

# Étude

Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'isolations thermiques dans les constructions en bois

- toits, murs, plafonds -

Freine-vapeurs pro clima DB+ et INTELLO®

à valeur  $\mu d$  variable selon le taux d'humidité

Calcul de simulation par ordinateur du transport combiné de chaleur et d'humidité de constructions de toitures et de murs avec prise en compte des conditions climatiques naturelles et des transports de liquides au sein des matériaux



<b>1. Prévention des dégâts au bâtiment dans les constructions en bois: une question de réserves de séchage</b>	<b>4</b>
1.1 Vue d'ensemble et introduction	4
1.2 Condensation – point de condensation – quantité d'eau de condensation	4
1.3 Charges d'humidité de la construction	5
1.3.1 Charge d'humidité par diffusion	5
1.3.2 Charge d'humidité par convection	5
1.3.3 Humidité due à la construction même – diffusion latérale	6
1.3.4 Apport d'humidité important par les matériaux de construction	6
1.3.5 Résumé des charges d'humidité	6
<b>2. Freine-vapeurs « intelligents »</b>	<b>8</b>
2.1 Séchage de la construction vers l'intérieur	8
2.2 Fonctionnement de la résistance à la diffusion variable selon le taux d'humidité	8
2.2.1 Grande résistance à la diffusion en hiver	9
2.2.2 Faible résistance à la diffusion en été	9
2.2.3 Profil de diffusion équilibré	9
2.2.4 Potentiel de sécurité maximal	9
<b>3. Détermination du potentiel de sécurité d'une construction de toiture</b>	<b>10</b>
3.1 Calcul des flux d'humidité selon différentes méthodes	10
3.1.1 Calcul selon Glaser – EN ISO 13 788	10
3.1.2 Calcul des transports combinés de chaleur et d'humidité dans des conditions climatiques naturelles	10
3.2 Détermination du potentiel de sécurité des constructions	10
3.2.1 Constructions de toitures	11
3.2.2 Définition du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment	11
3.3 Les facteurs d'influence à la dimension du potentiel	11
3.4 Le climat tempéré	11
3.4.1 Données climatiques Paris	11
3.4.2 Potentiel de sécurité d'un toit à forte pente à Paris, côté nord, pente du toit 40°	12
3.4.3 Potentiel de sécurité d'un toit vert et d'un toit plat à Paris	12
3.5 Le climat de haute montagne	13
3.5.1 Données climatiques Davos	13
3.5.2 Potentiel de sécurité d'un toit à forte pente à Davos, côté nord, pente du toit 40°	13
3.5.3 Potentiel de sécurité d'un toit vert et d'un toit plat	13
3.6 Conclusions sur les toitures	13
3.7 Diffusion latérale	14
3.8 Résultats du calcul de simulation bidimensionnel	14
3.9 Constructions des murs	15
<b>4. Recommandations de construction</b>	<b>16</b>
4.1 Constructions	16
4.2 Revêtement intérieur	16
4.3 Pièces humides en permanence	16
4.4 Pièces humides dans les habitations	16
4.5 Humidité dans les nouvelles constructions en cours	16
4.6 Sous-toiture	16
4.7 Toits à forte pente	17
4.8 Toits plats et toits verts	17
4.9 Toits en haute montagne	17
4.10 Murs	17
<b>5. Pose et mise en œuvre de INTELLO®, INTELLO® PLUS et DB+</b>	<b>18</b>
5.1 Pour les isolants sous forme de plaques et de nattes	18
5.2 Sens de la pose	18
5.3 Composants du système pro clima recommandés pour le collage	18
5.4 Isolants fibreux à insuffler	18
5.5 Isolants en mousse	18
5.6 Stabilité dimensionnelle	18
5.7 Résistances mécaniques	18
5.8 Structure translucide	19
5.9 Recyclage et écologie	19
5.10 Conclusion	19
<b>6. Littérature</b>	<b>20</b>

# 1. Prévention des dégâts au bâtiment dans les constructions en bois: une question de réserves de séchage

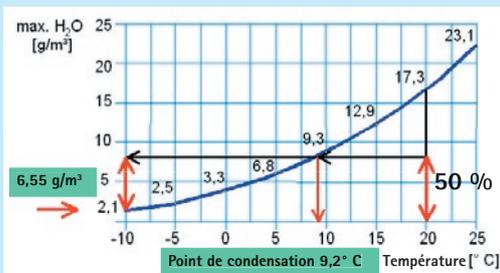
## Physique de l'humidité de l'air

En se refroidissant, l'air augmente son taux d'humidité.

Lorsque la température descend en dessous du point de condensation, cette humidité se condense.

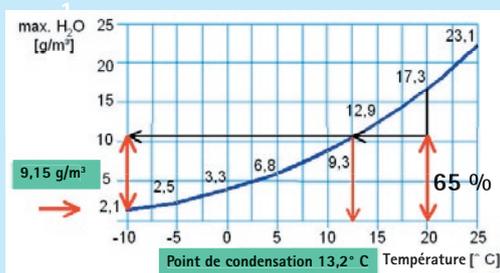
Lorsque le taux d'humidité de l'air ambiant est plus élevé, la température du point de condensation augmente. Conséquence: la condensation se forme plus tôt.

### 1. Physique de l'humidité de l'air à 50 % d'humidité relative de l'air



Dans des conditions climatiques standards (20° C / 50 % d'humidité relative de l'air), le point de condensation est atteint à 9,2° C. A -10° C, la condensation est de 6,55 g/m<sup>3</sup> d'air.

### 2. Physique de l'humidité de l'air à 65 % d'humidité relative de l'air



Lorsque le taux d'humidité de l'air ambiant est plus élevé, p.ex. à 65 %, le point de condensation est déjà atteint à 13,2° C. A -10° C, la condensation est de 9,15 g/m<sup>3</sup> d'air.

## 1.1 Vue d'ensemble et introduction

La présente étude décrit la manière dont les dégâts au bâtiment apparaissent dans les structures d'isolation thermique et les moyens qui permettent de protéger efficacement les constructions contre ces dégâts.

Les dégâts au bâtiment apparaissent lorsque la charge d'humidité dans une construction est supérieure à sa capacité de séchage. Pour éviter les dégâts au bâtiment, on se concentre d'habitude sur la réduction de la charge d'humidité. Or, les constructions bâties ne se laissent pas protéger complètement contre les influences de l'humidité.

Les charges d'humidité par diffusion qui sont prévisibles ne constituent pour ainsi dire jamais la cause des dégâts au bâtiment. Généralement, ces derniers sont dus aux charges d'humidité imprévisibles qui, en raison même de la construction, ne peuvent pas être totalement exclues.

Pour prévenir les dégâts au bâtiment et les moisissures, il faut donc se concentrer non seulement sur la charge d'humidité, mais aussi et surtout sur la capacité de séchage d'une construction. Les constructions à forte capacité de séchage et à charge d'humidité réduite, comme celles que permettent par exemple les freine-vapeurs à valeur  $\mu$ d variable, offrent une grande sécurité contre les dégâts au bâtiment, même en cas de charges d'humidité imprévisibles.

## 1.2 Condensation – point de condensation – quantité d'eau de condensation

Dans la construction en bois, l'isolation thermique sépare l'air intérieur chaud, d'un taux d'humidité élevé, de l'air extérieur froid, d'une humidité absolue réduite.

Lorsque de l'air ambiant chaud pénètre dans un élément de construction, cet air se refroidit au fil de son passage à travers la construction, en cas de climat extérieur hivernal.

Il peut y avoir alors condensation de l'humidité. La formation d'eau est due au comportement physique de l'air vis-à-vis de l'humidité: l'air chaud peut accumuler davantage d'humidité que l'air froid. Lorsque le taux d'humidité relative de l'air ambiant est plus élevé (p.ex. 65 %), la température du point de condensation augmente et, conséquence immédiate, aussi la quantité d'eau de condensation (voir figures 1 et 2). De l'eau de condensation se forme à

chaque fois qu'une couche d'un élément de construction plus étanche à la diffusion se trouve en dessous de la température du point de condensation. Autrement dit:

Les couches d'un élément de construction défavorables sont celles qui sont plus étanches à la diffusion sur le côté extérieur de l'isolation thermique que les couches de l'élément de construction situées sur le côté intérieur. La situation est très problématique lorsque de l'air chaud peut pénétrer dans l'élément de construction par des flux de convection, c'est-à-dire suite à des défauts d'étanchéité dans la couche d'étanchéité à l'air de l'élément de construction.

Les éléments de construction très ouverts à la diffusion sont ceux dont l'épaisseur de la couche d'air équivalente (valeur  $\mu$ d) est inférieure à 0,20 m. La valeur  $\mu$ d est définie comme le produit du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (valeur  $\mu$ ), en tant que constante matérielle, et de l'épaisseur de l'élément de construction exprimée en mètres:

$$\mu d = \mu \times \text{épaisseur [m]}$$

Une valeur  $\mu$ d basse peut s'obtenir au moyen d'une valeur  $\mu$  basse avec une épaisseur de couche plus grande (p.ex. panneaux isolants en fibres de bois) ou d'une valeur  $\mu$  élevée avec une épaisseur de couche très réduite (p.ex. bandes de sous-toiture). La vapeur d'eau s'oriente d'abord d'après la valeur  $\mu$ , puis seulement d'après l'épaisseur de la couche du matériau de construction. Cela signifie que l'eau de condensation apparaît plus rapidement avec une valeur  $\mu$  plus élevée qu'avec une valeur  $\mu$  réduite. En outre, au niveau des bandes de sous-toiture, il y a seulement une petite différence de pression de vapeur, en raison de l'absence fréquente d'une différence de température et d'humidité.

Cela explique pourquoi les dégâts au bâtiment peuvent aussi apparaître avec des bandes de sous-toiture ouvertes à la diffusion, lorsque le flux d'humidité est élevé dans l'élément de construction. Les bandes de sous-couverture et de sous-toiture à membrane monolithique, p.ex. SOLITEX UD et SOLITEX PLUS, offrent ici des avantages, parce que la diffusion ne se fait pas par les pores, mais activement le long des chaînes moléculaires.

Une fois que de l'eau s'est formée dans la construction, le climat froid de l'hiver peut occasionner la formation de givre, voire de glace sur la bande de sous-toiture ou sur la sous-toiture. L'eau et la glace sont imperméables à la vapeur d'eau et transforment alors la face extérieure d'une bande de sous-toiture en pare-vapeur.

Les constructions qui présentent à l'extérieur une couche qui freine voire empêche la diffusion, sont plus critiques en termes de physique du bâtiment que des couches d'élément de construction ouvertes à la diffusion vers l'extérieur.

Parmi les constructions étanches à la diffusion, citons notamment les toits à forte pente avec sous-couverture freinant la diffusion (p.ex. des bandes bitumées), les toits à couverture en tôles, les toits plats et les toits verts. Au niveau de la couche étanche à la diffusion, l'humidité s'accumule dans la construction, entraînant l'apparition d'eau de condensation.

### 1.3 Charges d'humidité de la construction

Dans la construction en bois, une charge d'humidité au sein d'une structure d'isolation thermique, p.ex. en toiture, peut avoir des causes variées. D'une part, un défaut d'étanchéité dans la couverture peut laisser pénétrer de l'eau. Il peut s'agir de grandes quantités d'humidité où l'eau tombe par gouttes dans l'espace habité. De petites fuites peuvent entraîner une humidification lente. Celle-ci s'accompagne souvent de la formation de moisissures sur les matériaux constitutifs de la construction. Mais d'autre part, une charge d'humidité dans la construction peut aussi avoir des causes internes, à savoir:

#### Charge d'humidité prévisible:

- des processus de diffusion

#### Charge d'humidité imprévisible:

- la convection, c'est-à-dire le flux d'air (défauts d'étanchéité dans la couche étanche à l'air)
- un transport d'humidité dû à la construction même (p.ex. diffusion latérale par maçonnerie adjacente)
- un apport d'humidité accru par les matériaux de construction mis en œuvre

#### 1.3.1 Charge d'humidité par diffusion

Jadis, on pensait que moins l'humidité pouvait pénétrer dans une construction, plus le risque de dégâts au bâtiment était faible. Autrement dit, des pare-vapeurs très épais empêcheraient les dégâts au bâtiment. Or, la réalité est différente, comme l'ont déjà démontré, il y a plus de dix ans, des calculs de physique du bâtiment, lors de la commercialisation du lé freine-vapeur pro clima DB+, avec une valeur  $\mu_d$  de 2,30 m. En outre, des analyses effectuées en 1999 [1] sur des murs extérieurs en Amérique du

nord montrent que même en cas de pose par un professionnel, l'apport d'humidité à travers un pare-vapeur occasionne une condensation d'environ  $250 \text{ g/m}^2$  par période de condensation, à cause de la convection. Cela correspond à une quantité d'eau de condensation qui est diffusée à travers un freine-vapeur avec une valeur  $\mu_d$  de 3,3 m durant un hiver [2].

#### Conclusion:

Dans les constructions avec pare-vapeurs dont les valeurs  $\mu_d$  théoriques s'élèvent à 50 m, 100 m ou davantage, il y a finalement aussi formation de quantités d'humidité considérables. Mais les pare-vapeurs ne permettent aucune évaporation en retour. D'où l'apparition de pièges à humidité.

#### 1.3.2 Charge d'humidité par convection

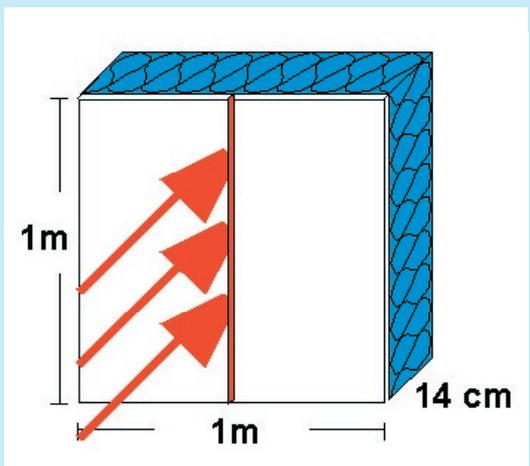
Les quantités d'humidité transportées dans la construction par convection, donc par flux d'air, sont sensiblement plus grandes que par diffusion.

La quantité d'humidité apportée par convection peut facilement être mille fois supérieure à celle apportée par diffusion (voir fig. 3).

En raison de leur grande charge d'humidité, les quantités d'humidité apportées par convection peuvent aussi devenir dangereuses pour des éléments de construction ouverts à la diffusion à l'extérieur, lorsque de l'eau de condensation s'est formée. Un film d'eau, tout comme la glace, est un pare-vapeur. Dans de telles constructions, cette situation entraîne généralement des dégâts au bâtiment.

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

### 3. Fente de 1 mm = $800 \text{ g/24 h}$ par m de longueur de fente



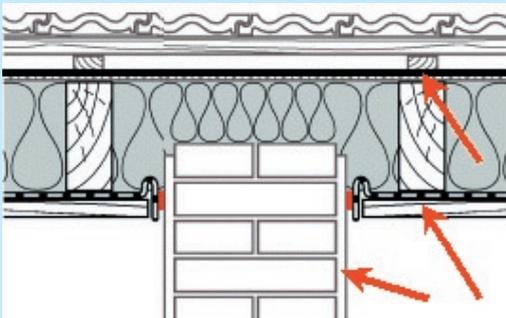
Transport d'humidité  
 par freine-vapeur:  $0,5 \text{ g/m}^2 \times 24\text{h}$   
 par fente de 1 mm:  $800 \text{ g/m}^2 \times 24\text{h}$   
**Augmentation par le facteur 1.600**

Conditions aux limites:  
 Freine-vapeur valeur  $\mu_d$  = 30 m  
 Température intérieure =  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Température extérieure =  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Différence de pression = 20 Pa  
 selon vent de force 2-3

Mesures: Institut für Bauphysik, Stuttgart [3]

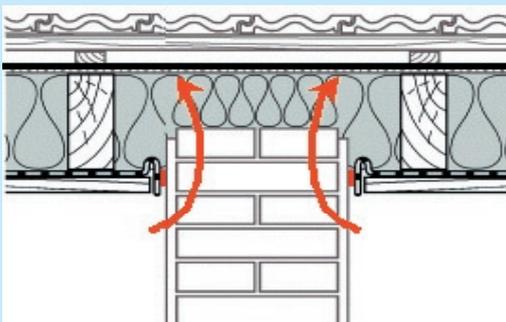
## Diffusion latérale

### 4. Dégâts au bâtiment: apport d'humidité malgré l'étanchéité à l'air du raccord et l'utilisation d'un pare-vapeur



Construction étanche à l'air avec film PE et enduit étanche à l'air, bande bitumée de sous-couverture à l'extérieur

### 5. Cause de l'apport d'humidité: transport de l'humidité par le côté, ici par le mur



Apport d'humidité par diffusion latérale par le mur adjacent

### 1.3.3 Humidité due à la construction même – diffusion latérale

Dans la pratique, des dégâts au bâtiment sont apparus qui ne s'expliquaient pas exclusivement par les processus de diffusion et de convection. Ruhe [4] et Klopfer [5], [6] ont attiré respectivement en 1995 et 1997 l'attention sur le problème de la diffusion latérale, en cas de dégâts au bâtiment.

La structure: toiture, voligeage avec bande bitumée sur la face extérieure, film synthétique en polyéthylène (PE) sur la face intérieure, laine minérale entre les deux. Malgré une étanchéité parfaite à l'air, de l'eau goutte à goutte en été au niveau des raccords de la bande, sur les éléments de construction inférieurs adjacents. Dans un premier temps, on a supposé que c'était dû à l'humidité accrue générée par la mise en œuvre. Comme la quantité de gouttes d'eau augmentait d'année en année, ce facteur devait être exclu.

Au bout de cinq ans, on décida d'ouvrir le toit. Le voligeage avait déjà pourri en grande partie.

La discussion porta alors sur l'apport d'humidité par diffusion latérale: de l'humidité pénètre dans le toit par les côtés du raccord latéral d'étanchéité à l'air, en l'occurrence par un mur de briques poreux. Le flux d'humidité contourne pour ainsi dire le freine-vapeur (voir figures 4 et 5).

Au début, les faits firent l'objet d'une discussion controversée parmi les physiiciens du bâtiment, jusqu'à ce qu'en 1997, Künzel [7] démontre la diffusion latérale par des calculs du transport bidimensionnel de la chaleur et de l'humidité réalisés à l'aide du logiciel WUFI 2D 2.1 [8]. D'après ses calculs, l'humidité du bois au-dessus du mur de briques était montée à environ 20 % après un an, dépassant donc déjà la limite critique pour les moisissures, avant de grimper à 40 % après trois ans et à 50 % après 5 ans.

### 1.3.4 Apport d'humidité important par les matériaux de construction

Lorsque des matériaux de construction sont mis en œuvre avec un taux d'humidité accru, il faut, pour préserver la construction, que cette humidité puisse à nouveau s'évaporer. Même si de nos jours, l'utilisation de bois de construction sec s'est imposée, rien n'empêche une averse d'en augmenter l'humidité.

### Concrètement, cela signifie ceci:

Un toit avec des chevrons 8/18 espacés de  $e = 0,70$  m comporte, par  $m^2$  de couverture, 1,5 mètres courants de chevrons. A un taux d'humidité de 10 %, cette partie de chevrons contient environ 1,1 litres d'eau. En d'autres termes: si l'humidité du bois est de 30 % au début, il faut, pour rester en deçà de l'humidité de 20 % critique pour les moisissures, pouvoir sécher 1,1 litres d'eau par  $m^2$  de couverture.

Cet exemple de calcul s'applique aussi à un voligeage de 20 mm d'épaisseur. A un taux d'humidité du bois de 10 %, celui-ci contient environ 1,2 litres d'eau.

A 30 % d'humidité relative au départ (ce qui n'est pas rare après un jour de pluie), il faut que 1,2 litres d'eau s'évaporent par  $m^2$  de couverture, pour rester en deçà de la limite de moisissure.

En tout, cela fait environ 2,3 litres par  $m^2$  de couverture.

La quantité totale d'humidité est souvent sous-estimée.

Dans la construction en dur, l'humidité du nouvel ouvrage risque de venir s'y rajouter. Si un film en polyéthylène étanche à la diffusion se trouve alors sur le côté intérieur et une bande bitumée en guise de sous-couverture sur le côté extérieur, des dégâts apparaissent rapidement au bâtiment.

### 1.3.5 Résumé des charges d'humidité

Les nombreuses possibilités d'apport en humidité montrent que dans le bâtiment, la charge d'humidité d'une construction n'est jamais à exclure. Lorsqu'il s'agit de construire sans occasionner des dégâts et des moisissures, l'augmentation des réserves de séchage constitue une solution nettement plus efficace et plus sûre que la concentration sur une réduction maximale de la pénétration d'humidité dans la construction.

**Formule de sécurité:**

**Capacité de séchage > charge d'humidité  
=> prévention des dégâts au bâtiment**

Des dégâts peuvent seulement apparaître au bâtiment lorsque la capacité de séchage est inférieure à la charge d'humidité.

**«Plus la réserve de séchage d'une construction est grande, plus la charge d'humidité imprévisible peut être élevée, tout en préservant la construction de dégâts au bâtiment.»**

Les constructions qui sont ouvertes à la diffusion à l'extérieur possèdent une plus grande réserve de séchage que les constructions étanches à la diffusion à l'extérieur.

Nous devons protéger  
ce qui nous  
tient à cœur

pro clima DB+:  
la solution écologique  
pour l'étanchéité à l'air



Freine-vapeur et étanchéité à l'air DB+

Lé d'étanchéité **DB+**

La solution sympa



**MOLL**  
bauökologische Produkte GmbH  
Rheintalstr. 35-43  
D-68723 Schwetzingen  
Allemagne  
[www.proclima.com](http://www.proclima.com)

## 2. Freine-vapeurs « intelligents »

### Comportement de l'humidité dans la construction

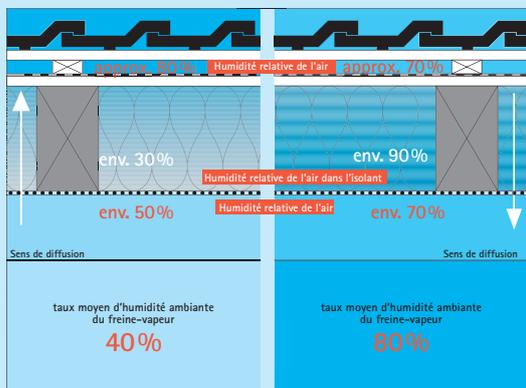
Le flux de diffusion va toujours du chaud vers le froid:

En hiver:  
humidité accrue sur le côté extérieur

En été:  
humidité accrue sur le côté intérieur

### 6. Le freine-vapeur se trouve

- en hiver dans une zone avec une humidité de l'air réduite, donc le freine-vapeur à diffusion variable selon le taux d'humidité est plus étanche à la diffusion
- en été dans une zone avec une humidité de l'air élevée, donc le freine-vapeur à diffusion variable selon le taux d'humidité est plus ouvert à la diffusion



Représentation des taux d'humidité relative de l'air au niveau du freine-vapeur selon la saison

### 7. Flux de diffusion des freine-vapeurs pro clima à diffusion variable selon le taux d'humidité

Flux de diffusion	Sens de diffusion	Valeur $W_{DD}$ en g/m <sup>2</sup> par semaine	
		DB+	INTELLO®
en hiver	vers la construction: humidification	28	7
en été	vers l'espace intérieur: séchage	175	560

### 2.1 Séchage de la construction vers l'intérieur

Vers l'intérieur, une autre possibilité de séchage déterminante s'offre à l'élément de construction: à chaque fois que la température extérieure de l'isolation est supérieure à sa température intérieure, le flux de diffusion s'inverse: l'humidité présente dans l'élément de construction se répand à l'intérieur. C'est déjà le cas durant les jours ensoleillés au printemps et en automne et plus fortement encore pendant les mois d'été.

Si un niveau de freine-vapeur et d'étanchéité à l'air était alors ouvert à la diffusion, l'humidité éventuellement présente dans la construction pourrait s'évaporer et sécher vers l'intérieur.

Mais en hiver, un freine-vapeur ouvert à la diffusion laisserait diffuser trop d'humidité dans la construction et causerait ainsi des dégâts au bâtiment.

Avec l'utilisation de pare-vapeurs, la construction semble a priori protégée contre l'humidité. Cependant, s'il y a un apport d'humidité par convection, diffusion latérale ou des matériaux de construction très humides, un séchage ultérieur vers l'intérieur en été n'est pas possible. Le pare-vapeur devient alors rapidement un piège à humidité.

La solution idéale est un freine-vapeur avec une résistance à la diffusion forte en hiver et faible en été.

Cela fait maintenant plusieurs années que ces freine-vapeurs « intelligents » à valeur  $\mu_d$  variable selon le taux d'humidité ont parfaitement fait leurs preuves. Ils modifient leur résistance à la diffusion selon l'humidité relative de l'air ambiant.

Ainsi, par climat hivernal, ils sont plus étanches à la diffusion et protègent la construction de l'humidité. Par climat estival, ils sont plus ouverts à la diffusion et permettent un séchage vers l'extérieur de l'humidité éventuellement présente dans la construction.

### 2.2 Fonctionnement de la résistance à la diffusion variable selon le taux d'humidité

La direction du flux de diffusion est déterminée par le gradient de la pression partielle de la vapeur d'eau. Cette pression dépend de la température et du taux d'humidité de l'air à l'intérieur et/ou à l'extérieur d'un bâtiment.

Si pour simplifier, on examine seulement la température, on constate que l'humidité passe du côté chaud vers le côté froid. En hiver, de l'intérieur vers l'extérieur et en été, de l'extérieur vers l'intérieur.

Des mesures prises dans des toits ont montré que par climat hivernal, le freine-vapeur se situe dans une humidité ambiante d'environ 40 % en moyenne, en raison du transport de l'humidité présente dans l'aire des chevrons vers l'extérieur. En revanche, par climat estival, l'humidité relative de l'air augmente au niveau du freine-vapeur, en cas de présence d'humidité dans l'aire des chevrons, et de l'eau de condensation peut même s'y former (voir fig.6).

Les freine-vapeurs avec une résistance à la diffusion variable selon le taux d'humidité sont plus étanches à la diffusion dans un environnement sec et plus ouverts à la diffusion dans un environnement humide.

Depuis 1991, le freine-vapeur pro clima DB+ a parfaitement fait ses preuves, lors de la pose sur des millions de mètres carrés. Sa résistance à la diffusion varie entre 3,5 et 0,8 m.

En 2004, la société MOLL bauökologische Produkte GmbH a développé le freine-vapeur à haut rendement pro clima INTELLO®. Avec une fourchette entre 0,25 m et plus de 10 m, INTELLO® possède la plus grande variabilité de la résistance à la diffusion au monde, variable selon le taux d'humidité et efficace dans toutes les zones climatiques (voir figures 8 à 10).

### 2.2.1 Grande résistance à la diffusion en hiver

La résistance à la diffusion du freine-vapeur étanche à l'air pro clima INTELLO® a été réglée de manière à ce que par climat hivernal, il puisse avoir une valeur  $\mu$ d de plus de 10 m. Résultat: en hiver, lorsque la pression d'humidité sur la construction est la plus forte, le freine-vapeur ne laisse pénétrer presque pas d'humidité dans l'élément de construction.

Cela vaut également dans des conditions climatiques extrêmes, comme en haute montagne, où l'hiver peut être très froid et très long. Mais aussi dans les toits plats ou verts, les toits à bandes de sous-couverture étanches à la diffusion (p.ex. les bandes bitumées) et les toits avec couverture en tôles, la construction bénéficie d'une protection efficace contre l'humidité de l'air ambiant. La valeur  $\mu$ d élevée constitue également un avantage dans les toits ouverts à la diffusion à l'extérieur, lorsqu'il s'agit d'empêcher la formation de givre et de glace (qui empêchent la diffusion) sur une bande de sous-couverture ouverte à la diffusion (voir fig. 10).

### 2.2.2 Faible résistance à la diffusion en été

Par climat estival, la résistance à la diffusion peut tomber à une valeur  $\mu$ d de 0,25 m. Résultat: un séchage rapide vers l'intérieur de l'humidité éventuellement présente dans la construction. Selon la hauteur du gradient de la pression de la vapeur, cela correspond à une capacité de séchage de 5-12 g/m<sup>2</sup> de H<sub>2</sub>O à l'heure. Si l'on part d'une durée d'ensoleillement de 8 heures par jour pendant laquelle la température sous la couverture est supérieure à celle qui règne à l'intérieur d'un bâtiment, cela correspond à une capacité de séchage d'environ 40-100 g/m<sup>2</sup> de H<sub>2</sub>O par jour, soit 250-700 g/m<sup>2</sup> de H<sub>2</sub>O par semaine (voir fig. 7).

Grâce à cette grande capacité de séchage, l'élément de construction sèche rapidement dès le printemps. Cela permet donc de compenser la formation d'eau de condensation dans la construction par convection, diffusion latérale ou des matériaux de construction très humides.

### 2.2.3 Profil de diffusion équilibré

A une époque où les étanchéités à l'air sont meilleures et s'accompagnent de taux d'humidité de l'air plus élevés dans les nouvelles constructions en dur, la résistance à la diffusion joue un rôle important en cas d'augmentation de l'humidité relative de l'air.

La résistance à la diffusion du freine-vapeur INTELLO® a été réglée de manière à atteindre une valeur  $\mu$ d de plus de 2 m à un taux d'humidité relative de l'air de 65 %. La résistance est comparable à celle du lé pro clima DB+.

Cela permet d'éviter un apport d'humidité trop important dans la construction en cas d'augmentation de l'humidité relative de l'air à cause de l'habitation même.

Même en cas de charges d'humidité accrues durant la phase de construction, p.ex. lors de la réalisation d'une chape et du crépissage, INTELLO® garde un comportement favorable. A un taux d'humidité relative de l'air de 75 %, la valeur  $\mu$ d dépasse 1,0 m. En hiver, il faut veiller à éviter des taux d'humidité de l'air supérieurs à 75 % sur une longue durée. Dans ce cas, il convient d'aérer suffisamment.

### 2.2.4 Potentiel de sécurité maximal

Le comportement « intelligent » des freine-vapeurs à diffusion variable selon le taux d'humidité rend les structures d'isolation thermique très sûres, même en cas d'apport d'humidité imprévu dans la construction, p.ex. à cause de conditions climatiques défavorables, de défauts d'étanchéité, d'une diffusion latérale ou d'une humidité accrue due à la mise en œuvre de bois de construction ou de matériaux isolants. Ils agissent comme une pompe qui extrait activement de l'élément de construction, l'humidité qui s'y trouve éventuellement de manière imprévue.

Cela vaut d'autant plus pour les constructions situées en haute montagne (climat extrême) et pour les constructions étanches à la diffusion à l'extérieur, p.ex. les toits à bandes de sous-couverture étanches à la diffusion (p.ex. les bandes bitumées), les toits avec couverture en tôles et les toits plats ou verts.

## Adaptation de la diffusion par les freine-vapeurs

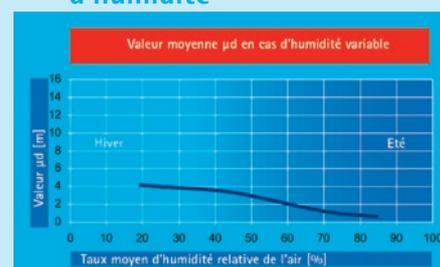
Plus la variabilité de la résistance à la diffusion est étendue entre l'hiver et l'été, plus la sécurité offerte par le freine-vapeur est grande.

### 8. Adaptation de la diffusion d'un film en PE – pas de variabilité selon le taux d'humidité



Valeur  $\mu$ d constante  
Film PE

### 9. Adaptation de la diffusion de pro clima DB+ – variabilité moyenne selon le taux d'humidité



Valeur  $\mu$ d variable selon le taux d'humidité pro clima DB+

### 10. Adaptation de la diffusion de INTELLO® – grande variabilité selon le taux d'humidité

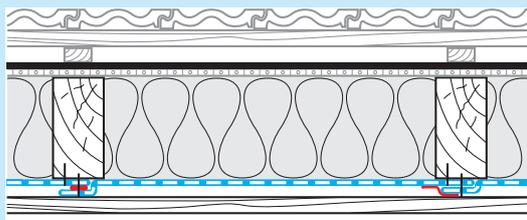


Valeur  $\mu$ d variable selon le taux d'humidité

### 3. Détermination du potentiel de sécurité d'une construction de toiture

## Évaluation de constructions de toitures en termes de physique du bâtiment

#### 11. Structure de la construction de toiture



Couches de l'élément de construction:

- étanche à la diffusion à l'extérieur (bande de sous-toiture bitumée: valeur  $\mu_d = 300$  m)
- voligeage en bois massif 24 mm
- isolation de fibres
- freine-vapeurs avec différentes valeurs  $\mu_d$
- niveau d'installation
- panneaux de plâtre

Variantes de toitures étudiées:

- toit à forte pente (40°) orienté au nord, couverture de tuiles rouges
- toit plat avec couche de gravier de 5 cm
- toit plat avec couche de gravier de 5 cm (18/32) et 8 cm de substrat végétal à verdure extensive

#### 3.1 Calcul des flux d'humidité selon différentes méthodes

Les réserves de séchage résultent non seulement des processus de diffusion, mais aussi des processus de sorption et de capillarité dans les couches des éléments de construction.

##### 3.1.1 Calcul selon Glaser EN ISO 13 788

La norme EN ISO 13 788 continue à se baser sur la méthode de Glaser. Celle-ci calcule les quantités d'eau de condensation qui s'accumulent dans les constructions en partant des valeurs moyennes mensuelles.

##### 3.1.2 Calcul des transports combinés de chaleur et d'humidité dans des conditions climatiques naturelles

La méthode Glaser est une bonne approche pour l'évaluation de constructions, mais elle ne correspond pas à la réalité. D'une part, les données climatiques types divergent par rapport au climat réel ; d'autre part, la méthode ne tient pas compte de mécanismes de transport importants comme la sorption et la capillarité.

C'est pourquoi la norme EN ISO 13 788 renvoie au fait que cette méthode ne convient pas pour garantir l'absence de dégâts au bâtiment pour les toits verts. Dans ce cas, il faut calculer les transports de chaleur et d'humidité avec un programme de simulation instationnaire. Parmi les solutions logicielles connues, citons Delphin 4 de l'institut « Institut für Bauklimatik » (génie climatique du bâtiment) à Dresde et WUFI 3.3 pro [10] de l'institut « Fraunhofer Institut für Bauphysik » (physique du bâtiment) à Holzkirchen.

Ces logiciels calculent le transport combiné de chaleur et d'humidité dans des éléments de construction multicouches en fonction de conditions climatiques naturelles, en prenant en compte également la température et le taux d'humidité, l'absorption de lumière du soleil, le vent, le froid dû à l'évaporation ainsi que la sorption et la capillarité.

La valeur de ces logiciels a été confirmée à plusieurs reprises, grâce à la comparaison des résultats de calcul avec des essais en plein air. Pour ce faire, il faut disposer des données météorologiques correspondantes d'une année, sous forme de valeurs horaires.

Des données climatiques sont disponibles partout dans le monde, en Europe, en Amérique du nord et en Asie, pour des zones climatiques tant extrêmes que tempérées. Pour les calculs de simulation, l'élément de construction est encodé dans le logiciel avec la succession de ses couches, puis analysé sur plusieurs années.

Cette analyse permet alors de déterminer si de l'humidité s'accumule dans l'élément de construction, c'est-à-dire si le taux d'humidité total de la construction augmente sur la durée considérée ou si l'élément de construction reste sec. Cette méthode ne permet cependant pas de cerner l'ampleur des réserves de séchage d'une construction.

#### 3.2 Détermination du potentiel de sécurité des constructions

Pour déterminer le degré de sécurité d'une construction en cas d'apport d'humidité imprévu, p.ex. par convection, diffusion latérale ou des matériaux de construction très humides, on utilise un paramètre supplémentaire.

On humidifie l'isolation thermique au départ du calcul et on analyse la vitesse à laquelle cette humidité s'évapore.

**La quantité d'humidité qui s'évapore de la construction en raison de l'augmentation du taux d'humidité dans l'élément de construction correspond au potentiel de sécurité dont dispose cet élément de construction par rapport à l'apparition de dégâts au bâtiment.**

Plusieurs constructions considérées comme critiques en termes de physique du bâtiment et dotées de différents freine-vapeurs sont étudiées.

Les calculs portent sur des conditions défavorables (p.ex. côté nord d'un toit à forte pente), dans différentes zones climatiques (p.ex. haute montagne) et avec différentes formes de toits (toit à forte pente, toit plat, toit vert). Les constructions favorables en termes de physique du bâtiment offrent par conséquent encore de meilleures garanties.

### 3.2.1 Constructions de toitures

Structure de la construction: (voir fig. 11)

Freine-vapeurs:

- film PE 50 m constante
- freine-vapeur 2,3 m constante
- pro clima DB+ 2,3 m variable selon le taux d'humidité
- pro clima INTELLO® 0,25 – 10 m variable selon le taux d'humidité

Variantes de toitures:

- toit à forte pente (40°) orienté au nord, tuiles rouges
- toit plat avec 5 cm de gravier
- toit plat avec 5 cm de gravier (18/32) et 8 cm de substrat végétal à verdure extensive

Emplacements:

- Paris, France altitude = 42 m
- Davos, Suisse, altitude = 1.560 m

Calcul:

- Avec WUFI 3.3 pro [10]
- Humidité initiale dans l'isolation thermique 4.000 g/m<sup>2</sup>

### 3.2.2 Définition du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment

Le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment décrit, quelle quantité d'humidité imprévue peut pénétrer dans une construction sans y causer des dégâts ou de la moisissure.

Une valeur essentielle pour la prévention des dégâts au bâtiment et des moisissures est la possibilité de rediffusion en été et, par conséquent, de séchage de la construction vers l'intérieur. Elle existe lorsque la pression partielle de la vapeur sur le côté extérieur de l'isolation est supérieure à celle du côté intérieur. Pour simplifier, disons que la température sur le côté extérieur de l'isolation doit être supérieure à celle du côté intérieur.

La température sur la face extérieure de l'isolation est influencée par la température de l'air extérieur et par l'ensoleillement.

### 3.3 Les facteurs d'influence à la dimension du potentiel

La capacité de la diffusion vers l'extérieur, c'est-à-dire la capacité de séchage, dépend de la température extérieure.

Plus la température à l'extérieur est élevée, plus la diffusion vers l'extérieur augmente et plus l'effet de séchage se montre en utilisant des freine-vapeurs à diffusion variable.

En raison de l'ensoleillement, la température de la surface de toiture est supérieure à la température de l'air.

Mais la température de la surface de toiture dépend de la pente de toiture, de son orientation (nord/sud) et de la couleur de sa couverture (clair/sombre).

**Les facteurs défavorables:**

une orientation vers le nord  
une pente de toiture élevée (> 25°)  
une couleur claire de la couverture  
une sous-toiture à diffusion fermée, p.ex. une feuille bitumée  
un climat froid (dans le nord du pays ou en haute-montagne)

**Les facteurs favorables:**

une orientation vers le sud  
une pente de toiture peu élevée (< 25°)  
une couleur sombre de la couverture  
une sous-toiture à diffusion ouverte, p.ex. SOLITEX un climat chaud (dans le sud du pays)

Pour le calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, les conditions les plus défavorables étaient choisies. (voir 3.2.1 variantes de toiture)

Si les conditions sont plus favorables, le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'une construction augmente.

Les calculs présents montrent, que la mise en oeuvre de freine-vapeur INTELLO® accorde aux constructions de toiture en France un grand potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, même sous les facteurs d'influence les plus défavorables. Et aussi le freine-vapeur DB+ donne une sécurité suffisante aux constructions.

## 3.4 Le climat tempéré

### 3.4.1 Données climatiques Paris

Paris se situe à une altitude de 42 m et est caractérisé par un climat tempéré.

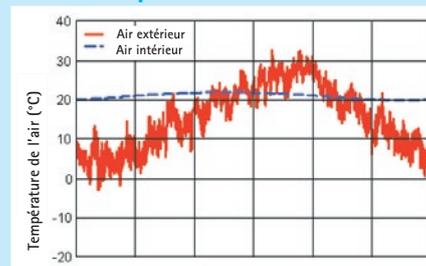
Les diagrammes suivants montrent les variations de température sur un an. La ligne bleue indique la température intérieure, les barres rouges correspondent aux températures extérieures (fig. 12 à 15).

En tenant compte du rayonnement solaire et global, on obtient une température à la surface du toit en partie nettement plus élevée que celle de l'air. A chaque fois que la température extérieure (en rouge) dépasse la température intérieure (en bleu), un séchage vers l'intérieur a lieu avec les freine-vapeurs à diffusion variable selon le taux d'humidité. Une rediffusion est donc possible à Paris de nombreux jours dans l'année, même en cas d'orientation au nord, et elle intervient dès l'hiver, aux jours ensoleillés, en cas d'orientation au sud.

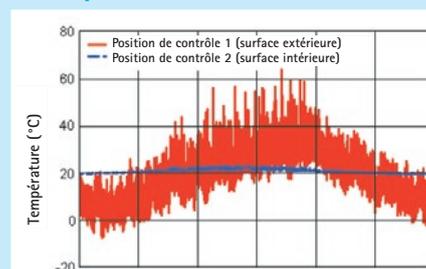
Dans notre exemple de calcul, nous nous sommes basés sur le cas défavorable, c'est-à-dire une orientation du toit au nord avec une pente de 40°, et sur une durée de calcul de 10 ans.

## Évolution des températures à Paris, altitude 42 m, France Couverture: tuiles rouges ou gravier

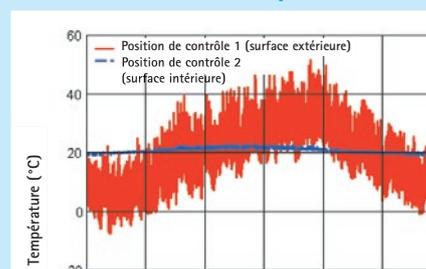
### 12. Température de l'air



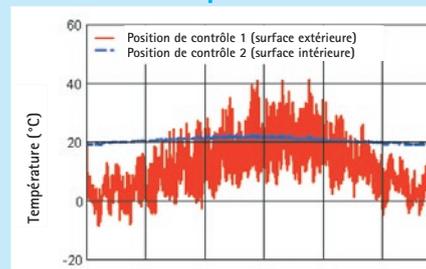
### 13. Température à la surface du toit, côté nord, pente du toit 40°



### 14. Température à la surface du toit, côté sud, pente du toit



### 15. Température à la surface du toit, toit plat

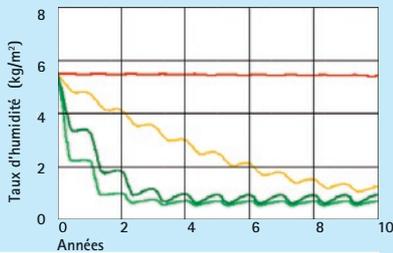


## Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment du site Paris, toiture

Humidité initiale supplémentaire supposée: 4.000 g/m<sup>2</sup>

Taux d'humidité de la construction à l'état sec (= taux d'humidité du voligeage à 15 %): 1.700 g/m<sup>2</sup>

### 16. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, côté nord, pente du toit 40°



Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment:

pro clima INTELLO® = 3300 g/m<sup>2</sup> par an  
 pro clima DB+ = 2000 g/m<sup>2</sup> par an  
 Valeur µd 2,3 m constante = 500 g/m<sup>2</sup> par an  
 Valeur µd 50 m constante = < 10 g/m<sup>2</sup> par an

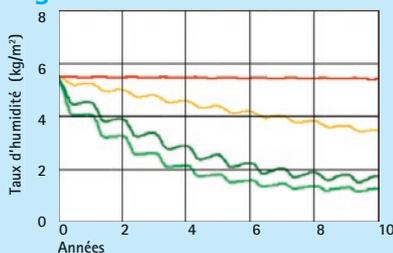
### 17. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert avec 13 cm de terre/gravier



Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment:

pro clima INTELLO® = 1300 g/m<sup>2</sup> par an  
 pro clima DB+ = 700 g/m<sup>2</sup> par an  
 Valeur µd 2,3 m constante = trop humide  
 Valeur µd 50 m constante = < 10 g/m<sup>2</sup> par an

### 18. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit plat avec 5 cm de gravier



Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment:

pro clima INTELLO® = 1500 g/m<sup>2</sup> par an  
 pro clima DB+ = 800 g/m<sup>2</sup> par an  
 Valeur µd 2,3 m constante = trop humide  
 Valeur µd 50 m constant = < 10 g/m<sup>2</sup> par an

### 3.4.2 Potentiel de sécurité d'un toit à forte pente à Paris, côté nord, pente du toit 40°

(voir fig. 16)

La vitesse de séchage de l'humidité initiale supplémentaire supposée indique le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de la construction par rapport à l'humidité imprévue (convection, diffusion latérale etc.).

On peut constater que le film PE ne permet pas de séchage. L'humidité présente dans la construction ne peut plus s'en échapper. Avec un freine-vapeur à valeur µd constante de 2,30 m, les réserves de séchage sont réduites.

La construction avec le lé pro clima DB+ occasionne un séchage nettement plus rapide et possède d'importantes réserves de sécurité.

Le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® offre à la construction le potentiel de sécurité maximal. D'après les calculs réalisés avec le logiciel WUFI 3.3 pro [10], il est possible de charger la construction de 3.300 g d'eau par m<sup>2</sup> et par an sans occasionner des dégâts au bâtiment.

### 3.4.3 Potentiel de sécurité d'un toit vert et d'un toit plat à Paris

(voir figures 17 et 18)

Les deux constructions offrent une moins bonne sécurité que le toit à forte pente, parce que les épaisse couches de l'élément de construction situées au-dessus de l'isolation thermique sont réchauffées plus lentement. Grâce à la couche de gravier plus fine, le toit plat offre une plus grande sécurité que le toit vert.

Comme avec le toit à forte pente, aucun séchage n'est possible avec le film PE. Déjà de petites charges d'humidité imprévues causent des dégâts au bâtiment.

Avec un freine-vapeur à valeur µd constante de 2,30 m, le taux d'humidité global est trop élevé dans la construction.

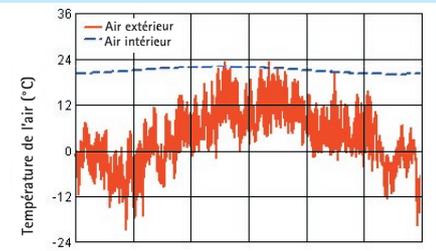
Ici aussi, des dégâts au bâtiment apparaîtraient. La construction avec le lé pro clima DB+ occasionne un séchage et possède encore des réserves de sécurité.

Le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® offre à la construction le potentiel de sécurité maximal. D'après les calculs réalisés avec le logiciel WUFI 3.3 pro [10], la

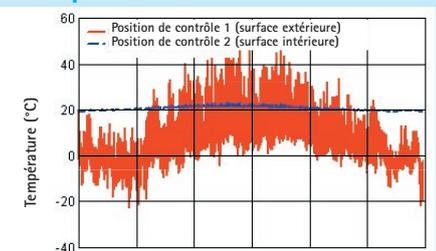
construction peut supporter 1.300 à 1.500 g d'eau par m<sup>2</sup> et par an sans que des dégâts apparaissent au bâtiment.

## Évolution des températures à Davos, altitude 1.560 m, Suisse Couverture: tuiles rouges / gravier

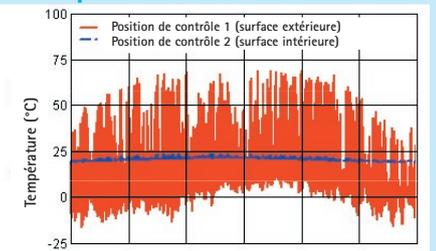
### 19. Température de l'air



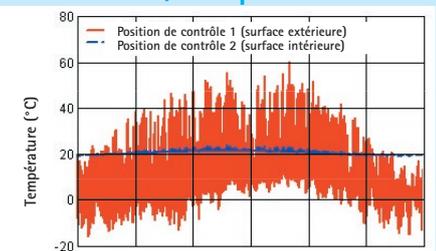
### 20. Température à la surface du toit, côté nord, pente du toit 40°



### 21. Température à la surface du toit, côté sud, pente du toit 40°



### 22. Température à la surface du toit, toit plat



### 3.5 Le climat de haute montagne

#### 3.5.1 Données climatiques Davos

Davos se situe à une altitude de 1.560 m et connaît donc un climat de haute montagne. Les diagrammes suivants montrent les variations de température sur un an.

La ligne bleue indique la température intérieure, les barres rouges correspondent aux températures extérieures (voir figures 19 à 22).

Si l'on étudie la température de l'air à Davos, il s'avère que les jours où la température extérieure est supérieure à la température intérieure y sont très rares dans l'année.

En tenant compte du rayonnement solaire et global, on obtient une température plus élevée à la surface du toit que celle de l'air. Les jours où une rediffusion est possible sont rares.

En hiver, les températures nocturnes sont spécifiques à la haute montagne et sensiblement plus basses.

Dans notre exemple de calcul, pour minimiser l'ensoleillement, nous nous sommes basés sur le cas défavorable, c'est-à-dire une orientation du toit au nord avec une pente de 40°.

#### 3.5.2 Potentiel de sécurité d'un toit à forte pente à Davos, côté nord, pente du toit 40° (voir fig. 23)

Les températures extrêmement basses en hiver entraînent la formation de quantités considérables d'eau de condensation, de sorte que la construction avec le film PE devient elle aussi humide, même si l'on suppose qu'aucune charge d'humidité imprévue n'est donnée.

Avec un freine-vapeur à valeur  $\mu_d$  constante de 2,30 m, la formation d'humidité est rapide.

Le lé pro clima DB+ n'est pas non plus en mesure de garder la construction au sec. Seul le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® permet une construction impeccable en termes de physique du bâtiment et offre un réel potentiel de sécurité. D'après les calculs réalisés avec le logiciel WUFI 3.3 pro [10], il est possible de charger la construction d'environ 1.500 g d'eau supplémentaires par m<sup>2</sup> et par an sans occasionner des dégâts au bâtiment.

#### 3.5.3 Potentiel de sécurité d'un toit vert et d'un toit plat

(voir figures 24 et 25)

Les deux constructions offrent une moins bonne sécurité que le toit à forte pente, parce que les épaisses couches de l'élément de construction situées au-dessus de l'isolation thermique sont réchauffées plus lentement. Comme à Paris, aucun séchage n'est possible avec le film PE. Déjà de petites charges d'humidité imprévues causent des dégâts au bâtiment.

Avec un freine-vapeur à valeur  $\mu_d$  constante de 2,30 m, la formation d'humidité est très rapide avec les deux constructions.

La construction avec le lé pro clima DB+ occasionne dans le toit plat un taux d'humidité trop élevé.

Le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® offre encore une solution à haut potentiel de sécurité pour le toit plat avec une couche de 5 cm de gravier. Pour le toit vert, la température extérieure à Davos ne suffit plus pour un séchage en retour.

### 3.6 Conclusions sur les toitures

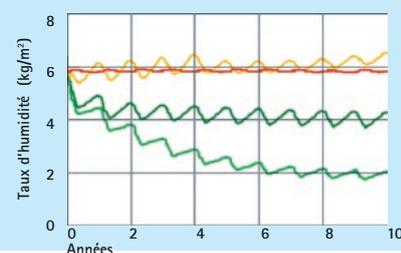
Le lé pro clima DB+ et le freine-vapeur INTELLO® permettent d'atteindre des potentiels très élevés de prévention des dégâts au bâtiment au niveau du toit. Même en cas d'humidité supplémentaire due à des influences imprévues, les constructions restent préservées de dégâts au bâtiment. INTELLO® et DB+ sont également en mesure de compenser la diffusion latérale par un mur de briques, telle que décrite par Ruhe [4], Klopfer [5], [6] et Künzel [7].

Depuis plus de 10 ans, le lé pro clima DB+ a parfaitement fait ses preuves dans la prévention des dégâts au bâtiment lors de la pose de millions de mètres carrés dans des constructions critiques. Avec le freine-vapeur INTELLO®, les toits à forte pente étanches à la diffusion sur le côté extérieur et les toits plats recouverts de gravier en haute montagne disposent d'un potentiel suffisant de prévention des dégâts au bâtiment.

### Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment du site Davos, toiture

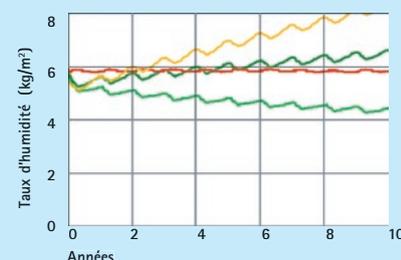
Données: voir calcul Holzkirchen en page 12

#### 23. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, côté nord, pente du toit 40°



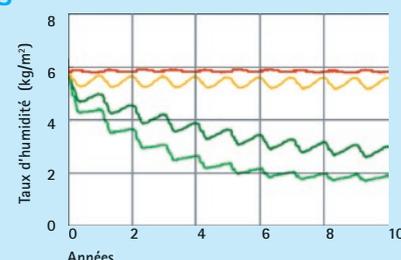
Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment:  
 pro clima INTELLO® = 1500 g/m<sup>2</sup> par an  
 pro clima DB+ = trop humide  
 Valeur  $\mu_d$  2,3 m constante = formation d'humidité!  
 Valeur  $\mu_d$  50 m constante = < 10 g/m<sup>2</sup> par an

#### 24. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert avec 13 cm de terre/gravier



Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment:  
 pro clima INTELLO® = 200 g/m<sup>2</sup> par an  
 pro clima DB+ = formation d'humidité!  
 Valeur  $\mu_d$  2,3 m constante = formation d'humidité!  
 Valeur  $\mu_d$  50 m constante = < 10 g/m<sup>2</sup> par an

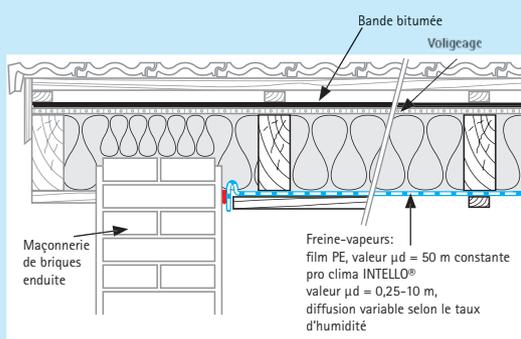
#### 25. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit plat avec 5 cm de gravier



Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment:  
 pro clima INTELLO® = 1200 g/m<sup>2</sup> par an  
 pro clima DB+ = 500 g/m<sup>2</sup> par an  
 $s_d$ -Wert 2,30 m konst. = < 10 g/m<sup>2</sup> par an  
 $s_d$ -Wert 50 m konst. = < 10 g/m<sup>2</sup> par an

## Calcul bidimensionnel des flux de chaleur et d'humidité avec WUFI 2D

### 26. Structure de la construction: mur intégré

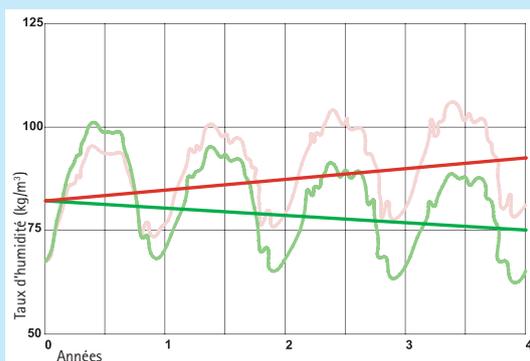


### 27. Augmentation de l'humidité avec un film en PE

→ formation d'humidité = dégâts au bâtiment

réduction de l'humidité avec INTELLO®

→ séchage = prévention des dégâts au bâtiment



Taux d'humidité croissant dans l'élément de construction avec un film PE, valeur  $\mu_d = 50$  m constante

Taux d'humidité décroissant dans l'élément de construction avec pro clima INTELLO®, valeur  $\mu_d = 0,25 - 10$  m, diffusion variable selon le taux d'humidité

### 3.7 Diffusion latérale

Pour déterminer l'influence de l'apport en humidité par les flancs d'un élément de construction, on examine le raccord entre un mur extérieur intégré et une structure d'isolation thermique. Sur le côté extérieur dans la sous-toiture, la construction dispose d'une bande de toiture bitumée étanche à la diffusion (voir fig. 26).

En règle générale, la maçonnerie a une résistance à la diffusion sensiblement plus faible que la couche freine-vapeur et d'étanchéité à l'air de la construction en bois adjacente. Cela permet la diffusion d'humidité dans la construction d'isolation thermique, par ce flanc.

Pour cet exemple, le choix s'est porté sur la situation dans une nouvelle construction. La maçonnerie et la couche d'enduit disposent d'un taux d'humidité alors habituel de  $30 \text{ kg/m}^3$ . L'isolant thermique fibreux est mis en œuvre à sec et le taux d'humidité relatif du bois du voligeage est de 15 %. Comme couches freine-vapeur et d'étanchéité à l'air, on utilise dans l'une des deux constructions un film en PE qui empêche la diffusion (valeur  $\mu_d = 50$  m) et dans l'autre construction pro clima INTELLO® à diffusion variable selon le taux d'humidité (valeur  $\mu_d = 0,25$  à  $10$  m).

### 3.8 Résultats du calcul de simulation bidimensionnel

Lorsque les flux de chaleur et d'humidité d'une telle construction sont déterminés par la méthode de calcul dimensionnelle appliquée dans WUFI 2D 2.1 [8], cela donne le résultat reproduit en figure 27.

Après une augmentation saisonnière du taux d'humidité dans les deux constructions, celles-ci se trouvent à un haut niveau pratiquement identique. Dans la variante avec le film en PE comme couche d'étanchéité à l'air et freine-vapeur, on observe chaque année, sur la période d'étude de quatre ans, une nette augmentation du taux d'humidité total (voir graphique rouge). Dans cette construction, l'humidité s'accumule dans les matériaux de construction présents, parce qu'aucune rediffusion dans l'espace intérieur n'est possible à travers le film de PE.

Résultat: apparition de moisissures sur le bois et/ou début du pourrissement.

Dans la construction avec le freine-vapeur à haut rendement INTELLO®, l'humidité présente dans la construction peut s'évaporer vers l'intérieur. L'élément de construction est protégé de l'accumulation d'humidité, celle-ci étant rapidement évacuée dans l'espace intérieur (voir graphique vert). Ainsi, le taux d'humidité diminue constamment durant la période d'étude de quatre ans. Cette construction dispose d'un grand potentiel de prévention des dégâts aux bâtiments.

### 3.9 Constructions des murs

En raison de leur orientation verticale, les constructions des murs présentent une moindre absorption de lumière du soleil que les constructions de toitures. C'est pourquoi leur potentiel de rediffusion est inférieur.

En règle générale, les murs ne sont pas étanches à la diffusion sur le côté extérieur, contrairement aux toitures. On n'y utilise pas de bandes bitumées.

Pour les murs, il n'y a pas d'exigence stricte en matière d'étanchéité à l'eau comme p.ex. pour les toits plats et les toits verts.

Les températures dans le mur extérieur dépendent essentiellement de la couleur de la façade. Sur les façades claires, l'ensoleillement produit des températures moins élevées que sur les façades plus sombres.

Les profils de température sur le mur extérieur présentés ici apparaissent dans le cas de façades enduites, d'une couleur normalement claire (voir figures 28 à 31).

Le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® offre aussi aux murs un potentiel de sécurité considérable.

Si à l'aide du logiciel WUFI 3.3 pro [10], on calcule pour le climat de Paris un mur extérieur orienté au nord avec une bande bitumée sur le côté extérieur d'une valeur  $\mu_d = 300$  m et une façade extérieure dans une couleur normalement claire, la construction offre encore toujours un potentiel de sécurité considérable, en cas d'utilisation du freine-vapeur INTELLO®.

Même dans des régions climatiques plus froides jusqu'aux emplacements de haute montagne comme Davos, les constructions des murs qui comportent des couches de l'élément de construction sur le côté extérieur de l'isolation, sont sûres avec le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® jusqu'à une valeur  $\mu_d$  de 10 m.

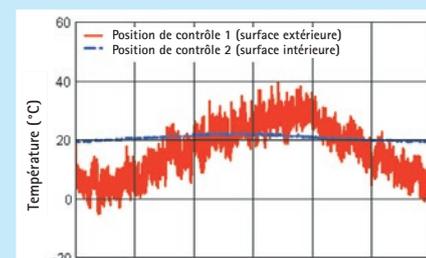
Pour le lé DB+, les éléments de construction situés à l'extérieur de l'isolation peuvent avoir une valeur  $\mu_d$  maximale de 6 m pour le climat de Paris et de 0,10 m pour Davos.

## Évolution des températures à Paris et Davos

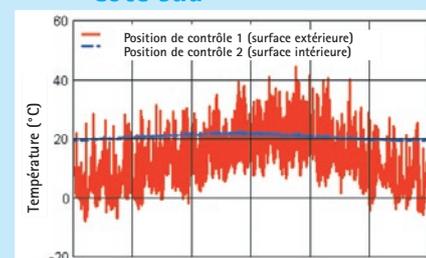
### Mur, façade enduite claire

#### Températures du mur à Paris

##### 28. Température du mur, côté nord

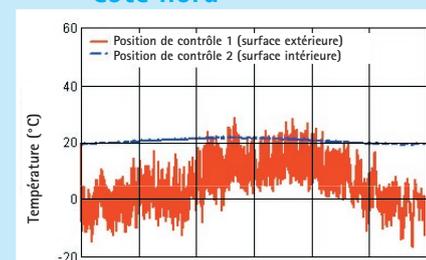


##### 29. Température du mur, côté sud

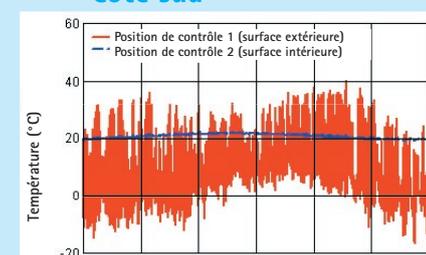


#### Températures du mur à Davos

##### 30. Température du mur, côté nord



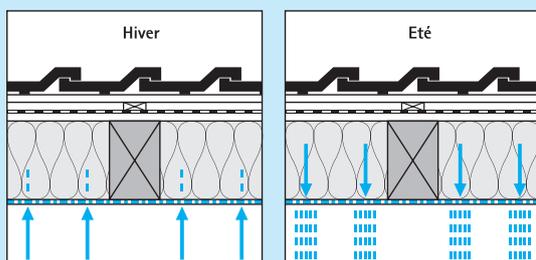
##### 31. Température du mur, côté sud



## 4. Recommandations de construction

### Condition requise pour garantir l'effet des freine-vapeurs à diffusion variable selon le taux d'humidité

A l'intérieur, il peut seulement y avoir des couches d'élément de construction ouvertes à la diffusion, afin de ne pas empêcher l'évaporation de l'humidité par rediffusion dans l'espace intérieur.



### 4.1 Constructions

Les études de physique du bâtiment réalisées avec des données climatiques réelles montrent l'énorme potentiel de prévention des dégâts au bâtiment pour les constructions qui ont recours soit à pro clima INTELLO®, le freine-vapeur à haut rendement qui offre dans toutes les zones climatiques la meilleure résistance à la diffusion variable au monde, soit à pro clima DB+, le lé freine-vapeur à diffusion variable qui a fait largement ses preuves depuis plus de dix ans.

Avec pro clima DB+ et INTELLO®, les constructions bénéficient aussi d'une grande sécurité contre les dégâts au bâtiment en cas de charges d'humidité accrues.

Pour cela, il faut une situation sans ombre, c'est-à-dire sans arbres ni bâtiments voisins.

### 4.2 Revêtement intérieur

Les grandes réserves de sécurité sont seulement possibles si l'humidité peut s'évaporer librement vers l'intérieur. Les revêtements freinant la diffusion qui sont posés sur le côté intérieur du freine-vapeur à diffusion variable selon le taux d'humidité, comme par exemple les matériaux dérivés du bois (plaques OSB ou panneaux multiplex), réduisent la quantité d'humidité qui peut s'évaporer en retour vers l'intérieur et donc aussi le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment. Les matériaux avantageux sont ceux à structure ouverte, comme par exemple les voligeages, les panneaux légers en laine de bois avec enduits et les panneaux de plâtre.

### 4.3 Pièces humides en permanence

Les freine-vapeurs à diffusion variable selon le taux d'humidité ne peuvent pas être utilisés dans des conditions climatiques qui présentent une humidité permanente, comme p.ex. dans les piscines couvertes, les jardinerie ou les grands cuisines.

### 4.4 Pièces humides dans les habitations

Les pièces humides dans les habitations ont seulement de manière temporaire une humidité relative accrue. Cette charge d'humidité provisoire ne diminue en rien le fonctionnement et la sécurité de la construction avec pro clima DB+ et INTELLO®.

### 4.5 Humidité dans les nouvelles constructions en cours

Dès que l'isolation thermique a été mise en œuvre, il faut poser le freine-vapeur, afin d'empêcher toute formation d'eau de condensation dans l'isolation. Sans freine-vapeur, plusieurs litres d'eau au m<sup>2</sup> peuvent s'y accumuler en peu de temps.

Par ailleurs, le taux d'humidité relative de l'air dans le chantier ne devrait pas dépasser 75 % en hiver ; après le crépissage et la réalisation des chapes, il convient de prévoir une aération suffisante et d'installer, le cas échéant, des déshumidificateurs de chantier.

Le profil de diffusion des freine-vapeurs pro clima à diffusion variable selon le taux d'humidité est réglé de manière à ce qu'en cas de taux d'humidité relative de l'air de 75 %, les lés aient encore une résistance à la diffusion de plus de 1 m. Cela réduit la sollicitation de la construction par un apport en humidité indésirable dans la phase de construction.

Il faudrait malgré tout éviter une augmentation de l'humidité de l'air dans la phase de construction, parce qu'elle réduit le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment.

### 4.6 Sous-toiture

Idéalement, il convient de choisir comme sous-toiture des matériaux ouverts à la diffusion (p.ex. des panneaux de sous-toiture en fibres de bois ou des bandes de sous-toiture ou de sous-toiture SOLITEX à membrane sans pores) qui permettent une évaporation importante vers l'extérieur.

Les constructions avec des éléments extérieurs étanches à la diffusion, comme p.ex. les bandes bitumées, les toits plats et les toits verts, ainsi que les toits à couverture en tôles réduisent la sécurité de l'élément de construction en termes de physique du bâtiment. Les voligeages en bois massif offrent de meilleures garanties que les panneaux en matériaux dérivés du bois (p.ex. OSB) parce que le bois a une résistance à la diffusion variable selon le taux d'humidité et une bonne capillarité. Grâce à sa grande variabilité selon le taux d'humidité, INTELLO® offre un très grand potentiel de sécurité, même dans le cas des matériaux dérivés du bois.

Si on utilise pro clima DB+ pour une sous-toiture étanche à la diffusion, il convient d'éviter les panneaux en matériaux dérivés en bois.

#### 4.7 Toits à forte pente

En combinaison avec les constructions ouvertes à la diffusion à l'extérieur, les réserves de séchage sont tellement grandes qu'en cas d'utilisation des freine-vapeurs pro clima DB+ et INTELLO®, il n'y a pas de limite d'altitude pour l'emplacement.

Même à des altitudes supérieures à 3.000 m, les constructions sont sûres.

Pour les constructions de toits à forte pente étanches à la diffusion à l'extérieur (p.ex. sous-couverture avec bandes bitumées), les limites reprises en [figure 32](#) sont d'application.

#### 4.8 Toits plats et toits verts

Sur le côté extérieur, les toits plats et les toits verts ont toujours une enveloppe étanche à la diffusion qui sert d'étanchéité à l'eau et de protection contre les racines. En règle générale, ils ne peuvent pas comporter de vide ventilé efficace parce qu'en l'absence de pente, il n'y a pas de poussée aérostatique.

Plus la couche de gravier ou de substrat (toit vert) sur le toit plat est épaisse, moins la couche isolante se réchauffe de l'extérieur, par ensoleillement. Cela réduit la rediffusion dans l'espace intérieur et les réserves de sécurité. Ici aussi, le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® offre à la construction une grande sécurité contre les dégâts au bâtiment, grâce à sa résistance à la diffusion variable selon le taux d'humidité, et ce, même en cas de charges d'humidité imprévues. Les calculs de simulation avec des données climatiques réelles donnent les limites d'application reprises en [figure 33](#).

Dans le secteur de la construction, les toits plats et les toits verts font partie des structures d'isolation thermique les plus exigeantes et les plus critiques en termes de physique du bâtiment.

En raison de sa résistance à la diffusion extrêmement variable selon le taux d'humidité, pro clima INTELLO® constitue la solution la plus sûre pour ces constructions. L'humidité qui a éventuellement pénétré ou qui se trouve dans la construction peut s'évaporer ensuite en très grande quantité, sans causer une nouvelle humidification critique. Si les toits plats et les toits verts doivent bénéficier d'une sécurité maximale, il convient d'utiliser INTELLO® comme freine-vapeur.

#### 4.9 Toits en haute montagne

Les toits à forte pente étanches à la diffusion à l'extérieur peuvent être dotés en toute sécurité du freine-vapeur INTELLO® jusqu'à une altitude de 1.600 m et ont un grand potentiel de prévention des dégâts au bâtiment.

Pour calculer le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment pour des sites plus élevés, nous ne disposons actuellement pas de données climatiques en Europe.

Mais comme des toits à forte pente étanches à la diffusion à l'extérieur et dotés du freine-vapeur INTELLO® gardent même dans des zones climatiques arctiques comme en Alaska (p.ex. Anchorage) un grand potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, on peut partir du principe qu'en Europe centrale, des bâtiments situés à une altitude supérieure à celle de Davos sont également sûrs.

En cas de doute, on peut aussi envisager un vide ventilé, mais celui-ci doit alors remplir des exigences particulières, vu la longue période durant laquelle le toit reste couvert de neige.

Si nécessaire, n'hésitez pas à contacter la ligne d'assistance de pro clima pour des détails de construction.

#### 4.10 Murs

En raison du moindre ensoleillement, les murs possèdent un plus petit potentiel de rediffusion et, par conséquent, des réserves de sécurité moins importantes.

Pour les murs, les valeurs de résistance à la diffusion reprises en [figure 34](#) s'appliquent au côté extérieur de l'isolation.

### Domaines d'application de INTELLO® et DB+

#### 32. Toits à forte pente

Constructions	INTELLO®	DB+
Constructions étanches à la diffusion à l'extérieur sans vide ventilé (sans ombre, pas de couches freine-vapeur du côté intérieur)	jusque 1.600 m d'altitude	jusque 1.000 m d'altitude, pas de panneaux en matériaux dérivés du bois
Constructions ouvertes à la diffusion à l'extérieur	pas de limite d'altitude	pas de limite d'altitude

#### 33. Toits plats et toits verts

Constructions	INTELLO®	DB+
Toit plat avec une couche de gravier de max. 5 cm sans vide ventilé (sans ombre, pas de couches freine-vapeur du côté intérieur)	jusque 1.600 m d'altitude	jusque 800 m d'altitude, pas de panneaux en matériaux dérivés du bois
Toit vert avec une couche de gravier et de substrat de max. 15 cm sans vide ventilé (sans ombre, pas de couches freine-vapeur du côté intérieur)	jusque 1.000 m d'altitude	jusque 800 m d'altitude pas de panneaux en matériaux dérivés du bois

#### 34. Murs

Constructions	INTELLO®	DB+
Couches de l'élément de construction situées à l'extérieur pour des murs jusqu'à une altitude de 700 m (pas de couches freine-vapeur du côté intérieur)	résistance illimitée à la diffusion	résistance à la diffusion max. 6 m
Couches de l'élément de construction situées à l'extérieur pour des murs jusqu'à une altitude de 1.600 m (pas de couches freine-vapeur du côté intérieur)	résistance à la diffusion max. 10 m	résistance à la diffusion max. 0,10 m

## 5. Pose et mise en œuvre de INTELLO®, INTELLO® PLUS et DB+

### Phases de la pose

#### 1. Pose / fixation



#### 2. Collage des joints



#### 3. Raccord au pignon



#### 4. Raccord à la fenêtre



#### 5. Raccord au percement



#### 5.1 Pour les isolants sous forme de plaques et de nattes

Poser INTELLO® avec le côté filmé (marquage) tourné vers la pièce.

Si INTELLO® a été posé avec le côté non-tissé tourné vers la pièce, cela ne nuit pas au bon fonctionnement du freine-vapeur en termes de physique du bâtiment. Bien appuyer sur les rubans adhésifs. Le collage est préférable sur le côté filmé.

pro clima DB+ a une structure symétrique. Le choix du côté du freine-vapeur qui sera tourné vers la pièce est donc libre.

#### 5.2 Sens de la pose

Les lés pro clima INTELLO® et DB+ peuvent être posés de manière parallèle ou transversale à la structure portante. En cas de pose parallèle, les joints doivent se trouver sur la structure portante. En cas de pose transversale, l'écart entre les bois de construction sera de 100 cm au maximum.

#### 5.3 Composants du système pro clima recommandés pour le collage

Tous les rubans adhésifs pro clima conviennent au collage des chevauchements de lés. Nous recommandons plus particulièrement le ruban à collage rapide pro clima RAPID CELL ainsi que le ruban adhésif universel UNI TAPE pour les lés pro clima DB+ et INTELLO®. Pour les raccords aux fenêtres et portes ainsi que pour le collage des coins, le ruban adhésif TESCON PROFIL convient parfaitement, grâce à sa grande résistance au perçage par choc et à son film de séparation divisé en trois.

Les colles de raccord ORCON F (INTELLO®) et ECO COLL (pour DB+) permettent la réalisation fiable des raccords aux éléments de construction adjacents (p.ex. les murs pignons enduits).

Le ruban de raccord CONTEGA PV à armature de crépissage intégrée sert à réaliser le raccord précis à la maçonnerie nue avant son crépissage.

#### 5.4 Isolants fibreux à insuffler

Le lé pro clima DB+ peut servir de couche de confinement pour tous les types d'isolants à insuffler. Du côté intérieur, un lattis transversal d'un écart maximal de 65 cm devrait soutenir le poids de l'isolant.

En raison de sa grande élasticité, le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® ne convient pas au confinement intérieur d'isolants à insuffler. Pour cette technique, nous proposons le freine-vapeur INTELLO® PLUS doté d'une solide armature en PP. INTELLO® PLUS offre le même potentiel de prévention des dégâts au bâtiment que INTELLO®.

#### 5.5 Isolants en mousse

Avec les isolants en mousse, la résistance variable à la diffusion n'agit plus guère, parce que la rediffusion est considérablement entravée. C'est pourquoi il convient d'éviter les isolants en mousse dans les constructions exigeantes et critiques en termes de physique du bâtiment, p.ex. dans celles qui sont ouvertes à la diffusion à l'extérieur.

#### 5.6 Stabilité dimensionnelle

Le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® ne rétrécit pas. Il peut être posé bien tendu et sans affaissement. INTELLO® possède à la fois une grande élasticité et une bonne résistance à la déchirure.

Après humidification puis séchage, pro clima DB+ rétrécit légèrement. C'est pourquoi le lé ne devrait pas être posé trop tendu. Le raccord aux éléments de construction adjacents doit se faire avec une boucle d'extension, pour compenser leurs mouvements.

#### 5.7 Résistances mécaniques

INTELLO® et DB+ ont une grande résistance à la déchirure au clou. Résultat: aux endroits d'agrafage, les lés sont bien protégés de l'arrachement et de la propagation de déchirures.

## 5.8 Structure translucide

Le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® est translucide et laisse donc transparaître les matériaux qu'il recouvre. INTELLO® n'est pas complètement transparent, de sorte que les bords du lé restent bien visibles. C'est pratique lors de la réalisation de raccords avec des éléments de construction adjacents, comme p.ex. au niveau des pannes faîtières et intermédiaires, des fenêtres de toiture et des cheminées, mais aussi lors du collage des chevauchements de lés.

## 5.9 Recyclage et écologie

Le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® se compose à 100 % de polyoléfine; la membrane spéciale est en copolymère de polyéthylène, le non-tissé et le tissu en polypropylène. Cela permet un recyclage aisé.

pro clima DB+ se compose de 50 % de cellulose de recyclage et peut seulement faire l'objet d'une récupération thermique, en raison de son voile de vitrofibrés.

## 6. Conclusion

Les constructions avec DB+ et INTELLO® possèdent d'énormes réserves de sécurité et préviennent donc les dégâts au bâtiment et les moisissures. Même en cas de charges d'humidité imprévues ou inévitables dans la pratique, les constructions disposent d'un excellent potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, grâce aux grandes réserves de séchage offertes par les freine-vapeurs de sécurité à diffusion variable selon le taux d'humidité.

Le freine-vapeur à haut rendement INTELLO® possède la plus grande variabilité de la résistance à la diffusion au monde, variable selon le taux d'humidité et efficace dans toutes les zones climatiques. Ainsi, il offre aux structures d'isolation thermique une sécurité sans pareil à ce jour, qu'il s'agisse de constructions ouvertes à la diffusion à l'extérieur ou de constructions exigeantes en termes de physique du bâtiment, comme les toits plats, les toits verts, les couvertures en tôles et les toits à sous-couverture étanche à la diffusion.

Le rendement du freine-vapeur INTELLO® est tout aussi impressionnant dans des conditions climatiques extrêmes, comme en haute montagne.

De qualité éprouvée, le lé pro clima DB+ offre jusqu'en moyenne altitude une excellente sécurité pour les constructions de toits.

Conformément aux exigences de la norme DIN 68 800-2, les freine-vapeurs à diffusion variable selon le taux d'humidité permettent de se passer d'un produit chimique de préservation du bois. pro clima offre une sécurité supplémentaire avec sa garantie de système valable 6 ans.

Avec les bandes freine-vapeur et d'étanchéité à l'air INTELLO® et DB+, la règle de sécurité pro clima se réalise une fois de plus:

**« Plus la réserve de séchage d'une construction est grande, plus la charge d'humidité imprévisible peut être élevée, tout en préservant la construction de dégâts au bâtiment. »**

Pour plus d'informations sur la mise en œuvre et les détails de construction, veuillez contacter la ligne d'assistance technique de pro clima:

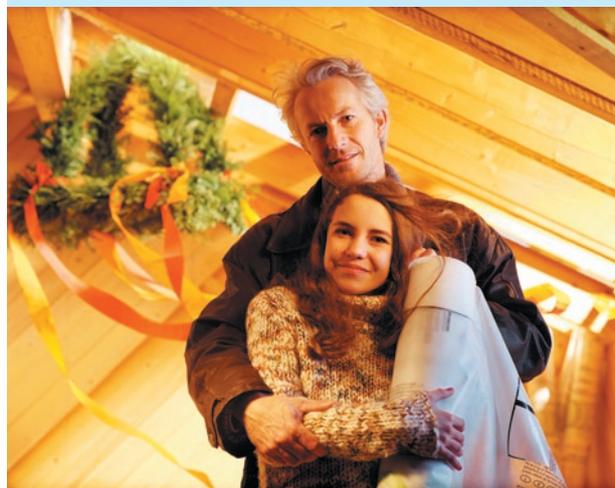
N° tél.: +49 (0)62 02 - 27 82.0

N° fax: +49 (0)62 02 - 27 82.21

E-mail: [info@proclima.com](mailto:info@proclima.com)

Une sécurité  
absolument unique  
au monde pour les  
grands et les petits

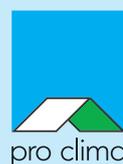
INTELLO® – une protection  
intelligente et écologique  
contre les moisissures



Freine-vapeur et étanchéité à l'air INTELLO®

INTELLO®

L'enveloppe intelligente pour la maison



MOLL  
bauökologische Produkte GmbH  
Rheintalstr. 35-43  
D-68723 Schwetzingen  
Allemagne  
[www.proclima.com](http://www.proclima.com)

## 6. Littérature

- [1] TenWolde, A. et al.: „Air pressures in wood frame walls, proceedings thermal VII.“; Ashrae Publication Atlanta, 1999
- [2] IBP Mitteilungen 355: „Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis?“
- [3] Deutsche Bauzeitung; n° 12/89; page 1639 et suiv.
- [4] DAB 1995; page 1479; n° 8
- [5] Klopfer, Heinz; Bauschäden-Sammlung, volume 11, Günter Zimmermann (éd.), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1997
- [6] Klopfer, Heinz; ARCONIS: Wissen zum Planen und Bauen und zum Bauprodukt: Flankenübertragung bei der Wasserdampfdiffusion; n° 1/1997, page 8-10
- [7] H.M. Künzel; Tauwasserschäden im Dach aufgrund von Diffusion durch angrenzendes Mauerwerk; wksb 41/1996; n° 37; pages 34-36
- [8] WUFI 2D 2.1; logiciel destiné au calcul du transport bidimensionnel combiné de la chaleur et de l'humidité dans les éléments de construction; Fraunhofer Institut für Bauphysik  
Infos sous [www.wufi.de](http://www.wufi.de)
- [9] DIN 4108-3: Isolation thermique et économie d'énergie dans les bâtiments – 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
- [10] WUFI 3.3 pro; logiciel destiné au calcul du transport bidimensionnel combiné de la chaleur et de l'humidité dans les éléments de construction; Fraunhofer Institut für Bauphysik  
Infos sous [www.wufi.de](http://www.wufi.de)

## INFOS

[www.proclima.com](http://www.proclima.com)

MOLL bauökologische Produkte GmbH

Rheintalstraße 35 – 43  
D-68723 Schwetzingen  
Allemagne

N° tél.: +49 (0) 62 02 – 27 82.0  
N° fax: +49 (0) 62 02 – 27 82.21  
E-mail: [info@proclima.com](mailto:info@proclima.com)  
Internet: [www.proclima.com](http://www.proclima.com)