

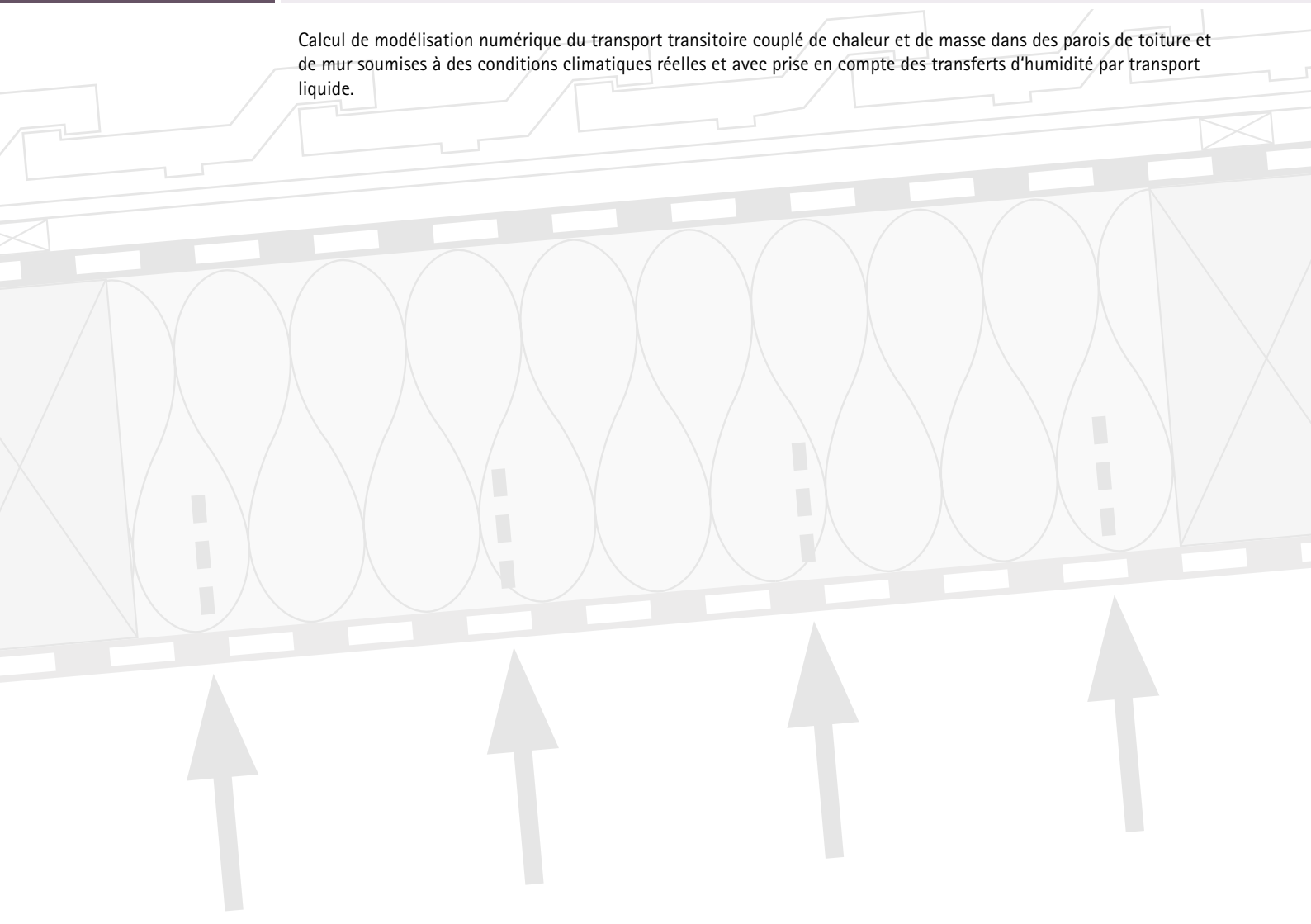
## Etude de rénovation

Solutions d'étanchéité à l'air dans le cas de rénovations thermiques de toits

Emplacement fonctionnel de l'étanchéité à l'air dans les constructions

Pose en créneau (par au-dessus et par en dessous) : comparaison du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment des frein-vapeurs à valeur  $s_d$  variable

Calcul de modélisation numérique du transport transitoire couplé de chaleur et de masse dans des parois de toiture et de mur soumises à des conditions climatiques réelles et avec prise en compte des transferts d'humidité par transport liquide.



## Chère lectrice, cher lecteur,

*Pour pouvoir concevoir et réaliser des structures d'isolation thermique en toute sécurité, il faut avoir des connaissances générales en physique du bâtiment. Mais parfois, les liens de cause à effet dans ce domaine semblent complexes et difficiles à comprendre. C'est pourquoi nous avons assorti le chapitre Physique du bâtiment ainsi que les deux études qu'il contient, d'explications et d'illustrations simples.*

*L'étude sur le calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment analyse et évalue différentes variantes de construction, sur la base des recommandations actuelles du « Fraunhofer Institut für Bauphysik », et indique la voie à suivre pour une conception et une réalisation qui se fondent sur des principes solides, sont adaptées à la pratique et offrent une fiabilité durable, avec des marges de sécurité maximales. Nous y avons sciemment pris en compte des éléments de construction avec de grosses épaisseurs d'isolation.*

*Dans l'étude sur la rénovation, nous examinons la sécurité de différentes solutions et nous vous apportons, dans une liste en 10 points, des recommandations claires et précises sur la réalisation de constructions durablement fiables. Le savoir-faire de pro clima dépasse largement le contenu du chapitre Physique du bâtiment et même de ce manuel de planification. Notre équipe d'ingénieurs spécialisée dans la construction en bois et le bâtiment échange en permanence des connaissances et expériences avec des partenaires dans les associations professionnelles, la recherche et l'enseignement. En collaboration avec des praticiens dans le domaine de la conception et de la mise en œuvre, ils élaborent des solutions intégrées novatrices pour des bâtiments qui allient au mieux durabilité, prévention des dégâts constructifs et santé de l'habitat. La connaissance est la clé du succès. Nous souhaitons partager notre connaissance avec vous.*

*Dans cet esprit, nous espérons que vous aurez autant de plaisir que nous à faire de nouvelles découvertes.*



**Lothar Moll**  
*Ingénieur diplômé en technique du bois* Gérant, Recherche et développement, production, assurance qualité, exportations



**Michael Förster**  
*Ingénieur diplômé en bâtiment*  
Diplômé en gestion d'entreprise  
Responsable des techniques d'application, Recherche et développement, assurance qualité, séminaires

# Solutions de rénovation avec le plus grand potentiel de sécurité

Introduction	4
<b>A. Emplacement fonctionnel de l'étanchéité à l'air dans les constructions</b>	<b>4</b>
Règle d'or 1/3 - 2/3	4
Sources d'apport d'humidité	5
Modèles de calcul pour les processus de diffusion	5
Calcul selon EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3 [2]	5
a) Méthode de Glaser	
b) Méthode de Glaser avec données climatiques de Jenisch	5
Calcul selon DIN EN 15026 [4]	6
Modèles de calcul pour l'apport d'humidité par convection	6
Accumulation de la quantité d'humidité suite à la convection interne	6
Couches de glaces = parevapeurs	6
Grandeur $s_d$ et grandeur $\mu$	6
Imprécision des mesures dans le cas de matériaux hautement perméables à la vapeur	7
Evaluation des influences de l'humidité - Définition du critère de prévention des dégâts au bâtiment	7
Constructions étudiées	8
Cas n°1 : 35 mm de fibre de bois	9
Cas n°2 : solution 1:1	9
Cas n°3 : solution 2 : 1	9
Cas n°4 : pose en créneau (sub et top)	9
Présentation des résultats	9
Objectif	9
Calculs : 35 mm de fibre de bois en guise d'isolation sur chevrons, sans étanchéité à l'air à l'intérieur (aucun parement intérieur)	10
35 mm de fibre de bois en guise d'isolation sur chevrons, avec une étanchéité à l'air à l'intérieur parfaite (réalisée avec des plaques de plâtre à parement de carton)	10
Solution 1 : 1, sans étanchéité à l'air à l'intérieur	11
Solution 2 : 1, sans étanchéité à l'air à l'intérieur	11
Membranes d'étanchéité à l'air avec couche fonctionnelle monolithique	12
Pose en créneau (sub et top), sans étanchéité à l'air à l'intérieur	12
Conclusion - comparaison entre l'étanchéité à l'air à l'extérieur et l'ensemble étanchéité à l'air + frein-vapeur à l'intérieur	13
10 points garantissant une construction durablement fiable	13
<b>B. Pose en créneau - comparaison du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment des frein-vapeurs à valeur <math>s_d</math> variable</b>	<b>14</b>
Etude comparative des réserves de rediffusion	14
Valeurs $W_{DD}$ (perméabilité de vapeur d'eau) pour différentes valeurs $s_d$	14
Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment	15
Constructions étudiées	15
Cas n°1 : sous-toiture ouverte à la diffusion	15
Cas n°2 : panneau de sous-toiture en fibre de bois de 60 mm	15
Cas n°3 : panneau de sous-toiture en polyuréthane de 35 mm	15
Discussion des résultats	15
Conclusion - comparaison des systèmes frein-vapeurs et d'étanchéité à l'air posés en créneau	16
Objectif de la construction	17
8 points garantissant une construction et mise en oeuvre durablement fiables	17

## Bibliographie

- [1] DIN 4108-7 : « Isolation thermique et économie d'énergie dans les bâtiments - Partie 7 : Etanchéité à l'air de bâtiments, exigences, recommandations et exemples de conception et d'exécution », Beuth-Verlag, Berlin, 01/2011
- [2] DIN 4108-3 : « Isolation thermique et économie d'énergie dans les bâtiments - Partie 3 : Protection contre l'humidité en fonction du climat, exigences, méthodes de calcul et indications concernant la conception et l'exécution », Beuth-Verlag, Berlin, 07/2001
- [3] Séminaire consacré aux moisissures dans l'habitat : « Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht - Beurteilung durch aw-Werte oder Isoplethensysteme? » [Les moisissures du point de vue de la physique du bâtiment - évaluation par les valeurs aw ou les systèmes à isopléthène], Klaus Sedlbauer, Martin Krus, Fraunhofer IBP, Holzkirchen, 26.06.2002
- [4] DIN EN 15026 : « Comportement thermique et hygrothermique de parties et d'éléments de construction - évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique », Beuth-Verlag, Berlin, 07/2007
- [5] WUFI Pro 4.2 : « Calcul du comportement hygrothermique unidimensionnel de constructions bâties dans des conditions réelles », Fraunhofer IBP, Holzkirchen, 08/2008
- [6] WUFI 2D 3.2 : « Calcul du comportement hygrothermique bidimensionnel de constructions bâties dans des conditions réelles », Fraunhofer IBP, Holzkirchen
- [7] Delphin 5 : « Logiciel de simulation numérique pour le transport combiné de chaleur, d'humidité et de liquides », Institut für Bauklimatik, Fakultät Architektur, TU Dresden, Dresde
- [8] DIN EN ISO 12572 : « Comportement thermique et hygrotechnique de matériaux et produits de construction - détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau », Beuth-Verlag, Berlin, 09/2001
- [9] Fiche technique WTA 6-2-01/D : « Simulation wärme-und feuchtetechnischer Prozesse » [Simulation de processus thermiques et hygrotechniques], Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA-Referat 6 Physikalisch-Chemische Grundlagen, München, 05/2002
- [10] Etude : « Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de structures d'isolation thermique dans les constructions en bois et en acier », Moll bauökologische Produkte GmbH, 08/2006
- [11] Deutsche Bauzeitung; n° 12/89, page 1639 et suiv.

## Étanchéité à l'air de toitures existantes : quelles améliorations existe-t-il ?

### Introduction

Il est bien connu que l'étanchéité à l'air constitue la condition requise pour le bon fonctionnement d'une isolation thermique. Les constructions étanches à l'air garantissent un climat intérieur confortable et participent à la prévention des dégâts au bâtiment dus à l'accumulation d'humidité par condensation. Les flux d'humidité par convection peuvent notamment apporter en très peu de temps de grandes quantités d'humidité dans l'isolation et compromettre ainsi le bon fonctionnement à la fois de la structure porteuse et de l'isolant. Il n'est pas rare que cela entraîne la formation de moisissures et un fonctionnement altéré de la paroi.

Dans les toitures existantes, il convient de s'interroger sur les moyens permettant d'améliorer l'étanchéité à l'air qui y fait généralement défaut, lors de leurs rénovations énergétiques.

À cet égard, il faut d'abord examiner les différentes possibilités selon l'emplacement de l'intégration d'une étanchéité à l'air à la structure.

Dans le projet de la norme SIA 180, DIN 4108-7 [1], le point 5 «Conception et exécution» stipule qu'en règle générale, la couche d'étanchéité à l'air doit être disposée du côté intérieur de l'isolation thermique et, si possible, aussi du côté intérieur de la structure porteuse. Cette recommandation de la norme présuppose l'état idéal d'un projet de construction neuve. Or, lors de la rénovation d'un toit, cet état n'est réalisable qu'avec de grands moyens et occasionne beaucoup de désagréments aux occupants de l'habitation à rénover. En conséquence, conformément à la norme, l'étanchéité à l'air d'un bâtiment peut être réalisée dans toute la hauteur de la toiture.

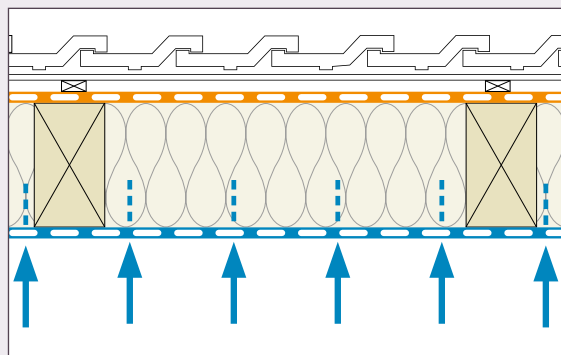
La formation de condensation dans la paroi doit être considérée, selon les

exigences des normes EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3 [2], afin de placer correctement la couche d'étanchéité à l'air. Si la couche d'étanchéité à l'air disposée du côté intérieur possède une résistance à la diffusion trop faible (valeur  $s_d$ ), la quantité d'humidité qui pénètre dans la paroi risque, d'être trop importante et de se condenser (selon la composition de la paroi multicouche). S'il y a côté extérieur une couche d'étanchéité à l'air avec une capacité pare-vapeur trop grande, l'humidité risque alors de s'accumuler à l'intérieur de la paroi. L'objectif de cette étude est d'examiner et d'évaluer les différentes variantes et de formuler des recommandations pour des constructions durablement fiables qui disposent d'un potentiel maximal de prévention des dégâts au bâtiment. Lors de la rénovation dans un bâtiment existant, les structures rapportées tolérantes aux erreurs sont particulièrement importantes.

## A. Emplacement fonctionnel de l'étanchéité à l'air dans les constructions

Les processus de diffusion dans la construction peuvent faire l'objet d'une évaluation fiable

### 1. Effets de l'humidité sur une structure isolante en hiver



La quantité d'humidité qui pénètre dans la structure à travers une couche frein-vapeur et d'étanchéité à l'air avec une valeur  $s_d$  de 3 m est de seulement 5g d'eau par mètre carré par jour.

### Règle d'or 1/3 - 2/3

Les normes EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3 [2] font référence à la règle dite des 20%. C'est-à-dire que sans preuve calculatoire, il est possible de placer 20% de la résistance thermique totale côté chaud de l'élément qui freine la diffusion (en cas de conductibilité thermique identique au sein de la structure, ce pourcentage correspond à un cinquième de l'épaisseur d'isolation thermique totale). Si cette prescription est dépassée, il faut apporter une preuve calculatoire.

Cela s'explique par le fait qu'en tenant compte des conditions climatiques normatives dans le cas de constructions dotées d'isolants thermiques de même conductibilité thermique, la température passe sous celle du point de rosée (9,2 °C) après environ un tiers de l'épaisseur d'isolation totale, vu de l'intérieur. Si l'écran d'étanchéité à l'air se situe derrière le point de rosée, il y a risque de condensation dans une proportion inconnue. Les

taux d'humidité critiques peuvent déjà être atteints à partir d'une humidité relative de l'air de plus de 80%. A partir de ce niveau d'humidité, les conditions nécessaires à la prolifération de presque toutes les moisissures sont remplies, à une température entre 0 °C et 50 °C [3]. Par ailleurs, l'accumulation de condensat sur des membranes d'étanchéité à l'air placées dans la zone de gel d'une construction (écran de sous-toiture par exemple), risque d'entraîner la formation d'une couche de glace. Celle-ci empêche toute forme de transport d'humidité à travers la couche d'étanchéité à l'air (par diffusion ou échange gazeux à travers les pores par exemple), puisque la glace est pratiquement imperméable à la vapeur. Cela peut entraîner l'accumulation de quantités d'humidité supplémentaires, tout aussi néfastes pour l'élément de construction.

## Sources d'apport d'humidité

On distingue deux causes fondamentales d'apport d'humidité dans des structures isolantes :

- l'apport par diffusion,
- l'apport par convection.

Les transports d'humidité résultant de processus de diffusion peuvent être calculés à l'aide de données climatiques statistiques globales (selon EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3 [2]) ou sous forme de calcul dynamique et proche de la réalité des transports d'humidité à l'aide de données de référence réelles sur le climat et les matériaux de construction selon DIN EN 15026 [4].

Les transports d'humidité par convection ne sont pas calculables et occasionnent bien souvent une quantité d'humidité dans la construction qui peut être plusieurs centaines de fois supérieure à celle due à la diffusion.

## Modèles de calcul pour les processus de diffusion

Pour déterminer les transports d'humidité par diffusion au sein de la construction, il existe différents modèles de calcul avec une précision variable.

Dans la norme DIN 4108-3 [2], la quantité de condensation / d'évaporation qui peut, par diffusion, pénétrer ou ressortir de la paroi considérée est calculée dans des conditions climatiques standardisées. Pour le calcul, il y a deux climats statiques disponibles (climats hivernal et estival). La méthode selon Jenisch est reprise en tant qu'option dans la norme EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3. Cette méthode fournit des résultats plus nuancés, sur la base de conditions climatiques aux limites adaptées aux régions.

Les deux approches citées dans la norme EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3 ne permettent pas d'obtenir d'étude détaillée des flux de chaleur et d'humidité. Il n'est pas possible de déterminer le taux d'humidité précis de l'un des matériaux utilisés. Dans le secteur du bâtiment, la méthode de Glaser sert depuis plusieurs décennies exclusivement à l'évaluation approximative des quantités de condensation et d'évaporation. Les modèles de calcul dynamiques selon la norme DIN EN 15026 [4], tels qu'ils sont

adoptés dans les logiciels WUFI pro [5], WUFI 2D [6] ou Delphin [7], simulent les flux d'humidité et de chaleur au sein des parois. Si le calcul se fonde sur des données climatiques déterminées heure après heure, il fournit de loin les résultats les plus précis.

Tous les modèles de calcul décrits partent du principe que les couches dans la paroi sont étanches à l'air.

### Calcul selon EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3 [2] a) Méthode de Glaser

Les flux d'humidité sont calculés avec un climat globalisé de 60 jours d'hiver (-10 °C / 80 % d'hum. rel. de l'air à l'extérieur et 20 °C / 50 % d'hum. rel. de l'air à l'intérieur) et 90 jours d'été (+12 °C / 70 % d'humidité relative à l'intérieur et l'extérieur, 20 °C au niveau du toit à l'extérieur).

Les constructions doivent respecter les limites suivantes : la quantité de condensation ne peut pas dépasser 500 g/m<sup>2</sup> dans les couches non absorbantes de la paroi par capillarité (par exemple les films) ; et la quantité de condensation durant la période hivernale doit être inférieure à la quantité d'évaporation en été.

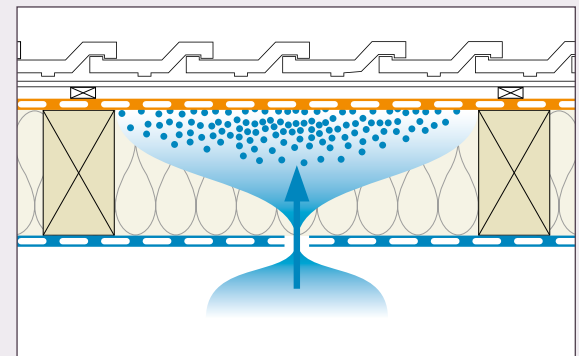
### b) Méthode de Glaser avec données climatiques de Jenisch

La méthode de Jenisch calcule par région, avec douze séries de données climatiques globales, une situation climatique pour chaque mois, avec une température moyenne extérieure et intérieure. Les températures extérieures se situent seulement autour de 0 °C en hiver (et non à -10 °C comme dans la méthode de Glaser) et à 18 °C en été selon la région (et non à 12 °C comme dans la méthode de Glaser). Les constructions sont donc calculées sans période de gel du côté extérieur et donnent ainsi des résultats nettement moins critiques qu'avec la méthode de Glaser. Les résultats doivent être interprétés en conséquence.

Même si elle est encore évoquée dans la norme EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3, la méthode de Jenisch ne s'utilise pratiquement plus de nos jours. Pour obtenir des résultats précis, on utilise des méthodes de calcul dynamiques.

**Impondérables: actuellement, les apports d'humidité à travers des fentes (convection) sont seulement calculables à titre indicatif**

### 2. Apport d'humidité dans l'isolation à cause de fuites



Une fente d'une largeur de 1 mm peut occasionner des apports d'humidité allant jusqu'à 800 g d'eau au m<sup>2</sup> par jour.

### Résultats précis avec les modèles de calcul dynamiques

#### Modèles statiques

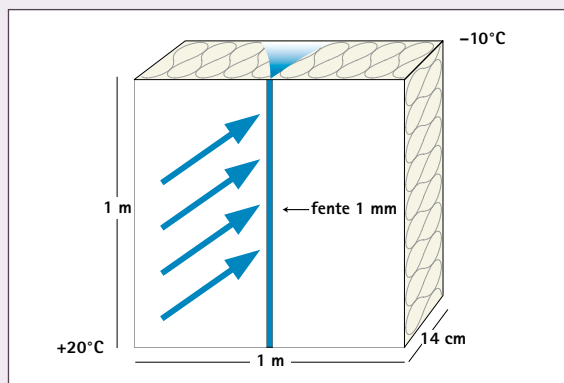
- Méthode de Glaser
- Méthode de Glaser avec données climatiques de Jenisch → valeurs indicatives approximatives

#### Modèles dynamiques

- WUFI pro / WUFI 2D
- Delphin → valeurs très précises sur le taux d'humidité pour chaque position dans la paroi; idéales pour vérifier l'intégrité des éléments de constructions

### Apport d'humidité dans la construction dû à des défauts d'étanchéité dans le frein-vapeur

#### 3. Fente de 1 mm = 800 g/24 h par mètre linéaire de fente



#### Transport d'humidité

par frein-vapeur : 0,5 g/m<sup>2</sup> x 24 h

par fente de 1 mm : 800 g/m x 24 h

facteur d'augmentation : 1 600

#### Conditions aux limites :

Frein-vapeur valeur  $s_d = 30$  m

Température intérieure = +20 °C

Température extérieure = -10 °C

Différence de pression = 20 Pa

selon vent de force 2 à 3

Mesures : Institut für Bauphysik, Stuttgart [11]

#### Convection et simulation

Les flux de convection dus à des fuites peuvent uniquement être calculés de manière approximative. Si le parement intérieur est laissé de côté lors du calcul, l'apport d'humidité se fait exclusivement par diffusion. Les apports réels par convection sont plus importants. Des matériaux avec des valeurs  $\mu$  élevées sur le côté froid de la construction augmentent le risque de condensation dans la masse.

### Calcul selon DIN EN 15026 [4]

Les méthodes de calcul dynamiques comme WUFI pro [5], WUFI 2D [6] ou Delphin [7] fournissent des résultats vraiment réalistes. Ces méthodes permettent le calcul de transport d'humidité et de chaleur dans la paroi sur la base de données climatiques réelles (température, taux d'humidité de l'air, pluie (battante), soleil, vent, etc.), des propriétés des matériaux de construction (diffusion, absorption, accumulation et transport d'eau, etc.) et de l'orientation géographique des éléments du bâtiment (pente, point cardinal). Le taux d'humidité et la température peuvent être fournis pour chaque point de la paroi considérée.

### Modèles de calcul pour l'apport d'humidité par convection

Le moteur de la convection est la différence de pression entre l'intérieur d'un bâtiment et l'air extérieur. Cette différence de pression résulte du vent sur l'extérieur du bâtiment et de la montée de l'air chauffé au sein de la pièce habitée.

A partir de la version 5.0, le logiciel WUFI Pro propose un modèle d'infiltration d'air pour le calcul des apports d'humidité par convection. Sur la base d'un échange avec l'air ambiant dans les pièces. Cela pré-suppose que l'inétanchéité de la construction est connue, parce qu'elle sert à quantifier l'apport d'humidité.

Lors de la rénovation, il est rarement possible de déterminer avec précision la qualité du revêtement intérieur. Or, celle-ci a une influence déterminante sur l'apport d'humidité par diffusion et convection.

Pour des raisons de sécurité constructive, on calcule donc le transport d'humidité dû à des fuites dans une construction sans prendre en compte les couches intérieures des parois qui freinent la diffusion de vapeur (comme les couches frein-vapeurs ou les revêtements intérieurs). Comme en l'occurrence, il s'agit seulement des flux de diffusion et que le moteur créant les différences de pression d'air fait défaut, les charges d'humidité par convection peuvent être nettement supérieures, en réalité.

Dans le cas de flux d'air dus à des fuites, l'apport d'humidité se concentre sur une

petite surface. Par conséquent, cet apport est largement supérieur aux valeurs indiquées par les résultats de calcul. Par convection, une fente large de 1 mm et longue de 1 m (= 1 / 1 000 m<sup>2</sup>) peut laisser pénétrer 800 g/m d'humidité par jour dans l'isolation.

Même l'écran de sous-toiture le plus perméable à la vapeur n'est pas capable de laisser évaporer une telle quantité d'humidité. D'autant plus que dans la pratique, en cas de différence de pression minimale voire nulle, le flux de diffusion d'un élément de construction fin est beaucoup plus faible que ne le laissent supposer sa valeur  $s_d$  (cf. un peu plus loin le paragraphe consacré aux grandeurs  $s_d$  et  $\mu$ ).

### Accumulation de la quantité d'humidité suite à la convection interne

Des phénomènes convectifs peuvent aussi survenir au sein même des parois. L'échauffement de la construction par l'extérieur, causé par l'exposition directe au soleil, peut occasionner la montée d'humidité au sein de l'élément de construction et, le cas échéant, son accumulation dans des endroits où d'autres processus de convection sont interrompus, à cause de chevêtres par exemple.

### Couches de glaces = pare-vapeurs

Lorsqu'il y a formation de condensation sur des couches de matériaux situées dans la zone de gel (comme sur des membranes d'étanchéité à l'air posées à l'extérieur), une couche de glace risque de s'y former en cas de températures négatives. La construction ne peut alors pas diffuser cette humidité vers l'extérieur, de très grandes quantités d'eau de condensation viennent s'accumuler et geler. Résultat : un affaiblissement du pouvoir de l'isolant utilisé ainsi qu'un grand risque d'endommagement des matériaux de la paroi.

### Grandeur $s_d$ et grandeur $\mu$

L'élément déterminant dans la formation de condensation est d'abord la grandeur  $\mu$  (coefficient de résistance à la diffusion de vapeur [-]). Cette grandeur décrit la « qualité » du matériau de construction en tant que „pare-vapeur”. La grandeur  $s_d$



(épaisseur de couche d'air équivalente [m]) tient en outre compte de l'épaisseur du matériau de construction considéré. Si cette épaisseur augmente, la durée nécessaire à une molécule d'eau pour traverser le matériau de construction lors du processus de transport s'allonge. Les écrans de sous-toiture sont ouverts à la diffusion et ont une faible valeur  $s_d$ . En raison de l'épaisseur réduite de la couche, la grandeur  $\mu$  est toutefois comparativement élevée. Exemple : un écran de sous-toiture avec un film fonctionnel microporeux a, dans le cas d'une valeur  $s_d$  de 0,02 m et d'une épaisseur de 0,50 mm, une valeur  $\mu$  de 40. Comparé à un isolant thermique en fibre (valeur  $\mu = 1$ ), l'écran possède une étanchéité à la diffusion quarante fois supérieure. Ainsi, de l'eau de condensation peut aussi se former en sous-face d'écrans de sous-toiture ouverts à la diffusion.

Les écrans de sous-toiture microporeux ou microporeux ouverts à la diffusion laissent s'évaporer nettement moins d'humidité que ne le laissent supposer leurs valeurs  $\mu$  et  $s_d$ . C'est dû à la différence de pression faible voire nulle de part et d'autre d'un élément de construction fin soumis à des conditions climatiques variables.

L'explication est simple : un flux de diffusion apparaît toujours suite à des différences de pression. Si le même climat règne des deux côtés (10 °C et 80 % d'hum. rel. de l'air par exemple), il n'y a aucun transport d'humidité. Les molécules de vapeur d'eau traversent par diffusion l'écran uniquement lorsque de part et d'autre de l'écran la température et/ou l'humidité relative diffèrent.

Dans le cas d'un écran de sous-toiture / d'une membrane d'étanchéité à l'air extérieure, il n'y a pas de différence de température en raison de la faible épaisseur du matériau, de sorte que l'unique moteur est la différence des taux d'humidité relative de l'air. En hiver, ces différences sont faibles au niveau de l'écran de sous-toiture / de l'étanchéité à l'air extérieure, lorsque sur la face intérieure de l'écran ou de la membrane, l'humidité relative de l'air atteint 80 % voire davantage et que du côté extérieur, les taux d'humidité sont similaires, le risque de condensation est important.

Ici, les membranes d'étanchéité à l'air

dotées de films fonctionnels monolithiques offrent des avantages de sécurité évident. En cas de condensation en sous-face de l'écran l'humidité est extraite activement par diffusion le long des chaînes moléculaires. Sous l'effet de l'humidité, la résistance à la diffusion de pro clima DASAPLANO 0,01 connect s'affaiblit ; le risque de formation de glace diminue. En revanche, avec les membranes microporeuses, la formation d'eau de condensation sur l'écran entraîne une diminution de la capacité de diffusion. L'humidité peut uniquement traverser les écrans de manière passive, à l'état gazeux, et le risque de formation de glace est plus élevé qu'avec les membranes monolithiques.

### Imprécision des mesures dans le cas de matériaux hautement perméables à la vapeur

La norme DIN EN ISO 12572 [8], une référence importante pour la détermination de la résistance à la diffusion, contient dans sa Section 9 « Précision des mesures » une liste de sources d'erreur possibles. Outre la qualité des échantillons ainsi que la précision des installations de mesure, la norme mentionne également comme causes pouvant occasionner des erreurs dans les résultats de mesure, les conditions aux limites climatiques en cours de mesurage (variations de la pression d'air). Conformément aux indications reprises à la section 9.8, la norme DIN EN ISO 12572 ne convient pas pour mesurer les propriétés de coefficients élevés de perméabilité à la vapeur d'eau (c'est-à-dire avec  $s_d < 0,1$  m). Pour toutes ces raisons, il faut partir, lors du calcul de diffusion sur des matériaux plus perméables à la vapeur, d'une valeur  $s_d$  minimale de 0,1 m d'après la norme EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3 pour des mesures selon DIN EN ISO 12572.

### Evaluation des influences de l'humidité – Définition du critère de prévention des dégâts au bâtiment

Les apports d'humidité décrits fig 1 et 2 peuvent entraîner un taux élevé d'humidité relative de l'air voire la formation de condensation au sein des parois. En combinaison avec une température suffisamment élevée à

L'apport d'humidité dans la construction risque d'entraîner des dégâts au bâtiment et des moisissures.

#### 4. Les moisissures prolifèrent aussi dans des conditions ambiantes défavorables.



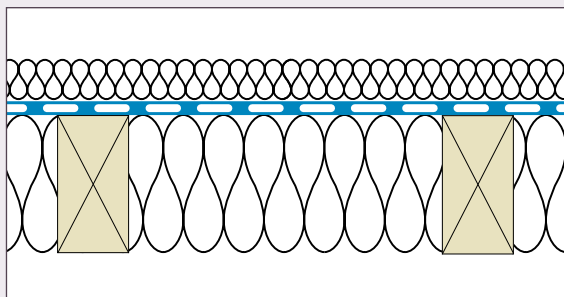
Sedlbauer et Krus [3] indiquent qu'un taux d'humidité relative de l'air de 80 % suffit à remplir les conditions de développement de presque toutes les moisissures que l'on peut rencontrer dans le bâtiment. Selon l'espèce, la zone optimale se situe entre 90 et 96 % d'humidité relative de l'air.

## Comparaison de quatre constructions

### Cas n°1 : 35 mm de fibre de bois en guise d'isolation sur chevrons

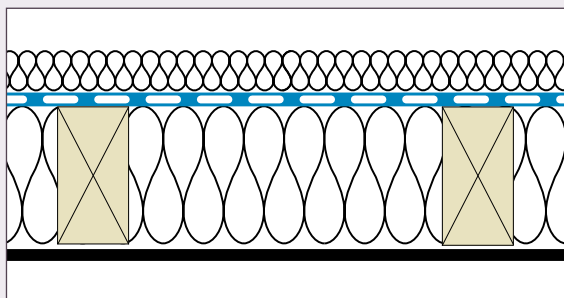
Construction avec couche d'étanchéité à l'air du côté extérieur

#### 1a : 5. Sans étanchéité à l'air à l'intérieur



- Fibre de bois 35 mm
- Etanchéité à l'air ouverte à la diffusion ( $s_d = 0,02$  m)
- Isolant en fibre non-absorbant, 120 mm
- Pas de revêtement intérieur

#### 1b : 6. Avec étanchéité à l'air à l'intérieur



- Fibre de bois 35 mm
- Etanchéité à l'air ouverte à la diffusion ( $s_d = 0,02$  m)
- Isolant en fibre non-absorbant, 120 mm
- Avec plaque de plâtre à parement de carton

L'endroit où règne ce taux d'humidité accru, on risque de constater, en cas d'effet prolongé et de source d'alimentation appropriée, la germination de spores de moisissures. Celles-ci sont considérées comme les premières colonisatrices parce qu'elles peuvent proliférer même dans des conditions ambiantes biologiquement défavorables [3].

Sedlbauer et Krus [3] indiquent qu'un taux d'humidité relative de l'air de 80 % suffit à remplir les conditions de développement de presque toutes les moisissures que l'on rencontre dans le bâtiment. Selon l'espèce, la zone optimale se situe entre 90 et 96 % d'humidité relative de l'air. La température qui règne lors de taux d'humidité accrus doit se situer entre 0 et 50 °C pour la germination des spores et/ou la prolifération des moisissures. La température de développement idéale est d'environ 30 °C. A cette température, des moisissures peuvent germer et proliférer sur de la laine minérale à partir d'un taux d'humidité relative de l'air de 92 %. Si la température est plus basse, il faut des taux d'humidité plus élevés pour la colonisation.

Des salissures dues à de la poussière, à des traces de doigts et à la pollution de l'air (cuisine, résidus dans la douche, etc.) ainsi que l'humidité dégagée par les personnes suffisent à créer des conditions favorables à la colonisation par des moisissures sur des supports a priori moins adaptés.

Ces conditions aux limites ont une influence sur le niveau du taux d'humidité relative de l'air et de la température nécessaires à la germination. En raison de l'alternance jour-nuit, les températures sont soumises à des fluctuations qui peuvent faire en sorte que par moments, les conditions requises pour la prolifération des moisissures ne sont pas remplies. En [3], Zöld indique que dans le cas de températures inférieures à 20 °C, des moisissures risquent d'apparaître si sur 5 jours, la construction est soumise pendant plus de 12 heures à un taux d'humidité relative de l'air supérieur à 75 %.

Le critère pour une construction menacée par l'éventuelle prolifération de moisissures peut être défini comme suit :

1. La température est supérieure à 0 °C (moyenne du jour)

2. Le taux d'humidité relative est durablement supérieur à 90 % (moyenne du jour)
3. La température et le taux d'humidité relative de l'air doivent se maintenir relativement longtemps à ce niveau.

## Constructions étudiées

Dans la première partie de cette étude, nous analysons le risque de moisissures pour quatre constructions, sur la base des critères formulés plus haut. Cette analyse comparative se fait avec le logiciel WUFI pro [5] de l'Institut Fraunhofer, à l'aide des données climatiques de Paris/Bruxelles. Les 4 cas sont décrits ci-après (cf paragraphes cas n°1 à cas n°4), ils présentent les caractéristiques communes suivantes :

1. toit à forte pente, pente de 40° orienté au nord, couverture en tuiles grises.
2. Hauteur des chevrons existants : 12 cm avec isolation complète des chevrons en matériaux isolants en fibres
  - isolant absorbant (exemple) fibre de bois ou cellulose)
  - isolant non-absorbant (comme la laine minérale) (masse volumique apparente = 60 kg/m<sup>3</sup>)

Les isolants absorbants offrent un gain de sécurité supplémentaire. Ils peuvent amortir les pics d'humidité dans la paroi au niveau des couches à l'interface avec l'isolation. Cela se fait par absorption de l'humidité dans les cellules de bois contenue dans l'isolant (cas des isolants en fibre de bois ou en cellulose).

Le climat intérieur est déterminé d'après les suppositions de la fiche technique WTA 6-2-01/D [9] (contenues dans WUFI) avec une charge d'humidité normale, comme il existe dans des pièces de maisons habitées (chambres à coucher et séjour, salles de bain et cuisines).

Pour évaluer l'influence de l'étanchéité du revêtement intérieur, les constructions mentionnées sont calculées avec une plaque de plâtre à parement de carton appliquée sur toute la surface (épaisseur 10 mm) et sans parement intérieur, afin de prendre en compte l'influence des lambris et/ou des revêtements intérieurs avec des défauts d'étanchéité à l'air. Les cas n°1, 2 et 4 exposés ci-après sont analysés avec des matériaux isolants



non-absorbants (laine minérale) entre chevrons. Pour le cas n°3, nous avons utilisé un isolant avec des propriétés de sorption (cellulose).

### Cas n°1 : 35 mm de fibre de bois (fig. 5 + 6)

Recouvrement des chevrons avec un isolant en fibre de bois de 35 mm ; étanchéité à l'air ouverte à la diffusion posée sur chevrons ( $s_d = 0,02$  m). Isolation entre les chevrons avec un isolant non-absorbant.

(En dérogation aux recommandations des normes DIN EN ISO 12572 et EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3, le calcul s'effectue avec une valeur  $s_d$  de 0,02 m [au lieu de la valeur 0,10 m spécifiée dans la norme]).

### Cas n°2 : solution 1:1 (fig. 7)

La couche d'étanchéité à l'air est intercalée entre deux couches d'isolation de même épaisseur : 50% de l'isolation thermique entre chevrons sous la membrane d'étanchéité à l'air; 50% d'isolant thermique sur chevrons. Les deux isolants ont le même coefficient de conductivité thermique  $\lambda$ .

- Recouvrement des chevrons avec un isolant de 120mm en fibre de bois.
- Membrane d'étanchéité à l'air ouverte à la diffusion ( $s_d = 0,02$  m)
- Isolation entre chevrons avec un isolant non-absorbant.

(En dérogation aux recommandations des normes DIN EN ISO 12572 et EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3, le calcul s'effectue avec une valeur  $s_d$  de 0,02 m.)

### Cas n°3 : solution 2 : 1 (fig. 8)

- Isolation sur chevrons de 60 mm en fibre de bois
- Membrane d'étanchéité à l'air ouverte à la diffusion ( $s_d = 0,02$  m)
- Isolation entre les chevrons avec un isolant absorbant (comme en fibre de bois ou cellulose), épaisseur 120 mm.

### Cas n°4 : pose en créneau (sub et top) (fig. 9)

La couche d'étanchéité à l'air est posée en créneau sur le revêtement intérieur et par-dessus la structure porteuse. Recouvrement des chevrons avec un isolant en fibre de bois de 35 mm, étanchéité à l'air posée à l'intérieur ( $s_d =$  hygrovariable entre 0,05 et 2,0 m). Isolation entre les chevrons avec un isolant non-absorbant.

### Présentation des résultats

L'étude porte sur la situation de l'humidité au niveau de la sous-face de la membrane d'étanchéité à l'air. Pour ce faire,

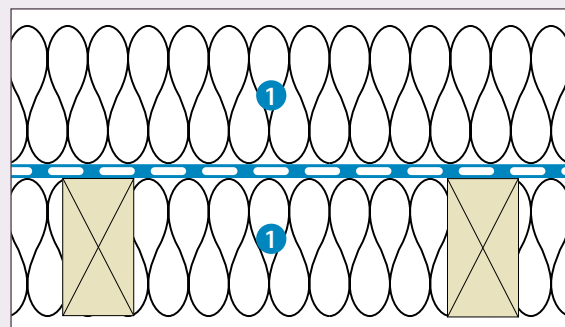
- nous calculons l'humidité relative de l'air en fonction de la température qui règne dans la zone limite au niveau de la membrane d'étanchéité à l'air (cas n°1, 3, 4) ou du panneau en fibre de bois (cas n°2) ;
- nous calculons la teneur en eau de l'isolation thermique dans la couche limite à l'interface isolation-membrane.

### Objectif

Au sein de constructions dotées d'une isolation thermique, les taux d'humidité ou d'humidité relative de l'air les plus élevés règnent dans la zone de transition entre des matériaux avec des valeurs  $\mu$  différentes. La teneur en eau de l'isolation thermique dans la couche la plus extérieure (1 mm) et l'humidité relative de l'air ne devraient pas être supérieures de manière significative.

Cas n°2 :

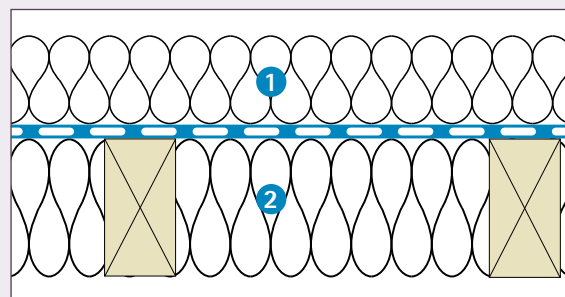
#### 7. Solution 1 : 1



- Fibre de bois 120 mm
- Etanchéité à l'air ouverte à la diffusion ( $s_d = 0,02$  m)
- Isolant en fibre non-absorbant, 120 mm

Cas n°3 :

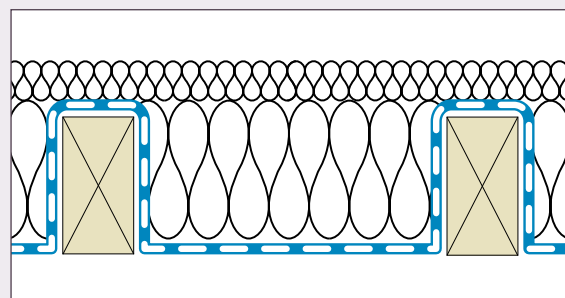
#### 8. Isolants absorbants et règle 2 : 1



- Fibre de bois 60 mm
- Etanchéité à l'air ouverte à la diffusion ( $s_d = 0,02$  m)
- Isolant en fibre absorbant, 120 mm

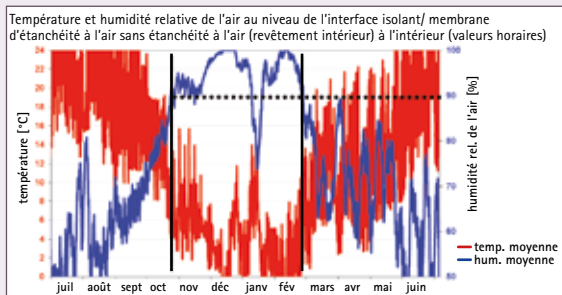
Cas n°4 :

#### 9. Pose en créneau

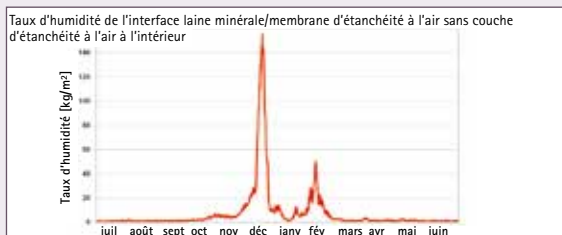


- Fibre de bois 35 mm
- Etanchéité à l'air, posée en créneau ( $s_d =$  hygrovariable entre 0,05 et 2,0 m)
- Isolant en fibre non-absorbant, 120 mm

### 10. + 11. Résultat pour le cas n°1a : fibre de bois 35 mm : étanchéité à l'air à l'extérieur, revêtement intérieur avec fentes

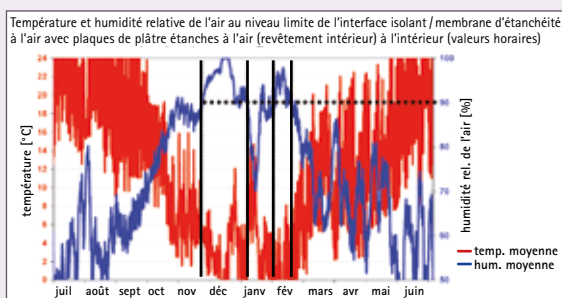


Humidité > 90% pendant 157 jours, condensation pendant 15 jours → **très forte probabilité de moisissures**

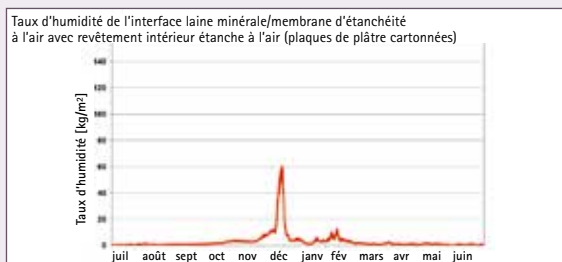


Taux d'humidité maximum élevé au niveau de l'interface pendant plusieurs mois ; supérieur à 150 kg/m<sup>3</sup>

### 12. + 13. Résultat pour le cas n°1b : fibre de bois 35 mm : étanchéité à l'air à l'extérieur, revêtement intérieur étanche à l'air



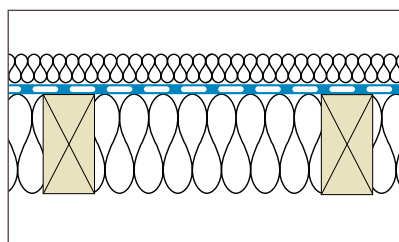
Humidité > 90% pendant 84 jours, condensation pendant 6 jours → **probabilité de moisissures élevée**



Taux d'humidité maximum élevé au niveau de l'interface pendant plus d'un mois, jusqu'à 60 kg/m<sup>3</sup>

Calculs : 35 mm de fibre de bois en guise d'isolation sur chevrons, sans étanchéité à l'air à l'intérieur (aucun parement intérieur) (cas n°1a)

Paroi avec couche d'étanchéité à l'air posée du côté extérieur



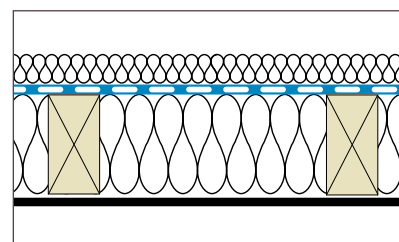
Ce cas simule des constructions avec une étanchéité à l'air imparfaite dans le cas de plaque de plâtre à parement de carton, surfaces enduites et lambris.

D'après le résultat de calcul représenté en fig. 10 et 11, de telles constructions atteignent, dans à l'interface isolation thermique/ couche d'étanchéité à l'air extérieure, des taux d'humidité relatifs de l'air très élevés, largement supérieurs à 90 %, jusqu'à la formation de condensation. Pendant 157 jours par an, l'humidité relative de l'air à cette interface dépasse 90 % ; pendant 15 jours, il y a même formation d'eau de condensation. Il existe un très grand risque de développement de moisissures, puisqu'il y a conjointement de très hautes humidités relatives ambiantes et des températures largement supérieures à 0 °C. La teneur en eau dans la zone limite monte jusqu'à plus de 150 kg/m<sup>3</sup>.

Dans de telles constructions avec une étanchéité à l'air imparfaite, il y a un risque de dégâts au bâtiment.

35 mm de fibre de bois en guise d'isolation sur chevrons, avec une étanchéité à l'air à l'intérieur parfaite (réalisée avec des plaques de plâtre à parement de carton) (cas n°1b)

Paroi avec couche d'étanchéité à l'air posée du côté extérieur

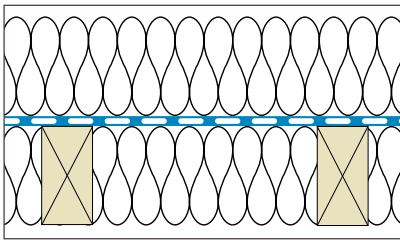


Si la paroi est déjà dotée, sur toute la surface, d'un revêtement intérieur en plaques de plâtre à parement de carton, ce revêtement peut être considéré comme étanche à l'air dans le calcul. L'apport d'humidité dans la construction se fait exclusivement par diffusion.

Selon la fig. 12, cette construction atteint pendant 84 jours par an des taux d'humidité relative de l'air très élevés supérieurs à 90 % ; pendant 6 jours, il y a même formation de condensation. A l'interface avec la membrane d'étanchéité à l'air, l'isolation thermique se charge sur une brève période de plus de 60 kg d'humidité au m<sup>3</sup> (fig. 13). Dans cette paroi, la probabilité de formation de moisissures est élevée dans la zone limite entre l'isolant thermique et la membrane d'étanchéité à l'air, malgré le revêtement intérieur étanche à l'air et efficace.

### Solution 1 : 1, sans étanchéité à l'air à l'intérieur (cas n°2)

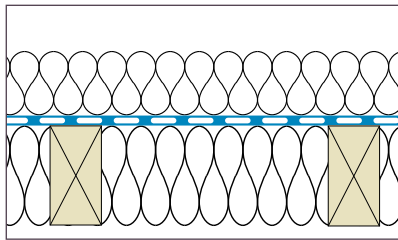
Paroi avec couche d'étanchéité à l'air intercalée entre les isolants de même épaisseur



Si 50 % de l'isolation thermique (de la résistance au passage de la chaleur totale) sont placés au-dessus de la couche d'étanchéité à l'air, des taux d'humidité relative de l'air supérieurs à 90 % apparaissent seulement pendant une semaine durant la période d'hiver (cf. fig. 14). Il n'y a aucune formation de condensation. La zone limite ne présente aucune accumulation d'humidité déterminante (cf. fig. 15). S'il existe un revêtement intérieur intact, l'humidité relative de l'air à l'interface entre l'isolant et la membrane d'étanchéité à l'air reste inférieure à 90 % durant toute l'année. Selon [3], la prolifération de moisissures n'y est pas possible, même si la couche d'étanchéité à l'air intérieure (en l'occurrence le revêtement intérieur) présente des défauts.

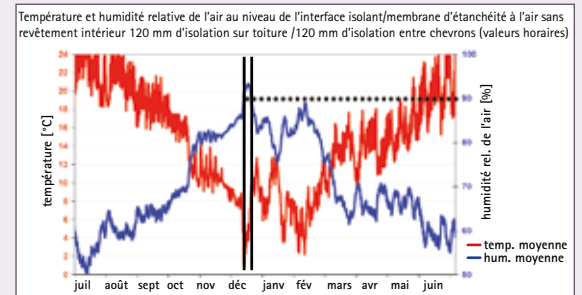
### Solution 2 : 1, sans étanchéité à l'air à l'intérieur (cas n°3)

Paroi avec 30 % d'isolant au-dessus des chevrons et 70 % entre les chevrons

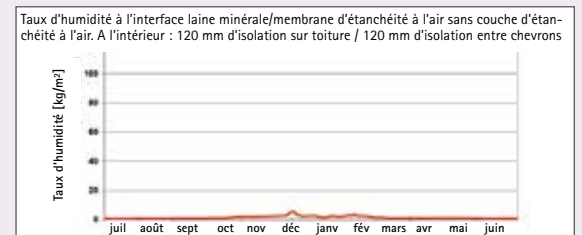


En cas de mise en œuvre d'isolants capables de stocker de l'humidité à court terme par sorption, il est possible d'établir un rapport 30-70 pour la proportion isolation sur toiture / isolation entre chevrons. Pour cela, il faut que les matériaux isolants utilisés possèdent la même conductivité thermique. Dans l'exemple considéré, l'isolation de 120 mm entre les chevrons et l'isolation sur toiture de 60 mm sont séparées par une membrane d'étanchéité à l'air ouverte à la diffusion. Dans la zone limite de cette construction, les taux d'humidité atteignent 90 % sur des périodes relativement longues et dépassent parfois ce seuil. Grâce aux propriétés de sorption, notamment de la cellulose ou de la fibre de bois, ces taux d'humidité sont tolérables (fig. 16). Les taux d'humidité à l'interface couche d'isolation / membrane d'étanchéité à l'air ne sont pas critiques (fig. 17). Lors d'une rénovation, un isolant non-absorbant (comme la laine minérale) déjà présent dans l'élément de construction peut rester dans la construction s'il est complété jusqu'à la couche d'étanchéité à l'air (surface au-dessus des chevrons) par au moins 40 mm d'un matériau isolant absorbant (fibre de bois ou cellulose par exemple).

### 14. + 15. Résultat pour le cas n°2 : solution 1 : 1, étanchéité à l'air intercalée entre isolants de même épaisseur, revêtement intérieur avec fentes

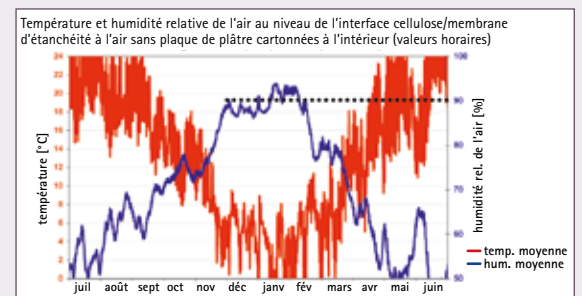


Humidité > 90 % pendant 7 jours, aucune condensation  
→ faible probabilité de moisissures

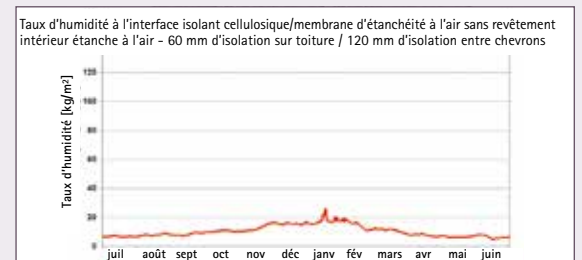


Seulement de très faibles taux d'humidité dans la zone limite

### 16. + 17. Résultat pour le cas n°3 : solution 2 : 1, étanchéité à l'air dans la couche d'isolation, revêtement intérieur avec fentes

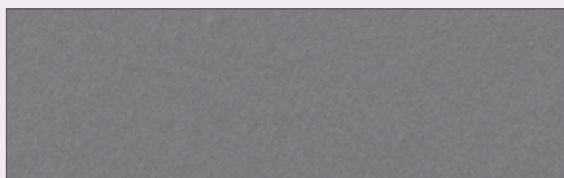


Humidité > 90 % pendant 45 jours, aucune condensation  
→ faible probabilité de moisissures avec un isolant sorbant



Taux d'humidité non critiques dans la zone limite

### 18. Vue agrandie du film fonctionnel monolithique sans pores des membranes DASAPLANO



Le transport actif d'humidité le long des chaînes moléculaires augmente la capacité de séchage par rediffusion.

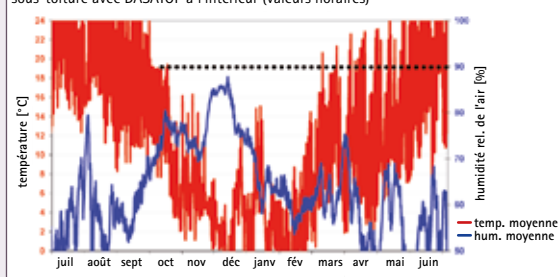
### 19. Vue agrandie d'un film fonctionnel microporeux



Le transport d'humidité passif à travers les pores (échange gazeux) accroît le risque de formation de glace dans l'élément de construction.

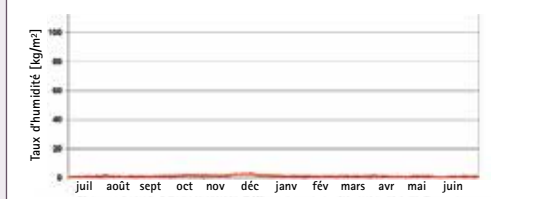
### 20. + 21. Résultat pour le cas n°4 : pose en créneau, étanchéité à l'air à l'intérieur, revêtement intérieur avec fentes

Température et humidité relative de l'air au niveau de l'interface isolant/écran de sous-toiture avec DASATOP à l'intérieur (valeurs horaires)



Aucune humidité > 90 %, aucune condensation  
→ très faible probabilité de moisissures

Taux d'humidité à l'interface laine minérale/panneau en fibre de bois avec DASATOP



Taux d'humidité non critiques dans la zone limite

## Membranes d'étanchéité à l'air avec couche fonctionnelle monolithique

Si comme dans la description du cas n°2 (solution 1 : 1) ou n°3 (solution 2 : 1), la couche d'étanchéité à l'air est posée par-dessus les chevrons, il convient d'utiliser une membrane d'étanchéité à l'air ouverte à la diffusion avec un film fonctionnel monolithique et hygrovariable. La membrane pro clima DASAPLANO dispose d'un film fonctionnel en composé polymère monolithique adéquat et offre les avantages suivants à la construction :

#### • étanchéité à l'air

Le film fonctionnel monolithique de la membrane DASAPLANO garantit une étanchéité à l'air à 100%. Contrairement aux membranes d'étanchéité à l'air ordinaires avec des films microporeux (fig.19), la membrane DASAPLANO est totalement non poreuse (fig.18).

#### • ouverture à la diffusion

Le film fonctionnel monolithique permet un transport actif de l'humidité à travers le matériau de la membrane. Si de la condensation s'accumule sous forme de gouttes sur la face interne de la membrane DASAPLANO, elle est transportée activement vers l'extérieur le long de ses chaînes moléculaires. Cela réduit sensiblement le risque de formation de glace (qui aurait un effet pare-vapeur) au niveau de la membrane d'étanchéité à l'air par rapport à une membrane avec des films fonctionnels microporeux.

#### • hygrovariabilité

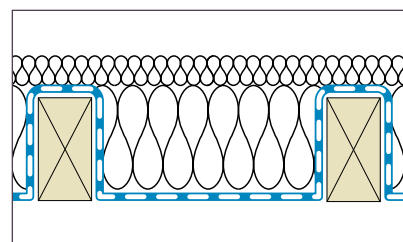
Le film fonctionnel de la membrane DASAPLANO 0,01 connect a des propriétés hygrovariables. Cette hygrovariabilité diminue la résistance à la diffusion des membranes en cas de formation de condensation jusqu'à une valeur  $s_d$  inférieure à 0,01 m. D'où une prévention optimale de l'augmentation habituelle de la résistance à la diffusion, par exemple due à la fermeture des pores par de l'eau.

S'il s'agit de poser la membrane d'étanchéité à l'air au-dessus des chevrons, les membranes DASAPLANO offrent en respectant les solutions de rénovation 1:1 et 2:1 une plus grande sécurité pour

la paroi par rapport aux membranes d'étanchéité à l'air microporeuses.

## Pose en créneau (sub et top), sans étanchéité à l'air à l'intérieur (cas n°4)

Paroi avec couche d'étanchéité à l'air posée à l'intérieur, sans revêtement intérieur.



La pose en créneau (sub et top) du frein-vapeur de rénovation DASATOP garantit une étanchéité à l'air fiable et protège l'isolation thermique des dégâts au bâtiment dus à des taux d'humidité élevés dans toutes les couches de la paroi, grâce à la valeur  $s_d$  hygrovariable. La membrane DASATOP peut se combiner avec tous les isolants en fibre. Dans ce cas, la pose d'une membrane d'étanchéité à l'air au-dessus de l'isolation entre chevrons n'est pas nécessaire. Grâce à l'utilisation de la membrane DASATOP, le taux d'humidité dans l'isolation thermique posée immédiatement en dessous du panneau en fibre de bois n'est jamais critique. Le pic d'humidité de 85 % ne survient que très brièvement en cas de températures autour de 0 °C (cf. fig. 20). Il n'y règne aucun taux d'humidité qui entraînerait des dégâts aux matériaux (cf. fig. 21). Dans ces conditions aux limites et avec les matériaux utilisés, les moisissures ne peuvent ni germer, ni proliférer. Moyennant une pose et un collage étanches à l'air, les constructions dotées de la membrane DASATOP ne sont exposées à aucun risque de formation de moisissures dans l'élément de construction. Elles offrent ainsi la plus grande sécurité pour tous les isolants en fibre et pour la construction.



## Conclusion – comparaison entre l'étanchéité à l'air à l'extérieur et l'ensemble étanchéité à l'air + frein-vapeur à l'intérieur

Les calculs selon les méthodes de simulations dynamiques dans des conditions climatiques réelles permettent une représentation fidèle des processus concrets à l'oeuvre dans la construction. Ils peuvent indiquer des risques de formation de condensation et permettre de tirer des conclusions sur le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'une paroi.

Lors de l'étude de parois avec des étanchéités à l'air posées côté extérieur, sans sur-isolation suffisante, les résultats sont des taux d'humidité relative de l'air supérieurs à 90 % et une condensation importante dans l'interface entre l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air. Conséquence : dans les parois illustrées par le cas n° 1, la probabilité de formation de moisissures est élevée.

Au niveau des murs de refends ou des cloisons porteuses, l'isolation intérieure risque d'être traversée par un flux d'air,

comme dans le cas de défauts d'étanchéité dans la maçonnerie du mur pignon. Durant les saisons froides, de grandes quantités d'eau de condensation peuvent s'accumuler. La probabilité de la prolifération de moisissures augmente encore. La détermination des valeurs  $s_d$  de matériaux hautement perméables à la vapeur peut, d'après les remarques de la norme DIN EN ISO 12572, donner lieu à une erreur de mesure importante.

L'augmentation de 0,01 m de la résistance à la diffusion de la membrane d'étanchéité à l'air (passant de 0,02 à 0,03 m) occasionne une augmentation de plus de 60 % du taux d'humidité maximum à l'interface entre l'isolant et la membrane d'étanchéité à l'air, dans le calcul du cas n° 1 avec parement intérieur. Lorsque la valeur monte à 0,04 m, le taux d'humidité maximum augmente de plus du double (120 %) de la valeur initiale.

De légères divergences de la résistance à la diffusion augmentent donc énormément le risque de formation de moisissures. Si la couche d'étanchéité à l'air est posée au milieu de la couche d'isolation thermique (solution 50-50), les taux d'humidité relative de l'air passent en dessous des valeurs critiques, à l'interface critique.

Cette méthode est valable quelque soit l'isolant fibreux entre chevrons. Sinon, en cas d'utilisation d'isolants absorbants (cas de fibre de bois ou cellulose), on peut aussi ramener l'épaisseur de l'isolation sur toiture à un tiers de l'épaisseur d'isolation totale (solution 2 : 1). Si une isolation existe déjà, il faut qu'elle se compose d'au moins 40 mm d'isolant sorbant avant la couche d'étanchéité à l'air.

La solution la plus fiable de l'étude comparative est la construction avec le frein-vapeur de rénovation de toiture DASATOP posé en créneau. Elle se combine avec tous les isolants en fibre. Grâce au frein-vapeur posé côté intérieur, avec une valeur  $s_d$  pouvant atteindre 2 m, l'isolation thermique est suffisamment protégée de l'humidité provenant de l'espace intérieur.

En aucun endroit dans la paroi n'apparaissent des taux d'humidité critiques en termes de moisissures. Avec DASATOP, il n'est pas nécessaire de doter l'élément de construction d'une isolation sur toiture supplémentaire, pour la protéger d'une condensation dangereuse.

### 10 points garantissant une construction durablement fiable

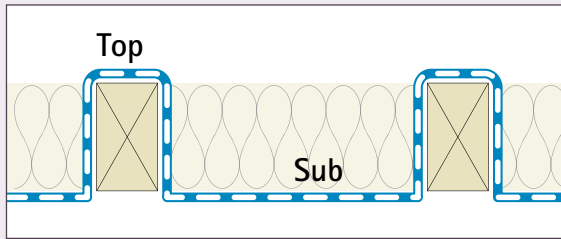


1. Les constructions garantissant une sécurité optimale sont celles qui respectent la règle 1/3 – 2/3 (intérieur – extérieur) au niveau des couches frein-vapeur et d'étanchéité à l'air (cf. page 80 – Règle d'or).
2. Plus la couche d'étanchéité à l'air est proche de l'espace intérieur, plus les constructions gagnent en fiabilité. Plus elle se rapproche de l'extérieur, plus la construction devient à risque : le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment diminue.
3. Les revêtements intérieurs posés sur toute la surface, sans aucune fente, empêchent l'apport d'humidité par convection, dans le cas de membranes d'étanchéité à l'air posées à l'extérieur.
4. La pose en créneau de DASATOP garantit le plus grand potentiel de prévention des dégâts en association avec tous les isolants fibreux. En effet cette membrane se trouve sous l'isolation thermique, dans la zone
- chaude (plus chaude que la température du point de condensation). Sur les chevrons, elle est capable d'adopter la résistance à la diffusion d'un écran de sous-toiture.
5. En cas d'utilisation d'isolants absorbants (exemple: fibre de bois ou cellulose), on peut opter pour la solution 2 : 1 combinée à la membrane d'étanchéité hygroactive DASA-PLANO 0,01 connect à l'air dotée d'une structure monolithique.
6. Les constructions dotées d'isolants non- absorbants (comme la laine minérale) peuvent être considérées comme fiables si, du côté de la pièce, 50 % maximum de la résistance au passage de la chaleur totale sont placés devant la couche d'étanchéité à l'air.
7. Dans les cas n° 2 et 3, il est avantageux d'utiliser en membrane d'étanchéité à l'air une membrane ouverte à la diffusion et dotée d'un film fonctionnel monolithique, tel DASAPLANO
- 0,01 connect, capable de transporter activement l'humidité le long de ses chaînes moléculaires. Ce film diminue le risque de formation de glace et donc une brusque augmentation de la résistance à la diffusion en cas d'apport d'humidité imprévu.
8. Il est toujours recommandé d'effectuer un contrôle d'assurance qualité parallèlement à la construction. En cas de rénovation par l'extérieur, l'étanchéité à l'air peut se faire à l'aide d'un test de surpression, combiné à du brouillard artificiel. Les fuites sont alors faciles à détecter et à éliminer.
9. La résistance à la diffusion de membranes d'étanchéité à l'air ouvertes à la diffusion doit être respectée de manière extrêmement précise et rester d'application en cas d'humidité relative élevée.
10. L'étanchéité à l'air devrait, si possible, se trouver dans la zone protégée du gel.

## B. Pose en créneau – comparaison du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment des frein-vapeurs à valeur $s_d$ variable

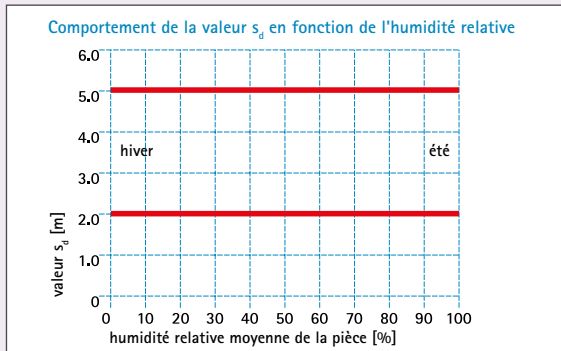
Sécurité particulière en cas de rénovation avec des membranes posées en créneau

### 22. Principe de la pose en créneau



Dans la chambrée de chevron (Sub : sous l'isolant), la membrane est plus étanche à la diffusion : protection contre l'humidité. Sur les chevrons (Top), elle est hautement perméable à la vapeur : séchage rapide vers l'extérieur.

### 23. Membranes à valeur $s_d$ fixe de 2 m et 5 m



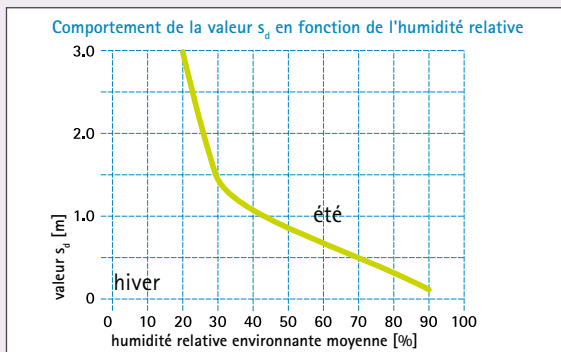
Dans la zone sèche :

valeur  $s_d$  de 2m ou de 5m : équivaut à un frein-vapeur

Dans la zone humide :

valeur  $s_d$  de 2m ou de 5m : équivaut à un frein-vapeur

### 24. DASATOP à valeur $s_d$ entre 0,05 et 2 m



Dans la zone sèche :

valeur  $s_d$  2 m : équivaut à un frein-vapeur

Dans la zone humide :

valeur  $s_d$  0,05 m : équivaut à un écran de sous-toiture

Dans la première partie de cette étude, nous avons fait la distinction entre plusieurs systèmes adaptés à la rénovation de la toiture par l'extérieur. Nous y avons comparé des membranes ouvertes à la diffusion et destinées à la réalisation de l'étanchéité à l'air avec des solutions intégrées qui ont un léger effet frein-vapeur. Dans l'exposé qui suit, nous allons examiner des solutions de pose en créneau appliquées sous l'isolant thermique et sur la structure porteuse de la construction.

**A cet égard, il convient de distinguer deux variantes de base :**

1. Les systèmes composés de frein-vapeurs et membranes d'étanchéité à l'air à résistance hygrovariable à la diffusion.

Ces systèmes possèdent une résistance à la diffusion variable selon le taux moyen d'humidité relative de l'air ambiant. Dans le cas du frein-vapeur de rénovation de toiture DASATOP, cette résistance peut varier entre 0,05 et 2 m (cf. fig. 24), selon le taux moyen d'humidité relative de l'air qui règne à proximité immédiate de la membrane. Pour des informations sur le fonctionnement précis de l'hygrovariabilité, reportez-vous à l'étude « Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'isolations thermiques dans les constructions en bois et en acier » [10].

2. Les systèmes composés de frein-vapeurs et membranes d'étanchéité à l'air à résistance constante à la diffusion

Ce concept utilise des films fonctionnels qui ne présentent aucune variation de la résistance à la diffusion selon le taux d'humidité relative de l'air ambiant. A titre d'exemple, nous présentons les résistances à la diffusion de deux membranes avec une valeur  $s_d$  de respectivement 2 et 5 m en fig. 23.

### Etude comparative des réserves de rediffusion

Il est évident que les membranes posées en créneau devraient adopter la résistance à la diffusion la plus faible possible au-dessus de la structure porteuse. Les valeurs  $s_d$  en dessous de 0,1 m sont idéales pour

permettre l'évaporation d'une quantité maximale d'humidité au niveau du chevron (grande ouverture à la diffusion). Les frein-vapeurs hygrovariables destinés aux isolations entre chevrons atteignent une valeur  $s_d$  d'environ 0,25 m (cas de proclima INTELLO) dans la zone humide. Ils offrent ainsi un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment moins important que la membrane DASATOP.

Lorsque le flux de diffusion à travers un matériau est saisi selon la norme EN ISO 13788, NBN EN ISO 13788, DIN 4108-3 [2] à l'état stationnaire au moyen du calcul de la densité du flux de diffusion de la vapeur d'eau  $g$  [ $\text{kg}/\text{m}^2 \times \text{h}$ ], la performance des membranes avec différents degrés d'étanchéité devient évidente. La densité du flux de diffusion de la vapeur d'eau est déterminée par la différence entre les pressions partielles de la vapeur d'eau  $p_i$  (intérieure) [Pa] et  $p_a$  (extérieure) [Pa], divisée par la résistance au passage de la vapeur d'eau  $Z$  [ $\text{m}^2 \times \text{h} \times \text{Pa}/\text{kg}$ ]. En multipliant le tout par 24, on obtient la perméabilité à la vapeur d'eau ( $W_{DD}$ ) [ $\text{g}/\text{m}^2 \times 24 \text{ h}$ ].

A titre d'exemple, lors de l'arrivée au point de condensation, le flux de diffusion est calculé en combinaison avec une température extérieure hivernale. Pour  $p_i$ , on part d'une valeur de 1 163 Pa (9,2 °C / 100 % d'humidité rel. de l'air [température du point de condensation par climat normal]) et pour  $p_a$ , d'une valeur de 208 Pa (-10 °C / 80 % d'humidité rel. de l'air).

### Valeurs $W_{DD}$ (perméabilité de vapeur d'eau) pour différentes valeurs $s_d$

Valeur $s_d$ [m]	$W_{DD}$ [ $\text{g}/\text{m}^2 \times 24 \text{ h}$ ]
0,05	~ 320
0,10	~ 160
0,50	~ 32
2,0	~ 8
5,0	~ 3
50,0	~ 0,3

L'éventuelle perméabilité à la vapeur d'eau diminue fortement dès que les valeurs  $s_d$  augmentent légèrement. Cela a des incidences sur la sécurité d'une construction.



Cette observation n'est pas directement transposable aux calculs dynamiques, puisque  $\pi$  et  $p_a$  varient constamment en raison du climat réel utilisé dans le calcul et en fonction de l'emplacement dans la paroi. Pour la situation de séchage, les valeurs sont par exemple plus basses des deux côtés des membranes, en raison des faibles différences de pression.

### Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment

Pour le calcul de construction avec des membranes posées en créneau, l'observation de la capacité de déshumidification de la structure porteuse (en l'occurrence les chevrons) est déterminante. Si les membranes n'épousent pas au plus près la forme des chevrons, de l'eau de condensation risque de se former sur leur face supérieure durant la saison froide. Or, cette condensation doit pouvoir s'évaporer ensuite à travers la membranes. Pour cela, il faut considérer les flux de chaleur et d'humidité sous l'angle bidimensionnel. Ces flux ne circulent pas exclusivement de l'intérieur vers l'extérieur. Des flux de diffusion peuvent aussi survenir au sein de la construction, par exemple des flancs des chevrons jusque dans la couche d'isolation thermique, grâce à des frein-vapeurs et membranes d'étanchéité à l'air adéquats. Pour représenter la capacité de déshumidification, on intègre au calcul la quantité d'humidité qui vient s'ajouter à celle du bois des chevrons. Celle-ci est prise en compte dans le calcul avec un taux d'humidité du matériau de 80% (= 2 300 g d'eau par mètre linéaire de chevron) et simule une accumulation d'humidité entre le frein-vapeur / la membrane d'étanchéité à l'air et les chevrons. La quantité de séchage par rediffusion ainsi trouvée permet de calculer ensuite le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment en [g H<sub>2</sub>O/m] de chevron par an. Normalement, les chevrons ont un taux d'humidité d'environ 300 g par mètre linéaire.

Le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment indique

- le degré de tolérance de la construction en cas de charge d'humidité imprévue et
- la quantité d'eau qui peut pénétrer dans une construction (de manière imprévue) sans y provoquer de dégâts au bâtiment.

### Constructions étudiées

1. Toit à forte pente, pente de 40°, orientation au nord, couverture en tuiles grises
2. Hauteur des chevrons 12 cm, avec isolation complète des chevrons en laine minérale (masse volumique = 60 kg/m<sup>3</sup>)

La détermination du climat intérieur se fait avec une charge d'humidité normale.

#### Cas n°1 : sous-toiture ouverte à la diffusion (fig. 25)

Dans le calcul, la sous-toiture a une valeur  $s_d$  de 0,1 m.

#### Cas n°2 : panneau de sous-toiture en fibre de bois de 60 mm (fig. 26)

Ce panneau est utilisé comme isolation supplémentaire sur chevrons afin de limiter les ponts thermiques (valeur  $s_d$  = 0,3 m).

#### Cas n°3 : panneau de sous-toiture en polyuréthane de 35 mm (fig. 27)

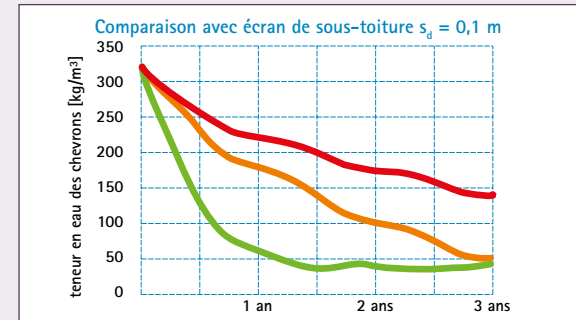
Isolation sur chevrons comme dans le cas n°2, mais valeur  $s_d$  = 3,5 m.

Chacun des trois cas est étudié avec trois frein-vapeurs différents posés en créneau :

- frein-vapeur DASATOP, valeur  $s_d$  hygrovariable entre 0,05 et plus de 2 m
- frein-vapeur, valeur  $s_d$  constante de 2 m
- frein-vapeur, valeur  $s_d$  constante de 5 m

### Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment à Paris/Bruxelles, toiture

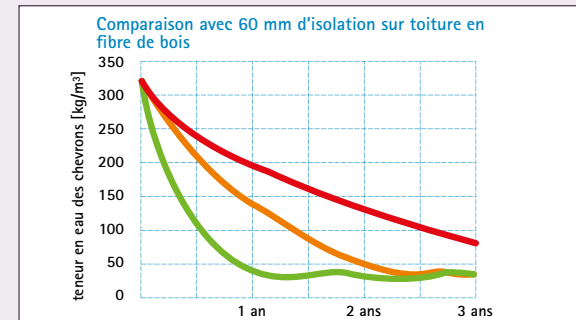
#### 25. Résultat pour la sous-toiture ouverte à la diffusion ( $s_d = 0,1$ m)



Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment :

- DASATOP 1 900 g/m
- $s_d$  2 m : trop faible
- $s_d$  5 m : trop faible

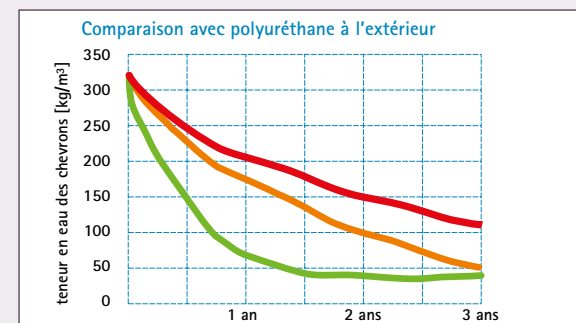
#### 26. Résultat pour le panneau en fibre de bois de 60 mm à l'extérieur ( $s_d = 0,3$ m)



Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment :

- DASATOP 2 100 g/m
- $s_d$  2 m : trop faible
- $s_d$  5 m : trop faible

#### 27. Résultat avec polyuréthane de 35 mm à l'extérieur ( $s_d = 3,5$ m)



Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment :

- DASATOP 1 800 g/m
- $s_d$  2 : trop faible
- $s_d$  5 : trop faible

## Formule de sécurité pro clima

Plus la réserve de séchage d'une construction est grande, c'est-à-dire plus le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment est grand, plus la construction est protégée des moisissures en cas de charges d'humidité imprévues.

## Discussion des résultats

L'étude porte sur la capacité de séchage de l'humidité élevée contenue dans les chevrons. Cette humidité est comparée sur une période de trois ans pour chacun des 3 cas, avec les 3 différents freins-vapeurs. Pour les 3 compositions de toiture, il s'avère que c'est la variante avec la membrane hygrovariable DASATOP qui permet à l'humidité du matériau de s'évaporer le plus rapidement du chevron. Les taux d'humidité dans les chevrons ne sont pas critiques tant que le point de saturation des fibres du bois n'est pas atteint. Si ce point est pris en compte lors d'une comparaison de la vitesse de séchage, les chevrons de la paroi sèchent environ trois fois plus vite avec DASATOP qu'avec le frein-vapeur dont la valeur  $s_d$  constante est de 2 m. Comparé au frein-vapeur avec la valeur  $s_d$  constante de 5 m, DASATOP permet un séchage cinq fois plus rapide dans le cas de constructions avec isolations sur toiture. Dans les constructions dotées exclusivement d'un écran de sous-toiture ouvert à la diffusion, DASATOP assure même un séchage huit fois plus rapide qu'une construction dotée d'un frein-vapeur avec une valeur  $s_d$  de 5 m.

### Conclusion - comparaison des systèmes frein-vapeurs et d'étanchéité à l'air posés en créneau

Du point de vue de la physique du bâtiment, la pose en créneau avec des frein-vapeurs et membranes d'étanchéité à l'air hygrovariables constitue la meilleure solution pour la sécurité de la construction et offre le plus grand potentiel de prévention des dégâts au bâtiment en cas de charges d'humidité imprévues. Lors de l'utilisation de DASATOP sur les chevrons, les taux d'humidité non critiques du bois sont atteints environ trois voire cinq fois (parfois même huit fois) plus rapidement que dans le cas de membranes avec des valeurs  $s_d$  de 2 m ou 5 m. Lors de la pose en créneau, la membrane sous l'isolation thermique fait office de frein-vapeur. En revanche, lors de la pose par-dessus les chevrons, la fonction d'un écran de sous-toiture est avantageuse pour que l'humidité puisse s'évaporer le

plus possible sans encombre. Dès lors, si les membranes n'épousent pas parfaitement la forme des chevrons, l'humidité qui en résulte au niveau des flancs des chevrons peut à nouveau s'évaporer rapidement. Les frein-vapeurs hygrovariables pour les isolations entre les chevrons atteignent une valeur  $s_d$  d'environ 0,25 m dans la zone humide. Ils offrent donc un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment plus faible que DASATOP.

La résistance hygrovariable à la diffusion permet la pose fiable des membranes au niveau de tous les points singuliers, par exemple lors de chevêtres de fenêtres de toit, noues et arêtiers ou encore les toitures très accidentés (cheminées, lucarnes ...). La résistance à la diffusion peut adopter en n'importe quel endroit de la membrane une valeur  $s_d$  entre 0,05 et 2 m adaptée au climat et à la situation. Les membranes peuvent être posées dans le sens longitudinal ou transversal. L'utilisation de membranes ouvertes à la diffusion à l'extérieur ou la mise en place d'une isolation sur toiture en fibre ouverte à la diffusion s'avère avantageuse.

Lorsque des membranes avec une valeur  $s_d$  constante sont utilisées pour la pose en créneau, le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment diminue considérablement. En hiver, les membranes protègent l'isolation thermique de la pénétration d'humidité (à l'intérieur), comme le font les membranes hygrovariables. En été cependant, elles n'offrent aucune possibilité de séchage supplémentaire par évaporation de la construction. Si de la condensation se forme sur la face supérieure des chevrons, elle ne peut s'évaporer que lentement : le risque de dégâts au bâtiment augmente de façon considérable. En principe, les structures d'isolation thermique devraient être dotées de réserves de sécurité maximales. Celles-ci offriraient une protection supplémentaire contre les dégâts au bâtiment et les moisissures en cas de charges d'humidité imprévues. Cela protégerait aussi idéalement l'artisan des dégâts et d'une mise en cause de sa responsabilité. La pose en créneau de frein-vapeurs et membranes d'étanchéité à l'air hygrovariables avec une valeur  $s_d$  la plus réduite possible en cas d'humidité relative élevée de l'air offre la meilleure protection en termes de physique du bâtiment lors de la rénovation d'un toit par l'extérieur.

## Objectif de la construction

L'objectif de la construction n'est pas seulement de réaliser des habitations avec une réelle efficacité énergétique et un grand confort climatique, mais surtout de réaliser des constructions avec un climat intérieur sain pour ses occupants. Cela ne se réduit pas uniquement aux aspects toxicologiques; émanations (ou non) des matériaux de construction; mais aussi à l'absence (ou la présence) de moisissures dans la construction. En effet les spores attaquent le système immunitaire et favorisent / provoquent des allergies ; les productions des moisissures (composés organiques volatils microbiens - COVM) peuvent entraîner des troubles physiques et psychologiques. Lorsque les moisissures se trouvent dans un climat sec, elles perdent beaucoup de leur dangerosité. Par

contre, lorsqu'elles sont à nouveau humidifiées, il est bien connu que leur impact néfaste est réactivé.

Lorsque des moisissures se trouvent à la surface d'éléments de construction du côté intérieur (par exemple, à cause de ponts thermiques ou d'une condensation en surface), elles sont visibles et peuvent donc être détectées, puis éliminées, si nécessaire. Mais si des sources de moisissures se trouvent au sein d'une paroi, elles ne sont pas détectées. Année après année, elles sont réactivées par l'humidité, mettant ainsi constamment en péril la santé des occupants.

L'objectif de la construction ne devrait pas être d'exploiter totalement la sécurité de la physique du bâtiment, mais bien de générer le potentiel de sécurité maximal vis-à-vis des moisissures.

### 8 points garantissant une construction et mise en oeuvre durablement fiables



1. Les constructions garantissant une sécurité optimale sont celles dotées de frein-vapeurs et membranes d'étanchéité hygrovariables avec une résistance à la diffusion particulièrement faible dans la zone humide, à savoir  $< 0,10$  m.
2. Les membranes posées en créneau avec une résistance à la diffusion particulièrement faible en cas d'accumulation d'humidité peuvent se situer dans la zone de gel, au-dessus des chevrons. Le risque de formation de glace est pratiquement exclu en raison de la grande capacité de séchage et de la caractéristique de diffusion de la paroi.
3. Avec DASATOP, les taux d'humidité non critiques des chevrons sont atteints trois voire cinq fois (parfois même huit fois) plus rapidement. Cela garantit une grande protection contre la formation de moisissures.
4. L'isolation thermique est protégée de l'humidité due à l'utilisation de l'habitation et provenant de l'espace intérieur grâce à la pose d'une membrane dans la zone entre chevrons, avec des valeurs sd jusqu'à 2 m. Toute formation de condensation dans la couche d'isolation est exclue.
5. Les constructions ouvertes à la diffusion à l'extérieur ont des réserves de séchage plus grandes que celles avec des couches qui freinent la diffusion (par exemple avec des isolants en mousse).
6. Il est toujours recommandé d'effectuer un contrôle d'assurance qualité parallèlement à la construction. En cas de rénovation par l'extérieur, l'étanchéité à l'air peut se faire à l'aide d'un test de surpression, combiné à du brouillard artificiel. Les fuites sont alors faciles à détecter et à éliminer.
7. Lors de la pose en créneau, la fixation de la membrane devrait se faire de manière mécanique à l'aide de baguettes. Un collage supplémentaire est possible avec une colle de raccord étanche à l'air. Les rubans adhésifs ne collent pas sur les supports poussiéreux des vieux chevrons.
8. En raison des risques d'accidents et par souci du confort de mise en oeuvre, il convient de préférer les membranes non éblouissantes de couleur foncée aux membranes claires et notamment blanches.

Pour de plus amples informations, consultez notre brochure actuelle:

»Etude sur le calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment«

