

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

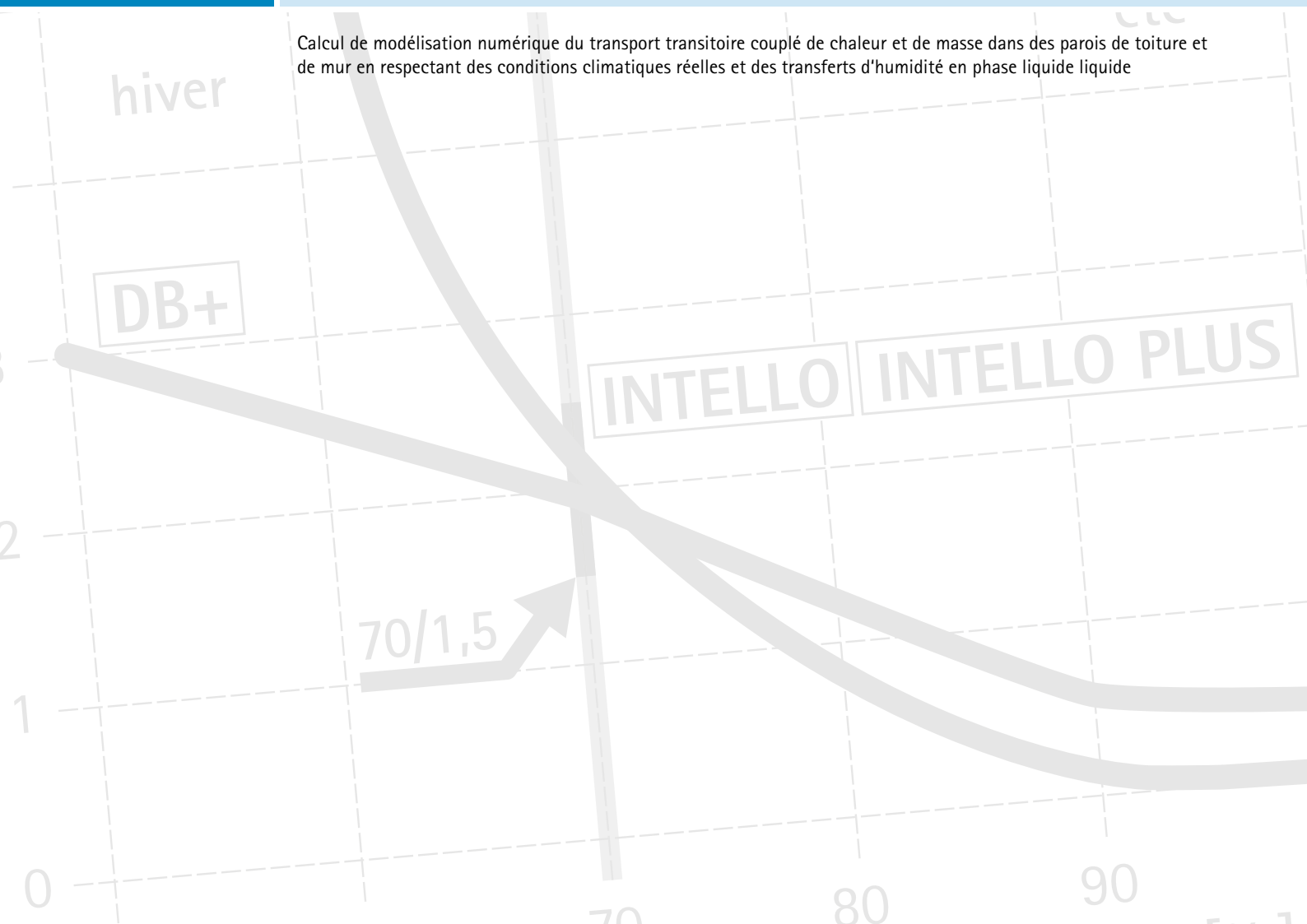
Etude d'isolations thermiques dans des constructions en bois et en acier

Frein-vapeurs hygrovariables pro clima DB+ et INTELLO avec hygrorégulation intelligente

Toits, murs, plafonds

France, Belgique, Suisse

Calcul de modélisation numérique du transport transitoire couplé de chaleur et de masse dans des parois de toiture et de mur en respectant des conditions climatiques réelles et des transferts d'humidité en phase liquide





Étude physique du bâtiment

1	Prévention des dégâts au bâtiment d'isolations thermiques dans les constructions bois	4	5	Belgique	18
1.1	Vue d'ensemble et introduction	4	5.1	Calculs pour la Belgique	18
1.2	Condensation - point de rosée - quantité de condensation	4	5.2	Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'un toit à forte pente, Bruxelles, versant nord, pente du toit 40°	18
1.3	Charges d'humidité de la construction	5	5.3	Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toits plats	18
1.3.1	Charge d'humidité par diffusion	5	5.3.1	Toit plat en gravier	18
1.3.2	Charge d'humidité par convection	6	5.3.2	Toit plat végétalisé	19
1.3.3	Humidité due à la construction même - diffusion latérale	6	6	Suisse	20
1.3.4	Apport d'humidité important par les matériaux de construction	6	6.1	Calculs pour la Suisse	20
1.4	Résumé des charges d'humidité	7	6.2	Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'un toit à forte pente, versant nord, pente du toit 40°	20
2	Frein-vapeurs « intelligents »	8	6.3	Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit plat en gravier	20
2.1	Assèchement de la des frein-vapeurs construction vers l'intérieur de la construction vers l'intérieur 8	8	6.4	Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit plat végétalisé	21
2.2	Fonctionnement de la résistance hygrovariable à la diffusion	8	7.	Influence de l'épaisseur de la couche d'isolation	22
2.2.1	Certification du système hygrovariable	9	8.	Conclusions sur le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment	22
2.2.2	Grande résistance à la diffusion en hiver	9	9	Détermination de l'aptitude à l'emploi	23
2.2.3	Faible résistance à la diffusion en été	9	9.1	Méthode d'évaluation	23
2.2.4	Profil de diffusion équilibré	10	9.2	Aptitude à l'emploi des toitures inclinées (40°)	24
	Construction neuve : période de séchage (règle 60/2)	10	9.3	9.3 Aptitude à l'emploi des toitures plates gravillonnées	24
	Période de chantier : la valeur hydrosafe (règle 70/1,5)	10	9.4	Aptitude à l'emploi des toitures végétalisées	24
2.2.5	Sécurité maximale	10	9.5	Conclusion de l'aptitude à l'emploi	24
3	Détermination du potentiel de sécurité d'une toiture	11	10	Diffusion latérale	25
3.1	Validation des parois par calcul	11	10.1	Résultats de la simulation bi-dimensionnelle	25
3.1.1	Calcul selon Glaser	11	10.2	Conclusion sur la diffusion latérale	25
3.1.2	Calcul des transports combinés de chaleur et d'humidité	11	10.3	Cas des murs extérieurs	25
3.2	Définition du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment	12	11	Recommandations de construction	26
3.2.1	Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment (PPDB)	12	11.1	Constructions	26
3.3	Toiture	12	11.2	Parement intérieur	26
3.3.1	Toit en pente	12	11.3	Pièces humides en permanence	26
3.3.2	Toits plats	12	11.4	Constructions neuves: phase de séchage - règle 60/2	26
3.4	Frein-vapeurs et autres facteurs	12	11.5	Pièces humides dans les habitations	26
3.5	Emplacements	12	11.6	Période de chantier: valeur hydrosafe - règle 70/1,5	26
3.6	Facteurs d'influence sur le niveau du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment	12	11.7	Sous-toiture	27
4	France	13	11.8	Toiture inclinée	27
4.1	Calculs pour la France	14	11.9	Toitures plates et végétalisées	27
4.1.1	Zones climatiques influencées par le climat maritime (H1A, H2A à H2C)	14	11.10	Remarques complémentaires sur les domaines d'application	27
4.1.2	Zones climatiques continentales (H1B, H1C)	14	11.11	Toitures inclinées en altitude	28
4.1.3	Zones climatiques méditerranéennes (H2D, H3)	14	11.12	Murs	28
4.1.4	Evolution des températures	14	11.13	Assurance qualité	28
4.2	Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'un toit à forte pente, versant nord, pente du toit 40°	14	12	Conclusion	28
4.3	Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment toit plat en gravier	15			
4.4	Toit plat végétalisé	15			

Bibliographie

- [1] Déclaration de consensus du 2e congrès international « Holz[Bau] Physik » du 10 et 11 février 2011 à Leipzig,
- [2] Ten Wolde, A. et al.: « Air pressures in wood frame walls, proceedings thermal VII. » Ashrae Publication Atlanta, 1999
- [3] Communications IBP Mitteilungen 355 : « Dampf-diffusionsberechnung nach Glaser - quo vadis? » [Calcul de diffusion de vapeur selon Glaser - quo vadis ?]
- [4] Deutsche Bauzeitung ; numéro 12/89 ; page 1639 et suiv.
- [5] DAB 1995 ; page 1479 ; numéro 8
- [6] Klopfer, Heinz ; Bauschäden-Sammlung [Collection de dégâts au bâtiment], volume 11, Günter Zimmermann (éd.), Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 1997
- [7] Klopfer, Heinz ; ARCONIS : Wissen zum Planen und Bauen und zum Baumarkt: Flankenübertragung bei der Waserdampfdiffusion [Connaissances destinées à la planification et construction et au marché de la construction : diffusion latérale en cas de diffusion de vapeur d'eau] ; numéro 1/1997, pages 8 à 10
- [8] H.M. Künzel ; Tauwasserschäden im Dach aufgrund von Diffusion durch angrenzendes Mauerwerk [Dégâts de condensation en toiture dus à la diffusion par la maçonnerie adjacente] ; wksb 41/1996 ; numéro 37 ; pages 34 à 36
- [9] WUFI 2D 3.4 (Wärme und Feuchte instationär) [Flux de chaleur et d'humidité] ; logiciel informatique de calcul du transport bidimensionnel couplé de chaleur et d'humidité dans les éléments de construction ; Fraunhofer-Institut für Bauphysik ; infos sous www.wufi.de
- [10] DIN 4108-3 : Protection thermique et économie d'énergie dans la construction immobilière - Partie 3 : Protection contre l'humidité conditionnée par le climat - Exigences et directions pour le calcul et l'exécution, 11/2014
- [11] EN ISO 13788 : Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse - Méthodes de calcul, 05/2013
- [12] WUFI 6.1 pro (Wärme und Feuchte instationär) [Flux de chaleur et d'humidité] ; logiciel informatique de calcul du transport couplé de chaleur et d'humidité dans les éléments de construction ; Fraunhofer-Institut für Bauphysik ; infos sous www.wufi.de
- [13] Meteotest ; Banque de données météorologique globale pour tout endroit sur la terre ; Meteotest ; infos sous www.meteotest.com
- [14] EN 15026 : Comportement thermique et hygrotechnique de parties et d'éléments de construction - évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique, 07/2007



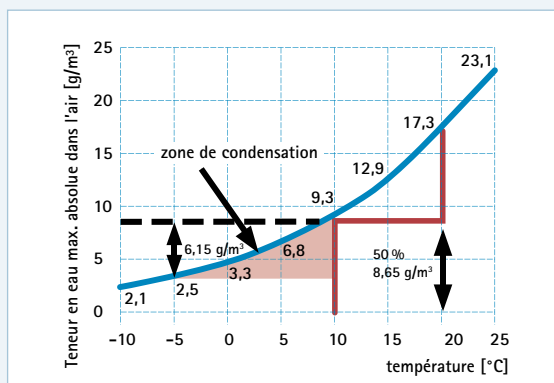
Prévention des dégâts au bâtiment d'isolations thermiques dans les constructions bois :

Une question de réserves de séchage et de la gestion intelligente de l'humidité

Physique de l'humidité de l'air

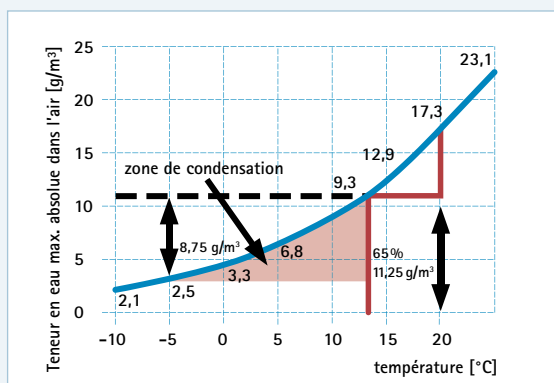
En se refroidissant, l'air augmente relativement son taux d'humidité. Lorsque la température descend en dessous du point de rosée, cette humidité se condense. Lorsque le taux d'humidité relative de l'air ambiant est plus élevé, la température du point de rosée est plus élevé.
→ La condensation se forme plus tôt.

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



Dans des conditions climatiques standard (20 °C / 50 % d'humidité relative de l'air), le point de rosée est atteint à 9,2 °C. Avec une température de l'air extérieur de -5 °C, la condensation est de 6,15 g/m³ d'air.

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



Pour un taux d'humidité de l'air ambiant plus élevé, de 65 %, le point de rosée est déjà atteint à 13,2 °C. Avec une température de l'air extérieur de -5 °C, la condensation est de 8,75 g/m³ d'air.

1.1 Vue d'ensemble et introduction

Notre étude décrit le calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'une construction avec un toit à forte pente, la manière dont ces dégâts 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 habituellement sur la réduction de la charge d'humidité dans cette paroi. Or, les constructions ne peuvent pas être parfaitement protégées de l'humidité.

Les charges d'humidité par diffusion qui sont prévisibles ne sont pratiquement jamais la cause principale des dégâts au bâtiment. Généralement, ces derniers sont dus aux charges d'humidité non-prévues qui, en raison même de la construction, ne peuvent être totalement exclues. Pour prévenir les dégâts au bâtiment et les moisissures, il faut donc se concentrer en priorité sur la capacité de séchage d'une construction. Cette étude compare différentes configurations de paroi en fonction de leur potentiel de séchage.

1.2 Condensation – point de rosée – quantité de condensation

La couche d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment sépare l'air intérieur chaud avec un taux d'humidité élevé, de l'air extérieur froid avec une humidité absolue réduite.

Lorsque, durant la saison froide, de l'air ambiant chaud pénètre dans une paroi, cet air se refroidit au fil de son passage à travers cette construction. Il peut y avoir, alors, condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air.

La formation d'eau liquide est due au comportement physique de l'air humide : l'air chaud peut contenir davantage d'humidité que l'air froid. Lorsque le taux d'humidité relative de l'air est plus élevé (65 % dans les constructions neuves par exemple), la température du point de rosée augmente et, conséquence

immédiate, aussi la quantité condensat (cf. fig. 1 et 2).

De l'eau de condensation se forme à chaque fois qu'un élément trop étanche à la diffusion à l'extérieur de la paroi se trouve dans une ambiance de température inférieure au point de rosée. Autrement dit, il est défavorable de retrouver les éléments les plus étanches à la diffusion d'une paroi multicouches à l'extérieur de l'isolation thermique de cette paroi (plutôt que du côté intérieur). La situation devient problématique lorsque de l'air chaud peut pénétrer dans l'élément de construction par des flux convectifs; c'est-à-dire, suite à des défauts d'étanchéité dans la couche à l'air de l'élément de construction.

Les éléments de construction ouverts à la diffusion sont ceux dont l'épaisseur de la couche d'air équivalente (grandeur s_d) est inférieure à 0,50 m.

La grandeur s_d est définie comme le produit du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (coeff. μ) en tant que constante matérielle, et de l'épaisseur de l'élément de construction exprimée en mètre :

$$s_d = \mu \times s \text{ [m]}$$

Une valeur s_d basse peut s'obtenir au moyen d'un coefficient μ bas avec une épaisseur de couche moyenne (comme pour les panneaux isolants en fibres de bois) ou d'un coefficient μ élevé avec une épaisseur de couche très réduite (cas des écrans de sous-toiture).

La vapeur d'eau s'oriente en premier lieu d'après le coefficient μ , puis seulement d'après l'épaisseur de la couche du matériau de construction. Cela signifie que la condensation apparaît plus rapidement avec un coefficient μ élevé qu'avec un coefficient μ réduit.

En outre, il existe une différence faible de pression de vapeur de part et d'autre d'un écran de sous-toiture, en raison du manque de différence de température et d'humidité (de part et d'autre de cet écran). Cela explique pourquoi les dégâts au bâtiment peuvent aussi apparaître avec des écrans de sous-toiture ouverts à la diffusion, lorsque le flux d'humidité est élevé dans la paroi.

Les écrans de sous-toiture à membrane monolithique non poreuse, comme les écrans de la famille pro clima SOLITEX



MENTO, offrent ici des avantages. La diffusion ne se fait pas passivement par les pores, mais activement le long des chaînes moléculaires du film monolithique. La résistance à la diffusion de SOLITEX UD et SOLITEX PLUS est variable. En cas de risque de condensation, elle se réduit à moins de 0,02 m. L'écran permet alors un transport d'humidité extrêmement rapide et actif et protège idéalement la construction de la condensation et des moisissures.

Une fois que de l'eau s'est formée dans la construction, le froid de l'hiver peut occasionner la formation de givre voire de glace en sous-face de l'écran de sous-toiture. La glace est imperméable à la vapeur d'eau et transforme alors l'écran de sous-toiture en pare-vapeur.

Les parois, qui sont composées à l'extérieur par des éléments qui freinent, ou même, empêchent la diffusion de vapeur d'eau, sont bien plus critiques, en terme de physique du bâtiment, que les parois ouvertes à l'extérieur à la diffusion. Parmi les constructions étanches à la diffusion, citons notamment les toits à forte pente avec sous-couverture pare-vapeur (bandes bitumées par exemple), les toits à couverture métallique, les toits plats et les toitures végétalisées. 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

Une humidification dans une structure isolante, comme 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 goutte dans l'habitation. 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 :

- processus de diffusion

Charge d'humidité non-prévue :

- la convection, c'est-à-dire le flux d'air (défauts dans la couche étanche à l'air)
- un transport d'humidité dû à la construction même (diffusion latérale par maçonnerie adjacente)
- un apport d'humidité élevé par les matériaux de construction mis en œuvre
- un manque de coordination du chantier

1.3.1 Charge d'humidité par diffusion

Jadis on pensait que le risque de sinistralité dû à l'humidité sera plus faible en utilisant des matériaux avec une valeur s_d importante côté intérieur de la paroi. Autrement dit, l'utilisation de pare-vapeurs avec des résistances très élevées à la diffusion empêcherait les dégâts au bâtiment. Or, la réalité est différente, comme l'ont déjà montré, depuis plus de

vingt-cinq ans, des calculs de physique du bâtiment, lors de la commercialisation de la membrane pro clima DB+, avec une valeur s_d de 2,30 m.

Aujourd'hui, plusieurs physiciens du bâtiment reconnus du monde scientifique et professionnel considèrent que ces parois étanches-étanches dans les constructions de toits plats (à l'intérieur, pare-vapeur avec $s_d > 100$ m ; à l'extérieur, revêtement étanche à la vapeur) ne sont plus conformes aux règles de l'art. Un consensus, publié en février 2011 suite au 2e congrès international « Holz[Bau] Physik » a fourni l'information suivante concernant les constructions à toit plat non ventilées avec structure bois : les pare-vapeurs empêchent la rédiffusion estivale qui est nécessaire au séchage de l'apport d'humidité hivernal (qui résulte du transport de vapeur par convection, due à des fuites résiduelles inévitables) [1]. Par conséquent, de tels éléments de construction peuvent être exécutés uniquement avec une ventilation fonctionnelle ou avec des éléments de construction disposant de potentiels d'évaporation prouvés.

Cela devient possible grâce au choix d'une membrane d'étanchéité à l'air et frein-vapeur appropriée côté intérieur de la paroi. En outre, des analyses effectuées en 1999 [2] sur des murs extérieurs en Amérique du Nord montrent que même en cas de pose par un professionnel, l'humidification à travers un pare-vapeur occasionne une condensation d'environ 250 g/m² par période de condensation, due à des phénomènes de convection. Cela correspond à une quantité d'eau de condensation qui est diffusée à travers un frein-vapeur avec une valeur s_d de 3,3 m durant un hiver [3].

Conclusion

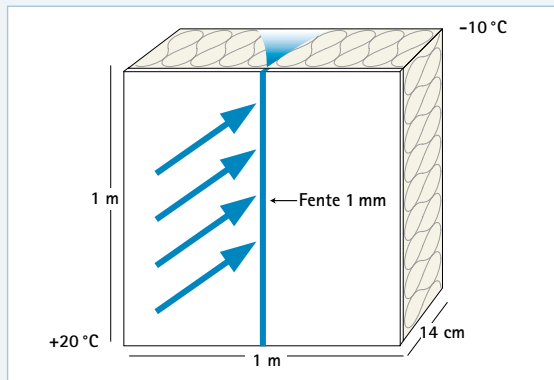


Même dans les constructions avec des pare-vapeurs dont les valeurs s_d s'élèvent à 50 m, 100 m ou d'avantage, il y a, finalement, tout de même, formation de quantités d'humidité considérables. Or les pare-vapeurs ne permettent aucune évaporation. D'où la création de pièges à humidité.



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

3. Quantité d'humidité apportée par convection



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

Facteur de détérioration : 1 600

Conditions aux limites :

Frein-vapeur valeur $s_d = 30 \text{ m}$

Température intérieure = $+20 \text{ °C}$

Température extérieure = -10 °C

Différence de pression = 20 Pa

vent de force 2 à 3

Mesures : Institut für Bauphysik, Stuttgart [4]

1.3.2 Charge d'humidité par convection

Les quantités d'humidité transportées dans la construction par convection, sont remarquablement plus importantes que par diffusion. La quantité d'humidité apportée par convection peut facilement être mille fois supérieure à celle apportée par diffusion. (cf. fig. 3).

Une humidification par convection cause rapidement des dégâts au bâtiment dans les parois composées de couches étanches à la diffusion côté extérieur.

Mais 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, surtout lorsque de l'eau de condensation s'y est formée.

1.3.3 Humidité due à la construction même – diffusion latérale

Dans la pratique, on a découvert des dégâts au bâtiment qui ne s'expliquaient pas exclusivement par les processus de diffusion et de convection. Ruhe [5] et Klopfer [6] ont attiré respectivement en 1995 et 1997 l'attention sur le problème de la diffusion latérale [7].

Composition de la structure :

Toiture inclinée : Couverture, volige sous écran de sous-toiture bitumeuse, isolation en laine minérale sur toute la hauteur des chevrons, film synthétique en polyéthylène (PE) côté intérieur.

Malgré une étanchéité à l'air parfaite, de l'eau gouttait en été au niveau des raccords de la membrane, sur les éléments de construction inférieurs.

Dans un premier temps, on a supposé que c'était dû à l'humidité élevée générée par la mise en œuvre de certains matériaux (teneur en eau initiale).

Comme la quantité de gouttes d'eau augmentait d'année en année, ce facteur fut exclu.

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

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 film en PE (cf. fig. 4 et 5).

Au début, les faits firent l'objet d'une discussion controversée parmi les physiciens du bâtiment, jusqu'à ce qu'en 1997, Künzel [8] démontre la diffusion latérale par des calculs du transport bidimensionnel de la chaleur et de l'humidité à l'aide du logiciel WUFI 2D [9]. D'après ses calculs, l'humidité du bois au-dessus du mur de briques était montée à env. 20 % après un an (valeur limite maximale admissible), avant de grimper à 40 % après trois ans et à 50 % après cinq ans.

1.3.4 Apport d'humidité important par les matériaux de construction

Lorsque des matériaux de construction sont mis en œuvre avec une teneur en eau initiale trop importante, 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 préalablement séchés par des moyens techniques s'est imposée, rien n'empêche une averse d'en augmenter l'humidité.

Un exemple : Une toiture avec des chevrons de 6/24 cm espacés de $e = 0,70 \text{ m}$ comporte, par m^2 de couverture, 1,5 mètres linéaires de chevrons. A un taux d'humidité de 10 %, cette partie de chevrons contient environ 1,1 litres d'eau.

Séchement de la construction : La norme allemande actuelle DIN 68800-2 recommande que les éléments en bois qui ont pris de l'humidité pendant la phase de construction doivent être séchés pendant les premiers trois mois hors de la construction jusqu'à une teneur en eau inférieure à 20 %. Si l'humidité du bois est de 30 % au début, il faut, pour rester en-deçà du seuil critique de 20 % d'humidité relative pour les moisissures, pouvoir sécher 1,1 litres d'eau par m^2 de toiture.

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 au m^2 . A 30 % d'humidité relative au départ (qui n'est pas rare après un jour de pluie), il faut que 1,2 litres d'eau s'évaporent par



m² de couverture, pour rester en-deçà de la limite de moisissure. En additionnant chevrons et voligeage, cela fait environ 2,3 litres par m² de toiture.

La quantité totale d'humidité est souvent sous-estimée. Dans la construction massive l'humidité contenue dans le bâtiment neuf peut contribuer à augmenter fortement la teneur en eau des éléments bois. Si un film en PE étanche à la diffusion se trouve alors sur le côté intérieur et un écran de sous-toiture bitumé sur le côté extérieur d'une construction de toiture isolée en caisson, des dégâts au bâtiment risquent d'apparaître rapidement.

1.3.5 Résumé des charges d'humidité

Les nombreuses possibilités d'apport en humidité montrent que dans le bâtiment, il y a toujours une charge d'humidité. Pour construire sans occasionner de dégâts et de moisissures, l'augmentation des réserves de séchage et la régulation des apports d'humidité constituent une solution nettement plus efficace et plus sûre que de se concentrer uniquement sur une réduction maximale de la pénétration d'humidité dans la construction.

Hygrorégulation intelligente – formule de sécurité



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

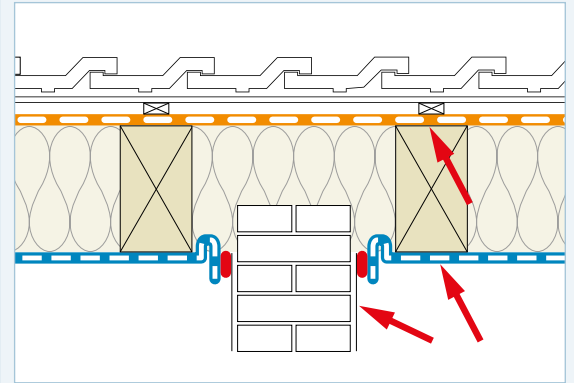
Des dégâts au bâtiment peuvent seulement apparaître lorsque la capacité de séchage est inférieure à la charge d'humidité.

« Plus la réserve de séchage d'une construction est grande, plus la charge d'humidité non-prévue peut être importante, 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.

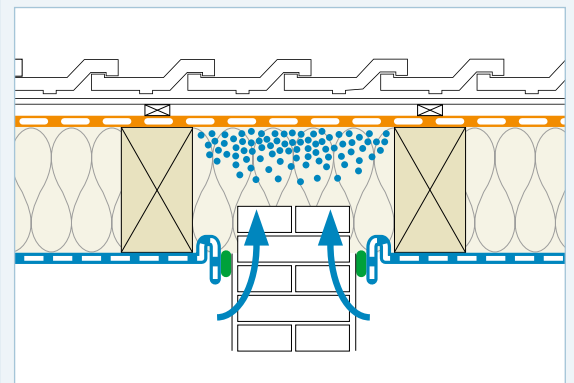
Diffusion latérale

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 pare-vapeur en PE et couche d'enduit étanche à l'air, membrane bitumée de sous-toiture 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



Frein-vapeurs « intelligents »

Comportement de l'humidité dans la construction

Le flux de diffusion va se diriger toujours du côté chaud vers le côté froid. Conséquence :

En hiver :
humidité importante côté extérieur de la paroi

En été :
humidité importante côté intérieur de la paroi

6. Principe de fonctionnement des membranes hygrovariables

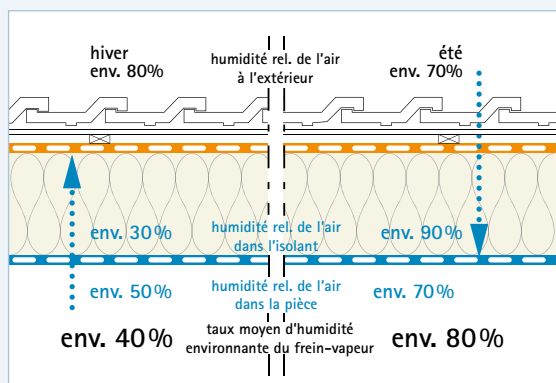


Schéma des taux d'humidité relative de l'air au niveau du frein-vapeur, selon la saison

Humidité ambiante au niveau du frein-vapeur

- Hiver : humidité de l'air réduite
→ le frein-vapeur hygrovariable est plus étanche à la diffusion
- Été : humidité de l'air élevée
→ le frein-vapeur hygrovariable est plus ouvert à la diffusion

7. Flux de diffusion des frein-vapeurs hygrovariables pro clima

Flux de diffusion	Valeur W_{DD} , perméabilité à la vapeur d'eau, en g/m^2 par semaine	
	en hiver	en été
Sens de diffusion	vers l'extérieur direction sous-toiture	vers l'intérieur direction frein-vapeur
DB+	28	175
INTELLO INTELLO PLUS INTESANA	7	560

2.1 Assèchement de la construction vers l'intérieur

Une autre possibilité de séchage déterminante s'offre à l'élément de construction par l'activation de la surface intérieure : à chaque fois que la température extérieure de l'isolation est supérieure à sa température intérieure, le flux de diffusion s'inverse et l'humidité présente dans l'élément de construction migre vers le côté 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 la couche frein-vapeur et d'étanchéité à l'air était alors ouverte à la diffusion, l'humidité éventuellement présente dans la construction pourrait s'évaporer et sécher vers l'intérieur. Mais en hiver, un frein-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. Comme ces éléments de construction favorisent les pièges à humidité, ils se sont vu retirer, dans le cas de constructions à toit plat, le statut de conformité aux règles de l'art lors du 2^e congrès international « Holz[Bau]Physik » en février 2011 [1].

La solution idéale est un frein-vapeur avec une résistance à la diffusion forte en hiver et faible en été. Cela fait maintenant plusieurs années que ces frein-vapeurs « intelligents », à valeur s_d hygrovariable, ont 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'intérieur de l'humidité éventuellement présente dans la construction. Dans les conditions idéales en été la valeur s_d est nettement inférieure à 0,5 m – à partir de celle-ci un matériau est considéré comme ouvert à la diffusion (voir aussi DIN 4108-3 [10]). Dès que la valeur s_d se

trouve pendant la période estivale au-delà de cette valeur seuil, le potentiel d'assèchement de la construction est fortement réduit.

2.2 Fonctionnement de la résistance hygrovariable à la diffusion

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

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

Des mesures prises dans des toits ont montré que pendant la période hivernale, le frein-vapeur se situe dans une humidité ambiante moyenne d'env. 40 %, en raison du transport de l'humidité présente dans les caissons entre chevrons vers l'extérieur. En revanche, pendant la période estivale, l'humidité relative de l'air augmente au niveau du frein-vapeur, en cas de présence d'humidité dans la zone des chevrons, et de l'eau de condensation peut même s'y former (cf. fig. 6).

Les frein-vapeurs à résistance hygrovariable à la diffusion sont plus étanches à la diffusion dans un environnement sec et plus ouverts à la diffusion dans un environnement humide.

Depuis 1991, la membrane pro clima DB+ a été posée sur des millions de m^2 et a parfaitement fait ses preuves. Sa résistance à la diffusion peut atteindre des valeurs s_d variant entre 0,4 et 4 m. En 2004, la société MOLL bauökologische Produkte GmbH a développé le frein-vapeur haute performance pro clima INTELLO. Les membranes INTELLO, INTELLO PLUS ainsi que INTESANA possèdent une valeur s_d hygrovariable variant entre 0,25 et plus de 25 m (cf. fig. 9).

Des essais concernant le fonctionnement des membranes hygrovariables INTELLO et INTELLO PLUS ont montrés que celles-ci atteignent même des valeurs s_d de 55 m. De cette façon la paroi sera protégée en période hivernale contre toute humidification éventuelle par diffusion.



2.2.1 Certification du système hygrovariable

Depuis 2011 le système d'étanchéité à l'air INTELLO et INTELLO PLUS est certifié par un Document Technique d'Application (DTA) qui présente le même statut qu'un Avis technique (ATEC). Créé à l'initiative de l'État français, l'Avis Technique est une prestation d'évaluation délivrée par la Commission Chargée de Formuler les Avis Techniques (CCFAT), qui porte sur les produits et procédés de construction innovants. Elle s'effectue via des Groupes Spécialisés (GS) qui formulent l'avis sous l'autorité de la CCFAT. L'Avis Technique/Document Technique d'Application consiste en une analyse exhaustive des capacités d'un produit/procédé/technique à être apte à l'usage et durable.

Les DTA pour le système d'étanchéité à l'air de la membrane hygrovariable INTELLO et INTELLO PLUS pour un procédé d'isolation a été validé par le GS 20 « Produits et procédés spéciaux d'isolation » de la CCFAT pour une application en murs à ossature bois (DTA 20/15-340*01 Mod) et pour une application en comble (DTA 20/15-341).

Selon ces certifications le système d'étanchéité INTELLO et INTELLO PLUS est à utiliser dans des locaux visés sont les locaux à faible ou moyenne hygrométrie, en neuf ou existant, résidentiel ou non résidentiel (locaux à usage courant), tels que les bâtiments d'habitation ou bureaux, soumis à des sollicitations équivalentes aux :

- Locaux classés EA et EB selon e-cahier CSTB 3567 et pour lesquels le niveau de sollicitations correspond suivant la norme NF DTU 25.41 (indice de classement P72-203),
- Locaux classés EB+ privatifs sous réserve de l'utilisation de plaques hydrofugées de type H1 et du respect des dispositions prévues dans la norme NF DTU 25.41 (indice de classement P72-203).

Le procédé est compatible avec les parements intérieurs courants à base de plaques de plâtre cartonnées, panneaux de particules de bois ou lambris bois. Est inclus dans ce domaine d'emploi le climat de montagne (altitude supérieure à 900 m).

Pour les locaux ponctuellement et temporairement rafraîchis en période chaude par un système d'appoint associé

à la ventilation mécanique, l'emploi est accepté pour autant que la température de consigne soit telle que l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur soit inférieur à 5°C.

2.2.2 Grande résistance à la diffusion en hiver

La résistance à la diffusion des frein-vapeurs INTELLO, INTELLO PLUS et INTESANA a été développée de manière à ce que par climat hivernal, la membrane puisse avoir une valeur s_d supérieure à 25 m. Résultat : en hiver, lorsque la pression d'humidité sur la construction est la plus forte, les frein-vapeurs hygrovariables précités ne laissent pénétrer presque pas d'humidité par diffusion.

Le fonctionnement de la résistance hygrovariable à la diffusion est indépendant de l'altitude à laquelle se situe le bâtiment. La propriété agit même durant les hivers froids et longs.

Dans le cas de constructions avec des écrans étanches à la diffusion côté extérieur, les membranes peuvent assurer l'hygrorégulation et protéger efficacement les éléments de construction de l'humidité. La valeur s_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 (effet pare-vapeur) sur un écran de sous-toiture ouvert à la diffusion (cf. fig. 9).

2.2.3 Faible résistance à la diffusion en été

Par climat estival, la résistance à la diffusion peut tomber à une valeur s_d de 0,25 m avec les membranes INTELLO.

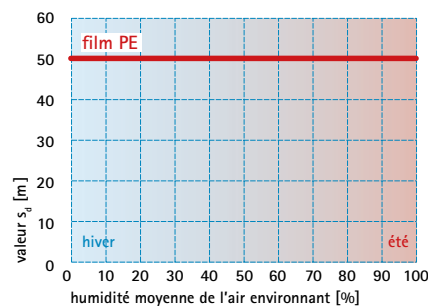
Résultat : un séchage rapide vers l'intérieur de l'humidité éventuellement présente dans la paroi. Selon l'importance du gradient de pression de vapeur, cela correspond à une capacité de séchage de 5 à 12 g/m² de H₂O par heure, soit env. 80 g/m² de H₂O par jour ou 560 g/m² de H₂O par semaine (cf. fig. 7).

Grâce à cette grande capacité de séchage, les différents éléments constitutifs de la paroi sèchent rapidement dès le printemps. Pour cela il est important que les membranes frein-vapeur avec une résistance variable à la diffusion possèdent une valeur s_d nettement inférieure à

Comportement de la valeur s_d des frein-vapeurs

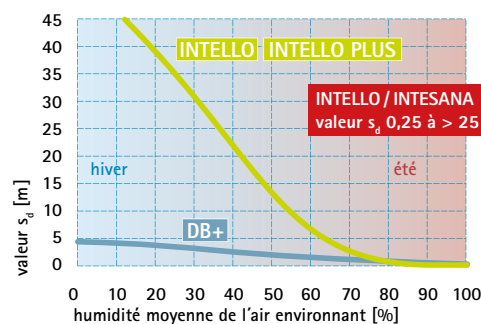
Plus la variabilité de la résistance à la diffusion est étendue entre l'hiver et l'été, plus la sécurité offerte par le frein-vapeur est grande.

8. Comportement de la valeur s_d avec un film en PE



Film en PE : aucune hygrovariabilité

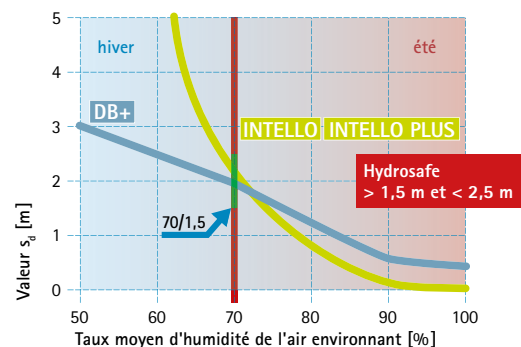
9. Comportement de la valeur s_d avec les frein-vapeurs pro clima



DB+ : hygrovariabilité moyenne

INTELLO : très grande hygrovariabilité

10. Nouvelle construction et phase de réalisation de travaux règles 60/2 et 70/1,5



Valeurs s_d minimales recommandées durant la phase de travaux, en cas d'humidité apportée par la nouvelle construction et dans les pièces humides des habitations



0,5 m dans un milieu humide car, dans le cas contraire, les parois n'offrent pas de sécurité supplémentaire pour répondre à des apports d'humidité imprévus.

2.2.4 Profil de diffusion équilibré

A une époque où les étanchéités à l'air de l'enveloppe du bâtiment s'améliorent et s'accompagnent de taux d'humidité de l'air plus élevés dans les bâtiments neufs en construction massive, la résistance à la diffusion joue un rôle important en cas d'augmentation de l'humidité relative de l'air.

Constructions neuves : phase de séchage (règle 60/2)

Dans les nouvelles constructions et les pièces humides (salles de bain, cuisines), le taux d'humidité ambiant grimpe facilement à environ 70 %, sous l'effet des travaux réalisés ou de l'occupation de l'habitation. La résistance à la diffusion d'un frein-vapeur devrait être réglée de manière à atteindre une résistance à la diffusion d'au moins 2 m à ce taux d'humidité, afin de protéger suffisamment la construction contre l'apport d'humidité par l'air ambiant et donc la formation de moisissures.

A un taux d'humidité moyen de 60 % (70 % d'humidité de l'air ambiant et 50 % d'humidité au niveau de l'isolation thermique), INTELLO, INTELLO PLUS et INTESANA ont une valeur s_d supérieure à 6 m. La valeur de la membrane DB+ est environ de 2,5 m. (cf. fig. 10).

Période de chantier : la valeur hydrosafe (règle 70/1,5)

Durant la phase de construction, lors de l'application d'un enduit ou le coulage d'une chape, il règne dans le bâtiment un taux d'humidité de l'air très élevé, parfois supérieur à 90 %.

Dans ces conditions d'humidité importante résiduelle de chantier la protection des constructions en ossature bois isolées est décrite par la valeur Hydrosafe. Cette valeur indique l'épaisseur de couche d'air équivalente (valeur s_d) minimale d'un frein-vapeur hygrovariable posé côté intérieur de la construction comme membrane d'étanchéité à l'air pour que les éléments constructifs et l'isolant seront protégés suffisamment contre toute l'humidité.

Les membranes INTELLO et INTELLO PLUS atteignent à un taux d'humidité moyen de 70 % (90 % d'humidité de l'air ambiante et 50 % dans la couche d'isolation

thermique) une valeur s_d largement supérieure à 2 m, la membrane DB+ atteint une valeur de 2 m.

La persistance d'un taux d'humidité excessif de l'air intérieur pendant la phase de construction nuit à tous les éléments de construction du bâtiment et y provoque une accumulation d'humidité qui devrait pouvoir s'échapper de manière systématique et continue de l'ouvrage, par ventilation au niveau des fenêtres. Des déshumidificateurs de chantier peuvent être nécessaires (cf. fig. 10).

2.2.5 Sécurité maximale

Le comportement « intelligent » des frein-vapeurs hygrovariables pro clima rend les structures d'isolation thermique très sûres (suivant toutefois le type de paroi et la situation), même en cas d'apport d'humidité imprévu dans la paroi, par exemple en raison de conditions climatiques défavorables, de défauts d'étanchéité, d'une diffusion latérale ou de la mise en œuvre de bois d'œuvre ou de matériaux isolants humides. Les frein-vapeurs hygrovariables pro clima agissent comme une pompe qui extrait activement toute humidité de la paroi qui s'y trouve éventuellement.



Détermination du potentiel de sécurité d'une configuration de toiture

3.1 Validation des parois par calcul

Pour calculer les charges d'humidité au sein d'éléments de construction, il existe des méthodes de calcul en régime stationnaire et dynamique. Actuellement, les méthodes de calcul stationnaires selon Glaser sont toujours autorisées pour toutes les compositions de toitures, à l'exception des toitures végétalisées et elles sont la base pour différentes normes nationales ou internationales comme par exemple la DIN 4108-3 [10] et la EN ISO 13788 [11].

Les méthodes stationnaires ne sont cependant pas en mesure de prendre en compte les facteurs d'influence spécifiques aux matériaux, liés à la construction ou encore causés par la situation ou le climat. Ainsi par exemple, les comportements des matériaux, comme la capillarité et la capacité de sorption, ne sont pris en compte qu'avec des méthodes dynamiques selon la norme NF EN 15026 [14].

3.1.1 Calcul selon Glaser

La norme NF EN ISO 13788 [11] continue à recourir à la méthode Glaser. Celle-ci calcule les quantités de condensat occasionnelles dans des constructions dans l'hypothèse de données climatiques standards. Néanmoins, cette méthode simplifiée présente également des restrictions importantes car certaines hypothèses initiales de calcul ne peuvent pas être prises en compte comme par exemple des surfaces ombragées ou des couches de lestage (gravier, végétalisation). En plus, les conditions de teneur en eau réelle de différents matériaux ainsi que leurs caractéristiques techniques en transport de l'humidité en phase liquide (suction et sorption) ne sont pas respectées. Pour cette raison la méthode simplifiée Glaser ne s'utilise pas pour analyser le comportement complexe des constructions en ossature bois exigeantes à la physique du bâtiment.

3.1.2 Calcul des transports combinés de chaleur et d'humidité

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 supposées divergent du climat réel ; d'autre part, la méthode ignore d'importants mécanismes de transport, comme la sorption et la capillarité.

Pour des calculs réalistes des flux de chaleur et d'humidité dans les constructions, il existe des méthodes dites dynamiques. Parmi les logiciels connus, citons Delphin de l'Institut de génie climatique du bâtiment (Institut für Bauklimatik) de Dresden et WUFI pro [12] de l'Institut de physique du bâtiment (Fraunhofer-Institut für Bauphysik) de Holzkirchen. Ces logiciels calculent le transport combiné de chaleur et d'humidité dans les parois multicouches en fonction des conditions climatiques réelles, en prenant en compte la température et le taux d'humidité, l'influence du rayonnement solaire (direct et diffus), le vent, le froid dû à l'évaporation ainsi que la sorption et la capillarité des matériaux de construction.

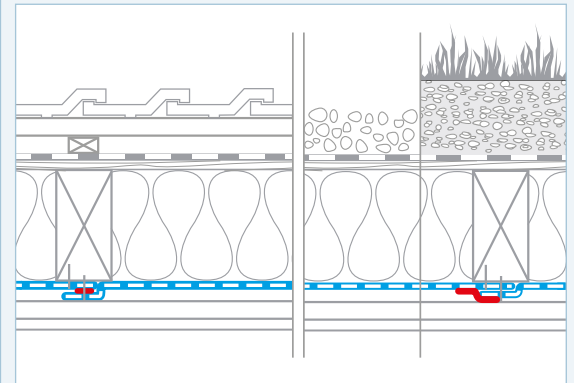
La validation de ces logiciels s'est faite à plusieurs reprises, grâce à la comparaison des résultats numériques avec des essais en plein air. Ces études dynamiques demandent d'avoir des données climatiques relevées toutes les heures. Des données climatiques relevées par plusieurs milliers de stations météorologiques du monde entier sont ainsi disponibles. Meteonorm [13], parmi les logiciels qui rendent ces données disponibles, est ainsi compatible avec WUFI. Ce logiciel couvre à la fois des zones climatiques tempérées et extrêmes.

Pour les calculs de simulation, la paroi est encodée dans le logiciel avec la succession de ses couches, puis analysé sur plusieurs années.

Cette analyse permet de déterminer si de l'humidité s'accumule dans la paroi ; 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. En analysant le développement de la teneur en eau totale d'une construction il est également possible de vérifier le séchage maximal de différents éléments de construction. Cette capacité de séchage en fonction de la durée est également définie comme potentiel de prévention des dégâts au bâtiment.

Evaluation de constructions de toitures selon la physique du bâtiment

11. Composition de la toiture



Éléments de la paroi :

- étanche à la diffusion à l'extérieur (écran de sous-toiture bitumé ; valeur $s_d = 300 \text{ m}$)
- F et B : voligeage en bois massif 24 mm ou panneau OSB/3 en 18 mm
- CH : voligeage en bois massif 27 mm
- Isolant fibreux (laine minérale) 200 mm
- frein-vapeurs à valeurs s_d variables
- vide technique 25 mm
- plaque de plâtre à parement de carton

Variantes de toiture étudiées :

- toit à forte pente (40°) orienté au nord, couverture en tuiles rouges
- toit plat avec couche de gravier de 5 cm
- Toiture végétalisée extensive
Épaisseur de la couche de substrat de 10 cm

Toutes les constructions sont sans ombre.



3.2 Définition du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment

Le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment indique quelle quantité d'humidité imprévue peut pénétrer dans une construction en raison de défauts d'étanchéité, d'une diffusion latérale ou de matériaux de construction humides, puis s'évaporer à nouveau de la paroi en l'espace d'un an, contribuant ainsi à la prévention de ces dégâts.

3.2.1 Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment (PPDB)

Pour déterminer le degré de sécurité d'une construction en cas d'apport d'humidité imprévu on procède comme suit : au début du calcul, on définit l'apport d'une certaine quantité d'humidité dans l'isolation thermique. Le logiciel indique à quelle vitesse celle-ci s'évapore par la suite. La quantité d'humidité qui s'évapore de la construction par an, dans l'hypothèse d'une humidité initiale arbitrairement augmentée, correspond à son potentiel de prévention des dégâts au bâtiment.

Les calculs portent sur des conditions défavorables (par exemple le versant nord d'un toit à forte pente), dans différentes zones climatiques (haute montagne) et avec différents types de toit (en pente, toits plats en gravier ou végétalisés).

Les constructions favorables en termes de physique du bâtiment offrent de meilleures garanties. Autre critère pour le fonctionnement d'une construction : les taux d'humidité maximum qui surviennent dans les couches de la paroi.

Ces études sur l'aptitude à l'emploi sont présentées à partir de la [section 3.3](#).

3.3 Toiture

Différentes toitures sont étudiées, leur composition ainsi que leur emplacement varie (cf. [fig. 11 à gauche](#)).

3.3.1 Toit en pente

La toiture à forte pente choisie pour le calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment est orientée au nord, avec une pente de 40°.

Le choix s'est porté sur le versant nord car

l'influence du soleil sur l'échauffement de la paroi y est nettement moindre que sur un versant sud avec la même pente. La construction est pourvue d'un isolant en fibre avec une valeur λ de 0,035 W/mK. La couverture du toit est en tuiles rouges (cf. [fig. 11 à gauche](#)).

3.3.2 Toits plats

Pour le calcul des toits plats végétalisés et lestés avec du gravier, on dispose de séries de données actualisées de l'Institut Fraunhofer de physique du bâtiment (IBP). Celles-ci ont été établies sur la base de mesures réalisées sur différents toits plats en plusieurs emplacements. Les nouvelles données disponibles prennent davantage en compte les changements d'une construction végétalisée ou en gravier dans le temps. Ainsi par exemple, elles contiennent déjà les effets dus à la végétation (tel que l'ombrage des herbes). L'Institut IBP considère que ces séries de données constituent l'état actuel de la recherche. Le toit protégé par gravier dispose d'une couche de gravier épaisse de 5 cm. La couche de substrat du toit plat végétalisé a une épaisseur de 10 cm.

3.4 Frein-vapeurs et autres facteurs

Pour représenter la performance de la construction avec différents frein-vapeurs, le choix s'est porté sur les membranes dotées des résistances à la diffusion suivantes :

Frein-vapeurs :	valeur s_d :
• film PE	100 m constant
• pro clima DB+	0,6 à 4 m hygrovariable
• pro clima INTELLIO	0,25 à 25 m hygrovariable

Les calculs ont été effectués avec WUFI pro [12]. A l'exception de l'isolant contenu dans les parois, le taux d'humidité initial des matériaux se base sur une humidité relative de l'air de 80 % (= humidité apportée par la construction). Pour déterminer le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, on a ajouté à l'isolant 20 litres d'eau par m². Avec une épaisseur d'isolant de 200 mm, cela signifie que l'humidité initiale s'élève

à 4 000 g/m². Les calculs ne prennent pas en compte les ombres et masques (dus à des installations photovoltaïques, des structures architecturales discontinues, des arbres hauts ou à la topographie).

3.5 Emplacements

France :

- H1A : Caen (altitude 222 m)
- H2A : Brest (altitude 99 m)
- H1B : Nancy (altitude 212 m)
- H2B : Nantes (altitude 50 m)
- H1C : Dijon (altitude 272 m)
- H2C : Millau (altitude 710 m)
- H2D : Carpentras (altitude 109 m)
- H3 : Montpellier (altitude 3 m)

Belgique :

Bruxelles (altitude 100 m)

Suisse :

- situation basse : Sion (altitude 482 m)
- situation intermédiaire : La Fretaz (altitude 1 202 m)
- situation de haute montagne : Davos (altitude 1 560 m)

3.6 Facteurs d'influence sur le niveau du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment

Une donnée 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. Son niveau dépend de la température extérieure et plus précisément de la température sur le côté extérieur de l'isolation thermique.

En raison de l'ensoleillement, la température de la surface de la toiture et/ou des murs est supérieure à celle de l'air. Le temps mis par la chaleur extérieure pour atteindre l'isolation thermique est déterminant. Dans le cas d'un toit à forte pente, ce délai est plus court que dans le cas d'un toit plat en gravier ou végétalisé. Dans le cas d'un toit à forte pente, le niveau de la température de la surface de toiture dépend de la pente du toit, de son orientation (nord/sud) et de la couleur de sa couverture (claire/foncée).

Le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment est en outre influencé par l'épaisseur d'isolation. En règle générale, les fortes épaisseurs d'isolant entraînent



des quantités de séchage réduites, car la pénétration de la chaleur dans la paroi est plus lente et que, par conséquent, les périodes d'évaporation sont plus courtes.

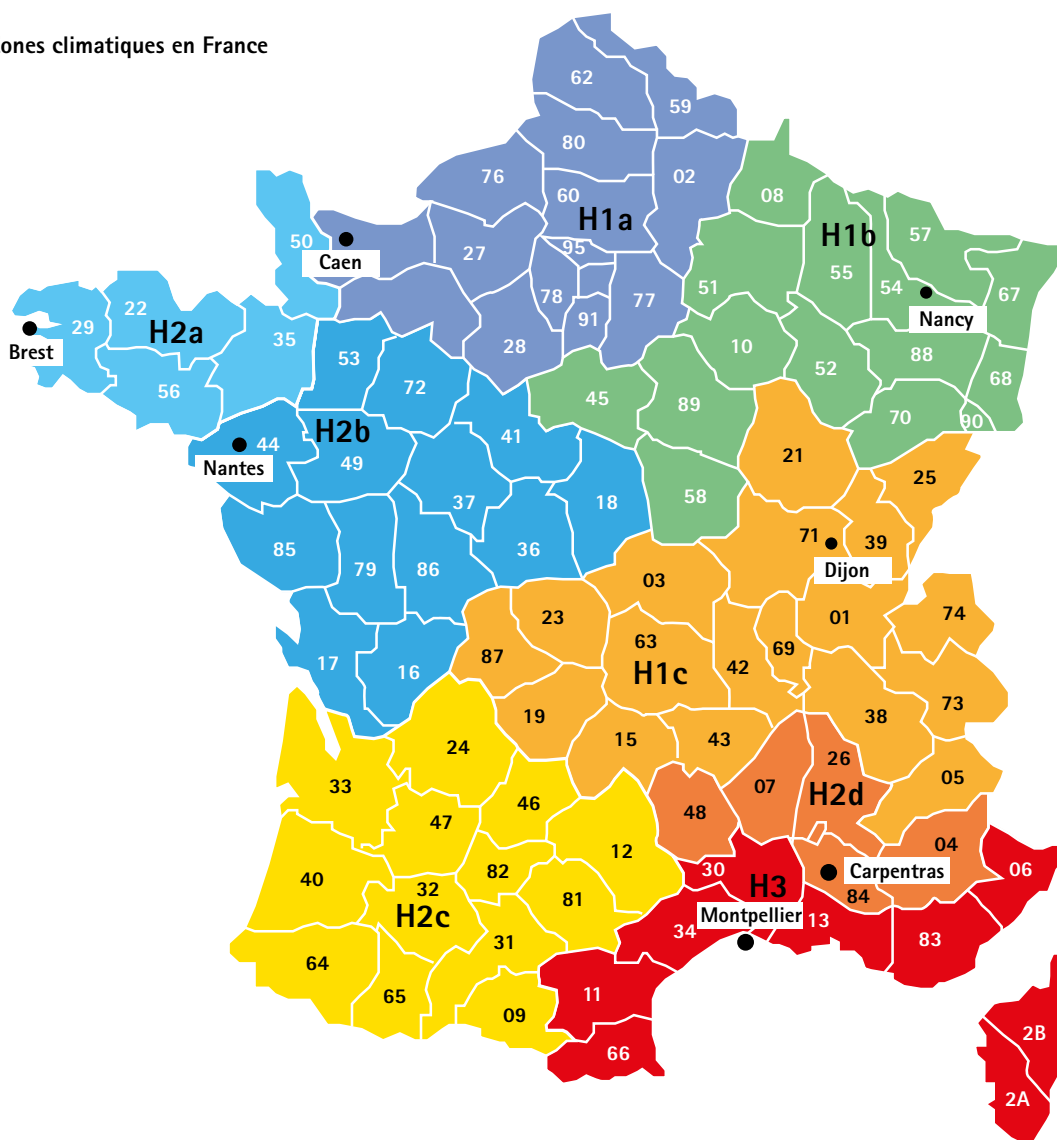
Les facteurs défavorables sont :

- une orientation au nord
- une pente forte (> 25°)
- une couverture ou membrane d'étanchéité de couleur claire
- une sous-toiture étanche à la diffusion
- un climat froid, comme en haute montagne
- de fortes épaisseurs d'isolant
- des couches de gravier / végétation, des lames de terrasse sur l'étanchéité
- des ombres

Pour illustrer l'influence du frein-vapeur sur le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, le calcul est effectué en supposant une sous-toiture étanche à la diffusion. En outre, les panneaux de sous-toiture ouverts à la diffusion peuvent se transformer en pare-vapeurs en hiver, si l'eau de condensation y gèle.

France

12. Zones climatiques en France



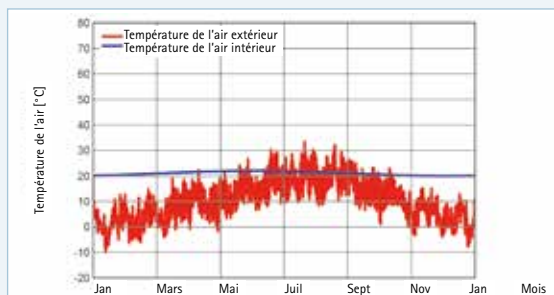


France

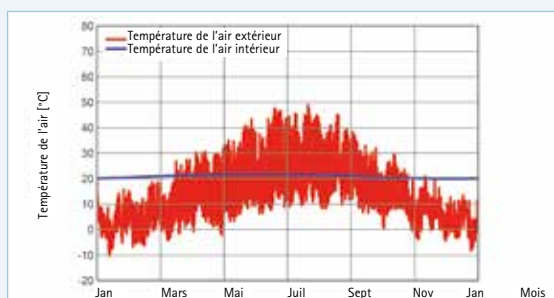
Evolution des températures à Dijon (France)

Altitude : 222 m, Couverture : tuiles rouges ou gravier

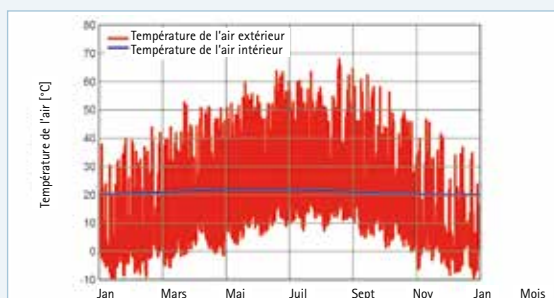
13. Températures de l'air (climat d'humidité de référence)



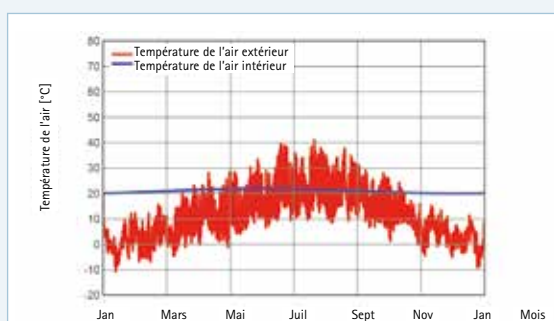
14. Température à la surface du toit, versant nord, pente 40°



15. Température à la surface du toit, versant sud, pente 40°



16. Température à la surface du toit, toit plat en gravier



4.1 Calculs pour la France

Selon la Règlementation Thermique 2012, la France peut être divisée en huit zones climatiques différentes. Celles-ci sont désignées de H1A à H3 en [fig. 12](#).

Pour chacune des zones climatiques, nous avons sélectionné une localité représentative afin de déterminer le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment. Les séries de données climatiques des stations météorologiques correspondantes sont issues du logiciel Meteonorm [13].

4.1.1 Zones climatiques influencées par le climat maritime (H1A, H2A à H2C)

Ces zones climatiques bordent l'Océan Atlantique, la Manche et la Mer du Nord. Elles sont donc principalement influencées par le climat maritime. Le Gulf Stream y crée un climat relativement doux qui même à Brest (H2A), n'entraîne que rarement des températures inférieures à 0° durant les mois d'hiver. Autre caractéristique de ces zones : les faibles. Pour la zone climatique H2B, nous avons choisi Nantes comme localité-exemple. La station météorologique pour la zone H1A est Caen. Préfecture de la Basse-Normandie, cette ville se situe au bord de la Manche et est donc directement exposée au climat maritime. Une ville fait exception : Millau. Elle se situe à une altitude de 710 m et fait partie des climats montagnards. Millau a été choisie comme localité représentative de la zone climatique H2C.

4.1.2 Zones climatiques continentales (H1B, H1C)

Ces deux zones climatiques sont fortement dominées par des influences continentales. Alors que les hivers peuvent être froids et secs, les étés atteignent des températures élevées. Les précipitations sont plus faibles que dans d'autres régions de France. La station climatique de Nancy est pertinente pour la zone H1B. Dijon fournit la série de données Meteonorm avec le climat le plus exigeant dans la zone climatique H1C.

4.1.3 Zones climatiques méditerranéennes (H2D, H3)

Ces deux zones climatiques se trouvent dans le sud de la France, à proximité de la côte méditerranéenne. Avec des températures annuelles moyennes de 13,1 °C (Carpentras/H2D) et 14 °C (Montpellier/H3), elles se situent dans les régions chaudes de l'Hexagone.

4.1.4 Evolution des températures

A titre d'exemple, les [figures 13 à 16](#) présentent la température de l'air extérieur ou à la surface (en rouge) de différentes constructions sous le climat de Dijon par rapport à la température de l'air intérieur (en bleu). A Dijon, les températures extérieures maximales sont supérieures aux températures intérieures environ trois mois par an. Cela a une influence positive sur les températures à la surface des constructions.

L'effet du rayonnement global entraîne des températures supérieures sur le toit qu'en d'autres endroits avec des températures extérieures moins élevées. Le fait que sur les versants nord, les rayons du soleil tombent avec un angle nettement plus réduit que sur les surfaces orientées au sud, entraîne une différence sensible des températures à la surface ([cf. fig. 14 et 15](#)). Comparés aux autres toitures, les toits en gravier ([fig. 16](#)) présentent des températures plus faibles encore sur le côté extérieur de l'élément. La couleur grise du gravier induit que la quantité de rayonnement solaire global convertie en énergie thermique est moindre.

4.2 Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'un toit à forte pente, versant nord, pente du toit 40°

La vitesse de séchage de l'humidité initiale supplémentaire définit le potentiel de prévention de dégâts au bâtiment de la paroi en cas d'humidité non-prévue (convection, diffusion latérale, etc.). Par exemple, les [fig. 17 à 20](#) montrent les résultats des calculs des toits à forte pente à Brest (H2A), Dijon (H1C), Carpentras (H2D) et Montpellier (H3). Les courbes rouges montrent que le film PE (valeur s_d 100 m) ne permet en aucun cas



le séchage de de l'humidité de l'isolation épaisse de 200 mm. L'humidité présente dans la construction ne peut plus s'en échapper. Ce n'est pas bien surprenant puisque ces constructions comportent des pare-vapeurs à la fois sur la face extérieure (écran bitumé) et la face intérieure. De telles constructions ne disposent absolument pas de réserves de séchage et sont donc à proscrire. En revanche, les parois dotées d'une membrane hygrovariable haute performance INTELLO offrent aux constructions de très grands potentiels de sécurité. D'après les calculs réalisés avec le logiciel WUFI pro [10], il est possible de charger les constructions d'approximativement 4 300 g d'eau par m² et par an, sans occasionner de dégâts au bâtiment. Grâce à la membrane INTELLO, Brest (H2A) (fig. 17) dispose d'un potentiel considérable de prévention des dégâts au bâtiment, avec un climat maritime relativement doux et 2 800 g/m² par an. Avec 1 600 g/m² par an, la membrane DB+ offre également des sécurités suffisantes pour ce toit à forte pente.

Cette tendance se poursuit pour tous les toits, à forte pente, des différentes zones climatiques qui ont été calculés. Pour Dijon (H1C) (fig. 18), les résultats des calculs pour les membranes INTELLO et DB+ indiquent des potentiels de prévention des dégâts au bâtiment de respectivement 3 800 g/m² et 2 100 g/m², soit des valeurs nettement supérieures aux potentiels de Brest.

Cela illustre à quel point l'hygrovariabilité a des incidences décisives sur la sécurité de toutes les constructions.

Les villes les plus favorables sont Carpentras (H2D) (fig. 19) et Montpellier (H3) (fig. 20) où les toits à forte pente possèdent, avec INTELLO, un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment supérieur à 4 300 g/m² par an. L'humidité contenue dans les matériaux et apportée par leur mise en œuvre atteint ici une valeur supérieure à 4 000 g/m² par an. La membrane DB+ offre également d'importantes réserves de séchage (2 500 g/m² à Carpentras, 4 300 g/m² à Montpellier). Le tableau en fig. 21 reprend l'ensemble des huit villes pour lesquelles nous avons calculé le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment des toits à forte pente. Les marges de séchage possibles augmentent en allant du nord au sud.

4.3 Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment toit plat en gravier

Le toit plat en gravier offre une moindre sécurité que le toit à forte pente : la pénétration de chaleur dans le lestage en gravier est assez lente. Par conséquent, la pénétration de chaleur dans les couches inférieures y compris dans la couche d'isolation, est moindre. Les fig. 14 à 16 montrent les températures d'une toiture avec un versant nord / sud par rapport à un toit plat en gravier. La différence avec le toit à forte pente orienté au sud est particulièrement importante. Le versant nord présente, quant à lui, des températures maximales supérieures d'environ 8 à 10 °C à celles du toit plat en gravier. Comme le toit à forte pente, le toit en gravier doté du film en PE ne permet aucun séchage en aucun endroit, en raison de la forte résistance à la diffusion (valeur s_d de 100 m). De petites charges d'humidité imprévues causent déjà des dégâts au bâtiment.

Même dans la zone climatique la plus exigeante de France (H2A), les toits en gravier calculés avec le climat de Brest et dotés d'une membrane pro clima INTELLO disposent d'un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de 900 g/m² par an. Avec 500 g/m² par an, la membrane DB+ peut elle aussi aider à éviter les dégâts au bâtiment (cf. fig. 22).

Pour toutes les autres zones climatiques, les quantités de séchage possibles obtenues par calcul sont en partie nettement supérieures. Dans le cas d'un toit en gravier, la membrane INTELLO offre un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de 1 800 g/m² par an pour Dijon et de plus de 3 100 g/m² par an pour Carpentras et Montpellier.

La fig. 26 présente un résumé de tous les potentiels de prévention des dégâts au bâtiment des huit zones climatiques de France.

4.4 Toit plat végétalisé

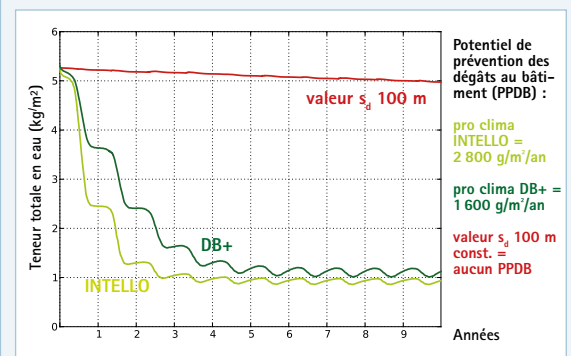
En raison de l'épaisse couche de substrat et des quantités d'eau que celle-ci emmagasine, les toits plats végétalisés sont encore un peu plus inertes que les variantes recouvertes de gravier.

En été, les températures au niveau du film d'étanchéité y atteignent des valeurs

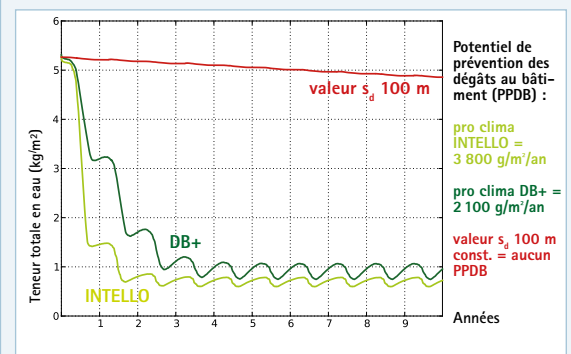
Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment en France, toit à forte pente

Humidité initiale supplémentaire : 4 000 g/m²
Taux d'humidité de la construction à l'état sec (= taux d'humidité du voligeage à 15 %) : 1 700 g/m²

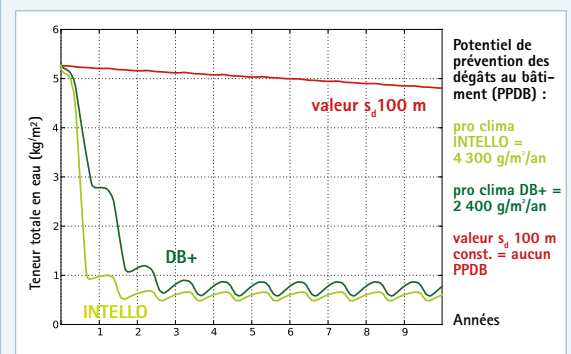
17. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, Brest



18. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, Dijon



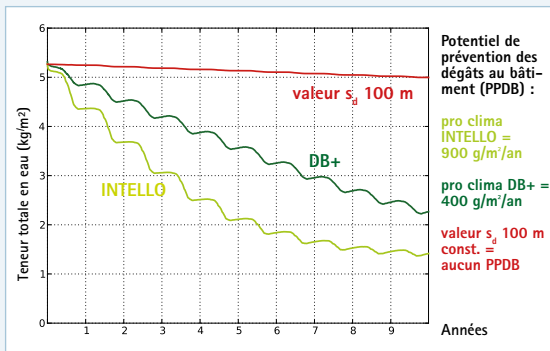
19. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, Carpentras



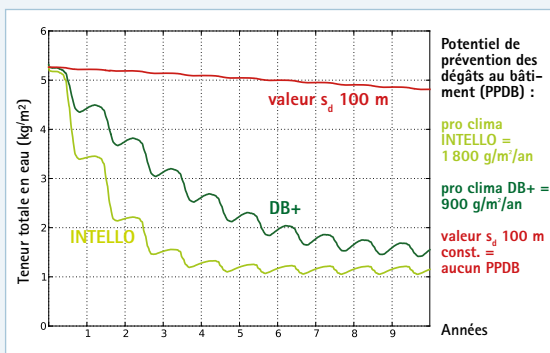


Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment en France, toit en gravier

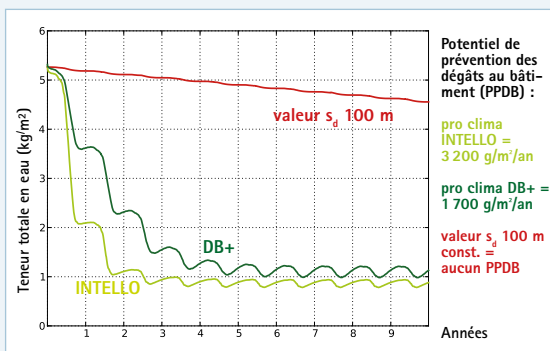
22. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit en gravier, Brest



23. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit en gravier, Dijon



24. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit en gravier, Carpentras



maximales de 35 à 40 °C. Dans la zone climatique H2A (Brest), les toits verts dotés d'un frein-vapeur haute performance INTELLO peuvent supporter des quantités d'humidité non-prévues de 400 g/m² par an. Ainsi, Brest atteint presque le niveau de Caen qui, avec 600 g/m² par an, offre un potentiel de séchage un peu supérieur. Pour Nancy aussi, les toits verts atteignent des sécurités suffisantes avec la membrane INTELLO. Montpellier arrive en tête : le potentiel de séchage pour un toit plat végétalisé y est de 2 700 g/m² par an.

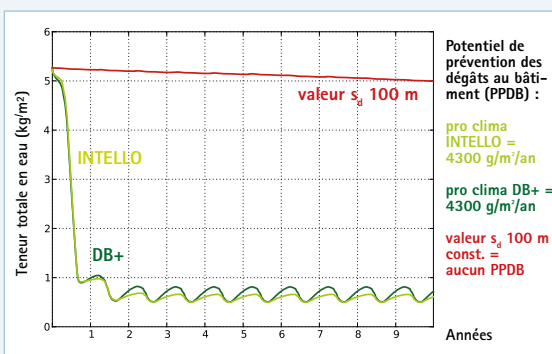
Conclusion : les membranes INTELLO offrent le niveau de sécurité maximal pour les toits végétalisés.

La membrane DB+ offre certes des potentiels de prévention des dégâts au bâtiment suffisants dans les zones climatiques méridionales, mais vu l'inertie des toits verts, il faudrait toujours lui préférer INTELLO.

La fig. 31 présente un aperçu des potentiels de prévention des dégâts au bâtiment pour toutes les zones climatiques.

Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment en France, toit à forte pente

20. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, Montpellier



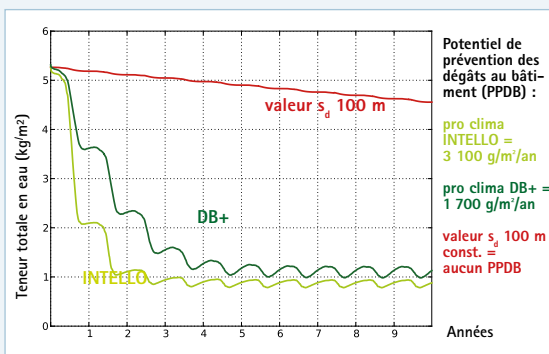
21. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, ensemble des zones climatiques

	INTELLO g/m ² /an	DB+ g/m ² /an	s _d = 100 m
H1A: Caen	2 900	2 900	aucun PPDB
H2A: Brest	2 800	1 600	aucun PPDB
H1B: Nancy	3 500	3 500	aucun PPDB
H2B: Nantes	3 600	3 600	aucun PPDB
H1C: Dijon	3 800	2 100	aucun PPDB
H2C: Millau	2 900	2 900	aucun PPDB
H2D: Carpentras	4 300	2 400	aucun PPDB
H3: Montpellier	4 300	4 300	aucun PPDB



Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment en France, toit en gravier

25. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit en gravier, Montpellier

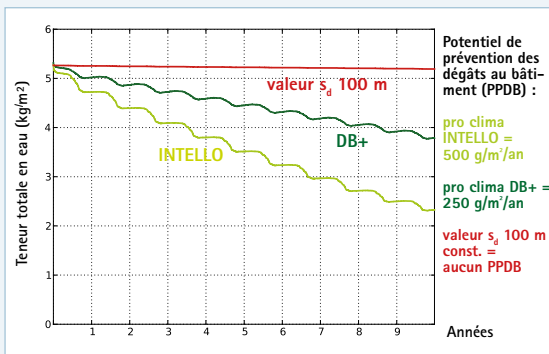


26. Potentiels de prévention des dégâts au bâtiment, toit en gravier, ensemble des zones climatiques

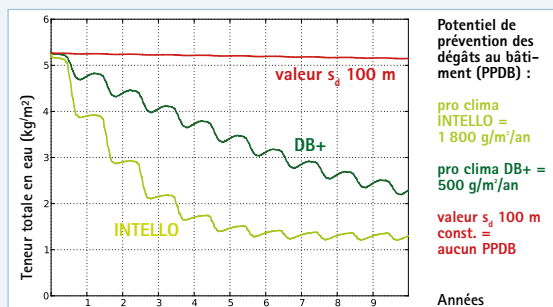
	INTELLO g/m ² /an	DB+ g/m ² /an	s _d = 100 m
H1A: Caen	1 000	800	aucun PPDB
H2A: Brest	900	400	aucun PPDB
H1B: Nancy	1 300	600	aucun PPDB
H2B: Nantes	1 800	900	aucun PPDB
H1C: Dijon	1 800	900	aucun PPDB
H2C: Millau	2 000	1 000	aucun PPDB
H2D: Carpentras	3 200	1 700	aucun PPDB
H3: Montpellier	3 100	1 700	aucun PPDB

Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment en France, toit vert

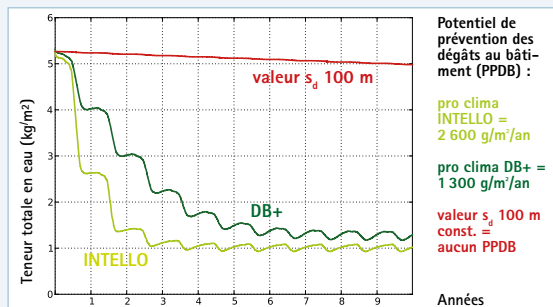
27. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert, Brest



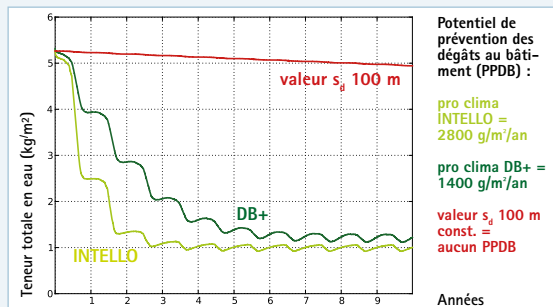
28. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert, Dijon



29. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert, Carpentras



30. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert, Montpellier



31. Potentiels de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert, ensemble des zones climatiques

	INTELLO g/m ² /an	DB+ g/m ² /an	s _d = 100 m
H1A: Caen	600	300	aucun PPDB
H2A: Brest	500	250	aucun PPDB
H1B: Nancy	1 000	300	aucun PPDB
H2B: Nantes	1 100	500	aucun PPDB
H1C: Dijon	1 800	500	aucun PPDB
H2C: Millau	1 100	600	aucun PPDB
H2D: Carpentras	2 600	1 300	aucun PPDB
H3: Montpellier	2 800	1 400	aucun PPDB

Pour les toits verts, la membrane hygrovariable INTELLO constitue le meilleur choix.

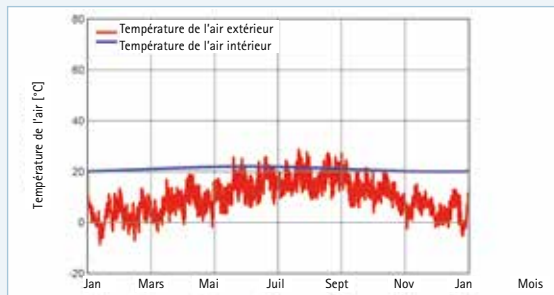


Belgique

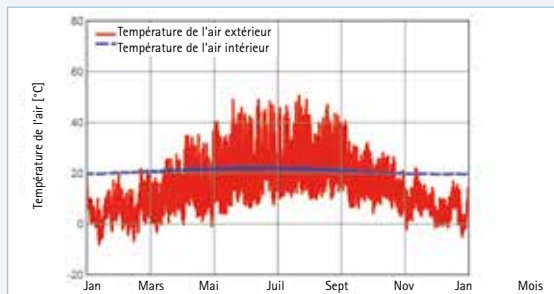
Evolution des températures Bruxelles (Belgique)

Couverture : tuiles rouges ou gravier

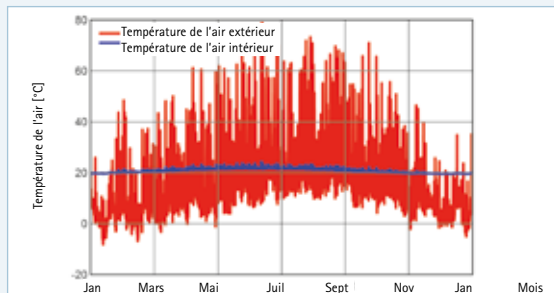
32. Températures de l'air, climat selon Meteonorm [13]



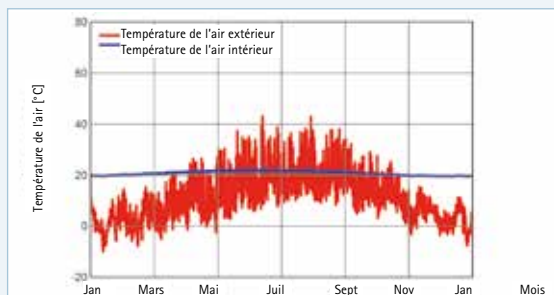
33. Température à la surface du toit, versant nord, pente 40°



34. Température à la surface du toit, versant sud, pente 40°



35. Température à la surface du toit, toit plat en gravier



5.1 Calculs pour la Belgique

Bruxelles se situe au cœur de la Belgique et bénéficie d'un climat tempéré, avec un ensoleillement annuel plutôt réduit et beaucoup de pluie. Pour les conditions climatiques aux limites, nous avons sélectionné un ensemble de données dans Meteonorm [13].

Les diagrammes (fig. 32 à 35) illustrent l'évolution des températures sur un an. La courbe bleue indique les températures intérieures ; les barres rouges, les températures extérieures.

En tenant compte de l'ensoleillement et du rayonnement global, l'analyse montre une température à la surface du toit nettement supérieure, en partie, à la température de l'air. Lorsque la température extérieure (en rouge) dépasse la température intérieure (en bleu), le séchage se fait vers l'intérieur avec des frein-vapeurs hygrovariables. Par conséquent, à Bruxelles, une rétrodiffusion est possible un grand nombre de jours de l'année, même en cas d'orientation au nord ; en cas d'orientation au sud, elle l'est déjà en hiver, les jours ensoleillés. Dans notre calcul, nous sommes partis de la situation la plus défavorable : une orientation du toit au nord, avec une pente de 40°.

5.2 Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'un toit à forte pente, Bruxelles, versant nord, pente du toit 40°

La vitesse de séchage de l'humidité initiale supplémentaire définit le potentiel de prévention de dégâts au bâtiment de la construction en cas d'humidité non-prévue (convection, diffusion latérale, etc.). Les résultats du calcul montrent que le film PE (valeur s_d 100 m) ne permet en aucun cas le séchage de l'humidité de l'isolation épaisse de 200 mm. L'humidité présente dans la construction ne peut plus s'en échapper.

La construction avec la membrane pro clima DB+ assure un séchage nettement plus rapide et possède d'importantes réserves de sécurité, avec 1500 g/m² par an.

Les frein-vapeurs haute performance INTELLLO offrent la plus grande marge de

sécurité aux constructions. D'après les calculs réalisés avec le logiciel WUFI pro [10], il est possible de charger ces constructions d'environ 3 000 g d'eau par m² et par an, sans occasionner de dégâts au bâtiment (cf. fig. 36).

5.3 Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toits plats

Pour le calcul des toits plats végétalisés et en gravier, on dispose de séries de données actualisées de l'Institut Fraunhofer de physique du bâtiment (IBP). Celles-ci ont été établies sur la base de mesures réalisées sur différents toits plats végétalisés et en gravier, en plusieurs emplacements. Les nouvelles données disponibles prennent davantage en compte les changements d'une paroi végétalisée ou en gravier dans le temps. Ainsi par exemple, elles prennent en compte les effets dus à la végétation (telle que l'ombre des herbes). L'Institut IBP considère que ces séries de données constituent l'état actuel de la recherche.

5.3.1 Toit plat en gravier

Le toit plat en gravier à Bruxelles offre une moindre sécurité que le toit à forte pente, la pénétration de chaleur dans le lestage en gravier est assez lente. Par conséquent, l'échauffement des couches inférieures, y compris de la couche d'isolation, est moindre.

Les fig. 33 à 35 montrent les températures d'une toiture à forte pente avec un versant nord / sud par rapport à un toit plat en gravier. La différence avec le toit à forte pente orienté au sud est particulièrement importante. Le versant nord présente quant à lui des températures maximales supérieures d'environ 8 à 10 °C à celles du toit plat en gravier.

Comme le toit à forte pente, le toit en gravier doté du film en PE ne permet aucun séchage, en raison de la forte résistance à la diffusion (valeur s_d de 100 m). De petites charges d'humidité imprévues causent déjà des dégâts au bâtiment.

Par contre, si le toit est doté de la membrane pro clima DB+, la construction dispose d'un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de 400 g/m² et par an. Bien que les températures à la surface du



toit en gravier soient nettement réduites, le frein-vapeur haute performance INTELLO offre une marge de sécurité considérable. D'après les calculs réalisés avec le logiciel WUFI pro [12], il est possible de charger l'élément de construction d'environ 1 000 g d'eau par m² et par an, sans occasionner de dégâts au bâtiment (cf. fig. 36).

5.3.2 Toit plat végétalisé

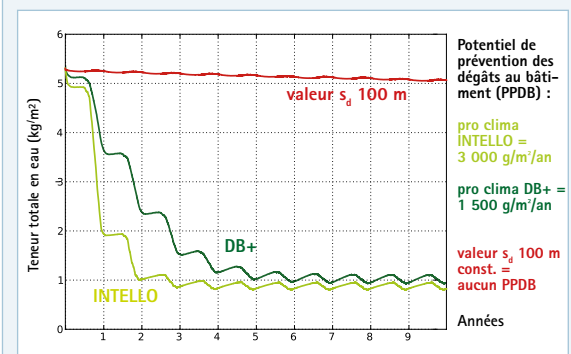
En raison de l'épaisse couche de substrat et des quantités d'eau que celle-ci emmagasine, les toits plats végétalisés sont encore un peu plus inertes que les variantes recouvertes de gravier. En été, les températures au niveau du film d'étanchéité y atteignent des valeurs maximales de 35 à 40 °C. Malgré cela, la construction sans ombre recèle, avec une épaisseur d'isolation de 200 mm et une membrane INTELLO ou INTELLO PLUS, un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de 600 g/m² par an. La paroi dispose de marges de sécurité suffisantes en cas d'apport d'humidité imprévu. Ce fait illustre clairement la prise en compte de l'influence de la végétation (ombrage) et donc de la sécurité dans la série de données. Pour les toits plats végétalisés, les membranes INTELLO et INTELLO PLUS constituent le premier choix en vue de l'absence de dégâts au bâtiment.

Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, Bruxelles, toit

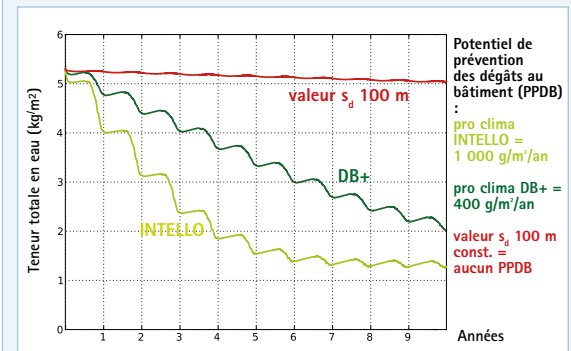
Humidité initiale supplémentaire : 4 000 g/m²

Taux d'humidité de la construction à l'état sec
(= taux d'humidité du voligeage à 15 %) : 1 700 g/m²

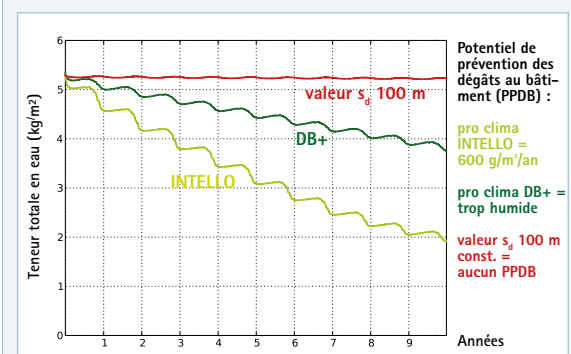
36. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'un toit à forte pente, versant nord, pente du toit 40°



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



38. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert avec 10 cm de substrat

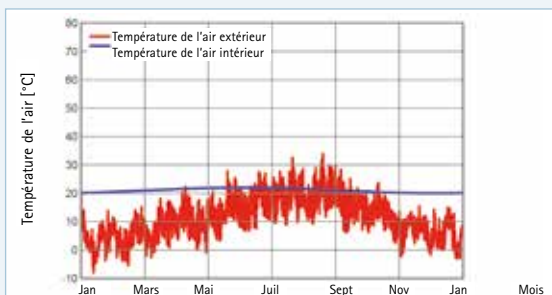




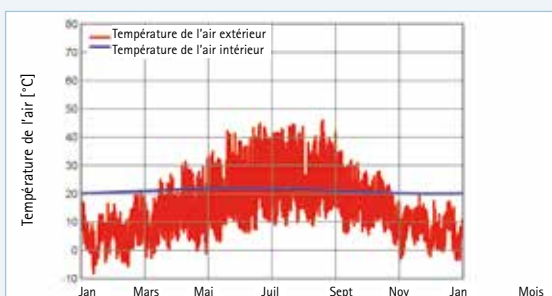
Evolution des températures à Sion (Suisse)

Altitude : 482 m, Couverture : tuiles rouges ou gravier

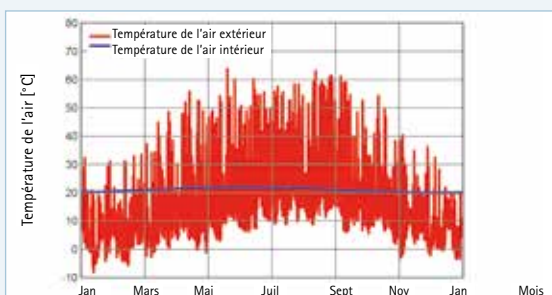
39. Températures de l'air (Sion)



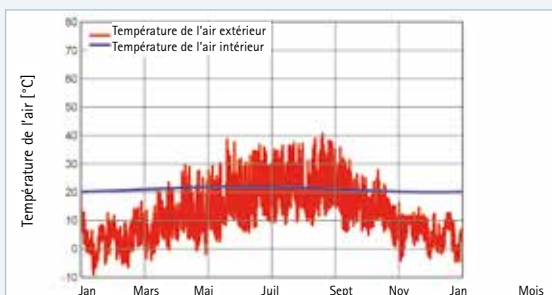
40. Température à la surface du toit, versant nord, pente 40°



41. Température à la surface du toit, versant sud, pente 40°



42. Température à la surface du toit, toit plat en gravier



6.1 Calculs pour la Suisse

Comme nous l'indiquons à la [section 3.5](#), les calculs destinés à déterminer le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment et l'aptitude à l'emploi pour les données climatiques suisses s'effectuent à différentes altitudes. En effet les taux d'humidité dépendent fortement des températures extérieures et du rayonnement global qui règnent aux emplacements respectifs.

Nous distinguons trois situations : la basse altitude, illustrée ici par le climat de Sion (altitude 482 m), la moyenne altitude avec le climat de La Fretaz (1 202 m) et le climat de haute montagne avec Davos (1 599 m).

Les [fig. 39 à 42](#) montrent l'évolution des températures annuelles à Sion. Sion se situe dans le Bas-Valais, sur les deux rives du Rhône. En tenant compte du rayonnement global, l'analyse montre une température à la surface du toit nettement supérieure, en partie, à la température de l'air. Lorsque la température extérieure (en rouge) dépasse la température intérieure (en bleu), le séchage se fait vers l'intérieur avec des frein-vapeurs hygrovariables. Par conséquent, à Sion, une rétrodiffusion est possible de nombreux jours de l'année, même en cas d'orientation au nord ; en cas d'orientation au sud, elle l'est déjà en hiver, les jours ensoleillés.

6.2 Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'un toit à forte pente, versant nord, pente du toit 40°

La vitesse de séchage de l'humidité initiale supplémentaire définit le potentiel de prévention de dégâts au bâtiment de la construction en cas d'apport d'humidité non-prévu (convection, diffusion latérale, etc.). Par rapport à La Fretaz et Davos, Sion offre les potentiels de prévention des dégâts au bâtiment les plus élevés pour un toit à forte pente. C'est principalement grâce au climat favorable qui règne à cette altitude. La température moyenne annuelle issue de la série de données pour Sion est, avec 9,3 °C, supérieure de 4 °C à celle de La Fretaz. Cette différence peut favoriser l'évaporation de l'humidité.

Mais ce n'est pas toujours le cas, comme le montrent les graphiques des résultats

pour les toits à forte pente dotés d'un pare-vapeur (valeur s_d 100 m) à Sion, La Fretaz et Davos ([cf. fig. 43 à 45](#)), aucune des constructions ne dispose d'un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment. La plupart des experts considèrent que ces paroi étanches-étanches ne sont plus conformes aux règles de l'art : la moindre fuite peut occasionner des dégâts au bâtiment par moisissures et décomposition.

Par contre, la même construction à Sion dotée de la membrane pro clima INTELLO recèle un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de 4 000 g/m² par an. Avec un potentiel de séchage de 2 200 g/m² par an, la membrane DB+ favorise également l'absence de dégâts dans les constructions.

Comme nous l'avons déjà indiqué, l'altitude a une grande influence sur l'évaporation de l'humidité. La Fretaz, située à une moyenne altitude de 1 202 m, offre malgré tout de bonnes conditions pour un toit à forte pente. Avec un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de 2 400 g/m² par an pour INTELLO et de 1 300 g/m² pour DB+, les réserves de séchage possibles sont importantes.

L'influence de l'altitude est particulièrement remarquable à Davos. Les calculs ont été effectués avec la série de données climatiques contenues dans WUFI pro [12] pour une année froide, afin de durcir les exigences à l'égard de la construction. La température moyenne annuelle dans ce climat de haute montagne s'élève à seulement 3,2 °C. Dans ces conditions, il n'est plus possible d'utiliser la membrane DB+ (valeur s_d hygrovariable de 0,6 à 4 m). Les quantités de séchage possibles sont trop faibles. Seul le frein-vapeur haute performance INTELLO permet une construction irréprochable en termes de physique du bâtiment, avec une marge de sécurité. D'après les calculs réalisés avec le logiciel WUFI pro [12], il est possible de charger la construction d'environ 1 300 g d'eau par m² et par an, sans occasionner de dégâts au bâtiment ([cf. fig. 45](#)).

6.3 Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit plat en gravier

La couche de gravier épaisse de 5 cm qui sert notamment de protection à la



membrane d'étanchéité, retarde l'échauffement de la construction sous-jacente. D'une part, la couleur est généralement claire ; d'autre part, la chaleur doit d'abord échauffer le gravier ainsi que l'eau qui peut s'y trouver.

La comparaison entre la fig. 40 (toit à forte pente à Sion) et la fig. 42 (toit en gravier à Sion) montre bien l'importance de cette influence. Les températures maximales au niveau de la membrane d'étanchéité du toit en gravier sont inférieures de pratiquement 8 °C à celles du toit à forte pente orienté au nord. En outre, l'échauffement du toit en gravier prend nettement plus de temps. Pour les toits en gravier, le principe est le même que pour les toits à forte pente. Plus l'altitude est élevée, plus le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment est faible. Il est manifeste que les pare-va-peurs avec de fortes résistances à la diffusion n'offrent aucune sécurité dans les éléments de construction.

Par contre, l'utilisation de la membrane DB+ à des altitudes comparables à celle de Sion est possible avec un potentiel convenable de prévention des dégâts au bâtiment. En l'espace d'un an, le toit en gravier peut laisser s'évaporer 800 g/m² d'humidité. Mais c'est la membrane INTELLO qui offre la solution la plus sûre. Avec 1 700 g/m² par an, elle permet de réaliser des toits en gravier fiables sur un site comme Sion (fig. 46).

Pour les emplacements situés à l'altitude de La Fretaz (1 202 m) et Davos (1 599 m), il faut éventuellement des isolations sur toiture supplémentaires au-dessus de la membrane d'étanchéité. Vous trouverez des informations complémentaires à ce sujet dans la section « Recommandations de construction », p. 72.

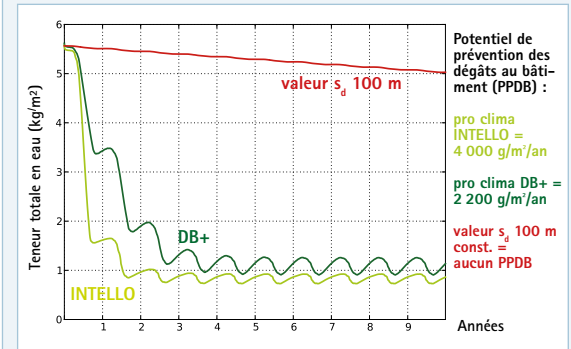
6.4 Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit plat végétalisé

Des couches de substrats supplémentaires sur le film d'étanchéité retardent l'échauffement de l'élément de construction sous-jacent. Par conséquent, l'humidité contenue dans la section de l'élément s'évapore plus lentement de la paroi que dans le cas d'un toit à forte pente ou d'un toit plat en gravier. Malgré cela, une construction sans ombre située à Sion, avec une épaisseur

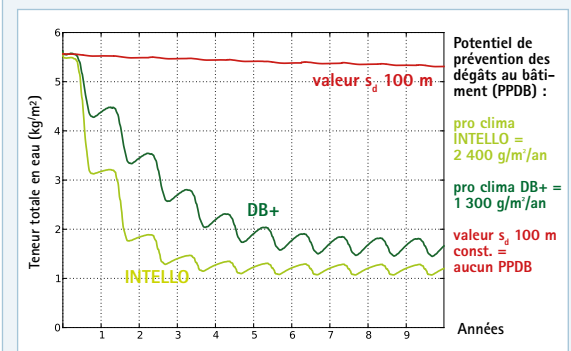
d'isolation de 200 mm et une membrane INTELLO, recèle un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de 1 100 g/m² par an (fig. 47). A des altitudes plus élevées comme celle de La Fretaz ou Davos, les potentiels de prévention des dégâts au bâtiment calculés ne sont pas significatifs. Ici, il faut en principe prévoir des isolations sur toiture supplémentaires, séparées au niveau hydrique. Pour les toits plats végétalisés, les compositions avec le film fonctionnel INTELLO constituent le premier choix pour éviter des dégâts au bâtiment.

Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, Sion, La Fretaz et Davos, toit à forte pente

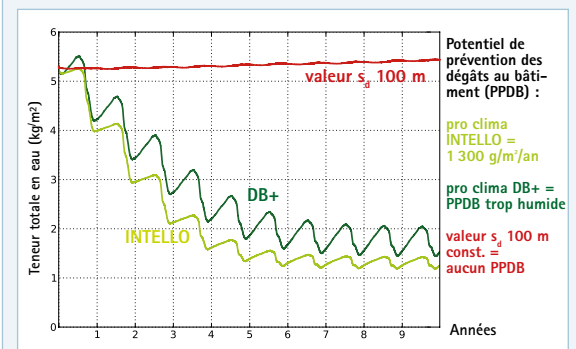
43. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, Sion



44. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, La Fretaz



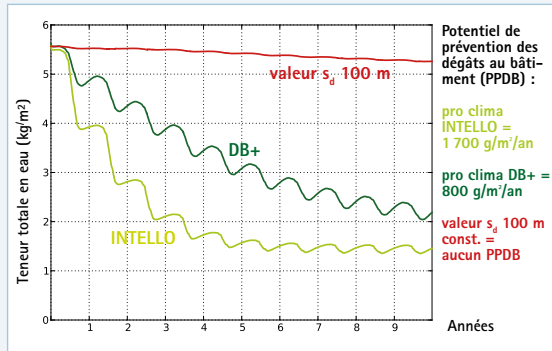
45. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit à forte pente, Davos



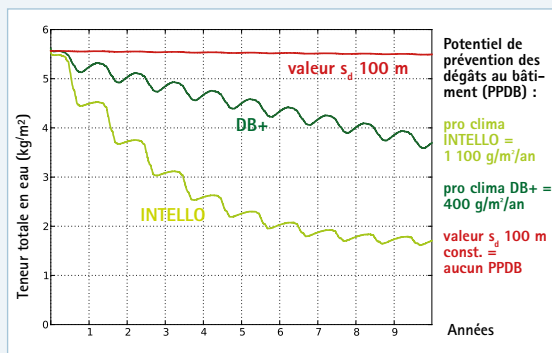


Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, Sion, La Fretaz et Davos, toit

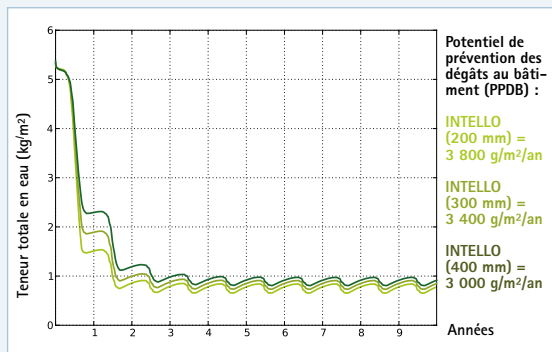
46. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit en gravier, Sion



47. Potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, toit vert, Sion



48. Comparaison du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment avec différentes épaisseurs d'isolation (exemple : Dijon)



7. Influence de l'épaisseur de la couche d'isolation

Ces dernières années, l'épaisseur des couches d'isolation mises en œuvre a augmenté, notamment en raison du durcissement des exigences en matière d'économie d'énergie.

Des épaisseurs d'isolation de 300 mm ou davantage, extrêmement rares jadis dans les bâtiments conventionnels, sont désormais de plus en plus fréquentes.

Or, les constructions à forte isolation thermique ont un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment réduit. En effet, l'échauffement de la paroi est ralenti avec l'augmentation de l'épaisseur d'isolant.

Résultat : cela freine le processus d'évaporation des apports d'humidités imprévus. Et, comme les conditions climatiques extérieures restent identiques, les quantités de séchage sur un an diminuent.

Nous allons illustrer l'influence de l'épaisseur d'isolation sur le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment par l'exemple de Dijon.

Dans leur tendance, les résultats sont transposables à d'autres emplacements traités dans cette étude.

INTELLO : La fig. 48 montre le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment du toit à forte pente décrit en 3.3.1 avec l'INTELLO et une épaisseur d'isolation de 200, 300 et 400 mm.

Le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment y atteint environ 3 800 g/m² par an avec 200 mm d'épaisseur d'isolation, env. 3 400 avec 300 mm et 3 000 avec 400 mm.

DB+ : l'épaisseur d'isolation influe sur le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment évidemment aussi avec le DB+. Avec le DB+, la construction possède un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment de 3 800 g/m² par an avec 200 mm d'épaisseur d'isolation, de 1 800 g/m²/an avec 300 mm et de 1 200 g/m²/an avec 400 mm.

Par conséquent, le principe suivant vaut pour INTELLO et DB+ : même dans le cas des toits à forte pente (40°) étanches à la diffusion sur le côté extérieur et orientés au nord, avec de grandes épaisseurs d'isolation et des tuiles rouges, les éléments de construction bénéficient d'une protection suffisante. En cas de couches d'isolation très épaisses, les toits en gravier ou

végétalisés devraient être examinés au cas par cas lorsque ces épaisseurs divergent des considérations reprises à la section 9.6.1.

8. Conclusions sur le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment

Le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment désigne la capacité d'évaporation possible et constitue une information sur l'efficacité d'une construction. Plus le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment est élevé, plus parois sont fiables, c'est-à-dire capables de gérer des apports d'humidité non-prévus plus importants.

En France, en Belgique et en Suisse, les constructions peuvent en majorité offrir un potentiel de prévention des dégâts au bâtiment impressionnant, de sorte que même celles qui sont exigeantes, comme les toits verts ou en gravier, sont réalisables sans hésitation et surtout sans risque de dégâts au bâtiment. L'essentiel étant que les frein-vapeurs et d'étanchéité à l'air hygrovariables INTELLO et DB+ soient en mesure d'offrir la marge de sécurité nécessaire pour garantir le bon fonctionnement des constructions tout au long de la vie du bâtiment.

De plus, en cas de besoin, de grandes quantités d'humidité peuvent alors s'évaporer des éléments de construction. Ces effets sont confirmés par plusieurs millions de m² de membrane pro clima DB+ posés ces vingt dernières années. Les membranes INTELLO (INTELLO, INTELLO PLUS et INTESANA) sont les perfectionnements logiques de ce concept de protection et augmentent la sécurité constructive. Ainsi, les toits verts et en gravier ainsi que les toits à forte pente étanches à la diffusion côté extérieur peuvent atteindre le niveau de sécurité maximal.

Dans la mesure du possible, les toits plats devraient être conçus sans lestage supplémentaire sur la paroi. Les éléments de construction sans ombre dotés de membranes noires ($\alpha > 0,80$) offrent une sécurité particulièrement élevée. Donc, moyennant le respect d'autres paramètres (entre autres une faible humidité des matériaux, une étanchéité à l'air garantie par un contrôle), ces éléments de construction sont dispensés d'une certification de conformité.



9. Détermination de l'aptitude à l'emploi

Outre le potentiel de prévention des dégâts aux bâtiments, il est décisif d'étudier l'évolution de la teneur en eau des différents éléments constituant la paroi lors de son usage. Une évaluation hygrothermique permet de déterminer quels éléments sont à surveiller. Ces derniers identifiés, la paroi est modélisée de façon dynamique avec une éventuelle modification de la composition (diminution de l'isolant entre la structure porteuse / ajout d'une sur-isolation) afin que les éléments critiques restent sous des valeurs seuils déterminées.

L'aptitude à l'ouvrage d'une paroi dépend de sa composition mais également de la localisation du bâtiment. Une même paroi n'est ainsi pas soumise au même climat à Nancy, à La Rochelle ou à Montpellier. Différentes villes de références ont ainsi été choisies pour représenter les différentes zones climatiques établies dans la RT 2012 (cf. fig. 49).

Chaque cas de paroi (toiture inclinée / toiture plate gravillonnée / toiture plate végétalisée) a été étudié dans ces différentes villes, nous vous présentons à chaque fois le cas le moins favorable. Il s'agit ici de présenter des calculs modèles, dès lors qu'un élément diffère des hypothèses données le résultat peut varier, c'est la raison pour laquelle il ne faut pas hésiter à contacter le service technique pour s'assurer de la pérennité des parois de son projet.

9.1 Méthode d'évaluation

Il est judicieux de considérer l'étanchéité à l'air comme imparfaite lors d'une modélisation hygrothermique. En effet dans le cadre de la RT 2012, le traitement de la perméabilité à l'air des bâtiments à usage d'habitation est obligatoire. Les seuils réglementaires sont les suivants :

- 0,6 m³/(m²*h) pour les maisons individuelles
- 1 m³/(m²*h) pour les logements collectifs
- Pour le secteur tertiaire, aucune exigence de résultat n'est imposée.

Cela signifie qu'il existe une quantité d'air qui réussit à traverser la paroi malgré la présence d'une couche spécifique d'étanchéité à l'air dans les parois.

Comme cela a été présenté §1.3.2 Charge d'humidité par convection, les exfiltrations sont une source d'humidité dans la paroi, il est alors logique de la prendre en compte de façon théorique. Le logiciel WUFI développé par l'Institut Fraunhofer de physique du bâtiment intègre un modèle d'infiltration d'air. L'unité de mesure est la grandeur q_{50} , c'est-à-dire le renouvellement d'air rapporté à la surface de l'enveloppe du bâtiment (et non la valeur n50 qui se rapporte au volume). Par défaut, le modèle d'infiltration d'air distingue trois catégories d'étanchéité à l'air A, B et C qui correspondent respectivement à une valeur q_{50} de 1 m³/(m²*h), 3 m³/(m²*h) et 5 m³/(m²*h). Pour la modélisation de la charge d'humidité non-prévue due à des micro-fuites, on peut considérer que, la catégorie A concerne les parois préfabriqués ainsi que l'étanchéité à l'air contrôlée avec détection des fuites, la catégorie B, l'étanchéité à l'air contrôlée et la catégorie C, les constructions avec une étanchéité à l'air non-contrôlée.

Pour garantir une sécurité maximale de l'ensemble, il faudrait soumettre chaque paroi à un contrôle d'étanchéité à l'air, avec détection de fuites. Dans ce cas, la catégorie d'étanchéité à l'air A peut servir à la certification.

Il faut ici faire attention, l'unité du q_{50} et celle du $Q_{4Pa-surf}$ de la RT 2012 sont identiques mais ne se rapporte pas à la même enveloppe. Les surfaces de planchers bas ne sont ainsi pas pris en compte dans le $Q_{4Pa-surf}$
 $Q_{4Pa-surf} = \dot{V} / AT_{bât}$ en [m³/(m²*h)]
 avec $AT_{bât}$ la surface de parois froides (hors plancher bas en [m²]) et \dot{V} le débit de fuite sous 4 pascal en [m³/h].

Et $q_{50} = \dot{V}_{50} / A_E$ en [m³/(m²*h)] avec A_E l'aire de l'enveloppe en [m²] et \dot{V}_{50} le débit de fuite sous 50 pascal en [m³/h]

relation entre $Q_{4Pa-surf}$ et q_{50}

$$Q_{4Pa-surf} = q_{50} \cdot (4/50)^n$$

n correspond au coefficient d'écoulement de flux, pour une maison individuelle $n \sim 2/3$

Donc avec une classe d'infiltration B ($q_{50} = 3$ m³/(m²*h)) la valeur $Q_{4Pa-surf}$ est de $Q_{4Pa-surf} = 3 \cdot (4/50)^{2/3} \approx 0,56$ [m³/(m²*h)]

Ainsi en prenant en compte une infiltration de classe B lors de la modélisation, cela signifie que l'étanchéité à l'air est environ celle demandée par la RT 2012 pour une maison individuelle.

49. Aptitude à l'emploi, villes références prises en compte France

H1a	Caen	Lille	Trappes
H1b	Nancy		
H1c	Clermont-Ferrand	Dijon	Mâcon
H2a	Brest	Rennes	
H2b	Bourges	La Rochelle	Nantes
H2c	Agen	Millau	
H2d	Carpentras		
H3	Nice	Montpellier	

50. Aptitude à l'emploi - limites

Type de toiture	Ville de référence	Épaisseur d'isolant maximum
toiture inclinée 40° fermée	Caen	360 mm
toiture plate gravillonnée	Nancy	300 mm
toiture plate végétalisée	Brest	280 mm



Ainsi en prenant en compte une infiltration de classe B lors de la modélisation, cela signifie que l'étanchéité à l'air est environ celle demandée par la RT 2012 pour une maison individuelle.

Dans les calculs réalisés pour déterminer l'aptitude à l'emploi, la catégorie d'étanchéité B a alors toujours été choisie comme modèle d'infiltration (hauteur de colonne d'air de 5 m). L'isolant est une laine minérale O35, si un panneau OSB apparaît dans la composition il est de type 3, la volige bois est en résineux (sapin, pin ou épicéa). Les hypothèses et les valeurs seuils sont issues des notices WTA 6-8 (Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege : Groupe de travail technico-scientifique pour la conservation des ouvrages et l'entretien des monuments) sur l'évaluation de l'humidité dans les constructions bois, ainsi que des recommandations professionnelles RAGE de mars 2013 sur les systèmes constructifs à ossature bois annexe D (justification des transferts de vapeur d'eau dans les parois par simulation numérique). Pour la sécurité des éléments de la paroi, il peut être pertinent dès la phase de conception de prévoir une sur-isolation au-dessus de la première couche d'étanchéité – soit au-dessus de l'élément porteur (panneau OSB). Même si cette sur-isolation n'est pas indispensable d'un point de vue de la physique du bâtiment, elle offre l'avantage que l'humidité provenant par exemple d'une fuite de la membrane de revêtement extérieur ne pénètre pas la partie structurelle, qui reste alors protégée. D'un point de vue général, une maintenance régulière des toitures à faible pente est recommandée.

9.2 Aptitude à l'emploi des toitures inclinées (40°)

La configuration de toit est pratiquement celle présentée fig. 11 p. 145 avec des tuiles rouges vernissées, pro clima INTELLO comme membrane d'étanchéité à l'air et frein-vapeur hygrovariable et une volige de 24mm d'épaisseur. Cette paroi a été modélisée sous 17 climats français différents, seul le cas le plus défavorable est présenté.

Le principal élément critique de cette paroi est la volige bois sous la feuille bitumée. Pour s'assurer de la pérennité de

cet élément il est nécessaire que le taux d'humidité de la volige reste inférieur à 20 %. Si cette limite est atteinte, l'épaisseur d'isolant est à réduire ou une couche de sur-isolation est à recommander. Sinon la composition est fonctionnelle et sa sécurité suffisante.

Le cas le plus défavorable dans cette configuration est celui de Caen où l'épaisseur maximale de laine minérale est de 360mm (ce qui représente une résistance thermique supérieure à 10m²K/W). Avec tous les autres climats, une isolation de 400mm pouvait être mise en place. Des épaisseurs d'isolation plus grandes ou des panneaux dérivés du bois sous la membrane bitumée étanche sont possibles, mais ne font pas l'objet de la présente étude.

Le choix de la couverture joue un rôle important, il a été délibérément choisi de tuiles rouges vernissées (brillantes) qui présentent un coefficient d'absorption des rayonnements solaires très moyen. Des tuiles mates ou de couleur sombre permettent un échauffement plus important de la paroi et peuvent ainsi offrir une plus grande marge de sécurité.

9.3 Aptitude à l'emploi des toitures plates gravillonnées

La toiture gravillonnée se présente comme dans l'illustration Abb. 11 possède un panneau OSB/3 de 18mm comme élément porteur et pro clima INTELLO comme membrane frein-vapeur. L'orientation de la toiture n'a que peu d'influence puisqu'il s'agit d'une toiture à faible pente. En revanche, la toiture est ensoleillée (pas de masque portée par les bâtiments voisins ou de panneaux solaires par exemple).

Le cas le plus critique avec cette configuration est celui de Nancy avec une isolation en laine minérale de 300 mm maximum. Au-delà, le panneau OSB présente une teneur en eau trop importante, une sur-isolation incompressible et insensible à l'humidité devient indispensable.

Selon les climats les épaisseurs maximales varient. Néanmoins comme précisé plus haut, l'ajout d'une sur-isolation est toujours avantageuse quelque soit la zone climatique. Puisqu'elle offre une sécurité supplémentaire par rapport à d'éventuelles infiltrations d'eau mais permet également de « couper les ponts ther-

miques » et d'améliorer le confort d'été. L'épaisseur du lestage est importante, les graviers apportent une forte inertie thermique et enferment de l'eau entres-eux. Une forte épaisseur de gravier peut être préjudiciable : l'élément porteur de la toiture est exposé à des températures froides une grande partie de l'année, selon le climat cela n'est pas pérenne.

9.4 Aptitude à l'emploi des toitures végétalisées

La configuration de toiture végétalisée est celle présentée dans l' Abb. 11 avec un panneau OSB/3 de 18mm et une membrane INTELLO. Dans cette paroi également, l'orientation ne joue pas un rôle important puisque la pente est très faible. La toiture est ensoleillée.

Comme pour les toitures plates gravillonnées, ces parois sont exigeantes d'un point de vue de la physique du bâtiment car elles sont fermées à la diffusion côté extérieur et que le substrat apporte une forte inertie thermique (côté extérieur de la paroi).

Le cas le plus critique pour le panneau OSB correspond au climat de Brest, sans aucune sur-isolation, l'épaisseur d'isolant minéral est limitée à 280mm. Pour toute isolation plus importante, l'ajout d'une sur-isolation est indispensable.

9.5 Conclusion de l'aptitude à l'emploi

L'aptitude à l'emploi de parois fermées à la diffusion comme les toitures inclinées (40°), les toitures plates gravillonnées ou végétalisées a été vérifiée par calculs. Toute paroi similaire mais qui diffère par un élément (volige plutôt qu'OSB, épaisseur ou nature d'isolant différent) ou par une hypothèse (localisation, ombre) peut mener à des conclusions différentes et à l'ajout d'une sur-isolation et d'une membrane de séparation hydrique (seconde couche d'étanchéité). Cette sur-isolation est, de façon générale, positive pour la sécurité de la paroi puisqu'elle protège la structure d'une infiltration d'eau si le revêtement extérieur venait à ne plus être parfaitement étanche. Dans toutes ces configurations de toiture un entretien régulier (inspection) est à recommander, pour s'assurer du bon fonctionnement de la toiture (notamment de la bonne évacuation de l'eau).



Diffusion latérale

10. Diffusion latérale

Pour déterminer l'influence de l'apport en humidité par les flancs d'un élément de construction, on examine le raccord entre le mur extérieur intégré et une structure isolante. Sur le côté extérieur de la sous-toiture, la construction dispose d'une bande bitumée étanche à la diffusion (cf. fig. 51).

En règle générale, la maçonnerie a une résistance à la diffusion plus faible que la membrane frein-vapeur et d'étanchéité à l'air de la construction en bois adjacente. Cela permet la diffusion d'humidité dans la structure d'isolation thermique, par ce flanc. Pour cet exemple, le choix s'est porté sur le cas d'une construction neuve. La maçonnerie et la couche d'enduit disposent alors d'un taux d'humidité habituel de 30 kg/m³. L'isolant thermique en fibres est mis en œuvre à sec et le taux d'humidité relatif du bois de la volige est de 15 %. Comme membranes frein-vapeur et d'étanchéité à l'air, on utilise dans l'une des deux constructions un film en PE qui empêche la diffusion (valeur s_d 100 m) et dans l'autre la membrane hygrovariable pro clima INTELLO (valeur s_d de 0,25 à plus de 25 m).

10.1 Résultats de la simulation bi-dimensionnelle

Lorsque les flux de chaleur et d'humidité d'une telle construction sont déterminés par la méthode de calcul bidimensionnelle du logiciel WUFI 2D [8], cela donne le résultat suivant : (cf. fig. 52).

Après une augmentation saisonnière du taux d'humidité dans les deux constructions, celles-ci se trouvent à un niveau haut pratiquement identique.

Dans la variante avec le film en PE comme membrane frein-vapeur et d'étanchéité à l'air, on observe chaque année, sur la période d'étude de quatre ans, une nette augmentation du taux d'humidité total (cf. courbe rouge). Dans cette construction, l'humidité s'accumule dans les matériaux de construction présents, parce qu'aucune rediffusion vers l'espace intérieur n'est possible à travers le film en PE. Conséquence : des moisissures apparaissent sur le bois qui commence à pourrir.

Dans la construction avec le frein-vapeur haute performance INTELLO, l'humidité présente dans la construction peut

s'évaporer vers l'intérieur. La paroi est protégée de l'accumulation d'humidité, celle-ci étant rapidement évacuée dans vers l'intérieur (cf. courbe vert). Ainsi, le taux d'humidité diminue constamment durant la période d'étude de quatre ans. Les constructions dotées des frein-vapeurs INTELLO et DB+ disposent d'un grand potentiel de prévention des dégâts au bâtiment.

10.2 Conclusion sur la diffusion latérale

Les apports d'humidité par diffusion latérale dans le cas d'un mur intérieur intégré à la structure d'isolation thermique, tels que décrits par Ruhe [5], Klopfer [6], [7] et Künzle [8], peuvent s'évaporer à nouveau de la paroi, grâce aux frein-vapeurs INTELLO et DB+. Dans les constructions avec un faible potentiel de prévention des dégâts au bâtiment, il convient d'éviter les processus de diffusion latérale au niveau structurel.

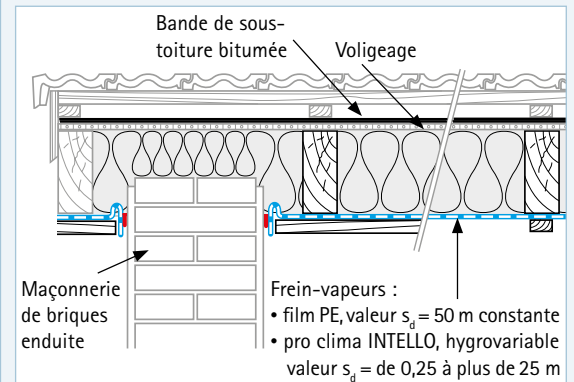
10.3 Cas des murs extérieurs

Les parois verticales sont exposées à un échauffement solaire moins important que les toitures à cause de leur inclinaison. C'est pourquoi leur potentiel de séchage est plus faible. Généralement les murs extérieurs sont ouverts à la diffusion côté extérieur, aucune membrane bitumeuse n'apparaît dans la paroi contrairement à la composition de toitures à faible pente où une étanchéité à l'eau est requise. Les températures des murs extérieurs dépendent en grande partie de la couleur de la façade. Les façades claires mènent à un échauffement solaire plus faible que les façades sombres. L'évolution des températures extérieures présentées Abb. 31 bis 34 est celle d'un mur avec un enduit clair. La membrane frein-vapeur à haute performance INTELLO offre également pour les murs un important potentiel de prévention des dégâts au bâtiment.

Les modélisations avec des logiciels de calcul du transport bidimensionnel couplé de chaleur et d'humidité en respectant et le climat de Holzkirchen (DE) montrent avec INTELLO et INTELLO PLUS un potentiel de séchage suffisant même pour un mur extérieur orienté au nord avec un parement extérieur de couleur clair fermé à la diffusion

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

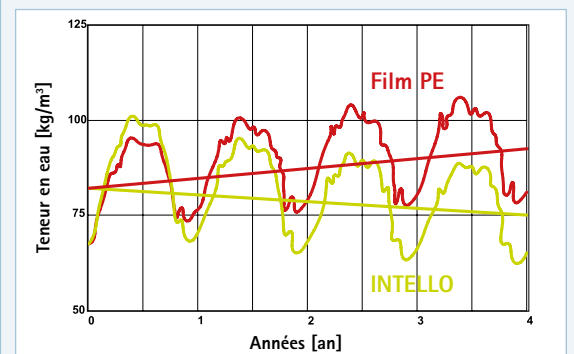
51. Structure de la construction : mur intégré



52. Augmentation de l'humidité avec un film en PE → formation d'humidité = apparition de dégâts au bâtiment

Réduction de l'humidité avec INTELLO

→ séchage = prévention des dégâts au bâtiment



Taux d'humidité croissant dans la paroi avec un film PE, valeur s_d = 100 m constante

Taux d'humidité décroissant dans la paroi avec pro clima INTELLO, valeur s_d = de 0,25 à plus de 25 m

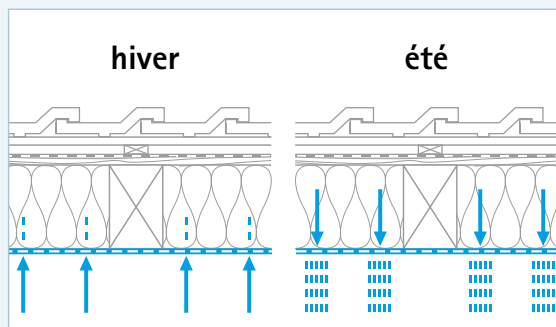
de vapeur d'eau. Ainsi les membranes INTELLO, INTELLO PLUS sont la solution idéale pour obtenir un haut potentiel de prévention des dégâts au bâtiment même avec des panneaux comme l'OSB ou les panneaux de particules côté extérieur du mur. Le risque de développement de moisissure est nettement amoindri. La protection de la paroi contre l'humidité est indispensable et doit être prise en compte lors de sa modélisation. Merci de contacter un physicien du bâtiment. pro clima offre la possibilité d'apprécier le comportement de paroi grâce à son service technique.



Recommandations de construction

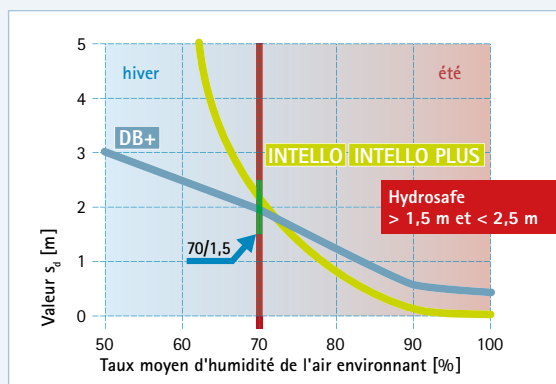
Condition requise pour garantir l'effet des frein-vapeurs hygrovariables

53. Ouverture à la diffusion du côté intérieur



A l'intérieur, il faut des éléments de construction ouverts à la diffusion, afin de ne pas empêcher l'évaporation de l'humidité par rediffusion dans l'espace intérieur.

54. Protection de la structure d'isolation thermique dans les nouvelles constructions et durant la phase des travaux



La valeur s_g des membranes s'adapte aux différents taux d'humidité ambiante. Le respect des règles 60/2 et 70/1,5 garantit un grand potentiel de prévention des dégâts au bâtiment dans la structure d'isolation thermique.

Remarque

La couleur des couches extérieures des parois joue un rôle important pour l'évaluation physique des constructions. Veuillez contacter le service technique pro clima pour de plus amples informations.

11.1 Constructions

Les études de physique du bâtiment avec des données climatiques réelles montrent l'énorme potentiel de prévention des dégâts au bâtiment pour les constructions qui ont recours soit aux frein-vapeurs haute performance INTELLO, INTELLO PLUS et INTESANA et offrant dans toutes les zones climatiques une résistance hygrovariable à la diffusion particulièrement grande, soit au frein-vapeur hygrovariable pro clima DB+ qui a largement fait ses preuves depuis vingt ans. Avec les frein-vapeurs et membranes d'étanchéité à l'air hygrovariables pro clima, les constructions bénéficient aussi d'une grande sécurité contre les dégâts au bâtiment en cas de charges d'humidité élevées. Pour cela, elles ne doivent pas être à l'ombre, d'arbres, d'autres bâtiments avoisinants, de panneaux photovoltaïques etc.

11.2 Parement intérieur

De grandes marges de sécurité sont uniquement possibles si l'humidité peut s'évaporer librement vers l'intérieur. Les parements qui freinent la diffusion sur le côté intérieur du frein-vapeur hygrovariable, comme les panneaux dérivés du bois (OSB ou panneaux multicouches en bois massifs), réduisent la quantité d'humidité qui peut s'évaporer vers l'intérieur et donc aussi le potentiel de prévention des dégâts au bâtiment (cf. fig. 52).

Les matériaux avantageux sont ceux à structure ouverte, comme le lambris, les panneaux légers en laine de bois avec enduit et les plaques de plâtres à parements de carton par exemple. Les constructions comprenant des couches étanches à la diffusion sur le côté extérieur devraient être combinées exclusivement avec des parements intérieurs ouverts à la diffusion. Ainsi, les éléments de construction bénéficieront d'une protection maximale contre les dégâts au bâtiment.

11.3 Pièces humides en permanence

Les frein-vapeurs hygrovariables ne peuvent pas être utilisés dans les milieux où règne une humidité élevée en permanence, comme les piscines couvertes, les centres de cure thermique, les jardinerie ou les cuisines collectives.

11.4 Constructions neuves: phase de séchage – règle 60/2

Le respect de la règle 60/2 permet de protéger efficacement l'isolation des constructions neuves où règne par principe une humidité élevée dans l'air ambiant. Les membranes pro clima INTELLO, INTELLO PLUS, INTESANA et DB+ remplissent ces exigences et favorisent ainsi l'excellente protection des parois contre les dégâts au bâtiment.

11.5 Pièces humides dans les habitations

Les pièces humides voire très humides dans les habitations ont temporairement une humidité relative de la paroi 70 %. Grâce au respect de la règle 60/2, avec une valeur s_d supérieure à 2 m à 70 % d'humidité de l'air ambiant et 50 % d'humidité dans la couche d'isolation (60 % d'humidité moyenne), les frein-vapeurs hygrovariables pro clima INTELLO, INTELLO PLUS, INTESANA et DB+ offrent dans ces pièces une protection optimale. Ainsi, même en cas d'humidité due aux travaux, puis à l'occupation d'une nouvelle construction, cette dernière est suffisamment protégée de l'humidité apportée par l'air ambiant et, par conséquent, de la formation de moisissures (cf. fig. 54).

11.6 Période de chantier: valeur hydrosafe – règle 70/1,5

Les frein-vapeurs pro clima INTELLO, INTELLO PLUS et DB+ possèdent une valeur hydrosafe supérieure à 2m et offrent à la paroi une grande protection contre les charges d'humidité, durant la phase de travaux (cf. fig. 54). Ainsi, les parois dotées de frein-vapeurs hygrovariables bénéficient aussi durant la phase des travaux d'une bonne protection contre la formation de moisissures. La persistance d'un taux d'humidité excessif de l'air ambiant pendant la phase de travaux peut provoquer en principe une accumulation d'humidité dans la construction. Cette humidité devrait pouvoir s'échapper en continu de l'ouvrage, par une ventilation soutenue et systématique. Les déshumidificateurs de chantier aident à alléger la charge d'humidité et permettent ainsi d'éviter la persistance de taux d'humidité relative de



l'air élevés durant cette période. La réduction de la teneur en eau des matériaux humides mis en oeuvre (maçonnerie, enduit, chape, béton...) est également importante pour éviter le développement en surface de moisissures.

11.7 Sous-toiture

Le meilleur choix pour la réalisation de la sous-couverture est l'utilisation de matériaux perméables à la migration de vapeur d'eau (panneaux sous-toiture en fibres de bois ou écran de sous-toiture pro clima SOLITEX) qui permettent un séchage important vers l'extérieur. Les parois avec des éléments extérieurs étanches à la diffusion (couche d'étanchéité), comme les bandes bitumées, les toits plats et les toitures végétalisées, ainsi que les toits à couverture métallique réduisent la sécurité de la paroi en termes de physique du bâtiment. Les voligeages en bois massif offrent de meilleures garanties que les panneaux dérivés du bois (OSB, MDF ... etc) car le bois a une résistance hygrovariable à la diffusion et une bonne capillarité. Grâce à sa grande hygrovariabilité, INTELLO / INTESANA offre un très grand potentiel de sécurité, même avec des matériaux dérivés du bois.

11.8 Toiture inclinée

Dans le cas de parois ouvertes à la diffusion vers l'extérieur, les réserves de séchage sont tellement grandes qu'il n'y a pas de limite d'altitude pour l'utilisation des frein-vapeurs INTELLO / INTELLO PLUS, INTESANA et DB+. Même à des altitudes supérieures à 3 000 m, les constructions sont sûres (cf. fig. 43/44/45). Pour les toitures inclinées fermées à la diffusion côté extérieur, merci de contacter la hotline technique de pro clima.

11.9 Toitures plates et végétalisées

Côté extérieur, les toitures plates et/ou végétalisées ont toujours un revêtement qui sert d'étanchéité à l'eau. Ces revêtements ont une résistance à la diffusion proche de celle d'un pare-vapeur fermé (~90 m) voire sont complètement fermés à la diffusion ($S_d > 1\,500\text{ m}$) s'il s'agit de membrane contenant une couche bitumeuse associée à de l'aluminium.

Dans tous les cas, les possibilités de séchage vers l'extérieur sont réduites au minimum.

De plus, ces toits sont difficiles à ventiler de manière efficace car en l'absence de pente, il n'y a pas de tirage thermique. Ainsi, l'épaisseur de la lame d'air doit être grande et il est indispensable d'avoir des entrées et sorties d'air dans le prolongement de cette lame. Enfin, la lame de ventilation augmente l'épaisseur totale de la paroi.

Les toitures plates non-ventilées peuvent être réalisées de manières efficaces avec les membranes INTELLO / INTELLO PLUS. Les toitures peuvent même être réalisées avec un lestage, une végétalisation ou une terrasse ventilée. Les frein-vapeurs haute performance INTELLO / INTELLO PLUS offrent à la paroi une grande protection contre les dégâts au bâtiment, même en cas de charges d'humidité imprévues. L'humidité peut sécher vers l'intérieur en très grande quantité, sans causer une humidification critique.

La protection de la paroi contre l'humidité est indispensable et doit être prise en compte lors de sa modélisation. Merci de contacter un physicien du bâtiment. pro clima offre la possibilité d'apprécier le comportement de paroi grâce à son service technique.

11.10 Remarques complémentaires sur les domaines d'application

Lorsque les conditions aux limites divergent, il est parfois nécessaire de poser une sur-isolation sur la structure porteuse. Dans ce cas, il faut prévoir une séparation hydrique entre les deux couches d'isolation. Lors de l'utilisation de panneaux multicouches en bois massif ou d'autres panneaux dérivés du bois OSB ... à la place d'un voligeage, il est nécessaire de considérer la structure séparément. En principe, les constructions peuvent aussi être réalisées avec les frein-vapeurs et membranes d'étanchéité à l'air pro clima à des altitudes supérieures ou avec des épaisseurs d'isolation plus grandes. En cas d'ombre portée due à des installations photovoltaïques ou solaires thermiques, des revêtements de terrasse (en bois), des structures architecturales discontinues, la topographie ou encore à des bâtiments ou arbres avoisinants, il faut considérer les éléments de construction séparément. Dans les situations divergentes, n'hésitez pas à vous adresser à la ligne d'assistance technique de pro clima.

55. Mise en dépression/surpression du bâtiment



pro clima WINCON

56. Détermination du taux de renouvellement d'air n_{50}



BlowerDoor



11.11 Toitures inclinées en altitude

Les toitures inclinées fermées à la diffusion côté extérieur peuvent être réalisées avec les membranes INTELLO, INTELLO PLUS de façon sûre grâce au grand potentiel de prévention des dégâts au bâtiment qu'offrent ces membranes. Il est néanmoins décisif de prendre en compte de faire modéliser la paroi et sa protection contre l'humidité par un physicien du bâtiment ou par le service technique pro clima.

11.12 Murs

Les murs à ossature bois avec des éléments ouverts à la diffusion côté

extérieur (SOLITEX FRONTA WA, panneau de fibres de bois...) et derrière un parement ventilé peuvent être réalisés avec INTELLO, INTELLO PLUS ou DB+, quelque soit l'altitude. Pour les murs avec sur-isolation extérieure en mousse synthétique enduite ou pour les murs maçonnés isolés par l'intérieur, les membranes hygrovariables peuvent également être utilisées. Il est recommandé de modéliser ces parois, le service technique peut également vous aider.

11.13 Assurance qualité

L'étanchéité à l'air est idéalement testée juste après sa réalisation. Ainsi si une fuite est identifiée il est facilement possible de la corriger. Cela rend les parois

particulièrement sûres. Les tests peuvent être menés à l'aide de pro clima WINCON (cf fig. 55) qui permet même pendant la phase de chantier de créer une dépression des bâtiments rendus étanches de façon provisoire (portes, fenêtres...). Il est aussi possible de faire réaliser un test intermédiaire avec une porte soufflante (Blower-Door cf. fig.56).

Le test final pour déterminer le n_{50} ou Q4 du bâtiment est ensuite mené avec BlowerDoor une fois le chantier terminé. Une étanchéité à l'air parfaitement réalisée représente un point crucial pour un climat intérieur confortable, des pertes d'énergies faibles ainsi qu'une grande sécurité face aux dommages liés à une humidification par convection.

12. Conclusion



Les constructions avec DB+ ainsi que INTELLO / INTELLO PLUS et INTESANA possèdent, selon leur emplacement et leur structure, d'énormes réserves de sécurité et préviennent donc les dégâts au bâtiment et les moisissures, grâce à leur hygrovariabilité intelligentes.

Même en cas de charges d'humidité non-prévues 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 leurs résistances hygrovariables à la diffusion.

Les frein-vapeurs haute performance INTELLO, INTELLO PLUS et INTESANA possèdent une hygrovariabilité particulièrement grande et efficace dans toutes les zones climatiques. Ils offrent ainsi aux structures d'isolation thermique une sécurité inégalée 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 toitures plates, les toitures végétalisées, les couvertures métalliques et les toits avec une sous-toiture étanche à la diffusion conforme aux normes. Parfois, les parois ont besoin d'une sur-isolation sur toiture supplémentaire pour que les taux d'humidité des voligeages restent inférieurs aux taux critiques.

La conformité des parois, avec des épaisseurs d'isolation plus importantes, peut être vérifiée par des modélisations dynamiques. Il en va de même pour la conformité des constructions situées à des altitudes élevées.

Avec INTELLO, INTELLO PLUS, INTESANA et DB+, la règle de sécurité pro clima se vérifie une fois encore : « Plus la réserve de séchage d'une construction est grande, plus la charge d'humidité imprévisible peut être élevée, tout en préservant la construction des dégâts au bâtiment. » La gestion intelligente des frein-vapeurs INTELLO et INTELLO PLUS et DB+ assure la conformité à cette règle et autorise la réalisation de constructions particulièrement fiables.

Pour plus d'informations sur la mise en œuvre et les détails de construction, veuillez consulter les documents de conception pro clima. Vous pouvez aussi contacter la ligne d'assistance technique de pro clima :
tél. : +33 (0)1 86 37 00 45
eMail : technique@proclima.info

Pour de plus amples informations, consultez notre brochure actuelle:

»Etude de rénovation«

