



TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS  
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



# CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS ÉCOULEMENT DU FLUX DE LA VAPEUR D'EAU - THÉORIE ET RÉGLEMENTATION

---

Avril / 2022



**TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **C3608 V1**

# Écoulement du flux de la vapeur d'eau - Théorie et réglementation

Date de publication :  
**10 février 2011**

Cet article est issu de : **Construction et travaux publics | Le second oeuvre et  
l'équipement du bâtiment**

par **Paul DAHAN**

**Pour toute question :**  
Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**  
infos.clients@teching.com  
**Par téléphone :**  
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **11/04/2022**

Pour le compte : **7200106152 - éditions ti // céline BLONBOU // 92.170.243.158**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

# Écoulement du flux de la vapeur d'eau

## Théorie et réglementation

par **Paul DAHAN**

Ingénieur ETP, European engineer, ex-professeur à l'ESTP

<b>1. Diagramme de Mollier</b> .....	C 3 608 – 2
<b>2. Humidité relative. Condensation. Point de rosée</b> .....	– 3
2.1 Hygromètre à cheveu .....	– 3
2.2 Humidité relative .....	– 3
2.3 Condensation. Point de rosée.....	– 3
<b>3. Humidité de l'air</b> .....	– 4
3.1 En hiver .....	– 4
3.2 Autres conséquences .....	– 4
3.3 Commentaires .....	– 5
<b>4. Indice de transfert de la vapeur d'eau (<math>I_{TV}</math>)</b> .....	– 6
4.1 Loi de Fick.....	– 6
4.2 Perméance .....	– 6
4.3 Résistance à la diffusion .....	– 6
4.4 Indice de transfert de la vapeur d'eau ( $I_{TV}$ ) .....	– 6
4.5 Perméabilité intrinsèque du système ( $\pi_s$ ) .....	– 7
<b>5. Résumé à savoir</b> .....	– 8
5.1 Flux de vapeur .....	– 8
5.2 Microporosité .....	– 8
5.3 Procès Verbal (PV) d'essais .....	– 8
<b>6. Procès Verbal d'essais</b> .....	– 8
6.1 PV réduit .....	– 9
6.2 PV <i>in extenso</i> .....	– 9
<b>7. Commentaires et analyses</b> .....	– 11
7.1 Commentaires .....	– 11
7.2 Analyse .....	– 11
<b>8. Caractéristiques de l'air – Notions fondamentales</b> .....	– 18
8.1 Air sec.....	– 18
8.2 Air humide.....	– 19
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. C 3 608

**L'**air est un mélange gazeux qui contient en proportions différentes :

- oxygène ;
- hydrogène ;
- azote ;
- gaz carbonique ;
- gaz rares ;
- vapeur d'eau.

Une question fondamentale à poser est la suivante : est-ce que dans l'air, il peut y avoir n'importe quelle quantité de vapeur d'eau ?

# 1. Diagramme de Mollier

## ■ Première expérience

Dans une enceinte *isotherme*, dont la température  $t_1 = 20\text{ °C}$ , on introduit un cube en verre à vitre de 1 m de côté (volume =  $1\text{ m}^3$ ) (figure 1).

Suivent les 4 étapes ci-après :

- injection de la vapeur d'eau dans ce cube ;
- arrêt de l'injection dès l'apparition d'une goutte d'eau sur la paroi intérieure de la vitre du cube ;
- mesure de la quantité de vapeur d'eau injectée dans ce mètre cube ;
- report, sur un graphique cartésien orthogonal, des coordonnées suivantes (figure 2) :

- en abscisse, sur l'axe des températures :  $t_1 = 20\text{ °C}$ ,
- en ordonnée, sur l'axe des quantités de vapeur d'eau en  $\text{g}/\text{m}^3$  :  $W_1 = 16\text{ g}$ .

## ■ Seconde expérience

Dans la même enceinte isotherme, dont la température est maintenue à  $t_2 = 0\text{ °C}$ , on injecte de nouveau de la vapeur d'eau dans le cube en verre à vitre (figure 3).

On enchaîne alors les 5 étapes suivantes :

- arrêt de l'injection de la vapeur d'eau, dès l'apparition de la première goutte d'eau sur l'intérieur de la paroi vitrée ;
- mesure de la quantité  $W_2$  injectée ;
- report sur le graphique précédent, des coordonnées suivantes (figure 4) :

- en abscisse :  $t_2 = 0\text{ °C}$ ,
- en ordonnée :  $W_2 = 3,9\text{ g}$  ;

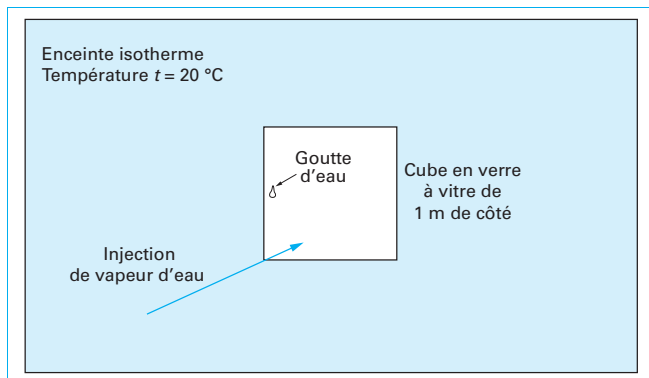


Figure 1 – Enceinte isotherme à 20 °C

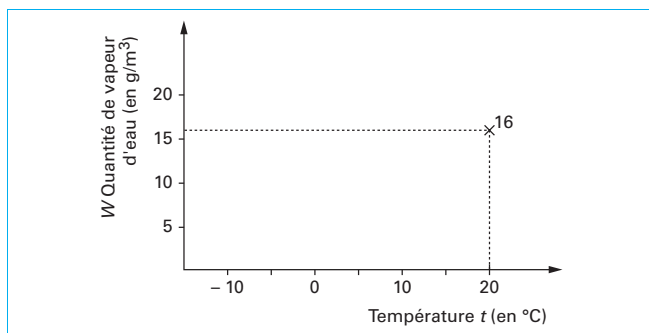


Figure 2 – Graphique cartésien orthogonal

- recommencement de l'expérience pour différentes températures de l'enceinte isotherme, avec note, pour chaque température, de la quantité de vapeur d'eau injectée à l'apparition de la 1<sup>re</sup> condensation sur la paroi vitrée ;
- aboutissement au Diagramme de Mollier, qui donne la quantité maximum de vapeur d'eau contenu dans  $1\text{ m}^3$  d'air en fonction de sa température. Autrement dit, on trace la **courbe de saturation de l'air en vapeur d'eau** (figure 5).

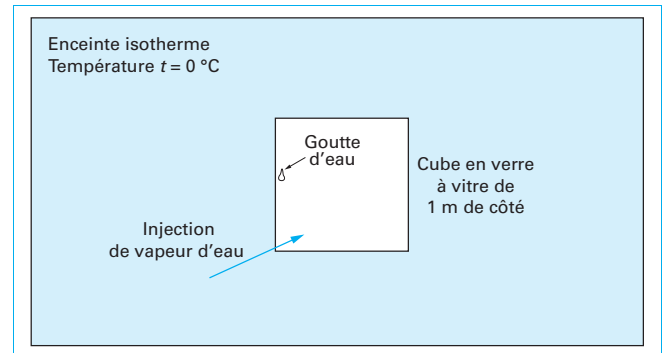


Figure 3 – Enceinte isotherme à 0 °C

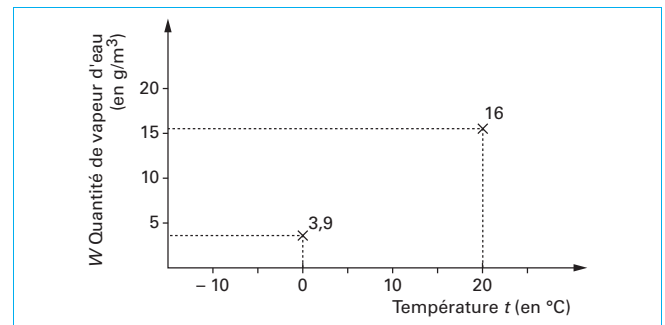


Figure 4 – Graphique cartésien orthogonal

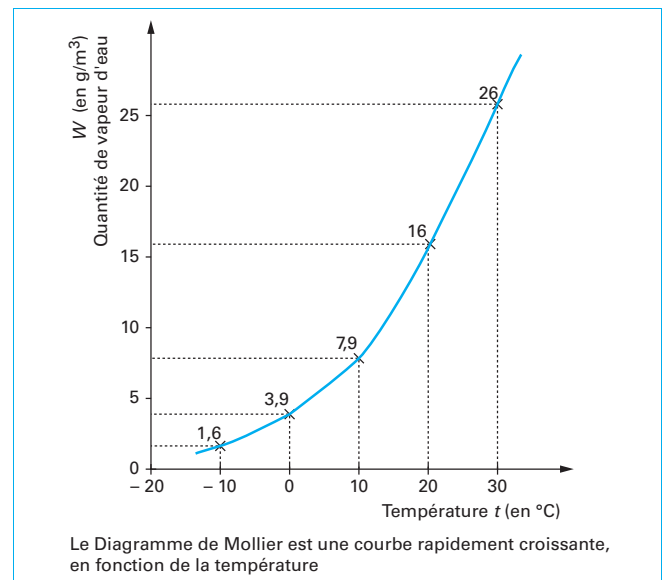


Figure 5 – Diagramme de Mollier – Graphique de la courbe de saturation de la vapeur d'eau

**Remarque**

Les expériences décrites ci-avant sont un moyen pédagogique pour appréhender le Diagramme de Mollier.

## 2. Humidité relative. Condensation. Point de rosée

Nous ne vivons pas dans un air saturé en vapeur d'eau. Pour mesurer l'humidité de l'air on a recouru à un **hygromètre (à cheveu)** (figure 6 et 7).



Figure 6 – Hygromètre à cheveu – L'appareil est muni de 2 aiguilles

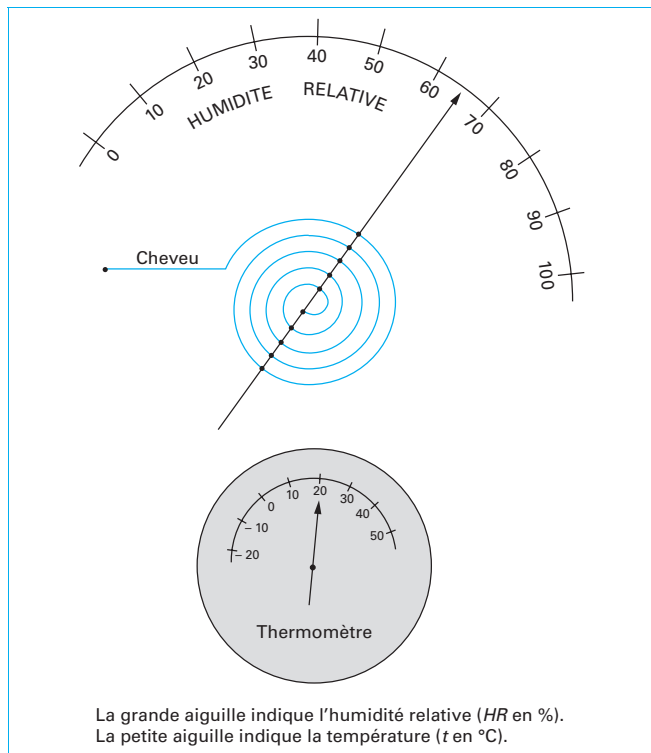


Figure 7 – Schéma de principe d'un hygromètre à cheveu

### 2.1 Hygromètre à cheveu

L'hygromètre utilise la propriété physique de la sensibilité des cheveux à l'humidité. En particulier, les cheveux blonds.

Dans l'hygromètre, on utilise un crin de cheval. Une extrémité du crin est liée à un point fixe, l'autre est fixée à un ressort qui maintient le crin en tension. La seconde extrémité du ressort est solidaire d'un axe.

La grande aiguille est fixée sur cet axe.

Quand l'air s'humidifie, le cheveu s'allonge et le ressort entraîne l'axe. En pivotant, l'axe entraîne l'aiguille dans un sens. Quand l'air s'assèche, le cheveu se raccourcit, le ressort entraîne l'axe et l'aiguille dans l'autre sens. Il reste à graduer le cadran de 0 à 100.

**Exemple**

Notons que, le papier (*à dessin*) est également sensible à l'humidité de l'air. On utilise cette propriété pour « tendre » une feuille de papier Canson sur une planche à dessin.

Le dessinateur l'humidifie légèrement la veille avant de la punaiser sur sa planche à dessin. En séchant, le lendemain matin, la feuille de papier est parfaitement tendue.

### 2.2 Humidité relative

D'après le Diagramme de Mollier, un air dont la température est égale à  $t = 20\text{ °C}$ , peut contenir, au maximum, une quantité de vapeur d'eau (à l'état vapeur) de :  $W_s \approx 16\text{ g par m}^3$  d'air sec (figure 8).

Supposons, maintenant, que la grande aiguille soit sur la graduation : 65. Cela veut dire que l'humidité dans l'air *relative à la saturation* est de 65 %. Autrement dit :

$$W = W_s \cdot (65/100)$$

La quantité absolue  $W$  de vapeur d'eau dans cet air, à  $20\text{ °C}$ , est égale à :

$$W = 16 \times \frac{65}{100} = 10,4\text{ g par m}^3\text{ d'air.}$$

### 2.3 Condensation. Point de rosée

Supposons que, dans le local qui contient cet air, la température baisse.

■ Pour une température déterminée «  $t_d$  » la quantité absolue  $W = 10,4\text{ g}$  correspondra à la quantité de saturation  $W_s$  de la vapeur d'eau. On aura l'égalité suivante :

$$W = W_s \approx 10,4\text{ g.}$$

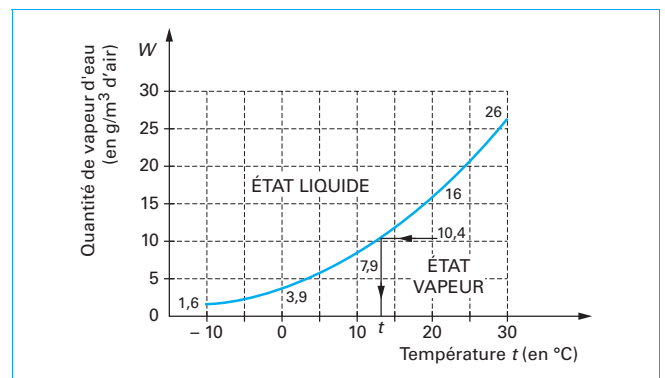


Figure 8 – Diagramme de Mollier

D'où l'humidité relative  $HR$  est égale à :

$$HR = \frac{W}{W_s} \times 100 = \frac{10,4}{10,4} \times 100 = 100 \%$$

Sur le diagramme de Mollier, cette quantité de  $10,4 \text{ g/m}^3$  correspond à une température  $t_d$  égale à (cf. figure 8) :

$$t_d = 13,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

■ Si dans le local, la température diminue encore, ( $t < t_d = 13,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), une partie (des  $10,4 \text{ g}$ ) de la vapeur d'eau va se transformer en eau liquide : il y a condensation.

Cette température «  $t_d$  » qui détermine le changement d'état de la vapeur d'eau, se nomme :

$t_d =$  température du point de rosée

Une partie de la vapeur d'eau, à cette température déterminée, se transforme en eau liquide.

### 3. Humidité de l'air

Sur l'ensemble du territoire, l'humidité absolue de l'air «  $W$  » (figure 9) varie relativement peu au cours d'une même saison. Ainsi, en moyenne :

- en été :  $W_{\text{été}} \approx 12 \text{ g/m}^3$  d'air ;
- en hiver :  $W_{\text{hiver}} \approx 6 \text{ g/m}^3$  d'air.

Quelles sont les conséquences inhérentes à ces deux valeurs ? (cf. figure 8).

#### ■ En été

Sur le diagramme de Mollier,  $W = 12 \text{ g/m}^3$  correspond à une température du point de rosée :  $t_d = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  (cf. figure 9).

Lorsque la nuit, la température du sol se refroidit (à une température inférieure à  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ), on constate alors que le sol se couvre de rosée.

Si la température du sol reste supérieure à  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , il n'y aura pas de rosée.

#### ■ En hiver

La quantité de vapeur d'eau,  $W = 6 \text{ g/m}^3$  dans l'air correspond à une température du point de rosée :  $t_d = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . (cf. figure 9).

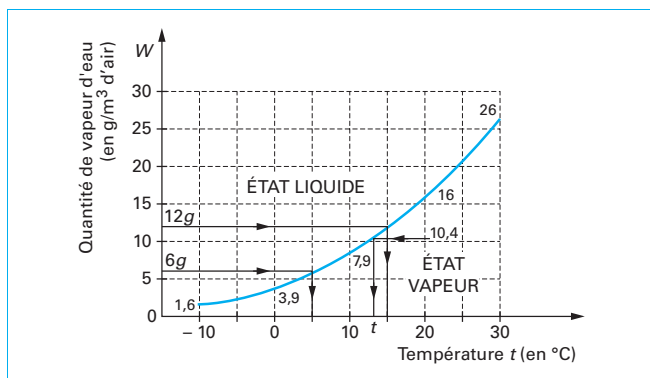


Figure 9 – Diagramme de Mollier. Humidité absolue «  $W$  » en été et en hiver

### 3.1 En hiver

■ Dans un enduit (ou un béton) à base de liant hydraulique, l'eau de gâchage (normalement en excès) s'évaporera très difficilement, puisque l'air, déjà saturé en vapeur d'eau ( $t \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), aura plutôt tendance à déposer de l'eau liquide sur l'enduit (phénomène de rosée).

Par ailleurs, comme toutes les réactions chimiques, la prise du ciment est ralentie aux basses températures (*diminution du mouvement Brownien des atomes*). Des désordres peuvent alors prendre naissance :

- **Efflorescences blanchâtres** (dues à la migration, en surface de l'enduit, d'une solution aqueuse d'hydroxyde de calcium. L'hydroxyde de calcium est une molécule « libre » issue normalement de la réaction d'hydratation du ciment.

À la longue, l'eau s'évapore. Le gaz carbonique, dissous dans l'eau (de pluie), réagit lentement avec l'hydroxyde de calcium, en donnant « la fleur de chaux », qui est du carbonate de calcium.

Ces tâches blanchâtres aléatoires sont inesthétiques sur un enduit pigmenté),

- **Gel** (de l'eau de gâchage) en cas de températures négatives ( $t < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

■ Avec une peinture en phase aqueuse, le solvant (l'eau) restera dans le feuil, et le liant (*polymères ou copolymères de résines acryliques, par exemple*) ne pourra pas amorcer la phase de coalescence, c'est-à-dire, la réaction de polymérisation de la résine.

Les désordres potentiels sont les *couleurs* de peinture sur le sujettile. Conséquence : la mise en peinture est à refaire.

■ Dans les documents techniques des fabricants, (aussi bien d'enduits hydrauliques que de peintures en phases aqueuses), il est stipulé que la mise en œuvre des produits doit respecter les conditions climatiques suivantes :

#### • En hiver

La température de l'air extérieur doit être telle que :

$$t_{\text{air}} \geq +5 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad HR \leq 80 \%$$

De façon à ce que l'eau (de gâchage de l'enduit hydraulique, ou le solvant de la phase aqueuse de la peinture), puisse s'évaporer.

#### • En été

La température de l'air ou du sujettile doit être telle que :

$$t_{\text{air ou sujettile}} < 30 \text{ à } 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

De façon à éviter qu'une partie de l'eau nécessaire à la réaction chimique d'hydratation (prise) du ciment de l'enduit ne s'évapore (trop rapidement), ou soit absorbée par le sujettile, et entraîne un grillage de l'enduit à l'interface sujettile/enduit.

Les conséquences du défaut d'hydratation du ciment sont :

- en surface : l'enduit poudre ;
- dans le plan d'adhérence, (à l'interface sujettile/enduit) : il y a risque de décohésion ; l'enduit sonne alors « creux ».

### 3.2 Autres conséquences

#### 3.2.1 Gelées blanches

Toujours en hiver, si la température du sol devient nulle ou négative ( $\theta_{\text{sol}} \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), la quantité de saturation ( $W_{s_{\theta_{\text{sol}}}}$ ) est inférieure à la quantité de la vapeur contenue dans l'air en hiver ( $W_{\text{hiver}}$ ).

La quantité potentielle, en  $\text{g/m}^3$ , de vapeur d'eau qui se transforme en cristaux de glace est égale à la différence :

$$W_{\text{hiver}} - W_{s_{\theta_{\text{sol}}}}$$

**Exemple**

• Pour  $\theta_{\text{sol}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , nous trouvons sur le Diagramme de Mollier :

$$W_{s(\theta_{\text{sol}}=0 \text{ }^\circ\text{C})} = 3,9 \text{ g/m}^3$$

Quantité potentielle de vapeur d'eau donnant naissance à des gelées blanches :

$$6 - 3,9 = 2,1 \text{ g/m}^3$$

• Pour  $\theta_{\text{sol}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ , nous trouvons,  $W_{s(\theta_{\text{sol}} = -10 \text{ }^\circ\text{C})} = 1,6 \text{ g/m}^3$ .

Quantité potentielle de vapeur d'eau donnant naissance à des gelées blanches :

$$6 - 1,6 = 4,4 \text{ g/m}^3$$

**3.2.2 Brouillard en automne**

De l'été à l'hiver, les températures nocturnes de l'air diminuent progressivement en devenant inférieure à  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , pour tendre vers des températures basses, de l'ordre de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Autrement dit, une partie des  $12 \text{ g}$  de vapeur d'eau par  $\text{m}^3$  d'air se mue en fines gouttelettes d'eau qui, restant en suspension dans l'air, forment des nuages de basses altitudes.

Ces nuages (brouillard) disparaissent quand le soleil réchauffe suffisamment l'air entre les gouttelettes du brouillard.

**3.2.3 Buée et parois « froides »**

Plusieurs exemples illustrent ce phénomène :

- le miroir (dans la salle de bain) qui se couvre de buée au moment de la douche ;
- la face intérieure du pare-brise de la voiture, par des matins froids, en présence des passagers (qui respirent et rejettent de la vapeur d'eau).

Dans les deux cas, il y a une forte production de vapeur d'eau, provenant de l'eau chaude de la douche, et de l'air expiré, à  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ , par les passagers, dans la voiture.

■ La **température de surface** «  $\theta_{\text{surface}}$  », des éléments (*miroir et pare-brise*), reste pratiquement inchangée. À cette température correspond une quantité de saturation de la vapeur d'eau :  $W_{s_{\theta_{\text{surface}}}}$ .

À un moment donné, la quantité de vapeur d'eau produite  $W_p$  sera supérieure à la quantité de saturation  $W_{s_{\theta_{\text{surface}}}}$  de la vapeur d'eau de l'air en contact avec le pare-brise, dont la température de surface est, pratiquement inchangée : ( $\theta_{\text{surface}}$ ).

Par conséquent, la différence  $W_p - W_{s_{\theta_{\text{surface}}}}$  passera de l'état vapeur à l'état liquide (buée).

■ Pour **supprimer ces condensations** (buées) :

- sur le miroir, on chauffe localement (*par exemple, avec un sèche-cheveux*) une petite surface du miroir ;
- sur le pare-brise, on met en route le ventilateur qui pulse de l'air chaud sur la face intérieure (du pare-brise) couverte de buée.

Dans les deux cas, pour éliminer *localement* l'effet « paroi froide », on élève, sur une petite zone, la température de surface «  $t_{\text{surface localement}}$  » (du miroir et du pare-brise), de telle sorte que :

$$t_{\text{surface localement}} > \theta_{\text{surface initial}}$$

**Exemple**

Classique et, bien connu, pour illustrer le *phénomène de « paroi froide »* le cas de la bouteille en plastique, pleine d'eau gelée, est un exemple très visuel.

Elle se couvre instantanément de buée, dès qu'elle est sortie du congélateur.

D'une façon générale, lorsque la température «  $\theta$  surface » de ces éléments (miroir, pare brise, plastique de la bouteille pleine d'eau congelée) est inférieure à la température du point de rosée «  $t_d$  » de l'air ambiant, l'élément est qualifié de « *paroi froide* ». Quand :

$$\theta_{\text{surface de l'élément}} < t_d \text{ de l'air ambiant}$$

Cet élément sera le siège d'une *condensation superficielle* potentielle.

**3.3 Commentaires**

Le diagramme de Mollier nous a permis d'expliquer ces phénomènes climatiques naturels et de comprendre la formation de la rosée, des gelées blanches, du brouillard, etc. En fait, le diagramme de Mollier, c'est-à-dire cette courbe rapidement croissante avec la température qui représente la saturation de la vapeur d'eau dans l'air, délimite deux espaces, en dessous et au-dessus de la courbe, figure 10.

■ Lorsque l'hygromètre indique  $\text{HR} = 65 \%$  et  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , nous avons calculé que la **quantité de vapeur d'eau, à l'état vapeur**, par  $\text{m}^3$  d'air était égal à :  $W = 10,4 \text{ g}$ .

La représentation graphique de cet état est un point « A » situé dans l'espace en dessous de la courbe, (coordonnées : abscisse  $t_A = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  et ordonnée,  $W_A = 10,4 \text{ g}$ ).

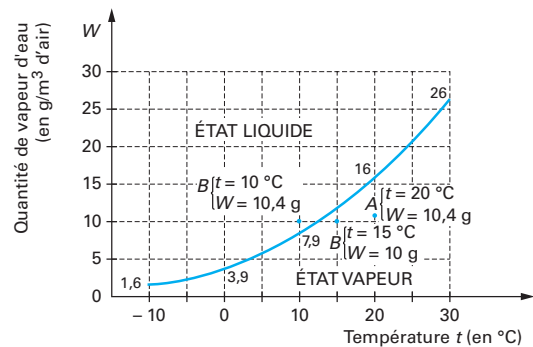
Tous les points dont les coordonnées se situent dans l'espace en dessous de la courbe représentent un état hygrométrique de la vapeur d'eau à l'état vapeur.

■ Le point « B » (coordonnée, abscisse,  $t_B = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  et ordonnée,  $W_B = 10,0 \text{ g}$ ), situé dans l'espace au dessus de la courbe, pourrait configurer l'**état de l'air atmosphérique** une nuit au début de l'automne (formation de brouillard au petit matin).

Pour cet état (*point B*), la quantité de vapeur d'eau à l'origine du brouillard est égale à  $10 - 7,9 = 2,1 \text{ g}$  par  $\text{m}^3$  d'air.

Tous les points dont les coordonnées se situent dans l'espace au dessus de la courbe représentent l'état hygrométrique potentiel de la vapeur d'eau à l'état liquide.

**Pour que le brouillard disparaisse il faut que le soleil réchauffe l'air atmosphérique à une température supérieure à  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ .**



Tous les points dont les coordonnées se situent dans l'espace au dessus de la courbe représentent l'état hygrométrique potentiel de la vapeur d'eau à l'état liquide

**Figure 10 – Courbe de saturation de la vapeur d'eau délimitant deux zones**

Si l'on veut suivre sur le diagramme de Mollier (cf. figure 10), l'évolution de ce changement, il faut déplacer le point B sur une horizontale parallèle à l'axe des températures, jusqu'au point B', par exemple, (coordonnées,  $t_{B'} = 15\text{ °C}$  et  $W_{B'} = 10\text{ g}$ ), situé dans l'espace au-dessous de la courbe, c'est-à-dire, dans l'espace où la vapeur d'eau est à l'état vapeur.

■ En définitive, nous constatons que : « le gaz, vapeur d'eau » suit la loi des gaz parfaits (loi de Mariotte),

$$PV = nRT$$

Dans laquelle, la pression atmosphérique normale, reste constante ( $P = 1,013\text{ bar}$  ou,  $760\text{ mmHg}$  : pression au niveau de la mer).

## 4. Indice de transfert de la vapeur d'eau ( $I_{TV}$ )

Nous venons de caractériser les grandeurs physiques qui définissent l'état hygrothermique de l'air humide dans le temps (à un instant donné) et dans l'espace.

En d'autre terme, cela correspond à un *état statique de l'air humide dans une ambiance déterminée*.

Que se passe-t-il quand un élément de construction sépare deux ambiances hygrothermiques différentes ?

### 4.1 Loi de Fick

Soit une paroi homogène séparant deux ambiances dans lesquelles les températures  $T_1$  et  $T_2$  sont égales :  $T_1 = T_2$ , mais où  $HR_1$  et  $HR_2$  sont différentes,  $HR_1 > HR_2$  (figure 11).

À chaque humidité relative de l'air,  $HR_1$  et  $HR_2$ , correspond une *pression partielle*  $P_{p1}$  et  $P_{p2}$  de la vapeur d'eau avec, bien sur :

$$P_{p1} > P_{p2}$$

Il s'établit alors, au travers de la paroi, *un courant de diffusion de la vapeur d'eau* selon la Loi de Fick.

$$g = \frac{P_{p1} - P_{p2}}{e} \pi$$

avec	$g$	(s'exprime en $\text{g}/\text{m}^2.\text{h}$ ) quantité de vapeur d'eau (en g) traversant la paroi par unité de temps (en h) et par unité de surface (en $\text{m}^2$ ),
	$e$	épaisseur de la paroi (en m),
	$\pi$	perméabilité du matériau à la vapeur d'eau (en $\text{g}/\text{m}.\text{h}.\text{mmHg}$ ).

La loi de Fick est analogue à celle qui régit la transmission de la chaleur à travers une paroi. Ainsi, il existe pour les problèmes de diffusion de la vapeur des *coefficients de transfert de surface* qui sont analogues aux coefficients thermiques d'échange superficiels ( $h_i$  et  $h_e$ ).

Mais ces coefficients de transfert de surface restent négligeables devant la diffusion à travers la paroi.

#### Remarque

On peut donc admettre, avec une bonne approximation, que « La pression qui règne sur les faces de la paroi est celle qui règne dans l'ambiance en contact ».

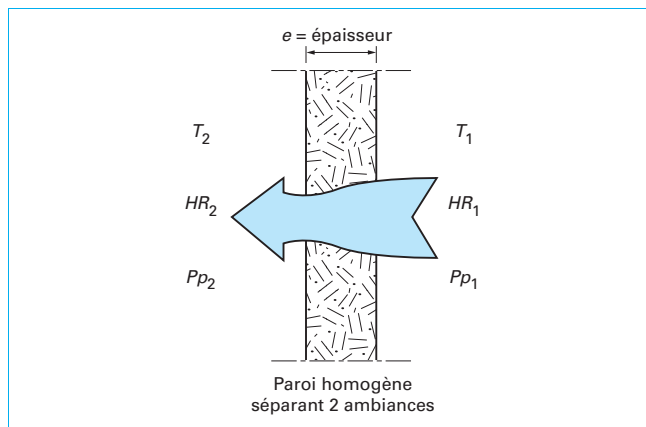


Figure 11 - Paroi homogène et conditions hygrothermiques

### 4.2 Perméance

La perméance est le rapport de la perméabilité ( $\pi$ ) à la vapeur d'eau d'un matériau à l'épaisseur ( $e$ ) de celui-ci.

$$\text{Perméance} = \frac{\pi}{e} \rightarrow \begin{array}{l} \text{en } \text{g}/\text{m}.\text{h}.\text{mmHg} \\ \text{en m} \end{array}$$

La perméance s'exprime en «  $\text{g}/\text{m}^2.\text{h}.\text{mmHg}$  ».

### 4.3 Résistance à la diffusion

On définit la résistance «  $R_d$  » à la diffusion comme l'inverse de la perméance :

$$R_d = \frac{1}{\pi/e} = \frac{e}{\pi} \rightarrow \begin{array}{l} \text{en m} \\ \text{en } \text{g}/\text{m}.\text{h}.\text{mmHg} \end{array}$$

La résistance  $R_d$  s'exprime en «  $\text{m}^2.\text{h}.\text{mmHg}/\text{g}$  ».

#### Remarque

La résistance à la diffusion «  $R_d$  » d'une paroi est donnée par la formule :

$$R_d = \frac{e}{\pi} = \sum_1^n \frac{e_n}{\pi_n}$$

On note que ce sont les *résistances élémentaires* ( $e_n/\pi_n$ ) qui s'ajoutent (ou se retranchent) et non pas les perméances.

### 4.4 Indice de transfert de la vapeur d'eau ( $I_{TV}$ )

La mesure de l'indice de transfert de la vapeur d'eau, repose sur la Loi de Fick (différence de pression de part et d'autre de la paroi).

Les essais à la coupelle humide, selon la norme NF P 84 402 de juin 1989, mesurent la perméance de l'éprouvette revêtue :

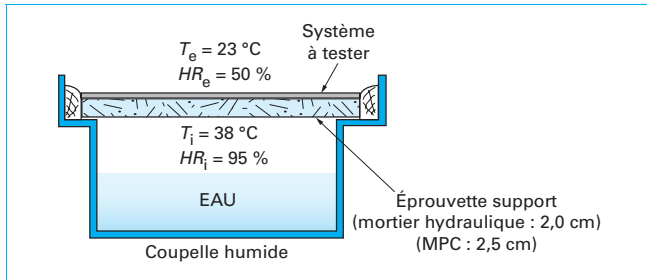
$$\left(\frac{\pi}{e}\right)r$$

La norme NF EN ISO 7783-2 de juillet 1999, conduit à la perméance du revêtement seul.

#### ■ Mesure de $I_{TV}$ (selon NF P 84 402)

Dans une enceinte thermostatée ( $T_e = 23\text{ °C}$  et  $HR_e = 50\%$ ), on place une coupelle en aluminium, contenant de l'eau portée à une





**Figure 12 – Coupelle humide obturée par l'éprouvette revêtue du système à tester**

température de  $T_i = 38\text{ °C}$ . Le couvercle de la coupelle est constitué par l'éprouvette normalisée, (support en mortier de ciment, ou en mortier de plâtre et chaux) revêtue du système à tester.

L'humidité relative  $HR_i$  dans la coupelle est sensiblement égale à :  $HR_i \approx 95\%$  (figure 12).

Il s'établit un courant de diffusion de vapeur d'eau à travers l'éprouvette.

Lorsque la perte de poids, par 24 h, est stabilisée, autrement dit quand le flux de vapeur traversant l'éprouvette revêtue est constant, on obtient l'indice de transfert de la vapeur d'eau  $I_{TV}$ .

■ Conventionnellement, l'éprouvette revêtue doit avoir un **indice de transfert plancher**, à savoir :

$$I_{TV} \geq 40 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$$

Cela, bien sûr, sous l'effet du gradient de pression partielle normalisée :

$$\Delta P_p = P_{p1} - P_{p2}$$

■ Selon la norme NF P 84 402, et avec l'aide des tables de Regnault, nous pouvons **calculer**  $\Delta P_p$  normalisée :

$$\Delta P_p \text{ normalisée} = 49,69 \times (95/100) - 21,07 \times (50 \times 100)$$

$$\Delta P_p \text{ normalisée} = 36,6705 \text{ mmHg}$$

#### 4.5 Perméabilité intrinsèque du système ( $\pi_s$ )

Les essais à la coupelle humide permettent de connaître la perméance de l'éprouvette revêtue, dans des conditions expérimentales normalisées. Les conditions hygrothermiques, dans la vie courante, sont différentes de celles retenues lors des essais normalisés. Il en est de même pour la nature des matériaux sur lesquels seront appliqués les systèmes (ou les produits).

Lors des *essais normalisés* (NF P 84 402) à la coupelle humide, l'éprouvette est soumise au gradient de pression partielle égal à (§ 4.4) :

$$\Delta P_p \text{ normalisée} = P_{p1} - P_{p2} = 36,6705 \text{ mmHg}$$

■ **En bâtiment**, en hiver, les conditions hygrothermiques rencontrées sont variables et peuvent être comprises dans les limites moyennes (intérieure et extérieure) suivantes.

$$T_i = 18 \text{ à } 23\text{ °C}, \text{ avec } HR_i = 50 \text{ à } 65\%$$

$$T_e = -10 \text{ à } 10\text{ °C}, \text{ avec } HR_e \approx 95\%$$

■ **Dans les tables de Regnault** (voir [Doc. C 3 608]) on trouve la valeur de la pression saturante de la vapeur d'eau en mmHg en fonction de la température.

Le tableau 1 regroupe l'ensemble de ces valeurs.

**Tableau 1 – Conditions hygrothermiques potentielles hivernales en bâtiment**

Ambiance	Température $T$ (en °C)	Pression saturante $P_s$ (en mmHg)	Humidité relative $HR$ (en %)	Pression partielle $P_p$ (en mmHg)
Intérieure	18	15,48	50 à 65	7,7400 à 10,0620
	23	21,07	50 à 65	10,5350 à 13,6955
Extérieure	-10	1,95	95	1,8525
	-5	3,01		2,8595
	0	4,58		4,3510
	5	6,54	6,2130	
	10	9,21	85	7,8285

■ En fonction des variations climatiques et de la destination des locaux, on note que les **murs périmétriques**, en contact avec l'ambiance extérieure, seront soumis au gradient de pression partielle égal à :

$$\Delta P_{p \text{ murs}} = P_{pi} - P_{pe}$$

pourra varier entre les valeurs suivantes :

$$-0,0885 \leq \Delta P_{p \text{ murs}} \leq 11,8430 \text{ mmHg}$$

Nous constatons que, (en hiver, en bâtiment), le gradient de pression ( $\Delta P_{p \text{ murs}}$ ), auquel sont soumis les murs périmétriques, est différent du gradient de pression normalisé :

$$\Delta P_p \text{ normalisé} = 36,6705 \text{ mmHg}$$

#### Signes conventionnels

En hiver, le gradient de pression partiel positif signifie que le flux de vapeur va de l'intérieur vers l'extérieur, et en sens inverse quand il est négatif.

#### Remarque importante

Malgré le soin apporté dans la confection normalisée des éprouvettes (en mortier de ciment, ou, en mortier de plâtre et chaux, support expérimental du futur revêtement) la valeur de leur perméance est variable, d'une éprouvette « nue » à l'autre. (De 90 à 150 g/m<sup>2</sup>. 24 h pour celles en mortier de ciment et 250 à 300 g/m<sup>2</sup>. 24 h pour celles en mortier de plâtre et chaux).

Ces écarts peuvent fausser la comparaison des valeurs de la perméance à la vapeur d'eau de revêtements de la même famille, mais provenant de deux fabricants différents.

Dans l'utilisation courante, les revêtements (qui ont fait l'objet de PV d'essais) sont destinés à être appliqués sur différents supports, et dans des conditions hygrothermiques éminemment variables dans le temps (cf. tableau 1).

■ Rappelons les fonctions principales (selon la norme NF P 84 403) que doivent satisfaire les **systèmes dits d'« imperméabilité »**. Ils doivent être :

- imperméables à l'eau liquide ;
- perméables à la vapeur d'eau, autrement dit « laisser respirer le mur » ;
- résistants à une certaine fissuration en fonction de leur classe ( $I_1$  à  $I_4$ ).

Pour laisser respirer le support, c'est-à-dire, pouvoir affirmer que la migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur, seule une étude hygrothermique (fondée sur des Diagrammes de Glaser) permettra une approche quantitative qui confirmera ou infirmera que cette nécessité est satisfaite ou pas. Dans cette éventualité, il est impératif de connaître la perméance du revêtement seul.

Par définition, nous l'appellerons : « perméance intrinsèque du système :  $(\pi/e)_s$  ».

■ Écrivons que la **résistance à la diffusion de l'éprouvette revêtue** ( $R_d$ ) est égale à la somme des résistances à la diffusion des éléments rencontrés (éprouvette témoin et système) :

$$(R_d)_r = (R_d)_t + (R_d)_s \quad (1)$$

La norme NF P 84-403 exige, pour la perméance de l'éprouvette revêtue, une valeur plancher :

- perméance *plancher* de l'éprouvette revêtue :  $(\pi/e)_r \geq 40 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$  ;
- perméance des éprouvettes témoins (*ciment*) non revêtues :  $(\pi/e)_t = 90 \text{ à } 150 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$  ;
- perméance intrinsèque « *plancher* » du système seul :  $(\pi/e)_s = \dots ? \dots \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ .

En remplaçant dans l'équation (1) les lettres par leurs valeurs, on trouve une perméance intrinsèque « *plancher* » pour tous les systèmes :

$$\frac{1}{40} \geq \frac{1}{90 \text{ à } 150} + \frac{1}{(\pi/e)_s}$$

$$(\pi/e)_s \geq 72,00 \text{ à } 54,54 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$$

■ Nous pouvons donc calculer la **perméance intrinsèque plancher** et la **résistance plafond de diffusion à la vapeur d'eau** des systèmes pour :

- un flux de vapeur d'une durée de 1 h ;
- un gradient de pression de 1 mmHg.

Soit pour les systèmes :

- **Perméance intrinsèque « plancher » :**  
 $(\pi/e)_s \geq 72,00 \text{ à } 54,54 / 24 \times 36,6705 = 0,0818 \text{ à } 0,0620 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ .

- **Résistance plafond de diffusion à la vapeur d'eau**  
 $R_d \leq 1 / (\pi/e)_s = 1 / (0,0818 \text{ à } 0,0620) = 12,2235 \text{ à } 16,1350 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ .

En ce qui concerne le coefficient de perméabilité intrinsèque plancher du système «  $\pi_s$  », il faut connaître l'épaisseur «  $e_s$  » à l'état sec, du feuil appliqué.

Exemple

Pour les peintures du type pliolite, dont l'épaisseur est généralement de l'ordre de 200  $\mu\text{m}$ , le coefficient de perméabilité intrinsèque plancher à la vapeur d'eau devra être égal ou supérieur à :

- $\pi_{\text{pliolite}} \geq (0,0818 \text{ à } 0,0620) \times 0,000200$  ;
- $\pi_{\text{pliolite}} \geq 0,00001636 \text{ à } 0,00001240 \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$  ;
- $\pi_{\text{pliolite}} \geq 0,1636 \times 10^{-4} \text{ à } 0,1240 \times 10^{-4} \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ .

## 5. Résumé à savoir

### 5.1 Flux de vapeur

Le flux de vapeur va toujours des hautes températures (ou des hautes pressions) vers les basses températures (ou les basses pressions).

En bâtiment, nous constatons souvent que l'eau, à l'état liquide, est la cause originelle de pathologies avérées. Il faut donc vérifier,

pour les éviter que la migration de la vapeur d'eau à travers la paroi revêtue, ou non, se fait à l'état vapeur, même et surtout quand l'entrepreneur et/ou le fabricant qualifient le revêtement prévisionnel de « *peintures microporeuses* ! ».

### 5.2 Microporosité

Souvent, dans le jargon professionnel, on parle de *microporosité* d'une peinture, ce qui sous-entend : la vapeur d'eau à travers le feuil de peinture migrera à l'état vapeur, ou encore, la peinture laissera respirer la paroi ainsi revêtue.

Cette affirmation « verbale » n'est que « qualitative ! ».

Comment démontrer et être en mesure de pouvoir affirmer, d'une façon quantitative et incontestable, cette propriété physique ?

Comme nous l'avons vu (cf. § 4.4), pour tous les systèmes, on peut, déterminer leur indice de transfert de la vapeur d'eau ( $I_{TV}$ ). Ils sont donc (plus ou moins) perméables à la vapeur d'eau, autrement dit, toutes les peintures sont en partie microporeuses.

Pour statuer « scientifiquement » sur la microporosité d'un feuil de peinture, c'est-à-dire, « affirmer » que la migration de la vapeur d'eau se fera à l'état vapeur, il faut connaître :

- la composition et les caractéristiques physiques des éléments constitutifs de la paroi ;
- les conditions hygrothermiques des ambiances qui règnent de part et d'autre de cette paroi ;
- les coefficients de perméabilité à la vapeur d'eau de chaque élément de la paroi, ainsi que la perméance intrinsèque de la peinture ou du système.

Ces données connues, on pourra alors établir une étude hygrothermique fondée sur le tracé de diagrammes de Glaser. Cette approche scientifique statuera, d'une façon incontestable, sur :

- la migration de la vapeur d'eau : à l'état vapeur, liquide ou solide ;
- les performances et les limites du feuil de peinture : microporeux ou pas, dans des conditions climatiques extrêmes définies.

### 5.3 Procès Verbal (PV) d'essais

Dans la pratique, le maître d'œuvre exigera dans le dossier des pièces écrites du marché, le PV d'essai « *in extenso* » de chaque peinture ou système préconisé, au même titre que les avis techniques en cours de validité des produits (ou systèmes) de technique non courante et les PV d'essais validant la conformité aux normes et/ou DTU en vigueur pour des produits (ou systèmes) traditionnels.

Le cahier des clauses techniques (CCT) devra préciser dans quels cas une *étude hygrothermique* sera établie, afin de démontrer que la paroi « respire », et cela, dans des conditions hygrothermiques extrêmes définies (par le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre).

Il reviendra également au Maître d'œuvre en accord avec le maître d'ouvrage de préciser celui qui aura la charge d'établir, *éventuellement*, l'étude hygrothermique : bureau d'étude technique indépendant, ou, service technique du fabricant de revêtements de façade.

Le maître d'œuvre pourra ainsi, affirmer ou infirmer scientifiquement les performances et les limites des systèmes à mettre en œuvre.

## 6. Procès Verbal d'essais

Les résultats d'essais sont remis au détenteur du produit (ou du système), sous deux formes : réduite et *in extenso*.

Sur demande du Maître d'œuvre, le fabricant est tenu de produire le PV d'essais du produit (ou du système).

D'une façon quasi systématique, c'est le PV réduit qui sera expédié.

Pourquoi ? Y'a-t-il une différence de fond entre les deux formes de présentation d'un document officiel du même produit (ou système) ?

## 6.1 PV réduit

Les résultats tiennent sur le recto d'une feuille 21 x 29,7, que nous reproduisons ci-dessous (voir encadré 1).

Encadré 1 – PV réduit	
Analyse de notre procès verbal d'essais	
Références de la demande	
CLIENT : Raison sociale et coordonnées géographiques	
Système de revêtements de façades à base de polymères	
Nom Commercial du système	
PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES	
Support : en mortier de ciment finement taloché, conformé-ment à la norme P 84 402	
Système de revêtements :	
1 couche d'impression NC <sub>1</sub> : 250 g/m <sup>2</sup>	
1 première couche de revêtement NC <sub>2</sub> : 400 g/m <sup>2</sup>	
1 deuxième couche de revêtement NC <sub>3</sub> : 400 g/m <sup>2</sup>	
ESSAI DE COMPORTEMENT A LA VAPEUR D'EAU	
Perméabilité et cloquage : P 84-402	
– Perméabilité : indice conventionnel de transfert de vapeur d'eau en g/m <sup>2</sup> .24 h : 70	
– Susceptibilité au cloquage : ni cloquage, ni désordre du système après,	
• Séjour à 38 °C en étuve ventilée,	
• Séjour à 60 °C dans un bain thermostaté	
ESSAI DE COMPORTEMENT AUX CYCLES CLIMATIQUES CONVENTIONNEL : P 84-402	
Au bout de 75 cycles d'exposition, le système ne présente aucune modification d'aspect, tel que farinage, décollement, faïencage, cloquage	
ESSAI DE COMPORTEMENT À LA FISSURATION. P-84-402	

	Ouverture de la fissure (En mm à la rupture)	
	à 23 °C	à - 10 °C
Avant cycles climatiques conventionnels....	1,6	1,3
Valeur individuelle minimale.....	1,5	1,1
Après cycles climatiques conventionnels....	1,9	1,1
Valeur individuelle minimale.....	1,4	1,1

Date et signature du laboratoire

Il s'agit d'un système d'imperméabilité I<sub>3</sub> que nous appellerons « NC » (Nom Commercial). Ce système est commercialisé par un fabricant (dont nous gardons l'anonymat, par souci d'objectivité). Le PV d'essais a été établi par le laboratoire d'un Bureau de contrôle agréé indépendant (Bureau Véritas).

## 6.2 PV in extenso

Les résultats du PV d'essais sont regroupés dans un rapport qui peut comporter 6 pages (*par exemple*), et chaque page est numérotée (1/6, etc.).

Il s'agit d'un autre système d'imperméabilité I<sub>3</sub>, que nous appellerons NC', et, commercialisé par un *autre fabricant*.

Le PV d'essai in extenso de NC' a été établi par le même laboratoire qui a rédigé celui du NC (cf. § 6.1).

### 6.2.1 Contenu de la page 1

Référence du demandeur des essais :

Nom et adresse

Date de la demande d'essai : 3 mars année (n)

Nature des essais demandés : essais sur système de revêtement de façades à base de polymères

Référence des échantillons

Échantillonnage :

- 1 échantillon de fixateur NC<sub>1</sub> ;
- 1 échantillon de revêtement NC<sub>2</sub> ;
- 1 échantillon de revêtement NC<sub>3</sub>.

Identification

Date de réception : 28 mars année (n), n° ...

Provenance

État des échantillons à la réception : bon pour essais

### 6.2.2 Contenu de la page 2

Système de revêtement de façade à base de polymère.

Nom commercial (NC'), I<sub>3</sub> finition lisse.

Sur NC<sub>2</sub> de la sous couche et NC<sub>1</sub> de la couche d'impression.

Essais réalisés durant la période du 28 mars au 20 septembre année (n).

#### ■ Préparation des éprouvettes.

Ce paragraphe indique qui, où et comment sont préparées les maquettes. Généralement, elles sont réalisées dans le laboratoire du Bureau de contrôle par un représentant du fabricant.

- application à la brosse du fixateur NC<sub>1</sub> – Poids de fixateur appliqué au m<sup>2</sup> : 180 g – Séchage 24 h à 23 °C et 50 % d'HR ;
- application au rouleau laine à poil moyen d'une couche du revêtement NC<sub>2</sub> – Poids de revêtement appliqué au m<sup>2</sup> : 500 g – Séchage 24 h à 23 °C et 50 % d'HR ;
- application au rouleau laine à poil moyen d'une couche du revêtement NC<sub>3</sub> – Poids de revêtement appliqué au m<sup>2</sup> : 400 g – Séchage 28 j à 23 °C et 50 % d'HR avant de procéder aux essais.

### 6.2.3 Contenu de la page 3

#### ■ Essai d'imperméabilité à l'eau : P 84 402

Après 7 jours d'essais :

- aucun passage d'eau ne s'est produit en sous face de l'éprouvette ;
- aucune cloque ne s'est formée.

#### ■ Essai de comportement à la vapeur d'eau : P 84 402

Indice conventionnel de transfert de vapeur d'eau exprimé en g/m<sup>2</sup>.24 h (voir tableau 2).

##### • Susceptibilité au cloquage

Les deux éprouvettes traitées sont placées dans un bain thermostaté à 60 °C.

Au bout de 7 jours, le système ne présente aucun cloquage, ni désordre.

- Essai de **comportement aux cycles climatiques conventionnels** : P 84 402.

Tableau 2 – Coefficients  $I_{TV}$ 

Éprouvette	$I_{TV}$ (en g/m <sup>2</sup> .24 h)
Témoin (non revêtue)	130
Recouverte du système	55

Tableau 3 – Allongement à la rupture

N° de l'éprouvette	Ouverture de la fissure (en mm)	
	À 23 °C	À - 10 °C
Avant cycles climatiques		
1	1,2	1,5
2	1,8	1,4
3	1,7	1,2
4	1,2	1,5
<b>Moyenne</b>	<b>1,5</b>	<b>1,4</b>
Après cycles climatiques	A 23 °C	A - 10 °C
1	1,5	1,1
2	1,0	1,4
3	1,1	1,5
4	0,9	1,7
<b>Moyenne</b>	<b>1,1</b>	<b>1,4</b>

À la fin des cycles, le système ne présente ni farinage, ni décollement, ni faïençage, ni cloquage.

#### 6.2.4 Contenu de la page 4

Essai de comportement à la fissuration : P 84 402.

Après rupture du support, méthode dite instantanée, un effort de traction longitudinal élargit la fissure de l'éprouvette jusqu'à rupture du système.

Les résultats d'allongement sont consignés dans le tableau 3.

Épaisseur moyenne du système à l'endroit de la rupture : mini = 0 mm et maxi = 0,6 mm.

#### 6.2.5 Contenu de la page 5

Essai d'adhérence : P 84 402.

Les résultats sont consignés dans le tableau 4.

#### 6.2.6 Contenu de la page 6

Essai d'identification.

Les mesures sont effectuées sur les produits ayant servi aux essais (tableaux 5 et 6).

Date du PV : 17 janvier année (n + 1).

Signatures : du Technicien et du Responsable du laboratoire.

Tableau 4 – Contrainte d'adhérence

Avant cycles climatiques	Contrainte de rupture (en MPa)	Rupture
1	1,1	Cohésive de NC <sub>1</sub>
2	1,0	
3	1,0	
4	0,8	
5	1,0	
<b>Moyenne</b>	<b>1,0</b>	
Après cycles climatiques	Contrainte de rupture (en MPa)	Rupture
1	1,4	Cohésive de NC <sub>1</sub> : 80 %.
2	1,5	
3	1,8	Adhésive du système : soit 20 % du ciment
4	1,5	
5	1,4	
<b>Moyenne</b>	<b>1,5</b>	

Tableau 5 – Masses volumiques et extraits secs

Référence du produit	Fixateur NC <sub>1</sub>	Sous couche NC <sub>2</sub>	Finition NC <sub>3</sub>
Masse volumique à 23 °C	0,906 g/cm <sup>3</sup>	1,246 g/cm <sup>3</sup>	1,375 g/cm <sup>3</sup>
Extrait sec à 105 °C	11,0 %	69,6 %	70,0 %
Taux de cendres à 450 °C	—	33,7 %	40,0 %
Taux de cendres à 900 °C	—	23,1 %	34,8 %

Tableau 6 – Viscosité et pH des échantillons

Viscosité à 23 °C	NC <sub>1</sub>	NC <sub>2</sub>	NC <sub>3</sub>
Coupe Ford n° 4 Appareil Brookfield	16 s		
Mobile	T 6	T 6	T 7
Vitesse (en tr/min)	(en Pa.s)	(en Pa.s)	(en Pa.s)
0,5	170	140	160
1,0	115	100	120
2,5	72	66	80
5,0	50	48	60
10,0	36	36	40
20,0	25	27	33
50,0	16	18	23
100,0	—	—	17
Détermination du pH à 23 °C	8,7	9,3	9,3

## 7. Commentaires et analyses

### 7.1 Commentaires

Les normes intéressent principalement les :

- fabricants ;
- laboratoires agréés, (LNE, CEBTP, CSTB), les organismes de contrôle (Bureau Véritas, Socotec etc.).

Les normes sont des documents relatifs aux produits et/ou aux procédés qui donnent généralement : les définitions et le vocabulaire ; les méthodes d'essais ; les caractéristiques ; les performances ; ainsi que le cahier des clauses techniques et spéciales et le guide d'emploi.

Les normes permettent, aux fabricants, de formuler leurs produits, et, aux laboratoires, de vérifier et certifier que les produits sont conformes aux normes.

■ Les DTU (Documents techniques unifiés) intéressent :

- le Maître d'ouvrage ;
- le Maître d'œuvre ;
- l'Entrepreneur.

■ Nous les nommerons indifféremment : « les intervenants ».

■ Les DTU sont constitués par des cahiers des clauses techniques (CCT), appelés à l'origine « cahier des charges » qui indiquent les conditions techniques que doivent respecter les Intervenants pour le choix et la mise en œuvre des produits dans l'exécution des travaux des différents corps d'état.

■ Ces intervenants doivent :

- préconiser (et/ou mettre en œuvre) des produits (et/ou des procédés),
- être en mesure d'en évaluer les performances et/ou les limites ;
- être en mesure d'émettre un jugement de valeurs sur les pièces techniques (PV d'essais) intégrées au dossier du marché (privé ou public).

Ainsi, *a priori*, les intervenants n'auraient pas à connaître le contenu des normes.

La question qui se pose alors est la suivante : comment pourront-ils se forger un jugement de valeur sur les pièces techniques intégrées au dossier du marché, s'ils n'ont pas une connaissance du contenu des normes qui caractérisent les produits préconisés et/ou mis en œuvre ?

À notre avis, il vaut mieux *prévenir que guérir*.

Nous recommandons fortement aux intervenants, de s'approprier le contenu de ces normes. En effet, en cas de litige et/ou de désordres, ceux qui auront à juger « de la chose construite », auront pour mission de statuer sur les performances et/ou les limites du système (définies dans les normes) et la préconisation et/ou la mise en œuvre effectuées par les intervenants.

Est-ce que pour les intervenants, le passage des anciennes normes nationales aux nouvelles normes européennes va, pour eux, dans le sens d'une simplification ?

■ En premier lieu, si l'on en juge à l'aune de la quantité des nouveaux documents à consulter et à assimiler : l'objectif de la simplification n'est, peut-être, pas atteint ! En effet :

- les 3 normes nationales tenaient en 18 pages « Afnor » alors que ;
- les 7 normes européennes (88 pages) + la norme XP T 34 722 de décembre 2004 (Adaptation des revêtements de façade à la nouvelle classification européenne : 10 pages) représentent, pour les Intervenants, une quantité non négligeable de documents nouveaux à assimiler pour se forger leur jugement de valeur !

De plus, à l'intérieur de certaines normes, il est fait état de renvoi à d'autres normes (telles que : ISO 3233, NF EN 13687-3, EN ISO 4683-1, -2, -4, -6 et -7 etc...) !

■ En second lieu, y-a-t-il des changements importants, (voire des incohérences) entre les normes nationales (anciennes P 84 401 à P 84 403) et les normes européennes (nouvelle série EN ISO 1062-1 à 11) relatives aux peintures et vernis ?

La seule façon de statuer sur ce dernier point est d'analyser :

- les PV d'essais relatifs aux anciennes normes nationales ;
- les PV d'essais issus des nouvelles normes européennes, et ;
- de les comparer.

Dans le cadre d'une critique constructive, il faut : « savoir d'où l'on part, et évaluer le cheminement (facile ou délicat) qui permet d'atteindre, ou pas, l'objectif envisagé ».

Autrement dit, avoir le souci d'accroître son savoir, comme l'exprime, d'une façon implicite (subliminale), le proverbe chinois :

« si je te donne un poisson, je te nourris un jour, si je t'apprends à pêcher, tu te nourris toute ta vie ».

### 7.2 Analyse

Pour conduire objectivement cette analyse, il faut avoir présent à l'esprit les tenants et les aboutissants contenus dans chacune des normes (anciennes et nouvelles).

#### 7.2.1 Anciennes normes nationales

À la date de la publication par l'Afnor, en juin 1989, des 3 normes NF P 84-401, P 84-402 et P 84-403, il n'existait pas de normes ni de projet de norme européenne ou internationale sur le sujet.

Ce qui veut dire, en d'autre terme, que c'est au plan national que la profession de peintre en bâtiment avait adopté des « règles de conduite », c'est-à-dire, avait défini les règles de l'art qui régissaient leur métier. Des instances, comprenant :

- les Bureaux de Normalisation (Afnor, Copla, etc.) travaillant dans le domaine du bâtiment,
- les principaux centres techniques,
- les représentants des entrepreneurs, ainsi que ceux des industriels de la construction, les architectes, les bureaux de contrôle, et,
- le CSTB, (ce dernier assurant le secrétariat), rédigèrent des normes.

Rappelons que ce sont les Allemands qui, dans les années 1960, ont importé en premier ces types de produit (d'imperméabilisation et d'étanchéité des façades) en France. Ces systèmes y connurent un développement important.

##### 7.2.1.1 Norme P 84-401

Elle traite tous les systèmes de revêtements, alors que la norme homologuée de 1984 ne s'appliquait qu'aux revêtements comportant une armature rapportée.

Cette norme (P 84 401) définit les 4 fonctions (maintien de l'aspect, décoration, imperméabilité à la pluie et isolation thermique) qu'un revêtement appliqué sur les façades peut remplir.

Elle précise les définitions et le vocabulaire nécessaires à la bonne compréhension des termes normatifs qui se rapportent à ce sujet.

Notons qu'un seul terme : « Imperméabilité » définit l'imperméabilisation et l'étanchéité (verticale).

##### 7.2.1.2 Norme P 84-402

Elle décrit une série de méthodes d'essais permettant de caractériser les performances des revêtements appliqués sur les façades en service.

Cette norme apprécie l'aptitude à l'emploi des revêtements à base de polymères, constituant les systèmes d'imperméabilité.

Deux types de PV (réduit ou in extenso) en rendent compte.

Le PV réduit atteste, seulement, que le produit (ou système) a subi les tests, sans que le destinataire puisse toutefois, en évaluer et ainsi en apprécier d'une façon quantitative les performances intrinsèques.

Le PV *in extenso* permet de porter un jugement de valeur sur le produit.

Le tableau 7 regroupe les résultats des deux PV des § 6.1 et § 6.2.

#### ■ Préparation des éprouvettes

La consommation au  $m^2$  (1 050 et 1 080  $g/m^2$ ) de produits est sensiblement la même pour les 2 systèmes.

Le PV *in extenso*, précise l'outillage pour satisfaire cette consommation.

#### ■ Essais de comportement à la vapeur d'eau

Le PV *in extenso* permet le calcul de  $I_{TVs}$  intrinsèque et de la perméance du système  $(\pi/e)_s$ .

Le PV réduit ne le permet pas.

##### Exemple

1) Calculons  $I_{TVs}$  de NC'.

Avec le PV *in extenso*, on peut écrire que la résistance à la diffusion de l'éprouvette revêtue est égale à la somme des résistances élémentaires rencontrées :

$$\frac{1}{55} = \frac{1}{130} + \frac{1}{(\pi/e)_s}$$

$$I_{TVs} = \frac{1}{(\pi/e)_s} = 0,0105 m^2 \cdot 24 h/g$$

D'où la perméance intrinsèque :

$$(\pi/e)_s = 95,33 g/m^2 \cdot 24 h$$

2) Calculons le coefficient de perméabilité intrinsèque «  $\pi_s$  » du système NC' en  $g/m \cdot h \cdot mmHg$ , dont l'épaisseur du feuil sec est égale à 504,8  $\mu m$  (cf. [Doc. C 3 608]),

$$\pi_s = 95,33 \times 0,0005048 / 24 \times 36,6705$$

$$\pi_s = 0,5468 \cdot 10^{-4} g/m \cdot h \cdot mmHg$$

Dans le cadre d'une étude hygrothermique d'une paroi (*en contact avec l'atmosphère extérieure*) revêtue du système d'imperméabilité NC', la connaissance de la perméabilité intrinsèque «  $\pi_s$  » en  $g/m \cdot h \cdot mmHg$  du revêtement est indispensable pour établir la note de calcul qui conduit au tracé d'un Diagramme de Glaser.

Le diagramme de Glaser permet de statuer d'une façon incontestable sur l'état (*vapeur, liquide ou solide*) de l'écoulement de la vapeur d'eau à travers cette *paroi revêtue*.

Avec le PV réduit, il n'est pas possible de calculer  $I_{TVs}$  du système NC.

#### ■ Essais de comportement aux cycles climatiques

Les renseignements sont similaires pour les deux PV.

#### ■ Essais d'imperméabilité à l'eau

Aucune indication n'est donnée pour le PV réduit, alors que le PV *in extenso* précise qu'il n'y a *aucun passage d'eau après 7 jours d'essai*, ni formation de cloque.

#### ■ Essais de comportement à la fissuration

Le PV *in extenso* fournit des renseignements plus complets. Ils permettent :

- d'évaluer l'évolution de la résistance à la fissuration du revêtement ;
- de constater qu'après vieillissement conventionnel « l'élasticité » reste *performante*, surtout aux températures négatives ( $-10^\circ C$ ).

Rappelons que les fissures ont tendances à « s'ouvrir » aux basses températures.

Le PV réduit ne fournit qu'une valeur individuelle minimale.

*Un seul résultat* reste insuffisant (*vis-à-vis des agressions climatiques naturelles*) pour statuer sur le vieillissement du système dans le temps.

#### ■ Essais d'adhérence

Aucun renseignement n'est communiqué dans le PV réduit, alors que dans le PV *in extenso*, on note que l'adhérence s'améliore avec le vieillissement conventionnel. Autrement dit, cela laisse espérer un *gage de pérennité dans la durée* pour le revêtement.

#### ■ Essais d'identification

Aucun renseignement n'est communiqué dans le PV réduit.

Le PV *in extenso* indique la masse volumique et les extraits secs.

Ces renseignements permettent de :

- calculer l'épaisseur (théorique du feuil sec dans le cadre du respect des consommations au  $m^2$  prévue par le fabricant) du système NC' (cf. Exemple 2 de la [Doc. C 3 608] :  $E = 504,8 \mu m$ ) ;
- quantifier la composition chimique (volumique en %) des 3 couches du produit NC' (cf. tableau 8). En effet, il faut savoir que les extraits secs à  $105^\circ C$ , à  $450^\circ C$  et à  $900^\circ C$  correspondent, successivement, aux phénomènes physico-chimiques suivants :

- à  $105^\circ C$  : évaporation du solvant,
- à  $450^\circ C$  : destruction des résines,
- à  $900^\circ C$  : destruction des adjuvants solides, il ne reste que les charges.

Ces renseignements nous permettent de quantifier le taux (en %) des différents constituants, entrant dans la composition du revêtement (cf. tableau 8).

Rappelons que les qualités performanciennes du feuil de peinture sont liées au taux de résine. En outre, le taux de résine peut justifier la différence de coût de deux systèmes de revêtements relevant d'une même famille de produit.

### 7.2.1.3 Norme P 84-403

Elle précise les critères que doivent satisfaire chaque type de produits. Cette norme classe les différents revêtements, avec pour objectif de les sélectionner, soit au titre de l'entretien, soit au titre de la réfection afin de jouer l'un des rôles suivants :

#### ■ Maintien de l'aspect. Décoration : classe D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ou D<sub>3</sub>.

- classe D<sub>1</sub> maintient l'aspect d'origine (*correspond à des hydrofuges de surface*) ;
- classe D<sub>2</sub> a une fonction décorative (*correspond à des peintures*). L'épaisseur du feuil est de l'ordre de 200  $\mu m$  (0,2 mm) ;
- classe D<sub>3</sub>, en plus de la fonction décorative, apporte une protection superficielle de nature à masquer le faïencage du support (*cette classe correspond à des revêtements type RPE (revêtement plastique épais). Ils peuvent se présenter sous quatre aspects : roulé, taloché, ribbé ou granité*).

Selon la granulométrie du RPE, l'épaisseur varie entre 0,2 et 2 mm.

**Nota**  
Faïencage = réseau d'ouvertures linéaires superficielles, de très faible largeur, inférieures à  $2/10^{ème}$  de mm, et sur une très faible profondeur (*environ 1 mm, au voisinage de la surface*).

#### ■ Imperméabilité à la pluie.

Se reporter aux anciennes normes, cf. [Doc. C 3 608].

**Tableau 7 – Résultats des PV d'essais (réduit et *in extenso*), selon la NF P 84 402, de deux systèmes d'imperméabilité  $I_3$ , (deux fabricants différents)**

Rubriques	PV d'essais « réduit »		PV d'essais « <i>in extenso</i> »			
Préparation des éprouvettes	§ 6.1 : NC	g/m <sup>2</sup>	§ 6.2 : NC'	g/m <sup>2</sup>		
	1 couche d'impression .....	250	1 couche d'impression .....	180		
	1 <sup>re</sup> couche .....	400	1 <sup>re</sup> couche .....	500		
	2 <sup>e</sup> couche .....	400	2 <sup>e</sup> couche .....	400		
	<b>Total</b>	<b>1 050</b>	<b>Total</b>	<b>1 080</b>		
Essais de comportement à la vapeur d'eau	<b>Perméabilité <math>I_{TV}</math></b> (en g/m <sup>2</sup> 24 h)					
	Éprouvette revêtue .....	70	Éprouvette témoin .....	130		
	Susceptibilité au cloquage : ni cloquage, ni désordre à 38 °C et 60 °C		Éprouvette revêtue .....	55		
Essais d'imperméabilité à l'eau liquide	Aucune indication		Après 7 j d'essais :			
			– aucun passage d'eau ; – aucune cloque.			
Essais de comportement aux cycles climatiques conventionnels	Au bout des 75 cycles : ni farinage, ni décollement, ni faïençage, ni cloquage		Au bout des 75 cycles, méthode B : ni farinage, ni décollement, ni faïençage, ni cloquage			
Essais de comportement à la fissuration	<b>Ouverture de la fissure à la rupture du système</b> (en mm)					
		À 23 °C	À - 10 °C (en mm)	Essais (n°)	À 23 °C	À - 10 °C
	<b>Avant cycles climatiques</b>					
				1.....	1,2	1,5
				2.....	1,8	1,4
	Moyenne.....	1,6	1,3	3.....	1,7	1,2
	Valeur minimale.....	1,5	1,1	4.....	1,2	1,5
				Moyenne.....	1,5	1,4
	<b>Après cycles climatiques</b>					
	Moyenne.....	1,9	1,1	1.....	1,5	1,1
	Valeur minimale.....	1,1	1,1	2.....	1,0	1,4
				3.....	1,1	1,5
			4.....	0,9	1,7	
			Moyenne	1,1	1,4	
			Épaisseur moyenne du système à l'endroit de la rupture (en mm)			
			mini = 0 et maxi = 0,6			

**Tableau 7 – Résultats des PV d'essais (réduit et *in extenso*), selon la NF P 84 402, de deux systèmes d'imperméabilité I<sub>3</sub>, (deux fabricants différents) (suite)**

Rubriques	PV d'essais « réduit »	PV d'essais « <i>in extenso</i> »		
		Essais (n°)	Rupture (en MPa)	Mode
Essai d'adhérence	Aucune indication	Avant cycle climatique		
		1.....	1,1	cohésive
		2.....	1,0	"
		3.....	1,0	"
		4.....	0,8	"
		5.....	1,0	"
		Moyenne.....	1,0	
		Après cycle climatique		
		1.....	1,4	Cohésive sur 80 % de la surface Adhésive sur 20 % du support
		2.....	1,5	
		3.....	1,8	
		4.....	1,5	
		5.....	1,4	
		Moyenne.....	1,5	
Essai d'identification	Aucune indication	<b>Masse volumique (en g/cm<sup>3</sup>)</b>		
		NC <sub>1</sub>	1,246	
		NC <sub>2</sub>	1,246	
		NC <sub>3</sub>	1,375	
		<b>Extraits secs à 105 °C (en %)</b>		
		NC <sub>1</sub>	11,0	
		NC <sub>2</sub>	69,6	
		NC <sub>3</sub>	70,0	
		<b>Extraits secs à 450 °C (en %)</b>		
		NC <sub>1</sub>	0,0	
		NC <sub>2</sub>	33,7	
		NC <sub>3</sub>	40,0	
		<b>Extraits secs à 900 °C (en %)</b>		
		NC <sub>1</sub>	0,0	
NC <sub>2</sub>	23,1			
NC <sub>3</sub>	34,8			



**Tableau 8 – Composition volumique du système NC'**

Extrait sec à	Système d'imperméabilité NC' (en %)		
	NC' <sub>1</sub>	NC' <sub>2</sub>	NC' <sub>3</sub>
105 °C	100 – 11,0 = 89	100 – 69,6 = 30,4	100,0 – 70,0 = 30,0
Évaporation	White-spirit	Eau	Eau
450 °C	11,0	69,6 – 33,7 = 35,9	70,0 – 40,0 = 30,0
Destruction de la résine			
900 °C		33,7 – 23,1 = 10,6	40,0 – 34,8 = 5,2
Destruction des adjuvants solides			
Reste de charges		23,1	34,8

**■ Isolation thermique. Classe T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> ou T<sub>3</sub>.**

Du fait que certains systèmes d'isolation thermique par l'extérieur utilisent en parement des R.P.E., la notion de résistance thermique  $R_{th}$  a été prise en compte, avec :

– **classe T<sub>1</sub>** : Revêtement curatif ayant ....  $R_{th} < 0,05 \text{ m}^2.\text{K/W}$ . Cette résistance thermique correspond à des épaisseurs d'isolant de l'ordre de 3 mm. Le produit existe en 3 ou 6 mm d'épaisseur (*sorte de tapisserie murale, connue sous le nom commercial de Dépron*) ;

– **classe T<sub>2</sub>** : Revêtement curatif ayant  $0,05 \leq R_{th} \leq 1,00 \text{ m}^2.\text{K/W}$ . Cette résistance thermique correspond à des épaisseurs maximales d'isolant de l'ordre de 40 à 45 mm (*polystyrène, laines minérales*) ;

– **classe T<sub>3</sub>** : revêtement curatif ayant .....  $R_{th} > 1,00 \text{ m}^2.\text{K/W}$ .

**Nota**  
Toutes les réglementations thermiques qui ont vu le jour après le premier choc pétrolier de 1973 (de RTh 77 à RT 2005) conduisent à mettre en œuvre des épaisseurs d'isolant thermique largement supérieures à celles du classement ci-dessus ( $R_{th} > 3,00 \text{ m}^2.\text{K/W}$ ).

**7.2.1.4 Conclusion**

Les 3 normes, de portée nationale, caractérisent, *via* une démarche simple, les revêtements à base de polymères en réfection des façades en services.

■ La norme P 84 401 définit le vocabulaire et les 4 fonctions (*maintien de l'aspect, décoration, imperméabilité à la pluie et isolation thermique*) qu'un revêtement appliqué sur les façades peut remplir.

■ La norme P 84-402 décrit une série de méthodes d'essais permettant de caractériser les performances des revêtements appliqués sur les façades en service.

■ La norme P 84-403 précise les critères à satisfaire, et classe les différents revêtements qui sont destinés : soit à l'entretien, soit à la réfection des façades.

**7.2.2 Nouvelles normes européennes**

La série des normes NF EN 1062-1 à 11, plus les normes NF EN ISO 7783-1 et 2, définissent, décrivent et caractérisent des produits de peinture et des systèmes de revêtement pour la préservation, la décoration et la protection des supports en maçonnerie et en béton neufs ou anciens, nus ou revêtus.

Cette série de normes homologuées remplacent les normes NF T 30 700 de mars 1983, NF T 30 804 de décembre 1981, le fascicule de documentation NF T 30 708 de février 1983 et les normes expérimentales P 84 401, P 84 402, P 84 403 de juin 1989, T 34 720 d'août 1986.

**7.2.2.1 Norme NF EN 1 062-1**

Elle précise les propriétés et les caractéristiques des systèmes de revêtement suivant le classement GESWVAC (cf. § 7.1). Les systèmes sont évalués indépendamment du subjectile. Les propriétés qui dépendent du subjectile, comme l'adhérence et la texture, ne sont pas incluses.

L'évaluation des propriétés, après conditionnement, peut être effectuée conformément aux normes EN ISO 4683-1, -2, -4, -6 et -7.

Pour réaliser un système de revêtement efficace, les produits doivent être appliqués conformément aux recommandations du fabricant qui doit attribuer un code d'identification au produit figurant au moins sur sa fiche descriptive à savoir :

**■ Brillant spéculaire « G »**

Si la réflexion spéculaire mesurée à 60° est inférieure à 10, la mesure doit être répétée à 85°. La valeur obtenue à 85° détermine la classification (tableau 9).

**■ Épaisseur du feuillet sec « E »**

Se reporter au tableau 10.

**■ Dimension des grains « granulométrie »**

Se reporter au tableau 11.

**■ Perméabilité à la vapeur d'eau**

Le taux de transmission de la vapeur d'eau doit être déterminé conformément à la norme EN ISO 7788-2 (tableau 12).

**■ Perméabilité à l'eau liquide « W »**

La perméabilité à l'eau liquide doit être déterminée conformément à la norme EN 1062-3 (tableau 13).

**■ Résistance à la fissuration « A »**

La résistance à la fissuration doit être déterminée conformément à la norme EN 1 062-7 (tableau 14).

**■ Perméabilité au dioxyde de carbone « C »**

La perméabilité au dioxyde de carbone doit être déterminée conformément à la norme EN 1062-6 (tableau 15).

**Tableau 9 – Classification du brillant spéculaire**

Classe	Angle d'incidence (en degré)	Exigence
G <sub>1</sub> → Brillant	60	> 60
G <sub>2</sub> → Satiné	60	≤ 60
	85	> 10
G <sub>3</sub> → Mat	85	≤ 10

**Tableau 10 – Classification de l'épaisseur du feuil**

Classe	Exigence (en µm)
E <sub>1</sub>	≤ 50
E <sub>2</sub>	> 50 ; ≤ 100
E <sub>3</sub>	> 100 ; ≤ 200
E <sub>4</sub>	> 200 ; ≤ 400
E <sub>5</sub>	> 400

**Tableau 11 – Classification de la dimension maximale des grains (S)**

Classe <sup>(a)</sup>	Exigence (en µm)	Méthode d'essai
S <sub>1</sub> → Fine	< 100	EN ISO 1 524
S <sub>2</sub> → Moyenne	< 300	EN ISO 787-7 ou EN ISO 787-18
S <sub>3</sub> → Grosse	< 1 500	
S <sub>4</sub> → Très grosse	> 1 500	

<sup>(a)</sup> La classification se rapporte à la dimension maximale des grains et non à une description du revêtement

**Tableau 12 – Classe de perméabilité à la vapeur d'eau**

Classe	Exigences	
	(en g/m <sup>2</sup> .j)	(en m) <sup>(a)</sup>
V <sub>0</sub>	Aucune exigence	Aucune exigence
V <sub>1</sub> Grande	> 150	< 0,14
V <sub>2</sub> Moyenne	≤ 150 ; > 15	0,05
V <sub>3</sub> Faible	≤ 15	0,05

(a) Valeurs de l'épaisseur de la couche d'air équivalente en régime de diffusion (s<sub>d</sub>)

**Tableau 13 – Classe de perméabilité l'eau liquide**

Classe	Exigence (en kg/m <sup>2</sup> .h <sup>0,5</sup> )
W <sub>0</sub>	Aucune exigence
W <sub>1</sub> Grande	> 0,5
W <sub>2</sub> Moyenne	≤ 0,5 ; > 0,1
W <sub>3</sub> Faible	≤ 0,1

**Tableau 14 – Classe de résistance à la fissuration**

Classe	Exigences	
	(en µm)	À la vitesse (en mm/min)
A <sub>0</sub>	Aucune exigence	Aucune exigence
A <sub>1</sub>	> 100	-
A <sub>2</sub>	> 250	0,05
A <sub>3</sub>	> 500	0,05
A <sub>4</sub>	> 1 250	0,5
A <sub>5</sub>	> 2 500	0,5

**Tableau 15 – Classe de perméabilité au dioxyde de carbone**

Classe	(en g/m <sup>2</sup> .j)	(en m <sup>2</sup> )
C <sub>0</sub>	Aucune exigence	Aucune exigence
C <sub>1</sub>	< 5	> 50

### 7.2.2.2 Chronologie de publication des nouvelles normes européennes

■ Pour remplacer les normes nationales, (NF P 84 401, P 84 402 et P 84 403 de juin 1989), les nouvelles normes européennes sont parues dans l'ordre chronologique suivant :

- février 1999 : NF EN 1062-3. Partie 3 : Détermination et classification de la perméabilité à l'eau liquide ;
- juillet 1999 : NF EN ISO 7783-2. Partie 2 : Détermination et classification du taux de transmission de la vapeur d'eau (*perméabilité*) ;
- septembre 1999 : NF EN ISO 7783-1. Détermination du coefficient de transmission de la vapeur d'eau. Partie 1 : méthode de la capsule pour feuil libre ;
- novembre 2002 : NF EN 1062-6. Partie 6 : Détermination de la perméabilité au dioxyde de carbone ;
- novembre 2002 : NF EN 1062-11. Partie 11 : Méthodes de conditionnement avant essais ;
- août 2004 : NF EN 1062-7. Partie 7 : Détermination de la résistance à la fissuration ;
- octobre 2004 : NF EN 1062-1. Partie 1 : Classification ;
- septembre 2004, l'Afnor publie la norme XP T 34 722 : Adaptation des revêtements de façade à la nouvelle réglementation. Les observations relatives à cette norme expérimentale doivent être adressées à l'Afnor avant le 31 décembre 2006.

Cette norme remplace la norme expérimentale XP T 34 722 d'octobre 1999.

Cet article a pour objectif de préparer à intégrer sans difficulté d'application (*classement d'équivalence « EVWA »*), dans le système des normes françaises, les nouveaux critères normalisés. Il relie donc la classification de la norme P 84 403, qui vise d'abord la réfection *des façades en service*, à celles de la série des normes NF EN 1062 qui visent l'ensemble des supports extérieurs en maçonnerie ou en béton correspondant à des parois de construction immobilière : bâtiment ou génie civil.

La classification européenne repose sur sept critères physiques, alors que la classification nationale n'en comportait que trois. Le tableau 16, regroupe les caractéristiques minimales et les correspondances.

■ Tout fabricant (importateur, ou distributeur) de produit de peinture antérieur à la parution de la série des normes EN 1062 et conforme aux normes françaises (P 84 401 à P 84 403) peut utiliser le **classement d'équivalence EVWA** à l'intérieur du territoire national sans avoir à justifier de nouveaux essais de qualification.

Les produits ou systèmes de peinture postérieurs à la parution de la série des normes EN 1062 devront être qualifiés conformément à ces normes.

■ Tenant compte des analogies que les nouvelles normes présentent avec les anciennes normes françaises, il est intéressant de **souligner quelques nuances** :

- **Perméabilité à la vapeur d'eau selon NF EN 7788-2** :
  - peintures microporeuses :  $V_2 \geq 40 \text{ g/m}^2 \cdot \text{j}$  ;

- RPE, RSE, y compris l'imperméabilité :  $V_2 \geq 55 \text{ g/m}^2 \cdot \text{j}$  ;
- analogie apparente pour les systèmes d'imperméabilité entre la perméance minimale de l'ancienne norme nationale (perméance de l'éprouvette revêtue supérieure à  $40 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ ) et celle de la XP T 34 722 et/ou de EN 1062-3 (perméance  $V_2$  du revêtement seul  $> 55 \text{ g/m}^2 \cdot \text{j}$ ).

En effet, le gradient de pression est de :

$$P_{p \text{ ancienne norme}} = 36,6705 \text{ mmHg}$$

et

$$P_{p \text{ nouvelle norme}} = 9,0601 \text{ mmHg}$$

- La perméance intrinsèque « plancher » du **système seul** est :

$$(\pi / e)_s = \dots? \dots \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$$

- En remplaçant dans l'équation (1) les lettres par leurs valeurs, on trouve une perméance intrinsèque « plancher » **pour tous les systèmes** :

$$\frac{1}{40} \geq \frac{1}{90 \text{ à } 150} + \frac{1}{(\pi / e)_s}$$

$$(\pi / e)_s \geq 72,00 \text{ à } 54,54 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$$

**Tableau 16 – Classement EVWA des revêtements de façades.  
Caractéristiques minimales et correspondances**

Type de revêtement	Classement français Norme P 84 403	Épaisseur du revêtement <sup>(a)</sup> E NF EN 1062-1 (en $\mu\text{m}$ )	Perméabilité à la vapeur d'eau NF EN 1062-3 (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{j}$ )	Perméabilité à l'eau liquide W NF EN 1062-3 (en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ )	Résistance à la fissuration A <sup>(b)</sup> NF EN 1062-7 (en $\mu\text{m}$ )
		E <sub>1</sub> < 50 50 < E <sub>2</sub> ≤ 100 100 < E <sub>3</sub> ≤ 200 200 < E <sub>4</sub> ≤ 400 E <sub>5</sub> > 400	V <sub>1</sub> > 150 15 < V <sub>2</sub> ≤ 150 V <sub>3</sub> ≤ 15	W <sub>1</sub> > 0,5 0,1 < W <sub>2</sub> ≤ 0,5 W <sub>3</sub> < 0,1	A <sub>0</sub> hors classe A <sub>1</sub> > 100 à 23 °C A <sub>2</sub> > 250 à -10 °C A <sub>3</sub> > 500 à -10 °C A <sub>4</sub> > 1 250 à -10 °C A <sub>5</sub> > 2 500 à -10 °C
Hydrofuge	D <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	A <sub>0</sub>
Lasure béton	D <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>
NF T 30 804	D <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>
NF T 30 700/RPE <sup>(c)</sup>	D <sub>3</sub>	E <sub>5</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	A <sub>0</sub>
NF T 30 720/RSE <sup>(c)</sup>	D <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>
Revêtement d'imperméabilité selon P 84 403	I <sub>1</sub>	E <sub>4</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>
	I <sub>2</sub>	E <sub>4</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
	I <sub>3</sub>	E <sub>5</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	A <sub>4</sub>
	I <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	V <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	A <sub>5</sub>

<sup>(a)</sup> L'épaisseur du revêtement comprend l'épaisseur de l'impression

<sup>(b)</sup> Un autre classement B<sub>0</sub> à B<sub>3</sub> est prévu pour la résistance à la fissuration des revêtements d'ouvrages soumis à des phénomènes vibratoires (*ponts, etc.*).

<sup>(c)</sup> Abréviation, de Revêtement Semi Epais, consacrée par l'usage.

- **Résistance à la fissuration selon NF EN 7788-7 :**

- mesures à faire avant vieillissement après 7 jours de préparation (stockage des éprouvettes à une température de 70 °C et conditionnement des éprouvettes d'essai pendant 24 h à 23 °C et 50 % de HR avant d'effectuer les essais ultérieurs), et après vieillissement artificiel ;

- vieillissement artificiel (selon la norme NF EN 13 673-3) à raison de 20 cycles thermiques prévu par la norme NF EN 1062-11.

- **Perméabilité à l'eau liquide selon NF EN 7788-3 :**

Notons que la norme européenne traite sur le même plan, vis-à-vis de l'eau liquide, les RPE et les systèmes d'imperméabilité, en admettant pour les mêmes valeurs  $W_2$  :

$$0,1 < W_2 \leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$$

Il y a là, à notre avis, une **incohérence majeure**.

En effet, un RPE n'a qu'une fonction décorative et, n'est effectivement couvert que par une garantie légale de bon fonctionnement de 2 ans.

Alors que les systèmes d'imperméabilité, selon l'ancienne norme nationale (P 84 402, § 3.5 essai d'imperméabilité à l'eau et cf. PV d'essais § 7.2, alinéa 7.22 et tableau 7 : après 7 j d'essai, aucun passage d'eau, aucune cloque) sont couverts par une garantie légale décennale.

« L'eau liquide » est souvent à l'origine de pathologies avérées. Que doit-on penser de ce classement en  $W_2$  des systèmes d'imperméabilité ?

## 8. Caractéristiques de l'air – Notions fondamentales

Extraits du cours de climatisation de G. Porcher

L'air atmosphérique est composé d'un certain nombre de gaz, d'humidité, de poussières et de bactéries. On l'appelle par définition l'**air humide pollué**

- **Air sec.**

Par convention, l'air sec c'est l'air pur ne contenant aucune poussière ou bactérie, et, totalement dépourvu d'humidité (tableau 17).

Tableau 17 – Composition volumique de l'air sec		
	Constituants	Composition volumique (en %)
	Azote (N <sub>2</sub> ) = 28 Oxygène (O <sub>2</sub> ) = 32	78,09 20,84
Impuretés	gaz carbonique (CO <sub>2</sub> ) = 44 oxyde de carbone (CO) = 28 anhydride sulfureux (SO <sub>2</sub> ) = 64 anhydride sulfurique (SO <sub>3</sub> ) = 80	} 0,03 } Variable }
Gaz rares	Argon (A) = 40 Xénon (Xe) Krypton (Kr) Helium (He) etc.	} 0,93 } } Traces }

- **Air humide.**

C'est un air pur, ne contenant aucune poussière ou bactérie, mais ayant une certaine teneur en humidité. C'est un mélange d'air sec et d'humidité.

En fait l'air absolument sec se rencontre rarement dans notre environnement immédiat, sauf peut-être au-delà de 10 km d'altitude.

L'air sec est donc une conception théorique, mais très utile dans la définition des grandeurs caractérisant l'air humide.

### 8.1 Air sec

#### 8.1.1 Masse molaire de l'air sec

La masse molaire d'un gaz ou « kilomole » est la masse d'un volume de 22,4 m<sup>3</sup> de ce gaz considéré à 0 °C et à la pression atmosphérique normale de 1,013 bar. Ainsi, la masse molaire de l'oxygène est de 32 kg, celle de l'azote est de 28 kg etc.

Nous écrivons :

$$M_{O_2} = 32 \text{ kg} \quad M_{N_2} = 28 \text{ kg}.$$

La composition volumique de l'air sec est sensiblement constante.

La masse molaire de l'air sec est donc une moyenne pondérée des masses molaires des principaux constituants.

$$M_{AIR} = \frac{78,09 [M_{N_2}] + 20,95 [M_{O_2}] + 0,93 [M_{AIR}] + 0,03 [M_{CO_2}]}{100}$$

En remplaçant les masses molaires par leurs valeurs, nous obtenons :

$$M_{AIR} = 28,96$$

Soit

$$M_{AIR} \approx 29$$

#### 8.1.2 Masse volumique de l'air sec

La masse volumique «  $\rho_{as}$  » de l'air sec est la masse de l'unité de volume d'air sec considérée à une température et une pression déterminée :

$$\rho_{as} = \frac{m_{as}}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

■ **Pour calculer  $\rho_{as}$ ,** nous pouvons appliquer à l'air l'équation caractéristique des gaz parfaits, à savoir :

$$\rho_{as} V = \frac{m_{as} RT}{M} \quad (2)$$

avec  $\rho_{as}$  pression absolue de l'air sec (en Pa),  
 $V$  volume que l'air sec occupe sous la pression  $\rho_{as}$  (en m<sup>3</sup>),  
 $m$  masse correspondante (en kg),  
 $M$  masse molaire de l'air sec  $M = 29$  kg,  
 $T$  température absolue de l'air sec (en K),  
 $T = \theta + 273$  ( $\theta$  en °Celsius),  
 $R$  constante universelle des gaz parfait.  $R = 8\,320$  (en J/kilomole, K).

■ Transformons l'équation (2), pour faire apparaître la **masse volumique :  $m_{as}$**

$$\rho_{as} = \frac{m_{as}}{V} = \frac{M \rho_{as}}{R T}$$

$\rho_{as}$  s'exprime en kg/m<sup>3</sup>

Et dans le cas de l'air sec :

$$M_{\text{air}} = 29 \text{ kg} \quad \text{et} \quad R = 8\,320 \text{ J/kilomole.K}$$

Soit :

$$\rho_{\text{as}} = \frac{p_{\text{as}}}{287 T} \quad (3)$$

avec  $\rho_{\text{as}}$  (en  $\text{kg/m}^3$ ),  
 $p_{\text{as}}$  (en Pa),  
 $T$  (en  $^{\circ}\text{K}$ ).

### Exemple

Considérons de l'air sec à  $20^{\circ}\text{C}$  et à la pression atmosphérique de 1,013 bar. Quelle est sa masse volumique ?

$$\rho_{\text{as}} = \frac{101\,300}{287 \times (273 + 20)} = 1,20 \text{ kg/m}^3$$

### ■ Volume massique de l'air sec

Le volume massique  $v_{\text{as}}$  de l'air sec est le volume occupé par l'unité de masse d'air sec. C'est donc l'inverse de la masse volumique.

$$v_{\text{as}} = \frac{1}{\rho_{\text{as}}} = \frac{V}{m_{\text{as}}}$$

$v_{\text{as}}$  s'exprime en  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

On en déduit, d'après l'équation (3) :

$$v_{\text{as}} = 287 \frac{T}{p_{\text{as}}}$$

Le volume massique de l'air sec à  $20^{\circ}\text{C}$  et 1,013 bar est :

$$v_{\text{as}} = \frac{1}{1,20} = 0,835 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

### 8.1.3 Chaleur massique de l'air sec

La chaleur massique de l'air sec est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse d'air sec pour élever sa température de  $1^{\circ}\text{C}$ .

Il est important pour les gaz de considérer si l'échauffement se fait à volume constant, ou à pression constante.

Dans le cas de l'air sec, on admet que l'échauffement se fait à pression constante.

La chaleur massique «  $C_{\text{as}}$  » est définie par la relation :

$$C_{\text{as}} = \frac{\Delta H}{m_{\text{as}} \cdot \Delta \theta} \quad \text{s'exprime en J/kg.}^{\circ}\text{C}.$$

avec  $\Delta H$  quantité de chaleur (en J ou kcal) nécessaire pour élever une masse  $m$  (en kg) de  $\Delta \theta$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ).

Dans la gamme des températures couramment rencontrée en bâtiment ( $-20 < \theta < 100^{\circ}\text{C}$ ), la chaleur massique de l'air sec  $C_{\text{as}}$  varie peu :

Ou

$$C_{\text{as}} = 0,24 \text{ kcal/kg.}^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

$$C_{\text{as}} = 1 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

Le tableau 18 indique ces variations.

NB : 1 kJ = 0,24 kcal et 1 kcal = 4,18 kJ.

## 8.2 Air humide

L'air humide est un mélange d'air sec et d'humidité, il se présente sous forme de :

- vapeur d'eau ;
- gouttelettes d'eau en suspension dans l'air (*brume, brouillard ou pluie*) ;
- particules de glace (*givre ou neige*).

Dans les études hygrothermiques, nous supposons, presque toujours, que l'humidité de l'air est essentiellement constituée par la vapeur d'eau.

La présence éventuelle de gouttelettes d'eau, ou de particules de glace en suspension dans l'air, ne sera qu'un cas particulier.

### 8.2.1 Pression partielle de la vapeur d'eau

L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, que nous pouvons considérer, en première approximation, comme des gaz parfaits. Appliquons donc à ce mélange la loi de Mariotte (encadré 2).

#### Encadré 2 – Rappel de la loi de Mariotte

Lorsqu'on a affaire à un mélange de gaz considérés comme parfaits, on peut encore lui appliquer la loi des gaz parfaits :

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

avec  $P$  pression totale du mélange mesuré (en Pa),  
 $m$  masse totale du mélange (en kg), à la température  $T$  (en  $^{\circ}\text{K}$ ).

D'autre part, on peut considérer que chaque gaz exerce dans le volume qu'il occupe, sa propre pression, appelée *pression partielle*. C'est-à-dire la pression qu'il exercerait s'il se trouvait seul dans le volume  $V$ .

Considérons deux gaz de pression partielle  $p_1$  et  $p_2$  et contenu dans un volume  $V$  à la température  $T$ . Nous pouvons écrire :

$$p_1 V = \frac{m_1}{M_1} RT$$

$$p_2 V = \frac{m_2}{M_2} RT$$

En faisant la somme de ces deux relations, on obtient :

$$(p_1 + p_2) V = \left( \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) RT$$

**Tableau 18 – Variations de la chaleur massique de l'air sec en fonction de la température**

Température (en $^{\circ}\text{C}$ )	- 40	0	20	40	60	80	100
$C_{\text{as}}$ (en $\text{kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$ )	1,003	1,007	1,007	1,01	1,014	1,014	1,017
$C_{\text{as}}$ (en $\text{kcal/kg.}^{\circ}\text{C}$ )	0,240	0,241	0,241	0,242	0,243	0,243	0,244

La somme  $\left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}\right)$  représente le nombre total de kilomole du mélange. Elle est égale à  $\frac{m}{M}$ .

Par conséquent

$$(p_1 + p_2) = p$$

C'est la loi de Mariotte.

La pression totale d'un mélange de gaz parfait est égale à la somme des pressions partielles des différents gaz, considérés chacun comme occupant le volume total du mélange à la température considérée.

En revenant à l'air humide, nous pouvons écrire :

$$p = p_{as} + p_v$$

avec  $p$  pression absolue de l'air humide,  
 $p_{as}$  pression partielle de l'air sec,  
 $p_v$  pression partielle de la vapeur d'eau.

Appliquons à la vapeur d'eau la loi des gaz parfaits, en sachant que :  $M_{H_2O} = 18 \text{ kg}$ , et  $RT = 8\,320 \text{ J/kilomole} \cdot ^\circ\text{K}$ , nous obtenons

$$p_v V = \frac{m_v}{M_{H_2O}} RT = 462 m_v T$$

Soit :

$$p_v = 462 \frac{m_v}{V} T \quad (6)$$

avec  $p_v$  pression partielle de la vapeur d'eau (en Pa),  
 $m_v$  masse de vapeur d'eau dans l'air humide,  
 $V$  volume occupé par l'air humide et en particulier par la vapeur d'eau (en  $\text{m}^3$ ),  
 $T$  température absolue de cet air (en  $^\circ\text{K}$ ).

La pression partielle de la vapeur d'eau  $p_v$  dépend essentiellement de la quantité de vapeur d'eau  $m_v$  contenue dans le volume  $V$  d'air humide et de la température  $T$  de cet air.

À une température donnée et constante, si l'on augmente la quantité d'humidité de l'air  $m_v$ , la pression partielle  $p_v$  croît jusqu'à une valeur maximale  $p_{vs}$  appelée pression partielle de vapeur saturante ou pression de saturation de la vapeur d'eau à une température donnée.

Pour cette valeur, l'air humide est saturé, autrement dit, toute addition de vapeur d'eau conduirait à la condensation instantanée de cette vapeur d'eau, ou au dépôt sous forme liquide de toute eau ajoutée. **On dit que l'eau et la vapeur d'eau sont en équilibre.**

Par conséquent, à chaque température de l'air humide correspond une pression de vapeur saturante bien déterminée.

Le tableau 19 donne, en fonction de la température, les pressions de vapeur saturante de l'eau pure. Aussi connues sous le nom de « Tables de Regnault ».

### Exemple.

Considérons  $5 \text{ m}^3$  d'air humide à la température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . La quantité d'humidité contenue dans ce volume est  $1 \text{ g}$ .

Calculer la pression partielle de la vapeur d'eau. À l'aide de l'égalité (6), on trouve :

$$p_v = 462 \frac{0,001 \times (273 + 25)}{5}$$

$$p_v = 27,6 \text{ Pa}$$

Pour quelle quantité d'humidité ce mélange serait-il saturé ? L'égalité (6) nous permet le calcul de «  $m_{vs}$  » :

$$m_{vs} = \frac{p_{vs} V}{462 T}$$

Soit

$$m_{vs} = \frac{3166,1 \times 5}{462 (273 + 25)}$$

$$m_{vs} = 0,115 \text{ kg}$$

## 8.2.2 Masse volumique et volume massique de l'air humide

La relation (6) nous permet d'écrire :

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{1}{462} \frac{p_v}{T}$$

$$\rho_v = \frac{p_v}{462 T} \quad (7)$$

avec  $\rho_v$  masse volumique de la vapeur d'eau de l'air humide (en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  
 $p_v$  pression partielle de la vapeur d'eau de l'air humide (en Pa),  
 $T$  température absolue de l'air humide (en  $^\circ\text{K}$ ).

Le volume massique «  $v_v$  » de la vapeur d'eau est l'inverse de la masse volumique :

$$v_v = \frac{1}{\rho_v} = \frac{462 T}{p_v} \quad (8)$$

$v_v$  s'exprime en  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

## 8.2.3 Teneur en humidité ou humidité spécifique

La quantité d'humidité contenue dans l'air sous forme de vapeur ou, éventuellement, d'eau et de glace en suspension peut varier. Pour la caractériser, il est commode de l'associer à l'unité de masse d'air sec.

De sorte que la masse totale d'humidité « associée » à un kilogramme d'air sec est appelée la teneur en humidité ou humidité spécifique.

On l'exprime en kilogramme (ou en gramme) d'humidité par kilogramme d'air sec contenu dans un certain volume d'air humide.

Nous adopterons «  $\Gamma$  » comme symbole de la teneur en humidité.  $\Gamma$  s'exprime en  $\text{kg}/\text{kg}_{as}$ , ou en  $\text{g}/\text{kg}_{as}$ .

$$\Gamma = \frac{m_h}{m_{as}} = \frac{\text{masse totale d'humidité}}{\text{masse d'air sec}} \quad (9)$$

Cette grandeur  $\Gamma$  peut varier de zéro ( $\Gamma = 0$  pour l'air sec puisque  $m_h = 0$ ) jusqu'à une valeur maximale obtenue lorsque l'air humide est saturé.

**Tableau 19 – Tables de Regnault – pression de vapeur saturante de l'eau pure**

Température (en °C)	Pression de vapeur saturante (en Pa)	Pression de vapeur saturante (en mmHg)	Température (en °C)	Pression de vapeur saturante (en Pa)	Pression de vapeur saturante (en mmHg)
0	610,7	4,5803	40	7 374,0	55,3050
1	656,6	4,9245	41	7 776,3	58,3223
2	705,5	5,2913	42	8 197,3	61,4798
3	757,6	5,6820	43	8 637,9	64,7843
4	813,1	6,0983	44	9 098,8	68,2410
5	872,1	6,5408	45	9 580,7	71,8553
6	934,9	7,0118	46	10 084	75,6300
7	1 001,6	7,4120	47	10 610	79,5750
8	1 072,4	8,0430	48	11 160	83,7000
9	1 147,7	8,6078	49	11 734	88,0050
10	1 227,5	9,2063	50	12 333	92,4975
11	1 312,2	9,8415	51	12 959	97,1925
12	1 401,9	10,5143	52	13 611	102,0825
13	1 497,1	11,2283	53	14 291	107,1825
14	1 597,8	11,9835	54	15 000	112,5000
15	1 704,5	12,7838	55	15 739	118,0425
16	1 817,3	13,6298	56	16 509	123,8175
17	1 936,7	14,5253	57	17 311	129,8325
18	2 062,8	15,4710	58	18 145	136,0875
19	2 196,2	16,4715	59	19 014	142,6050
20	2 337,0	17,5275	60	19 918	149,3850
21	2 485,6	18,6420	61	20 859	156,4425
22	2 642,5	19,8188	62	21 837	163,7775
23	2 807,9	21,0593	63	22 853	171,3975
24	2 982,3	22,3673	64	23 910	179,3250
25	3 166,1	23,7458	65	25 008	187,5600
26	3 359,7	25,1978	66	26 148	196,1100
27	3 563,6	26,7270	67	27 332	204,9900
28	3 778,2	28,3365	68	28 562	214,2150
29	4 003,9	30,0293	69	29 837	223,7775
30	4 241,3	31,8098	70	31 161	233,7075
31	4 490,8	33,6810	71	32 534	244,0050
32	4 753,0	35,6475	72	33 958	254,6850
33	5 028,4	37,7130	73	35 434	265,7550
34	5 317,5	39,8813	74	36 953	277,1475
35	5 620,9	42,1568	75	38 548	289,1100
36	5 939,3	44,5448	76	40 190	301,4250
37	6 273,1	47,0483	77	41 891	314,1825
38	6 623,1	49,6733	78	43 651	327,3825
39	6 989,8	52,4235	79	45 474	341,0550
40	7 374,0	55,3050	80	47 360	355,2000

Rappel : 1 mmHg = 133,33 Pa

Afin de calculer la teneur en humidité à la saturation, exprimons  $\Gamma$  en fonction de la pression partielle de vapeur d'eau. Avant saturation la masse d'humidité est égale à la masse de vapeur d'eau :

$$m_h = m_v$$

L'égalité (6) permet de calculer  $m_v$  :

$$m_v = \frac{V}{462 T} p_v$$

D'autre part l'égalité (2) peut s'écrire :

$$p_{as} = \frac{m_{as}}{V} = \frac{p_{as}}{287 T}$$

D'où

$$m_{as} = \frac{V}{287 T} p_{as}$$

Par conséquent :

$$\Gamma = \frac{m_v}{m_{as}} = 0,622 \frac{p_v}{p_{as}}$$

Or, nous savons que :

$$p = p_v + p_{as}$$

avec  $p$  pression absolue de l'air humide considéré.

Donc :

$$\Gamma = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (10)$$

Avec  $\Gamma$  en kg/kg<sub>as</sub>, et les pressions en Pa.

Ou :

$$\Gamma = 622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (11)$$

Avec  $\Gamma$  en g/kg<sub>as</sub> et les pressions en Pa.

À la saturation :  $p_v = p_{vs}$  (pression de vapeur de saturation), donc :

$$\Gamma_s = 622 \frac{p_{vs}}{p - p_{vs}} \quad (12)$$

#### Remarque importante

Les relations (11) et (12) sont fondamentales puisqu'elles nous permettent de calculer la teneur en humidité si l'on connaît la pression partielle de vapeur d'eau et *vice versa*.

$$p_v = \frac{\Gamma \cdot p}{622 + \Gamma} \quad (13)$$

La pression partielle de la vapeur  $p_v$  s'exprime en Pa, et la teneur en humidité  $\Gamma$  en g/kg<sub>as</sub>.

### 8.2.4 Degré hygrométrique ou humidité relative

La teneur en humidité de l'air ne peut pas être mesurée d'une façon simple. Elle se calcule, ou se détermine, à l'aide d'un diagramme. On a donc été amené à définir une autre grandeur

caractéristique de l'air humide qui puisse faire l'objet d'une mesure simple et directe.

**C'est le degré hygrométrique ou humidité relative.**

■ Le **degré hygrométrique** «  $\varphi$  » est le rapport de la pression partielle de vapeur de l'air humide à la température considérée à la pression partielle de vapeur saturante à la même température :

$$\varphi = \frac{p_{v,\theta}}{p_{vs,\theta}}$$

■ L'**humidité relative** «  $HR$  » est égale au degré hygrométrique exprimé par un pourcentage (%) :

$$HR = \varphi = 100 \frac{p_{v,\theta}}{p_{vs,\theta}} \quad (14)$$

#### Remarques

$\varphi$  % (ou  $HR$ ) est compris entre 0 et 100. si  $\varphi = 0$ , l'air est absolument sec ; si  $\varphi = 100$ , l'air est saturé.

Plus  $\varphi$  est élevé, plus on est près de la saturation ;

Connaissant la pression de vapeur saturante et le degré hygrométrique de l'air à une certaine température, on peut en déduire la teneur en humidité.

En effet :

$$p_v = \varphi p_{vs},$$

Et

$$\Gamma = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$$

Par conséquent :

$$\Gamma = 0,622 \frac{\varphi p_{vs}}{p - \varphi p_{vs}}$$

$$\Gamma = 0,622 \frac{\varphi p_{vs}}{100 p - \varphi p_{vs}} \quad (15)$$

avec  $\Gamma$  (en kg/kg<sub>as</sub>),  
 $p$  (en Pa),  
 $\varphi$  (en %).

#### Exemple

Calculer la teneur en humidité d'un certain volume d'air humide, dont la température est de 15 °C, le degré hygrométrique de 60 % et la pression de 101 300 Pa.

Pour une température de 15 °C la pression de la vapeur saturante est égale à 1 704,5 Pa (cf. tableau 19) :

$$\Gamma = 0,622 \frac{60 \times 1704,5}{100 \times 101\,300 - 60 \times 1704,5}$$

$$\Gamma = \frac{63\,612}{10\,027\,730} = 0,00634 \text{ kg / kg}_{as}$$

$$\Gamma = 6,34 \text{ g / kg d'air sec}$$

Le tableau 20 donne les valeurs pré calculées de la teneur en humidité «  $\Gamma$  » en g/kg<sub>as</sub>.



**Tableau 20 – Valeurs de  $\Gamma$  (en g/kg<sub>as</sub>) en fonction de la température et du degré hygrométrique  
(Pour une pression atmosphérique normale de 101 325 Pa)**

Températures (en °C)	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
0	0,38	0,75	1,13	1,50	1,88	2,26	2,64	3,01	3,39	3,77
1	0,40	0,81	1,23	1,62	2,02	2,43	2,83	3,24	3,65	4,06
2	0,44	0,87	1,30	1,74	2,17	2,61	3,04	3,48	3,92	4,36
3	0,46	0,93	1,45	1,86	2,33	2,80	3,27	3,74	4,21	4,68
4	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,01	3,51	4,02	4,52	5,03
5	0,54	1,07	1,61	2,15	2,69	3,23	3,77	4,31	4,85	5,40
6	0,57	1,15	1,73	2,30	2,88	3,46	4,04	4,62	5,20	5,79
7	0,62	1,23	1,85	2,47	3,09	3,71	4,33	4,96	5,58	6,21
8	0,66	1,32	1,98	2,64	3,31	3,97	4,64	5,31	5,98	6,65
9	0,70	1,41	2,12	2,83	3,54	4,25	4,97	5,68	6,40	7,12
10	0,75	1,51	2,27	3,03	3,79	4,55	5,32	6,08	6,85	7,62
11	0,81	1,62	2,42	3,24	4,05	4,87	5,69	6,51	7,33	8,16
12	0,86	1,72	2,59	3,46	4,33	5,20	6,08	6,96	7,84	8,72
13	0,92	1,84	2,77	3,70	4,63	5,56	6,50	7,44	8,38	9,32
14	0,98	1,97	2,96	3,95	4,94	5,94	6,94	7,94	8,95	9,96
15	1,05	2,10	3,15	4,21	5,27	6,34	7,41	8,48	9,56	10,6
16	1,12	2,24	3,35	4,49	5,63	6,76	7,91	9,05	10,2	11,4
17	1,19	2,39	3,59	4,79	6,00	7,21	8,48	9,66	10,9	12,1
18	1,27	2,54	3,82	5,10	6,40	7,70	9,05	10,3	11,6	12,9
19	1,35	2,71	4,07	5,44	6,82	8,19	9,66	11,0	12,4	13,8
20	1,44	2,88	4,33	5,79	7,26	8,73	10,3	11,7	13,2	14,7
21	1,56	3,07	4,58	6,17	7,72	9,29	10,9	12,4	14,0	15,6
22	1,66	3,26	4,90	6,57	8,22	9,88	11,6	13,2	14,8	16,6
23	1,77	3,47	5,21	6,97	8,74	10,5	12,3	14,1	15,9	17,7
24	1,89	3,68	5,54	7,45	9,20	11,2	13,1	15,0	16,9	18,9
25	2,01	3,91	5,89	8,00	9,87	11,9	13,9	15,9	18,0	20,1
26	2,13	4,15	6,25	8,35	10,5	12,6	14,8	16,9	19,1	21,3
27	2,27	4,41	6,63	8,88	11,1	13,4	15,7	18,0	20,3	22,7
28	2,41	4,67	7,04	9,42	11,8	14,2	16,7	19,1	21,6	24,1
29	2,56	4,96	7,45	9,99	12,5	15,1	17,7	20,3	22,9	25,6
30	2,61	5,25	7,91	10,6	13,3	16,0	18,8	21,5	24,3	27,2
31	2,77	5,56	8,38	11,2	14,1	17,0	19,9	22,9	25,8	28,8
32	2,93	5,89	8,88	11,9	14,9	18,0	21,1	24,3	27,4	30,6
33	3,10	6,24	9,40	12,6	15,8	19,1	22,4	25,7	29,1	
34	3,28	6,60	9,95	13,3	16,8	20,2	23,7	27,3	30,8	
35	3,47	6,98	10,5	14,1	17,7	21,4	25,1	28,9		
36	3,67	7,38	11,1	14,9	18,8	22,7	26,6	30,6		
37	3,88	7,80	11,8	15,9	19,9	24,0	28,2			
38	4,09	8,24	12,4	16,7	21,0	25,4	29,8			
39	4,32	8,70	13,1	17,7	22,2	26,9				
40	4,55	9,19	13,9	18,6	23,5	28,4				
41	4,81	9,70	14,7	19,7	24,8	30,0				
42	5,07	10,2	15,5	20,8	26,2					
43	5,35	10,8	16,3	22,0	27,7					
44	5,64	11,4	17,2	23,2	29,2					
45	5,94	12,0	18,2	24,5	30,9					
46	6,25	12,6	19,1	25,8						
47	6,58	13,3	20,2	27,2						
48	6,93	14,0	21,3	28,7						
49	7,29	14,7	22,4	30,2						
50	7,66	15,5	23,6							

# Écoulement du flux de la vapeur d'eau

## Théorie et réglementation

par **Paul DAHAN**

Ingénieur ETP, European engineer, ex-professeur à l'ESTP

### À lire également dans nos bases

DAHAN (P.). – *Pathologie de l'humidité – Parois revêtues en bâtiment – Étude d'un cas concret*. [C 7 146] (2009).

DAHAN (P.). – *Pathologie de l'humidité – Parois revêtues en bâtiment – Isolation thermique*. [C 7 142] (2008).

DAHAN (P.). – *Pathologie de l'humidité – Parois revêtues en bâtiment – Analyse du phénomène*. [C 7 144] (2008).

DAHAN (P.). – *Pathologie de l'humidité – Parois revêtues en bâtiment – Spécificités*. [C 7 140] (2008).

DAHAN (P.). – *Pathologie de l'humidité – Paroi simple – Cas concret : un voile en béton*. [C 7 132] (2008).

DAHAN (P.). – *Pathologie de l'humidité – Paroi simple – Exemples courants*. [C 7 134] (2008).

DAHAN (P.). – *Pathologie de l'humidité – Paroi simple – Phénomène de condensation*. [C 7 130] (2008).

### Normes et standards

#### Nouvelles normes

NF EN ISO 7783-1 09.1999

NF EN ISO 7783-2 07.1999 Détermination du coefficient de transmission de la vapeur d'eau.

La première décrit la méthode de la capsule pour feuil libres. La seconde détermine et classe le taux de transmission de la vapeur d'eau (perméabilité).

Elles ont maintenant le statut de normes françaises et font partie de la série des normes NF EN 1062-1 à 1062-11, sous le titre général :

« *Peintures et vernis – Produits de peintures et systèmes de revêtement pour maçonnerie et béton extérieurs* », et, qui sont constituées par les parties suivantes :

- partie 1 : classification (octobre 2004) ;
- partie 3 : détermination et classification de la perméabilité à l'eau liquide (février 1999) ;
- partie 6 : détermination de la perméabilité au dioxyde de carbone (novembre 2002) ;
- partie 7 : détermination de la résistance à la fissuration (août 2004) ;
- partie 11 : méthodes de conditionnement avant essais (novembre 2002).

#### Remarques

##### ■ Expression des résultats

Pour les **feuil appliqués sur supports poreux**, le calcul du taux de transmission de la vapeur d'eau à travers l'éprouvette revêtue, se calcule selon l'équation ci-dessous :

$$\frac{1}{V_{cs}} = \frac{1}{V_s} + \frac{1}{V}$$

avec  $V$  taux de transmission de la vapeur d'eau, en g/m<sup>2</sup>.j du revêtement,

$V_{cs}$  taux de transmission de la vapeur d'eau, en g/m<sup>2</sup>.j, du support poreux peint avec le produit (ou système) de peinture. (Indice « cs » pour « support peint » de l'anglais « coating support »).

Le coefficient de perméabilité,  $\delta$ , («  $\pi$  » dans la loi de Fick, cf. § 4.1), à la vapeur d'eau du revêtement, en gramme par mètre par jour par pascal est égal à :

$$\delta = \frac{Vd}{\Delta p}$$

avec  $V$  taux de transmission de la vapeur d'eau, en g/m<sup>2</sup>.j du revêtement,

$d$  épaisseur du feuillet, en mètre,

$\Delta p$  différence de pression de vapeur d'eau, en pascals, des deux faces du revêtement (1 mmHg = 133,33 Pa et 1 Pa = 75.10<sup>-4</sup> mmHg).

##### ■ NF EN 1062

Cette série de normes remplace les normes françaises NF P 84 401 à P 84 403.

Qu'est-ce qui caractérise chacune de ces nouvelles normes ?

- **NF EN 1062-1** 10.2004 Classification.

Cette norme fait état d'un classement (G.E.S.V.W.A.C.), avec l'attribution des indices suivants :

- G<sub>1 à 3</sub> : brillant spéculaire ;
- E<sub>1 à 5</sub> : épaisseur du feuillet sec, en  $\mu\text{m}$ , calculée à partir de la consommation<sup>(1)</sup> ( $E_1 \leq 50$  à  $E_5 > 400 \mu\text{m}$ ) ;
- S<sub>1 à 4</sub> : granulométrie ;
- V<sub>1 à 4</sub> : perméabilité à la vapeur d'eau ;
- W<sub>0 à 3</sub> : perméabilité à l'eau liquide ;
- A<sub>0 à 5</sub> : résistance à la fissuration ;
- C<sub>0 à 1</sub> : perméabilité au dioxyde de carbone.

(1) L'épaisseur « E », en  $\mu\text{m}$ , est donnée par l'équation suivante :

$$E = \frac{V_0 NV}{100}$$

avec  $NV$  teneur en matière non volatile, exprimée en pourcentage en volume (déterminée selon l'ISO 3233),

$V$  consommation, exprimée en millilitres par mètre carré (ml/m<sup>2</sup>).

**Exercice n° 1**

Qu'elle est l'épaisseur  $E_2$  de la sous couche  $NC_2$ , (cf. § 7.2 : *PV in extenso*), appliquée à raison de 500 g/m<sup>2</sup>, de masse volumique 1,246 g/cm<sup>3</sup> et dont l'extrait sec à 105 °C est égal à 69,6 % ?

$$V_2 = \frac{500}{1,246} = 401,3 \text{ cm}^3/\text{m}^2 = 401,3 \text{ ml/m}^2$$

Et

$$E_2 = \frac{401,3 \times 69,6}{100}$$

$$E_2 = 279,3 \text{ } \mu\text{m}$$

**Exercice n° 2**

Qu'elle est l'épaisseur « E » du système complet NC ?

Calcul de l'épaisseur  $E_1$  de l'impression  $NC_1$

$$V_1 = \frac{180}{0,906} = 198,7 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \quad \text{et} \quad E_1' = \frac{198,7 \times 11,0}{100} = 21,9 \text{ } \mu\text{m}$$

Calcul de l'épaisseur  $E_3$  de la finition  $NC_3$

$$V_3 = \frac{400}{1,375} = 290,9 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \quad \text{et} \quad E_3' = \frac{290,9 \times 70,0}{100} = 203,6 \text{ } \mu\text{m}$$

D'où :

$$E' = E_1' + E_2' + E_3'$$

$$E' = 21,9 + 279,3 + 203,6$$

$$E' = 504,8 \text{ } \mu\text{m}$$

- **NF EN 1062-3** 02.1999 Détermination et classification de la perméabilité à l'eau liquide.

La présente norme décrit une méthode de détermination de la perméabilité à l'eau liquide des systèmes de revêtements destinés à la maçonnerie et au béton extérieur. Elle évalue l'augmentation de la masse après immersion des blocs minéraux de grande porosité revêtus par le système de revêtement à tester.

La norme NF EN 1062-3 définit trois classes (cf. tableau 1).

- **NF EN 1062-6** 11.2002 Détermination de la perméabilité au dioxyde de carbone.

Cette norme européenne spécifie une méthode de détermination de la perméabilité au dioxyde de carbone des produits de peintures, des systèmes de revêtement et produits assimilés, destinés à la maçonnerie et au béton extérieur.

La perméabilité au dioxyde de carbone (*symbole « i »*) est la quantité de dioxyde de carbone en gramme (*g*) qui sera diffusée par jour (*j*) au travers d'un revêtement d'une surface de 1 m<sup>2</sup> sous l'action d'une pression partielle définie ou d'une différence de concentration.

Elle est exprimée en g/m<sup>2</sup>.j.

- **NF EN 1062-7** 08.2004 Détermination de la résistance à la fissuration.

La présente norme européenne spécifie deux méthodes permettant de déterminer la résistance à la fissuration des produits de peinture, systèmes de revêtement et produits concernées, pour maçonnerie et bétons extérieurs.

**Tableau 1 – Classification selon la perméabilité à l'eau liquide**

Classe	Perméabilité à l'eau liquide (en kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )
I : Grande	> 0,5
II : Moyenne	0,1 à 0,5
III : Faible	< 0,1

La résistance à la fissuration est la capacité du revêtement ou du système de revêtement à absorber l'allongement engendré par le mouvement des côtés de la fissure.

**Principe**

Après revêtement du subjectile, une fissure déterminée est créée en un point de fissuration nominale. Le revêtement appliqué est mis en tension au droit de la fissure. L'effort est exercé sur le revêtement selon l'une des méthodes suivantes.

**Méthode A**

La largeur de la fissure est agrandie progressivement à une vitesse donnée. La mesure prend fin lorsqu'apparaît une détérioration dans le revêtement ou dans le système de revêtement, ou lorsque la largeur de fissure requise est atteinte.

**Méthode B**

La largeur de la fissure varie périodiquement dans des limites définies. La mesure prend fin lorsqu'apparaît une détérioration dans le revêtement ou bien au terme du cycle dynamique.

La résistance à la fissuration peut être déterminée à diverses températures.

La température d'essai pour la classe A<sub>1</sub> est de 23 °C.

Une température de - 10 °C est recommandée pour la température d'essai pour les classes A<sub>2</sub> à A<sub>5</sub>.

D'autres températures peuvent être convenues entre les parties intéressées, par exemple 10 °C, 0 °C, - 10 °C, - 20 °C, - 30 °C et - 40 °C.

Dans ce cas la température d'essai doit être indiquée entre parenthèse après la classe, par exemple : A<sub>4</sub> (- 20 °C).

- **NF EN 1062-11** 11.2002 Méthodes de conditionnement avant essais.

La présente norme européenne spécifie quatre méthodes pour le conditionnement des éprouvettes d'essai préparées pour évaluer la résistance aux conditions climatiques des produits de peintures et des systèmes de revêtement appliqués sur maçonnerie et béton en extérieur.

**Température élevée**

Les éprouvettes d'essais sont stockées à une température de 70 °C pendant 7 jours.

Cette méthode permet des conclusions sur la variation éventuelle des propriétés physiques, chimiques et mécaniques des résines réagissant chimiquement, telles les résines thermodurcissables, qui se produit au cours du temps, spécialement aux températures élevées.

Cette méthode doit être particulièrement utilisée pour les produits de peinture dont le liant contient des résines thermodurcissables.

**Rayonnement UV et humidité**

Les éprouvettes d'essais sont soumises à un rayonnement de lampes type 2 (UV-A), pendant un cycle de 4 h, puis un cycle de 4 h d'humidité sans rayonnement UV, et, ainsi pour un total d'au moins 1 000 h avant d'effectuer les essais ultérieurs.

Pendant la phase sèche, la température est maintenue à 60 °C pendant 4 h.

Pendant la phase d'humidité, la température est maintenue à 50 °C pendant 4 h.

Cette méthode permet de tirer des conclusions sur les dégradations de la surface liées à des changements de propriétés mécaniques des revêtements qui réagiraient au rayonnement UV.

**Stockage dans l'eau**

Les éprouvettes d'essais sont soumises à 3 cycles comprenant les conditions suivantes :

- 24 h de stockage dans l'eau potable à 23 °C ;
- 24 h de séchage à 50 °C.

Cette méthode permet de tirer des conclusions sur les changements des propriétés des revêtements dont des constituants éventuels pourraient être hydrosolubles, et en particulier pour les peintures en phase aqueuse.

**Cycle gel – dégel**

Les éprouvettes d'essai sont soumises à 20 cycles (cf. norme pr EN 13687.1 ou 3 de 2001, méthode C, sous § b. voir le contenu de ces conditions, afin de connaître les changements éventuels par rapport à celles de la norme NF P 84 402).

Cette méthode permet de tirer des conclusions sur le comportement des surfaces mouillée à des températures inférieures à 0 °C, et particulièrement pour des produits poreux appliqués sur des surfaces sujettes à de fortes contraintes d'humidité : par exemple, les surfaces horizontales, les bordures et margelles continuellement soumises aux éclaboussures d'eau.

Pour mesurer l'écoulement du flux de vapeur, il faut déterminer le coefficient «  $\pi$  » de perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (ou de chacun des éléments le constituant).

Pour ce faire nous nous fondons sur la Loi de Fick.

Pour caractériser le coefficient «  $\pi$  », l'éprouvette à tester (*nue et/ou revêtue*, cf. § 4.4), est soumise à un gradient de pression qui crée ainsi un courant de diffusion de la vapeur d'eau à travers cette éprouvette.

Les anciennes normes sont indiqués ci-après.

### Anciennes normes

#### ■ NF P 84-402 et NF P 84 403 06.1989

Ces normes, de portée nationale, publiées par l'AFNOR s'appliquent aux revêtements à base de polymères en réaction des façades en services.

- **NF P 84 402** décrit les *Méthodes d'essais*. Elle permet de caractériser les performances des revêtements.

Comme nous l'avons vu, les conditions hygrothermiques pour la *détermination de l'indice conventionnel de transfert de la vapeur d'eau*, à la coupelle humide sont : eau de la coupelle thermorégulée à 38 °C placée dans une ambiance à 23 °C dont, HR = 50 % (cf. figure 11).

L'indice conventionnel de transfert de la vapeur d'eau en g/m<sup>2</sup>.24 h est exprimé par la formule suivante :

$$I_{TV} = \frac{M}{ST}$$

- avec **S** aire en m<sup>2</sup> de la surface d'essai de l'éprouvette (soit 0,22 m<sup>2</sup>),
- T** durée totale en jours entre la première et la dernière des trois dernières pesées (deux expositions de 24 h) soit 2 j,
- M** perte de masse en gramme de la cellule d'essai pendant la durée **T**.

On donne la transmission de la vapeur d'eau pour l'éprouvette témoin et la moyenne arithmétique pour les deux éprouvettes revêtues.

- **NF P 84 403** classe les divers revêtements et définit les performances de ces revêtements.

En ce qui concerne l'Imperméabilité, on affecte au système un indice allant de (I<sub>1</sub> à I<sub>4</sub>).

Plus l'indice est élevé, plus le revêtement possède des caractéristiques élevées de résistance à la fissuration du fond.

Tous les revêtements doivent posséder les caractéristiques minimales suivantes :

- I<sub>TV</sub>, de l'éprouvette revêtue, supérieur à 40 g/m<sup>2</sup>.24 h ;
- tenue au cloquage : pas de cloquage, lorsque l'eau de la coupelle est portée à 60 °C ;
- imperméabilité à l'eau liquide pendant les 7 jours de l'essai ;
- adhérence (*valeurs minimales*) :
  - 0,7 MPa en rupture adhésive,
  - 0,5 MPa en rupture cohésive.

**Nota** : Dans le DTU 42-1 (de septembre 1993) annexe B (*étude préalable*), pour apprécier « la bonne ou la mauvaise tenue » du revêtement en place, il faut noter qu'il y a :

- **bonne tenue**, si la contrainte moyenne d'adhérence est supérieure ou égale à :
  - 0,3 MPa (3 bars ou 3 kg/cm<sup>2</sup>) dans le cas de rupture cohésive du support,
  - 0,5 MPa (5 bars ou 5 kg/cm<sup>2</sup>) dans le cas de rupture cohésive du revêtement ou de rupture adhésive ;
- **mauvaise tenue** dans le cas contraire.

**Tableau 2 – Tables de Regnault. Pression de saturation (en mmHg)**

$\frac{\delta P}{\delta \theta}$	°C	- 0,0	- 0,1	- 0,2	- 0,3	- 0,4	- 0,5	- 0,6	- 0,7	- 0,8	- 0,9
0,35	- 0	4,58	4,54	4,51	4,47	4,44	4,40	4,36	4,33	4,29	4,26
0,35	- 1	4,22	4,19	4,15	4,12	4,08	4,05	4,02	3,98	3,95	3,91
0,32	- 2	3,88	3,85	3,82	3,79	3,76	3,72	3,69	3,66	3,63	3,60
0,30	- 3	3,57	3,54	3,51	3,48	3,45	3,42	3,40	3,37	3,34	3,31
0,28	- 4	3,28	3,25	3,23	3,20	3,17	3,14	3,12	3,09	3,06	3,04
0,26	- 5	3,01	2,98	2,96	2,93	2,91	2,88	2,86	2,84	2,81	2,79
0,24	- 6	2,76	2,74	2,71	2,69	2,67	2,65	2,62	2,60	2,58	2,55
0,22	- 7	2,53	2,51	2,49	2,47	2,45	2,43	2,40	2,38	2,36	2,34
0,20	- 8	2,32	2,30	2,28	2,26	2,24	2,22	2,21	2,19	2,17	2,15
0,19	- 9	2,13	2,11	2,09	2,08	2,06	2,04	2,02	2,00	1,99	1,97
0,18	- 10	1,95	1,93	1,92	1,90	1,88	1,87	1,85	1,83	1,81	1,80
0,16	- 11	1,78	1,76	1,75	1,73	1,72	1,71	1,69	1,68	1,66	1,64
0,14	- 12	1,63	1,62	1,60	1,59	1,57	1,56	1,55	1,53	1,52	1,50
0,13	- 13	1,49	1,48	1,46	1,45	1,44	1,43	1,41	1,40	1,39	1,37
0,12	- 14	1,36	1,35	1,34	1,32	1,31	1,30	1,29	1,28	1,26	1,25
0,11	- 15	1,24	1,23	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14
0,10	- 16	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04
0,09	- 17	1,03	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95
0,09	- 18	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86
0,08	- 19	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,79	0,78
0,07	- 20	0,77	0,76	0,76	0,75	0,74	0,73	0,73	0,72	0,72	0,71

**Tableau 2 – Tables de Regnault. Pression de saturation (en mmHg) (suite)**

$\frac{\delta P}{\delta \theta}$	°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,35	0	4,58	4,62	4,65	4,69	4,72	4,76	4,79	4,83	4,86	4,90
0,35	1	4,93	4,97	5,00	5,04	5,07	5,11	5,15	5,18	5,22	5,25
0,38	2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,48	5,52	5,56	5,60	5,64
0,40	3	5,68	5,72	5,76	5,81	5,85	5,89	5,93	5,97	6,02	6,06
0,43	4	6,10	6,14	6,19	6,23	6,28	6,32	6,36	6,41	6,45	6,50
0,45	5	6,54	6,59	6,63	6,68	6,73	6,77	6,82	6,87	6,92	6,96
0,49	6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46
0,52	7	7,51	7,56	7,62	7,67	7,73	7,78	7,83	7,89	7,95	8,0à
0,55	8	8,05	8,11	8,16	8,22	8,27	8,33	8,39	8,44	8,50	8,55
0,58	9	8,61	8,67	8,73	8,79	8,85	8,91	8,97	9,03	9,09	9,15
0,61	10	9,21	9,27	9,34	9,40	9,46	9,52	9,59	9,65	9,71	9,78
0,65	11	9,84	9,91	9,98	10,04	10,11	10,18	10,25	10,32	10,38	10,45
0,70	12	10,52	10,59	10,66	10,73	10,80	10,87	10,95	11,02	11,09	11,16
0,74	13	11,23	11,31	11,38	11,46	11,53	11,61	11,69	11,76	11,84	11,91
0,78	14	11,99	12,07	12,15	12,23	12,31	12,39	12,47	12,55	12,63	12,71
0,82	15	12,79	12,87	12,96	13,04	13,13	13,21	13,29	13,38	13,46	13,55
0,87	16	13,63	13,72	13,81	13,90	13,99	14,08	14,17	14,26	14,35	14,44
0,92	17	14,53	14,62	14,72	14,81	14,91	15,00	15,10	15,19	15,29	15,38
0,98	18	15,48	15,58	15,68	15,78	15,88	15,98	16,08	16,18	16,28	16,38
1,03	19	16,48	16,59	16,69	16,79	16,90	17,01	17,12	17,22	17,33	17,43
1,09	20	17,54	17,65	17,76	17,87	17,98	18,09	18,20	18,32	18,43	18,54
1,15	21	18,65	18,77	18,89	19,00	19,12	19,24	19,36	19,48	19,59	19,71
1,21	22	19,83	19,95	20,08	20,20	20,33	20,45	20,57	20,70	20,82	20,95
1,27	23	21,07	21,20	21,33	21,46	21,59	21,72	21,86	21,99	22,12	22,25
1,35	24	22,38	22,52	22,66	22,79	22,93	23,07	23,21	23,35	23,48	23,62
1,41	25	23,76	23,90	24,05	24,19	24,34	24,48	24,63	24,77	24,92	25,06
1,49	26	25,21	25,36	25,52	25,67	25,82	25,97	26,13	26,28	26,43	26,58
1,57	27	26,74	26,90	27,06	27,22	27,38	27,54	27,71	27,87	28,03	28,19
1,65	28	28,35	28,52	28,69	28,86	29,03	29,19	29,36	29,53	29,70	29,87
1,74	29	30,04	30,22	30,40	30,57	30,75	30,93	31,11	31,29	31,46	31,64
1,83	30	31,82	32,01	32,20	32,38	32,57	32,76	32,95	33,14	33,32	33,51
1,92	31	33,70	33,90	34,09	34,29	34,48	34,68	34,88	35,07	35,27	35,46
2,02	32	35,66	35,88	36,07	36,28	36,49	36,69	36,90	37,11	37,32	37,52
2,12	33	37,73	37,95	38,16	38,38	38,60	38,81	39,03	39,25	39,47	39,68
2,23	34	39,90	40,13	40,36	40,58	40,81	41,04	41,27	41,50	41,72	41,95
2,33	35	42,18	42,42	42,66	42,89	43,13	43,37	43,61	43,85	44,08	44,32
2,45	36	44,56	44,81	45,06	45,31	45,56	45,81	46,07	46,32	46,57	46,82
2,56	37	47,07	47,33	47,59	47,86	48,12	48,38	48,64	48,90	49,17	49,43
2,69	38	49,69	49,96	50,24	50,51	50,79	51,06	51,34	51,61	51,89	52,16
2,81	39	52,44	52,73	53,02	53,30	53,59	53,88	54,14	54,46	54,74	55,03
2,95	40	55,32	55,62	55,92	56,23	56,53	56,83	57,17	57,43	57,74	58,04
3,09	41	58,34	58,65	58,97	59,29	59,60	59,92	60,24	60,55	60,87	61,18
3,23	42	61,50	61,83	62,16	62,49	62,82	63,15	63,48	63,81	64,14	64,47
3,38	43	64,80	65,15	65,49	65,84	66,18	66,53	66,88	67,22	67,57	67,91
3,54	44	68,26	68,62	68,98	69,35	69,71	70,07	70,43	70,79	71,16	71,52
3,70	45	71,88	72,26	72,63	73,01	73,39	73,76	74,14	74,52	74,90	75,27
3,86	46	75,65	76,04	76,44	76,83	77,23	77,62	78,02	78,41	78,81	79,20
4,03	47	79,60	80,01	80,42	80,83	81,24	81,65	82,06	82,48	82,89	83,30
4,21	48	83,71	84,14	84,57	85,00	85,43	85,86	86,30	86,73	87,16	87,59
4,40	49	88,02	88,47	88,92	89,37	89,82	90,26	90,71	91,16	91,61	92,06

Tableau 2 - Tables de Regnault. Pression de saturation (en mmHg) (suite)

$\frac{\delta P}{\delta \theta}$	°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
4,59	50	92,51	92,98	93,45	93,92	94,39	94,85	95,32	95,79	96,26	96,73
4,80	51	97,20	97,69	98,18	98,67	99,16	99,65	100,1	100,6	101,1	101,6
5,00	52	102,1	102,6	103,1	103,6	104,1	104,6	105,2	105,7	106,2	106,7
5,20	53	107,2	107,7	108,3	108,8	109,3	109,8	110,4	110,9	111,4	112,0
5,40	54	112,5	113,0	113,6	114,1	114,7	115,2	115,8	116,3	116,9	117,4
5,65	55	118,0	118,6	119,2	119,7	120,3	120,9	121,5	122,1	122,6	123,2
5,90	56	123,8	124,4	125,0	125,6	126,2	126,8	127,4	128,0	128,6	129,2
6,15	57	129,8	130,4	131,1	131,7	132,3	132,9	133,6	134,2	134,8	135,5
6,40	58	136,1	136,7	137,4	138,0	138,7	139,3	140,0	140,6	141,3	141,9
6,65	59	142,6	143,3	144,0	144,6	145,3	146,0	146,7	147,4	148,0	148,7
6,90	60	149,4	150,1	150,8	151,5	152,2	152,9	153,6	154,3	155,0	155,7
7,20	61	156,4	157,1	157,9	158,6	159,4	160,1	160,8	161,6	162,3	163,1
7,50	62	163,8	164,6	165,3	166,1	166,8	167,6	168,4	169,1	169,9	170,6
7,75	63	171,4	172,2	173,0	173,8	174,6	175,3	176,1	176,9	177,7	178,5
8,05	64	179,3	180,1	180,9	181,8	182,6	183,4	184,2	185,0	185,9	186,7
8,40	65	187,5	188,4	189,2	190,1	190,9	191,8	192,7	193,5	194,4	195,2
8,75	66	196,1	197,0	197,9	198,8	199,7	200,5	201,4	202,3	203,2	204,1
9,05	67	205,0	205,9	206,8	207,8	208,7	209,6	210,5	211,4	212,4	213,3
9,35	68	214,2	215,1	216,1	217,0	218,0	218,9	219,9	220,8	221,8	222,7
9,75	69	223,7	224,7	225,7	226,7	227,7	228,7	229,7	230,7	231,7	232,7
10,10	70	233,7	234,7	235,7	236,8	237,8	238,8	239,8	240,8	241,9	242,93
10,45	71	243,9	245,0	246,0	247,1	248,2	249,2	250,3	251,4	252,5	253,5
10,95	72	254,6	255,7	256,8	257,9	259,0	260,1	261,3	262,4	263,5	264,6
11,30	73	265,7	266,8	268,0	269,1	270,3	271,4	272,6	273,7	274,9	276,0
12,10	75	289,1	290,3	291,6	292,8	294,0	295,2	296,5	297,7	298,9	300,2
12,50	76	301,4	302,7	303,9	305,2	306,5	307,7	309,0	310,3	311,6	321,8
12,95	77	314,1	315,4	316,7	318,1	319,4	320,7	322,0	323,3	324,7	326,0
13,45	78	327,3	328,7	330,0	331,4	332,8	334,1	335,5	336,9	338,3	339,6
13,90	79	341,0	342,4	343,8	345,2	346,6	348,0	349,5	350,9	352,3	353,7
14,35	80	355,1	356,6	358,0	359,5	360,9	362,4	363,9	365,3	366,8	368,2
14,84	81	369,7	371,2	372,7	374,3	375,8	377,3	378,8	380,3	381,9	383,4
15,34	82	384,9	386,5	388,0	389,6	391,2	392,7	394,3	395,9	397,5	399,0
15,83	83	400,6	402,2	403,8	405,5	407,1	408,7	410,3	411,9	413,6	415,2
16,33	84	416,8	418,5	420,2	421,8	423,5	425,2	426,9	428,6	430,2	431,1
16,82	85	433,6	435,3	437,1	438,8	440,5	442,2	444,0	445,7	447,4	449,2
17,32	86	450,9	452,7	454,5	456,2	458,0	459,8	461,6	463,4	465,1	466,9
17,81	87	468,7	470,5	472,4	474,2	476,1	477,9	479,7	481,6	483,4	485,3
18,31	88	487,1	489,0	490,9	492,8	494,7	496,6	498,5	500,4	502,3	504,2
19,30	89	506,1	508,1	510,0	512,0	514,0	515,9	517,9	519,9	521,9	523,8
19,79	90	525,8	527,8	529,9	531,9	533,9	535,9	538,0	540,0	542,0	544,1
20,29	91	546,1	548,2	550,3	552,4	554,5	556,6	558,6	560,7	562,8	564,9
21,28	92	567,0	569,2	571,3	573,5	575,6	577,8	580,0	582,1	584,3	586,4
21,77	93	588,6	590,8	593,1	595,3	597,5	599,7	602,0	604,2	606,4	608,7
22,77	94	610,9	613,2	615,5	617,8	620,1	622,4	624,7	627,0	629,3	631,6
23,26	95	633,9	636,3	638,6	641,0	643,4	645,7	648,1	650,5	652,9	655,2
23,75	96	657,6	660,0	662,5	664,9	667,4	669,8	672,3	674,7	677,2	679,6
24,74	97	682,1	684,6	687,1	689,7	692,2	694,7	697,2	699,7	702,3	704,8
25,24	98	707,3	709,9	712,5	715,1	717,7	720,2	722,8	725,4	728,0	730,6
26,23	99	733,2	735,9	738,6	741,2	743,9	746,6	749,3	752,0	754,6	757,3
27,22	100	760,0	762,8	765,5	768,3	771,0	773,8	776,6	779,3	782,1	784,8

# Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE  
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR  
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE  
SUR TOUS SUPPORTS  
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS  
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

## SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



### Questions aux experts\*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



### Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



### Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



### Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



### Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

\*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

## Les offres Techniques de l'Ingénieur

### INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

### MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

### MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

### ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

### ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

### GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

### ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

### TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

### AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

### INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

### MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

### PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

### SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

### BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

### CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

## OFFRE



### Le second oeuvre et l'équipement du bâtiment

Optimiser l'enveloppe et l'équipement du bâtiment pour améliorer le confort et réguler la consommation énergétique

Ref : TIP252WEB

## PRÉSENTATION

L'enveloppe du bâtiment protège, régule, isole et participe à la régulation thermique.  
La circulation de la lumière naturelle et l'éclairage artificiel participent directement au bien-être des occupants.  
Les aménagements intérieurs comprennent les revêtements (sols et murs), la gestion des eaux, les installations électriques et de gaz.

## VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP252WEB	Le second oeuvre et l'équipement du bâtiment	<b>1 045 €</b>	1	<b>1 045 €</b>
Total H.T en €				<b>1 045 €</b>
T.V.A : 5,5%				<b>57,48 €</b>
Total TTC en €				<b>1 102,48 €</b>

## VOS COORDONNÉES :

Civilité  M.  Mme

Prénom \_\_\_\_\_

Nom \_\_\_\_\_

Fonction \_\_\_\_\_

E-mail \_\_\_\_\_

Raison sociale \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_

Code postal \_\_\_\_\_

Ville \_\_\_\_\_

Pays \_\_\_\_\_

Date :

Signature et cachet obligatoire

## CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur [www.technique-ingenieur.fr](http://www.technique-ingenieur.fr)

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.