

Pathologie de l'humidité. Paroi simple

Cas concret : un voile en béton

par **Paul DAHAN**

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

1. Exposé du problème	C 7 132 - 2
2. Problèmes à résoudre	— 2
2.1 Comportement en hiver	— 2
2.2 Comportement en été.....	— 2
3. Méthodologie : utilisation du diagramme de Glaser	— 2
4. Voile en béton en période hivernale	— 2
4.1 Diagramme de Glaser par étape.....	— 2
4.2 Exploitation du diagramme de Glaser	— 6
4.3 Humidité relative intérieure à ne pas dépasser	— 8
5. Voile en béton en période estivale	— 8
5.1 Diagramme de Glaser.....	— 9
5.2 Exploitation du diagramme de Glaser	— 9
6. Choc thermique	— 10
7. Effets du choc thermique	— 10
7.1 Variations linéaires	— 10
7.2 Contraintes internes.....	— 10
8. Synthèse des résultats.....	— 11
9. Pathologie potentielle.....	— 11
9.1 Types de désordre	— 11
9.2 Analyse des causes de la pathologie	— 11
Pour en savoir plus	Doc. C 7 136
Formulaire	Form. C 7 137

Après avoir rappelé les principes de base du phénomène de condensation dans le dossier [C 7 130], le cas spécifique d'un voile en béton va être abordé dans ce dossier afin d'en faire une étude hygrothermique complète.

Nota : un tableau regroupant les symboles utilisés pour les articles [C 7 130] [C 7 132] et [C 7 134] est présenté à la fin de l'article [C 7 130].

1. Exposé du problème

Soit un mur de façade constitué par un voile en béton dont l'épaisseur est de 16 cm. Ce mur comporte, sur sa face intérieure, un enduit plâtre de 1 cm d'épaisseur et, à l'extérieur, un enduit hydraulique de 5 mm.

Supposons que ce mur soit soumis aux conditions hygro-thermiques extrêmes définies dans le tableau 1.

Tableau 1 – Conditions hygrométriques du cas étudié

Saison	Extérieur		Intérieur	
	Température T_e	Humidité relative HR_e	Température T_i	Humidité relative HR_i
Hiver	- 5 °C	95 %	19 °C	60 %
Été	+ 35 °C	35 %	22 °C	40 %

2. Problèmes à résoudre

2.1 Comportement en hiver

Il s'agit de pouvoir définir quel sera le comportement de la paroi ainsi définie en hiver et de déterminer :

- l'existence ou non de condensation sur le plâtre ;
- le type de condensation possible : superficielle et/ou interne ;
- la quantité éventuelle de celle(s)-ci, ainsi que le plan dans lequel elle(s) se produit(ent) ;
- l'humidité relative intérieure (HR_i) à ne pas dépasser pour éviter que le mur soit le siège de **condensations superficielles** ou de **condensations internes**.

2.2 Comportement en été

À partir de la théorie, il est possible de définir :

- l'intensité du **choc thermique** subi par l'enduit hydraulique ;
- les allongements unitaires et les contraintes de traction et de compression dans le plan d'adhérence de l'enduit hydraulique.

Hypothèses de base :

- températures médianes : $T_{me} = 15$ °C et $T_{mi} = 20$ °C ;
- module d'élasticité :
 - pour le béton : $E_b = 225\,000$ daN/cm²,
 - pour l'enduit hydraulique : $E_{e,h} = 75\,000$ daN/cm².

Rappel des unités

1 daN/cm² = 1,02 kg/cm² = 1,00 bar = 0,1 MPa.
 1 bar = 100 000 Pa.
 1 Pascal = 1 Newton/m² = 0,1 kg/m².

3. Méthodologie : utilisation du diagramme de Glaser

Pour obtenir un **diagramme de Glaser** il faut tracer un ensemble de trois courbes.

- **Courbe des températures.** Elle est fonction :

– d'une part du coefficient K (tel que défini dans les règles Th-K 77 [1]) de déperdition surfacique de la paroi considérée :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum_{n=1}^n \frac{e_n}{\lambda_n}$$

avec λ coefficient de conductivité thermique.

– d'autre part, des conditions thermiques (T_e et T_i) régnant de chaque côté de la paroi.

- **Courbe des pressions saturantes.** Elle est directement liée à la température de l'air occlus dans l'épaisseur de la paroi (cf. tables de Regnault [Form C 7 137]).

- **Courbe des pressions partielles.** Elle dépend :

– d'une part, de la résistance de diffusion à la vapeur d'eau (R_D) de la paroi :

$$R_D = \frac{e}{\pi} = \sum_{n=1}^n \frac{e_n}{\pi_n}$$

– d'autre part, des conditions d'humidité relative (HR_e et HR_i) régnant de chaque côté de la paroi.

Nota : le coefficient K devient le coefficient U de transmission surfacique dans la RT 2005 [2]. Les rapports $1/h_i$ et $1/h_e$ deviennent R_i et R_e dans la RT 2005.

Les valeurs respectives de ces coefficients sont récapitulées dans le formulaire [Form C 7 137].

Ils ne changent pas fondamentalement d'une réglementation à l'autre. La RT 2005 supprime des nuances qui existaient dans les règles Th-K 77.

4. Voile en béton en période hivernale

Les conditions hygrothermiques retenues sont celles décrites dans le tableau 1.

Pour obtenir le diagramme de Glaser en hiver, il faut établir la note de calcul dont les résultats seront repris dans un tableau de valeurs que nous compléterons au fur et à mesure et qui permettra de tracer les trois courbes.

4.1 Diagramme de Glaser par étape

4.1.1 Courbe des températures

4.1.1.1 Note de calcul

Le flux de chaleur, en hiver, se déplace des hautes températures ($T_i = 19$ °C) vers les basses températures ($T_e = - 5$ °C). Sachant que la chute de température dans chaque épaisseur e de matériau est proportionnelle à sa résistance thermique $R_{th} = e/\lambda$, le gradient thermique $\Delta T = 19 - (- 5) = 24$ °C peut être réparti entre les différentes couches élémentaires de la paroi (tableau 2).

Nota : les valeurs des coefficients de conductivité thermique λ des matériaux sont ceux donnés dans les règles Th-K 77, dont des extraits sont reproduits dans le formulaire [Form C 7 137].

Tableau 2 – Répartition du gradient de température dans la paroi

Résistances thermiques élémentaires de la paroi		Coeff. de proport.	Température	
			$\Delta T = 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_i = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,3738	8,7904	10,0296
Plâtre	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0972	2,3323	7,6972
Béton	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,3106	7,4536	0,2436
End.hydr.	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0146	0,3507	- 0,1070
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,2039	4,8930	- 5,0000
Total	$R_{th} = 0,2943$			
Coefficient de déperdition surfacique	$K = 3,3979 = 3,40 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$			

4.1.1.2 Épure

On porte sur un repère orthogonal cartésien :

- en abscisses, les épaisseurs des différentes couches de matériaux constituant la paroi. Dans la pratique, on utilise une feuille de papier quadrillé ($5 \times 5 \text{ mm}$) au format A 4 ($21 \times 29,7 \text{ cm}$) et à l'échelle 1/4 (soit 2,5 mm pour 1 cm d'épaisseur) ;
- en ordonnées, les températures en degré Celsius (à l'échelle 1/5, soit 5 mm pour $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Pour des raisons de mise en page, les figures 1 à 5 et 8 sont réduites par homothétie.

Portons sur le graphe les températures calculées (cf. colonne T_i du tableau 2) dans la note de calcul. La courbe des températures est constituée par une succession de segments de droite (figure 1).

4.1.2 Courbe des pressions saturantes

Étant une fonction directe de la température, avec l'aide des tables de Regnault (cf. [Form C 7 137]), on en déduit la pression saturante P_s correspondant à chaque température de la colonne T_i du tableau 2, qui devient alors le tableau 3.

4.1.2.1 Note de calcul

Dans la colonne « pression saturante » du tableau 3, on porte les valeurs de P_s correspondantes (trouvées dans les tables ou calculées par interpolation).

Ainsi, pour $T_i = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ correspond $P_{s(19 \text{ }^{\circ}\text{C})} = 16,48 \text{ mmHg}$.

Pour des raisons de précision des calculs, nécessaire ultérieurement, les chiffres présenteront 4 décimales après la virgule.

Pour $T_i = 10,0296 \text{ }^{\circ}\text{C}$, il faut interpoler les valeurs trouvées pour $10,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $10,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dans les tables de Regnault, soit respectivement : 9,21 et 9,27 mmHg. Ce qui donne :

$$P_{s(10,0296)} = 9,21 + \frac{9,27 - 9,21}{10,1 - 10,0} \cdot 0,0296$$

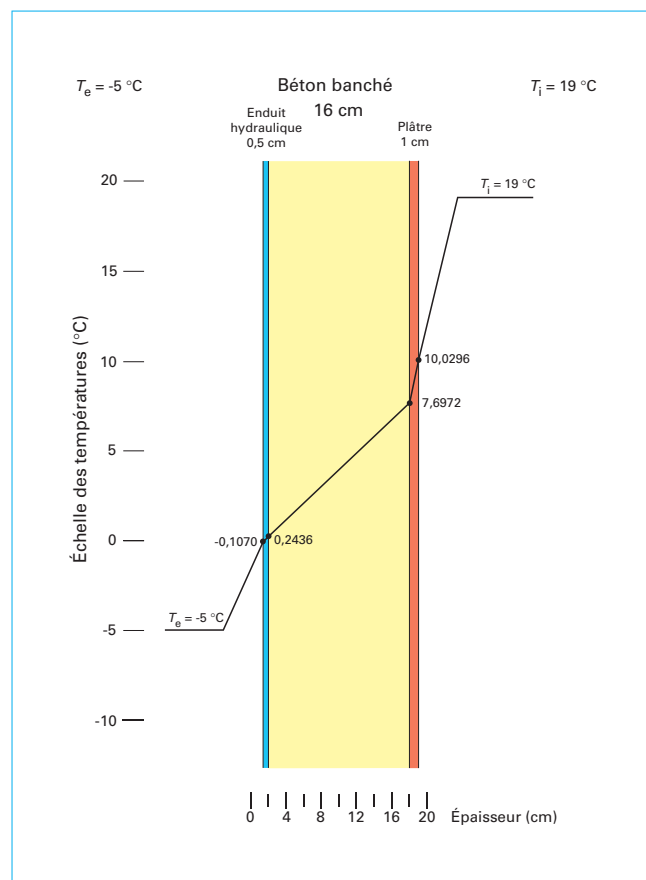
**Figure 1 – Construction du diagramme de Glaser : courbe des températures**

Tableau 3 – Courbe des pressions saturantes					
Résistances thermiques élémentaires de la paroi		Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_i = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Plâtre	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,3738	8,7904	10,0296	9,2278
	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0972	2,3323	7,6972	7,8883
Béton	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,3106	7,4536	0,2436	4,6674
End.hydr.	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0146	0,3507	– 0,1070	4,5379
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,2039	4,8930	– 5,0000	3,01
Total		$R_{th} = 0,2943$			
Coefficient de déperdition surfacique		$K = 3,3979 = 3,40 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$			

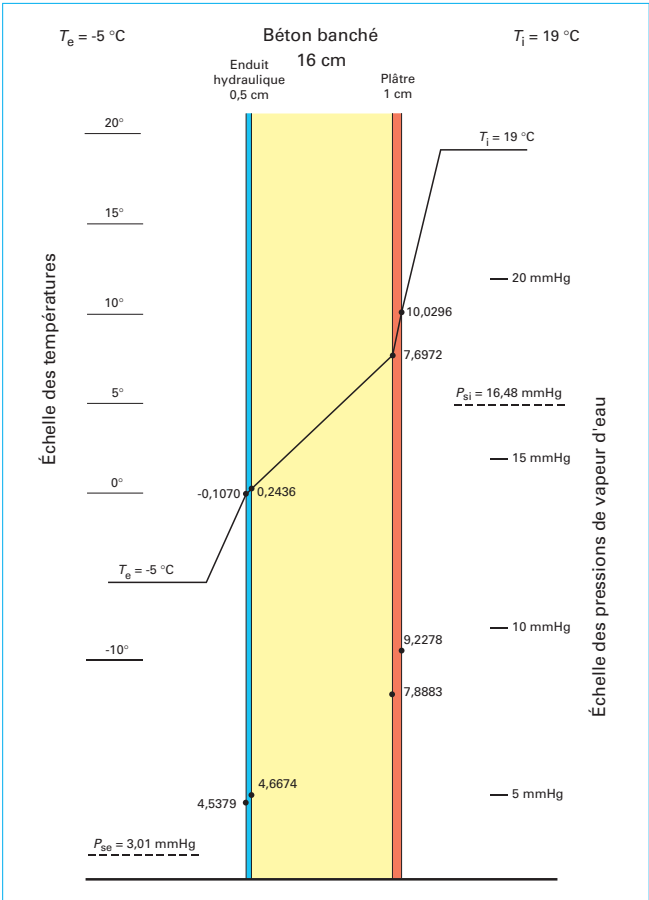


Figure 2 – Prise en compte des pressions de la vapeur d'eau

soit :

$$P_{s\ (10,0296)} = 9,2278 \text{ mmHg}$$

On complète ainsi le tableau 3.

4.1.2.2 Épure

Sur la figure 1, qui devient la figure 2, on trace en ordonnées, à droite du mur, l'axe des pressions de la vapeur d'eau.

La pression saturante de la vapeur d'eau est une fonction croissante de la température. C'est une courbe « concave », ayant une faible courbure. Pour avoir un tracé aussi précis que possible, il faut calculer un nombre de points suffisants de températures intermédiaires à l'intérieur du voile de béton de 16 cm, espacés de « n cm ».

Dans notre étude, prenons arbitrairement n = 4 cm. Désignons par :

- θ_i la température sur la face intérieure du voile en béton : $\theta_i = 7,6972 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- θ_e la température sur la face extérieure du voile en béton : $\theta_e = 0,2436 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

La chute $\Delta\theta_n$ de température tout les « n cm » est égale à :

$$\Delta\theta_n = (\theta_i - \theta_e) \cdot \frac{n}{e}$$

avec e (cm) épaisseur du voile.

Pour n = 4 cm et e = 16 cm :

$$\Delta\theta_4 = (7,6972 - 0,2436) \cdot \frac{4}{16}$$

soit :

$$\Delta\theta_4 = 1,8634 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Tableau 4 – Courbe de pressions partielles

Résist. à la diffusion e_n / π_n	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 24 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_i = 19 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,3738	8,7904	10,0296	9,2278
Plâtre 0,77	Plâtre $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0972	2,3323	7,6972	7,8883
Béton 53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,3106	7,4536	0,2436	4,6674
End. hydr. 2,50	End.hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0146	0,3507	- 0,1070	4,5379
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,2039	4,8930	- 5,0000	3,01
Total $R_D = 56,60 \text{ (1)}$	Total $R_{th} = 0,2943$				
	Coefficient de déperdition surfacique $K = 3,3979 = 3,40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$				

(1) en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$.

Ce qui permet le calcul de θ_n et P_{s_n} intermédiaires :

- $\theta_4 = 7,6972 - 1,8634 = 5,8338 \text{ }^\circ\text{C}$ d'où $P_{s_4} = 6,9335 \text{ mmHg}$;
- $\theta_8 = 5,8338 - 1,8634 = 3,9704 \text{ }^\circ\text{C}$ d'où $P_{s_8} = 6,0882 \text{ mmHg}$;
- $\theta_{12} = 3,9704 - 1,8634 = 2,1070 \text{ }^\circ\text{C}$ d'où $P_{s_{12}} = 5,3328 \text{ mmHg}$.

On porte sur la figure 3 les points intermédiaires de pressions saturantes ainsi calculés. On les relie par une courbe.

On trace ainsi la courbe des pressions saturantes de la vapeur d'eau en fonction de la température régnant à l'intérieur du voile de béton.

4.1.3 Courbe des pressions partielles

Selon la loi de Fick, la chute de pression à travers la paroi est proportionnelle à la résistance de diffusion : $R_{D_n} = e_n / \pi_n$ des n éléments de la paroi traversés par la vapeur d'eau.

4.1.3.1 Note de calcul

Dans le tableau 3 qui devient tableau 4, on complète la colonne de gauche qui correspond aux résistances élémentaires de diffusion à la vapeur d'eau e_n / π_n de chaque constituant de la paroi. L'épaisseur e_n est exprimée en mètres. Le coefficient de perméabilité π_n est exprimé en $\text{g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$.

• **À l'intérieur du local**, l'humidité relative est égale à $HR_i = 60 \%$, ce qui veut dire que dans cet air à $19 \text{ }^\circ\text{C}$ la pression partielle P_{pi} de la vapeur d'eau est de :

$$P_{pi} = P_{s_{19}} \times 60 / 100 = 16,48 \times 60 / 100 = 9,8880 \text{ mmHg}$$

• **À l'extérieur**, $HR_e = 95 \%$, donc la pression partielle P_{pe} est de :

$$P_{pe} = P_{s_{-5}} \times 95 / 100 = 3,01 \times 95 / 100 = 2,8595 \text{ mmHg}$$

Sous l'effet du gradient de pression ΔP_p représentant la différence des pressions partielles :

$$\Delta P_p = P_{pi} - P_{pe} = 9,8880 - 2,8595 = 7,0285 \text{ mmHg}$$

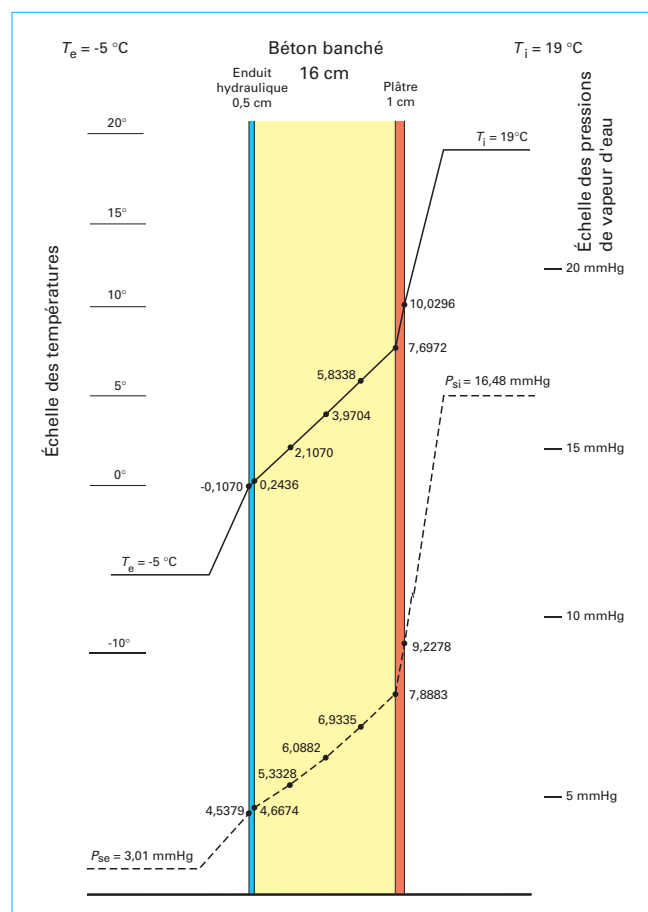


Figure 3 – Construction du diagramme de Glaser : courbe des pressions saturantes de la vapeur d'eau à l'intérieur du voile de béton

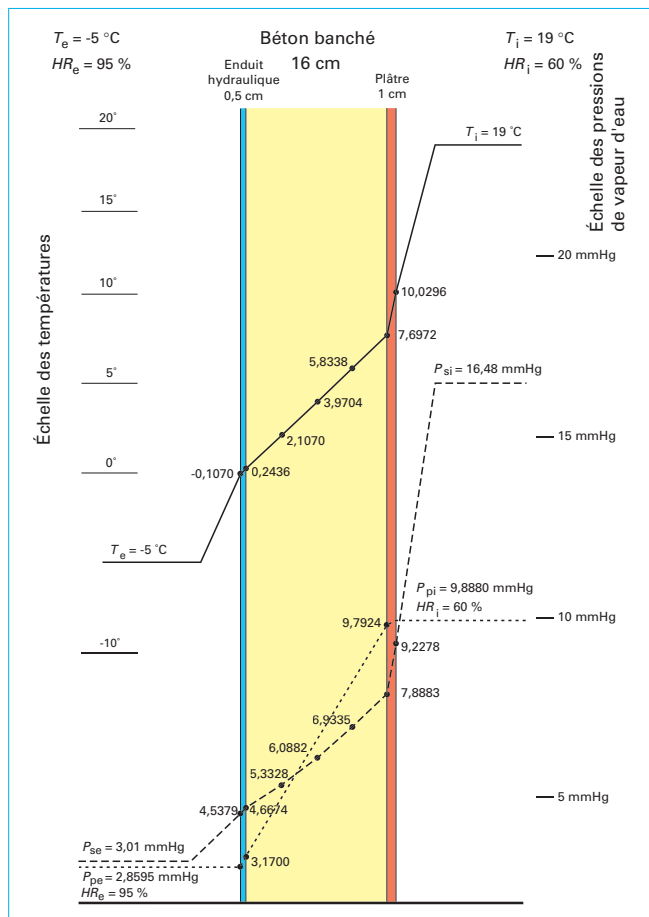


Figure 4 – Construction du diagramme de Glaser : courbe des pressions partielles

La vapeur d'eau va migrer à travers la paroi entre l'intérieur et l'extérieur. La chute de pression dans chaque élément de la paroi est proportionnelle à la résistance de diffusion $R_{D_n} = e_n / \pi_n$ de l'élément traversé :

$$\Delta P_{p_n} = \Delta P_p \times \frac{R_{D_n}}{R_D} \text{ (en mmHg)}$$

- Pour le plâtre : $\Delta P_{p.pl.} = 7,0285 \times 0,77/56,60 = 0,0956 \text{ mmHg}$
- Pour le béton : $\Delta P_{p.b.} = 7,0285 \times 53,33/56,60 = 6,6224 \text{ mmHg}$
- Pour l'enduit hydraulique :
 $\Delta P_{p.e.h.} = 7,0285 \times 2,50/56,60 = 0,3104 \text{ mmHg}$.

Calculons la pression partielle de la vapeur après avoir traversé :

- le plâtre : $P_{p.pl.} = 9,8880 - 0,0956 = 9,7924 \text{ mmHg}$
- le béton : $P_{p.b.} = 9,7924 - 6,6224 = 3,1700 \text{ mmHg}$
- l'enduit hydraulique :
 $P_{p.e.h.} = 3,1700 - 0,3105 = 2,8595 \text{ mmHg}$.

4.1.3.2 Épure

Reportons sur la figure 3, qui devient la figure 4, les valeurs de P_p calculées au paragraphe 4.1.3.1.

La courbe de pression partielle est une fonction linéaire (loi de Fick) de la résistance de diffusion de la vapeur d'eau à travers la

paroi. Elle est constituée par une série de segments de droite qui relient les points calculés.

Nous remarquons que la courbe des pressions partielles au niveau du plâtre a une valeur (9,8880 mmHg) supérieure à celle de la saturation (9,2278 mmHg) de la vapeur d'eau dans l'air en contact avec lui (le plâtre), dont la température est de :

$$\theta_{i \text{ plâtre}} = 10,0296 \text{ °C}$$

La vapeur d'eau, en contact avec le plâtre, est donc en **surpression** de :

$$9,8880 - 9,2278 = 0,6602 \text{ mmHg}$$

Pour faire baisser la valeur de cette surpression, il faut et il suffit que la vapeur d'eau change d'état, en se transformant en « eau liquide ».

Le changement se produit au rythme du coefficient de transfert :

$$B = 14 \text{ g / m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg, en air calme}$$

- Sur le plan physique, cela se traduit par une **condensation superficielle**, absorbée par la face extérieure du plâtre, dont la quantité q_1 est égale à :

$$q_1 = 0,6602 \times 14 = 9,2428 \text{ g / m}^2 \cdot \text{h}$$

tant que le régime hygrothermique est permanent.

- Sur le plan graphique, la courbe des pressions partielles ne peut pas être supérieure à la courbe des pressions saturantes. Au maximum, elle est confondue avec cette dernière.

Sur la figure 4, dans un environnement proche de la face extérieure du plâtre (3 cm d'une façon arbitraire) on trace un segment de droite oblique qui part de la pression partielle intérieure ($P_{pi} = 9,8880 \text{ mmHg}$) et joint le point de la pression saturante ($P_{si} = 9,2278 \text{ mmHg}$) correspondant à la température $\theta_{i \text{ plâtre}} = 10,0296 \text{ °C}$ qui règne sur cette face extérieure du plâtre.

– Dans le plâtre (1 cm), les deux courbes (pression partielle et pression saturante) sont **confondues**.

La pression de la vapeur entrante est : $P_{p.pl.entr} = 9,2278 \text{ mmHg}$

La pression de la vapeur sortante est : $P_{p.pl.sort} = 7,8883 \text{ mmHg}$

– Dans le béton (16 cm), la courbe des pressions partielles sera représentée par le segment de droite qui joint les points de pression :

- entrante : $P_{p.b.entr} = 7,8883 \text{ mmHg}$;
- sortante : $P_{p.b.sort} = 3,1700 \text{ mmHg}$.

– Dans l'enduit hydraulique, la courbe des pressions partielles est représentée par le segment de droite joignant les points de pression $P_{p.e.h.entr} = 3,1700 \text{ mmHg}$ à $P_{p.e.h.sort} = 2,8595 \text{ mmHg}$.

D'où la figure 5.

4.1.4 Conclusion

L'ensemble des trois courbes « température + pression saturante + pression partielle » forme le **diagramme de Glaser** (figure 6).

4.2 Exploitation du diagramme de Glaser

4.2.1 Condensations

Le fait que la courbe des pressions partielles soit supérieure, ou sécante, à la courbe des pressions saturantes permet de dire qualitativement qu'il y aura **condensation** :

- soit **superficielle**, s'il s'agit d'un plan séparant « matière/air » ;
- soit **interne**, s'il s'agit d'un plan séparant « deux matériaux », ou à l'intérieur de ce matériau.

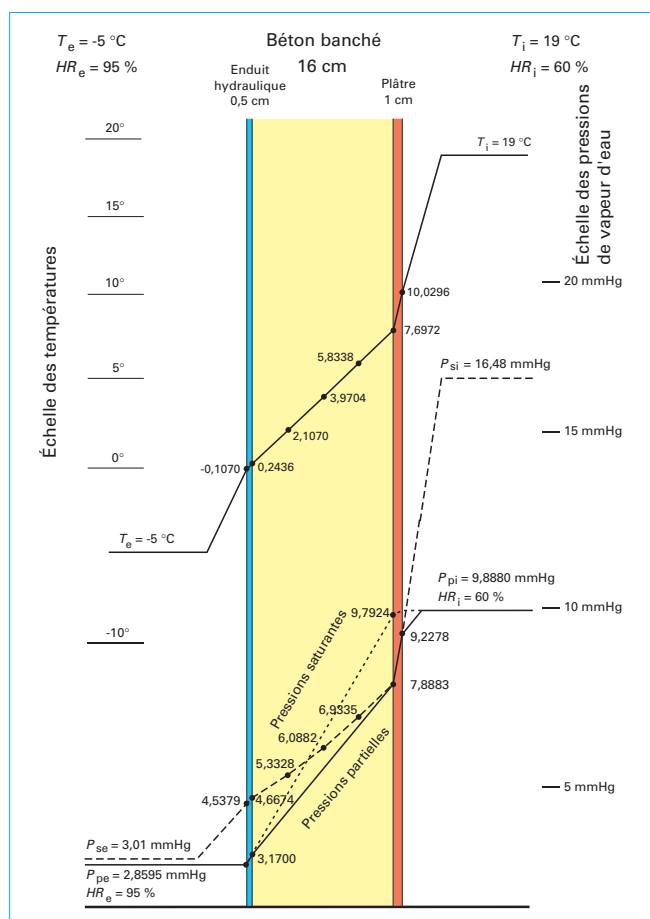


Figure 5 – Diagramme de Glaser : courbe des pressions partielles modifiée

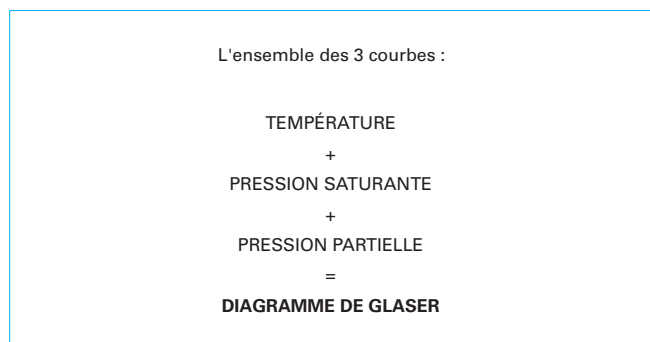


Figure 6 – Diagramme de Glaser par étape

4.2.2 Calcul des flux de vapeur d'eau

Pour quantifier la vapeur d'eau potentiellement condensable, il faut calculer la valeur du flux entrant g_e et celle du flux sortant g_s .

Si $g_e > g_s$, une quantité q de vapeur d'eau (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$) se condensera et sera égale à :

$$q = g_e - g_s$$

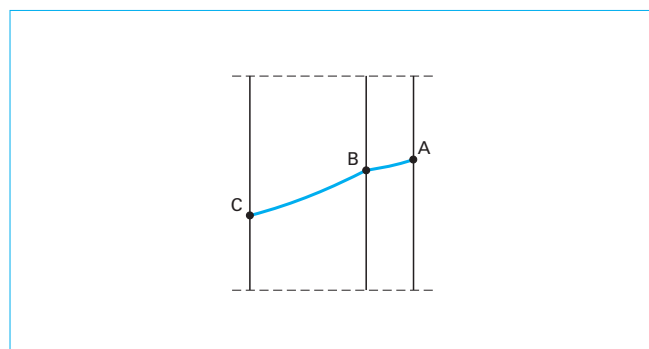


Figure 7 – Calcul des flux de vapeur d'eau

Le flux de vapeur se calcule à l'aide de la formule générale de la loi de Fick :

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

avec $R_D = \frac{e}{\pi}$

$$g = \frac{P_{p1} - P_{p2}}{R_D} \quad (1)$$

Lorsque la courbe des pressions partielles se confond avec la courbe des pressions saturantes, le flux arrivant ou sortant au point « B » (figure 7) est donné par la formule (2) :

$$g_B = \frac{\pi}{\lambda} \cdot K \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{dP}{d\theta} \right)_{\theta=\theta_B} \quad (2)$$

avec g_B flux de vapeur arrivant (ou sortant) au point de température $T = \theta_B$,

π (en $\text{g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$) perméabilité à la vapeur d'eau de la couche considérée, au point de tangence de la courbe de pression partielle à la courbe de pression saturante,

λ (en $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) conductivité thermique de la couche considérée au point « B » de tangence,

K (en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) coefficient de déperdition surfacique de l'ensemble de la paroi,

ΔT (en $^\circ\text{C}$) gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur,

$\left(\frac{dP}{d\theta} \right)_{\theta=\theta_B}$ pente de la tangente à la courbe de pression saturante au point de tangence correspondant à la température $T = \theta_B$ (cf. tables de Regnault [Form C 7 137]).

4.2.3 Application

À partir de la figure 5 et des formules (1) et (2) (§ 4.2.2), calculons les différents flux g (arrivant, entrant ou sortant) :

– flux arrivant sur le plâtre :

$$g_1 = (9,8880 - 9,2278) / (0,03/900 \cdot 10^{-4}) = 1,9806 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$$

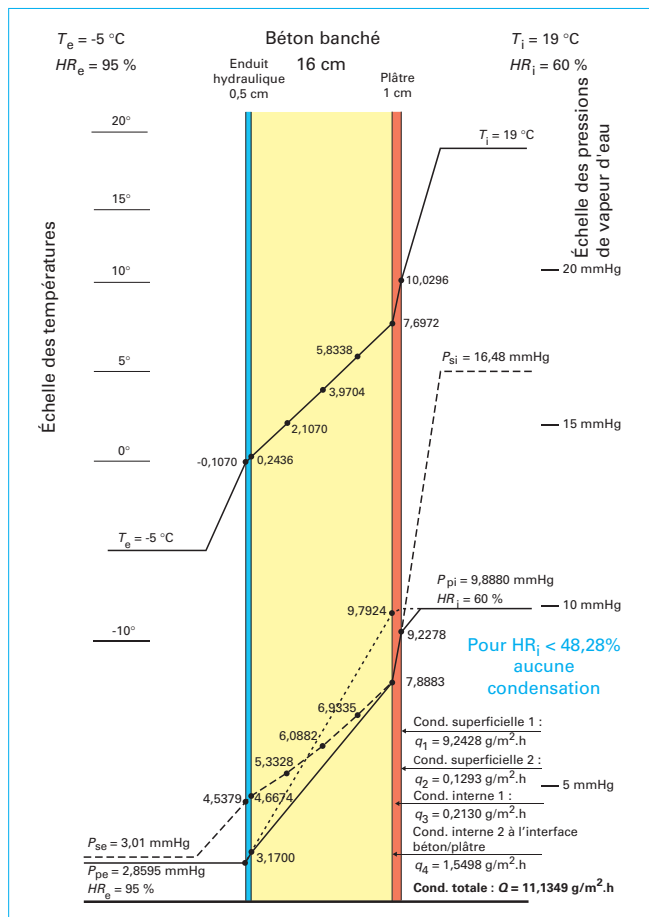


Figure 8 - Diagramme de Glaser, condensation en période hivernale

- flux entrant dans le plâtre :
 $g_2 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 3,3979 \times 24 \times 0,6112 = 1,8513 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux sortant du plâtre :
 $g_3 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 3,3979 \times 24 \times 0,5409 = 1,6383 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux traversant le béton :
 $g_4 = (7,8883 - 3,1700) / 53,33 = 0,0885 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux traversant l'enduit hydraulique :
 $g_5 = (3,1700 - 2,8596) / 2,50 = 0,1242 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$.

Lorsque le flux arrivant, g_a , d'une couche est supérieur au flux g_e entrant dans l'autre couche, il se produit en surface de la 1^{re} couche une condensation dont la quantité q est égale à la différence des flux : $q = g_a - g_e$

- condensation superficielle sur le plâtre :
 $q_2 = g_1 - g_2 = 1,9806 - 1,8513 = 0,1293 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- condensation interne dans le plâtre :
 $q_3 = g_2 - g_3 = 1,8513 - 1,6383 = 0,2130 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- condensation interface béton/plâtre :
 $q_4 = g_3 - g_4 = 1,6383 - 0,0885 = 1,5498 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- condensation interne dans le béton : aucune, car la courbe P_p est inférieure à la courbe P_s ;
- condensation interne dans l'enduit hydraulique : aucune, car la courbe P_p est inférieure à la courbe P_s .

Portons sur la figure 8 les quatre condensations : q_1 , q_2 , q_3 et q_4 .

4.3 Humidité relative intérieure à ne pas dépasser

4.3.1 Pour éviter les condensations superficielles

Pour qu'il n'y ait pas de condensations superficielles sur le plâtre, il faut que la pression partielle intérieure P_{pi} de la vapeur d'eau soit égale (ou inférieure) à la pression saturante intérieure P_{si} de la vapeur d'eau en contact avec la face extérieure du plâtre, dont la température est $\theta_{i \text{ pl.}} = 10,0296^\circ \text{C}$.

$$P_{pi} < P_{s \theta_i=10,0296} = 9,2278 \text{ mmHg}$$

Ce qui permet le calcul de l'humidité relative intérieure HR_i limite à ne pas dépasser :

$$HR_{i \text{ limite}} < (P_{s \theta_i=10,0296} / P_{s T_i=19^\circ \text{C}}) \times 100$$

$$HR_{i \text{ limite}} < (9,2278 / 16,48) \times 100$$

$$HR_{i \text{ limite}} < 55,99 \%$$

Il faut et il suffit, pour que les condensations q_1 et q_2 ne puissent pas s'établir, que : $HR_{i \text{ limite}} \leq 55 \%$, quand $T_i = 19^\circ \text{C}$.

4.3.2 Pour éviter les condensations internes

Pour qu'il n'y ait pas de condensations internes dans le plâtre, il suffit que la courbe des pressions partielles soit inférieure (ou au maximum tangente en un seul point) à la courbe des pressions saturantes. Il faut donc que le flux qui migre jusqu'au point de tangence soit égal au flux de vapeur migrant dans l'ensemble de la paroi.

Dans le cas présent, le point de pression maximum (point de tangence) que la courbe des pressions partielles ne doit pas dépasser est la pression de saturation régnant à « l'interface béton/plâtre », à savoir : $P_{s \text{ b./pl.}} = 7,8883 \text{ mmHg}$.

Soit $P_{p \text{ xi}}$ la pression partielle intérieure recherchée, on peut donc écrire l'égalité suivante :

$$(P_{p \text{ xi}} - P_{s \text{ b./pl.}}) / R_{D \text{ pl.}} = (P_{p \text{ xi}} - P_{p \text{ e}}) / R_D$$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, on trouve :

$$(P_{p \text{ xi}} - 7,8883) / 0,77 = (P_{p \text{ xi}} - 2,8596) / 56,60$$

Soit $(56,60 - 0,77) \times P_{p \text{ xi}} = (56,60 \times 7,8883) - (0,77 \times 2,8596)$

$$P_{p \text{ xi}} = 444,2759 / 55,83 = 7,9577 \text{ mmHg}$$

L'humidité relative intérieure limite à ne pas dépasser est donnée par la relation :

$$HR_{i \text{ limite}} < (P_{p \text{ xi}} / P_{si}) \times 100$$

$$HR_{i \text{ limite}} < (7,9577 / 16,48) \times 100$$

$$HR_{i \text{ limite}} < 48,28 \%$$

On peut ainsi affirmer, pour que les condensations q_3 et q_4 ne puissent pas s'établir, ou pour que la migration de la vapeur d'eau à travers la paroi (dans les conditions hivernales retenues) se fasse à l'état vapeur la condition à remplir est : $HR_i \leq 48 \%$ quand : $T_i = 19^\circ \text{C}$.

5. Voile de béton en période estivale

En procédant aux mêmes calculs que pour le voile de béton en période hivernale et en prenant les données du tableau 1, il est possible d'établir le diagramme de Glaser de ce même voile de béton en été.

Tableau 5 – Note de calcul en été

Tableau 5 – Note de calcul en été							
Résist. à la diffusion e_n / π_n		Résistance thermiques élémentaires de la paroi		Coeff. de proport.	Température		Pression saturante
					$\Delta T = 13\text{ °C}$	$T_i = 22\text{ °C}$	$P_{si} = 19,83\text{ mmHg}$
			$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,3738	4,8590	26,8590	26,5185
Plâtre	0,77	Plâtre	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0972	1,2633	28,1223	28,5579
Béton	53,33	Béton	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,3106	4,0374	32,1597	35,9934
End.hydr.	2,50	End.hydr.	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0146	0,1899	32,3496	36,3842
			$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,2039	2,6504	35,0000	42,18
Total $R_D = 56,60$		Total $R_{th} = 0,2943$					
		Coefficient de déperdition surfacique $K = 3,3979 = 3,40\text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$					

5.1 Diagramme de Glaser

5.1.1 Note de calcul

Le tableau 5 présente la note de calcul nécessaire au tracé des trois courbes constituant le diagramme de Glaser.

5.1.2 Épure

Traçons, avec la même méthodologie, sur la figure 9, l'ensemble des trois courbes :

- les températures ;
- les pressions saturantes ;
- les pressions partielles.

Portons sur deux axes orthogonaux cartésiens :

- en abscisses : les épaisseurs (échelle 1/4 : 2,5 mm pour 1 cm) ;
- en ordonnées : les températures (échelle 1/4 : 2,5 mm pour 1 °C) et les pressions (échelle 1/5 : 2 mm pour 1 mmHg).

Pour des raisons de mise en page, les figures 9 et 10 sont réduites par homothétie.

Pour la précision du tracé, comme précédemment, calculons dans le voile de béton des points intermédiaires.

5.2 Exploitation du diagramme de Glaser

Rappel

Le flux de vapeur se déplace toujours sous l'effet du gradient de pression séparant les ambiances (extérieure et intérieure). Autrement dit : des hautes pressions vers les basses pressions (ou des hautes températures vers les basses températures).

Constat

La courbe des pressions partielles reste, en tous plans de la paroi, inférieure à la courbe des pressions saturantes.

Nous pouvons ainsi affirmer que cette paroi n'est le siège d'aucune condensation superficielle ou interne. La migration de la vapeur se fait à l'état vapeur.

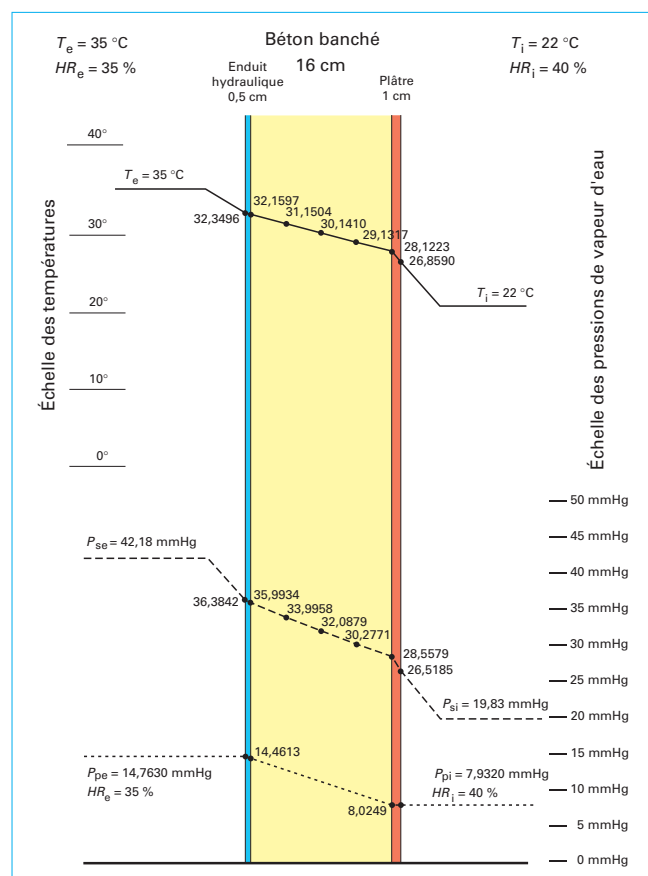


Figure 9 – Diagramme de Glaser, absence de condensation durant la période estivale

6. Choc thermique

Le **choc thermique** représente, d'une façon générale, la différence entre les températures extrêmes (*minima* et *maxima*) mesurées dans un même plan de matériau pour un espace temps défini.

On peut ainsi parler de choc thermique :

- **diurne** : différence de température entre le jour et la nuit ;
- **saisonnier** : différence de température entre l'hiver et l'été ;
- **instantané** : cas d'un plan chauffé mis en contact soudain avec un liquide froid.

Exemple : un mur ensoleillé qui reçoit une pluie d'averse.

Reportons sur la figure 9, qui devient la figure 10, la courbe des températures hivernales. Nous pouvons ainsi visualiser et calculer, dans chaque plan, le **choc thermique saisonnier** (ΔT_s).

Calculons ΔT_s à l'interface enduit hydraulique/voile en béton :

$$\Delta T_{s \text{ e.h./b.}} = T_{\text{été e.h./b.}} - T_{\text{hiver e.h./b.}} = 32,1597 - 0,2436 = 31,9161$$

$$\Delta T_{s \text{ e.h./b.}} = 31,9 \text{ °C}$$

Pour une variation de température de l'air extérieur, entre l'été et l'hiver, de : $\Delta T_{(\text{été} - \text{hiver})} = 40 \text{ °C}$.

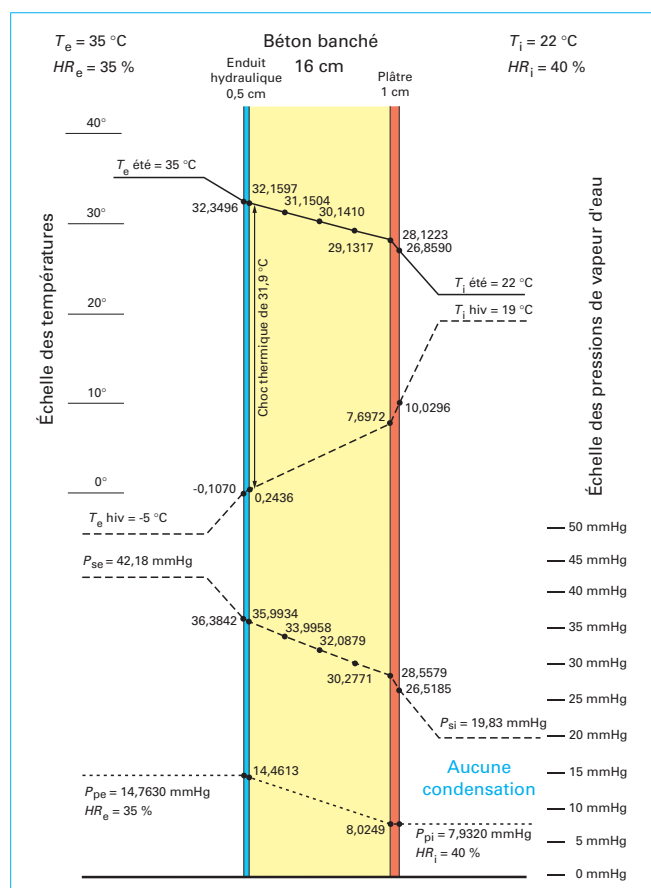


Figure 10 – Choc thermique saisonnier

7. Effets du choc thermique

Sous l'action de la température, tous les matériaux subissent :

- soit des **variations de longueur** s'ils sont « libres », pris au sens de la résistance des matériaux (RdM), c'est-à-dire, sans liaisons et/ou encastresments ;
- soit des **contraintes internes** s'ils sont soumis à des « liaisons ».

Pour évaluer les variations (linéaires ou les contraintes), prenons comme températures médianes de référence :

- pour l'intérieur : $T_{mi} = 20 \text{ °C}$;
- pour l'extérieur : $T_{me} = 15 \text{ °C}$.

Déterminons la répartition du gradient $\Delta T = T_{mi} - T_{me} = 5 \text{ °C}$, dans les différentes couches constituant le mur, en se servant des coefficients de proportionnalité de la note de calcul (cf. tableau 5).

À l'interface béton/enduit hydraulique on a : $T_{m \text{ b./e.h.}} = 16,0924 \text{ °C}$.

Pour l'enduit hydraulique on trouve : $T_{m \text{ e.h.}} = 16,0194 \text{ °C}$.

Ainsi l'interface enduit hydraulique/béton subira :

- en hiver : une baisse de température
 $\Delta T_{\text{baisse}} = 16,0924 - 0,2436 = 15,8488 \text{ °C}$;
- en été : une élévation de température
 $\Delta T_{\text{élévation}} = 32,1597 - 16,0924 = 16,0673 \text{ °C}$.

7.1 Variations linéaires

Sous l'effet de la température, la variation linéaire $\Delta \ell$ (allongement ou raccourcissement) est égale à :

$$\Delta \ell = \ell_0 \alpha \Delta T$$

avec ℓ_0 longueur initiale en millimètres,

α coefficient de dilatation linéaire ($\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ par °C pour le béton et l'enduit hydraulique, cf. [Form C 7 137]),

ΔT choc thermique (en °C).

Pour un mètre linéaire de béton ou d'enduit hydraulique :

– pour une élévation de la température $\Delta T_{\text{élévation}} = 16,0673 \text{ °C}$ (choc thermique estival), l'allongement est de :

$$\Delta \ell = 1\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 16,0673 = 0,161 \text{ mm/m}$$

– pour une baisse de la température $\Delta T_{\text{baisse}} = 15,8488 \text{ °C}$ (choc thermique hivernal), le raccourcissement est de :

$$\Delta \ell = 1\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 15,8488 = 0,158 \text{ mm/m}$$

7.2 Contraintes internes

Pour les matériaux ayant des liaisons, les variations de températures engendrent des contraintes internes σ égales à :

$$\sigma = E \alpha \Delta T$$

avec σ'_t contrainte de traction si la température baisse,

σ_c contrainte de compression si la température s'élève.

Pour la paroi type, objet de notre étude, les valeurs des différentes contraintes subies par l'enduit hydraulique et la face extérieure du voile en béton sont regroupées dans le tableau 6.

En général, les **contraintes de compression dans le béton** ne sont pas source de problèmes, par rapport aux contraintes admissibles. Il n'en est pas de même pour celles de traction.

Exemple : pour un béton ayant une contrainte de compression à la rupture de 35 MPa (soit 350 kg/cm²), la contrainte de traction correspondante sera 10 à 15 fois plus faible (35 à 23,3 kg/cm²) et pourra, en conséquence, être la cause de désordres.

Tableau 6 – Valeurs des contraintes subies par la paroi étudiée

Matériaux	Contraintes	
	Traction	Compression
Enduit hydraulique $E = 75\,000 \text{ kg/cm}^2$	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 15,8488$ $\sigma'_t = 11,88 \text{ kg/cm}^2$	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 16,0673$ $\sigma_c = 12,05 \text{ kg/cm}^2$
Béton banché $E = 225\,000 \text{ kg/cm}^2$	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 15,8488$ $\sigma'_t = 35,65 \text{ kg/cm}^2$	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 16,0673$ $\sigma_c = 36,15 \text{ kg/cm}^2$

Tableau 7 – Tableau des résultats

Rubriques	Paroi type : voile béton de 16 cm	
Coefficient de déperdition surfacique K		3,40 W/m ² · °C
Chocs thermiques à l'interface	Enduit hydraulique/béton	31,9 °C
	Béton/plâtre	20,4 °C
Contraintes de traction	Enduit hydraulique/béton	11,88 kg/cm ²
	Béton/plâtre	35,65 kg/cm ²
Condensation dans le plâtre	Hiver	11,1349 g/m ² · h
	Été	aucune
Condensation dans l'enduit hydraulique	Allongement	0,161 mm/m
	Retrait	0,158 mm/m

Les **enduits hydrauliques** « bâtards » qui ont des modules d'élasticité plus faibles ($30\,000 < E < 45\,000 \text{ kg/cm}^2$), conduiront dans les mêmes conditions à des contraintes de traction plus faibles ($4,8 < \sigma'_t < 7,1 \text{ kg/cm}^2$).

Nota : incidence de la couleur

Un enduit coloré absorbe plus la chaleur qu'un enduit pastel. Selon son coefficient d'absorption du rayonnement solaire (0,15 pour le blanc et 1,0 pour le noir), la température de surface peut ainsi dépasser de plus de 70 % la valeur calculée, en augmentant dans les mêmes proportions celle de la contrainte de traction engendrée par le choc thermique.

- les salissures ;
- le décollement de l'enduit extérieur ;
- l'éclatement du béton sous l'effet de la poussée de la rouille se développant sur les fers à béton ;
- l'apparition de moisissures sur la face intérieure des parois.

Le diagnostic a pour objectif d'identifier le (ou les) désordre(s). L'analyse doit déterminer la (les) cause(s) qui a (ont) produit l'effet (ou les effets) de façon à être en mesure de les traiter (les causes et/ou les effets), pour les éliminer.

8. Synthèse des résultats

Récapitulons, dans le tableau 7, l'ensemble des valeurs pouvant être la cause de désordre. (Résultats issus des figures 8 et 10).

Nota : les contraintes de compression n'étant pas, *a priori*, source de pathologie, celles-ci ne sont pas inscrites dans le tableau 7 récapitulant les résultats issus des diagrammes de Glaser (cf. fin du § 7.2).

Établissons le lien de cause à effet entre ces résultats et la pathologie potentielle rencontrée, le plus souvent, sur des parois verticales en contact avec les agents climatiques extérieurs en fonction des différentes conditions hygrothermiques envisagées.

9. Pathologie potentielle

9.1 Types de désordre

Les désordres qui affectent généralement ce type d'ouvrage sont :

- les fissures infiltrantes ou non ;

9.2 Analyse des causes de la pathologie

9.2.1 Fissuration

9.2.1.1 Diagnostic

La fissuration a souvent pour origine une contrainte de traction interne, dans le matériau, supérieure à la contrainte de rupture de celui-ci.

Sous l'effet du « choc thermique hivernal », la baisse de température dans un élément ayant des liaisons (au sens de la résistance des matériaux) entraîne un raccourcissement potentiel contrarié du fait de sa liaison et qui engendre par conséquent une contrainte interne de traction.

Lorsque la valeur de cette contrainte est supérieure à la contrainte de rupture : la fissure apparaît. Dans les rapports d'expertise, on parle de « libération des contraintes ».

Les fissures qui apparaissent :

- seront plus ou moins ouvertes selon les distances entre elles ;

Exemple : dans l'enduit hydraulique, le retrait de 0,158 mm pour 1,00 m pourra atteindre 0,553 mm si la fissuration se produit tous les 3,50 m.

– pourront intéresser :

- soit, uniquement l'enduit extérieur,
- soit, également le voile en béton si les contraintes internes dans ce dernier sont supérieures aux contraintes de rupture.

Exemple : si la contrainte de rupture σ'_{rt} de l'enduit hydraulique est égale à $\sigma'_{rt} = 10,0 \text{ kg/cm}^2$ il y aura fissuration, car la contrainte interne qui règne dans l'enduit lui est supérieure : $\sigma'_t = 11,88 \text{ kg/cm}^2$.

Si le voile est en béton armé, la contrainte interne de traction risque d'être inférieure à celle de la rupture : il n'y aura donc pas de fissuration dans le voile. On ne pourra pas en dire autant si le voile n'est pas armé.

9.2.1.2 Remèdes

Selon que l'on intervient sur l'effet ou sur la cause de la pathologie qui engendre les fissures, on mettra en œuvre des systèmes d'imperméabilité ou d'isolation thermique par l'extérieur.

9.2.1.2.1 Imperméabilité

Elle est représentée par la lettre « I » suivie en indice du chiffre « 1 », « 2 », « 3 » ou « 4 », suivant la performance de résistance à la fissuration du système (cf. tableau 1 [Form C 7 137]).

- I1 : résiste à une microfissuration n'excédant pas 2/10 mm.
- I2 : résiste à une fissuration existante < 5/10 mm.
- I3 : résiste à une fissuration existante ou à venir < 10/10 mm.
- I4 : résiste à une fissuration existante ou à venir < 20/10 mm.

Ce sont des systèmes spécifiques de peinture destinés à la « *réfection des façades en service par revêtements d'imperméabilité à bases de polymères* ». Ils relèvent de la norme NF DTU 42.1 (cf. [Doc. C 7 136]).

L'imperméabilité modifie la résistance de diffusion de la vapeur d'eau de la paroi revêtue par l'un des quatre systèmes.

Il est conseillé de retracer un diagramme de Glaser avant la mise en œuvre du système retenu pour la réfection, de façon à contrôler, d'une part, que la solution traitant la pathologie existante soit pérenne et que, d'autre part, ce traitement ne soit pas à l'origine d'une pathologie latente.

Ces systèmes prescrits en réhabilitation sont couverts par une garantie décennale. Par contre, ils ne peuvent pas l'être en travaux neufs, car on ne peut pas présumer la nature et l'importance de la fissuration à venir.

9.2.1.2.2 Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

Au-delà d'une fissuration existante supérieure à 20/10^e de millimètre, les systèmes d'imperméabilité atteignent leurs limites de performance.

Si les dispositions architecturales le permettent, on fera appel à des systèmes d'isolation thermique par l'extérieur (ITE).

L'intérêt de tels systèmes réside dans le fait qu'ils ont une incidence sur la cause. En effet, le choc thermique à l'interface enduit hydraulique/béton est divisée par 4 ou 5 (ou plus, en fonction de l'épaisseur de l'isolant mis en œuvre à l'extérieur). Le choc thermique initial (avant travaux) n'est pas supprimé, il est simplement déplacé sur la face extérieure du système ITE mis en place..

Exemple : dans le cas d'un enduit mince sur polystyrène, collé ou fixé mécaniquement sur la façade, le choc thermique, sur le sous-enduit armé sera légèrement supérieur à celui qui régnait sur l'enduit hydraulique. La toile de fibre de verre, dans le sous-enduit, a pour fonction de reprendre, aussi bien les contraintes de traction (retraits) ou de compression (dilatations). Là encore, un nouveau diagramme de Glaser devra confirmer ces assertions.

L'ITE fait partie des systèmes de « *mise en œuvre des techniques non courantes, (MOTNC)* ». Ils sont couverts en garantie décennale, lorsque leur avis technique est en cours de validité et qu'ils ont été mis en œuvre par des entreprises agréées, qualifiées et à jour de leur prime d'assurance, pour ce type de travaux.

Nota : dans cette étude, les fissures dont les causes ont pour origine les défauts de fabrication (dosage défectueux en liants, en eau de gâchage, en granulométrie, etc.) ou une mise en œuvre incorrecte (par temps de gel ou de chaleur excessive) ne sont pas abordées. Il en est de même pour les fissures consécutives à des tassements de sol. Ce type de fissures apparaît en général dans les premiers mois de la vie de l'ouvrage, sauf peut-être pour les tassements de sol qui peuvent être consécutifs à une sécheresse exceptionnelle (cas des marnes vertes qui se déshydratent et qui peuvent entraîner des tassements de sol de 2 ou 3 dizaines de centimètres).

9.2.2 Salissures

9.2.2.1 Diagnostic

Sur un enduit extérieur présentant un relief, les poussières et les micro-organismes se déposent en plus grandes quantités. L'incrustation des poussières et le développement des micro-organismes sont d'autant plus importants que l'enduit est poreux. En effet, l'eau liquide qui pénètre dans le réseau capillaire participe au développement des champignons et des lichens.

Pour diagnostiquer ce type de désordre, l'observation de l'environnement (végétations, forêts) renseigne sur la présence et le développement potentiel de micro-organismes.

Pour vérifier l'état de porosité du support, il faut avoir recours à l'essai du verre d'eau projeté sur la façade. Si l'eau perle, les salissures auront de la difficulté à « s'accrocher » car elles seront « entraînées », et, l'eau ne sera pas « une source de vie » pour les micro-organismes. Dans le cas contraire, le risque de salissures est avéré.

9.2.2.2 Remèdes

9.2.2.2.1 Hydrofugation

Généralement, l'**hydrofugation** consiste à appliquer ou pulvériser un produit superficiellement. C'est un produit en phase solvant contenant des molécules (type : siliconates en solution), qui ont pour effet d'augmenter la tension superficielle de l'eau et, par conséquent, de diminuer très fortement sa pénétration dans le support.

L'hydrofugation présente les avantages suivants : d'une part, en ne pénétrant pas dans le support, cela permet que l'eau « glisse » sur le support et diminue donc l'accroche des poussières et des micro-organismes sur celui-ci. L'eau de pluie « lave » la façade.

D'autre part, l'application d'un hydrofuge de surface n'altère pas la couleur du revêtement et ne modifie pas la résistance de diffusion de la vapeur d'eau dans l'ensemble de la paroi. Le mur « respire » de la même façon.

L'inconvénient de ce traitement est qu'il rend difficile, par la suite, l'application d'une peinture en phase aqueuse. En effet, l'eau, en tant que solvant, pénétrant difficilement dans les capillaires du support, n'entraînera pas suffisamment de résine (liant) de la peinture. Le feuil final présentera un « accrochage insuffisant » et sera le siège potentiel de cloquage sous l'effet de la pression partielle de la vapeur d'eau migrant à travers la paroi.

L'hydrofugation ne fait l'objet d'aucune garantie légale.

9.2.2.2.2 Au niveau du constructif

Il est important de prévoir des dispositifs architecturaux qui évitent au maximum « l'accroche » des poussières et les ruissellements anarchiques de l'eau le long des façades.

Exemple : prévoir des appuis de baies débordants et munis d'un dispositif « goutte d'eau ». De même les acrotères, des toitures terrasses, couronnés par des couvertures métalliques doivent avoir un ourlet faisant office de goutte d'eau.

Enfin, privilégier la mise en œuvre d'un enduit de *finition* « lisse » plutôt qu'un enduit « structuré ». L'exemple type à proscrire : le revêtement plastique épais (RPE) appliqué au rouleau.

9.2.3 Décollement de l'enduit extérieur

9.2.3.1 Diagnostic

Les causes de décollement de l'enduit extérieur sont multiples. Le diagramme de Glaser en explique quelques-unes.

9.2.3.1.1 Fissures

Le choc thermique peut être à l'origine de la cause. Au préalable, il faut rappeler le mécanisme d'adhérence de l'enduit hydraulique sur le voile en béton.

Lors de la prise du ciment, l'eau de gâchage en excès dans le béton s'évapore à travers un réseau de capillaires qui débouche en surface sous la forme de pores microscopiques. Ces pores constituent les futurs « points d'ancrage mécaniques » de l'enduit. Plus ces points d'ancrage sont nombreux, plus la valeur de la contrainte d'adhérence est élevée.

Lorsque la température baisse (choc thermique hivernal), sous l'effet du retrait, il peut se produire « un cisaillement partiel » de points d'ancrage. En sondant l'enduit si ce dernier « sonne le creux » cela correspond à une rupture d'une certaine quantité de points d'ancrage, et donc, « une décohésion partielle » d'une zone de l'enduit. Le cisaillement total des points d'ancrage correspond « au décollement » avec chute potentielle, par plaques, de l'enduit hydraulique extérieur.

Les fissures qui peuvent prendre naissance du fait des retraits et des allongements successifs peuvent être la cause de décollement de l'enduit.

Lorsque les fissures atteignent une largeur $\ell > 0,5$ mm, elles deviennent « infiltrantes ». L'eau (liquide) en changeant d'état (glace), augmente de volume. La poussée de la glace entraîne une rupture partielle ou totale, par « traction des points d'ancrage mécaniques », donc une perte d'adhérence avec décollement et/ou chute potentielle.

L'application de l'enduit hydraulique sur un support ayant des efflorescences (carbonate de calcium CO_3Ca , appelé également « fleur de chaux »), qui obturent les pores des capillaires, aura pour conséquence de diminuer d'une façon significative son adhérence. Sous l'effet des chocs thermiques, il y aura rupture, par cisaillement, des points d'ancrage existants qui se traduira par un cisaillement partiel ou un décollement total de l'enduit.

9.2.3.1.2 Carbonatation superficielle

Les efflorescences apparaissent dans le mois qui suit le coulage du béton lorsque les conditions hygrothermiques sont telles (température extérieure inférieure à 5 °C et/ou humidité relative supérieure à 80 %) que l'eau de gâchage en excès ne peut pas s'évaporer ou s'évapore très lentement. L'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, qui prend naturellement naissance lors de la prise du ciment et qui y reste libre (sans liaisons chimiques), est une molécule soluble dans l'eau. La solution aqueuse de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ va finir par migrer en surface et réagir avec le gaz carbonique CO_2 , dissous dans l'eau de pluie, qui agit comme un acide faible CO_3H_2 sur l'hydroxyde de calcium (celui-ci confère au béton frais son pH basique), pour donner un sel neutre : le carbonate de calcium, CO_3Ca . Cette réaction chimique de carbonatation superficielle est à rapprocher de la formation du calcin des pierres fraîchement extraites de leurs carrières.

9.2.3.2 Remèdes

- L'élimination des efflorescences avant toute application de l'enduit de finition.
- L'application d'une solution d'eau acidulée, sur le sujet, rend les efflorescences solubles dans l'eau. Un lavage sous haute pression (80 à 120 bar) de l'enduit fait disparaître 80 % des efflorescences visibles surtout sur les enduits colorés, sans en altérer les pigments, qui sont en général des oxydes minéraux.
- Éviter l'excès d'eau de gâchage dans tous les produits à base de liant hydraulique (ciments et chaux).

- Éviter de couler le béton et également d'appliquer les enduits de finition par temps froid et/ou humide (la documentation technique des fabricants préconise que l'application des enduits colorés se fassent dans les conditions hygrothermiques où : $T_e > 8$ °C et $HR_e < 80$ %).

9.2.4 Éclatement du béton sous la poussée de la rouille

9.2.4.1 Diagnostic

9.2.4.1.1 Carbonatation interne

L'alcalinité du béton (pH compris entre 11 et 13, selon que le ciment est gris ou blanc) protège les armatures contre la réaction d'oxydation des fers (rouille : Fe_2O_3 ou Fe_3O_4).

Mais sous l'effet de la **carbonatation lente et naturelle** du béton, par le gaz carbonique dissous dans l'eau de pluie, celui-ci voit son **alcalinité** diminuer de la surface vers l'intérieur. Pour un béton normalement dosé, sans fissures et ayant une porosité normale, la carbonatation des 2 premiers centimètres sera effective au bout de 20 à 25 ans. Autrement dit, la diminution du pH alcalin accroît le « risque d'oxydation des fers à béton » à partir du moment où le pH de celui-ci atteint des valeurs inférieures à 9.

9.2.4.1.2 Fissuration

L'inconvénient majeur de la rouille (hors des taches inesthétiques par coulures sur la façade), réside dans l'augmentation de son volume qui engendre « des forces de poussées » dans le plan perpendiculaire à l'axe du fer.

Cette poussée génère une force horizontale de cisaillement dans le béton qui s'ajoute à celle verticale due aux chocs thermiques. La résultante de ces deux forces engendre une contrainte de cisaillement qui peut être supérieure à celle de la rupture. Au début, on commence par voir des fissures et le désordre peut aller jusqu'à l'éclatement du béton, avec chute de matière.

Il est évident que lorsque le phénomène est amorcé, il va aller en s'aggravant d'autant plus que :

- le béton et son enduit extérieur sont poreux et/ou fissurés ;
- les fers à béton ont un enrobage insuffisant (inférieur à 2 cm).

9.2.4.2 Remèdes

– **En réhabilitation** : lorsque le désordre est avéré, les travaux de réfection sont classiques. Ils consistent principalement à passiver les armatures, à reconstituer le béton défaillant. Enfin à appliquer un système d'imperméabilité pour éviter toute pénétration future d'eau liquide dans la paroi.

– **En travaux neufs** : à titre préventif, prévoir un système d'ITE (cf. § 9.2.1.2.2).

9.2.5 Moisissures sur la face interne des parois

9.2.5.1 Diagnostic

Le plâtre à l'intérieur (dont la température varie entre 10,02 et 7,69 °C) est le siège de condensations superficielles et internes (cf. figure 8) où $q_{\text{totale}} = 11,1349 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$

Pour que cette eau de condensation « mouille » 1 cm de plâtre, il faut que la quantité d'eau absorbée dépasse le taux d'humidité critique τ du plâtre : $\tau = 5$ % pour le plâtre.

Autrement dit, il faut que la quantité d'eau condensée dans le plâtre corresponde en poids à 5 % du volume de plâtre considéré.

Ainsi, pour que 1 m² de plâtre de 1 cm d'épaisseur soit « mouillé », il faut qu'une quantité Q d'eau égale à :

$Q = 100 \times 100 \times 1 \times 5 / 100 = 500 \text{ cm}^3 = 500 \text{ g}$ d'eau par m² se soit condensée.

Pour que les condensations superficielles et internes « mouillent » complètement le plâtre, il faut que le « régime hivernal » soit permanent pendant un temps t , égal à :

- $t = Q / q_{\text{totale}} = 500 / 11,1349$;
- $t = 44,9039$ heures soit, 1 j 20 h 54 min.

Ce temps théorique « d'humidification » relativement court est la cause des désordres potentiels suivants :

- papiers peints qui se décollent ;
- peintures qui cloquent et qui s'écaillent sur le plâtre ;
- présence de moisissures. En effet, la température superficielle de 10 °C du plâtre est suffisante pour entraîner la formation de moisissures, car humidité et chaleur favorisent le développement de champignons (moisissures souvent noirâtres).

Par gravité, l'eau condensée va s'accumuler au niveau des plinthes et du plancher (en contact), et les moisissures y seront plus importantes.

Nota : pour les matériaux à base de liants hydrauliques (ciment et chaux), le taux d'humidité critique est égal à : $r = 20$ %

9.2.5.2 Remèdes

Il faut :

- Abaisser l'humidité relative qui règne dans l'ambiance intérieure du local (cf. calculs § 3.4).

- Augmenter la température intérieure du local afin que celle du plâtre soit en tous points supérieure à la température du point de rosée à ces températures.

Un simple calcul des flux de chaleur indique que la température intérieure du local doit être augmentée, et, passer de 19 °C à 23,2 °C, (à condition bien sûr que la quantité absolue W de vapeur d'eau dans le local reste inchangée). Dans ces conditions, avec cette nouvelle température intérieure, cela revient à dire : l'humidité relative intérieure a chuté. (HR_i serait alors de l'ordre de 46 %)

L'inconvénient est évident : une augmentation de plus de 17 % des consommations énergétiques, sans parler de la température intérieure qui peut être « hors la loi » vis-à-vis de la réglementation en vigueur.

Nota : la température intérieure est adaptée réglementairement à l'utilisation des locaux. Ainsi, dans un gymnase où l'effort physique est important, la température peut être maintenue à 15 °C alors qu'en habitation elle est de 19 °C et qu'en milieu hospitalier elle peut atteindre ou dépasser 23 °C.

- Envisager des travaux d'ITE qui vont permettre au plâtre d'être à une température plus élevée, de telle sorte que la vapeur d'eau en contact y restera à l'état vapeur (pas de condensation) en hiver.