

Transferts d'humidité à travers les parois



Évaluer les risques de condensation

- Calcul des transports d'humidité et de chaleur
- Règles de mise en œuvre associées

GUIDE TECHNIQUE

Transferts d'humidité à travers les parois

Évaluer les risques de condensation

La présente édition a été rédigée par Charlotte Abelé avec l'aide de :

Bernard Abraham

Jean-Luc Salagnac

José Fontan

Daniel Quenard

Stéphane Gilliot

Claude Pompéo

Septembre 2009

Avertissement

Le présent guide ne se substitue en aucun cas aux textes de référence, qu'ils soient réglementaires (lois, décrets, arrêtés...), normatifs (normes, DTU ou règles de calcul) ou codificatifs (Avis Techniques, « CPT »...) qui doivent être consultés.

Le CSTB décline toute responsabilité quant aux conséquences directes ou indirectes de toute nature qui pourraient résulter de toute interprétation erronée du contenu du présent guide.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

Avant-propos

Cette édition est la mise à jour du Reef Diffusion de vapeur au travers des parois – Condensation rédigé par Jack Berthier et publié en avril 1980.

Sommaire

Avant-propos	1
Introduction	5
1. Air humide	7
1.1 Généralités	7
1.2 Définitions et grandeurs de base	7
2. Matériaux	11
2.1 Caractéristiques	11
2.2 Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux	18
3. Transfert d'humidité	20
3.1 Transfert de la vapeur d'eau	20
3.2 Transfert de la phase liquide	21
3.3 Mécanisme de séchage	22
4. Mise en équations des transferts couplés de chaleur et d'humidité	22
4.1 Les équations de transport	23
4.2 Les conditions limites	23
5. Climat extérieur	24
5.1 Température	24
5.2 Humidité relative	24
5.3 Pluie battante et rayonnement solaire	24
6. Ambiance intérieure	25
7. Évaluation des transferts d'humidité dans une paroi courante de bâtiment en régime permanent	27
7.1 Diffusion de vapeur en régime isotherme	27
7.2 Diffusion de vapeur sous gradient thermique	28
8. Exemples de parois courantes	33
8.1 Parois légères	33
8.2 Murs avec doublage isolant intérieur	36
8.3 Murs avec isolation extérieure	41
8.4 Toitures-terrasses	46
8.5 Couvertures en combles aménagés	48
8.6 Maison à ossature bois	50
9. Annexes	54
9.1 Pression de vapeur saturante	54
9.2 Méthodes de résolution	54
9.3 Grandeurs utiles	56
10. Bibliographie	67
Nomenclature	68

Introduction

Le présent document a pour objet de définir les principaux paramètres qui gouvernent les transferts d'humidité et de chaleur dans les parois d'un bâtiment. Leur calcul ainsi que les quantités d'eau susceptibles de condenser sont également précisés.

Des règles de qualité résultant de ces calculs et de l'expérience sont données afin de limiter les risques de condensation lorsque ceux-ci sont susceptibles d'être nuisibles à l'ouvrage. Dans toute paroi de bâtiment se produisent à la fois des échanges thermiques et des transferts de vapeur d'eau qui dépendent les uns des autres. Par exemple, la *figure 1* représente les échanges hygrothermiques d'une toiture inclinée en fonction des conditions intérieures et extérieures.

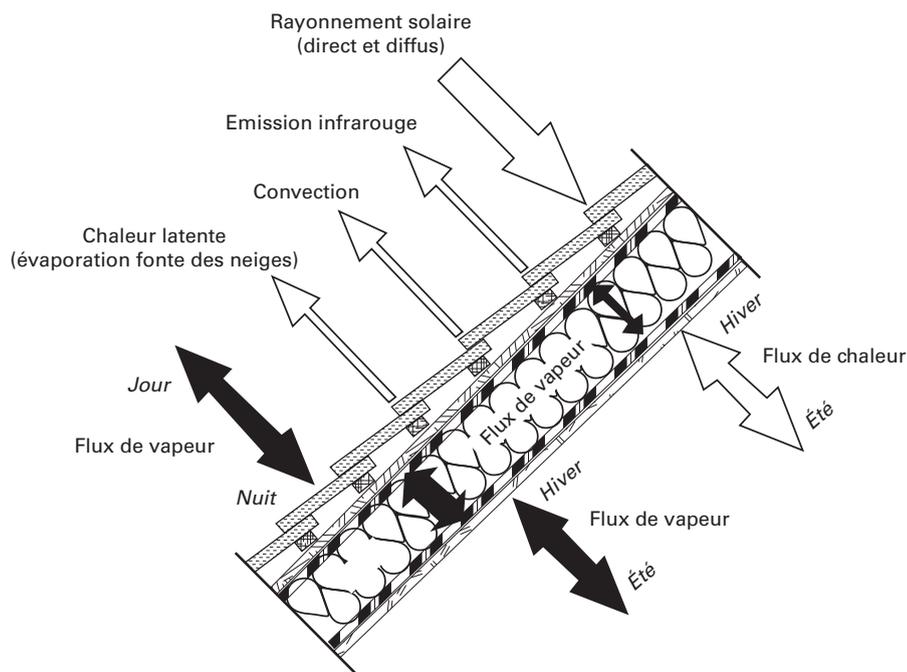


Figure 1 – Représentation schématique des effets de température et d'humidité et de leurs directions [4].

La plupart des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments sont des matériaux poreux dont une partie et éventuellement la totalité des pores sont interconnectés, les rendant perméables à la vapeur d'eau. Par ailleurs, certains matériaux sont hygroscopiques, c'est-à-dire qu'ils sont aptes à fixer l'humidité ce qui peut induire des modifications de leurs caractéristiques physiques, notamment mécaniques et thermiques. À titre d'exemple, l'humidité captée peut augmenter la conductivité thermique des matériaux jusqu'alors isolants induisant une dépense d'énergie supérieure en chauffage. Il est alors nécessaire de contrôler les transferts d'humidité afin de limiter la dégradation des matériaux pouvant entraîner d'une part une fragilisation structurelle et d'autre part un affaiblissement de leurs propriétés physiques.

Les dégradations structurelles ne sont pas les seuls phénomènes à craindre, un autre facteur doit être pris en compte : le niveau de confort des occupants. En effet, un excès ou un manque d'eau peuvent être la cause d'un inconfort plus ou moins sensible pour les occupants.

Les symptômes les plus couramment rencontrés sont l'apparition de condensation sur les fenêtres, de moisissures sur les murs et de réactions allergiques provenant de ces moisissures.

Il faut donc se préoccuper de ces phénomènes tant pour l'occupant que pour la pérennité du patrimoine immobilier. Il est important de déterminer où et quand des risques nuisibles d'humidité sont à craindre pour mieux les prévenir. De plus, les renforcements prévus de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments neufs et son extension aux bâtiments existants sont susceptibles de modifier notablement leur équilibre hygrothermique. La gestion de l'eau doit donc être prise en compte dès la conception des bâtiments neufs pour réduire les risques de désordres ultérieurs et lors d'une réhabilitation pour préserver le bâti.

Ce document rappelle d'abord les différentes grandeurs intervenant dans les transferts d'humidité (pression de vapeur saturante, humidité relative, air sec, air humide, etc.) ainsi que l'influence des climats intérieur et extérieur. Enfin, il propose des outils d'évaluation des transferts d'humidité afin de déterminer rapidement les risques encourus.

Tableau 1 - Processus de dégradation

Processus de dégradation	Principe de dégradation	Exemples de matériaux/ ouvrages concernés	Exemples de conséquences
Imprégnation par - capillarité - condensation - ruissellement	Action physique	Quasiment tous les matériaux (bois, minéraux, synthétiques)	Pertes performances (isolants) Conséquences éventuelles sur la santé (moisissures) Éclatement par le gel (pierre)
	Champignons	Bois	Affaiblissement propriétés mécaniques (pourrissement du bois)

1. Air humide

1.1 Généralités

L'atmosphère terrestre près de la surface du globe est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides. L'air sec est composé d'environ 78 % d'azote, de 21 % d'oxygène et de 1 % de gaz rares. Par ailleurs, l'air ambiant contient une certaine quantité de vapeur d'eau (de 0 à 6 %) mélangé à l'air sec. La vapeur d'eau est fréquemment oubliée de la liste des gaz qui composent l'air ambiant. Pourtant, elle est essentielle au bien-être de la vie et à la durabilité des matériaux.

La molécule d'eau est de très petite taille, elle mesure environ 0,3 nanomètre. Elle traverse donc facilement des structures très fines (béton, bois, plâtre, mousses plastiques, etc.).

1.2 Définitions et grandeurs de base

Les définitions et les notations employées resteront conformes à la norme NF EN ISO 9346 intitulée « Performance hygrothermique des bâtiments et des matériaux pour le bâtiment - Transfert de masse - Grandeurs physiques pour le transfert de masse - Vocabulaire », et à la norme AFNOR NF EN ISO 13788 relative à « Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments. Température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse ».

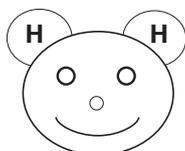
1.2.1 Air sec

L'air sec est un mélange de gaz contenant principalement de l'azote, de l'oxygène, de l'argon, du gaz carbonique et, en faible quantité, un certain nombre d'autres gaz (néon, hélium, krypton, hydrogène, etc.). Les proportions de ces différents gaz, tout en variant légèrement en fonction du temps et du lieu, peuvent être considérées en première approximation comme constantes (air de référence).

Tableau 2 - Portrait de la vapeur d'eau et de l'air humide

Azote N ₂	environ 78 %	
Oxygène O ₂	environ 21 %	
Argon Ar	0,93 %	
Gaz carbonique CO ₂	0,03 %	(en croissance)
N _e , H _e , K _r , X _e	0,01 %	

- Air sec



Taille de la molécule d'eau :
environ 0,3 nanomètre

- Air humide : mélange gazeux d'air sec et de vapeur d'eau

1.2.2 Air humide

L'air humide est un mélange en proportions variables d'air sec et de vapeur d'eau. Il est à noter que la vapeur d'eau étant de l'eau à l'état gazeux, la présence d'eau sous forme liquide en suspension (brouillard) n'intervient pas dans la notion d'air humide et n'entre pas dans le cadre de ce document ; la présence d'eau en suspension peut même constituer un élément perturbateur pour les mesures d'humidité.

Le diagramme de l'air humide (ou psychrométrique) permet de décrire les caractéristiques physiques de l'air humide en fonction de la température (figure 2). Il indique également l'humidité relative (définition en 1.2.9) qui est le ratio entre l'humidité absolue (définition en 1.2.5) et l'humidité à saturation pour une même température.

L'ordonnée présente l'humidité absolue, exprimée en grammes d'eau par m³ d'air. L'abscisse donne la température de l'air ; elle est graduée de - 5 à 35 °C. La courbe de saturation (courbe de 100 % d'humidité relative ou courbe du point de rosée) indique la quantité maximale d'eau que l'air peut contenir à une température donnée. Plus la température est élevée, plus l'air peut être humide : l'air à 23 °C peut ainsi contenir trois fois plus de vapeur d'eau que l'air à 5 °C.

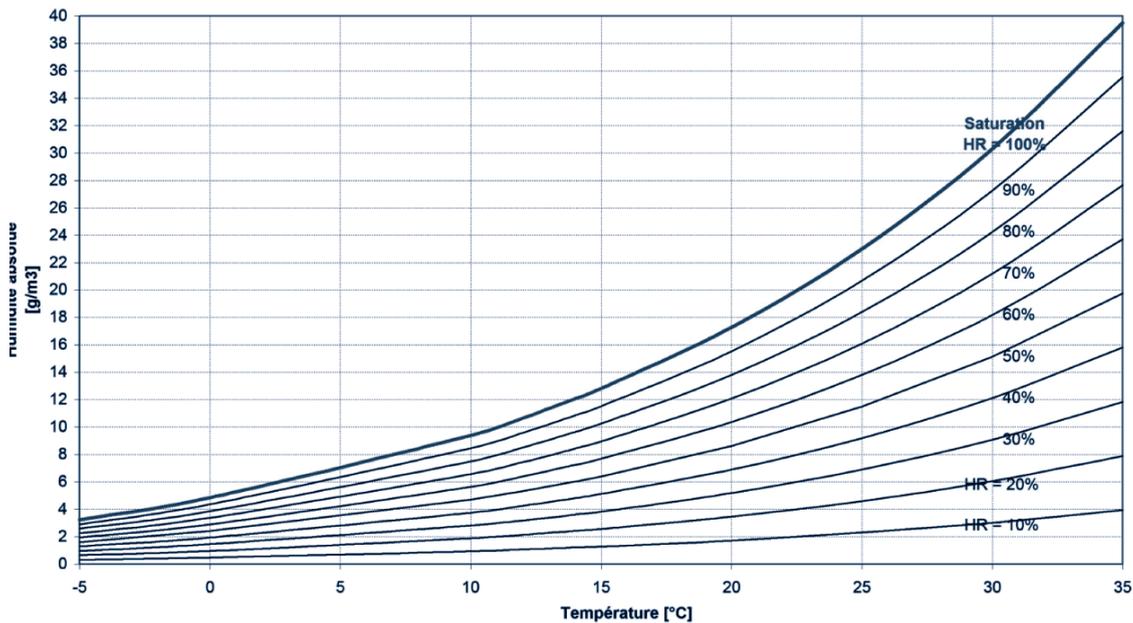


Figure 2 – Diagramme de l'air humide – diagramme de Mollier¹

1. Mollier, Richard (1865-1935) : il présente en 1892 un mémoire à l'université de Munich sur les diagrammes thermiques, événement qui fut le début d'une carrière universitaire consacrée aux applications de la thermodynamique, d'abord à Göttingen puis à Dresde. En 1904, il publie un article présentant des « Nouveaux Diagrammes pour l'enseignement technique de la thermique ». Ces outils, perfectionnés au fil du temps, connurent un succès mondial auprès des techniciens du domaine.

1.2.3 Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air

Dans le mélange de gaz que constitue l'air humide, la pression partielle de la vapeur d'eau p_v est, par définition, la pression qu'aurait la vapeur d'eau si elle occupait à elle seule tout le volume du mélange.

1.2.4 Humidité spécifique (ou humidité massique)

L'humidité spécifique est le rapport de la masse de vapeur d'eau m_v sur la masse d'air sec m_a avec laquelle la vapeur est associée dans l'air humide :

$$x = \frac{m_v}{m_a}$$

Ce rapport s'exprime en kg de vapeur d'eau par kg d'air sec, il est parfois appelé rapport de mélange (noté r).

1.2.5 Humidité absolue (ou humidité volumique)

L'humidité absolue v de l'air est définie comme étant la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Elle est exprimée en kg/m^3 :

$$v = \frac{m_v}{V}$$

où V est le volume de l'échantillon de l'air humide et m_v , la masse de vapeur d'eau.

Cette grandeur est également fréquemment notée W et est identique à la masse volumique de la vapeur d'eau, ρ_v .

Note : pour les valeurs de température et d'humidité absolue couramment rencontrées dans le domaine du bâtiment, les valeurs d'humidité absolue exprimées en g/m^3 sont très proches des valeurs de pression partielle de vapeur d'eau exprimées en mmHg.

1.2.6 Air saturé

L'air saturé correspond à un air humide, à une température et à une pression données, dont la quantité de vapeur d'eau est telle que toute quantité d'eau supplémentaire ne peut apparaître que sous forme liquide ou solide.

1.2.7 Température de rosée

Lorsque l'on refroidit l'air humide en maintenant le rapport de mélange constant, on atteint l'état de saturation pour une température appelée température de rosée (T_d) lorsque celle-ci est supérieure à 0°C ou température de gelée (T_g) lorsqu'elle est inférieure à 0°C .

La température de rosée ou de gelée est la température pour laquelle la pression partielle de la vapeur dans l'air humide est égale à la pression de vapeur saturante.

1.2.8 Pression de vapeur saturante

La pression de vapeur saturante p_{sat} est la pression de vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane d'eau liquide ou de glace à la même température et à la même pression. En d'autres termes, c'est la valeur maximale que peut atteindre la pression partielle de la vapeur à cette température.

On a :

$$p_{\text{sat}} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269T - 4717,03}{T - 35,85}\right) \text{ pour } T \geq 273,15 \text{ K}$$

$$p_{\text{sat}} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875T - 5975,16}{T - 7,65}\right) \text{ pour } T < 273,15 \text{ K (Norme NF EN ISO 13788)}$$

Au-delà de cette valeur, il y a condensation. Ce phénomène peut se produire lorsqu'il existe une différence de température entre deux couches telle que la pression de vapeur saturante (qui est une fonction croissante de la température) de la couche la plus froide est inférieure à la pression de vapeur de la couche la plus chaude. La masse d'eau liquide condensée provient d'une part de la condensation de la vapeur présente dans le milieu et d'autre part de la condensation d'une partie du flux d'humidité en phase vapeur.

Au moment de la condensation, on vérifie :

$$- P_v = P_{\text{sat}}$$

$$- T = T_d$$

Par lecture du diagramme de changement de phase (figure 3), il est possible de savoir si la condensation se fait vers un état liquide ou solide en fonction de la température. Dans le cas de l'eau pure, le diagramme de changement de phase a l'allure suivante :

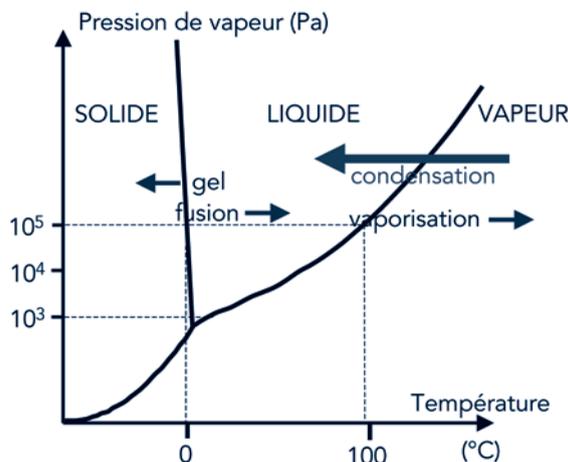


Figure 3 – Diagramme de phase de l'eau pure

La pression de vapeur saturante p_{sat} s'exprime généralement en pascal et ne dépend que de la température. Le *tableau 1* en annexe présente quelques valeurs montrant l'évolution de la pression de vapeur saturante en fonction de la température.

1.2.9 Humidité relative

Si l'air n'est pas saturé d'humidité alors l'humidité absolue de l'air est inférieure à celle obtenue à la saturation. On peut de ce fait définir une grandeur : l'humidité relative, notée φ . Il s'agit du rapport entre l'humidité absolue et sa valeur à la saturation à la même température :

$$\varphi = 100 \cdot \frac{v}{v_{\text{sat}}} (\%)$$

Il s'agit également du rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante :

$$\varphi = 100 \cdot \frac{p_v}{p_{\text{sat}}} \quad (\%)$$

Cette grandeur est également fréquemment notée HR (Humidité Relative).

L'humidité relative (degré d'hygrométrie)

est le rapport de :

- la quantité de vapeur contenue à
- la quantité contenue à saturation

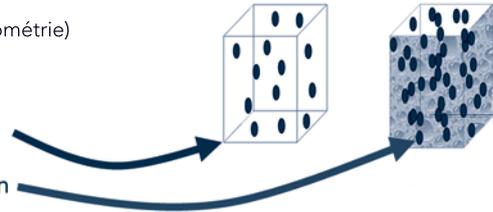


Figure 4 – Définition de l'humidité relative

1.2.10 Pression totale

Dans un mélange de gaz parfaits, la pression totale p est la somme des pressions partielles des constituants du mélange (relation de Dalton). En considérant l'air humide comme le mélange d'air sec et de vapeur d'eau, et en supposant que ces deux gaz suivent le comportement d'un gaz parfait, on peut écrire que la pression totale de l'air humide est la somme de la pression partielle de la vapeur d'eau (p_v) et de la pression partielle de l'air sec (p_a) :

$$p = p_a + p_v$$

2. Matériaux

2.1 Caractéristiques

2.1.1 Porosité

La porosité ε d'un matériau est le rapport du volume des vides sur le volume total. Il existe deux types de porosité selon la disposition des vides :

- la porosité fermée dans laquelle les vides ne communiquent pas entre eux ;
- la porosité ouverte dans laquelle les vides communiquent entre eux. Les fluides peuvent alors circuler plus librement dans le matériau le rendant plus perméable aux transferts gazeux.

Ce paramètre donne une information quantitative sur les volumes respectifs des deux phases en présence mais il ne fournit aucune indication sur leur répartition en taille et spatiale.

2.1.2 Surface spécifique

La surface spécifique représente la surface développée de l'ensemble des parties solides, par unité de volume du milieu poreux. Elle s'exprime alors en m^2/m^3 . Deux milieux peuvent avoir la même porosité mais des surfaces spécifiques différentes. Celui qui présentera la surface spécifique la plus élevée sera un milieu finement divisé avec des pores de faibles dimensions.

2.1.3 Teneur en eau

- Teneur en eau massique : u

La teneur en eau massique d'un matériau est le rapport de la masse d'eau contenue dans le matériau sur la masse du matériau sec. Elle est exprimée en kg/kg :

$$u = \frac{m_e}{m_s}$$

où m_e est la masse d'eau contenue dans le matériau et m_s la masse du matériau à l'état sec.

- Teneur en eau en masse par volume : w

La teneur en humidité en masse par volume est le rapport de la masse d'eau sur le volume apparent du matériau sec. Elle est exprimée en kg/m³.

Il existe une relation entre la teneur en eau massique et la teneur en eau en masse par volume :

$$w = \rho_s u$$

où ρ_s est la masse volumique du matériau sec.

- Teneur en eau volumique : ψ

La teneur en eau volumique est le rapport du volume d'eau sur le volume apparent du matériau sec. Elle peut être déterminée à partir de la teneur en eau massique à l'aide de la formule suivante :

$$\psi = \frac{\rho_s u}{\rho_w}$$

où ρ_s est la masse volumique du matériau sec et ρ_w celle de l'eau (997,6 kg/m³ à 23 °C).

2.1.4 Degré de saturation d'un matériau humide

Le degré de saturation d'un matériau humide est le rapport de la masse d'eau contenue dans le matériau sur la masse maximale d'eau que peut contenir le matériau : $\frac{m_e}{m_{e,sat}}$

où $m_{e,sat}$ est la masse maximale d'eau que peut contenir le matériau.

2.1.5 Hygroscopicité

Un matériau est dit « hygroscopique » s'il peut fixer une quantité mesurable d'humidité de l'air environnant. Le comportement de ce type de matériau peut en partie être caractérisé par sa courbe isotherme de sorption. L'hygroscopicité est plus marquée pour les matériaux présentant des pores très fins (< 100 nm).

2.1.6 Courbe isotherme de sorption

Cette courbe traduit l'accroissement de teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour un matériau donné à une température donnée.

2.1.7 Courbe isotherme de succion

L'état humide d'un matériau peut être caractérisé par sa courbe de succion. Cette courbe présente graphiquement la relation entre la teneur en humidité à l'équilibre du matériau poreux et la succion mesurée dans un pore. La succion, notée s est une différence de pression entre la pression de l'eau liquide dans un pore et la pression totale ambiante.

La courbe isotherme de sorption et de succion sont reliées puisque l'humidité relative peut être exprimée en fonction de la succion à partir de la relation de Kelvin :

$$s = \rho_l \frac{RT}{M_v} \ln \varphi$$

2.1.8 Perméabilité à la vapeur d'un matériau

La perméabilité d'un matériau δ_p définit sa capacité à se laisser traverser par un gaz sous l'action d'une pression entre ses deux faces opposées. Dans le cas où le gaz est la vapeur d'eau, il s'agit du rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité d'épaisseur, de temps et par unité de différence de pression de vapeur régnant de part et d'autre du matériau. Cette grandeur dépend des caractéristiques physiques du matériau telles que le diamètre des pores ou la géométrie des vides.

Dans le système S.I., la perméabilité s'exprime en $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Néanmoins elle est couramment exprimée en $\text{g}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$. La relation entre ces deux unités est la suivante :

$$1 \text{ g}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) = 20,8 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}).$$

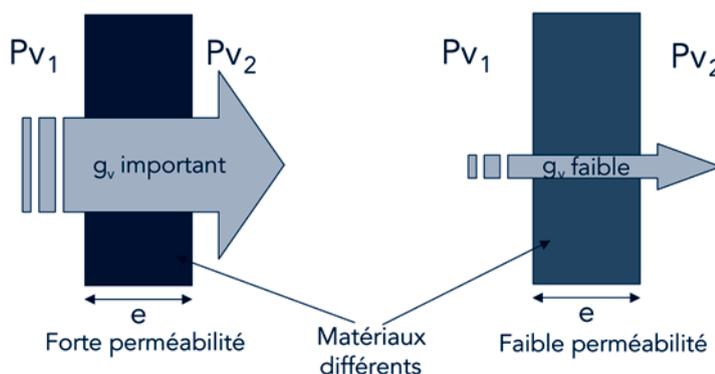


Figure 5 – Perméabilité à la vapeur d'eau

g_v : flux de vapeur

P_{v_1} : pression intérieure

P_{v_2} : pression extérieure

2.1.9 Perméance à la vapeur d'eau d'un matériau

La perméance d'un matériau homogène est le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau sur son épaisseur.

$$\text{Soit : } W_p = \frac{\delta_p}{e} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$$

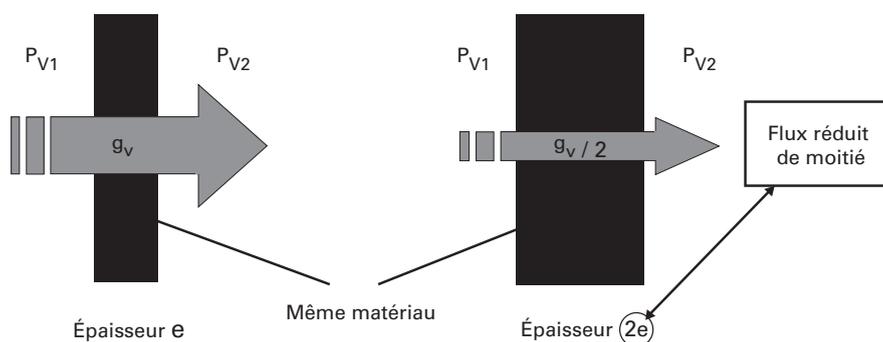


Figure 6 – Perméance à la vapeur d'eau

2.1.9.1 Méthodes de mesure de la perméance à la vapeur d'un matériau

Il existe plusieurs normes relatives à la mesure de la perméance suivant le domaine concerné (emballage, bâtiment, etc.).

Deux méthodes sont principalement décrites dans ces normes :

- méthodes gravimétriques (tableau 3) ;
- méthodes par analyse de gaz (tableau 4).

Tableau 3 – Exemples de normes utilisant les méthodes gravimétriques

Référence	Intitulé
NF EN ISO 7783-1	Peintures et vernis – Détermination du coefficient de transmission de la vapeur d'eau – Partie 1 : méthode de la capsule pour feuillets libres – Septembre 1999
ISO 2528:1995	Produits en feuilles – Détermination du coefficient de transmission de la vapeur d'eau. Méthode (de la capsule) par gravimétrie – Septembre 1995
NF H00-310	Emballages industriels – Matériaux souples et thermosoudables à faible coefficient de transmission de la vapeur d'eau ($P < 0,3$ g/mètre carré 24 h) – Juin 1988
NF EN ISO 12572	Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment – Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau – Octobre 2001
NF EN 12086	Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment – Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau (P 75-215) – Novembre 1997
NF EN 1931	Feuilles souples d'étanchéité – Feuilles d'étanchéité de toiture bitumineuses, plastiques et élastomères – Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau – Octobre 2000

Tableau 4 – Exemples de normes utilisant les méthodes d'analyse de gaz

Référence	Intitulé
ISO 9932:1990	Papier et carton. Détermination du coefficient de transmission de la vapeur d'eau des matériaux en feuille. Méthode dynamique par balayage de gaz et méthode statique – Octobre 1990
ASTM F1249-01	Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheet Using a Modulated Infrared Sensor

- Méthode gravimétrique dite méthode de la coupelle

C'est une méthode gravimétrique utilisée pour un grand nombre d'applications. Elle ne permet pas de mesurer des perméances inférieures à 10^{-2} $g_{eau}/m^2 \cdot jour$ (dans les conditions 38 °C et 0 - 90 % HR).

Le principe consiste à imposer un gradient de pression de vapeur d'eau de part et d'autre d'une éprouvette scellée dans une coupelle (figure 7) et de suivre l'évolution de la masse de l'ensemble jusqu'à l'obtention d'une perte

(ou gain) de masse constante. Le niveau d'humidité relative en sous-face de l'éprouvette est imposé à l'aide d'une solution saline. Différentes solutions existent dans le commerce offrant la possibilité de faire varier les niveaux d'humidité.

La perméance est calculée à partir de la relation suivante :

$$W_p = \frac{P}{S \Delta P} \quad (\text{kg/s.m}^2.\text{Pa})$$

avec : P : flux de vapeur (kg/s) calculé à partir de la pente de la courbe de variation de masse en fonction du temps,

S : la surface de l'éprouvette (m²),

ΔP : la différence de pression de vapeur d'eau (Pa) de part et d'autre du matériau.

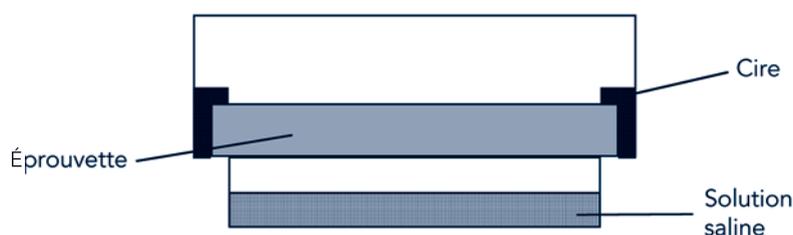


Figure 7 – schéma d'une coupelle

- Méthode par analyse de gaz

Deux normes décrivent cette méthode : ISO 9932:1990 et ASTM F1249. Elle consiste à mesurer ou à détecter la quantité de vapeur d'eau traversant une membrane soumise à une différence de pression partielle de vapeur d'eau (figure 8).

Plusieurs principes de mesure sont utilisés :

- sonde électrolytique ;
- spectromètre de masse ;
- sonde capacitive ;
- miroir refroidi ;
- chromatographie gazeuse ;
- analyse infrarouge.

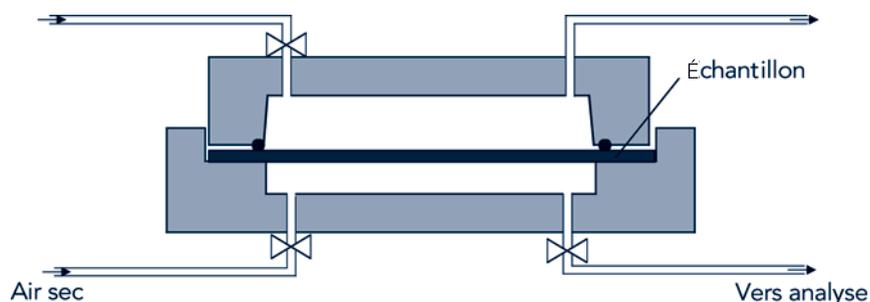


Figure 8 – Cellule de mesure

Suivant le détecteur utilisé, cette méthode permet de mesurer une large gamme de perméance, depuis les matériaux très perméables jusqu'aux films pare-vapeur ($5 \cdot 10^{-3} \text{ g}_{\text{eau}}/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$ dans les conditions 38 °C et $0 - 90 \text{ \% HR}$).

2.1.10 Résistance à la diffusion de vapeur d'eau

L'inverse de la perméance est la résistance à la diffusion notée R_D en $[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}]$.

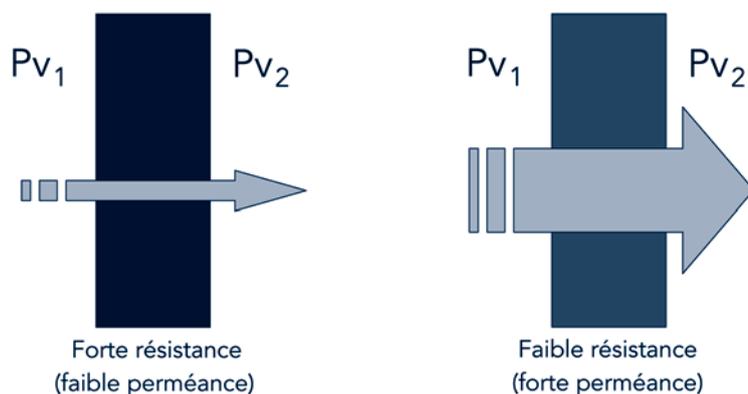


Figure 9 – Résistance à la vapeur

2.1.11 Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau

On définit le facteur de résistance à la diffusion d'un matériau comme le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air sur sa propre perméabilité.

$$\text{On a : } \mu = \frac{\delta_o}{\delta_p} \text{ [-]}$$

D'après [5], la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air peut être calculée à partir de la relation suivante :

$$\delta_o = 2.10^{-7} \frac{T^{0.81}}{p_0} \text{ [kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$$

où p_0 est la pression de l'air ambiant (en Pa).

2.1.12 Épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur

Épaisseur d'une couche d'air telle qu'elle ait la même perméance qu'une couche de matériau d'épaisseur e donnée. Elle peut être déterminée à partir du facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau et de l'épaisseur du matériau à l'aide de la formule suivante :

$$S_d = \mu \cdot e \text{ [m]}$$

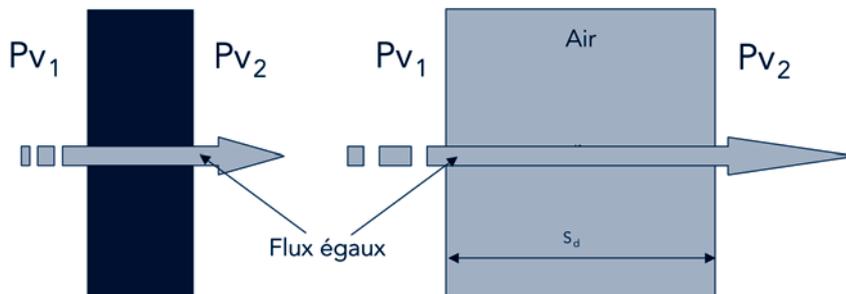


Figure 10 – Transfert de vapeur : grandeurs caractéristiques

2.1.13 Capillarité

C'est la propriété d'un matériau se chargeant en eau liquide à son contact par succion.

2.1.14 Perméabilité liquide et coefficient de transport capillaire

En cas de forte teneur en eau, le transport en phase liquide a une influence sur le transfert d'humidité dans les matériaux poreux. La caractéristique des matériaux qui décrit ce phénomène est la perméabilité liquide K_l (ou conductivité liquide) ou le coefficient de transport capillaire D_w (ou diffusivité hydrique). Ces deux grandeurs sont liées par la relation suivante :

$$K_l = D_w \frac{\partial w}{\partial s}$$

Une méthode simplifiée de détermination est couramment utilisée pour accéder au coefficient de diffusion liquide en cas de contact avec de l'eau liquide (pluie battante par exemple) :

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot \left(\frac{A}{w_f}\right)^2 \cdot 1000^{\frac{w}{w_f} - 1}$$

D_{ws} : coefficient de diffusion liquide par succion

A : coefficient d'absorption d'eau [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$]

w_f : teneur en eau libre

La norme NF EN ISO 15148 datant d'octobre 2003 et relative au « Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment – Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle » présente une méthode de mesure de ce coefficient.

Cette norme précise le protocole de mesure du coefficient d'absorption ainsi que son domaine d'utilisation. En effet, le recours à ce coefficient afin de déterminer une approximation du coefficient de diffusion liquide ne peut être utilisé qu'en contact d'eau liquide mais ne s'applique plus dans le cas du processus de redistribution une fois que la source d'eau a été enlevée. Dans ce cas, d'autres méthodes de mesure du coefficient de diffusion liquide sont alors utilisées faisant appel par exemple à la résonance magnétique nucléaire, aux rayons gamma ou aux micro-ondes.

2.2 Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

Il existe deux phénomènes de fixation de l'humidité : l'adsorption de surface et la condensation capillaire. Pour un état hygroscopique donné, la phase adsorbée et la phase capillaire cohabitent dans le milieu poreux.

Pour expliquer ce phénomène, il est important de différencier les pores de petite taille des plus gros. En effet, les pores de faible taille (inférieurs à 100 nm) définissent le domaine hygroscopique du matériau. Dans celui-ci la quantité d'humidité fixée par adsorption et condensation capillaire n'est pas négligeable. Les pores de taille plus importante sont très peu sensibles à ce phénomène. Il existe au sein des matériaux deux domaines aux propriétés différentes.

Tableau 5 – Description d'un matériau poreux [8]

Domaine hygroscopique	Domaine non hygroscopique
Rayon des pores < 100 nm	Rayon des pores > 100 nm
Adsorption et condensation capillaire importantes	Adsorption et condensation capillaire faibles

2.2.1 L'adsorption

Si l'humidité relative du milieu dans lequel est placé un échantillon de matériau poreux est modifiée et ce à température constante, on constate que le poids de l'échantillon augmente avec l'humidité relative. Ce phénomène est dû aux forces intermoléculaires de Van der Waals agissant sur les molécules de vapeur. La teneur en eau maximale qui peut être fixée par ce mécanisme est en général très inférieure à celle obtenue à la saturation complète.

Les molécules d'eau sont adsorbées physiquement. Elles se fixent sur la surface totale offerte par les pores contenus dans le matériau en formant une, puis plusieurs couches successives de molécules d'eau. La surface disponible est la surface spécifique définie précédemment. Plusieurs théories de l'adsorption surfacique existent. Leur objectif commun est de déterminer la teneur en eau adsorbée en fonction de l'humidité relative.

Il existe deux étapes distinctes au phénomène d'adsorption :

- l'adsorption monomoléculaire : fixation d'une seule couche de molécule d'eau à la surface des pores. L'humidité relative est dans ce cas très faible (< 20 %). Langmuir (1916) a développé une théorie rendant compte correctement de ces phénomènes ;
- l'adsorption plurimoléculaire : fixation de plusieurs couches sur la première. Brunauer, Emmett et Teller (BET, 1938) ont développé un modèle pour exprimer la teneur en eau au cours de ce phénomène.

2.2.2 La condensation capillaire

Au sein d'un pore, les couches plurimoléculaires qui s'accumulent peuvent se rejoindre si le diamètre des pores est suffisamment petit et généralement si l'humidité relative est supérieure à 50 %. Un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque est alors formé. Ainsi, on trouve au sein du matériau une phase liquide et une phase vapeur en équilibre pour une humidité relative inférieure à 100 %.

Kelvin a développé une théorie pour décrire cet équilibre en égalisant les potentiels chimiques des deux phases en présence aboutissant à la loi de Kelvin (donnée en 2.1.7).

Le schéma suivant illustre ces différentes phases :

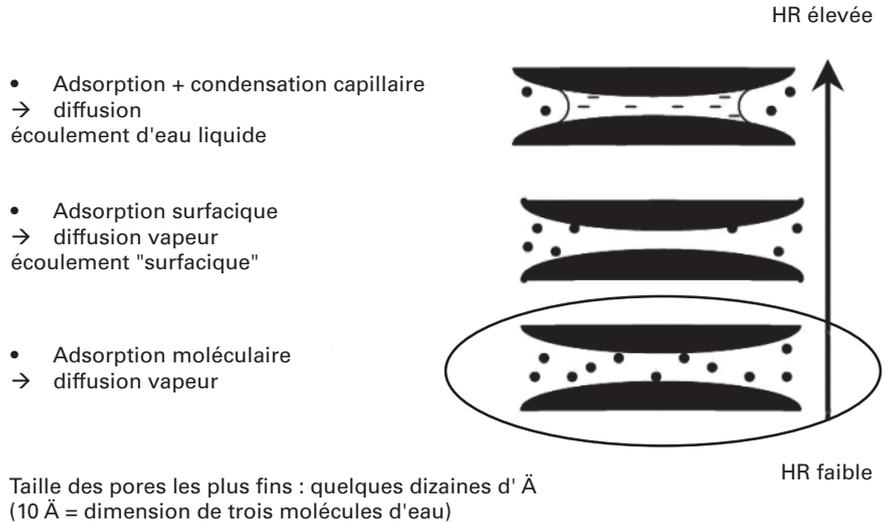


Figure 11 – Mécanisme de fixation de l'eau dans les matériaux [7]

L'isotherme de sorption présentée en figure 12, caractérise la capacité du matériau à stocker de l'eau. Un matériau capillaire actif en contact avec l'eau prendra cette eau jusqu'à ce qu'il atteigne sa teneur en eau de saturation libre (w_f). Cette évolution de la teneur en eau correspond à la fonction stockage d'humidité. En raison des trous d'air emprisonnés dans la structure, la saturation libre est inférieure à la teneur en eau maximale (w_{max}) qui est fonction de la porosité.

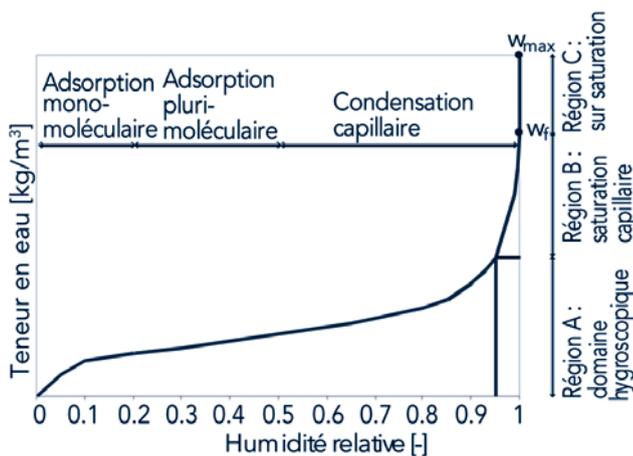


Figure 12 – Isotherme de sorption

Différentes régions de stockage de l'humidité apparaissent lorsque l'humidité augmente.

- Région A : c'est la région dite de « sorption », ou « hygroscopique ». Elle s'étend du matériau sec jusqu'à une valeur de l'humidité relative d'environ 95 %, et prend en compte toutes les teneurs en eau résultant de la sorption d'humidité et de la condensation capillaire jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre.
- Région B : la région capillaire suit la région de sorption et s'étend jusqu'à la saturation libre (w_f : teneur en eau libre).
- Région C : il s'agit de la région dite de « super-saturation », qui ne peut pas être atteinte par le phénomène de succion. Dans la pratique, cet état est atteint au travers des mécanismes de diffusion par gradient thermique, et en laboratoire sous l'application d'une pression ou la mise sous vide préalable de l'échantillon. On se situe au-delà de la saturation libre et on tend vers un état où tous les pores seront remplis d'eau.

La figure 12 est l'isotherme de sorption d'un matériau hygroscopique fictif. Pour les matériaux très peu hygroscopiques tels que la laine minérale, la courbe isotherme de sorption est une courbe proche de 0 pour une humidité relative inférieure à 1. Lorsque l'humidité relative se rapproche de 1, la teneur en eau du matériau passe de 0 à sa valeur maximale. La teneur en eau d'un matériau non hygroscopique est donc toujours très faible pour une humidité relative inférieure à 1.

3. Transfert d'humidité

Le transport d'humidité en milieux poreux résulte d'une composition de différents phénomènes à l'origine du mouvement de chacune des phases présentes (liquide et vapeur). La part de chacun de ces mécanismes sur la quantité d'eau fixée dépend particulièrement des propriétés du matériau, des conditions climatiques dans lequel il est placé (pression de vapeur et température) et enfin de la nature de la phase aqueuse (liquide ou vapeur). On abordera successivement les transferts dans la phase gazeuse puis les transferts induits par la présence de pores remplis d'eau.

3.1 Transfert de la vapeur d'eau

Dans un premier temps, il est important de noter que dans les pores de grande taille la probabilité de choc des molécules d'eau contre la paroi est bien plus faible que celle de choc contre les autres molécules. Dans ce cas, le libre parcours moyen (lpm) de la molécule de vapeur d'eau, qui représente la distance statique parcourue par la molécule entre deux chocs moléculaires, est petit devant la taille du pore.

Ainsi, suivant la taille des pores et la densité moléculaire, deux cas se présentent. Le transfert de vapeur dans les pores de rayon supérieur au libre parcours moyen sera principalement de la diffusion moléculaire. À l'inverse, le transfert de vapeur dans les pores de rayon inférieur au libre parcours moyen sera de la diffusion de Knüdsen.

3.1.1 Diffusion moléculaire

Ce mouvement est celui de la vapeur d'eau qui apparaît dans l'air humide sous l'effet d'une différence de concentration de la vapeur d'eau ou d'un gradient de pression partielle de la vapeur alors que la pression totale reste constante.

À l'échelle d'un pore, la diffusion moléculaire se manifeste lorsque la taille du pore est supérieure au libre parcours moyen de la molécule diffusante, ce qui revient à dire que la probabilité de chocs entre deux molécules est supérieure à celle du choc des molécules contre les parois du pore. Ce phénomène est alors prépondérant dans les plus gros pores du matériau et il est fonction du nombre de molécules présentes donc de la pression totale du gaz.

La loi de Fick permet de décrire ce phénomène mais l'écriture de cette loi diffère suivant les auteurs. L'écriture retenue dans le cas où le **gaz est supposé parfait et la pression totale constante** est la suivante :

$$g_v = - D_v \nabla \rho_v$$

La valeur du coefficient de diffusion D_v résulte du désordre moléculaire et dépend de la pression totale et de la température. Il existe dans la littérature plusieurs expressions de D_v . Par exemple celle utilisée dans le cas de grande dilution est la suivante :

$$D_v = \frac{1}{3} l_{pm} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

3.1.2 Transport de Knüdsen ou effusion

Ce phénomène se produit pour les mêmes raisons que dans le cas de la diffusion moléculaire à la différence que celui-ci se produit dans les pores de rayon inférieur au libre parcours moyen. De ce fait les interactions entre molécules disparaissent et leur vitesse est gouvernée par les collisions contre les parois du pore. Le phénomène ainsi décrit est l'écoulement de Knüdsen.

La loi de transfert applicable à l'effusion est la même que pour la diffusion moléculaire à la différence que le coefficient de diffusion n'est plus proportionnel au libre parcours moyen mais au rayon du pore :

$$g_k = -D_k \nabla \rho_v \text{ avec } D_k = \frac{2}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

La diffusion moléculaire et le mouvement de Knüdsen sont des idéalizations du phénomène physique. Ainsi, le transfert de vapeur dans un pore est une combinaison des deux phénomènes décrits précédemment. On peut alors proposer la modification suivante du coefficient de diffusion :

$$D_v' = \frac{D_v}{1+N} \text{ ou } N \text{ est le nombre de Knüdsen : } N = \frac{l_{pm}}{\text{diamètre}_{\text{pore}}}$$

Par ailleurs, il semble que ce soit le phénomène de diffusion moléculaire qui engendre l'essentiel des transferts de masse au travers des matériaux poreux du bâtiment à pression atmosphérique. Les petits pores, siège de l'écoulement de Knüdsen, jouent un rôle important aux fortes humidités relatives puisqu'ils sont condensés dès que le taux d'humidité relative dépasse 97 % à 20 °C. En effet, un matériau préalablement sec placé dans des ambiances d'humidité croissantes voit en premier ses plus gros pores transporter l'humidité et ses plus petits pores se condenser jusqu'à ce que tous les pores soient saturés d'eau pour une humidité relative égale à 1.

La grandeur mesurée étant la perméabilité à la vapeur, le flux de vapeur peut s'écrire de la façon suivante en utilisant la pression partielle de vapeur comme potentiel moteur :

$$g_v = -\delta_p \nabla p_v$$

3.2 Transfert de la phase liquide

L'écoulement de l'eau liquide est dû à un gradient de pression liquide au sein de l'eau. Celui-ci est dirigé dans le sens des pressions décroissantes.

La densité de flux liquide est décrite par la loi de Darcy qui est la transcription de la loi de Poiseuille à l'échelle macroscopique :

$$g_l = -K_l \nabla p_l$$

Dans cette expression on suppose que les forces gravitaires sont négligeables.

Or d'après la loi de Laplace $p_c = p_l - p_0$ où p_c est la pression capillaire.

La pression de succion ou succion notée s est alors définie par :

$$p_c = s$$

En utilisant la variable s la loi s'écrit :

$$g_l = -K_l \nabla s \quad (p_0 \text{ est la pression de l'air ambiant supposée constante}).$$

Elle peut également s'écrire de la manière suivante en choisissant pour potentiel moteur la teneur en eau :

$$g_l = -D_w \nabla w$$

3.3 Mécanisme de séchage

Lors du séchage d'un matériau saturé d'humidité, ou lors de sa mise en équilibre dans une ambiance définie en humidité relative et température, on distingue trois phases représentant des variations de vitesses caractéristiques.

Durant la première phase, généralement de courte durée, la vitesse de séchage est pratiquement constante ; elle correspond à la vitesse d'évaporation d'un plan d'eau dans l'atmosphère considérée. Cette phase se poursuit tant que les forces capillaires sont capables d'alimenter la surface du matériau en eau liquide, laquelle alors s'évapore.

Lorsqu'il n'en est plus ainsi, le front d'humidité se déplace vers l'intérieur du matériau et la vitesse de séchage va brusquement diminuer, le séchage s'effectuant alors par diffusion à partir du front d'humidité au travers d'une couche de plus en plus épaisse de matériau. Cette phase se poursuit jusqu'à ce que le front d'humidité ait atteint le plan médian du matériau (pour un matériau séchant par deux faces parallèles).

La troisième phase correspond à la mise en équilibre hygroscopique du matériau avec l'ambiance considérée ; elle est marquée par une décroissance sensible de la vitesse de séchage.

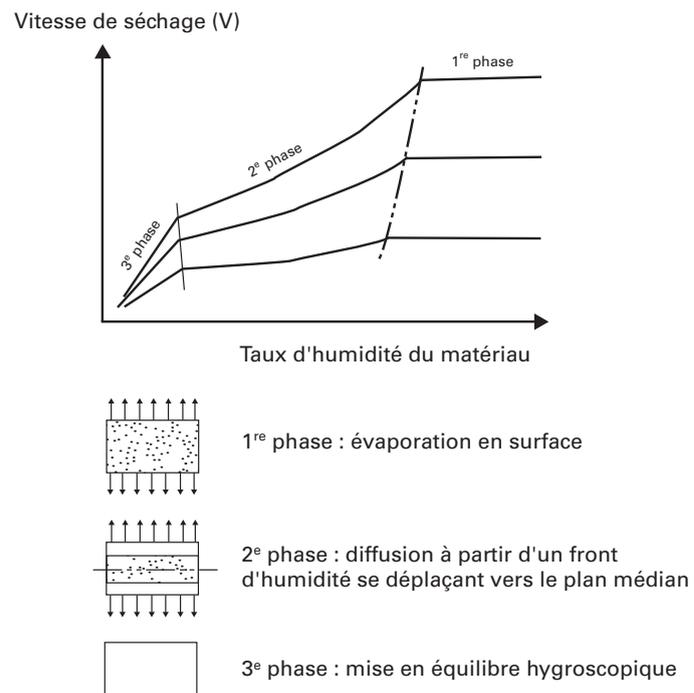


Figure 13 – Courbes caractéristiques de séchage

4. Mise en équations des transferts couplés de chaleur et d'humidité

Les phénomènes physiques de transferts couplés de chaleur et d'humidité sont à l'heure actuelle assez largement connus. Ils résultent du transport simultané des phases liquide et gazeuse présentes dans le milieu poreux. La traduction de ces transferts en équation fait l'objet de cette partie.

4.1 Les équations de transport

4.1.1 Transfert de chaleur

Le flux de chaleur se traduit par une variation d'enthalpie du matériau. Cette variation est principalement due à deux phénomènes distincts :

- d'une part au gradient de la densité de flux de chaleur qui est proportionnelle à la conductivité du matériau et au gradient de température (loi de Fourier) ;
- d'autre part au gradient du flux de chaleur transporté par le flux d'humidité qui peut être pris en compte en ajoutant un terme source. D'après [5] on peut faire l'hypothèse que le seul terme source non négligeable est celui lié au changement de phase.

L'équation de transfert de chaleur est donc la suivante :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (h_c \nabla g_v)$$

4.1.2 Transfert d'humidité

Le transport de l'humidité se fait par l'intermédiaire des deux phases en présence : la phase liquide et la phase vapeur.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (g_l + g_v)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (K_l \nabla s + \delta_p \nabla p_v) = \nabla \cdot (K_l \frac{\partial s}{\partial w} \nabla w + \delta_p \nabla p_v)$$

w est la teneur en eau totale qu'elle soit sous forme liquide ou vapeur.

4.2 Les conditions limites

Dans le cas où les conditions limites sont de type Neumann (flux imposé), la concentration de vapeur à la frontière de la paroi s'établit par transfert convectif modélisé par une loi d'échange de ce type :

$$g_v = h_m [(\rho_v)_{\text{frontière}} - (\rho_v)_{\text{ambiance}}]$$

Parallèlement les transferts de chaleur aux frontières sont de deux types soit convectif soit radiatif. La loi traduisant les échanges convectifs thermiques est analogue à la précédente faisant intervenir un coefficient d'échange thermique h_c :

$$q = h_c [T_{\text{frontière}} - T_{\text{ambiance}}]$$

Dans les fluides libres il existe une relation entre h_c et h_m :

$$h_m = h_c \frac{D_{v0}}{\lambda_{\text{ambient}}}$$

D_{v0} est le coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air ambiant ($D_{v0} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)

5. Climat extérieur

L'évaluation des risques encourus nécessite une bonne connaissance du climat environnant. En effet, l'humidité relative, la température mais aussi la pluie battante, le vent et l'ensoleillement sont tant de paramètres intervenant dans la création d'une ambiance environnante plus ou moins propice aux problèmes d'humidité.

Les différents paramètres à prendre en compte et leurs influences sur les phénomènes qui font l'objet de ce document sont développés dans cette partie.

5.1 Température

La température extérieure est un paramètre essentiel à connaître afin d'évaluer les risques de condensation et déterminer les phénomènes de diffusion à l'intérieur d'une paroi. Le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur est à l'origine d'une diffusion de chaleur couplée à une diffusion de vapeur.

Par ailleurs, la condensation se produit très fréquemment au niveau d'un plan bien déterminé et résulte de la température de ce plan, fonction de la température extérieure.

5.2 Humidité relative

L'humidité de l'air extérieur intervient d'une double façon dans l'examen des phénomènes de condensation :

- la pression de vapeur d'eau régnant à l'extérieur intervient dans le gradient de pression entre l'intérieur et l'extérieur qui commande la diffusion au travers des parois ;
- l'humidité intérieure dépend de l'humidité de l'air extérieur du fait des dispositifs de renouvellement d'air.

Par ailleurs, l'humidité absolue de l'air varie peu au cours d'une même saison ; elle se trouve être maximale en été (environ 12g/m³ en moyenne) et minimale en hiver (environ 6 g/m³ en moyenne). L'humidité relative correspondante étant de l'ordre de 80 % en moyenne annuelle.

5.3 Pluie battante et rayonnement solaire

La connaissance de l'humidité relative et de la température extérieures permet de faire une première évaluation des problèmes causés par l'humidité et en particulier des risques de condensation. Toutefois d'autres paramètres tels que la pluie battante, l'exposition de la façade, son orientation interviennent, de façon plus ou moins importante selon les cas, dans l'évaluation des risques. En effet, une façade exposée plein sud séchera plus vite que celle exposée au nord. De la même façon, selon la direction des vents dominants et de l'intensité de la pluie, les façades ne seront pas toutes mouillées identiquement. De plus, les infiltrations d'eau dans la façade dues à la pluie battante sont d'autant plus importantes en présence de fissures et contribuent à augmenter le taux d'humidité relative des parois.

De ce fait dans des zones à forte pluviométrie il est préférable de ne pas négliger la pluie battante afin d'approcher le cas réel.

6. Ambiance intérieure

La définition de l'ambiance intérieure passe par la détermination de la température et de l'humidité relative. La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant intérieur est un facteur prédominant dans l'évaluation des risques de condensation sur les murs ou les vitrages. De plus, le taux d'humidité relative à l'intérieur d'un bâtiment détermine en partie le niveau de confort ressenti par les occupants et la qualité de l'air. Cette quantité de vapeur d'eau peut être estimée en connaissant les différentes sources de vapeur d'eau et les périodes de production ou par l'estimation de la classe d'hygrométrie du local.

En effet, l'humidité relative intérieure varie avec le type d'activité et d'occupation du local. Elle dépend du nombre de personnes présentes, de leur activité physique (debout ou assis, immobile ou mobile...), du taux de renouvellement d'air assuré par un système de ventilation, des déperditions thermiques, des ouvertures installées (portes ou fenêtres). Dans un logement, diverses sources d'humidité doivent être prises en compte : lave-linge, sèche-linge, lave-vaisselle, cuisine, entretien des sols, douche, etc. Même le mobilier installé intervient puisqu'il peut être à l'origine du stockage puis du déstockage de l'humidité présente dans son environnement et ainsi modifier le taux d'humidité relative intérieure.

Les conditions intérieures, soit la température et l'humidité relative (ou tout autre paramètre mesurant la quantité de vapeur présente dans la pièce) peuvent être obtenues de diverses manières :

- valeurs mesurées dans un bâtiment identique situé sous un climat similaire ;
- valeurs de consigne spécifiées par des systèmes d'air conditionné ;
- valeurs approximées à partir de la production d'humidité et le renouvellement d'air estimés dans le local.

Suivant le type d'activité d'un local (bâtiment d'habitation, activité tertiaire ou secondaire, piscine, etc.), des classes de charge hygrométrique intérieure ont pu être définies dans la norme ISO 13788 relative à la « Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments ».

Tableau 6 – Définition des classes d'hygrométrie

Classe d'hygrométrie	Bâtiment
1	Zones de stockage
2	Bureaux, commerces
3	Logements à faible taux d'occupation
4	Logements à fort taux d'occupation, gymnases, cuisines, cantines ; bâtiments chauffés par des appareils de chauffage au gaz sans cheminée
5	Bâtiments spéciaux : laverie, piscine, brasserie

Dans cette même norme, il est proposé d'obtenir l'humidité de l'air intérieur à l'aide d'une des deux formules suivantes :

$$P_{\text{int}} = P_{\text{ext}} + \Delta p \text{ où } \Delta p \text{ est l'excédent de pression de vapeur intérieure,}$$

$$v_{\text{int}} = v_{\text{ext}} + \Delta v \text{ où } \Delta v \text{ est l'excédent d'humidité intérieure.}$$

Les valeurs de Δp et Δv sont fixées par rapport à l'usage prévu du bâtiment. Les profils suivants pour chaque classe en fonction de la température extérieure peuvent être adoptés :

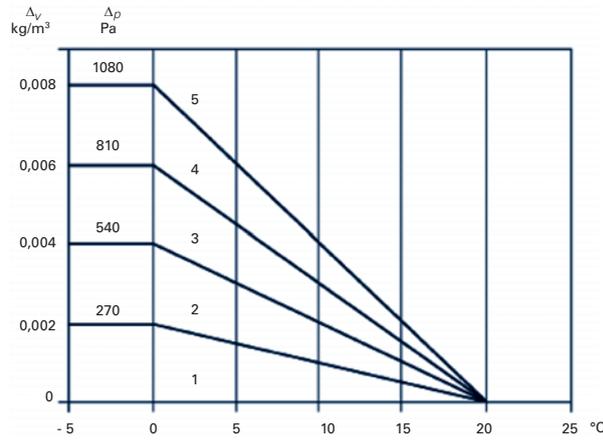


Figure 14 – Variation de production d'humidité intérieure en fonction de la température extérieure et de la classe d'hygrométrie du local [13]

Un autre classement est proposé dans les DTU :

Tableau 7 – Excès d'humidité pour chaque classe d'hygrométrie

Classe d'hygrométrie	W/n
Faible	$W/n \leq 2,5 \text{ g/m}^3$
Moyenne	$2,5 \text{ g/m}^3 < W/n \leq 5 \text{ g/m}^3$
Forte	$5 \text{ g/m}^3 < W/n \leq 7,5 \text{ g/m}^3$
Très forte	$7,5 \text{ g/m}^3 < W/n$

Avec cette notation on vérifie $\Delta v = \frac{W}{n}$

W est la quantité de vapeur produite par unité de temps,

n est le taux horaire de renouvellement d'air.

Si les classes d'hygrométrie définies précédemment ne sont pas utilisées, l'évaluation de la production d'humidité est possible en estimant l'apport en eau de chacune des sources d'humidité intérieures et ainsi leur contribution dans la production totale d'humidité.

Une valeur minimale et une valeur maximale de la production d'humidité interne occasionnée par diverses activités ont pu être approximées :

Tableau 8 – Tableau indicatif de valeurs de production d'humidité [1, 6]

Activité	Unité	Valeur minimale	Valeur maximale
Personne au repos	g/h/pers	40	60
Personne en activité	g/h/pers	80	250
Lessive, toilette & cuisine	kg/j pour 4 pers	5	20
Total apports journaliers du logement	kg/j pour 4 pers	10	25

7. Évaluation des transferts d'humidité dans une paroi courante de bâtiment en régime permanent

7.1 Diffusion de vapeur en régime isotherme

7.1.1 Matériaux non hygroscopiques

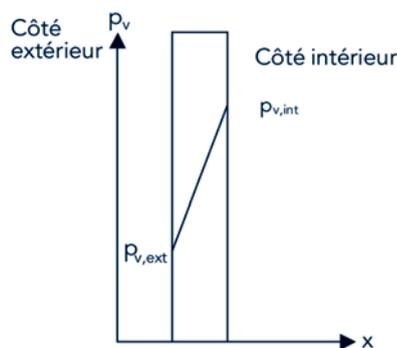


Figure 15 – Cas des parois monocouches

- Paroi monocouche

Considérons une paroi composée d'un matériau homogène non hygroscopique séparant deux ambiances où règne la même température mais où l'humidité de l'air est différente. De ce fait les pressions partielles de vapeur sont différentes dans chaque ambiance, notons les $p_{v,int}$ et $p_{v,ext}$ avec $p_{v,int} > p_{v,ext}$. Le transfert de vapeur à travers cette paroi s'écrit alors de la manière suivante :

$$g_v = -\delta_p \Delta p_v$$

Or en régime permanent g_v est constant d'où une variation linéaire de la pression partielle de vapeur p_v dans la paroi :

$$g_v = -\delta_p \frac{dp_v}{dx} = \delta_p \frac{p_{v,int} - p_{v,ext}}{e}$$

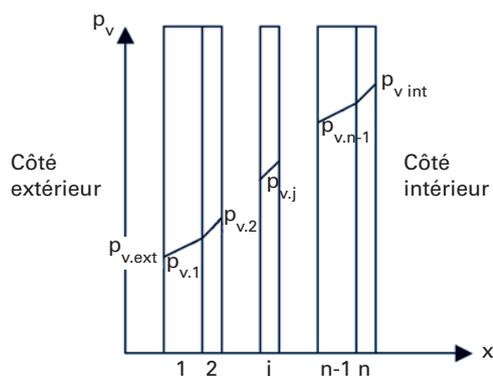


Figure 16 – Cas des parois multicouches

Dans les problèmes de diffusion, il existe des coefficients d'échange surfacique équivalents aux coefficients d'échange superficiel $h_{c,int}$ et $h_{c,ext}$ dans les problèmes thermiques. Néanmoins, la valeur de ces coefficients est telle que la résistance à la diffusion qui en résulte est négligeable devant celle de la paroi, si bien que l'on peut admettre avec une bonne approximation que la pression qui règne sur les faces de la paroi est celle régnant dans l'ambiance en contact.

- Paroi multicouche

Lorsqu'une paroi composée de plusieurs couches de matériaux homogènes de perméabilités différentes sépare deux ambiances où règnent des pressions de vapeur différentes : $p_{v,int}$ et $p_{v,ext}$ avec $p_{v,int} > p_{v,ext}$. Il est possible en régime isotherme de déterminer le diagramme de pression partielle de vapeur dans cette paroi multicouche. Pour cela on raisonne par analogie avec le calcul de flux de chaleur dans une paroi multicouche et le tracé du diagramme de température.

Le transfert au niveau de la couche j est le suivant :

$$g_{v,j} = \delta_{p,j} \frac{p_{v,j} - p_{v,j-1}}{e_j}$$

D'où :

$$g_v = \delta_{p,1} \frac{p_{v,1} - p_{v,ext}}{e_1} = \delta_{p,2} \frac{p_{v,2} - p_{v,1}}{e_2} = \delta_{p,j} \frac{p_{v,j} - p_{v,j-1}}{e_j} = \delta_{p,n} \frac{p_{v,int} - p_{v,n-1}}{e_n} = \frac{p_{v,int} - p_{v,ext}}{\sum_1^n \frac{e_j}{\delta_{p,j}}} \quad (1).$$

La perméance totale de la paroi est telle que :

$$\left(\frac{e}{\delta_p} \right)_{\text{équivalent}} = \sum_1^n \frac{e_j}{\delta_{p,j}}$$

Les relations (1) permettent de calculer les valeurs de $p_{v,j}$ et de tracer le diagramme de la pression partielle de vapeur à l'intérieur de la paroi.

7.1.2 Matériaux hygroscopiques

Les matériaux hygroscopiques sont caractérisés par une perméabilité à la vapeur d'eau variable avec l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle ils sont placés. En effet, la perméabilité à la vapeur croît avec l'humidité relative lentement pour les humidités relatives inférieures à 50 %, mais très rapidement pour les humidités relatives supérieures à 85 %.

Pour ces matériaux, il est donc important de déterminer au préalable la courbe de variation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative.

Pratiquement, il est préférable de connaître la tranche d'humidité relative dans laquelle se trouve la couche de matériau et de lui associer une perméabilité moyenne. Cette perméabilité moyenne servira ensuite à déterminer le diagramme de la pression partielle de vapeur à l'intérieur de la paroi de la même manière que dans le cas où les matériaux sont non hygroscopiques.

7.2 Diffusion de vapeur sous gradient thermique

De façon générale, les phénomènes de diffusion de vapeur sont intéressants à considérer dans le cas de parois extérieures utilisées pour séparer des ambiances à températures différentes. Ainsi, la théorie précédente doit être complétée afin de tenir compte de ce gradient de température.

La perméabilité des matériaux est considérée comme peu influencée par la température ce qui s'avère une approximation suffisante dans les cas abordés.

7.2.1 Matériaux non hygroscopiques

- Paroi monocouche : théorie des tangentes

Considérons une paroi composée d'un matériau homogène non hygroscopique séparant deux ambiances où cette fois-ci règnent les conditions suivantes :

- ambiance intérieure : température T_{int}
pression partielle de vapeur $p_{v,int}$
- ambiance extérieure : température T_{ext}
pression partielle de vapeur $p_{v,ext}$

Les caractéristiques du matériau utiles au problème sont les suivantes :

- la conductivité thermique λ ;
- la perméabilité à la vapeur d'eau δ_p ;
- l'épaisseur e .

À partir de ces données, il est possible de tracer le diagramme de température à l'intérieur de la paroi de la façon suivante.

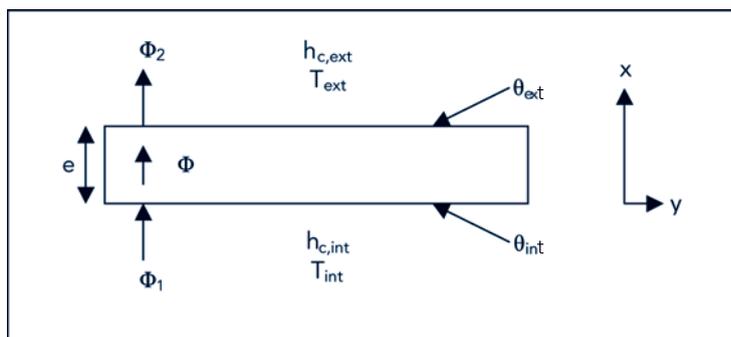


Figure 17 – Diagramme de température à l'intérieur de la paroi

Par analogie électrique R_T est la résistance thermique équivalente de l'ensemble ; parois et conditions limites :

$$R_T = \frac{1}{h_{c,ext}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{c,int}}$$

Le flux total transmis par conduction à travers le mur est le suivant :

$$\Phi = \frac{S}{R_T} (T_{int} - T_{ext})$$

Ce flux est égal aux flux convectifs Φ_1 et Φ_2 soit :

$$\Phi = \Phi_2 = h_{c,ext} S (\theta_{ext} - T_{ext}) = \Phi_1 = h_{c,int} S (T_{int} - \theta_{int})$$

De ces égalités on peut en tirer les températures de parois θ_{ext} et θ_{int} ainsi que le profil de température dans le mur :

$$\theta_{int} = T_{int} - \frac{\Phi}{Sh_{c,int}} ; \theta_{ext} = T_{ext} + \frac{\Phi}{Sh_{c,ext}} ; T_{mur} = (\theta_{ext} - \theta_{int}) \frac{x}{e} + \theta_{int}$$

À partir de ce diagramme de température, il est possible de déterminer :

- le diagramme de pression de vapeur saturante à l'intérieur de la paroi. Il suffit pour cela de faire correspondre à chaque température relevée sur la droite θ_{int} - θ_{ext} , la pression de vapeur saturante correspondante relevée dans le tableau de l'annexe 1 (9.1) ;
- le diagramme de pression partielle de vapeur d'eau à l'intérieur de la paroi. D'après le paragraphe précédent, il s'agit de la droite $p_{v,int}$ - $p_{v,ext}$.

Deux cas sont alors à distinguer :

- si la droite $p_{v,int} - p_{v,ext}$ ne coupe pas la courbe de pression de vapeur saturante et se situe constamment en dessous. Dans ce cas la droite $p_{v,int} - p_{v,ext}$ représente bien le diagramme de la pression partielle de vapeur et il n'y a pas de condensation dans la paroi.
- en revanche, si la droite $p_{v,int} - p_{v,ext}$ coupe la courbe de pression de vapeur saturante en un point tel que la pression partielle de vapeur devient supérieure à la pression de vapeur saturante, il y a condensation. La droite $p_{v,int} - p_{v,ext}$ ne peut donc plus, dans ces conditions, représenter la pression partielle de vapeur d'eau à l'intérieur de la paroi.

Supposons néanmoins que l'humidité intérieure diminue ce qui va se traduire par une diminution de p_v et traçons le point de contact p_1 entre la courbe de pression de vapeur saturante et la tangente à cette même courbe issue de $p_{v,int}$ d'une part et le point de contact p_2 entre la courbe de pression de vapeur saturante et la tangente à cette même courbe issue de $p_{v,ext}$ d'autre part.

Le diagramme de pression partielle de vapeur est composé des trois segments de courbe suivants :

- le segment $p_{v,int} - p_1$
- le segment de courbe de pression de vapeur saturante $p_1 - p_2$;
- le segment $p_2 - p_{v,ext}$

Ce diagramme vérifie bien les conditions auxquelles doivent répondre la pression partielle et sa différentielle :

$$g_v = -\delta_p \frac{dp_v}{dx} \quad \text{et} \quad p_v \leq p_{sat}$$

En conclusion, lorsque la droite joignant $p_{v,int}$ à $p_{v,ext}$ coupe la courbe de pression de vapeur saturante, le diagramme de pression partielle de vapeur à l'intérieur de la paroi s'obtient en abaissant les tangentes à la courbe de pression de vapeur saturante issues de $p_{v,int}$ et de $p_{v,ext}$.

Pour déterminer la quantité d'eau qui se dépose dans la paroi, on peut appliquer la loi de Fick aux parties de la paroi où la pression varie linéairement. Si on appelle e_1 et e_2 , les épaisseurs des couches comprises respectivement entre $p_{v,int}$ et p_1 et entre p_2 et $p_{v,ext}$, la loi de Fick appliquée à la couche e_1 donne la quantité d'eau entrant dans la paroi :

$$g_v = \delta_p \frac{p_{v,int} - p_1}{e_1}$$

appliquée à la couche e_2 elle donne la quantité d'eau sortant de la paroi :

$$g_v = \delta_p \frac{p_2 - p_{v,ext}}{e_2}$$

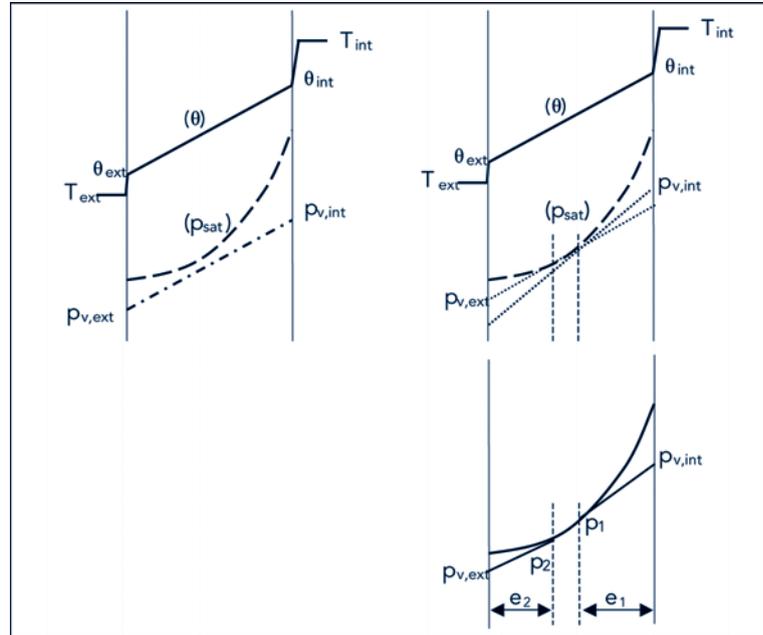


Figure 18 – Diagramme de pression partielle de vapeur

La quantité d'eau restant dans la paroi est obtenue par différence :

$$m_e = \delta_p \left(\frac{p_{v,int} - p_1}{e_1} - \frac{p_2 - p_{v,ext}}{e_2} \right)$$

- Paroi multicouche

Diagramme XY

Dans le cas d'une paroi multicouche, on procède de la même façon que précédemment. Les diagrammes de température, de pression de vapeur saturante et de pression partielle de vapeur sont tracés successivement à partir des données relatives aux ambiances intérieures et extérieures et des caractéristiques λ et δ_p des matériaux de chaque couche.

Si les conditions d'ambiance sont fixées, il est pratique de représenter la paroi multicouche dans un diagramme XY normé à 1 de la façon suivante :

- en abscisse, l'on porte successivement en partant de l'intérieur, le rapport de la résistance thermique de chaque couche ajoutée aux précédentes sur la résistance thermique totale de la paroi ;
- en ordonnée, l'on porte successivement en partant de l'intérieur, le rapport de l'inverse de la perméance de chaque couche ajoutée aux précédentes sur la somme des inverses des perméances des différentes couches composant la paroi.

Dans ces conditions, le point de coordonnée (0,0) représente l'ambiance intérieure et celui de coordonnée (1,1), l'ambiance extérieure.

Le plan de contact entre les couches $n-1$ et n est représenté par le point de coordonnées (X_n, Y_n) .

- Pour des conditions de température et de pressions partielles à l'intérieur et à l'extérieur $T_{int}, p_{v,int}$ et $T_{ext}, p_{v,ext}$ on a, en un point de coordonnée (X, Y) :

- la température : $T_x = T_{int} - X(T_{int} - T_{ext})$;

- la pression partielle : $p_Y = p_{v,int} - Y(p_{v,int} - p_{v,ext})$;

- la condensation sera évitée si en tout point on a : $p_Y < p_{sat}(T_x)$;

où $p_{sat}(T_x)$ est la pression de saturation à la température T_x

Soit :

$$Y > \frac{p_{v,int} - p_{sat}(T_x)}{p_{v,int} - p_{v,ext}} = Y_s(X)$$

- On peut alors, connaissant les conditions $T_{int}, p_{v,int}, T_{ext}$ et $p_{v,ext}$, tracer dans le diagramme XY, une fois pour toutes la courbe Y_s .

Il suffit alors de tracer sur ce diagramme les lignes brisées représentatives des différentes parois à examiner pour déterminer les risques de condensation.

Représentation des diagrammes de température et de pression de vapeur

Cette méthode est basée sur l'égalité des flux à travers la paroi.

Si la paroi est composée de n couches différentes on peut écrire :

- 1) Les relations suivantes pour le flux de vapeur :

$$g_v = \frac{p_{v,int} - p_{v,ext}}{\sum \frac{e_j}{\delta_{p,j}}}$$

À partir de la valeur du flux déterminée par l'égalité précédente chaque pression de vapeur peut être calculée à partir de la valeur de la couche précédente et du flux :

$$g_v \frac{e_1}{\delta_{p,1}} + p_{v,\text{ext}} = p_{v,1}$$

$$g_v \frac{e_j}{\delta_{p,j}} + p_{v,j-1} = p_{v,j}$$

2) Les relations suivantes pour le flux de chaleur :

$$q = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{R_T} \text{ avec } R_T = \frac{1}{h_{c,\text{ext}}} + \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_{c,\text{int}}}$$

À partir de la valeur du flux déterminée par l'égalité précédente chaque température peut être calculée à partir de la valeur de la couche précédente et du flux :

$$q \frac{e_1}{\lambda_1} + \theta_{\text{ext}} = T_1$$

$$q \frac{e_j}{\lambda_j} + T_{j-1} = T_j$$

De cette manière il est possible de déterminer la pression de vapeur et la température à l'interface de chaque couche. Le diagramme de pression de vapeur saturant est ensuite obtenu à partir du diagramme de température par les relations définies au *paragraphe 1.2.8*.

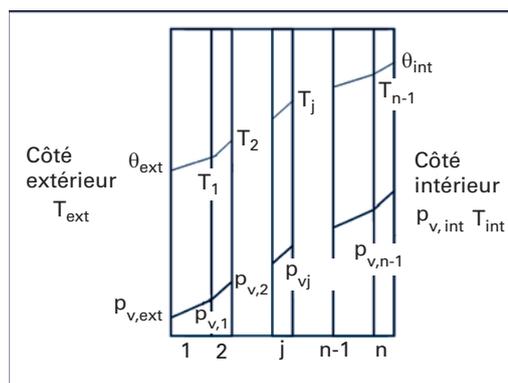


Figure 19 – Représentation des diagrammes de température et de pression de vapeur

7.2.2 Matériaux hygroscopiques

Pour les matériaux hygroscopiques, la perméabilité à la vapeur d'eau est fonction de l'humidité relative des ambiances en contact avec le matériau. Il est alors possible de compléter les diagrammes précédents par un diagramme donnant la variation d'humidité relative et d'en déduire les valeurs de perméabilité à utiliser.

On doit noter toutefois que cela ne constitue qu'une approximation, mais qui est très souvent suffisante pour la pratique. Si l'on désire plus d'exactitude, il convient de diviser chaque couche en plusieurs couches d'épaisseur élémentaire et d'appliquer à chaque couche élémentaire la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau correspondant à l'humidité relative de la couche élémentaire.

8. Exemples de parois courantes

8.1 Parois légères

8.1.1 Panneaux sandwichs

Les panneaux sandwichs sont généralement constitués de deux parements collés sur une âme isolante :

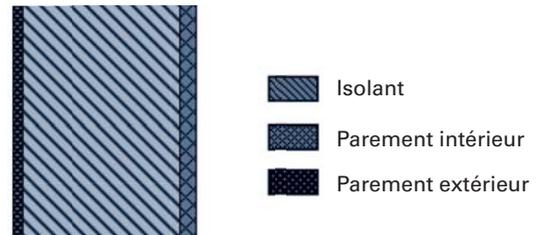


Figure 20 – Schéma de principe d'un panneau sandwich

L'examen des risques de condensation dans une telle paroi montre que les condensations peuvent se produire à l'interface entre l'isolant et le panneau en contact avec l'extérieur (panneau le plus froid). Afin de limiter la dégradation des collages, il est important de réduire les cycles de condensation/séchage au niveau de cette interface.

8.1.1.1 Exemple de paroi

L'étude des transferts de chaleur et d'humidité peut être réalisée à l'aide d'un diagramme XY normé à 1 (conformément à l'explication donnée au paragraphe 7.2.1). Afin d'illustrer cette méthode on s'appuie sur l'exemple théorique d'un panneau sandwich isolant constitué de deux parements différents.

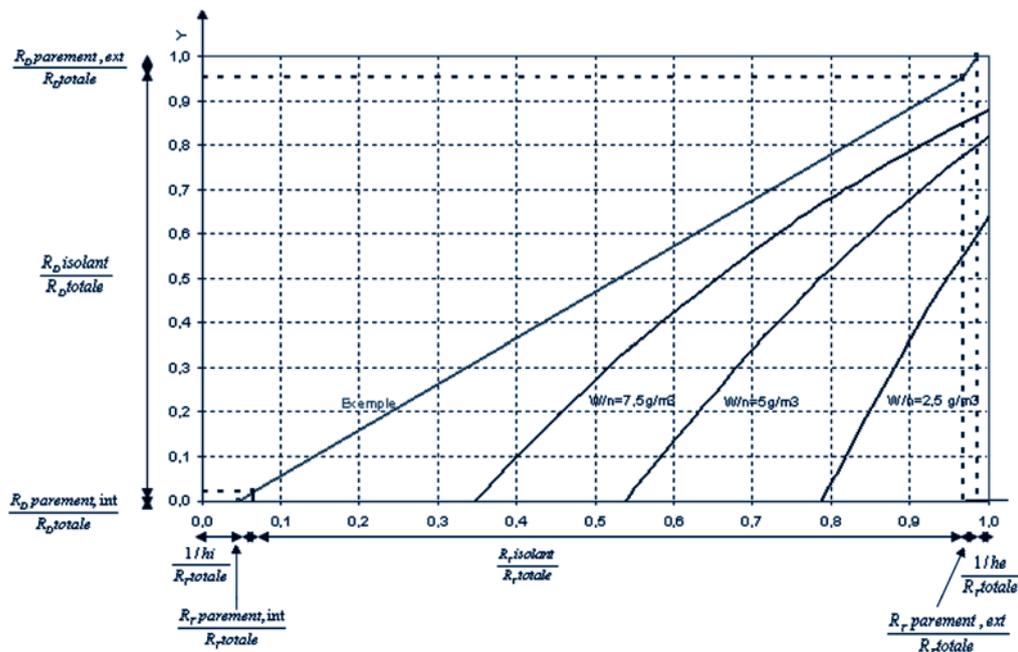


Figure 21 – Diagramme XY d'une paroi constituée d'une couche d'isolant (100 mm) entre deux couches différentes de parement

En abscisse est porté le rapport de la résistance thermique de chaque couche sur la résistance thermique totale de l'ensemble (air intérieur, panneau, air extérieur). En ordonnée est porté le rapport des perméances de chaque couche sur la perméance totale de la paroi (les perméances des couches d'air sont négligées).

De cette manière, pour l'exemple choisi les coordonnées des différentes interfaces entre les différentes couches du panneau sandwich figurent dans le *tableau 9*. Le *tableau 10* indique les caractéristiques des matériaux utilisés pour l'exemple.

Tableau 9 – Coordonnées XY des interfaces du panneau

	X	Y
Air intérieur	$4,7 \cdot 10^{-2}$	0
Parement intérieur	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Isolant peu perméable	$9,7 \cdot 10^{-1}$	$9,5 \cdot 10^{-1}$
Parement extérieur	$9,9 \cdot 10^{-1}$	1

Tableau 10 – Caractéristiques des matériaux

	λ [W/mK]	Perméabilité [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	R _T [m ² K/W]	R _D [m ² .s.Pa.kg ⁻¹]
Isolant peu perméable	0,04	$3,8 \cdot 10^{-12}$	2,5	$2,6 \cdot 10^{10}$
Parement extérieur	0,13	$3,2 \cdot 10^{-12}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^9$
Parement intérieur	0,25	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^8$

Ainsi le panneau sandwich est représenté par la ligne brisée joignant les points X_i, Y_i relative aux interfaces entre chaque couche (*figure 21*).

8.1.1.2 Évaluation des risques à partir des courbes de production W/n

Pour cet exemple on se place dans des conditions extérieures relativement sévères :

- température : 0 °C ;
- humidité relative : 80 %.

Le climat intérieur est défini à partir de la production d'humidité associée aux classes d'hygrométrie utilisées dans les DTU (*tableau 7*).

À partir de ces valeurs (W/n et température et humidité relative extérieure) il est possible de représenter les conditions de température et d'humidité relative au sein du panneau.

Compte tenu des conditions extérieures

$$(T_{\text{ext}} = 0 \text{ °C} ; \varphi_{\text{ext}} = 80 \%), v_{\text{ext}}(T_{\text{ext}}) = 3,87 \text{ g/m}^3 \text{ et } p_{v,\text{ext}} = 488 \text{ Pa}$$

Cette valeur peut être corrigée compte tenu du fait que l'air extérieur se trouve porté à la température intérieure. Soit :

$$v_{\text{ext}}(T_{\text{int}}) = v_{\text{ext}}(T_{\text{ext}}) \frac{1}{1 + \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{273}}$$

Dans ce cas :

$$v_{\text{ext}}(T_{\text{int}}) = 3,61 \text{ g/m}^3 \text{ à } 20 \text{ °C et } v_{\text{int}}(T_{\text{int}}) = v_{\text{ext}}(T_{\text{int}}) + \frac{W}{n} \text{ Soit } p_{v,\text{int}} = v_{\text{int}} \frac{RT_{\text{int}}}{M_v}$$

De ces relations, on en déduit les tableaux suivants :

Tableau 11 – Tableau de valeurs pour les courbes W/n

W/n	v_{int} [g/m ³]	$P_{v,int}$ [Pa]	$P_{v,int}-P_{v,ext}$ [Pa]
2,5	6,11	827	338
5	8,61	1 165	676
7,5	11,11	1 503	1 015

X	T _x [K]	P _{sat} (T _x) [Pa]	p _{v,int} -p _{sat} pour $\frac{W}{n}$ [Pa]			Y _s (X) pour $\frac{W}{n}$		
			2,5g/m ³	5g/m ³	7,5g/m ³	2,5g/m ³	5g/m ³	7,5g/m ³
0	20	2 337						
0,1	18	2 063						
0,2	16	1 817						
0,4	12	1 402			101			0,10
0,5	10	1 227			276			0,27
0,6	8	1 072		93	431		0,14	0,42
0,7	6	935		230	568		0,34	0,56
0,8	4	813	14	352	690	0,04	0,52	0,68
0,9	2	705	121	459	798	0,36	0,68	0,79
1,0	0	610	216	554	892	0,64	0,82	0,88

8.1.1.3 Conclusion

La comparaison de la position graphique du diagramme représentant le panneau sandwich et des courbes W/n permet de déterminer si oui ou non il y a des risques de condensation. Dans l'exemple précédent, on constate qu'aucun risque n'existe et ce quelle que soit la classe d'hygrométrie du local. En effet, la courbe reliant les points représentant l'interface entre les couches du panneau se situe toujours au-dessus des courbes W/n.

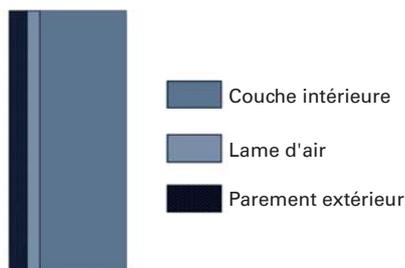


Figure 22 – Schéma de principe d'une paroi avec lame d'air

8.1.2 Parois avec lame d'air

Il s'agit de parois composites comportant des couches intérieures incorporant l'isolation thermique et des couches extérieures généralement réduites au revêtement extérieur, séparées par une lame d'air communiquant avec l'extérieur.

Des condensations peuvent se produire sur la face intérieure de la partie extérieure de la paroi. Pour les limiter, il est important que la ventilation de la lame d'air soit suffisante pour que l'humidité diffusant de l'intérieur vers l'extérieur ne sature pas l'air de celle-ci.

La règle pouvant être énoncée porte sur la section des ouvertures de ventilation en bas et en haut de la lame d'air exprimée en cm² par mètre de largeur de mur.

La section des ouvertures de ventilation à retenir est de 50 cm²/ml si la perméance des couches intérieures est au plus égale à 1,25.10⁻⁹ kg/(m².s.Pa) [soit 0,6 g/(m².h.mmHg)].

Pour une section inférieure à 10 cm²/ml (en dessous de laquelle on considère que la ventilation est quasi nulle), la perméance doit être inférieure à 3,12.10⁻¹¹ kg/(m².s.Pa) [soit 0,015 g/(m².h.mmHg)].

8.2 Murs avec doublage isolant intérieur

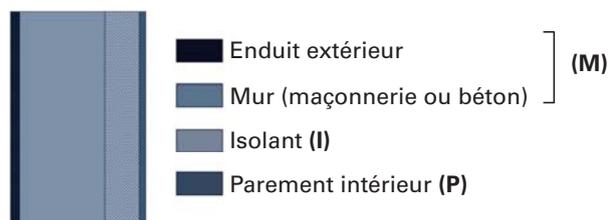


Figure 23 – Schéma de principe d'une paroi isolée par l'intérieur

Il s'agit de murs en maçonnerie ou en béton contre lesquels est disposée une couche d'isolation qui est elle-même fixée au parement intérieur.

Dans certains cas, l'isolant et le mur ou l'isolant et le parement intérieur peuvent être séparés par une lame d'air.

L'analyse des risques de condensation dans ces parois montre que :

- des condensations à la surface intérieure du mur extérieur en maçonnerie ou en béton sont inévitables (et ce d'autant plus que la paroi est isolée) ;
- des condensations peuvent également se produire dans certaines circonstances dans l'épaisseur de l'isolant ou sur la face intérieure de l'isolant.

De ce fait deux exigences peuvent être formulées :

- ne pas avoir de condensation dans l'épaisseur de l'isolant ni sur sa face intérieure ;
- faire en sorte que les condensations sur le mur soient limitées dans le temps et donc non dommageables.

Ces deux exigences amènent à la définition de trois règles énoncées ci-dessous.

- Condensation sur la face intérieure de l'isolant

Ce risque est principalement conditionné par la température atteinte en ce plan. Une règle simple portant sur les résistances thermiques du parement intérieur et de l'isolant permet de l'éviter :

$$R_{T,I} > 3 R_{T,P}$$

Il est important de noter que cette règle est très souvent respectée dans le cadre de la réglementation thermique actuelle compte tenu du garde-fou à respecter. Avec les systèmes constructifs couramment rencontrés (bloc creux, briques pleines, béton plein), ce garde-fou impose une résistance thermique de l'isolant d'au moins 1,5 m²K/W (RT 2005). De ce fait, elle est toujours trois fois supérieure à celle du parement intérieur.

- Condensation dans l'épaisseur de l'isolant

Ce risque dépend de plusieurs facteurs : épaisseur et perméabilité de l'isolant, résistance thermique du mur et température extérieure entre autres.

On peut noter que ce risque augmente :

- plus la résistance thermique du mur est faible ;
- plus l'isolant est imperméable à la vapeur et son épaisseur grande ;
- plus la température extérieure est basse.

Néanmoins un tel risque n'est à craindre que dans les locaux à forte hygrométrie. On peut s'en prémunir en disposant d'une paroi intérieure éventuellement complétée par une barrière limitant le transfert de vapeur. La règle proposée est la suivante :

$$\frac{1}{R_{D,P}} < 1,25 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sPa}) [= 0,06\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})]$$

- Condensation à la surface intérieure du mur extérieur

Ces condensations sont quasiment inévitables ; le problème est de concevoir la paroi pour s'en accommoder. Les paramètres intervenant principalement dans ce phénomène sont :

- la température de la surface intérieure du mur et le temps pendant lequel celle-ci peut rester négative. Ces informations dépendront du climat extérieur, des caractéristiques thermiques du mur et de l'isolant (plus l'isolation est importante, plus la température du mur sera basse augmentant les risques) ;
- la résistance à la diffusion des couches intérieures ($R_{D,P} + R_{D,I}$) qui permettra de limiter la quantité d'humidité qui diffuse et de la tenir en dessous d'une valeur acceptable.

Une première condition permettant de limiter les risques est la suivante :

$$R_{T,I} + R_{T,P} < 3R_{T,M}$$

Cette condition n'est pas vérifiée dans les constructions couramment rencontrées et respectant la réglementation thermique actuelle sauf dans le cas des maçonneries isolantes.

Dans ce cas, si $R_{T,I} + R_{T,P} > 3 R_{T,M}$ il faut envisager de limiter le flux de vapeur en privilégiant les choix suivants :

si $R_{T,M} > 0,086 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ alors $\frac{1}{R_{D,I} + R_{D,P}} < 6,24 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sPa})$
[ou $0,3\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$],

si $R_{T,M} < 0,086 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ alors $\frac{1}{R_{D,I} + R_{D,P}} < 1,25 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sPa})$
[ou $0,06\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$],

si la zone est très froide alors $\frac{1}{R_{D,I} + R_{D,P}} < 3,12 \cdot 10^{-11} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{sPa})$
[ou $0,015\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$].

La zone très froide est définie comme la zone où la température de base est inférieure à $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ (NF P52-612-2).

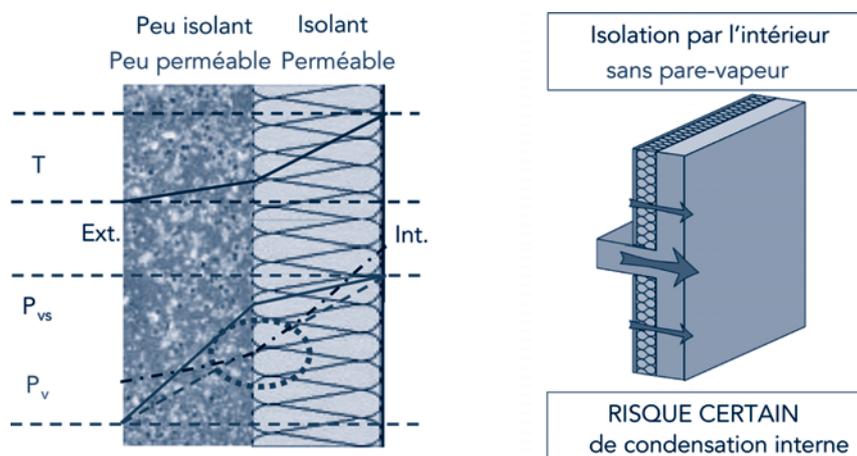


Figure 24 – Isolation par l'intérieur sans pare-vapeur

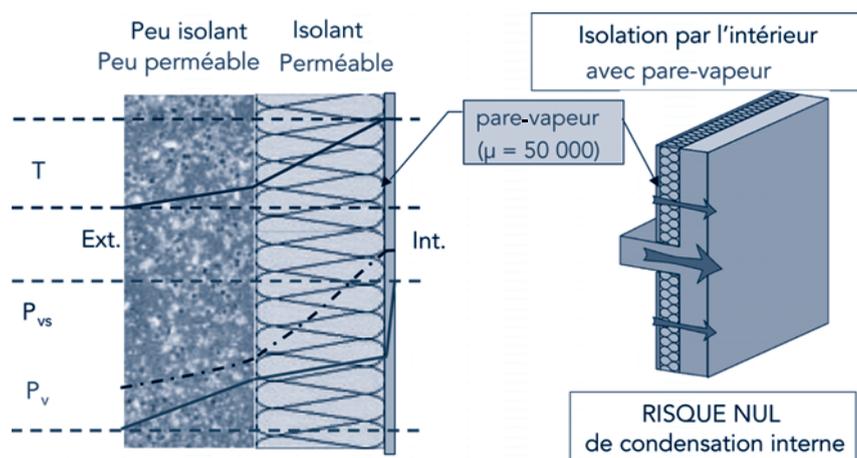


Figure 25 – Isolation par l'intérieur avec pare-vapeur : risque de condensation

8.2.1 Simulations numériques d'une paroi isolée par l'intérieur

Il s'agit d'une paroi constituée de 8 cm d'isolant très perméable (type laine minérale ou végétale) ou peu perméable (type plastique alvéolaire) à la vapeur d'eau placé à l'intérieur, et d'une couche de 20 cm de béton. Cette paroi est placée entre deux ambiances distinctes. Les côtés inférieur et supérieur sont parfaitement imperméables et isolés.

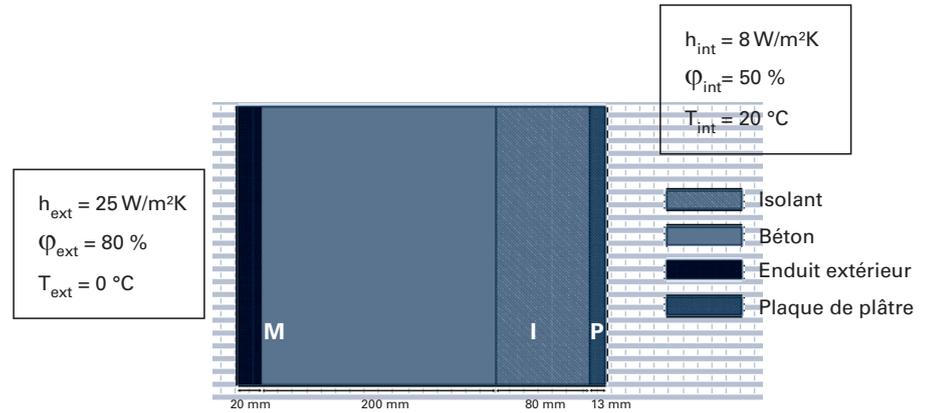


Figure 26 – Schéma de la paroi étudiée

Les deux tableaux suivants précisent les différentes caractéristiques des matériaux utilisées pour les simulations numériques et la conformité ou non aux règles énoncées précédemment.

Tableau 12 – Caractéristiques des matériaux

Matériaux	Perméabilité [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$]	λ [W/mK]	R_T [$\text{m}^2\text{K/W}$]	R_D [$\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}\cdot\text{kg}^{-1}$]	R_D [$\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}\cdot\text{g}^{-1}$]
Plaque de plâtre	$2,3\cdot 10^{-11}$	0,2	0,065	$5,7\cdot 10^8$	1,2
Isolant très perméable	$1,5\cdot 10^{-10}$	0,04	2	$5,5\cdot 10^8$	1,1
Béton	$1,6\cdot 10^{-12}$	1,6	0,125	$1,3\cdot 10^{11}$	266,7
Enduit extérieur	$2,7\cdot 10^{-11}$	0,7	0,028 6	$7,4\cdot 10^8$	1,5
Isolant peu perméable	$3,8\cdot 10^{-12}$	0,04	2	$2,3\cdot 10^{10}$	44,4

Tableau 13 – Vérification des règles

$R_{T,M}$	Rbéton + Renduit ext	0,15 $\text{m}^2\text{K/W}$	> 0,086 $\text{m}^2\text{K/W}$
$R_{T,I} + R_{T,P}$	Isolant très perméable	2,06 $\text{m}^2\text{K/W}$	> 3 $R_{T,M}$
$R_{T,I} + R_{T,P}$	Isolant peu perméable	2,06 $\text{m}^2\text{K/W}$	> 3 $R_{T,M}$
$\frac{1}{R_{D,I} + R_{D,P}}$	Isolant très perméable	0,42 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{mmHg}^{-1}$	> 0,3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{mmHg}^{-1}$
$\frac{1}{R_{D,I} + R_{D,P}}$	Isolant peu perméable	0,02 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{mmHg}^{-1}$	> 0,3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{mmHg}^{-1}$

Les résultats des simulations numériques présentés ci-après fournissent les profils de température, d'humidité relative et de teneur en eau dans les différentes couches de la paroi dans les deux cas : isolant très perméable ou, au contraire, peu perméable.

On constate que dans le cas de l'isolant peu perméable à la vapeur d'eau le niveau d'humidité relative atteint 95 % à l'interface béton-isolant. En revanche, dans le cas où l'isolation est réalisée avec un isolant très perméable, l'humidité relative atteint les 100 %, et il y a donc condensation à l'interface béton-isolant. Dans ce cas, il pourrait être envisagé de placer un pare-vapeur du côté intérieur (entre l'isolant et le parement intérieur) ou de choisir un parement intérieur avec une perméance plus faible (ou une résistance à la diffusion plus grande).

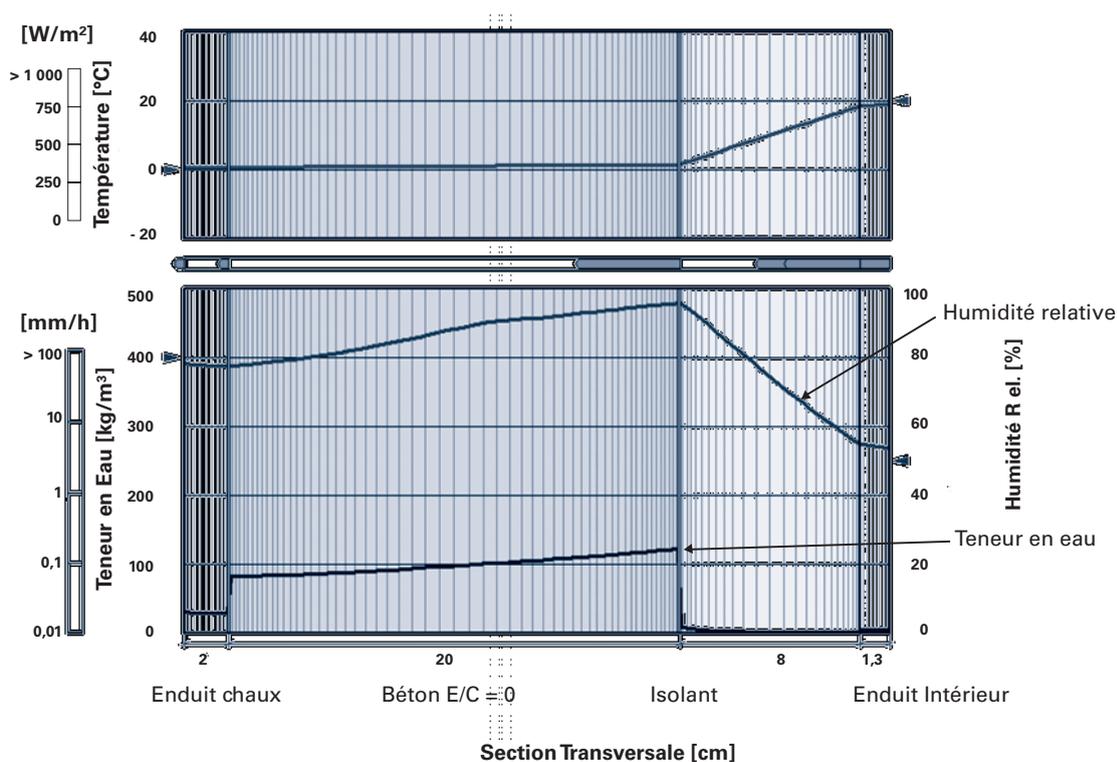


Figure 27 – Profils de température, d'humidité relative et d'humidité absolue d'une paroi isolée par 8 cm d'isolant peu perméable placé à l'intérieur (obtenu par simulation avec WUFI)

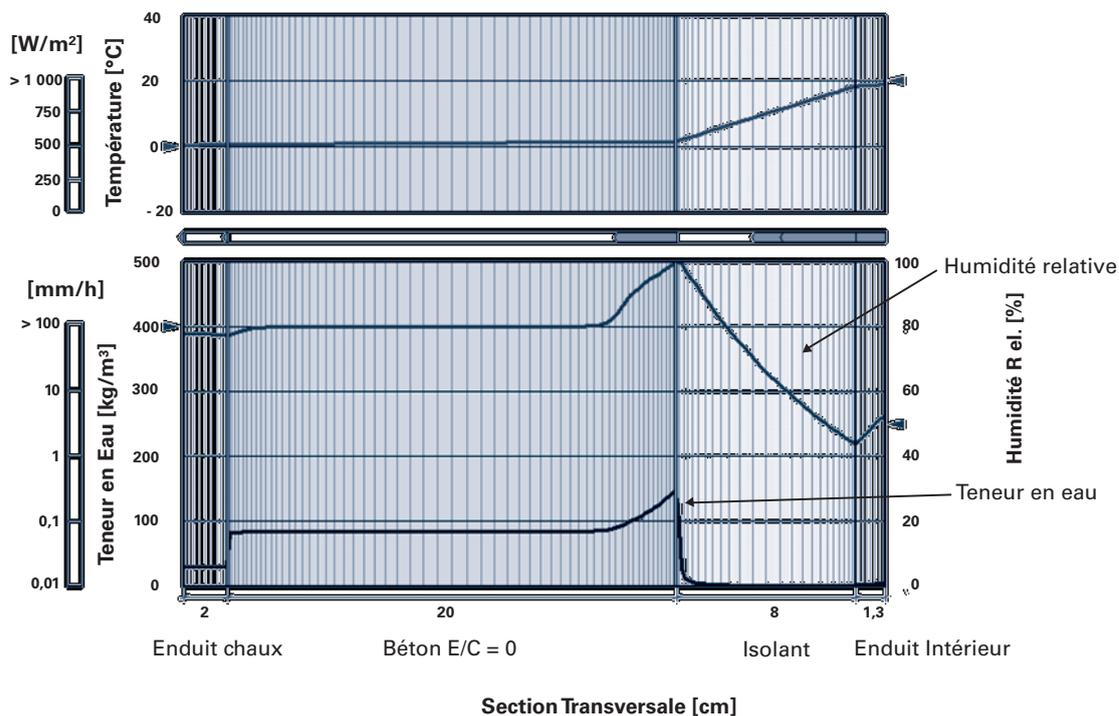


Figure 28 – Profils de température, d'humidité relative et d'humidité absolue d'une paroi isolée par 8 cm d'isolant très perméable placée à l'intérieur (obtenu par simulation avec WUFI)

8.3 Murs avec isolation extérieure

Il s'agit de parois constituées d'un mur en maçonnerie ou d'un voile de béton sur la face extérieure duquel est appliquée une couche de matériau isolant revêtu d'un enduit spécial ou protégé par un bardage séparé de l'isolant par une lame d'air.

Les risques de condensation les plus importants dans ce type de paroi résultent d'une part de la diffusion de la vapeur de l'intérieur vers l'extérieur mais surtout de la diffusion de l'eau en excès, contenue dans le mur au moment de la pose du système d'isolation.

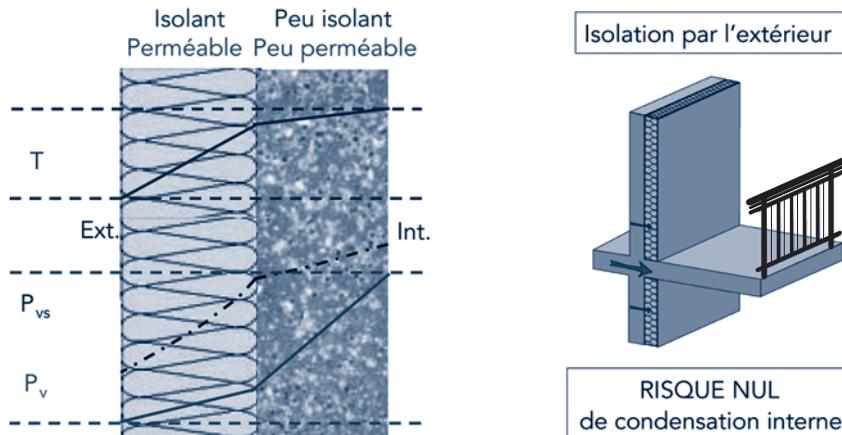


Figure 29 - Isolation par l'extérieur : risque de condensation

L'analyse des phénomènes de diffusion montre que l'on peut distinguer trois phases dans le processus de séchage du mur (*partie 3.3*). Les risques sont accrus par la présence du complexe isolant recouvrant le mur humide. Afin de ne pas entraver la diffusion de la vapeur d'eau sur la face extérieure de l'isolant, deux cas sont à envisager selon le système d'isolation adopté.

- Système avec enduit extérieur appliqué sur l'isolant

Il faut que la perméance de l'enduit soit suffisamment grande par rapport à celle de l'isolant, faute de quoi une quantité d'eau non négligeable pourrait se concentrer sous l'enduit, humidifiant l'isolant d'une part et risquant de décoller l'enduit d'autre part.

Dans l'Agrément Technique Européen relatif aux systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit, il est préconisé que l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur d'eau du système d'enduit (couche de base et couche(s) de finition) ne doit normalement pas dépasser :

- 2 mètres si la combinaison contient un isolant à base de matière plastique alvéolaire ;
- 1 mètre si la combinaison contient un isolant à base de laine minérale.

- Système avec bardage

La perméance des matériaux utilisés en bardage est généralement faible si bien que le bardage ne peut pas être directement appliqué sur l'isolant. Il est donc préconisé de ménager une lame d'air entre l'isolant et le bardage et d'éviter de disposer sur la face extérieure de l'isolant une protection trop imperméable (dans ce cas la règle relative aux systèmes avec enduit extérieur appliqué sur l'isolant doit être respectée).

Pour éviter la saturation de l'air dans la lame d'air qui provoquerait des condensations sur la face intérieure du bardage, il convient d'assurer un renouvellement de l'air par mise en communication de l'air de la lame d'air avec l'extérieur.

Cette lame d'air est efficacement ventilée lorsque :

- sa section en partie courante est suffisante, d'une largeur au moins égale à 2 cm ;
- les entrées et sorties de ventilation situées en partie haute et basse du mur sont de section suffisante : 50 cm² par mètre de mur.

De plus, il est nécessaire de prendre des dispositions au niveau du bardage et de sa fixation pour s'accommoder des condensations passagères sur le bardage pouvant résulter des abaissements de température dus au rayonnement nocturne.

8.3.1 Simulations numériques d'une paroi isolée par l'extérieur

Il s'agit d'une paroi constituée de 8 cm d'isolant (à base de laine minérale ou de plastique alvéolaire) placé à l'extérieur et d'une couche de 20 cm de béton. Cette paroi est placée entre deux ambiances distinctes. Les côtés inférieur et supérieur sont parfaitement imperméables et isolés.

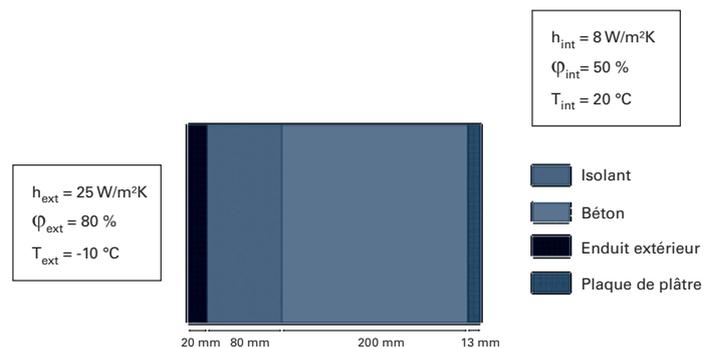


Figure 30 – Schéma de la paroi étudiée

Le béton est placé à l'état saturé dans l'ensemble des simulations. Il s'agit de la condition la plus défavorable puisque dans l'Agrément Technique Européen relatif aux systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit il est indiqué que « le support doit être solide, sec et débarrassé de tout matériau pulvérulent ». La simulation illustre donc le béton en phase de séchage.

Le tableau suivant précise les différentes caractéristiques des matériaux utilisées pour les simulations numériques.

Tableau 14 – Caractéristiques des matériaux

Matériaux	Perméabilité [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	s_d [m]	λ [W/mK]
Plaque de plâtre	$2,3 \cdot 10^{-11}$	0,108	0,2
Laine minérale	$1,5 \cdot 10^{-10}$	0,104	0,04
Polystyrène expansé	$3,8 \cdot 10^{-12}$	4	0,04
Béton	$1,6 \cdot 10^{-12}$	24	1,6
Enduit extérieur	entre $1,3 \cdot 10^{-12}$ et $4,7 \cdot 10^{-12}$	entre 0,8 et 3	0,7

Quatre simulations différentes ont été faites : les deux premières traitant d'une isolation à base de laine minérale et un enduit de s_d de 2 m ou 0,8 m et les deux secondes traitant d'une isolation à base de plastique alvéolaire et un enduit de s_d de 3 m ou 1,8 m. Dans deux cas la règle énoncée précédemment n'est pas respectée et dans deux autres cas, elle l'est.

Les résultats obtenus par simulation numérique (figure 31) montrent qu'il n'y a pas de condensation dans le cas d'un isolant à base de laine minérale à l'interface isolant-enduit. Néanmoins, l'humidité relative monte jusqu'à 98 % pendant près d'un mois, ce qu'il convient d'éviter. Une fois que le flux de vapeur d'eau sortant de l'isolant est supérieur au flux entrant (en provenance du béton en cours de séchage), l'humidité relative va diminuer jusqu'à se stabiliser.

Si on réalise une nouvelle simulation en conservant un s_d de 2 m mais en modifiant les conditions limites de façon à se placer dans le cas où la paroi est sèche et soumise au climat de Grenoble, on constate que l'humidité relative à l'interface de l'isolant et de l'enduit atteint tout de même 92 %.

Si l'enduit est plus perméable (s_d de 0,8 m) et respecte donc les préconisations, on constate que l'humidité relative à l'interface est moins élevée et qu'elle l'est moins longtemps.

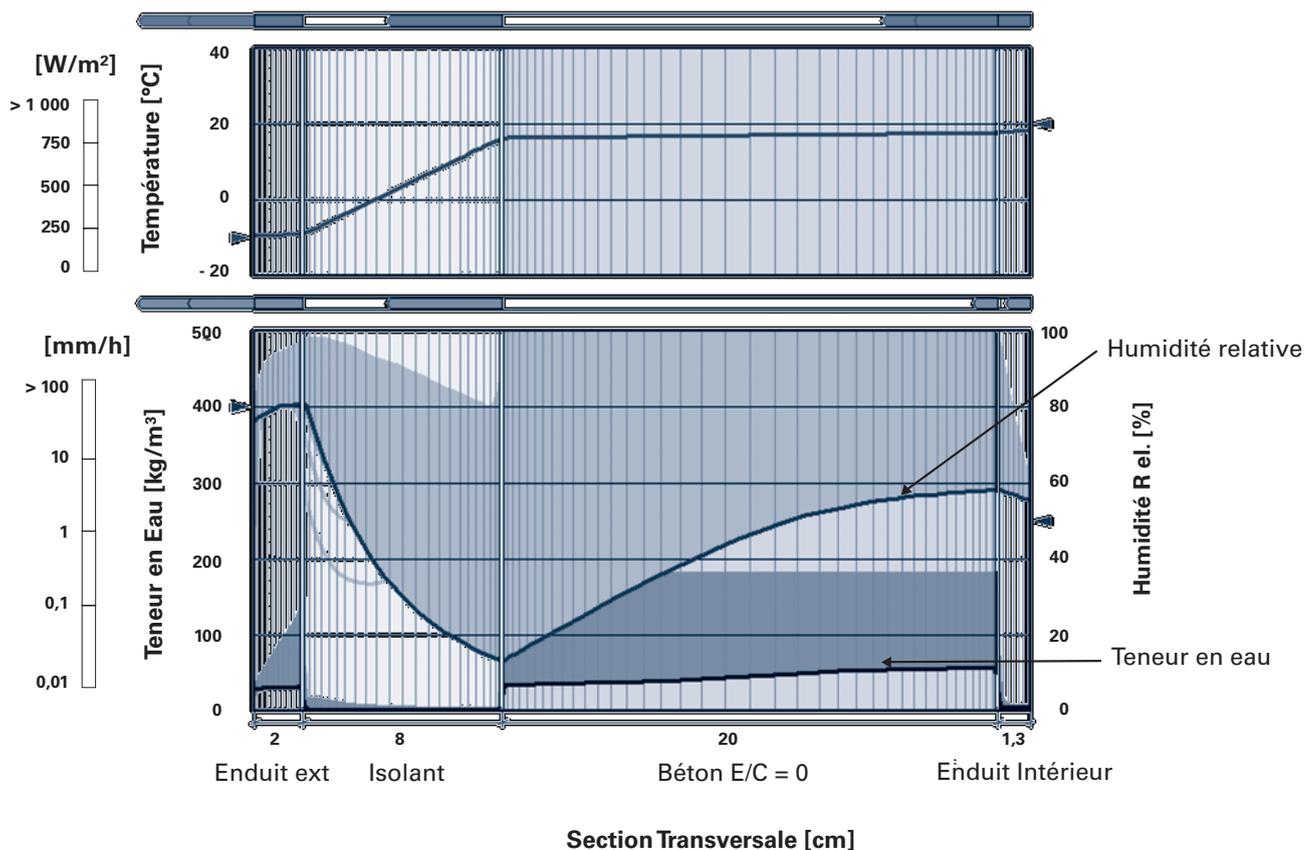


Figure 31 – Profils de température, d'humidité relative et d'humidité absolue d'une paroi isolée par 8 cm d'isolant à base de laine minérale placée à l'extérieur. Simulation du séchage de la paroi béton. s_d enduit = 2 m (obtenu par simulation avec WUFI sur 10 ans)

La courbe du bas indique le niveau de teneur en eau dans la paroi tandis que la zone bleue foncée représente l'intervalle de teneur en eau mesurée dans la paroi au cours de la simulation (dans le cas ci-dessus, la teneur en eau du béton a varié de 180 kg/m³ à 40 kg/m³). De la même façon, la courbe du milieu et la zone bleue claire représente le profil d'humidité relative et l'intervalle d'humidité relative mesurée au cours de la simulation (dans le cas ci-dessus, l'humidité relative du béton a varié de 100 % à 15 %).

Dans le cas d'un isolant à base de plastique alvéolaire, les résultats obtenus par simulation montrent qu'au cours de la première phase le flux de vapeur en provenance du mur entrant dans l'isolant est plus important que le flux de vapeur pouvant sortir par la face extérieure de l'isolant, si bien que l'eau s'accumule dans l'isolant. La couche de mur au contact de l'isolant s'assèche ensuite entraînant alors une diminution du flux entrant tandis que le flux sortant est maintenu. L'isolant s'assèche alors à son tour.

Cette première phase est d'autant plus longue que l'enduit est imperméable entraînant de ce fait une diminution de la résistance thermique de l'isolant pendant la durée où l'eau s'y est accumulée. Si l'enduit est plus perméable (s_d de 1,8 m) et respecte donc les préconisations, on constate que la période pendant laquelle l'humidité relative à l'intérieur de l'isolant est élevée est moins longue.

Enfin, si on réalise une simulation en conservant un s_d de 1,8 m mais en modifiant les conditions initiales et les conditions limites de façon à se placer dans le cas où la paroi est sèche et soumise au climat de Grenoble, on constate que l'humidité relative à l'intérieur de l'isolant n'augmente pas de façon aussi importante que dans les cas précédents (seulement 90 %).

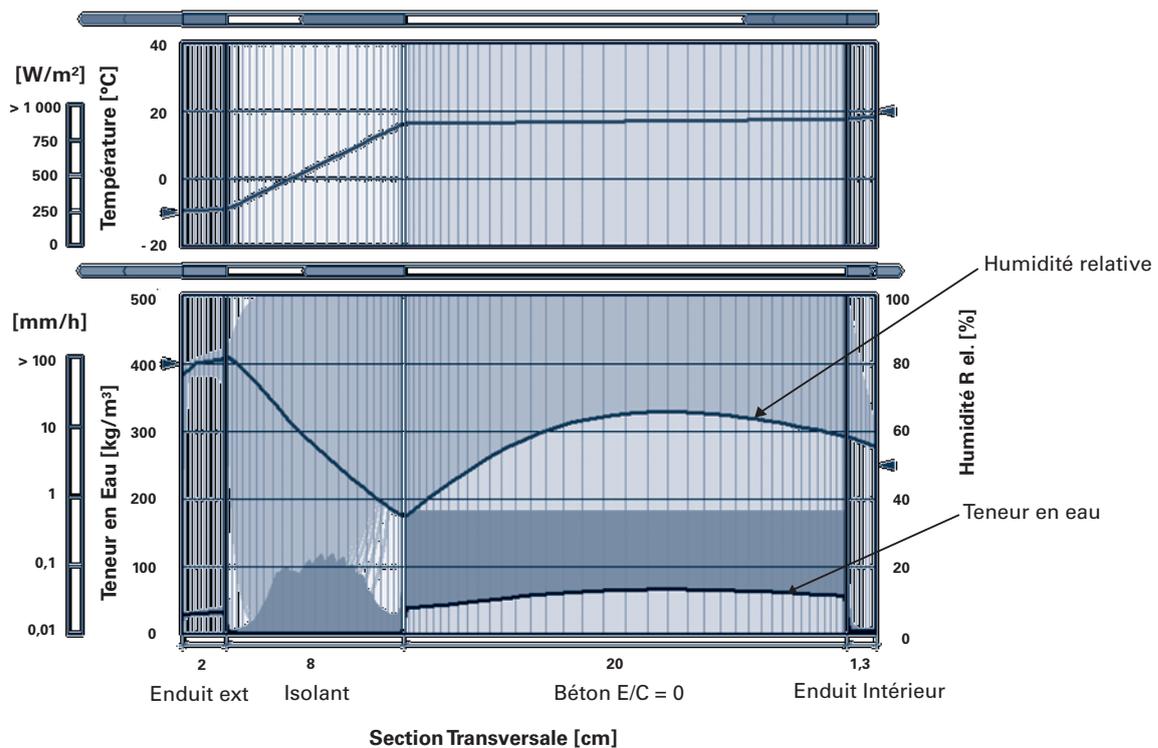


Figure 32 – Profils de température, d'humidité relative et d'humidité absolue d'une paroi isolée par 8 cm d'isolant à base de plastique alvéolaire à l'extérieur. Simulation du séchage de la paroi béton. s_d enduit = 3 m. (Obtenu par simulation avec WUFI sur 10 ans)

8.4 Toitures-terrasses

Les toitures-terrasses considérées sont des parois massives comportant un plancher support (dalle de béton ou plancher corps creux avec forme en béton), une couche d'isolant léger et un revêtement d'étanchéité.

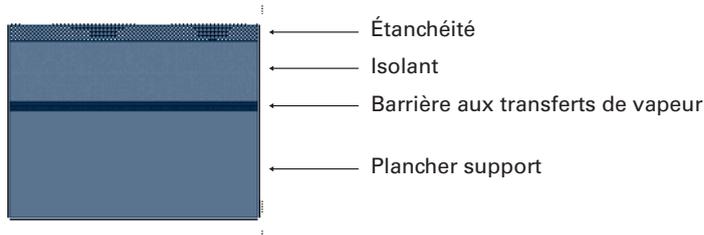


Figure 33 – Schéma d'une toiture-terrasse

Dans ce cas, les risques de condensation les plus importants sont dus à la diffusion de l'eau en excès contenue dans le plancher support pendant la période de chauffe. La vapeur risque alors de s'accumuler sous le revêtement d'étanchéité. Pour limiter ce phénomène, il est recommandé de placer une barrière aux transferts de vapeur de perméance inférieure à $2,1 \cdot 10^{-11}$ kg/(m².s.Pa) entre le support plancher et l'isolant qui stoppera la diffusion de vapeur.

8.4.1 Simulations numériques d'une toiture-terrasse avec forme de pente en dessous de l'isolant

Il s'agit d'une paroi constituée de 10 cm d'isolant (polyuréthane) placé à l'extérieur sous la couche d'étanchéité et au-dessus d'une couche de 20 cm de béton. Un pare-vapeur est placé entre l'isolant et la couche de béton, sa perméance valant soit $1,9 \cdot 10^{-10}$ kg/(m².s.Pa) (règle non vérifiée) soit $1,9 \cdot 10^{-11}$ kg/(m².s.Pa) (règle vérifiée). Cette paroi est placée entre deux ambiances distinctes (Grenoble à l'extérieur ; 20 °C et 65 % d'humidité relative à l'intérieur). Les parois latérales sont parfaitement imperméables et isolées.

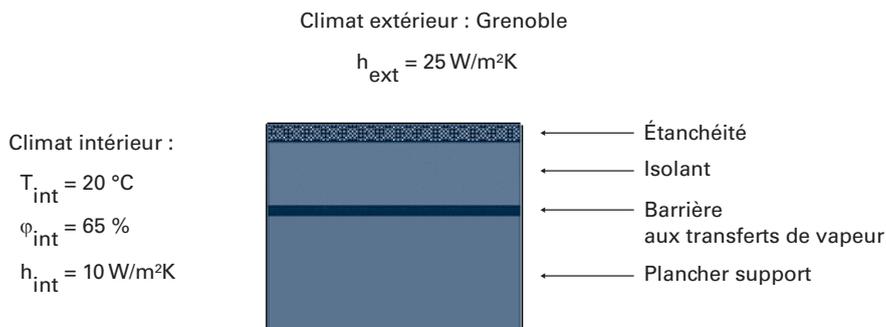


Figure 34 – Schéma de la paroi étudiée

Le tableau suivant précise les différentes caractéristiques des matériaux utilisées pour les simulations numériques.

Tableau 15 – Caractéristiques des matériaux

Matériaux	Perméance [kg.m ⁻² .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	λ [W/mK]
Barrière aux transferts de vapeur	1,9.10 ⁻¹⁰ ou 1,9.10 ⁻¹¹	2,3
Isolant à base de plastique alvéolaire	3,80.10 ⁻¹¹	0,03
Béton	5,28.10 ⁻¹²	1,6
Étanchéité	1,9.10 ⁻¹²	2,3

Les figures 35 et 36 présentées ci-dessous illustrent bien la nécessité de respecter la règle proposée précédemment. En effet si la perméance de la barrière aux transferts de vapeur est supérieure à 2,08.10⁻¹¹ kg/(m².s.Pa), on constate que l'humidité relative en sous-face de l'étanchéité est très élevée et atteint les 100 % occasionnant l'apparition d'eau liquide (figure 35). En revanche si la règle est respectée, la vapeur d'eau ne s'accumule pas sous le film et l'humidité relative reste à des niveaux tels qu'aucun désordre lié à la diffusion de la vapeur n'est à craindre (figure 36).

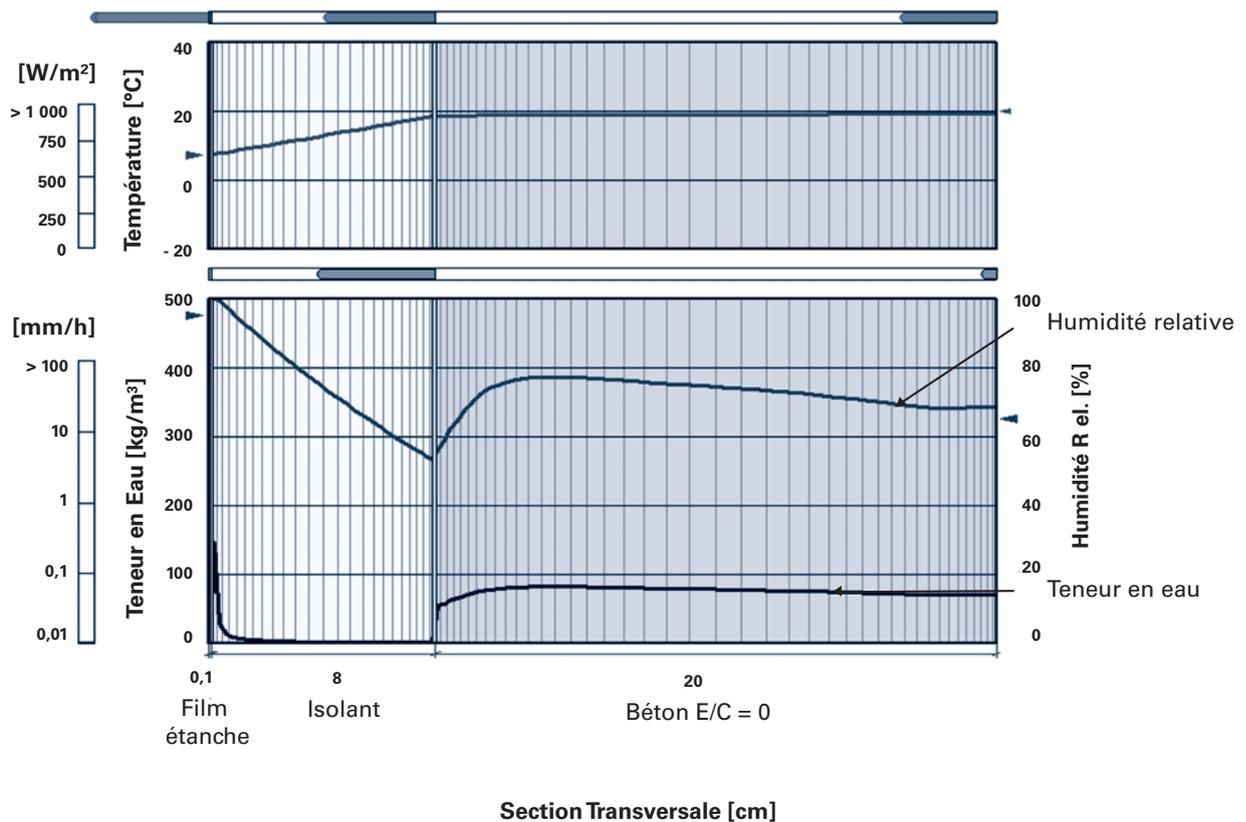


Figure 35 – Profils de température, d'humidité relative et d'humidité absolue obtenus dans la paroi le 1^{er} janvier à minuit de la troisième année de simulation. La perméance du pare-vapeur est supérieure à la règle (obtenu par simulation avec WUFI)

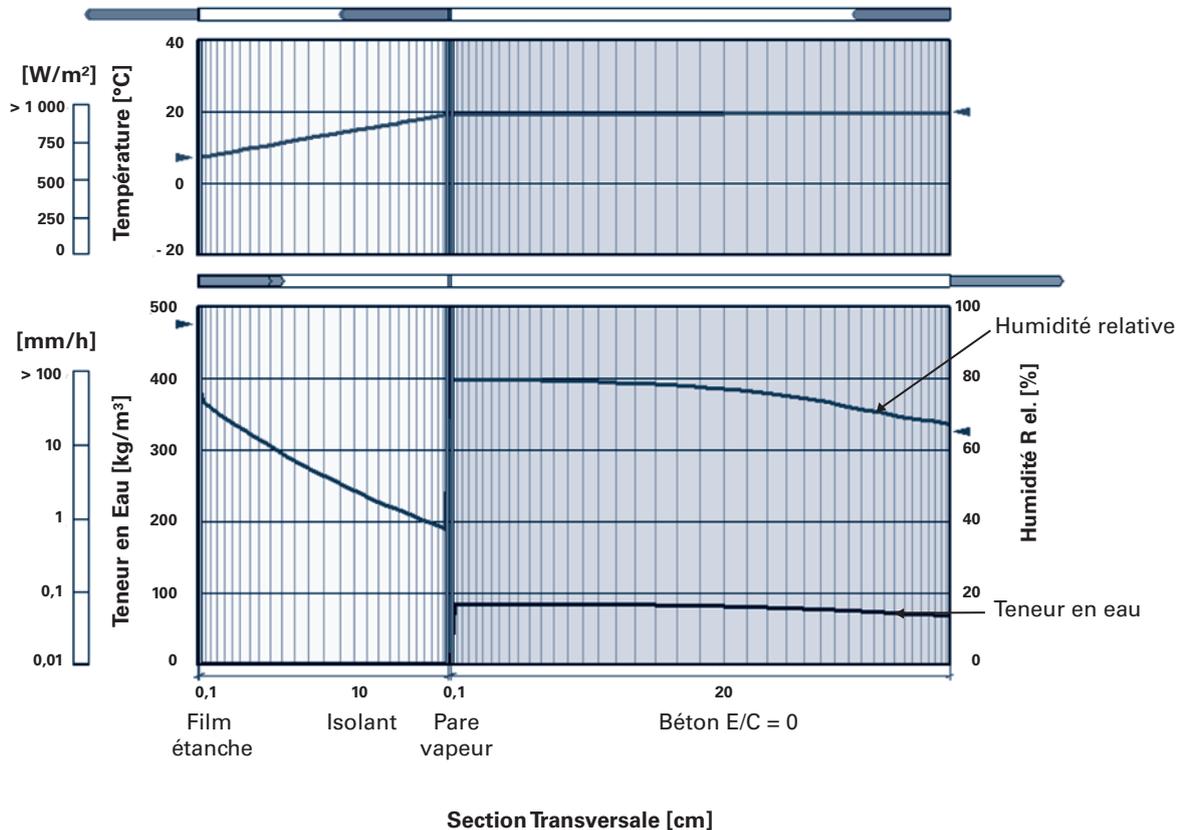


Figure 36 – Profils de température, d'humidité relative et d'humidité absolue obtenus dans la paroi le 1^{er} janvier à minuit de la troisième année de simulation. La perméance du pare-vapeur est inférieure à la règle (obtenu par simulation avec WUFI)

8.5 Couvertures en combles aménagés

Il s'agit d'un système de couverture comportant de l'intérieur vers l'extérieur un plafond, une isolation sous-rampant, une lame d'air ventilée sur l'extérieur et une couverture.

La particularité de ce type de paroi du point de vue hygrothermique vient de la présence importante de bois mis en œuvre pour la charpente (panne et chevron) qui peut absorber une quantité d'eau bien plus importante que les autres matériaux constitutifs de la paroi.

Les films mis en œuvre dans ce type de paroi tels que les pare-vapeur et les écrans de sous-toiture jouent un rôle prépondérant dans le transfert de la vapeur d'eau. Une association correcte de ces films permet de réduire les transferts de vapeur d'eau et de limiter les condensations. Des condensations sont quasiment inévitables, si cette association n'est pas réfléchi au préalable pour une construction neuve ou même une rénovation.

8.5.1 Analyse des risques de condensation

Il est important de noter que :

- plus le climat extérieur est froid plus les risques de condensation sont accrus puisque la partie extérieure de la couverture (partie où les condensations peuvent se produire) atteint des températures basses ;
- aucune condensation n'est à craindre si l'écran de sous-toiture est correctement ventilé en sous-face ou si il n'y a pas d'écran de sous-toiture ;
- la mise en place d'un pare-vapeur réduit fortement les risques ;
- une paroi sans pare-vapeur du côté intérieur construite sous un climat froid est sujette systématiquement à des condensations si l'écran de sous-toiture est en contact avec la laine minérale ou s'il existe une lame d'air **non ventilée** entre l'écran de sous-toiture et la laine minérale.

L'écran de sous-toiture est un frein aux transferts de vapeur d'eau, c'est pourquoi selon la quantité de vapeur d'eau diffusée et le niveau de température atteint dans la paroi, une accumulation d'eau et même des condensations peuvent être constatées. Cette quantité d'eau accumulée est toujours proportionnelle au niveau de perméance de l'écran de sous-toiture : plus l'écran oppose une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, plus la quantité d'eau accumulée en sous-face est importante.

Il est important de noter que l'utilisation d'un écran de sous-toiture caractérisé par une épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur (s_d) de 0,02 m ou moins permet de limiter considérablement les risques quels que soient le type de couverture et le climat extérieur. Quelques condensations peuvent être constatées dans certains cas (charpente industrielle, climat très froid), mais il s'agit d'épisodes très limités dans le temps.

Le pare-vapeur a un rôle prépondérant dans les transferts de vapeur d'eau puisqu'il joue le rôle de frein de vapeur. Sa présence va permettre de diminuer la quantité de vapeur d'eau qui transite de l'intérieur vers l'extérieur par les différents produits constituant la paroi. De ce fait, il diminue à la fois la quantité d'eau absorbée par les différents produits (principalement par le bois) et la quantité d'eau susceptible de condenser en sous-face de l'écran de sous-toiture.

Dans la plupart des cas un pare-vapeur caractérisé par un s_d de 1,4 m réduit considérablement les condensations. Le passage à un pare-vapeur caractérisé par un s_d de 18 m permet de supprimer les risques dans la plupart des cas.

8.5.2 Utilisation de la climatisation

Les combles sont très souvent sujets à des périodes de surchauffe au cours de l'été amenant les occupants à avoir recours à la climatisation.

Il est important de noter que dans ce cas la zone de risque ne se trouve plus du côté extérieur mais du côté intérieur. En effet, les transferts sont inversés : la vapeur d'eau diffuse de l'extérieur vers l'intérieur et risque de s'accumuler à la frontière entre l'isolant et le pare-vapeur si il y en a un.

Néanmoins, ces risques sont limités dans la mesure où la température de consigne est supérieure ou égale à 23 °C avec une climatisation soufflant de l'air à 15 °C et 95 % d'humidité relative. En revanche, si la température de consigne venait à diminuer pour avoisiner 20 °C ou 21 °C, les risques augmentent et s'avèrent d'autant plus élevés que le climat extérieur est chaud et humide et la température de consigne, basse.

8.6 Maison à ossature bois

La maîtrise des transferts d'humidité pour ce type de système constructif présente un enjeu fort puisque s'ils ne sont pas convenablement traités des désordres peuvent être rapidement observés entraînant une réduction sensible de la durabilité de la structure et occasionner la prolifération de micro-organismes.

Ce système constructif est caractérisé par une proportion importante de bois qui pourra absorber ou au contraire dégager de la vapeur d'eau de ou vers la paroi. De ce fait, il est important afin d'assurer la pérennité d'une construction de ce type, de limiter la quantité d'eau présente dans les montants en bois et de réduire les condensations possibles à la frontière entre l'isolant et le panneau de contreventement. En effet, si la teneur en eau du bois reste élevée de manière permanente, un développement de moisissures et des désordres structurels sont à craindre, tandis que l'accumulation d'eau à la frontière du panneau de contreventement et de l'isolant risque de détériorer les propriétés thermiques de l'isolant.

Dans le cas où il n'existe aucune barrière à la vapeur d'eau du côté intérieur, l'eau transportée par la vapeur va d'une part se fixer dans le bois et d'autre part s'accumuler à la frontière entre une couche très perméable et une couche qui l'est nettement moins (en particulier à la frontière entre l'isolant et le panneau de contreventement). Une étude rapide par simulation numérique illustre ces phénomènes et l'utilité de la mise en place d'une barrière à la vapeur du côté intérieur de la paroi. Cette barrière peut dépendre de la zone climatique du bâtiment et de la perméance des couches extérieures.

8.6.1 Simulations numériques d'une paroi à ossature bois

Il s'agit d'une paroi constituée de 12 cm d'isolant (laine minérale) placé entre les montants de bois (de section 45 x 120 mm) dont le parement du côté intérieur est réalisé avec une plaque de plâtre et le panneau de contreventement est un panneau dérivé du bois.

Dans une première configuration aucune barrière à la vapeur n'est mise en œuvre tandis que dans une seconde configuration une barrière à la vapeur (s_d de 18 m) est placée entre la plaque de plâtre et l'isolant. Cette barrière est continue et recouvre les montants en bois.

Cette paroi est placée entre deux ambiances distinctes. D'une part les profils de température et d'humidité relative sont représentés sous des conditions stationnaires. D'autre part, afin de se rapprocher des conditions réelles, des résultats de simulations illustreront le comportement de la paroi sous le climat de Nancy (sans ensoleillement). Les parois latérales sont parfaitement imperméables et isolées.

8.6.1.1 Simulations sous des conditions stationnaires

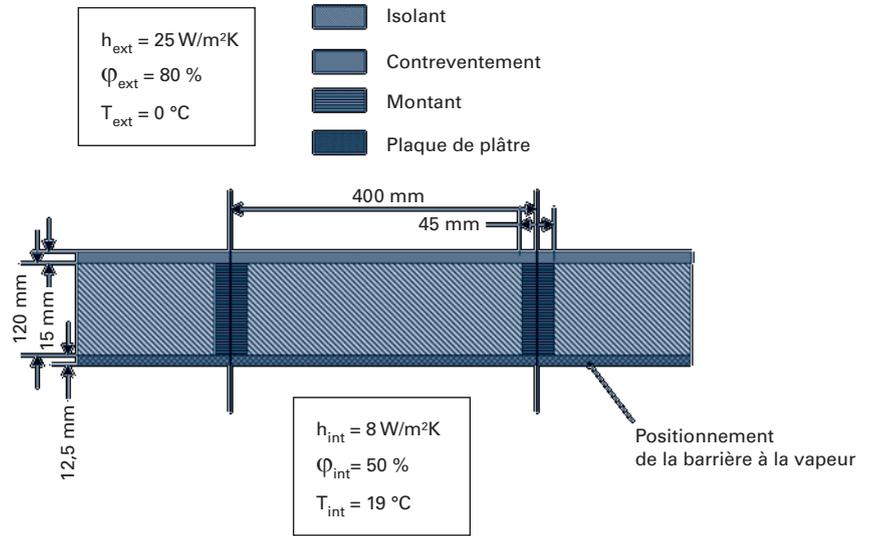


Figure 37 – Schéma de la paroi étudiée

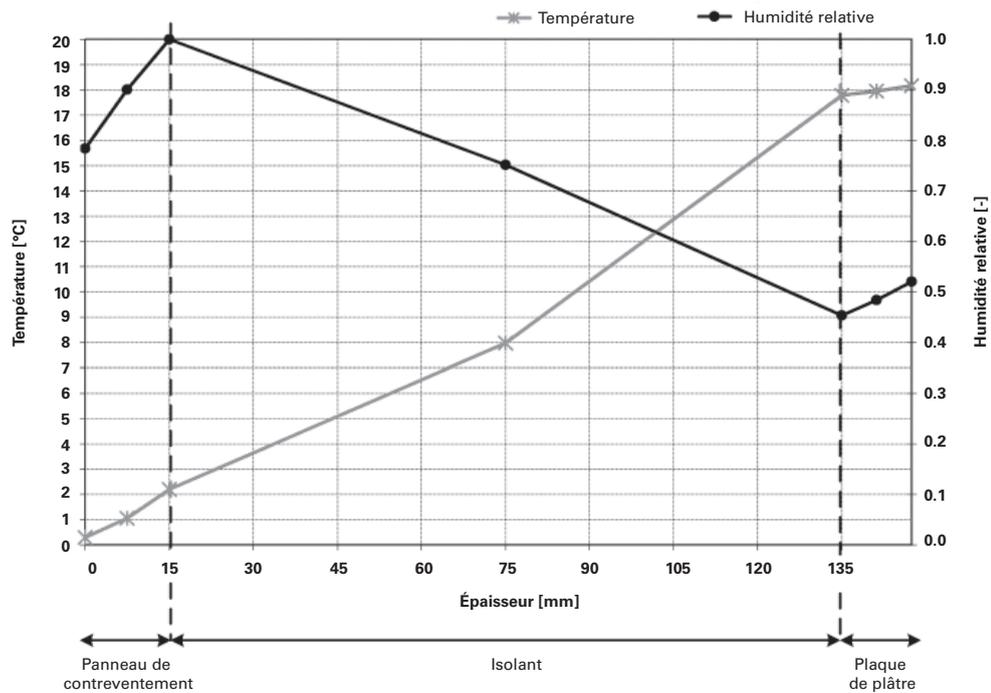


Figure 38 – Profils de température et d'humidité relative en paroi courante sans pare vapeur (obtenus par simulation avec WUFI D)

Dans le cas où aucune barrière à la vapeur n'est mise en œuvre on constate que la vapeur condense à la frontière entre le panneau de contreventement et l'isolant. Le graphique (figure 38) présente les profils de température et d'humidité relative dans la paroi en partie courante et montre bien que l'humidité relative atteint son maximum à la frontière entre l'isolant et le panneau de contreventement.

La figure ci-dessous présente les profils de température et d'humidité relative dans le cas où un pare-vapeur (sd de 18 m par exemple) est placé entre l'isolant et le pare-vapeur. On vérifie que la mise en place du pare-vapeur permet d'éviter les condensations.

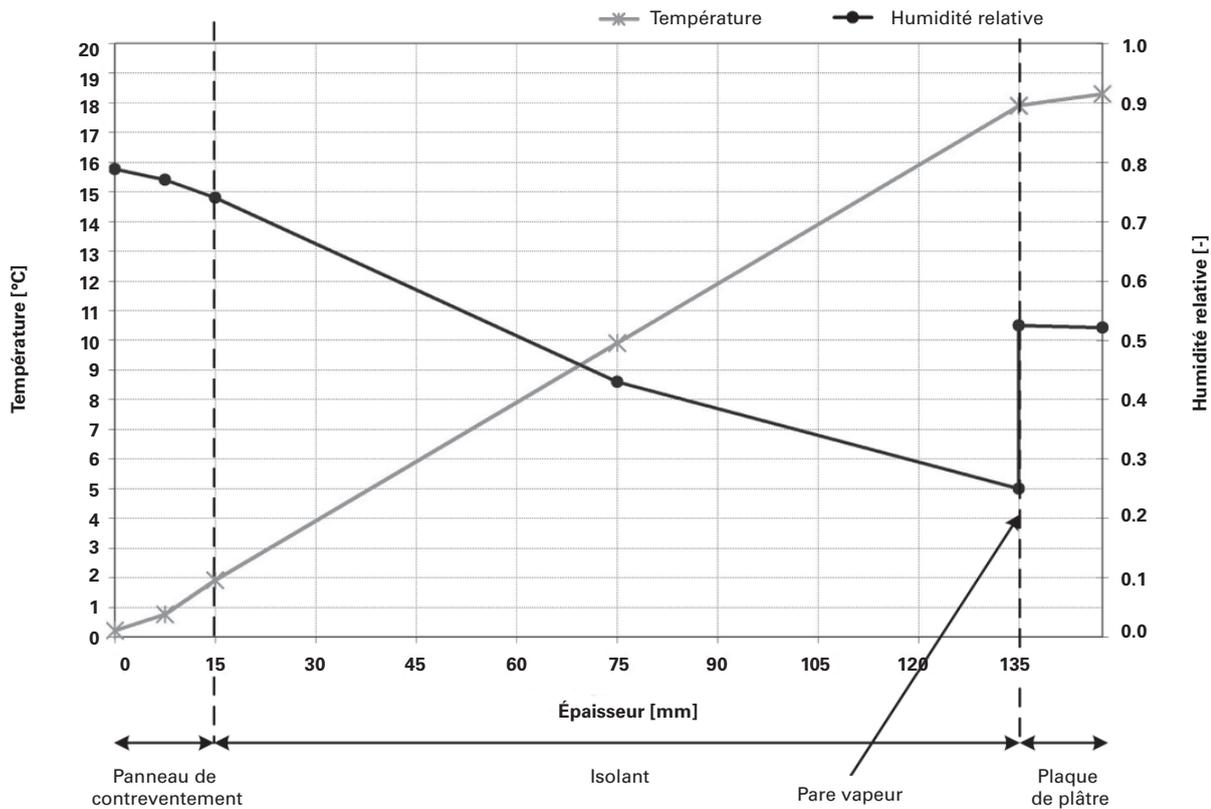


Figure 39 – Profils de température et d'humidité relative en paroi courante avec pare vapeur (obtenue par simulation avec WUFI 2D)

8.6.1.2 Simulations sous des conditions climatiques réelles

Les simulations réalisées sous le climat réel de Nancy fournissent deux informations :

- l'interface de l'isolant et du panneau de contreventement est bien le lieu de condensations au cours de l'hiver et ce sur une période prolongée (figure 39). La mise en place d'une barrière à la vapeur permet de les éviter ;
- la teneur en eau du bois au cours de l'année est bien plus élevée si aucune barrière à la vapeur n'est mise en œuvre (+ 32 %).

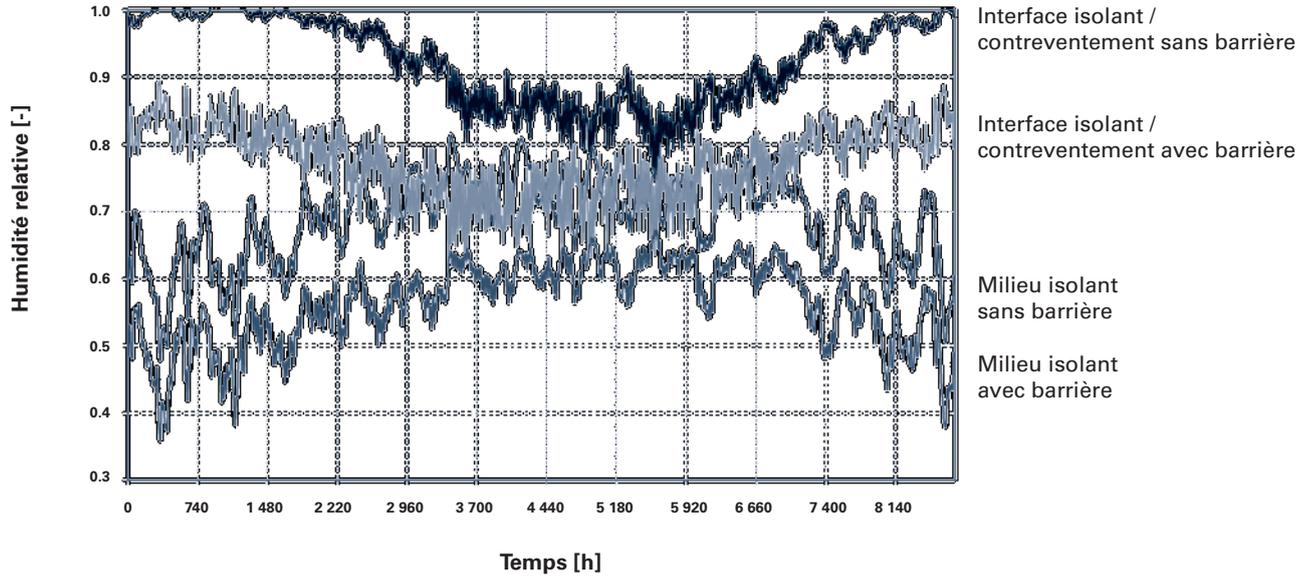


Figure 40 – Variation annuelle (de janvier à décembre) de l'humidité relative en différents points de la paroi (obtenu par simulation avec WUFI 2D)

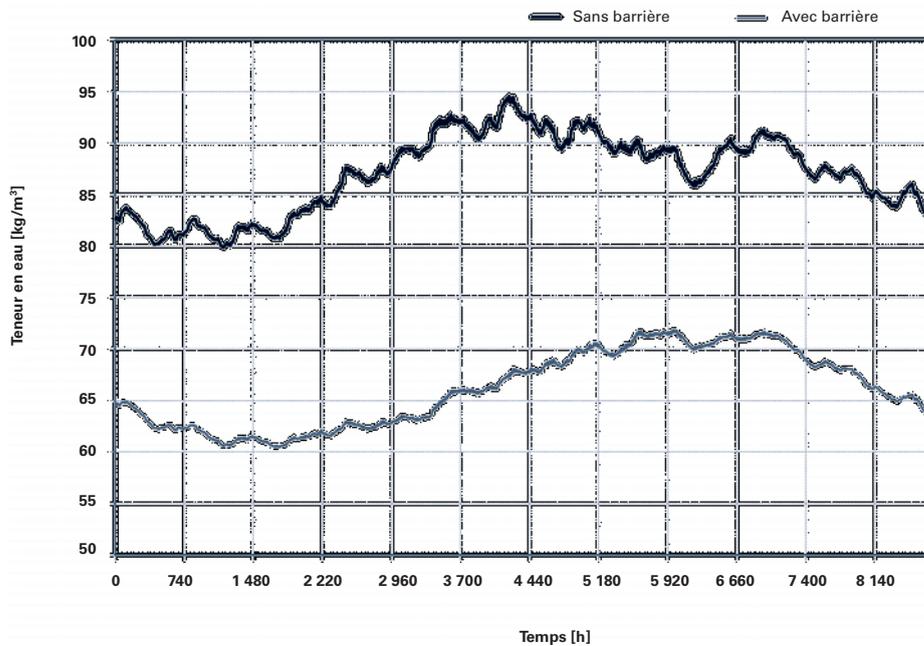


Figure 41 – Variation annuelle (de janvier à décembre) de la teneur en eau du montant en bois (obtenu par simulation avec WUFI 2D)

9. Annexes

9.1 Pression de vapeur saturante

9.1.1 Valeurs tabulées

Le *tableau 1* présente quelques valeurs montrant l'évolution de la pression de vapeur saturante en fonction de la température.

Tableau 1 – Pression de vapeur saturante en phase pure au-dessus d'une surface d'eau. D'après A. Wexler (1976) EIPT-68, corrigée par D. Sonntag (EIT-90) – Températures positives

Pression de vapeur saturante en phase pure au-dessus d'une surface d'eau									
T °C	p _{sat} Pa	θ °C	p _{sat} Pa	T °C	p _{sat} Pa	T °C	p _{sat} Pa	T °C	p _{sat} Pa
0	611	20	2 339	40	7 385	60	19 948	80	47 415
1	657	21	2 488	41	7 788	61	20 889	81	49 368
2	705	22	2 645	42	8 210	62	21 868	82	51 388
3	758	23	2 811	43	8 651	63	22 886	83	53 477
4	813	24	2 986	44	9 113	64	23 944	84	55 636
5	872	25	3 170	45	9 596	65	25 043	85	57 868
6	935	26	3 364	46	10 100	66	26 184	86	60 174
7	1 002	27	3 568	47	10 627	67	27 370	87	62 557
8	1 073	28	3 783	48	11 178	68	28 600	88	65 017
9	1 148	29	4 009	49	11 753	69	29 877	89	67 559
10	1 228	30	4 247	50	12 353	70	31 202	90	70 182
11	1 313	31	4 497	51	12 979	71	32 577	91	72 890
12	1 403	32	4 760	52	13 632	72	34 002	92	75 685
13	1 498	33	5 035	53	14 313	73	35 479	93	78 568
14	1 599	34	5 325	54	15 023	74	37 010	94	81 542
15	1 706	35	5 629	55	15 763	75	38 597	95	84 609
16	1 819	36	5 948	56	16 534	76	40 240	96	87 771
17	1 938	37	6 282	57	17 337	77	41 942	97	91 031
18	2 065	38	6 633	58	18 173	78	43 704	98	94 391
19	2 198	39	7 000	59	19 042	79	45 528	99	97 853
								100	101 419

9.2 Méthodes de résolution

9.2.1 Méthode simplifiée (méthode dite de Glaser)

Il s'agit du premier modèle utilisé pour analyser le phénomène de condensation dans les matériaux de construction, il est surtout connu pour les exploitations graphiques qu'il permet. Cette théorie suppose plusieurs hypothèses simplificatrices :

- l'humidité se déplace uniquement sous forme vapeur ;
- il n'y a pas de transport d'air : le transfert de vapeur se fait uniquement par diffusion ;

- les matériaux sont non hygroscopiques, la structure est supposée sèche à l'état initial ;
- il n'y a pas d'interaction entre le gradient de pression de vapeur et les gradients thermiques et de teneur en humidité.

Cette méthode décrit les transferts de vapeur et de chaleur par les lois de Fick et de Fourier respectivement.

Entre deux interfaces (notées 1 et 2), le flux de chaleur est calculé à partir de la loi de Fourier :

$$\bar{q} = -\lambda \bar{\nabla} T$$

Le flux de vapeur est calculé selon la loi de Fick (humidité) :

$$\bar{g}_v = -\delta_p \bar{\nabla} p$$

À partir de ces deux lois, différents logiciels (tels que GLASTA, MOIST) permettent de déterminer les profils de température et de pression de vapeur.

La pression de vapeur est limitée à la pression de vapeur à saturation. Lorsque la pression partielle est égale à la pression de saturation, la différence de flux de vapeur entre les deux couches concernées donne la quantité condensée. Le produit de cette différence et de la durée de la simulation fournit la quantité totale condensée pendant la durée de la simulation.

9.2.2 Méthode avancée

Les transferts d'humidité et de chaleur sont cette fois-ci basés sur deux équations générales comprenant chacune des termes de stockage. On tient compte d'une part de la conduction et d'autre part des sources de chaleur liées à l'évaporation ou à la condensation pour les transferts de chaleur. Au niveau hydrique, le transfert de vapeur par diffusion et le transfert d'eau liquide par conduction capillaire sont tous deux pris en compte.

Dans ce cas, les caractéristiques des matériaux dépendent de la quantité d'eau présente. Par exemple la conductivité thermique augmente avec la teneur en eau et le coefficient de résistance à la diffusion diminue avec la teneur en eau.

Le système d'équations retenu est le suivant :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (h_v g_v)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (g_l + g_v)$$

Pour résoudre ce système, le recours au numérique est inévitable. Plusieurs logiciels disponibles aujourd'hui permettent de résoudre ce système sous plusieurs hypothèses propres à chacun d'entre eux.

Par exemple, le logiciel WUFI (Wärme und Feuchtetransport Instationär) est développé par l'IBP (Fraunhofer Institut Für BauPhysik) à Holzkirchen en Allemagne et fonctionne sous Microsoft Windows. À l'heure actuelle il existe deux versions : l'une en une dimension préconisée pour évaluer les transferts hygrothermiques dans un mur ; l'autre en deux dimensions utilisée pour modéliser les ponts thermiques par exemple.

Le logiciel *hyglRC* est un modèle hygrothermique créé pour aider les professionnels de la conception de bâtiments à faire le meilleur choix en matière de système d'enveloppe et des éléments qui le composent. Il est développé par l'IRC-CNRC (Institut de Recherche en Construction - Conseil National de Recherches Canada). À l'heure actuelle il n'existe qu'une version monodimensionnelle.

9.3 Grandeurs utiles

Chaleur latente de fusion (glace -> liquide)	L_f ou h_f	334	[kJ.kg ⁻¹]
Chaleur latente de vaporisation (liquide -> vapeur)	L_v ou h_v	2 491	[kJ.kg ⁻¹]
Chaleur thermique massique liquide	c_l	4,2	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Chaleur thermique massique vapeur d'eau	c_v	1,9	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Masse volumique de l'eau liquide	ρ_l	1 000	[kg.m ⁻³]
Masse volumique de la vapeur d'eau	ρ_v	1,29	[kg.m ⁻³]
Masse molaire de la vapeur d'eau	M_v	18,01 10 ⁻³	[kg.mol ⁻¹]
Masse molaire de l'air sec	M	28,97 10 ⁻³	[kg.mol ⁻¹]
Constante des gaz parfaits	R	8,314	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]

Valeurs tabulées

Références : – Réglementation thermique 2005

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (C_p) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.1 – PIERRES ⁽¹⁾					
2.1.1 – ROCHES PLUTONIQUES ET MÉTAMORPHIQUES					
– Gneiss, porphyres	2 300 ≤ ρ ≤ 2 900	3,5	1 000	10 000	10 000
– Granites	2 500 ≤ ρ ≤ 2 700	2,8	1 000	10 000	10 000
– Schistes, ardoises	2 000 ≤ ρ ≤ 2 800	2,2 ⁽²⁾	1 000	1 000	800
2.1.2 – ROCHES VOLCANIQUES					
– Basaltes	2 700 ≤ ρ ≤ 3 000	1,6	1 000	10 000	10 000
– Trachytes, andésites	2 000 ≤ ρ ≤ 2 700	1,1	1 000	20	15
– Pierres naturelles poreuses, ex. laves	ρ ≤ 1 600	0,55	1 000	20	15
2.1.3 – PIERRES CALCAIRES					
– Marbres	2 600 ≤ ρ ≤ 2 800	3,5	1 000	10 000	10 000
– Pierres froides ou extra-dures	2 200 ≤ ρ ≤ 2 590	2,3	1 000	250	200
– Pierres dures	2 000 ≤ ρ ≤ 2 190	1,7	1 000	200	150
– Pierres fermes, demi-fermes	1 800 ≤ ρ ≤ 1 990	1,4	1 000	50	40
– Pierres tendres n° 2 et 3	1 600 ≤ ρ ≤ 1 790	1,1	1 000	40	25
– Pierres très tendres	ρ ≤ 1 590	0,85	1 000	30	20
2.1.4 – GRÈS					
– Grès quartzeux	2 600 ≤ ρ ≤ 2 800	2,6	1 000	40	30
– Grès (silice)	2 200 ≤ ρ ≤ 2 590	2,3	1 000	40	30
– Grès calcaireux	2 000 ≤ ρ ≤ 2 700	1,9	1 000	30	20
2.1.5 – SILEX, MEULIÈRES ET PONCES					
– Silex	2 600 ≤ ρ ≤ 2 800	2,6	1 000	10 000	10 000
– Meulière	1 900 ≤ ρ ≤ 2 500	1,8	1 000	50	40
– Ponce naturelle	1 300 ≤ ρ < 1 900	0,9	1 000	30	20
	ρ ≤ 400	0,12	1 000	8	6

(1) Les conductivités thermiques données dans ce paragraphe sont en fait des conductivités thermiques équivalentes tenant compte des joints.

(2) Il s'agit de la conductivité correspondant à l'utilisation de ces matériaux en murs, c'est-à-dire pour un flux de chaleur parallèle aux strates.

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (C_p) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.2 – BÉTONS					
2.2.1 – BÉTONS DE GRANULATS COURANTS SILICEUX, SILICO-CALCAIRES ET CALCAIRES (granulats conformes aux spécifications de la norme NF P 18-540)					
2.2.1.1 – Béton plein	2 300 < ρ ≤ 2 600 2 000 < ρ ≤ 2 300	2,00 1,65	1 000 1 000	130 120	80 70
2.2.1.2 – Béton caverneux	1800 < ρ ≤ 2 000 1600 ≤ ρ ≤ 1 800	1,35 1,15	1 000 1 000	100 100	60 60
2.2.1.3 – Béton plein armé Valeurs à prendre en compte lorsque le béton plein est armé avec un pourcentage en volume de : – avec 1 < % d'acier ≤ 2 – avec % d'acier > 2 dont au moins la moitié est disposée parallèlement au flux thermique. Pour les ouvrages dont le béton plein est armé avec moins de 1 % en volume d'acier ou n'entrant pas dans les familles ci-dessus, la valeur à prendre en compte est la valeur définie en 2.2.1.1 ci-dessus.	2 300 < ρ ≤ 2 400 ρ > 2 400	2,3 2,5	1 000 1 000	130 130	80 80
2.2.2 – BÉTONS DE GRANULATS COURANTS DE LAITIERS DE HAUTS FOURNEAUX (granulats conformes aux spécifications de la norme NF P 18-302)					
2.2.2.1 – Béton plein – avec sable de rivière ou de carrière – avec laitier granulé (granulats conformes aux spécifications de la norme NF P 18-306)	2 000 ≤ ρ ≤ 2 400 2 100 ≤ ρ ≤ 2 300	1,4 0,8	1 000 1 000	150 150	120 120
2.2.2.2 – Béton caverneux Bétons comportant moins de 10 % de sable de rivière	1 600 ≤ ρ ≤ 2 000	0,7	1 000	150	120
2.2.3 – BÉTONS DE GRANULATS LÉGERS					
2.2.3.1 – Béton de pouzzolane ou de laitier expansé à structure caverneuse Granulats conformes aux spécifications des normes NF P 18-307 et 18-308 Masse volumique apparente des granulats en vrac 750 kg/m ³ environ – avec éléments fins ou sable – sans éléments fins de sable	1 400 ≤ ρ ≤ 1 600 1 200 ≤ ρ ≤ 1 400 1 000 ≤ ρ ≤ 1 200	0,52 0,44 0,35	1 000 1 000 1 000	30 30 30	20 20 20
2.2.3.2 – Béton de cendres volantes frittées Masse volumique apparente des granulats en vrac 650 kg/m ³ environ	1 000 ≤ ρ ≤ 1 200	0,35	1 000	30	20
2.2.3.3 – Béton de ponce naturelle Masse volumique apparente des granulats en vrac 600 kg/m ³ environ	950 ≤ ρ ≤ 1 150	0,46	1 000	50	40

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.2.3.4 – Béton d'argile expansée ou de schiste expansé (Granulats conformes aux spécifications de la norme NF P 18-309)					
• Bétons de structure Dosage en ciment égal ou supérieur à 300 kg/m ³ et masse volumique apparente des granulats en vrac comprise entre 300 et 550 kg/m ³ , ou supérieure à 550 kg/m ³					
– avec sable de rivière, sans sable léger	1 600 < ρ ≤ 1 800	1,05	1 000	8	6
– avec sable de rivière et sable léger	1 400 < ρ ≤ 1 600	0,85	1 000	8	6
• Bétons « isolants porteurs » Dosage en ciment égal ou supérieur à 300 kg/m ³ et masse volumique apparente des granulats en vrac comprise entre 300 et 550 kg/m ³					
– avec sable léger et au plus 10 % de sable de rivière	1 200 < ρ ≤ 1 400	0,7	1 000	6	4
– avec sable léger, sans sable de rivière	1 000 ≤ ρ ≤ 1 200	0,46	1 000	6	4
• Bétons caverneux et semi-caverneux Dosage en ciment inférieur ou égal à 250 kg/m ³ et masse volumique apparente des granulats en vrac inférieure à 350 kg/m ³ ou comprise entre 350 et 550 kg/m ³ pour les bétons de masse volumique comprise entre 600 et 1000 kg/m ³					
– avec sable léger, sans sable de rivière	800 < ρ ≤ 1 000	0,33	1 000	6	4
– sans sable (léger ou de rivière) et ne nécessitant qu'un faible dosage en ciment	600 < ρ ≤ 800 ρ ≤ 600	0,25 0,20	1 000 1 000	6 6	4 4
2.2.4 – BÉTONS DE GRANULATS TRÈS LÉGERS					
2.2.4.1 – Bétons de perlite ou de vermiculite grade 3 (de 3 à 6 mm) coulé en place					
– dosage : 3/1	600 < ρ ≤ 800	0,31	1 000	15	10
– dosage : 6/1	400 ≤ ρ ≤ 600	0,24	1 000	15	10
2.2.4.2 – Plaques de béton de vermiculite fabriquées en usine	400 ≤ ρ ≤ 600	0,19	1 000	15	10
2.2.5 – BÉTONS CELLULAIRES TRAITÉS À L'AUTOCLAVE					
– Masse volumique nominale 800	765 < ρ ≤ 825	0,29	1 000	10	6
– Masse volumique nominale 750	715 < ρ ≤ 775	0,27	1 000	10	6
– Masse volumique nominale 700	665 < ρ ≤ 725	0,25	1 000	10	6
– Masse volumique nominale 650	615 < ρ ≤ 675	0,23	1 000	10	6
– Masse volumique nominale 600	565 < ρ ≤ 625	0,21	1 000	10	6
– Masse volumique nominale 550	515 < ρ ≤ 575	0,19	1 000	10	6
– Masse volumique nominale 500	465 < ρ ≤ 525	0,175	1 000	10	6
– Masse volumique nominale 450	415 < ρ ≤ 475	0,16	1 000	10	6
– Masse volumique nominale 400	365 < ρ ≤ 425	0,145	1 000	10	6
2.2.6 – BÉTONS DE BOIS					
2.2.6.1 – Béton de copeaux de bois (conforme aux documents d'Avis Technique)	450 ≤ ρ ≤ 650	0,16	1 000	15	10
2.2.6.2 – Panneaux de laine de bois (fibragglo) (voir § 2.5.3)					
2.2.6.3 – Béton de copeaux de bois Béton de fibres végétales (fibre de chanvre...)	100 ≤ ρ ≤ 200 200 ≤ ρ ≤ 600	0,1 0,2	1 000 1 000		

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.3 – PLÂTRES ⁽³⁾					
2.3.1 – PLÂTRES SANS GRANULATS					
<ul style="list-style-type: none"> Plâtre « gaché serré » ou « très serré » (plâtre de très haute dureté (THD), plâtre projeté et plâtre fin) 	1 200 < ρ ≤ 1 500	0,56	1 000	10	4
	900 < ρ ≤ 1 200	0,43	1 000	10	4
	600 ≤ ρ ≤ 900	0,30	1 000	10	4
	ρ ≤ 600	0,18	1 000	10	4
<ul style="list-style-type: none"> Plâtre courant d'enduit intérieur (plâtre fin de construction (PFC) ou plâtre gros de construction (PGC)) 	1 000 ≤ ρ ≤ 1 300	0,57	1 000	10	6
	ρ ≤ 1 000	0,40	1 000	10	6
<ul style="list-style-type: none"> Enduit intérieur à base de plâtre et de sable 	ρ ≤ 1 600	0,80	1 000	10	6
<ul style="list-style-type: none"> Plaques de plâtres à parement de carton « standard » et « haute dureté » ou éléments préfabriqués en plâtre à parements lisses 	750 ≤ ρ ≤ 900	0,25	1 000	10	4
2.3.2 – PLÂTRE AVEC GRANULATS LÉGERS OU FIBRES MINÉRALES					
<ul style="list-style-type: none"> Plaques de plâtre à parement de carton « spéciales feu » et plaques de plâtre armées de fibres minérales Plâtre d'enduit avec perlite tout venant ou vermiculite grade 2 (de 1 à 2 mm) - 1 volume pour un volume de plâtre - 2 volumes pour un volume de plâtre 	800 ≤ ρ ≤ 1 000	0,25	1 000	10	4
	600 ≤ ρ ≤ 900	0,30	1 000	10	6
	500 ≤ ρ ≤ 600	0,18	1 000	10	6
2.4 – TERRE CUITE utilisée dans les éléments de maçonnerie					
– Masse volumique nominale 2400	2 300 < ρ ≤ 2 400	1,04	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 2300	2 200 < ρ ≤ 2 300	0,98	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 2200	2 100 < ρ ≤ 2 200	0,92	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 2100	2 000 < ρ ≤ 2 100	0,85	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 2000	1 900 < ρ ≤ 2 000	0,79	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1900	1 800 < ρ ≤ 1 900	0,74	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1800	1 700 < ρ ≤ 1 800	0,69	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1700	1 600 < ρ ≤ 1 700	0,64	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1600	1 500 < ρ ≤ 1 600	0,60	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1500	1 400 < ρ ≤ 1 500	0,55	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1400	1 300 < ρ ≤ 1 400	0,50	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1300	1 200 < ρ ≤ 1 300	0,46	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1200	1 100 < ρ ≤ 1 200	0,41	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1100	1 000 < ρ ≤ 1 100	0,38	1 000	16	10
– Masse volumique nominale 1000	ρ ≤ 1000	0,34	1 000	16	10
2.5 – VÉGÉTAUX					
On caractérise les bois par leur masse volumique normale moyenne ρ_n , c'est-à-dire avec une teneur en humidité t_h de 15 % selon la terminologie de la norme NF B 51-002. La densité ainsi caractérisée est donc plus élevée que la masse volumique sèche indiquée dans la deuxième colonne.					
2.5.1 – Bois					
– Feuillus très lourds	$\rho_n > 1000$ kg/m ³	$\rho > 870$	0,29	1 600	200
– Feuillus lourds	865 < ρ_n ≤ 1000 kg/m ³	750 < ρ ≤ 870	0,23	1 600	200
– Feuillus mi-lourds	650 < ρ_n ≤ 865 kg/m ³	565 < ρ ≤ 750	0,18	1 600	200
– Feuillus légers	500 < ρ_n ≤ 650 kg/m ³	435 < ρ ≤ 565	0,15	1 600	200
– Feuillus très légers hors balsa	230 < ρ_n ≤ 500 kg/m ³	200 < ρ ≤ 435	0,13	1 600	50
– Balsa	ρ_n ≤ 230 kg/m ³	ρ ≤ 200	0,057	1 600	50
– Résineux très lourd	$\rho_n > 700$ kg/m ³	$\rho > 610$	0,23	1 600	50
– Résineux lourds	600 < ρ_n ≤ 700 kg/m ³	520 < ρ ≤ 610	0,18	1 600	50
– Résineux mi-lourds	500 < ρ_n ≤ 600 kg/m ³	435 < ρ ≤ 520	0,15	1 600	50
– Résineux légers	ρ_n ≤ 500 kg/m ³	ρ ≤ 435	0,13	1 600	50

(3) Conventionnellement, la masse volumique sèche des plâtres est obtenue après séchage en étuve ventilée à 55 °C au lieu de 70 °C (Voir NF B 12-001).

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.5.2 – PANNEAUX À BASE DE BOIS définis conformément la norme NF EN 13986 (octobre 2000)					
2.5.2.1 – Panneaux contreplaqués définis selon les normes NF EN 313-1 et NF EN 313-2 et bois panneautés définis selon la norme EN 12775.					
– Panneaux de masse volumique nominale 850 à 1 000 kg/m ³	750 < ρ ≤ 900	0,24	1 600	250	110
– Panneaux de masse volumique nominale 700 à 850 kg/m ³	600 < ρ ≤ 750	0,21	1 600	250	110
– Panneaux de masse volumique nominale 600 à 700 kg/m ³	500 < ρ ≤ 600	0,17	1 600	220	90
– Panneaux de masse volumique nominale 500 à 600 kg/m ³	450 < ρ ≤ 500	0,15	1 600	200	70
– Panneaux de masse volumique nominale 400 à 500 kg/m ³	350 < ρ ≤ 450	0,13	1 600	200	70
– Panneaux de masse volumique nominale 300 à 400 kg/m ³	250 < ρ ≤ 350	0,11	1 600	200	50
– Panneaux de masse volumique inférieure à 300 kg/m ³	ρ ≤ 250	0,09	1 600	200	50
2.5.2.2 – Panneaux à lamelles longues et orientées (OSB) définis selon la norme NF EN 300	ρ ≤ 650	0,13	1 700	50	30
2.5.2.3 – Panneaux de particules liées au ciment définis selon les normes NF EN 634-1 et NF EN 634-2.	ρ ≤ 1 200	0,23	1 500	50	30
2.5.2.4 – Panneaux de particules définis selon la norme NF EN 309					
– Panneaux de masse volumique nominale 700 à 900 kg/m ³	640 < ρ ≤ 820	0,18	1 700	50	20
– Panneaux de masse volumique nominale 500 à 700 kg/m ³	450 < ρ ≤ 640	0,15	1 700	50	20
– Panneaux de masse volumique nominale 300 à 500 kg/m ³	270 < ρ ≤ 450	0,13	1 700	50	20
– Panneaux de masse volumique nominale 200 à 300 kg/m ³	180 < ρ ≤ 270	0,10	1 700	50	20
2.5.2.5 – Panneaux de fibres définis selon la norme NF EN 316	750 < ρ ≤ 1 000 550 < ρ ≤ 750 350 < ρ ≤ 550 200 < ρ ≤ 350 ρ ≤ 200	0,20 0,18 0,14 0,10 0,07	1 700 1 700 1 700 1 700 1 700	50 30 20 10 5	20 20 12 6 2
2.5.3 - PANNEAUX DE LAINE DE BOIS Panneaux de laine de bois agglomérés avec un liant hydraulique, définis conformément à la norme NF EN 13168 (WW)	450 ≤ ρ ≤ 550 350 ≤ ρ ≤ 450 250 ≤ ρ ≤ 350	0,11 (4) 0,10 0,08	1 700 1 700 1 700	20 10 10	12 5 5
2.5.4 – LIÈGE défini conformément à la norme NF B 57-000					
– Comprimé	ρ ≤ 500	0,10	1 560	10	5
– Expansé pur : se reporter au paragraphe 2.6.3					
– Expansé aggloméré au brai ou aux résines synthétiques : se reporter au paragraphe 2.6.3					
2.5.5 – PAILLE COMPRIMÉE	300 ≤ ρ ≤ 400	0,12	1 400	1	1

(4) La valeur de 0,11 dépasse la valeur maximale définie dans la norme NF EN 13168 en raison de l'écart entre la valeur déclarée (selon la norme) et la valeur utile (selon les règles Th-U)

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.6 – MATÉRIAUX ISOLANTS MANUFACTURÉS					
Sont visés ici les matériaux dont la conductivité thermique est au plus égale à 0,065 W/(m.K), fabriqués en usine ou commercialisés sous la forme de plaques, panneaux ou rouleaux. Les caractéristiques thermiques des isolants sont données par famille d'isolants. Une famille est définie par une norme, un procédé de fabrication et, si nécessaire, des caractéristiques physiques spécifiques à cette famille. Les fabricants qui se réfèrent à une famille dans leurs documentations doivent pouvoir justifier que leurs produits satisfont aux critères d'identification indiqués. En l'absence de cette justification, sont applicables les valeurs données aux paragraphes ou alinéas « autres fabrications ».					
2.6.1 – Balsa Se reporter au § 2.5.1					
2.6.2 – LAINES MINÉRALES Définies conformément à la norme NF EN 13162 (MW). Les masses volumiques indiquées dans ce paragraphe sont les masses volumiques apparentes nominales telles qu'elles sont définies dans la EN 1602. Elles s'entendent revêtements éventuels exclus.					
2.6.2.1 – Laines de roche	15 ≤ ρ < 25 25 ≤ ρ < 40 40 ≤ ρ < 100 100 ≤ ρ < 125 125 ≤ ρ < 150 150 ≤ ρ < 175 175 ≤ ρ < 200	0,050 0,044 0,042 0,044 0,046 0,047 0,048	1 030 1 030 1 030 1 030 1 030 1 030 1 030	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1
2.6.2.2 – Laines de verre	7 ≤ ρ < 10 10 ≤ ρ < 15 15 ≤ ρ < 20 20 ≤ ρ < 30 30 ≤ ρ < 40 40 ≤ ρ < 80 80 ≤ ρ < 120 120 ≤ ρ < 150	0,055 0,047 0,044 0,041 0,039 0,038 0,039 0,040	1 030 1 030 1 030 1 030 1 030 1 030 1 030 1 030	1 1 1 1 1 1 1 1	 1 1 1 1 1 1 1
2.6.2.3 – Laines minérales en vrac ⁽⁵⁾ (masse volumique à l'application) - laines obtenues par soufflage sur plancher de comble - laines obtenues par épandage manuel sur plancher de comble	10 à 60 10 à 60	0,060 0,065	1 030 1 030	1 1	1 1
2.6.2.4 – Autres laines minérales		0,065	1 030	1	1
2.6.3 – LIÈGE (voir le § 2.5.4 pour les produits de masse volumique supérieure à 250 kg/m ³) – Expansé pur conforme à la norme NF EN 13170 (ICB) – Expansé aggloméré au brai ou aux résines synthétiques	100 ≤ ρ ≤ 150 100 ≤ ρ < 150 150 ≤ ρ ≤ 250	0,049 0,049 0,055	1 560 1 560 1 560	10 10 10	5 5 5

(5) Valeur par défaut pour les produits non visés par les paragraphes 3.8.4.2 et 3.8.4.4 du fascicule 4/5 « Parois opaques » des règles Th-U

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.6.4 – MATIÈRES PLASTIQUES ALVÉOLAIRES					
2.6.4.1 – Polystyrène expansé					
Dans le cas où les produits ci-dessous sont utilisés en isolation inversée de toiture, on se reportera, pour la détermination de leur conductivité thermique, aux Avis Techniques concernant ces procédés.					
2.6.4.1.1					
– Plaques découpées dans des blocs moulés et conformes à la norme NF EN 13163 (EPS)	7 ≤ ρ < 10 10 ≤ ρ < 13 13 ≤ ρ < 15	0,056 0,050 0,047	1 450 1 450 1 450	60 60 60	60 60 60
– Plaques moulées en continu et conformes à la norme NF EN 13163 (EPS)	15 ≤ ρ < 19 19 ≤ ρ < 24 24 ≤ ρ < 29	0,044 0,042 0,040	1 450 1 450 1 450	60 60 60	60 60 60
– Autres plaques moulées à partir de billes	29 ≤ ρ < 40 40 ≤ ρ < 60	0,039 0,038	1 450 1 450	60 60	60 60
2.6.4.1.2 – Plaques extrudées conformes à la norme NF EN 13164 (XPS)					
2.6.4.1.2.1 Plaques sans gaz occlus autre que l'air et le CO₂	28 ≤ ρ ≤ 40				
- épaisseur ≤ 60 mm		0,041	1 450	150	150
- épaisseur > 60 mm		0,046	1 450	150	150
2.6.4.1.2.2 Plaques expansées avec des hydrochlorofluorocarbures HCFC (142b et/ou R22) ⁽⁶⁾	25 ≤ ρ ≤ 40	0,035	1 450	150	150
2.6.4.1.2.3 Plaques expansées aux chlorofluorocarbures CFC ⁽⁶⁾					
– sans peau de surface	25 ≤ ρ ≤ 40	0,033	1 450	150	150
– avec peau de surface	25 ≤ ρ ≤ 40	0,031	1 450	150	150
2.6.4.1.2.4 Plaques expansées avec des hydrofluorocarbures HFC 134a ou 152a					
- épaisseur ≤ 60 mm		0,039	1 450	150	150
- épaisseur > 60 mm	25 < ρ ≤ 40	0,044	1 450	150	150
2.6.4.1.3 – Plaques expansées fabriquées à partir de polystyrène, mais n'entrant pas dans les familles définies ci-dessus.	20 ≤ ρ ≤ 60	0,050	1 450	150	150
2.6.4.2 – Mousse rigide de polychlorure de vinyle définie conformément à la NF T 56-202.					
Q2	25 ≤ ρ ≤ 35	0,031			
Q3	35 ≤ ρ ≤ 48	0,034			
2.6.4.3 – Mousse de polyuréthane ou de polyisocyanurate					
plaques conformes à la norme NF EN 13165 (PUR)					
On donne ici les caractéristiques thermiques des matériaux fabriqués en usine. Pour les produits projetés, on se reportera au § 2.6.4.3.9.					
2.6.4.3.1 – Plaques moulées en continu entre revêtements souples et expansées avec des hydrochlorocarbures HCFC (141b) ⁽⁶⁾ et/ou aux pentanes.					
- revêtements perméables à la diffusion	27 ≤ ρ ≤ 40	0,035	1 400	60	60
- alu > 50 μ m ou reconnus étanches aux gaz	27 ≤ ρ ≤ 40	0,030	1 400	60	60
2.6.4.3.2 – Plaques découpées dans des blocs moulés en continu et expansés avec des hydrochlorofluorocarbures HCFC (141b) ⁽⁶⁾ et/ou aux pentanes.	37 ≤ ρ ≤ 65	0,041	1 400	60	60
2.6.4.3.3 – Plaques moulées en continu injectées entre deux parements rigides (métal) étanches aux gaz					
– expansées avec des HCFC hydrochlorofluorocarbures ⁽⁶⁾ ou du pentane,	37 ≤ ρ ≤ 60	0,032	1 400	60	60
– expansées sans gaz occlus autre que l'air ou du CO ₂	37 ≤ ρ ≤ 60	0,035	1 400	60	60
2.6.4.3.4 – Plaques moulées en continu projetées sur un parement rigide (plâtre, dérivés du bois,...) expansées avec des hydrochlorocarbures ⁽⁶⁾ ou aux pentanes.	30 ≤ ρ ≤ 50	0,035	1 400	60	60

(6) Ces produits sont visés par le règlement CEE, portant sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone. En conséquence, les valeurs qui leur correspondent ne valent que pour les ouvrages réalisés avant 1996 pour les CFC et avant 2002 pour les HCFC et maintenus en l'état.

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.6.4.3.5 – Plaques moulées en continu ou découpées dans des blocs moulés expansés sans gaz occlus autre que l'air ou du CO ₂	15 ≤ ρ ≤ 30	0,040	1 400	60	60
2.6.4.3.6 Plaques conformes à la norme NF T 56-203, découpées dans des blocs moulés en discontinu, avec gaz CFC ⁽⁷⁾ . référence AD référence BD référence CD référence DD référence ED référence FD	30 ≤ ρ < 35 35 ≤ ρ < 40 40 ≤ ρ < 50 50 ≤ ρ < 60 60 ≤ ρ < 70 70 ≤ ρ < 100	0,030 0,030 0,035 0,035 0,040 0,045	1 400 1 400 1 400 1 400 1 400 1 400	60 60 60 60 60 60	60 60 60 60 60 60
2.6.4.3.7 – Plaques conformes à la norme NF T 56-203, découpées dans des blocs moulés en discontinu avec gaz CFC ⁽⁷⁾ . référence AC référence BC référence CC référence DC référence EC référence FC référence GC référence HC	29 ≤ ρ < 31 31 ≤ ρ < 33 33 ≤ ρ < 37 37 ≤ ρ < 46 46 ≤ ρ < 56 56 ≤ ρ < 66 66 ≤ ρ < 75 75 ≤ ρ < 100	0,030 0,030 0,035 0,035 0,035 0,040 0,040 0,045	1 400 1 400 1 400 1 400 1 400 1 400 1 400 1 400	60 60 60 60 60 60 60 60	60 60 60 60 60 60 60 60
2.6.4.3.8 – Plaques moulées en continu avec gaz CFC ⁽⁷⁾	27 ≤ ρ ≤ 35	0,030	1 400	60	60
2.6.4.3.9 – Plaques expansées, fabriquées à partir de polyuréthane mais n'entrant pas dans les familles définies ci-dessus.	20 ≤ ρ < 60	0,050	1 400	60	60
2.6.4.4 – Mousse phénolique rigide On ne donne ici que les caractéristiques thermiques des matériaux fabriqués en usine.					
2.6.4.4.1 – Panneaux fabriqués en continu, expansés aux hydrochlorofluorocarbures (HCFC 141b) et (ou) aux hydrochlorocarbures (LBL2) et (ou) aux pentanes.	30 ≤ ρ ≤ 45	0,030	1 400	50	50
2.6.4.4.2 – Panneaux fabriqués à partir de mousse phénolique mais n'entrant pas dans la famille ci-dessus.	30 ≤ ρ ≤ 60	0,050	1 400	50	50
2.6.4.5 – Autres matières plastiques alvéolaires fabriquées en usine – isolants fabriqués à partir d'autres matières plastiques alvéolaires	7 ≤ ρ ≤ 100	0,065			
2.6.5 – PLAQUES À BASE DE PERLITE EXPANSÉE					
2.6.5.1 – Plaques comportant un pourcentage de perlite expansée et de fibres supérieur à 80 %.	220 ≤ ρ ≤ 275 180 ≤ ρ ≤ 220 150 ≤ ρ ≤ 180	0,062 0,060 0,059	900 900 900	5 5 5	5 5 5
2.6.5.2 – Plaques à base de perlite expansée et de cellulose agglomérées, n'entrant pas dans la famille ci-dessus.	140 ≤ ρ < 260	0,064			
2.6.6 – PLAQUES HOMOGÈNES DE VERRE CELLULAIRE Fabrications postérieures à 1978	110 ≤ ρ ≤ 140 140 < ρ ≤ 180	0,051 0,057	1 000 1 000	∞	∞
2.6.7 – PRODUITS MANUFACTURÉS À BASE DE FIBRES VÉGÉTALES (LAINE DE CHANVRE - LAINE DE LIN EN PANNEAUX OU ROULEAUX - COTON ...)	20 ≤ ρ < 40 40 ≤ ρ < 60 60 ≤ ρ < 200	0,065 0,060 0,065	1 600 1 600 1 600	1 1 1	1 1 1
2.6.8 – PRODUITS MANUFACTURÉS À BASE DE FIBRES ANIMALES (LAINE DE MOUTON...)	10 ≤ ρ < 20 20 ≤ ρ < 50 50 ≤ ρ < 100	0,065 0,060 0,050	1 600 1 600	1 1	1 1

(7). Ces produits sont visés par le règlement CEE, portant sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone. En conséquence, les valeurs qui leur correspondent ne valent que pour les ouvrages réalisés avant 1996 pour les CFC et avant 2004 pour les HCFC et maintenus en l'état.

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (C_p) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.7 – MATIÈRES PLASTIQUES SYNTHÉTIQUES COMPACTES, MASTICS ET PRODUITS D'ÉTANCHÉITÉ					
2.7.1 – MATIÈRES SYNTHÉTIQUES COMPACTES D'USAGE COURANT DANS LE BÂTIMENT					
– naturel	910	0,13	1 100	10 000	10 000
– néoprène (polychloroprène)	1 240	0,23	2 140	10 000	10 000
– butyle (iso butène), plein/coulé à chaud	1 200	0,24	1 400	200 000	200 000
– caoutchouc mousse	60-80	0,06	1 500	7 000	7 000
– caoutchouc dur (ébonite), plein	1 200	0,17	1 400	∞	∞
– éthylène propylène diène monomère (EPDM)	1 150	0,25	1 000	6 000	6 000
– polyisobuthylène	930	0,20	1 100	10 000	10 000
– polysulfure	1 700	0,40	1 000	10 000	10 000
– butadiène	980	0,25	1 000	100 000	100 000
– acryliques	1 050	0,20	1 500	10 000	10 000
– poly carbonates	1 200	0,20	1 200	5 000	5 000
– polytétrafluoréthylène (PTFE)	2 200	0,25	1 000	10 000	10 000
– chlorure de polyvinyle (PVC)	1 390	0,17	1 900	50 000	50 000
– polyméthylméthacrylate (PMMA)	1 180	0,18	1 500	50 000	50 000
– poly acétate	1 410	0,30	1 400	100 000	100 000
– polyamide (nylon)	1 150	0,25	1 600	50 000	50 000
– polyamide 6.6 avec 25 % de fibre de verre	1 450	0,30	1 600	50 000	50 000
– polyéthylène/polythène, haute densité	980	0,50	1 800	100 000	100 000
– polyéthylène/polythène, basse densité	920	0,33	2 200	100 000	100 000
– polystyrène	1 050	0,16	1 300	100 000	100 000
– polypropylène	910	0,22	1 800	10 000	10 000
– polypropylène avec 25 % de fibre de verre	1 200	0,25	1 800	10 000	10 000
– polyuréthane (PU)	1 200	0,25	1 800	6 000	6 000
– résine époxy	1 200	0,20	1 400	10 000	10 000
– résine phénolique	1 300	0,30	1 700	100 000	100 000
– résine polyester	1 400	0,19	1 200	10 000	10 000
2.7.2 – MASTICS POUR JOINTS, ÉTANCHÉITÉ ET COUPURE THERMIQUE					
– silicagel (dessicatif)	720	0,13	1 000	∞	∞
– silicone pur	1 200	0,35	1 000	5 000	5 000
– silicone mastic	1 450	0,50	1 000	5 000	5 000
– mousse de silicone	750	0,12	1 000	10 000	10 000
– uréthane polyuréthane (coupure thermique)	1 300	0,21	1 800	60	60
– chlorure de polyvinyle flexible avec 40 % de plastifiant	1 200	0,14	1 000	100 000	100 000
– mousse élastomère flexible	60-80	0,05	1 500	10 000	10 000
– mousse de polyuréthane (PU)	70	0,05	1 500	60	60
– mousse de polyéthylène	70	0,05	2 300	100	100
2.7.3 – PRODUITS D'ÉTANCHÉITÉ ⁽⁸⁾					
2.7.3.1 – Asphalte					
– Asphalte pur	$\rho \leq 2 100$	0,70	1 000	50 000	50 000
– Asphalte sablé		1,15	1 000		
2.7.3.2 – Bitume					
– Pur	$\rho \leq 1 050$	0,17	1 000	50 000	50 000
– Cartons feutres et chapes souples imprégnées	$1 000 \leq \rho \leq 1 100$	0,23	1 000	50 000	50 000

(8) Les matériaux de protection, placés au-dessus de l'étanchéité ne sont pas pris en compte dans le calcul du U, sauf spécification contraire donnée dans un Avis Technique.

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.8 – MÉTAUX					
– aluminium	2 700	230	880	∞	∞
– alliages d'aluminium	2 800	160	880	∞	∞
– bronze	8 700	65	380	∞	∞
– laiton	8 400	120	380	∞	∞
– cuivre	8 900	380	380	∞	∞
– fer pur	7 870	72	450	∞	∞
– fer, fonte	7 500	50	450	∞	∞
– plomb	11 300	35	130	∞	∞
– acier	7 800	50	450	∞	∞
– acier inoxydable	7 900	17	460	∞	∞
– zinc	7 200	110	380	∞	∞
2.9 – AUTRES MATÉRIAUX					
2.9.1 – TERRE ET SOLS					
2.9.1.1 – Sols					
– sable et gravier	$1\ 700 \leq \rho \leq 2\ 200$	2,0	910-1180	50	50
– argile ou limon	$1\ 200 \leq \rho \leq 1\ 800$	1,5	1 670-2 500	50	50
2.9.1.2 – Pisé, bauge, béton de terre stabilisé, blocs de terre comprimée	$1\ 770 \leq \rho \leq 2\ 000$	1,1			
2.9.1.3 Revêtements de sol					
– caoutchouc	1 200	0,17	1 400	10 000	10 000
– plastique	1 700	0,25	1 400	10 000	10 000
– sous couche, caoutchouc-mousse ou plastique cellulaire	270	0,10	1 400	10 000	10 000
– sous-couche feutre	120	0,05	1 300	20	15
– sous-couche laine	200	0,06	1 300	20	15
– sous-couche liège	$\rho < 200$	0,05	1 500	20	10
– plaque de liège	$\rho > 400$	0,065	1 500	40	20
– tapis, revêtement textile	200	0,06	1 300	5	5
– linoléum	1 200	0,17	1 400	1 000	800
2.9.2 – MORTIERS D'ENDUITS ET DE JOINTS DE CIMENT OU DE CHAUX					
	$\rho > 2000$	1,8	1 000	10	6
	$1\ 800 < \rho \leq 2\ 000$	1,3 ⁽⁹⁾	1 000	10	6
	$1\ 600 < \rho \leq 1\ 800$	1,0	1 000	10	6
	$1\ 450 < \rho \leq 1\ 600$	0,80	1 000	10	6
	$1\ 250 < \rho \leq 1\ 450$	0,70	1 000	10	6
	$1\ 000 < \rho \leq 1\ 250$	0,55	1 000	10	6
	$750 < \rho \leq 1\ 000$	0,40	1 000	10	6
	$500 < \rho \leq 750$	0,30	1 000	10	6
2.9.3 – Fibres-ciment et fibres-ciment cellulose					
2.9.3.1 – Fibres-ciment					
	$1\ 800 < \rho \leq 2\ 200$	0,95			
	$1\ 400 \leq \rho \leq 1\ 800$	0,65			
2.9.3.2 – Fibres-ciment cellulose					
	$1\ 400 < \rho \leq 1\ 800$	0,46			
	$1\ 000 \leq \rho \leq 1\ 400$	0,35			

(9) La masse volumique moyenne d'un mortier de pose est de 1 900 kg/m³.

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.9.4 – PLAQUES À BASE DE VERMICULITE AGGLOMÉRÉES AUX SILICATES	400 < ρ ≤ 500 300 < ρ ≤ 400 200 < ρ ≤ 300	0,19 0,14 0,10			
2.9.5 – VERRE					
– verre sodocalcaire (y compris le verre flotté)	2 500	1,00	750	∞	∞
– quartz	2 200	1,40	750	∞	∞
– pâte de verre	2 000	1,20	750	∞	∞
2.9.6 – MATÉRIAUX EN VRAC					
Les caractéristiques de ces matériaux sont fonction de leur mise en œuvre ; elles sont données dans le fascicule 4/5 « Parois opaques »					
2.9.7 – GAZ					
– air	1,23	0,025	1 008	1	1
– dioxyde de carbone	1,95	0,014	820	1	1
– argon	1,70	0,017	519	1	1
– hexafluorure de soufre	6,36	0,013	614	1	1
– krypton	3,56	0,009	245	1	1
– xénon	5,68	0,0054	160	1	1
2.9.8 – EAU					
– glace à -10 °C	920	2,30	2 000		
– glace à 0 °C	900	2,20	2 000		
– neige fraîchement tombée (< 30 mm)	100	0,05	2 000		
– neige souple (30-70 mm)	200	0,12	2 000		
– neige légèrement comprimée (70-100 mm)	300	0,23	2 000		
– neige compactée (< 200 mm)	500	0,60	2 000		
– eau à 10 °C	1 000	0,60	4 190		
– eau à 40 °C	990	0,63	4 190		
– eau à 80 °C	970	0,67	4 190		

Épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur (résistance à la vapeur d'eau)

Produit/matériau	Épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur d'eau s_d en m
Polyéthylène 0,15 mm	50
Polyéthylène 0,25 mm	100
Film polyester 0,2 mm	50
Feuille de PVC	30
Feuille d'aluminium 0,05 mm	1 500
Feuille de polyéthylène (agrafée) 0,15 mm	8
Papier bitumineux 0,1 mm	2
Papier d'aluminium 0,4 mm	10
Membrane respirante	0,2
Peinture-émulsion	0,1
Peinture-verniss	3
Papier mural vinyle	2

Note : l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur d'eau d'un produit s'étend comme l'épaisseur d'une couche d'air immobile ayant la même résistance à la vapeur que le produit.

L'épaisseur des produits indiquée n'est normalement pas mesurée et ils peuvent être considérés comme des produits infiniment fins ayant une résistance à la vapeur d'eau. Le tableau donne des épaisseurs nominales pour faciliter l'identification du produit.

Source : norme NF EN ISO 10456 – Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques - Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles, juin 2008.

10. Bibliographie

- [1] COUASNET Y. *Les condensations dans les bâtiments – Guide pratique et éléments d'analyse*. Éditions Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 1990.
- [2] CROISET M. *L'hygrothermique dans le bâtiment – Confort thermique d'hiver d'été – Condensation*. Éditions Eyrolles, 1968.
- [3] DUFORESTEL T. *Bases métrologiques et modèles pour la simulation du comportement hygrothermique des composants et ouvrages du bâtiment*, thèse, École nationale des ponts et chaussées, 1992.
- [4] HARTWIG M. Künzel. *Pare-vapeur pour la protection de l'enveloppe des bâtiments contre un excès d'humidité*. Fraunhofer-Institut Bauphysik, Holzkirchen RFA, 2003.
- [5] HARTWIG M. Künzel. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*, IRB Verlag, 1995.
- [6] LOUVIGNE M. *Humidité dans les Bâtiments – Prévention et Traitement*, CATED, 1996.
- [7] MIQUEL A. *Détermination expérimentale des caractéristiques hydriques des matériaux du bâtiment : contribution à la mise au point et validation de techniques nouvelles*, thèse, Université Paris XII – Val-de-Marne, 1997.
- [8] SALLEE H., LAURENT J-P., QUENARD D. *Rapport Plan Construction et Architecture « Humidité »*, 1992.
- [9] BROGAT B., FONTAN J., LANCHON P., MILLET J-R., SKODA-SCHMOLL C., VILLENAVE J-G. *Ventilation dans les bâtiments collectifs d'habitation existants – Guide à l'usage des acteurs de la réhabilitation*, Cahier du CSTB n° 3248, septembre 2000.
- [10] NF EN ISO 9346 : Performance hygrothermique des bâtiments et des matériaux pour le bâtiment - Transfert de masse - Grandeurs physiques pour le transfert de masse – Vocabulaire, décembre 2007.
- [11] EN 15026 : Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments – évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique, février 2007.
- [12] NF EN ISO 15148 : Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment. Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle, octobre 2003.
- [13] NF 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, décembre 2001.

Nomenclature

A	Coefficient d'absorption d'eau	[kg/m ² .s ^{0.5}]	P _v	Pression partielle de vapeur	[Pa]
c	Chaleur spécifique	[J/(kg.K)]	S ou P _s	Pression de succion ou succion	[Pa]
D _v	Coefficient de diffusion moléculaire	[m ² /s]	P _{sat}	Pression de vapeur saturante	[Pa]
D _k	Coefficient de diffusion Knüdsen	[m ² /s]	q	Densité de flux de chaleur	[W/m ²]
D _w	Diffusivité hydrique	[m ² /s]	R _T	Résistance thermique	[m ² .K/W]
D _{ws}	Coefficient de diffusion liquide par succion	[m ² /s]	R _D	Résistance à la diffusion	[m ² .s.Pa/kg]
e	Épaisseur	[m]	R	Constante des gaz parfaits	[J/(mol.K)]
g _l	Densité de flux de liquide	[kg/(m ² .s)]	S	Surface	[m ²]
g _v	Densité de flux de vapeur	[kg/(m ² .s)]	S _d	Épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur d'eau	[m]
H	Enthalpie massique	[J/m ³]	T	Température	[K]
h _c	Coefficient d'échange convectif thermique	[W/(m ² .K)]	T _d	Température de rosée	[K]
h _m	Coefficient d'échange convectif massique	[m/s]	T _f	Température de gelée	[K]
h _e ou L	Chaleur latente d'évaporation ou de condensation	[J/kg]	u	Teneur en eau massique	[kg/kg]
K _l	Perméabilité liquide du matériau	[kg/(m.s.Pa)]	V	Volume	[m ³]
l _{pm}	Libre parcours moyen	[m]	w	Teneur en eau en masse par volume	[kg/m ³]
M	Masse molaire	[kg/mol]	w _f	Teneur en eau libre	[kg/m ³]
m	Masse	[kg]	W	Quantité de vapeur produite par unité de temps	[kg/(m ³ .h)]
n	Taux de renouvellement d'air	[h ⁻¹]	W _p	Perméance à la vapeur	[kg/(m ² .s.Pa)]
p	Pression	[Pa]	x	Humidité spécifique	[kg/kg d'air sec]
p _l	Pression liquide	[Pa]			

δ_0	Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air	[kg/(m.s.Pa)]	λ	Conductivité thermique	[W/(m.K)]
δ_p	Perméabilité du matériau à la vapeur d'eau	[kg/(m.s.Pa)]	μ	Facteur de résistance à la vapeur d'eau	[-]
ε	Porosité	[m ³ /m ³]	ν ou W	Humidité volumique Humidité absolue	[kg/m ³]
φ ou HR	Humidité relative	[-]	Δv	Excédent d'humidité	[kg/m ³]
Φ	Flux de chaleur	[W]	ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
θ	Température de surface	[K]	ψ	Teneur en eau volumique	[m ³ /m ³]

Indices :

a	air sec	0	air ambiant	v	phase vapeur
l	liquide	w, e	eau	s	état sec
int	intérieur	ext	extérieur	th	thermique
h	humide	max	maximal	sat	valeur à la saturation

TRANSFERTS D'HUMIDITÉ À TRAVERS LES PAROIS

Évaluer les risques de condensation

La plupart des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments sont poreux. Une partie ou éventuellement la totalité des pores de ces matériaux sont interconnectés, les rendant perméables à la vapeur d'eau. Par ailleurs, certains matériaux sont hygroscopiques, c'est-à-dire qu'ils sont aptes à fixer l'humidité. Cette propriété peut induire des modifications de leurs caractéristiques physiques, notamment mécaniques et thermiques. Par exemple, l'humidité augmente la conductivité thermique des matériaux jusqu'alors isolants induisant une dépense supérieure en chauffage. Il est donc nécessaire de contrôler les transferts d'humidité afin de limiter la dégradation des matériaux qui peut entraîner une fragilisation structurelle et une diminution de leurs propriétés physiques.

Les dégradations structurelles ne sont pas les seuls phénomènes à craindre, un autre facteur doit être pris en compte : le niveau de confort des occupants. En effet, un excès ou un manque d'eau peuvent causer un inconfort plus ou moins sensible pour les occupants. Les symptômes les plus couramment rencontrés sont l'apparition de condensation sur les fenêtres, de moisissures sur les murs et de réactions allergiques provenant de ces moisissures.

Il faut donc se préoccuper de ces phénomènes tant pour l'occupant que pour la pérennité du patrimoine immobilier et déterminer où et quand des risques nuisibles d'humidité sont à craindre pour mieux les prévenir.

De plus, les renforcements de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments neufs ou existants sont susceptibles de modifier leur équilibre hygrothermique. La gestion de l'eau doit donc être prise en compte dès la conception des bâtiments neufs pour réduire les risques de désordres ultérieurs et lors d'une réhabilitation pour préserver le bâti.

Ce document définit les principaux paramètres qui gouvernent les transferts d'humidité et de chaleur dans les parois d'un bâtiment. Il précise leur calcul et les quantités d'eau susceptibles de condenser. Des règles de qualité, résultant de ces calculs et de l'expérience, sont données afin de limiter les risques de condensation lorsqu'ils peuvent nuire à l'ouvrage.

Cet ouvrage rappelle d'abord les différentes grandeurs intervenant dans les transferts d'humidité (pression de vapeur saturante, humidité relative, air sec, air humide, etc.) ainsi que l'influence des climats intérieur et extérieur. Enfin, il propose des outils d'évaluation des transferts d'humidité afin de déterminer rapidement les risques encourus.