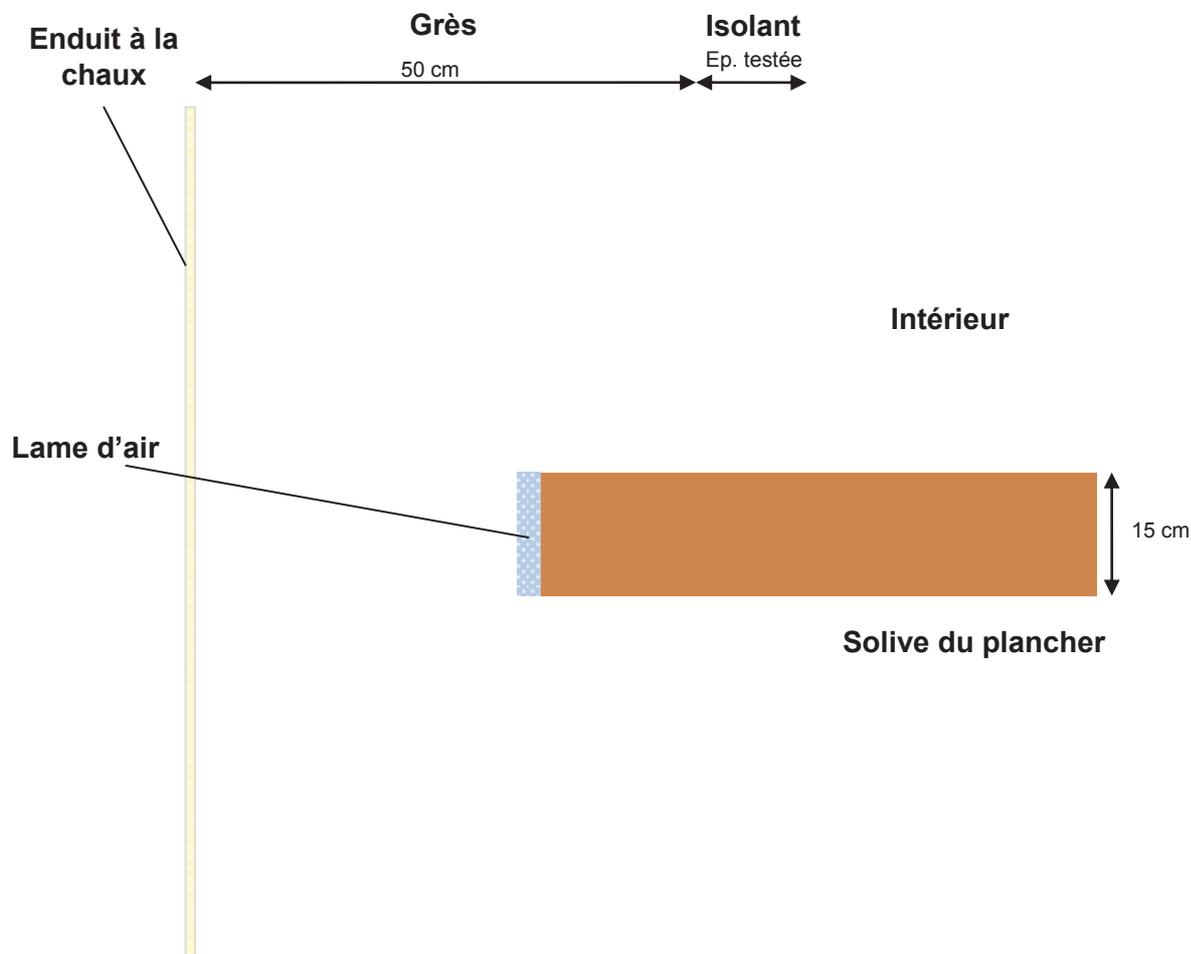
Pour les isolants retenus grâce à l'étude de la partie précédente, nous étudions les épaisseurs que l'on pourra mettre en œuvre en fonction du comportement hygrométrique.

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

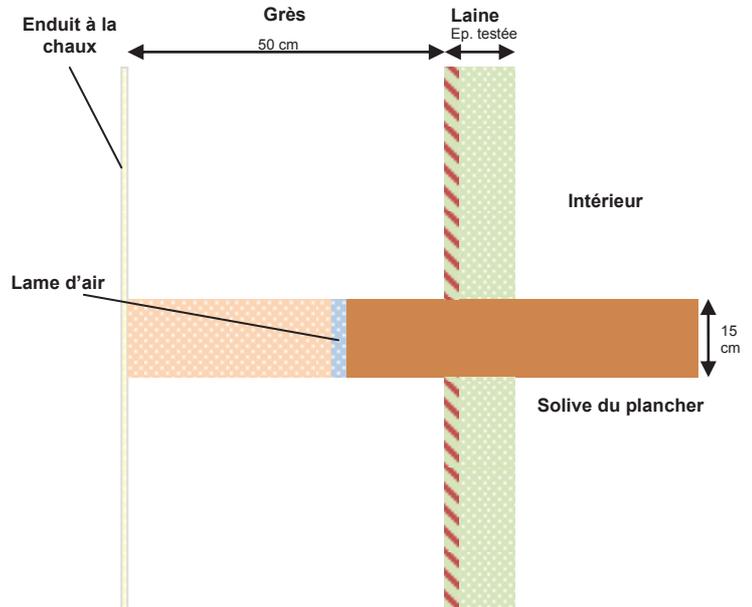
Nous avons testé avec l'isolant laine les épaisseurs suivantes : 6, 8, 10, 15 et 20 cm (sur 10 années de simulation). Et ce avec un pare-vapeur hygrovariable puisqu'il donnait les meilleurs résultats dans la partie précédente.

3.2.1 INTERFACE ISOLANT / GRES

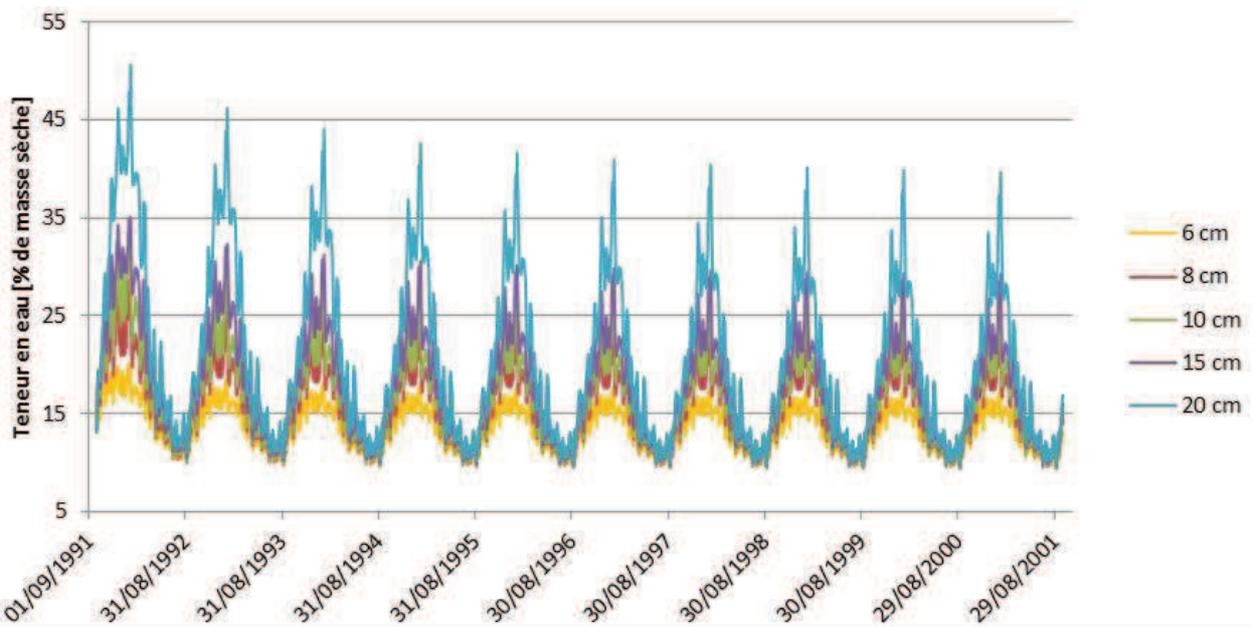
La zone la plus exposée à la condensation est l'interface grès/isolant. Et c'est dans cette zone que la pérennité des matériaux est la plus mise en danger suivant les différentes épaisseurs d'isolation.

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.



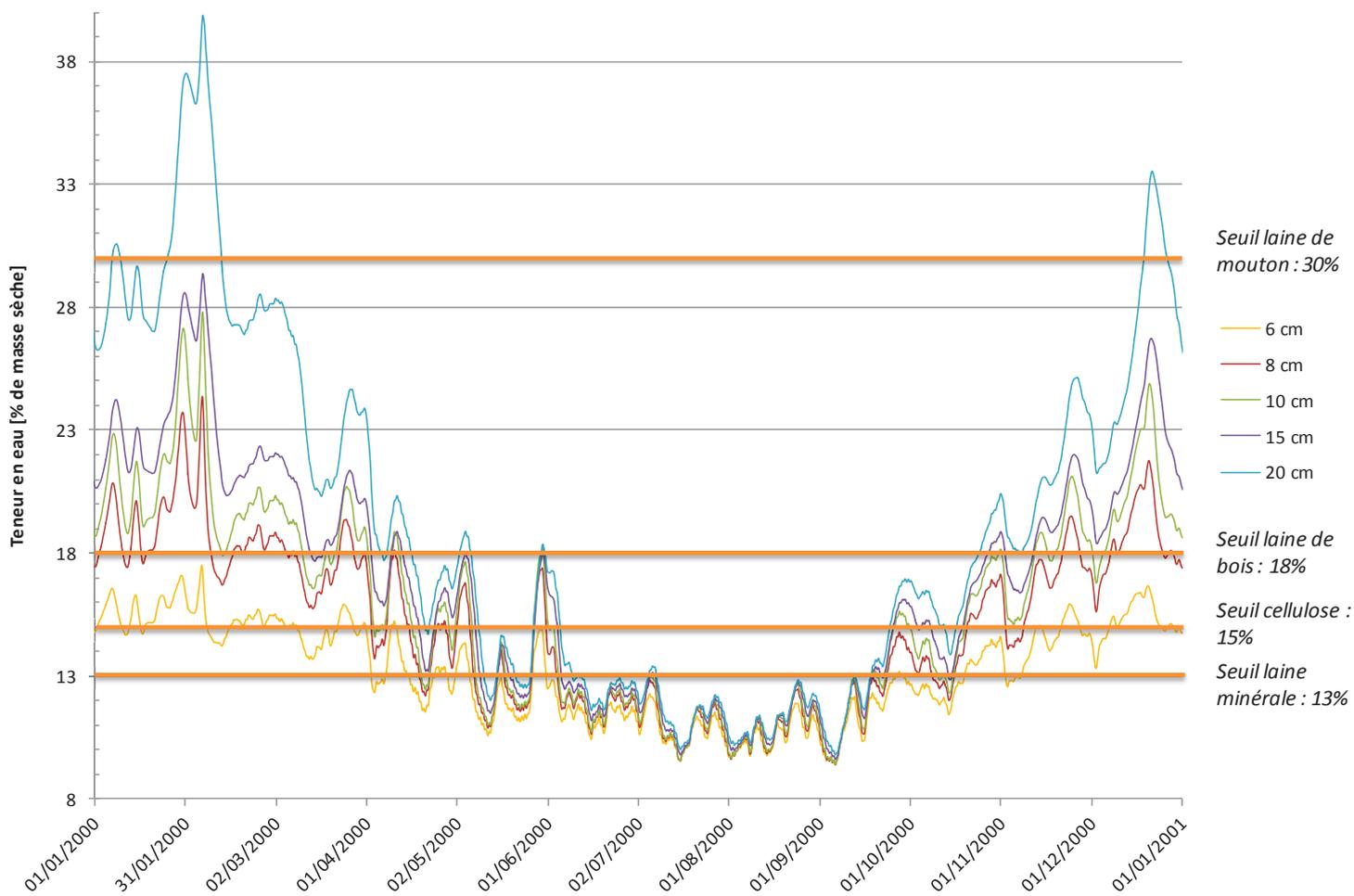
couche limite de l'isolant laine à l'interface avec le grès - sur 10 ans



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.

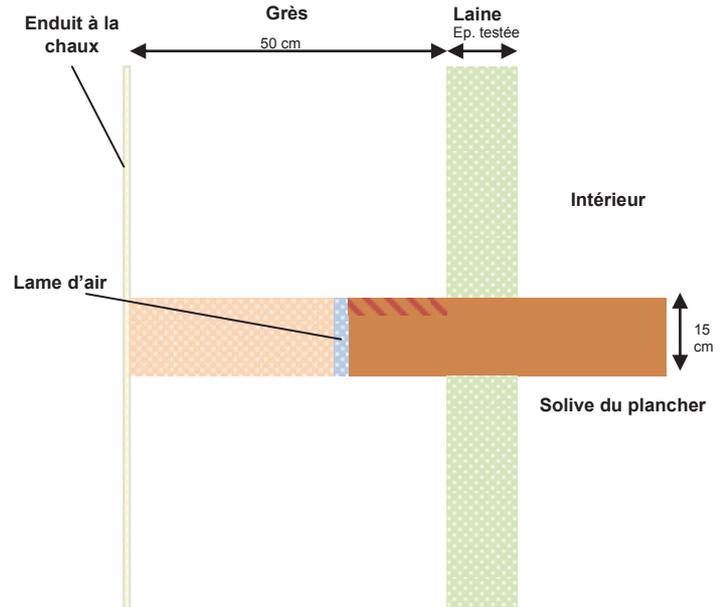
3.2.2 SOLIVE

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.

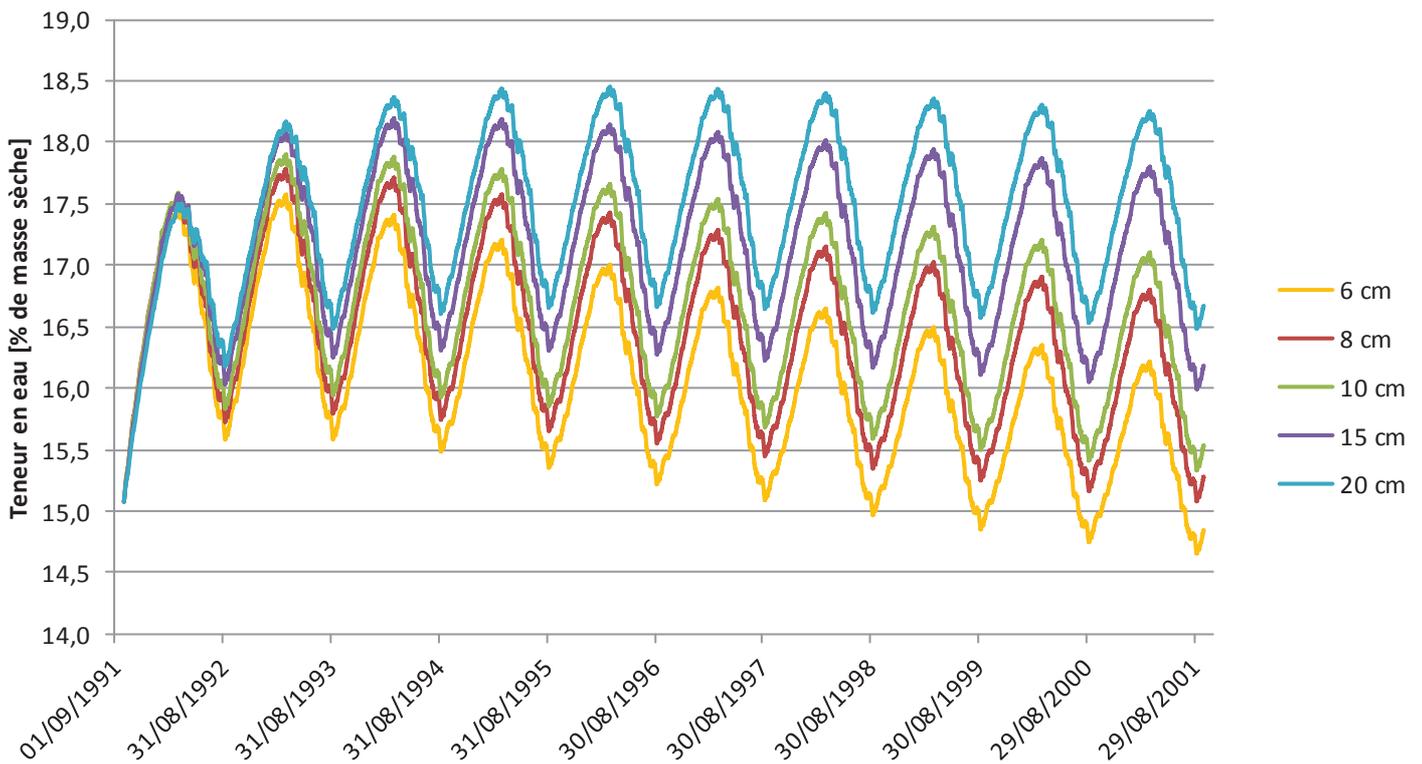
Une autre zone où les risques peuvent être élevés est la jonction entre le mur et la solive encastrée dans le mur, hachurée en rouge sur le schéma ci-contre.

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

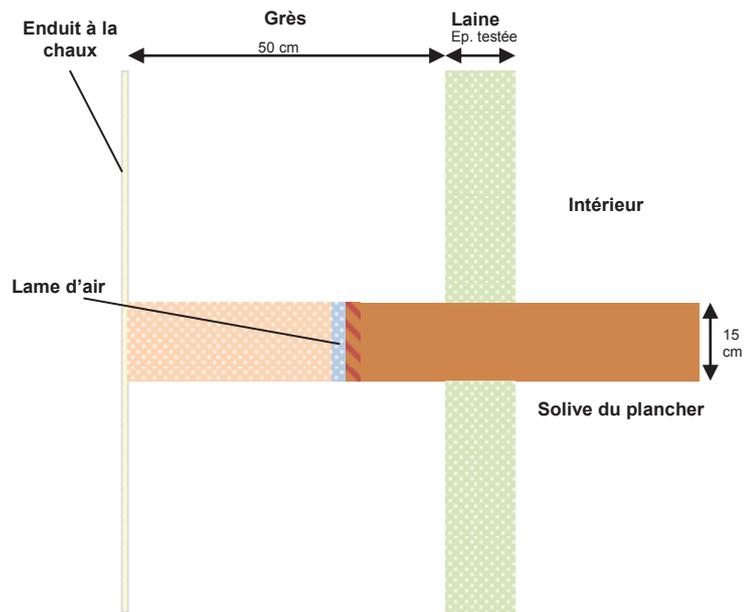


On constate tout d'abord que le seuil des 20% de masse sèche n'est jamais atteint (le maximum est 18,5%, atteint par une isolation de 20 cm d'épaisseur). De plus, la teneur en eau diminue après quelques années de légère augmentation (après plus longtemps pour une plus grande épaisseur). Ainsi avec une 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.

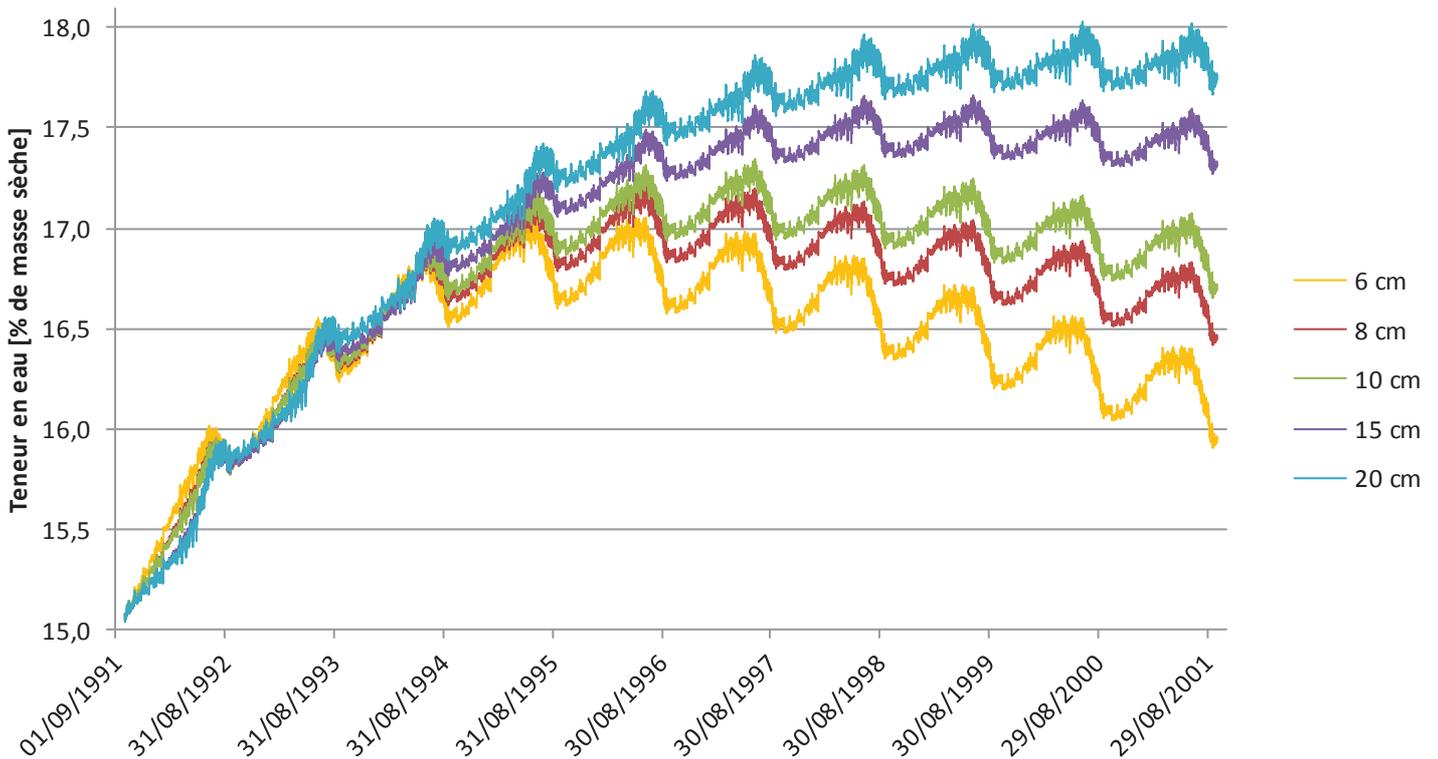
Bien que la teneur en eau dans la solive ne dépasse pas le seuil fixé, il est préférable d'avoir une marge suffisante permettant d'absorber un trop plein d'eau provenant d'une condensation entre l'isolant et le grès, et qui coulerait par gravité et atteindrait la solive. Le logiciel WUFI ne nous permet 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.

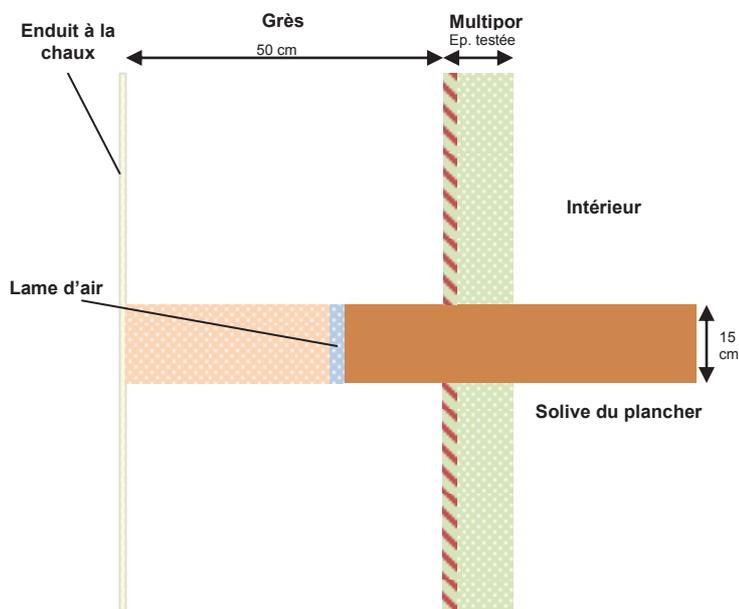
3.3 RESULTATS MULTIPOR

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).

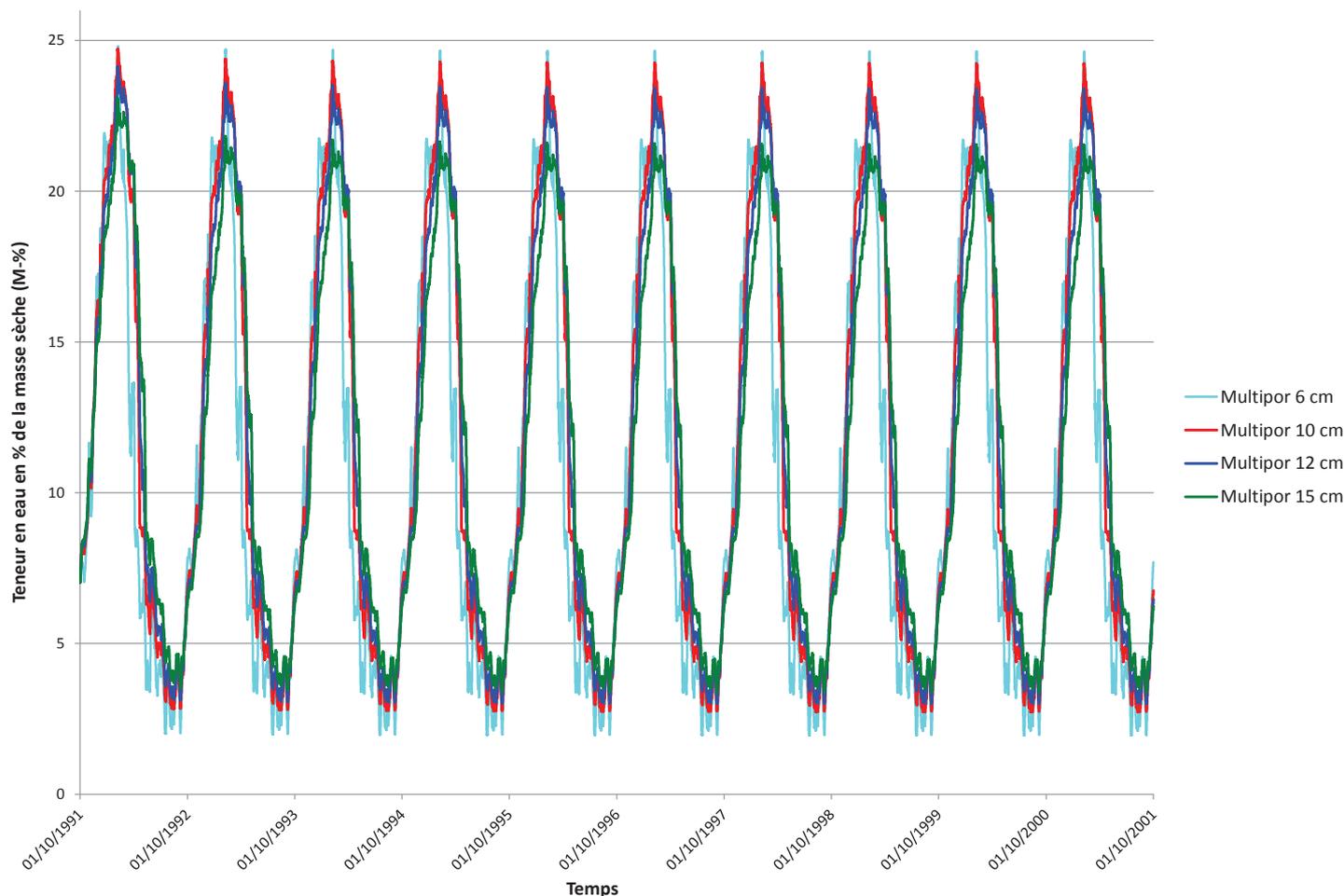
3.3.1 INTERFACE ISOLANT / GRES

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.

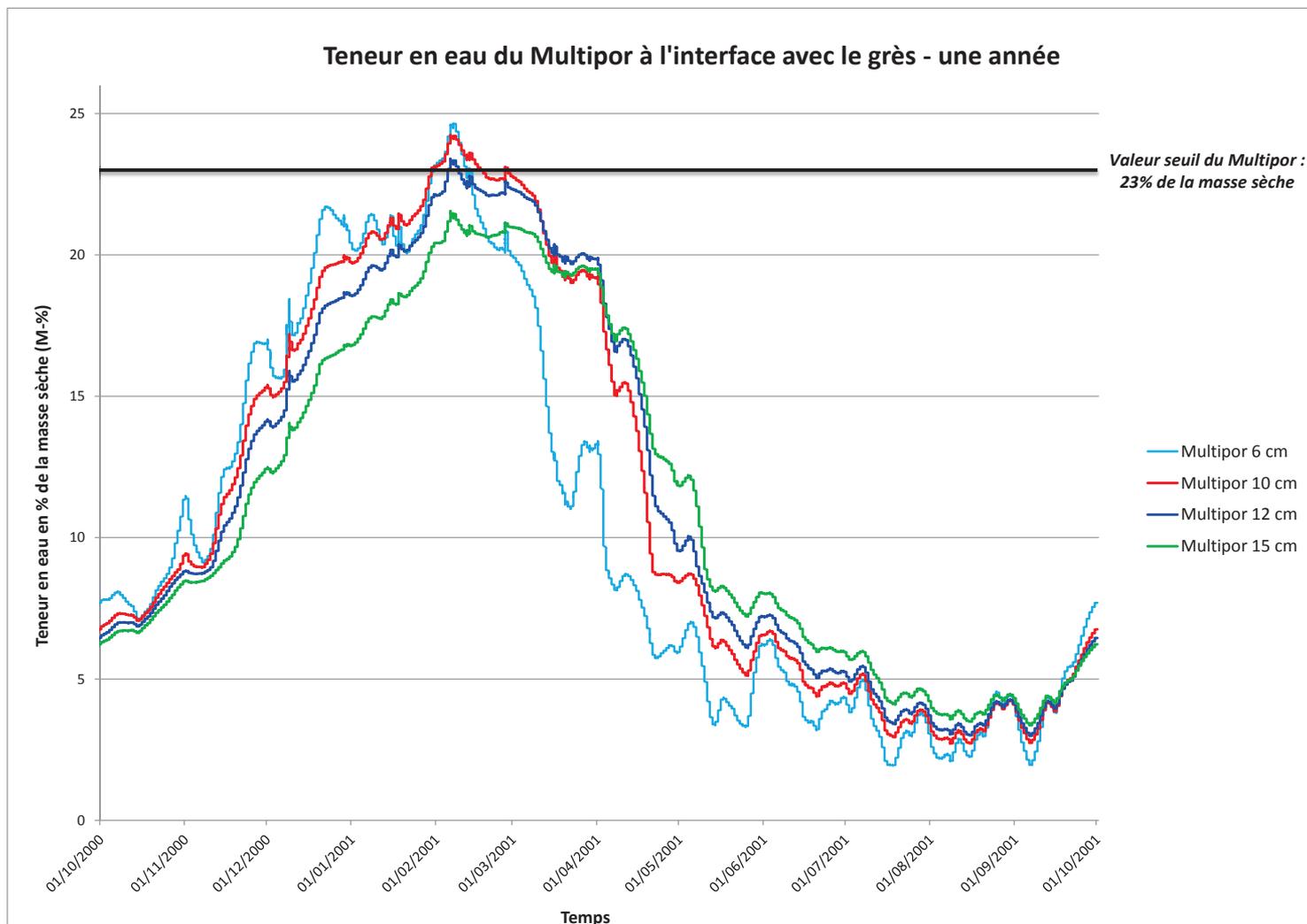


Teneur en eau du Multipor à l'interface avec le grès



- 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.

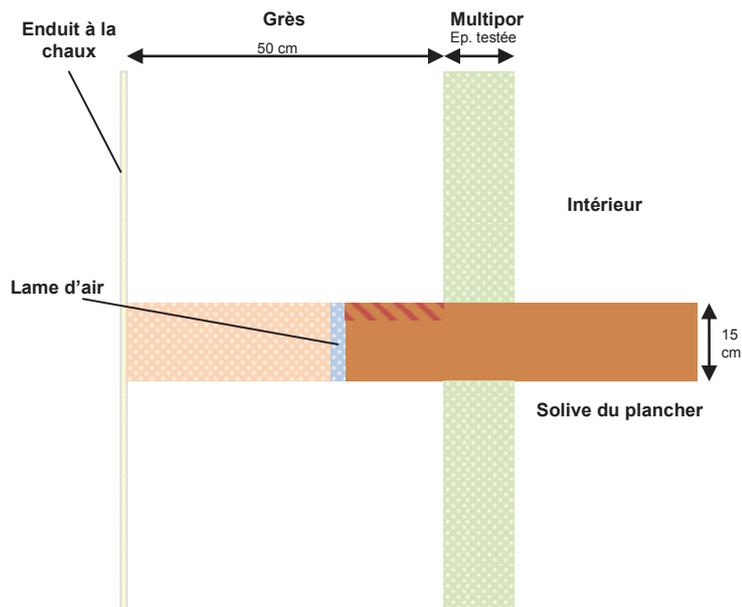


- De façon générale, moins la couche d'isolant est épaisse, moins on connaîtra cet effet de paroi froide du mur de grès à l'interface avec l'isolant. Cela diminue les risques de condensation. Mais ce n'est pas l'unique phénomène qui a une influence sur ces risques.
Un autre effet joue un rôle : plus 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.

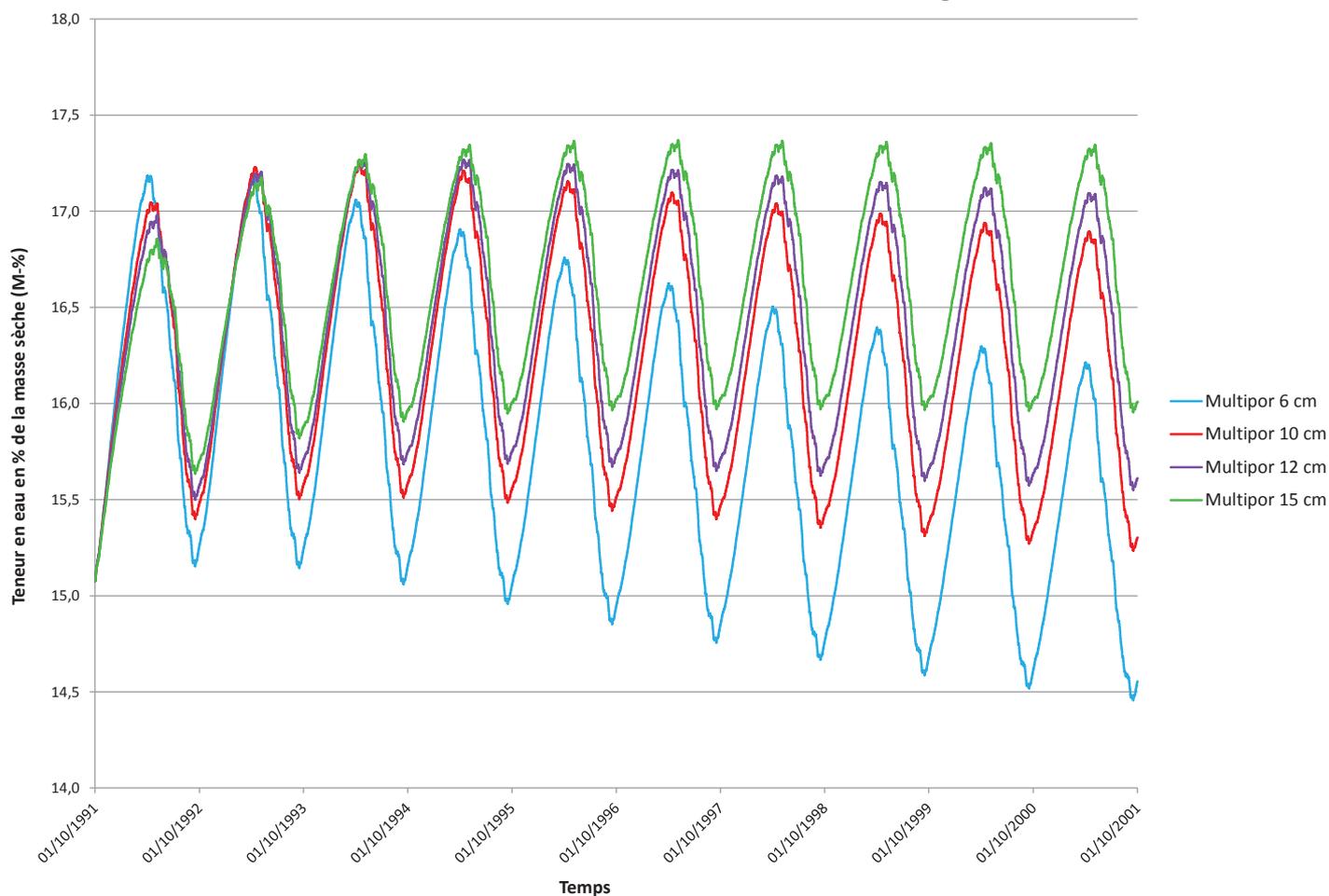
3.3.2 SOLIVE

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.



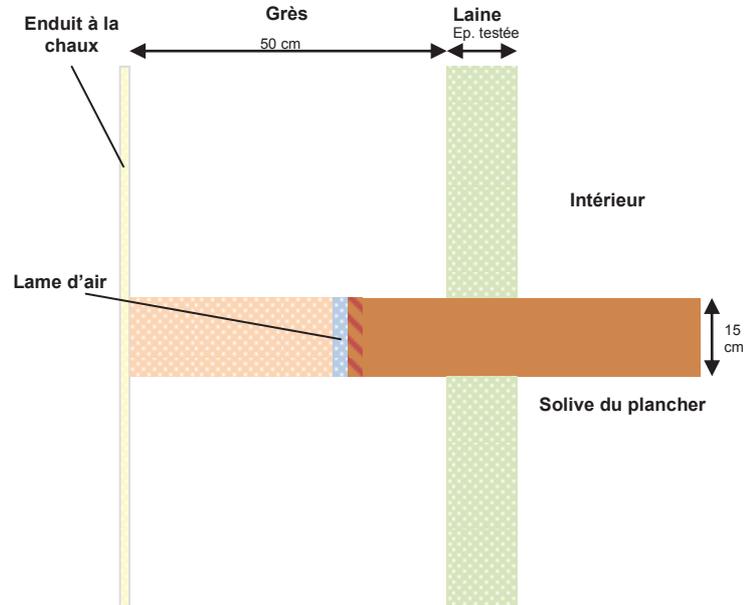
Teneur en eau de la solive à l'interface avec le grès



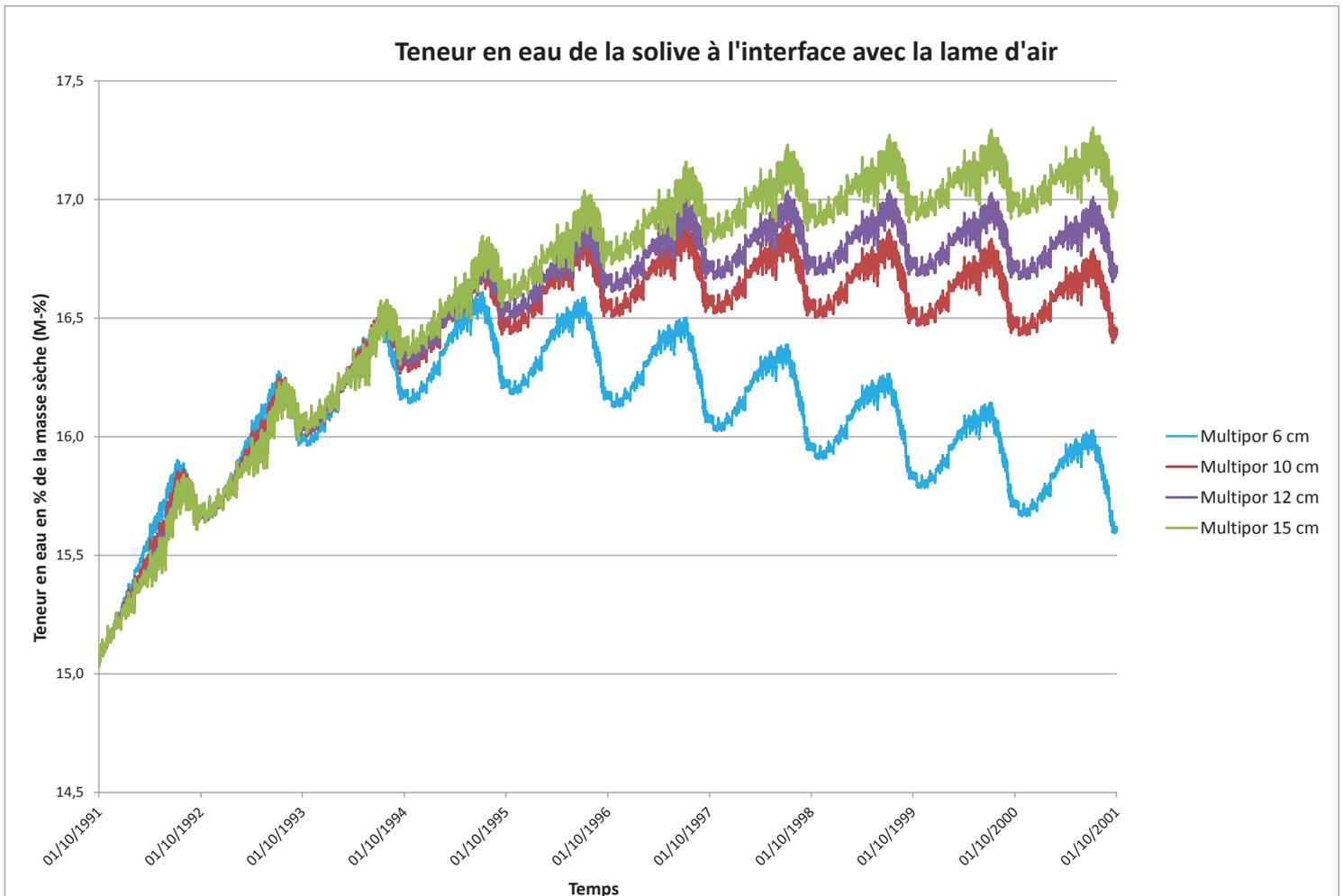
- En premier lieu, la teneur en eau n'atteint pas la limite des 20% de masse sèche, quelle que soit l'épaisseur de Multipor mise en œuvre. Il n'y a apparemment pas de risque de détérioration de la solive dans la couche limite à l'interface avec le mur en grès.
- Pour 6 cm d'isolation intérieure, la teneur 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



Sycoparc

Guide de l'éco-rénovation

- 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.