

## MIGRATION ET CONDENSATION DE LA VAPEUR D'EAU À TRAVERS LES ENVELOPPES DES BÂTIMENTS

**Mahamadou ALASSANE**

*Ecole Nationale d'Ingénieur Abderrahmane Baba Touré (ENI-ABT), 410  
Avenue Van VOLLENHOVEN, BP 242, Bamako, Mali  
Département d'Etudes et de Recherches (DER) de Génie Civil, Laboratoire  
de Génie Civil (GC)*

---

\*Correspondance, e-mail : [mahaalass@gmail.com](mailto:mahaalass@gmail.com)

### RÉSUMÉ

La vapeur d'eau qui existe en permanence dans les parois enveloppes des bâtiments migre spontanément du côté de la paroi où la concentration de vapeur d'eau est la plus forte vers le côté où la concentration de vapeur d'eau est la plus faible. Ce phénomène physique est indispensable au sein de la paroi mais très souvent il est la cause de condensation superficielle ou interne. Cette condensation au sein de la paroi enveloppe peut être la cause de plusieurs pathologies qui peuvent entraîner la dégradation de la paroi, le cloquage des revêtements, le décollement des peintures et des papiers peints, des moisissures etc. La vapeur d'eau dans les parois n'est pas un problème si elle peut s'évacuer sans condenser. Les dégradations sont toujours liées à l'eau liquide et quand les matériaux n'arrivent plus à évacuer l'excédent. Cette étude basée sur le phénomène de migration de la vapeur au travers des parois enveloppes et les risques de condensation superficielle et interne nous a conduit à dégager les méthodes pratiques de calcul et d'évaluation des risques de condensations superficielle et dans la masse des parois enveloppes de bâtiment et d'en déduire des mesures préventives dans chaque cas. Cette étude doit être menée dès les premières esquisses, mais aussi tout au long de la conception et de la réalisation des parois enveloppes.

**Mots-clés :** *vapeur, migration de vapeur d'eau, humidité, Transfert d'humidité, condensation, condensation superficielle, condensation interne, enveloppe de bâtiment, paroi enveloppe de bâtiment.*

**Mahamadou ALASSANE**

## ABSTRACT

### **Migration and condensation of vapor water into the building envelope**

The water vapor that exists permanently in the envelope walls of the buildings migrates spontaneously on the side of the wall where the concentration of water vapor is the strongest towards the side where the concentration is the lowest. This physical phenomenon is essential within the wall but very often it is the cause of superficial or internal condensation. This condensation within the wall envelope can be the cause of several pathologies that can lead to the degradation of the wall, blistering of coatings, the peeling of the paints and wall papers, mold, etc. The water vapor in the walls is not so that it can evacuate without condensing. Degradations are always related to liquid water and when the materials can no longer evacuate the excess. This study based on the phenomenon of migration of water vapor through the envelope walls and the risks of superficial and internal condensation, envelope walls and deduce preventive measures in each case. This study must be conducted from the first sketches, but also throughout the design and production of the walls envelopes.

**Keywords :** *vapor, water vapor migration, humidity, humidity transfer, condensation, superficial condensation, internal condensation, building envelope, building envelope wall.*

## I - INTRODUCTION

La présence d'humidité dans les parois enveloppes des bâtiments peut avoir de nombreuses origines : la pluie, les remontées capillaires, les fuites des conduites d'eau et d'air, les ponts thermiques, la vapeur d'eau émise dans les pièces humides (cuisine, douche etc.), ou par les occupants (la respiration, sudation), l'eau contenue dans les matériaux de construction et l'eau de gâchage, les eaux de condensations etc. Si ces différentes sources d'humidification des parois de bâtiments ne sont pas correctement appréhendées par les concepteurs, elles peuvent entraîner des conséquences multiples aussi bien sur le bâtiment que sur les occupants d'où la nécessité de cette étude. Le constat d'aujourd'hui est que ce problème qui est permanent dans le bâtiment n'est pas bien appréhendé par les concepteurs afin d'adopter le bon choix au bon moment. Selon B. VOISIN « Le risque de condensation dans les parois est un problème peu connu par les professionnels. Il est donc important de sensibiliser davantage à cette notion non seulement le professionnel mais le législateur ». Une sensibilisation des concepteurs s'avère donc nécessaire. La plupart des matériaux utilisés dans la construction des

bâtiments sont des matériaux poreux, plus ou moins perméables à la vapeur d'eau. Outre une ventilation efficace, indispensable pour pouvoir évacuer l'excédent d'humidité, il est aussi indispensable de maîtriser la migration de la vapeur d'eau au travers des parois. Les objectifs que nous visons dans cette étude sont les suivants :

- Comprendre le mécanisme physique du transfert de vapeur d'eau dans les parois enveloppes des bâtiments ;
- Evaluer les risques condensations superficielle et interne dans les enveloppes des bâtiments ;
- Savoir que le but de l'analyse des risques de condensation n'est pas d'empêcher les condensations, elles peuvent donc bien se produire mais sans que cela ait des conséquences négatives sur les bâtiments ;
- Avoir un aperçu des solutions permettant de maîtriser cette problématique en phase de conception des enveloppes.

## II - MÉTHODOLOGIE

Le travail consiste à mener une étude sur le phénomène de migration de la vapeur d'eau au sein des enveloppes des bâtiments causant leur l'humidification et la condensation de la vapeur d'eau et de procéder par la suite à une analyse des risques de condensations afin de dégager une méthode de calcul pratique et de mesures préventives nécessaires aux concepteurs des enveloppes et aux autres professionnels.

### II-1. Migration de la vapeur d'eau à travers les enveloppes de bâtiments

#### *II-1-1. Mécanisme de la migration de la vapeur d'eau dans les enveloppes des bâtiments*

Dès qu'il existe une différence de pression partielle entre les faces d'une paroi enveloppe d'un bâtiment, il y aura une migration de la vapeur d'eau du côté de la pression la plus élevée vers la pression la plus basse. Phénomène courant au travers de la plupart des matériaux de construction. Il faut savoir que de la même manière qu'une paroi enveloppe exposée sur ses deux faces à des températures différentes va chercher à équilibrer les températures en créant un flux de chaleur qui se déplace de la face la plus chaude vers la face la plus froide, une paroi enveloppe exposée sur ses deux cotés à des différences de concentration de vapeur d'eau va créer un flux de vapeur qui va aussi migrer du côté de la pression de vapeur la plus haute vers la pression la plus basse. Par exemple en hiver (en période froide), l'air des locaux chauffés et habités contient plus de vapeur d'eau que l'air froid extérieur. La pression de vapeur est donc plus forte à l'intérieur du local qu'à l'extérieur. Cette différence de

pression de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur aura pour conséquence immédiate la migration de la vapeur qui va alors de l'intérieur vers l'extérieur. Mais alors attention sous certaines conditions, cette vapeur d'eau peut se condenser à la surface ou à l'intérieur des parois enveloppes (mur, toit, etc.), et être la cause de désordres dans les structures enveloppes des bâtiments. D'où la nécessité d'une analyse du phénomène depuis la phase de la conception des parois (les murs et les toitures en particulier).

### ***II-1-2. Le phénomène de la migration de la vapeur d'eau à travers les enveloppes de bâtiments***

Lorsqu'un bâtiment est chauffé, on crée une différence de température et de taux d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. L'air humide qu'il contient tend à trouver son point d'équilibre avec l'air extérieur plus froid. Il existera alors une différence de pression partielle de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur qui entraînera un mouvement de vapeur qui s'effectue à travers les pores disponibles mais aussi à travers la structure même des parois de l'ambiance à plus forte concentration de pression partielle à celle de plus faible concentration de pression partielle. Pendant la conception des parois enveloppes de bâtiment, il faut savoir que la quantité de vapeur d'eau qui traverse une paroi dépend :

- Du profil (ou gradient) des pressions partielles de vapeur entre l'intérieur du bâtiment ( $P_i$ ) et l'extérieur ( $P_e$ ) ;
- De la perméabilité des parois à la vapeur, fonction des caractéristiques et des épaisseurs des matériaux de construction ;
- Du profil (ou gradient) des températures rencontrées dans les parois.

Suivant le degré hygrométrique de l'air, de grandes quantités de vapeurs d'eau peuvent migrer à l'intérieur des parois et dans une certaine mesure donner naissance à des condensations qui peuvent entraîner de graves conséquences pour les parois. Ce processus a lieu par déplacement de matière (déplacement de molécules d'eau). Comparativement au transfert de chaleur qui est un transfert d'énergie, le transfert de vapeur est beaucoup plus complexe, mais en supposant que le régime thermique est stationnaire on simplifiera le processus de calcul de la migration de la vapeur d'eau à travers les parois enveloppes. La méthode de calcul est semblable au cas des échanges thermiques où la densité de flux de chaleur exprimée en Watt par mètre carré ( $W/m^2$ ) est donnée par  $q = \frac{T_i - T_e}{R_i + \sum R + R_e}$  selon la Loi de Fourier, on peut utiliser **la Formule** suivante pour calculer la quantité de la vapeur d'eau qui migre à travers les enveloppes des bâtiments :

$$W=q_w=\frac{P_i-P_e}{R_m} \quad (1)$$

selon la Loi de Fick) avec  $R_m=\frac{d}{\pi}$ , donc quand une paroi perméable à la vapeur d'eau sépare deux milieux avec des concentrations de pression différentes, le transfert de vapeur au travers des parois de construction est décrit par des équations dérivées de la première loi de Fick qui s'exprime ainsi : en régime permanent, la quantité de vapeur d'eau qui migre entre deux plans parallèles d'un même matériau, par unité de surface et par unité de temps est :

- Proportionnelle à la différence de pression partielle ( $P_i-P_e$ ) entre ces deux plans ;
- Proportionnelle à la perméabilité à la vapeur d'eau  $\pi$  ;
- Inversement proportionnelle à la distance  $d$  entre les deux plans ;
- Inversement proportionnelle à la résistance à la migration de vapeur d'eau  $R_m$ .

Ce flux de vapeur est exprimé en  $g / m^2.h$ , cette loi suppose qu'il n'ya pas de condensation entre les deux plans, on admet que la courbe représentant l'évolution de la pression partielle à travers une paroi monocouche est une ligne droite mais une ligne brisée à travers une paroi multicouche. Puisque la résistance à la migration de vapeur en surface de paroi est très faible par rapport à la résistance à la migration dans la masse de la paroi, les résistances à la migration en surface seront négligées dans le calcul de la résistance totale à la migration de la vapeur. C'est ainsi qu'on représente par  $P_i$  et  $P_e$  les pressions partielles des faces intérieure et extérieure de la paroi, et en déduira la pression partielle d'une couche  $m$  quelconque de matériau par **la Formule** suivante :

$$P_m= P_i - \frac{\sum_{j=1}^{m-1} H_j}{R_m} (P_i - P_e) \quad (2)$$

avec  $m = 2. 3.4 \dots n$ ,  $\sum_{j=1}^{m-1} H_j =$  somme des résistances à la migration de vapeur à compter de la première couche à la couche  $m - 1$ .

## II-2. Phénomène de condensation dans les enveloppes des bâtiments

Dans le bâtiment on observe des pathologies dues à l'eau et à l'humidité créant des désordres structuraux et pouvant détériorer l'ouvrage dans le temps, la cause particulière est la condensation. En hiver la température et l'humidité spécifique à l'intérieur des locaux chauffés sont supérieures à celles régnant à l'extérieur, entraînant du coup une pression partielle de vapeur d'eau plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur. C'est ainsi qu'il se produira non seulement un phénomène de transfert thermique mais également un phénomène de

transfert de vapeur à travers les parois enveloppes de bâtiments. Si les caractéristiques thermiques et la composition des éléments de la structure enveloppe ne sont pas conçus de façon adéquate, cette vapeur migrante peut se condenser sur la surface intérieure ou dans la masse même de la structure enveloppe. Cette humidité induite peut être la source principale de détérioration dans le bâtiment : salissures, décollement de revêtements, effritement des enduits, gonflement et gauchissement des bois et en cas de gel fissuration et éclatement de matériau. Dans les pores des matériaux la condensation apparaît pour des degrés hygrométriques inférieurs à 100%. Il faut donc éviter que l'eau remplace l'air dans les matériaux de construction qui sont en grande partie des matériaux poreux. Aussi quand la vapeur d'eau contenue dans une masse d'air se transforme en gouttelettes d'eau autrement dit lorsque la température de rosée de l'air ambiant est atteinte il se produit une condensation. La condensation se produit également lorsqu'à un endroit du bâtiment la pression partielle de vapeur d'eau serait égale à la pression de vapeur saturante correspondant à la température régnante à cet endroit. On sait également qu'en hiver la température de la face intérieure des parois est inférieure à celle de l'ambiance intérieure et les variations de la température aux interfaces aussi peuvent être brutales, conséquence induite, la température de surface de la paroi d'un local chauffé est plus basse que celle de l'ambiance intérieure d'où la possibilité de condensation en surface, la température qui varie dans la masse de la paroi peut aussi entraîner une condensation dans la masse dite condensation interne, qui semble être la plus dangereuse. Ces phénomènes physiques doivent être pris en compte dès les premières esquisses de la phase de la conception des parois par les concepteurs.

### ***II-2-1. La condensation superficielle***

#### *II-2-1-1. Analyse du phénomène*

La condensation est le passage à l'état liquide de la vapeur d'eau contenue dans l'air des locaux. En hiver l'air intérieur d'une pièce chauffée ayant une température, une humidité relative et une pression donnée peut atteindre une surface de température plus faible (surface froide), au contact de cette surface l'air se refroidit et la température atteinte dans les voisinages de la surface peut descendre en dessous du point de rosée. Il apparaît alors de la condensation dite de surface, la pression partielle de vapeur dans l'air atteint la pression de saturation ( $P = P_s$ ). Dans les bâtiments la condensation superficielle apparaît principalement sur les simples vitrages (le verre étant imperméable à la vapeur d'eau des gouttelettes d'eau apparaissent à la surface du vitrage), les châssis métalliques sans coupure thermique, les conduites d'eau froide et sur les surfaces froides des enveloppes peu importe qu'elles soient à l'intérieur ou à l'extérieur. L'analyse du risque consistera donc à vérifier si la température de cette surface n'est pas inférieure à la température de rosée de l'air ambiant.

Pour les pièces à humidité normale, si l'enveloppe est conçue selon les principes de la résistance thermique minimale requise de l'enveloppe, il n'y aura pas de possibilité de condensation sur les parties opaques de la construction mais les endroits dont les propriétés thermiques sont faibles (les ponts thermiques) seront analysés et traités en conséquence.

### *II-2-1-2. Mesures préventives*

les principales causes de condensation superficielle étant connues. Pour empêcher la condensation superficielle il faut :

- Une isolation thermique de qualité suffisante de l'enveloppe de façon à ce que la température de la surface intérieure ne dépasse pas 18°C ;
- Diminuer par ventilation intermédiaire l'humidité relative de l'air intérieur du local ;
- Chauffer la surface intérieure des parois froides.

Si ces mesures ne sont pas applicables ou insuffisantes, la seule façon de limiter les dégâts est de traiter les surfaces des parois pour empêcher la pénétration des eaux de condensation par capillarité dans les parois et de pouvoir cueillir et évacuer les eaux de condensation.

### *II-2-2. La condensation interne*

C'est la condensation dans la masse d'un élément de construction, et qui se produit si à un endroit quelconque de cet élément de construction, la pression partielle de vapeur réelle devient égale à la pression de saturation correspondante à la température régnante à cet endroit. Ce phénomène est causé par les différences de pression partielle de vapeur d'eau et de température de part et d'autre de l'élément ou dans l'élément de construction. Quand on considère un bâtiment, il existe toujours une différence de pression partielle de vapeur entre l'intérieur chauffé et l'extérieur froid, c'est ainsi qu'en hiver (période froide chez nous) la pression partielle de vapeur intérieure est supérieure à la pression partielle de vapeur extérieure, il se produira donc de la condensation interne dans une paroi s'il y a une différence de température et de pression partielle de vapeur et localement la pression partielle de vapeur est égale à la pression de saturation ( $P = P_s$ ). Cette condensation interne crée dans la paroi des zones humides en permanence et donc une perte d'isolation thermique (car le coefficient de conductivité thermique de l'isolant croît avec l'humidité) et éventuellement une dégradation des parois (apparition de moisissures).

#### *II-2-2-1. Analyse du phénomène*

La pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air d'un local est plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur. Cette vapeur d'eau aura tendance à migrer

vers l'extérieur, en traversant la paroi sa température diminue et il peut se produire une condensation à l'intérieure de la paroi. Cette condensation est la plus dangereuse car contrairement à la condensation superficielle elle est invisible d'où la nécessité d'une analyse sérieuse de la condensation dans la masse des parois enveloppes.

### *II-2-2-2. Mesures préventives*

Les condensations dans le bâtiment sont toujours des sources d'imperfection pour y remédier efficacement en plus des exigences de bonne conception et de bonne exécution les mesures complémentaires sont : l'isolation thermique, la ventilation et le chauffage des parois.

#### *II-2-2-2-1. La méthode d'isolation thermique*

Cette méthode permet de réduire la production de vapeur. On distinguera le principe d'isolation par l'intérieur et par l'extérieur (la plus efficace pour traiter les ponts thermiques).

##### *II-2-2-2-1-1. L'isolation par l'extérieur*

Une bonne isolation permet de réduire les déperditions thermiques et de maintenir stable la température interne de la paroi, mais attention sans chauffage supplémentaire, l'isolation ne peut pas empêcher la variation de la température. En utilisant un isolant thermique dans les structures lourdes en maçonnerie de brique on peut accélérer l'élévation de la température de la surface intérieure de la paroi quand le local est chauffé. Mais l'isolation thermique doit être continue pour éviter l'apparition de ponts thermiques et de condensations superficielles. Pour éviter la condensation dans les pores des matériaux, il faut nécessairement des équipements qui freinent la vapeur d'eau, c'est ce qu'on appelle la technique du frein- vapeur. Pour une paroi constituée de plusieurs couches de matériaux, les matériaux opaques de faible perméabilité à la vapeur seront disposés du côté de plus grande pression partielle de vapeur d'eau (excepté pour les chambres froides, où il sera placé vers l'intérieur côté où la température est la plus élevée en hiver) et les matériaux de coefficients de perméabilité à la vapeur plus grands côté où la pression partielle de vapeur d'eau relativement petite vers l'extérieur où la température est basse, créant ainsi un équilibre entre vapeur d'eau entrant et sortant à travers la structure enveloppe ainsi infiltration difficile et évacuation rapide de la vapeur d'eau, évitant ainsi le risque de condensation interne. Exemple soit un mur constitué de l'extérieur vers l'intérieur de la façon suivante :

- un enduit extérieur en chaux capillaire de 1.0 cm d'épaisseur ;
- un isolant en polystyrène de 15 cm d'épaisseur ;
- un mur en béton imperméable à la vapeur d'eau de 20cm d'épaisseur.



Généralement il n'y a pas de risque de condensation de la vapeur d'eau, particulièrement en cas d'utilisation d'un matériau perméable à la vapeur d'eau (ouvert à la diffusion et d'un enduit capillaire). La chute de pression partielle de vapeur dans la maçonnerie apparaît ainsi avant la chute de la pression dans l'isolant. Mais il faut que l'isolant utilisé soit peu perméable (le verre cellulaire, le polystyrène extrudé). L'isolation par l'extérieur permet en plus d'éviter les problèmes de condensations liés à la migration de la vapeur d'eau de couper les ponts thermiques, par exemple celui d'une dalle intermédiaire sur un bâtiment à deux étages.

#### *II-2-2-1-2. L'isolation par l'intérieur*

Par contre pour l'isolation par l'intérieur, le risque de condensation est plus important, ainsi certains principes doivent être respectés afin d'éviter l'apparition d'humidité dans l'isolant. La vapeur d'eau migre le plus souvent de l'intérieur vers l'extérieur, il est recommandé d'employer des matériaux de plus en plus ouvert à la migration de vapeur d'eau, pour cela il faut que la résistance à la migration de vapeur intérieure  $R_{mi}$  soit cinq (5) fois supérieure à la résistance à la migration de vapeur extérieure  $R_{me}$  pour limiter les risques de condensation. C'est pourquoi on adopte la technique du pare-vapeur dans un tel cas (un pare-vapeur est une membrane qui permet de bloquer ou limiter la migration de la vapeur d'eau au sein de la paroi). La mise en place sur la face intérieure de l'isolant d'une couche peu perméable à la vapeur d'eau et n'ayant aucun rôle thermique, permet de faire chuter localement la pression partielle de vapeur d'eau et donne l'assurance qu'elle restera toujours en dessous de la pression de saturation. L'utilisation du pare-vapeur (feuille d'aluminium, de polyéthylène, ou de couche bitumineuse etc.) est donc une solution pour remédier au problème de la migration de l'humidité dans les parois. Il permet d'éviter la condensation mais attention à trois points essentiels :

- le pare-vapeur doit toujours être placé du côté chaud de la paroi, là où les pressions partielles sont les plus fortes ;
- il doit être protégé des chocs ;
- la continuité du par vapeur doit être assurée surtout à la jonction des murs et des planchers hauts et bas, ainsi qu'avec les cloisons et les murs de refends, attention à sa rupture pendant l'exécution.

La technique du pare vapeur est principalement utilisée pour les locaux de grande humidité, de nos jours elle est peu utilisée pour les locaux d'humidité normale. On déterminera par la formule suivante la résistance minimale à la migration de la vapeur d'eau :

$$R_{min} = \frac{P_i - P_{S,C}}{\frac{10d_i \rho_i [\Delta w]}{24Zh} + \frac{P_{S,C} - P_e}{R_{m,e}}} \leq R_{m,i} \quad (3)$$

si  $R_{\min} \leq R_{mi}$ , l'existence du pare-vapeur n'est pas nécessaire mis dans le cas contraire il faut prévoir un pare-vapeur. La résistance nécessaire à la migration d'un pare-vapeur sera calculée par :  $R_{mp} = R_{\min} - R_{mi}$ , La résistance à la migration de vapeur des chambres froides sera calculée par :

$$R_{mf} = 1.6 (P_i - P_e) \geq 4000 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{g}$$

**Tableau 1 :** Valeurs de  $[\Delta w]$  pour certains matériaux isolants courants

Isolants courants	$[\Delta w]$ (%)
Béton mousse, béton cellulaire ( $\rho=500$ à $700 \text{ Kg/m}^3$ )	4
Perlite, vermiculite de ciment ( $\rho=300$ à $500 \text{ Kg/m}^3$ )	6
Perlite asphalté, vermiculite asphalté ( $\rho=300$ à $400 \text{ Kg/m}^3$ )	7
Panneau de fibre de ciment (fibro-plaque)	5
Laine minérale, laine de roche, laine de verre et leurs produits dérivés (panneau ou rouleau)	3
Polystyrène expansé	15
Scorie de mine et de haut-fourneau (mâchefer)	2

**Tableau 2 :** Résistance à la diffusion de certains pare-vapeur

Pare-vapeurs	Epaisseur d (mm)	Rm ( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{g}$ )	Pare-vapeurs	Epaisseur d (mm)	Rm ( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{g}$ )
Papier feutre bitumé (ou asphalté)	0.4	293.3	Bicouche de polyéthylène	-	1240
Goudron de pétrole (houille)	1.5	1106.6	Bicouche d'époxyde	-	3733.0
Monocouche d'enrobée de bitume à chaud	2	266.6	Bicouche de chlorure de polyvinyle (PVC)	-	3866.3
Bicouche d'enrobée à chaud	4	480.0	-	-	-
Bicouche d'enrobée à base d'émulsion de bitume	-	520.0	Polyéthylène (PE)	0.16	733.3

### II-2-2-2. La méthode de ventilation (ou technique de la lame d'air)

Une ventilation générale, permanente et suffisante permet d'évacuer une grande partie de la vapeur d'eau. Une ventilation ajustée permet de minimiser et de

réguler les concentrations de vapeur d'eau présentes dans le bâtiment, ainsi la quantité de vapeur d'eau qui cherche à transiter par les parois sera moindre. Il est alors recommandé de disposer de matériaux de plus en plus ouverts à la migration de vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur. Prenons exemple précédent mais avec une disposition des couches de l'intérieur vers l'extérieure, la couche d'enduit de chaux, la couche d'isolation et le mur en béton : si la chute de pression n'a pas lieu dans l'isolant, c'est parce qu'elle apparaît essentiellement dans le mur. Supprimons l'influence du mur sur le transfert de vapeur, la chute de pression se produit alors nécessairement dans l'isolant que soit sa perméabilité, on réalisera cela par la présence d'une lame d'air ventilée qui maintient entre l'isolant et le mur, la pression partielle de vapeur de l'air extérieur. Les chutes de pression partielle et de pression saturante se faisant simultanément dans l'isolant, les risques de condensation sont éliminés. Il n'est pas nécessaire que la lame d'air soit très ventilée puisqu'il s'agit simplement 'assurer l'équilibre des pressions de part et d'autre du mur et d'évacuer le flux de vapeur d'eau vers l'extérieur.

### *II-2-2-3. La technique du chauffage*

Chauffer le local pour élever la température de surface intérieure des parois, sous l'effet de la chaleur l'humidité contenue dans l'air du local sera évacuer par ventilation avant une possible apparition de condensation, mais le temps et la température de chauffage peuvent influencer la condensation. C'est pourquoi la meilleure procédure est de chauffer progressivement en commençant par une basse température non par une température élevée pour un chauffage très rapide.

## **III - RÉSULTATS ET DISCUSSION**

Pourquoi faire une étude de migration de la vapeur d'eau ? Parce qu'elle permet de sécuriser la composition d'une paroi vis-à-vis de son comportement lorsque la vapeur d'eau traverse la paroi. La multiplication des parois complexes de nos jours exige une isolation vis-à-vis de l'eau afin de pérenniser le comportement de ces parois dans le temps. L'étude du phénomène de la migration de la vapeur d'eau au travers des parois enveloppes des bâtiments et des condensations superficielle et interne nous a conduit à trouver un résultat pratique qui nous permettra d'analyser les risques de condensation superficielle et interne et trouver les méthodes adéquates de préventions techniques et pratiques. Plusieurs visions s'opposent : (1) ne pas laisser passer la vapeur d'eau pour ne pas risquer d'augmenter le degré hygrométrique dans les parois et ainsi ne pas risquer de condenser, (2) laisser migrer la vapeur d'eau à travers les parois pour lui laisser la capacité de s'assécher en cas de condensation, (3) prendre un matériau plus ouvert à la migration de vapeur d'eau à l'extérieur qu'à l'intérieur et ne pas avoir plus de 20 % d'isolant coté intérieur du pare-vapeur.

### III-1. Analyse des risques de condensation superficielle

Pour éviter que le point de rosée soit atteint, il faut donc que les pressions partielles à l'intérieur (ou à l'extérieur) de la paroi enveloppe n'atteignent jamais la pression de saturation (ou supérieures à la pression de saturation). C'est-à-dire que la température  $\theta_i$  doit être supérieure à la température de rosée, il faudra donc vérifier que la température de surface soit supérieure à la température de rosée pour que la condensation superficielle soit évitée. Les pressions partielles intérieure (ou extérieure) sont calculées en fonction des températures des ambiances intérieure  $t_i$  (ou extérieure  $t_e$ ) et des humidités relatives intérieure  $\varphi_i$  (ou extérieure  $\varphi_e$ ), et des pressions de saturation  $P_{si}$  (ou  $P_{se}$ ),  $P_i = P_{si} * \varphi_i$  (ou  $P_e = P_{se} * \varphi_e$ ). Les pressions de saturation sont de moins en moins élevées au fur et à mesure que les températures diminuent. Il faut donc commencer par déterminer la température de la surface intérieure (ou extérieure) de la paroi enveloppe par la formules suivantes :

$$\theta_i = t_i - \frac{R_i}{R_t} (t_i - t_e) \quad (4)$$

avec  $R_i =$  Résistance thermique superficielle intérieure,  $t_i =$  température intérieure du local,  $t_e =$  température de l'ambiance extérieure,  $R_t = R_i + \Sigma R + R_e =$  Résistance thermique totale de la paroi enveloppe,  $R_e =$  Résistance thermique superficielle extérieure.

Après connaissance de la température de surface, on calcule la température de rosée  $T_r$ . Nous savons qu'à chaque température correspond une pression de saturation  $P_s$ . On calcule d'abord la pression partielle de vapeur d'eau par la formule  $P = P_s * \varphi$  avec  $\varphi$  humidité relative, la définition du point de rosée (température à laquelle apparaît de la condensation), implique que cette pression  $P = P_s$ , on en déduit alors la température de rosée à partir de cette pression trouvée par le calcul, valeur que nous trouvons dans les diagrammes psychrométriques, puis on compare les deux valeurs. Par exemple de l'air ayant une humidité relative de 60 % à la température 20°C atteindra son point de rosée vers 12°C ( $\varphi = 100$  %) et condensera en deçà.

### III-2. Analyse des risques de condensation interne

Il se produira une condensation interne dès que la pression partielle de vapeur d'eau serait égale à la pression de vapeur saturante ( $P = P_s$ ). Cette condensation crée dans la construction des zones mouillées en permanence et donc une perte d'isolation thermique et éventuellement une dégradation des parois. Pour analyser le risque de condensation interne on procédera alors de la manière suivante.

### III-2-1. Détermination des pressions partielles intérieure $P_i$ et extérieure $P_e$ de la paroi enveloppe

A chaque température correspond une pression de saturation, ainsi pour  $t_i$  correspondra une pression de saturation  $P_{si}$  et pour  $t_e$  une pression de saturation  $P_{se}$ , les pressions partielles  $P_i$  et  $P_e$  sont donc données par les **Formules** suivantes :

$$P_i = P_{si} * \varphi_i \text{ et } P_e = P_{se} * \varphi_e$$

### III-2-2. Calcul de la résistance thermique totale ( $R_t$ ) et la résistance thermique totale à la migration de vapeur d'eau ( $H_t$ )

Ces résistances sont données par les **Formules** suivantes :

$$R_t = R_i + \sum R + R_e = R_i + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_e \text{ et}$$

$$H_t = \sum H = H_1 + H_2 + \dots + H_n = \frac{d_1}{\mu_1} + \frac{d_2}{\mu_2} + \dots + \frac{d_n}{\mu_n}$$

avec  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  les coefficients de conductivités thermiques des matériaux constituant la paroi et  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  les coefficients de perméabilité des matériaux.

### III-2-3. Détermination des pressions partielles pour chacune des couches constituante de la paroi

Ce calcul se fera de l'intérieur vers l'extérieur par la formule suivante : pour chaque couche  $m$  on aura  $P_m = P_i - \frac{P_i - P_e}{H_t} (P_i - P_e)$ , exemple pour  $m = 1$  on aura

$$P_1 = P_i \text{ et pour } m = 2, P_2 = P_i - \frac{P_i - P_e}{H_t} * H_1 \text{ et pour } m = 3,$$

$$P_3 = P_i - \frac{P_i - P_e}{H_t} * (H_1 + H_2)$$

### III-2-4. Calcul des températures au travers des couches de matériaux et déduction des pressions de saturation correspondante à chaque température dans le diagramme psychrométrique

On utilise la formule suivante pour déterminer la température d'une couche  $m$  quelconque :  $\theta_m = t_i - \frac{R_i + \sum_{j=1}^{m-1} R_j}{R_t} (t_i - t_e)$  avec  $m = 2, 3, \dots, n$  exemple pour  $m = 1$   $\theta_m = t_i - \frac{R_i}{R_t} (t_i - t_e) = \theta_i$  on en déduira  $P_{si}$ , pour  $m = 2$ ,  $\theta_2 = t_i - \frac{R_i + R_1}{R_t} (t_i - t_e)$ , on en déduira  $P_{s2}$ , pour  $m = 3$ ,  $\theta_3 = t_i - \frac{R_i + R_1 + R_2}{R_t} (t_i - t_e)$ , on en déduira  $P_{s3}$ , c'est ainsi

jusqu'à la dernière couche, et enfin  $\theta_e = t_i - \frac{Rt-Re}{Rt} (t_i - t_e)$  ou  $\theta_e = t_e + \frac{Re}{Rt} (t_i - t_e)$ , on en déduira  $P_{se}$ .

### **III-2-5. Comparaison des résultats des pressions partielles et des pressions de saturations**

- Si  $P = P_s$  il y aura condensation ;
- Si  $P < P_s$  pas de condensation, cela est normale car c'est  $P_s$  qui est plus grande ;
- Si les courbes de  $P$  et de  $P_s$  se coupent il y aura condensation.

### **III-2-6. Détermination de la quantité de vapeur d'eau s'accumulant dans la zone de condensation**

La zone de condensation définie, on peut calculer la quantité de vapeur d'eau qui migre dans la zone par la **Formule** suivante

$$W_c = \frac{P_a - P_{sc}}{H_{oi}} - \frac{P_{sc} - P_b}{H_{oe}} \quad (5)$$

en  $g/m^2.h$  avec  $P_a =$  Pression partielle du côté de la plus grande pression (entrée),  $P_b =$  Pression partielle du côté de la plus faible pression (sortie),  $H_{oi} =$  Résistance à la migration de vapeur d'eau coté entrée de vapeur dans la zone de condensation et  $H_{oe} =$  Résistance à la migration de vapeur coté sortie de vapeur dans la zone de condensation.

### **III-2-7. Calcul de la quantité totale de la vapeur d'eau condensée et le taux d'humidité de la paroi enveloppe dans cette zone**

On utilise les formules suivantes :  $W_{ct} = 24 * Z_h * W_c$  avec  $Z_h =$  durée du chauffage (nombre de jour chauffé) et  $\Delta w = \frac{24 * Z_h * W_c}{10 * d_i * \rho_i} \leq [\Delta w]$  avec  $d_i =$  Epaisseur de la couche  $i$  quelconque d'isolation thermique  $\rho_i =$  masse volumique de la couche d'isolation thermique et  $[\Delta w] =$  Taux d'humidité autorisée par la réglementation thermique.

### **III-2-8. Comparaison des valeurs de $\Delta w$ et de $[\Delta w]$**

Si  $\Delta w$  est supérieur à  $[\Delta w]$  on doit procéder à une amélioration des performances de la paroi soit par une disposition adéquate des couches de matériaux constituant la paroi, soit par l'adoption de la technique du pare-vapeur.

### III-3. Les principes de prévention des condensations

Il ne s'agit pas d'écarter définitivement tout risque de condensation car on n'y parviendra jamais. On se contente, plutôt d'éviter que la condensation ne provoque des dégâts, dans ce cas soit on laisse se faire la condensation, mais on prépare le terrain pour l'évacuer sans dommage, c'est donc la méthode du carrelage de la salle de bains, qui protège le mur et le sol et conduit les eaux jusqu'au siphon de sol ; soit on cherche à éviter, ou au moins à réduire la condensation en réduisant la pression de vapeurs à des valeurs compatibles à celle permise par la température, ce qui a en même temps pour effet de diminuer la quantité de vapeur d'eau susceptible de se condenser. Les méthodes utilisées sont l'aération et la conception adéquate des parois :

#### III-3-1. L'aération des locaux

Son efficacité a été largement démontrée. Une bonne aération doit intéresser l'ensemble des locaux. Faire entrer l'air par les pièces principales, moins humides et le faire sortir par les pièces humides.

#### III-3-2. La conception des parois

Les parois doivent être conçues en fonction des risques dus aux condensations :

- Les condensations superficielles (aération des locaux) ;
- Les condensations dans la masse (pare-vapeur, lame d'air ventilée).

### III-4. Analyse de cas

Comment maîtriser le risque de condensation lors de la conception de l'enveloppe ?

- Soit un mur de béton de 18 cm d'épaisseur séparant l'intérieur (20°C et 60 % d'humidité relative) de l'extérieur (-10°C et 80 % d'humidité relative) où est la zone de condensation si elle existe ? Que faire pour la supprimer ? Le calcul des températures superficielles donne  $\theta_i = 5.85^\circ\text{C}$  et  $\theta_e = -5.45$ , le point de rosée pour 20°C et 60 % d'humidité relative est 12°C, cette température est nettement supérieure à la température de la surface intérieure du béton (moins de 6°C). Il y a condensation superficielle. Pour l'empêcher il faut assécher la salle, soit isoler le mur de préférence de l'extérieur avec une résistance thermique suffisante ;
- Une dalle-toiture de 20 cm d'épaisseur de béton est isolée à l'extérieur avec 5 cm de laine de verre dense, recouverte d'une étanchéité de 8 mm. Que se passe-t-il dans cette toiture ? Et que faire pour l'améliorer ? Climat intérieur :  $t_i = 20^\circ\text{C}$  et  $\varphi_i = 60\%$  et climat extérieur :  $t_e = -10^\circ\text{C}$  et  $\varphi_e = 80\%$ . Le calcul selon la méthode énoncée pour la condensation

interne montre qu'il y a condensation derrière la laine de verre. Cette isolation n'est d'ailleurs pas posée selon les règles de l'art. Il faut poser une barrière de vapeur sous la laine de verre, d'une résistance supérieure à celle de la couche d'étanchéité ou s'il s'agit de réparer après coup, on peut poser une isolation supplémentaire au-dessus de l'étanchéité de plus de  $2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  de résistance thermique.

#### IV - CONCLUSION

Pour construire durable et confortable, il est nécessaire de savoir le problème d'humidité au sein des parois des bâtiments. L'accumulation d'eau dans les matériaux poreux de construction diminue leur résistance thermique car l'eau a une conductivité thermique de  $0.6 \text{ w/ m.K}$  (à  $20^\circ\text{c}$ ) soit 23 fois plus que l'air d'où la modification du coefficient de conductivité des matériaux de construction en fonction de l'humidité. L'eau présente doit donc migrer convenablement et que les condensations se fassent sans faire de dommages. Cette étude a permis de savoir comment la vapeur d'eau se transfère à travers les parois, d'analyser les risques de condensations superficielle et interne et d'en dégager les principes de prévention de ces phénomènes physiques dans les parois des bâtiments. Cette étude doit être menée dans une perspective globale des premières esquisses et aussi tout au long de la conception et de la réalisation des parois.

#### RÉFÉRENCES

- [1] - Ouvrage, « L'isolation thermique écologique » Jean-Pierre Oliva, Samuel Courgey, (Mars 2010)
- [2] - Dossier CSTB, « Isolation par l'intérieur des murs, Expérience française dans le domaine de l'isolation par l'intérieur en construction neuve ou en rénovation », (Septembre 2010)
- [3] - ENERTECH, « transferts d'humidité dans les bâtiments », (Avril 2011)
- [4] - Informations techniques, Mutuelle des Architectes français, assurances : « L'humidité dans les bâtiments », (Avril 2011)
- [5] - « Détermination des caractéristiques thermiques et hydriques du pisé, simulation numérique et expérimentale de son comportement face à la migration d'humidité » Nadège FREY, Projet de fin d'Etudes à l'INSA de Strasbourg, (Juin 2011)
- [6] - J. DREYFUS, le confort dans l'habitat en pays tropical : la protection des constructions contre la chaleur, problème de ventilation. *Editions Eyrolles*, Paris, (1960) 363 p.
- [7] - M. N'GUESSAN, Analyse des performances thermiques des constructions en climat tropical. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Paris, (1990) 382 p.



- [8] - ADEL MOURTADA, ENSTP, Laboratoire de Physique du Bâtiment, BP. 1083, Yamoussoukro, COTE D'IVOIRE « Conception bioclimatique de l'habitat en climat tropical », AUPELF/ UREF, ENI, Bamako, Mali, (Février 1993)
- [9] - M. CROISSET, L'hygrothermique dans le bâtiment – Confort thermique d'hiver et d'été – Condensation. Editions Eyrolles, (1968).
- [10] - HARTWIG M. KUNZEL, Pare-vapeur pour la protection de l'enveloppe des bâtiments contre un excès d'humidité. Fraunhofer-Institut Bauphysik, Holzkirchen RFA, (2003)
- [11] - NF EN ISO 13788 : Performance hygrothermique des composants et des parois de bâtiments. Température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse, (Décembre 2001)
- [12] - NF EN ISO 15148 : Performance hygrothermique des matériaux et des produits pour le bâtiment. Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle, (Octobre 2003)
- [13] - EN 15026 : Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments-évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique, (février 2007)