

# Pathologie de l'humidité. Parois revêtues en bâtiment

## Isolation thermique

par **Paul DAHAN**

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

<b>1. Cas d'une paroi avec une isolation thermique par l'intérieur avec pare-vapeur</b> .....	C 7 142 - 2
1.1 Voile de béton recouvert d'une ITI (PSE) avec pare-vapeur « en hiver » .....	— 2
1.2 Voile de béton recouvert d'une ITI (PSE) avec pare-vapeur « en été » ...	— 4
<b>2. Cas d'une paroi avec une isolation thermique par l'intérieur sans pare-vapeur</b> .....	— 6
2.1 Voile de béton avec ITI (PSE) sans pare-vapeur « en hiver » .....	— 6
2.2 Voile de béton avec ITI (PSE) sans pare-vapeur « en été » .....	— 8
<b>3. Cas d'une paroi avec isolation thermique par l'extérieur (enduit épais sur polystyrène)</b> .....	— 9
3.1 Voile de béton avec ITE « en hiver » .....	— 9
3.2 Voile de béton avec ITE « en été » .....	— 11
<b>4. Cas d'une paroi avec isolation thermique par l'extérieur (enduit mince sur polystyrène)</b> .....	— 12
4.1 Voile de béton avec ITE (enduit mince) « en hiver » .....	— 12
4.2 Voile de béton avec ITE (enduit mince) « en été » .....	— 14
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. C 7 140

**D**epuis le premier choc pétrolier en 1973, la nécessité de faire des économies d'énergie a conduit le législateur à établir des « règles thermiques » applicables aux constructions neuves.

En réhabilitation, aucun règlement n'a encore vu le jour du fait, peut-être, de se trouver face à une difficulté d'analyse fiable en l'absence de documents descriptifs de la chose construite.

Par ailleurs, si la réglementation contraint le constructeur (maîtres d'œuvre et/ou d'ouvrage) à une obligation de résultats, les règlements lui laissent l'entière liberté pour les atteindre. Par leur évolution permanente, le législateur se sert des règles comme un moyen pour réaliser des économies d'énergie, qui contribuent à la diminution significative des gaz à effet de serre ; moins de CO et de CO<sub>2</sub> renvoyés dans l'atmosphère.

Par l'article 1792 du code civil, le constructeur engage sa responsabilité dès qu'il participe à l'acte de construire. Bien sûr, celle-ci fait l'objet d'une couverture d'assurance obligatoire. Sans entrer dans le détail, en cas de désordres, il s'ensuit une déclaration de sinistres qui, à terme, peut avoir des conséquences financières sur la prime RC dommages ouvrages du constructeur.

L'étude hygrothermique qui suit a pour objectif d'éclairer, d'une façon scientifique, le constructeur sur le comportement physique des éléments qui constituent « une **paroi revêtue** » par les différents systèmes d'**isolation thermique**, et d'analyser leurs performances et leurs limites face aux agressions des agents naturels que sont la **chaleur** et l'**eau**, sous toutes leurs formes, agissant séparément ou ensemble.

# 1. Cas d'une paroi avec une isolation thermique par l'intérieur avec pare-vapeur

On étudie le cas d'un voile de béton comportant maintenant une isolation thermique par l'intérieur (ITI).

## 1.1 Voile de béton recouvert d'une ITI (PSE) avec pare-vapeur « en hiver »

Le tableau 1 présente la note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser de la paroi revêtue dans les conditions hygrothermiques hivernales définies dans le dossier [C 7 140] (cf. § 1.2.2).

Le système d'isolation thermique par l'intérieur (ITI), que l'on va considérer comme collé sur le plâtre existant de 1 cm (que nous appellerons plâtre « 1 »), est constitué par :

- un polystyrène expansé (PSE) de 60 mm d'épaisseur ( $\lambda = 0,042 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  et  $\pi = 30 \cdot 10^{-4} \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ ) ;
- une plaque de plâtre cartonnée de 10 mm d'épaisseur, appelée plâtre « 2 » ( $\lambda = 0,35 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  et  $\pi = 130 \cdot 10^{-4} \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ ) ;
- un pare-vapeur aluminium (P-V) de 15  $\mu\text{m}$  ( $\lambda = 230 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  et  $\pi = 0,0015 \cdot 10^{-4} \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ ).

### 1.1.1 Épure

#### 1.1.1.1 Courbe des pressions saturantes

Pour permettre un tracé précis de la courbe des pressions saturantes, il faut calculer des températures intermédiaires tous les :

- 2 cm dans le PSE (2 points intermédiaires) ;
- 8 cm dans le béton (1 point intermédiaire).

#### 1.1.1.2 Courbe des pressions partielles

Pour tracer la courbe des pressions partielles, il faut répartir le gradient de pression :  $\Delta P_p = P_{pi} - P_{pe} = 7,0285 \text{ mmHg}$ , proportionnellement aux résistances de diffusion à la vapeur d'eau ( $e_n/\pi_n$ ) des  $n$  éléments constituant la paroi (cf. tableau 1) :

- pression partielle intérieure :  $P_{pi} = 9,888 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le plâtre « 2 » :  
 $P_{ppl.2} = 9,888 - 7,0285 \times 0,77 / 177,37 = 9,8575 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le pare-vapeur :  
 $P_{pP.V} = 9,8575 - 7,0285 \times 100 / 177,37 = 5,8949 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le PSE :  
 $P_{pPSE} = 5,8949 - 7,0285 \times 20 / 177,37 = 5,1023 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le plâtre « 1 » :  
 $P_{ppl.1} = 5,1023 - 7,0285 \times 0,77 / 177,37 = 5,0718 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le béton :  
 $P_{pb} = 5,0718 - 7,0285 \times 53,33 / 177,37 = 2,9586 \text{ mmHg}$  ;

**Tableau 1 – Note de calcul d'un voile de béton recouvert d'une ITI (PSE) avec pare-vapeur « en hiver »**

Résist. à la diffusion $e_n/\pi_n$ (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ )	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 24 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_i = 19 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0628	1,5073	17,4927	14,9934
Plâtre « 2 » 0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0163	0,3919	17,1008	14,6208
Pare-vapeur 100,00	Pare-vapeur $= 0,0000$	0,0000	0,0000	17,1008	14,6208
PSE 20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,8156	19,5754	- 2,4746	3,7302
Plâtre « 1 » 0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0163	0,3919	- 2,8665	3,6101
Béton 53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0522	1,2524	- 4,1189	3,2462
End. hydr. 2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0025	0,0589	- 4,1778	3,2344
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0343	0,8222	- 5,0000	3,01
<b>Total</b> $R_D = 177,37$	<b>Total</b> $R_{th} = 1,7515$				
	<b>Coefficient de déperdition surfacique</b> $K = 0,5709 = 0,57 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$				

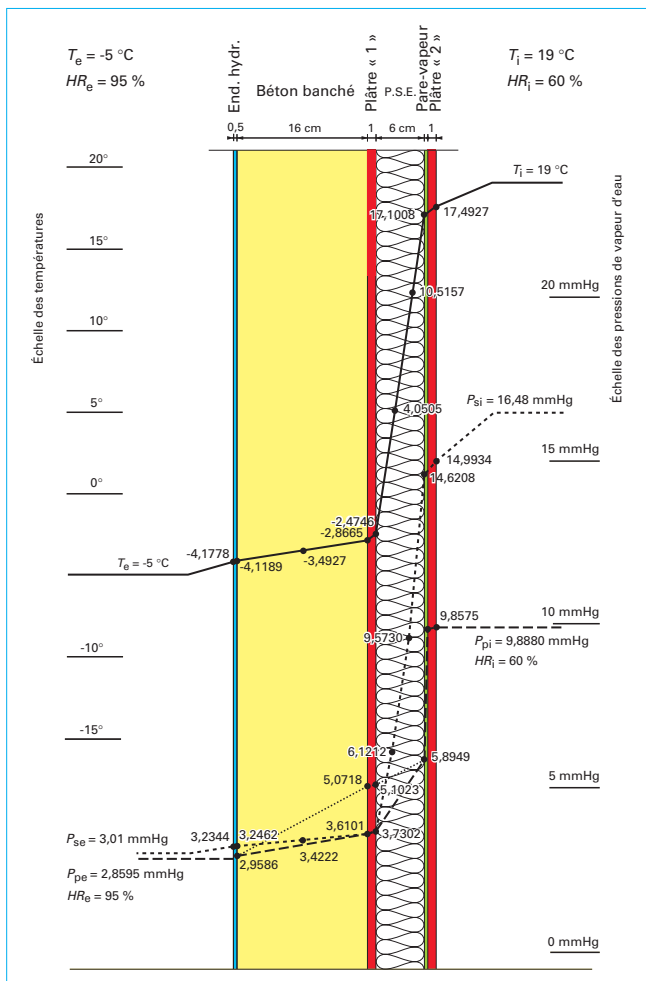


Figure 1 – Diagramme de Glaser d'un voile de béton recouvert d'une ITI (avec P-V) en hiver

- pression partielle après l'enduit hydraulique :  
 $P_{p.e.h.} = 2,9586 - 7,0285 \times 2,50 / 177,37 = 2,8595 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle extérieure :  $P_{pe} = 2,8595 \text{ mmHg}$ .

Reportons sur la figure 1 les points représentatifs de la courbe des pressions partielles.

### 1.1.2 Flux de vapeur d'eau

Calculons les flux de vapeur d'eau  $g$  arrivant, entrant ou sortant des différents éléments de la paroi :

- flux traversant le plâtre « 2 » :  
 $g_1 = (9,8880 - 9,8575) / 0,77 = 0,0396 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux traversant le pare-vapeur :  
 $g_2 = (9,8575 - 5,8949) / 100 = 0,0396 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux traversant le P.S.E. :  
 $g_3 = (5,8949 - 3,7302) / 20,00 = 0,1082 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux entrant dans le plâtre « 1 » :  
 $g_4 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 0,5709 \times 24 \times 0,3105 = 0,1580 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;

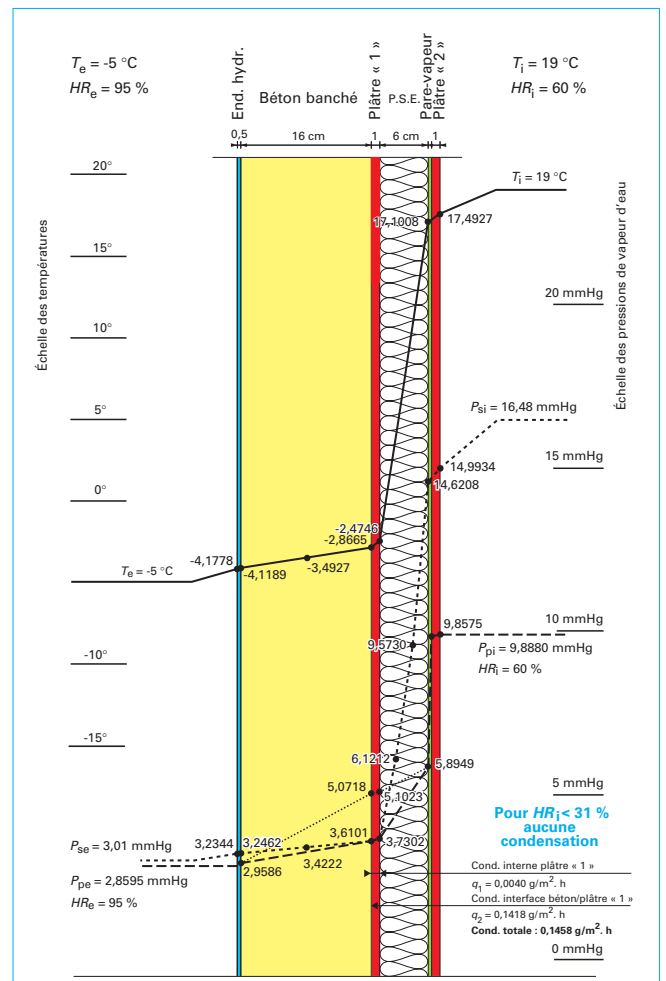


Figure 2 – Diagramme de Glaser, condensation en période hivernale

- flux sortant du plâtre « 1 » :  
 $g_5 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 0,5709 \times 24 \times 0,3027 = 0,1540 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux traversant le béton :  
 $g_6 = (3,6101 - 2,9586) / 53,33 = 0,0122 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux traversant l'enduit hydraulique :  
 $g_7 = (2,9586 - 2,8595) / 2,50 = 0,0396 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ .

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

- condensation interne dans le plâtre « 1 » :  
 $q_1 = g_4 - g_5 = 0,1580 - 0,1540 = 0,0040 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- condensation interne à l'interface béton/plâtre « 1 » :  
 $q_2 = g_5 - g_6 = 0,1540 - 0,0122 = 0,1418 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- 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  $P_s$ .

Indiquons sur la figure 2 les deux condensations  $q_1$  et  $q_2$ .

### 1.1.3 Seuil d'humidité relative intérieure

On peut ainsi déterminer l'humidité relative intérieure,  $HR_i$ , à ne pas dépasser pour éviter les condensations superficielles et/ou internes.

■ Il n'y aura pas de **condensation superficielle** tant que la pression partielle intérieure  $P_{pi}$  restera inférieure à la pression de saturation intérieure  $P_{si}$  régnant sur la face extérieure du plâtre « 2 » et qui est égale, dans le cas étudié, à  $P_{si} = 14,9934$  mmHg. Autrement dit tant que :

$$HR_i \leq (14,9934 / 16,48) \times 100$$

$$HR_i \leq 90,98 \% \approx 90 \%$$

■ Pour qu'il n'y ait pas de **condensations internes** à l'interface béton/ITI, 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 « 1 » », soit :  $P_{sb./pl.1} = 3,6101$  mmHg.

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

$$(P_{pxi} - P_{sb./pl.1}) / R_{DITI+pl.1} = (P_{pxi} - P_{pe}) / R_D$$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, on trouve :

$$(P_{pxi} - 3,6101) / 121,54 = (P_{pxi} - 2,8595) / 177,37$$

Soit :

$$(177,37 - 121,54) \times P_{pxi} = (177,37 \times 3,6101) - (121,54 \times 2,8595)$$

$$P_{pxi} = 292,7798 / 55,83$$

$$P_{pxi} = 5,2441 \text{ mmHg.}$$

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

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

$$HR_{i \text{ limite}} < (5,2441 / 16,48) \times 100$$

$$HR_{i \text{ limite}} < 31,82 \%$$

Ainsi, pour que les condensations  $q_1$  et  $q_2$  ne puissent pas s'établir, autrement dit, pour que la migration de la vapeur d'eau à travers la paroi (dans les conditions hivernales retenues) se fasse à l'état vapeur, il faut que :

$$HR_i \leq 31 \% \text{ quand } T_i = 19^\circ\text{C.}$$

## 1.2 Voile de béton recouvert d'une ITI (PSE) avec pare-vapeur « en été »

La note de calcul (tableau 2) nécessaire au tracé du diagramme de Glaser, (du mur revêtu) dans les conditions hygrothermiques estivales sont les mêmes que celles définies dans le § 1.2.2 de [C 7 140].

### 1.2.1 Épure

#### 1.2.1.1 Courbe des températures

À l'aide des valeurs du tableau 2, nous traçons la courbe des températures été.

Sur le même graphique, nous traçons également la courbe des températures hiver (tableau 1).

**Tableau 2 – Note de calcul d'un voile de béton recouvert d'une ITI (PSE) avec pare-vapeur « en été »**

Résist. à la diffusion $e_n / \pi_n$ (en m <sup>2</sup> ·h·mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 19,83$ mmHg
			$\Delta T = 13^\circ\text{C}$	$T_i = 22^\circ\text{C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0628	0,8164	22,8164	20,8413
Plâtre « 2 » 0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0163	0,2123	23,0287	21,1073
Pare-vapeur 100,00	Pare-vapeur $= 0,0000$	0,0000	0,0000	23,0287	21,1073
PSE 20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,8156	10,6034	33,6321	39,1006
Plâtre « 1 » 0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0163	0,2123	33,8444	39,5632
Béton 53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0522	0,6784	34,5228	41,0924
End. hydr. 2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0025	0,0319	34,5547	41,1658
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0343	0,4453	35,0000	42,18
<b>Total</b> $R_D = 177,37$	<b>Total</b> $R_{th} = 1,7515$				
	<b>Coefficient de déperdition surfacique</b> $K = 0,5709 = 0,57 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$				

### 1.2.1.2 Courbe des pressions saturantes

Pour permettre un tracé précis de la courbe des pressions saturantes, il faut calculer des températures intermédiaires tous les :

- 2 cm dans le PSE (2 points intermédiaires) ;
- 8 cm dans le béton (1 point).

### 1.2.1.3 Courbe des pressions partielles

Pour la tracer, il faut répartir le gradient de pression :

$\Delta P_p = P_{pe} - P_{pi} = 14,763 - 7,932 = 6,8310$  mmHg, proportionnellement aux résistances de diffusion à la vapeur d'eau ( $e_n/\pi_n$ ) des  $n$  éléments constituant la paroi (cf. tableau 2).

En reportant ces valeurs, ainsi calculées, nous obtenons le diagramme de Glaser en saison estivale (cf. figure 3).

#### Constat

La courbe des pressions partielles étant constamment inférieure à la courbe des pressions saturantes, on peut affirmer que la migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur, et en conséquence, ne donne lieu à **aucune condensation**.

### 1.2.2 Choc thermique

Calculons le choc thermique saisonnier «  $\Delta T_s$  » dans les plans suivants :

- à l'interface béton/ITI :  $\Delta T_a = 36,7109$  °C ;
- à l'interface enduit hydraulique/béton :  $\Delta T_b = 38,6417$  °C ;
- à la surface enduit hydraulique :  $\Delta T_c = 38,7325$  °C.

### 1.2.3 Effets du choc thermique

#### 1.2.3.1 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  $\ell_0$  (en mm) longueur initiale,

$\alpha$  coefficient de dilatation linéaire ( $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$  par °C pour le béton et l'enduit hydraulique),

$\Delta T$  (en °C) choc thermique.

À partir de la température moyenne :

$T_{mi} = 20$  °C et  $T_{me} = 15$  °C.

En faisant des calculs analogues à ceux effectués au § 7.1 de [C 7 132], on trouvera respectivement les variations linéaires suivantes :

- À l'interface béton/pl. « 1 » :  $\Delta \ell_a = 0,367$  mm/m :
  - pour une élévation de la température  $\Delta T_{a\text{élévation}} = 18,3999$  °C, l'allongement est de 0,184 mm/m ;
  - pour une baisse de la température  $\Delta T_{a\text{baisse}} = 18,3110$  °C, le retrait est de 0,183 mm/m.
- À l'interface enduit hydraulique/béton :  $\Delta \ell_b = 0,386$  mm/m :
  - pour une élévation de température de 19,3392 °C, l'allongement est de 0,193 mm/m ;
  - pour une baisse de température de 19,3025 °C, le raccourcissement est de 0,193 mm/m.
- À la surface de l'enduit hydraulique :  $\Delta \ell_c = 0,387$  mm/m :
  - pour une élévation de température de 19,3834 °C, l'allongement est de 0,194 mm/m ;
  - pour une baisse de température de 19,3491 °C, le raccourcissement est de 0,193 mm/m.

#### 1.2.3.2 Contraintes internes

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

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

avec  $\sigma'_t$  contrainte de traction si la température baisse,

$\sigma_c$  contrainte de compression si la température s'élève.

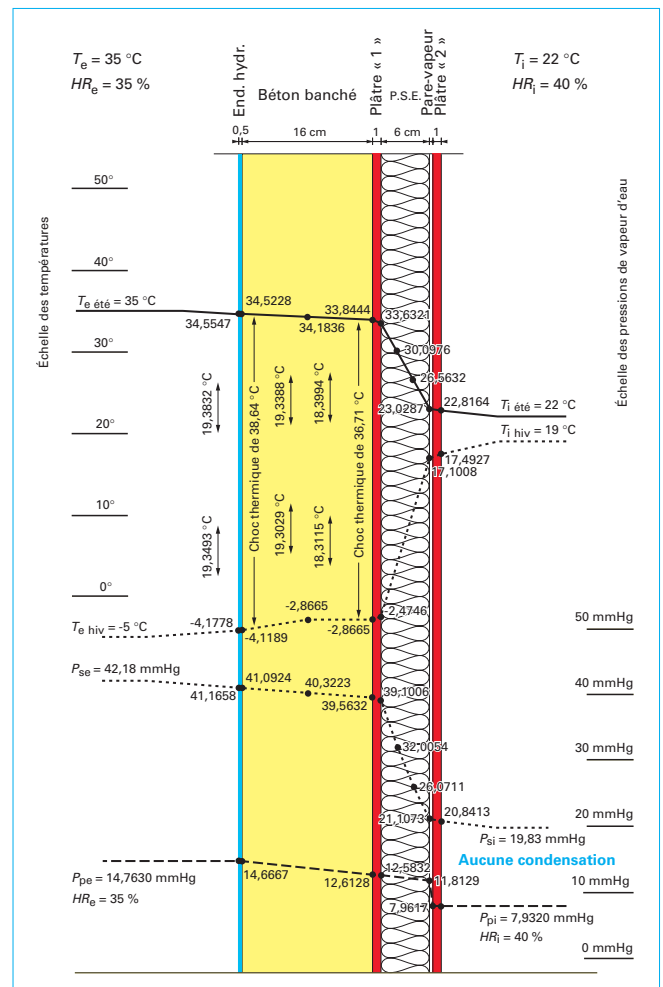


Figure 3 – Diagramme de Glaser d'un voile de béton recouvert d'une ITI (avec pare-vapeur) en été

Calculons les valeurs des différentes contraintes subies par l'enduit hydraulique et les faces (extérieure et intérieure) du voile en béton (cf. tableau 3).

#### Remarques importantes

En général, les **contraintes de compressions 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 (350 kg/cm<sup>2</sup>), la contrainte de traction correspondante sera 10 à 15 fois plus faible (35 à 23,3 kg/cm<sup>2</sup>) et pourra, en conséquence, engendrer des désordres.

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

**Tableau 3 – Tableau des contraintes**

Matériaux	Contraintes	
	Traction	Compression
Enduit hydraulique $E = 75\,000\text{ kg/cm}^2$	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,3493$ $\sigma'_t = 14,51\text{ kg/cm}^2$	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,3832$ $\sigma_c = 14,54\text{ kg/cm}^2$
Béton banché $E = 225\,000\text{ kg/cm}^2$ (face extérieure)	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,3029$ $\sigma'_t = 43,43\text{ kg/cm}^2$	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,3388$ $\sigma_c = 43,51\text{ kg/cm}^2$
Béton banché $E = 225\,000\text{ kg/cm}^2$ (face intérieure)	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 18,3115$ $\sigma'_t = 41,20\text{ kg/cm}^2$	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 18,3994$ $\sigma_c = 41,40\text{ kg/cm}^2$

**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.

## 2. Cas d'une paroi avec une isolation thermique par l'intérieur sans pare-vapeur

Les avis techniques de ces familles de produit stipulent bien que lorsqu'ils sont destinés à être mis en œuvre sur des murs périmétriques, en contact avec l'atmosphère extérieure, ces systèmes doivent comporter un pare-vapeur.

On peut évaluer les conséquences si, par ignorance et/ou par mesure « économique ... de bouts de chandelles !!! », ces complexes d'isolation thermique par l'intérieur ITI étaient mis en œuvre sans pare-vapeur !!!

### 2.1 Voile de béton avec ITI (PSE) sans pare-vapeur « en hiver »

Le tableau 4 présente la note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser du mur revêtu dans les conditions hygrothermiques hivernales retenues (cf. § 1.2.2 de [C 7 140]).

L'ITI que l'on va considérer collée sur le plâtre existant de 1 cm que nous appellerons plâtre « 1 », est constituée par :

- un polystyrène expansé (PSE) de 60 mm d'épaisseur ( $\lambda = 0,042\text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  et  $\pi = 30 \cdot 10^{-4}\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ ) ;
- un plaque de plâtre cartonnée de 10 mm d'épaisseur, appelé plâtre « 2 » ( $\lambda = 0,35\text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  et  $\pi = 130 \cdot 10^{-4}\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ ).

#### Remarque importante

Le fait de supprimer le pare-vapeur a pour conséquence de modifier d'une façon significative la résistance de diffusion à la vapeur d'eau  $R_D$  de la paroi.

$R_D$  sans pare-vapeur est égale à 77,37 au lieu de 177,37  $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$  quand il y en a un.

**Tableau 4 – Note de calcul d'un voile de béton avec ITI (PSE) sans pare-vapeur « en hiver »**

Résist. à la diffusion $e_n / \pi_n$ (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ )	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48\text{ mmHg}$
			$\Delta T = 24\text{ }^\circ\text{C}$	$T_i = 19\text{ }^\circ\text{C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0628	1,5073	17,4927	14,9934
Plâtre « 2 » 0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0163	0,3919	17,1008	14,6208
PSE 20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,8156	19,5754	- 2,4746	3,7302
Plâtre « 1 » 0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0163	0,3919	- 2,8665	3,6101
Béton 53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0522	1,2524	- 4,1189	3,2462
End. hydr. 2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0025	0,0589	- 4,1778	3,2344
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0343	0,8222	- 5,0000	3,01
<b>Total</b> $R_D = 77,37$	<b>Total</b> $R_{th} = 1,7515$				
	<b>Coefficient de déperdition surfacique</b> $K = 0,5709 = 0,57\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$				



## 2.1.1 Épure

### 2.1.1.1 Courbes de températures et de pressions saturantes

Ces deux courbes sont strictement identiques à celles de la figure 1.

### 2.1.1.2 Courbe des pressions partielles

Pour la tracer, il faut répartir le gradient de pression :  $\Delta P_p = P_{pi} - P_{pe} = 7,0285 \text{ mmHg}$ , proportionnellement aux résistances de diffusion à la vapeur d'eau ( $e_n/\pi_n$ ) des  $n$  éléments constituant la paroi (cf. tableau 4) :

- pression partielle intérieure :  $P_{pi} = 9,888 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le plâtre « 2 » :  
 $P_{ppl,2} = 9,888 - 7,0285 \times 0,77 / 77,37 = 9,8181 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le PSE :  
 $P_{pPSE} = 9,8181 - 7,0285 \times 20 / 77,37 = 8,0012 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le plâtre « 1 » :  
 $P_{ppl,1} = 8,0012 - 7,0285 \times 0,77 / 77,37 = 7,9312 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le béton :  
 $P_{pbéton} = 7,9312 - 7,0285 \times 53,33 / 77,37 = 3,0866 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après l'enduit hydraulique :  
 $P_{pe,h} = 3,0866 - 7,0285 \times 2,50 / 77,37 = 2,8595 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle extérieure :  $P_{pe} = 2,8595 \text{ mmHg}$ .

Nous constatons que, dans le PSE, dans le plâtre « 1 » ainsi qu'à l'interface béton/plâtre « 1 », la pression partielle est supérieure à celle des pressions saturantes : la vapeur d'eau est donc en surpression. Il faut donc recourir « aux tangentes », et obtenir le diagramme modifié (cf. figure 4).

## 2.1.2 Flux de vapeur d'eau

Calculons les flux de vapeur d'eau  $g$  arrivant, entrant ou sortant des différents éléments de la paroi :

- flux traversant le plâtre « 2 » :  
 $g_1 = (9,8880 - 9,8181) / 0,77 = 0,0908 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux traversant le PSE :  
 $g_2 = (9,8181 - 3,7302) / 20,00 = 0,3044 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux entrant dans le plâtre « 1 » :  
 $g_3 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 0,5709 \times 24 \times 0,3105 = 0,1580 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux sortant du plâtre « 1 » :  
 $g_4 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 0,5709 \times 24 \times 0,3027 = 0,1540 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux traversant le béton :  
 $g_5 = (3,6101 - 3,0866) / 53,33 = 0,0098 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- flux traversant l'enduit hydraulique :  
 $g_6 = (3,0866 - 2,8595) / 2,50 = 0,0908 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ .

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

- condensation à l'interface PSE/plâtre « 1 » :  
 $q_1 = g_2 - g_3 = 0,3044 - 0,1580 = 0,1464 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- condensation interne dans le plâtre « 1 » :  
 $q_2 = g_3 - g_4 = 0,1580 - 0,1540 = 0,0040 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- condensation interne à l'interface béton/plâtre « 1 » :  
 $q_3 = g_4 - g_5 = 0,1540 - 0,0098 = 0,1442 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ;
- 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  $P_s$ .

Indiquons sur la figure 5 les trois condensations  $q_1$ ,  $q_2$  et  $q_3$ .

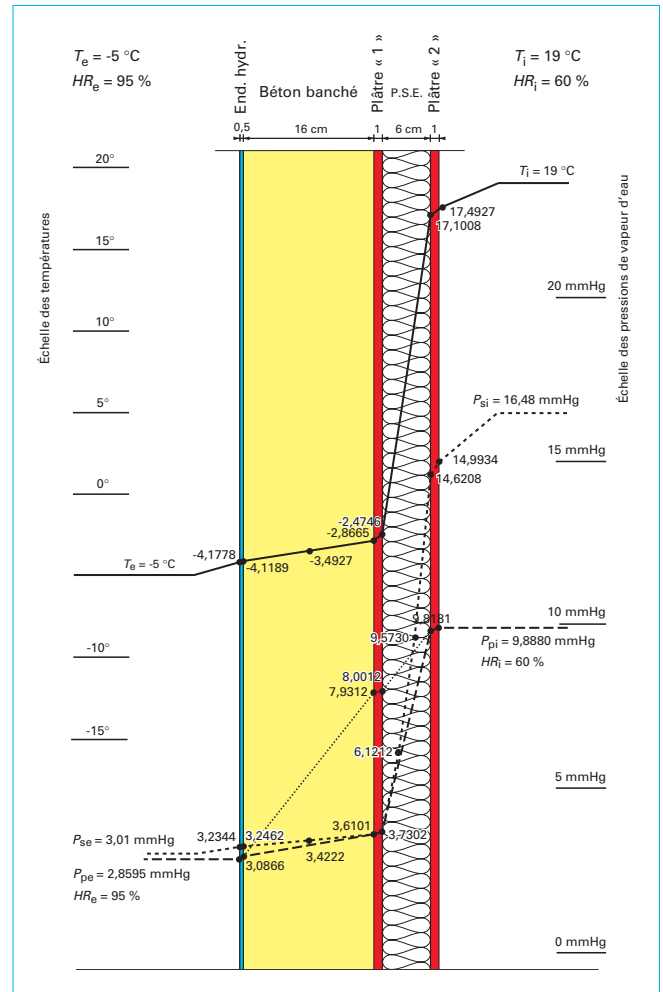


Figure 4 – Diagramme de Glaser d'un voile de béton avec ITI (PSE) sans P-V, en hiver

## 2.1.3 Seuil d'humidité relative intérieure

On peut ainsi déterminer l'humidité relative intérieure,  $HR_i$ , à ne pas dépasser pour éviter les condensations superficielles (cf. § 1.1.3) et/ou internes.

Pour qu'il n'y ait pas de condensations internes à l'interface béton/ITI, 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 « 1 », à savoir :  $P_{sb./pl.1} = 3,6101 \text{ mmHg}$ .

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

$$(P_{pxi} - P_{sb./pl.}) / R_{DITI} = (P_{pxi} - P_{pe}) / R_D$$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, on trouve :

$$(P_{pxi} - 3,6101) / 21,54 = (P_{pxi} - 2,8595) / 77,37$$

$$\text{Soit } (77,37 - 21,54) \times P_{pxi} = (77,37 \times 3,6101) - (21,54 \times 2,8595)$$

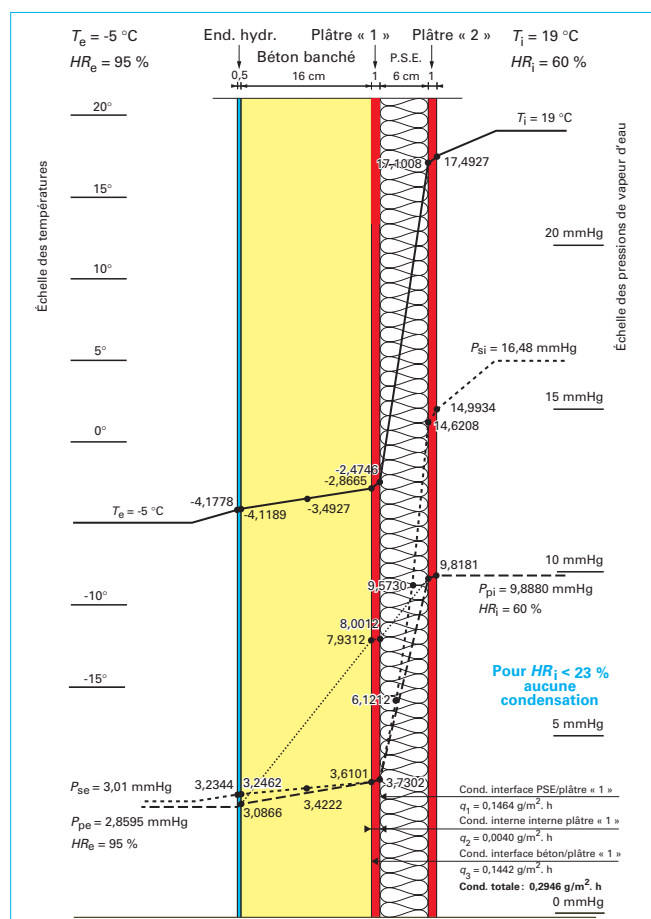


Figure 5 – Diagramme de Glaser, condensation en période hivernale

$$P_{pxi} = 217,7198 / 55,83 = 3,8997 \text{ mmHg.}$$

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

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

$$HR_{i \text{ limite}} < (3,8997 / 16,48) \times 100$$

$$HR_{i \text{ limite}} < 23,66 \text{ \%}.$$

On peut ainsi affirmer, pour que les condensations  $q_1$  et  $q_2$  ne puissent pas s'établir, ou autrement dit, 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 est  **$HR_i \leq 23 \%$**  quand  $T_i = 19 \text{ °C}$ .

#### Remarque

Cette condition ( $HR_i < 23 \%$ ) reste difficilement réalisable, compte tenu de la notion de « confort » (cf. § 5.2 de [C 7 130]).

Autrement dit, l'absence de pare-vapeur a pour conséquence de maintenir une condensation potentielle dans le plâtre « 1 ».

## 2.2 Voile de béton avec ITI (PSE) sans pare-vapeur « en été »

La note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser du mur revêtu dans les conditions hygrothermiques estivales retenues (cf. § 1.2.2 [C 7 140]) est présentée dans le tableau 5.

### 2.2.1 Épure

#### 2.2.1.1 Courbe des températures

À l'aide des valeurs du tableau 5, nous traçons la courbe des températures « été ». Sur le même graphique nous traçons également la courbe des températures hiver (cf. tableau 4).

#### 2.2.1.2 Courbe des pressions saturantes

Pour permettre un tracé précis de la courbe des pressions saturantes, il faut calculer des températures intermédiaires tous les :

- 2 cm dans le PSE (2 points intermédiaires) ;
- 8 cm dans le béton (1 point).

Tableau 5 – Note de calcul d'un voile de béton avec ITI (PSE) sans pare-vapeur « en été »

Résist. à la diffusion $e_n / \pi_n$ (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} / \text{g}$ )	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 19,83 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 13 \text{ °C}$	$T_i = 22 \text{ °C}$	
		$\frac{1}{h_i} = 0,1100$			
Plâtre « 2 »	0,77	Plâtre « 2 »	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0628	20,8413
PSE	20,00	PSE	$\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,0163	21,1073
Plâtre « 1 »	0,77	Plâtre « 1 »	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,8156	39,1006
Béton	53,33	Béton	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0163	39,5632
End. hydr.	2,50	End. hydr.	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0522	41,0924
		$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0025	0,6784	41,1658
			0,0343	0,4453	42,18
<b>Total</b>	$R_D = 77,37$	<b>Total</b>	$R_{th} = 1,7515$		
	<b>Coefficient de déperdition surfacique</b> $K = 0,5709 = 0,57 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{°C}$				



### 2.2.1.3 Courbe des pressions partielles

Pour la tracer, il faut répartir le gradient de pression :

$\Delta P_p = P_{pe} - P_{pi} = 14,763 - 7,932 = 6,8310 \text{ mmHg}$ , proportionnellement aux résistances de diffusion à la vapeur d'eau ( $e_n/\pi_n$ ) des  $n$  éléments constituant la paroi (cf. tableau 5).

En reportant ces valeurs, ainsi calculées, nous obtenons le diagramme de Glaser en saison estivale (cf. figure 6).

#### Constat

La courbe des pressions partielles étant constamment inférieure à la courbe des pressions saturantes, on peut affirmer que la migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur et en conséquence ne donne lieu à aucune condensation.

### 2.2.2 Choc thermique

L'absence de pare-vapeur dans le système ITI n'a aucune incidence sur le choc thermique. Nous avons donc les mêmes valeurs que celles du § 1.2.2.

### 2.2.3 Effets du choc thermique

#### 2.2.3.1 Variations linéaires

L'absence de pare-vapeur n'a aucune incidence, nous aurons donc les mêmes valeurs qu'au § 1.2.3.1.

Les variations linéaires seront les suivantes :

- $\Delta \ell_a = 0,367 \text{ mm/m}$  (avec un allongement de 0,184 mm/m et un retrait de 0,183 mm/m) ;
- $\Delta \ell_b = 0,386 \text{ mm/m}$  (avec un allongement de 0,193 mm/m et un retrait de 0,193 mm/m) ;
- $\Delta \ell_c = 0,387 \text{ mm/m}$  (avec un allongement de 0,194 mm/m et un retrait de 0,193 mm/m).

#### 2.2.3.2 Contraintes internes

Même conclusion qu'au § 2.2.3.1.

Nous aurons ainsi les mêmes contraintes que celles définies dans le tableau 3.

**Nota :** les remarques faites dans le paragraphe 1.2.3.2 sont également valables ici.

## 3. Cas d'une paroi avec isolation thermique par l'extérieur (enduit épais sur polystyrène)

### 3.1 Voile de béton avec ITE « en hiver »

La note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser du mur revêtu dans les conditions hygrothermiques hivernales retenues dans le dossier [C 7 140] (cf. § 1.2.2) est présentée tableau 6.

Le système d'isolation thermique par l'extérieur que l'on va considérer collé ou fixé mécaniquement sur l'enduit hydraulique extérieur du voile en béton « étudié » est constitué par :

- un polystyrène expansé (PSE) de 60 mm d'épaisseur ( $\lambda = 0,039 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  ;  $\pi = 25 \cdot 10^{-4} \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$  et  $E \approx 1\,000 \text{ kg/cm}^2$ ) ;
- un monocouche hydraulique gratté de 15 mm d'épaisseur ( $\lambda = 1,15 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  ;  $\pi = 60 \cdot 10^{-4} \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$  ;  $4,0 < \sigma'_t < 7,5 \text{ kg/cm}^2$  et  $E = 40\,000 \text{ kg/cm}^2$ ).

#### 3.1.1 Épure

##### 3.1.1.1 Courbe des pressions saturantes

Pour permettre un tracé précis de la courbe des pressions saturantes il faut calculer des températures intermédiaires tous les :

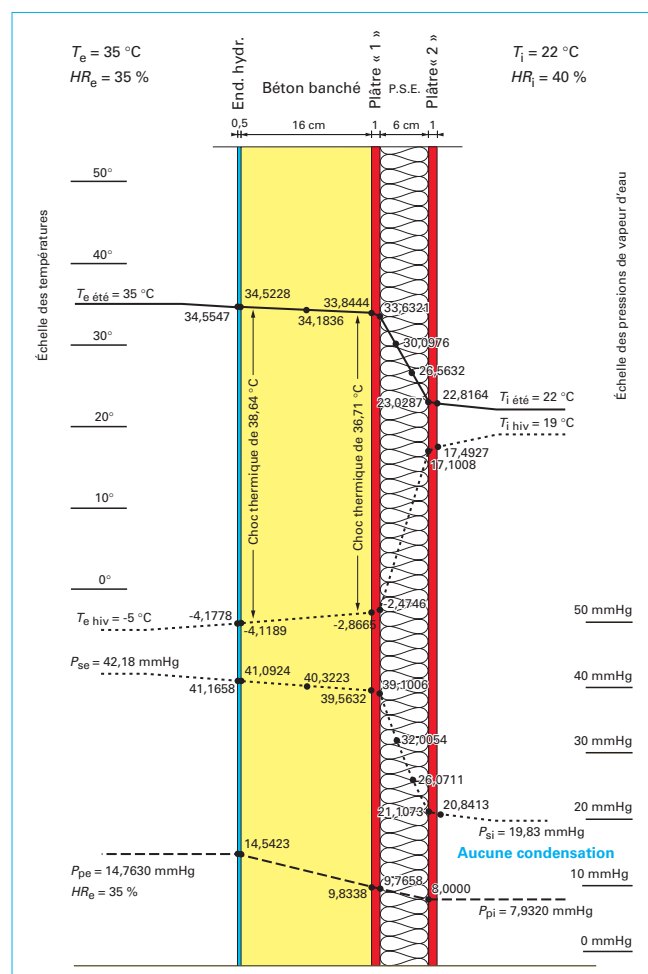


Figure 6 – Diagramme de Glaser d'un voile de béton recouvert d'une ITE sans pare-vapeur en période estivale

- 2 cm dans le PSE (2 points intermédiaires) ;
- 8 cm dans le béton (1 point intermédiaire).

#### 3.1.1.2 Courbe des pressions partielles

Pour la tracer, il faut répartir le gradient de pression :  $\Delta P_p = P_{pi} - P_{pe} = 7,0285 \text{ mmHg}$ , proportionnellement aux résistances de diffusion à la vapeur d'eau ( $e_n/\pi_n$ ) des  $n$  éléments constituant la paroi (cf. tableau 6) :

- pression partielle intérieure :  $P_{pi} = 9,888 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le plâtre :  $P_{p.pl.} = 9,888 - 7,0285 \times 0,77 / 83,10 = 9,8229 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le béton :  $P_{p.b.} = 9,8229 - 7,0285 \times 53,33 / 83,10 = 5,3123 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après l'enduit hydraulique :  $P_{p.e.h.} = 5,3123 - 7,0285 \times 2,50 / 83,10 = 5,1008 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le PSE :  $P_{p.PSE} = 5,1008 - 7,0285 \times 24,00 / 83,10 = 3,0709 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après la finition :  $P_{p.finition} = 3,0709 - 7,0285 \times 2,50 / 83,10 = 2,8595 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle extérieure :  $P_{pe} = 2,8595 \text{ mmHg}$ .

Reportons sur la figure 7 les points représentatifs de la courbe des pressions partielles.

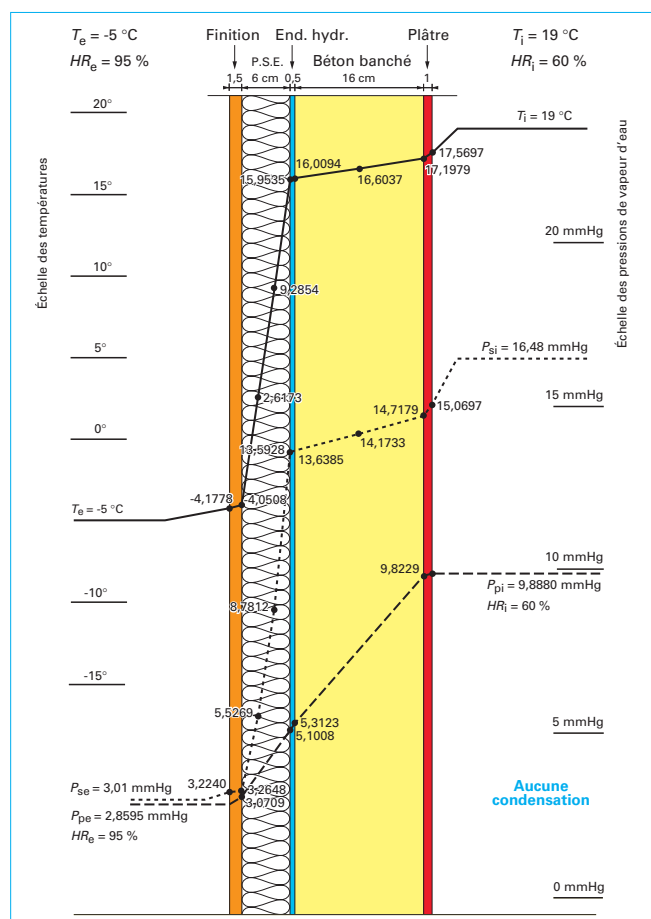


Figure 7 – Diagramme de Glaser d'un voile de béton avec ITE en période hivernale

### 3.1.2 Flux de vapeur d'eau

Nous constatons, sur le diagramme 7, que la courbe des pressions partielles reste constamment inférieure à la courbe des pressions saturantes.

La migration de la vapeur d'eau à travers la paroi isolée par l'extérieur avec le système enduit épais sur polystyrène se fait à l'état vapeur, à raison du flux constant égal à :

$$\Delta P = (P_{pi} - P_{pe}) / R_D = (9,888 - 2,8595) / 83,10 = 0,0846 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}.$$

Dans les conditions hygrothermiques hivernales retenues, la migration de la vapeur d'eau, à travers la paroi isolée par l'extérieur, se fait à l'état vapeur. Elle n'est donc le siège d'aucune condensation, superficielle ou interne (« le mur respire »).

### 3.1.3 Seuil d'humidité relative intérieure

On peut ainsi déterminer l'humidité relative intérieure,  $HR_i$ , à ne pas dépasser pour éviter les condensations superficielles et/ou internes.

Pour qu'il n'y ait pas de condensations internes, la courbe des pressions partielles doit être 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, soit :

$$P_{sb./pl.} = 14,7179 \text{ mmHg}.$$

Soit «  $P_{pxi}$  » la pression partielle intérieure recherchée, on peut donc écrire l'égalité suivante :

$$(P_{pxi} - P_{sb./pl.}) / R_{Dpl.} = (P_{pxi} - P_{pe}) / R_D.$$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, on trouve :

$$(P_{pxi} - 14,7179) / 0,77 = (P_{pxi} - 2,8595) / 83,10.$$

$$\text{Soit } (83,10 - 0,77) \times P_{pxi} = (83,10 \times 14,7179) - (0,77 \times 2,8595)$$

$$P_{pxi} = 1\,220,8557 / 82,33$$

$$P_{pxi} = 14,8288 \text{ mmHg}.$$

Tableau 6 – Note de calcul d'un voile de béton avec ITE « en hiver »

Résist. à la diffusion $e_n / \pi_n$ (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ )	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 24 \text{ °C}$	$T_i = 19 \text{ °C}$	
Plâtre 0,77	Plâtre $\frac{1}{h_i} = 0,1100$ $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0596 0,0155	1,4303 0,3719	17,5697 17,1979	15,0697 14,7179
Béton 53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0495	1,1884	16,0094	13,6385
End. hydr. 2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0559	15,9535	13,5928
PSE 24,00	PSE $\frac{0,06}{0,039} = 1,5385$	0,8335	20,0043	- 4,0508	3,2648
Finition 2,50	Finition $\frac{0,015}{1,15} = 0,0130$ $\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0070 0,0325	0,1690 0,7801	- 4,2199 - 5,0000	3,2240 3,01
<b>Total</b> $R_D = 83,10$	<b>Total</b> $R_{th} = 1,8458$				
	<b>Coefficient de déperdition surfacique</b> $K = 0,5418 = 0,54 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$				

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

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

$$HR_{i \text{ limite}} < (14,8288 / 16,48) \times 100$$

$$HR_{i \text{ limite}} < 89,98 \text{ \%}$$

Pour que la migration de la vapeur d'eau à travers la paroi, dans les conditions hivernales retenues, se fasse à l'état vapeur, il faut que  $HR_i \leq 89 \text{ \%}$  quand  $T_i = 19 \text{ °C}$ .

### 3.2 Voile de béton avec ITE « en été »

Le tableau 7 représente la note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser du mur revêtu dans les conditions hygrothermiques estivales retenues (cf. § 1.2.2 [C 7 140]).

#### 3.2.1 Épure

##### 3.2.1.1 Courbe des températures

À l'aide des valeurs du tableau 7, la courbe des températures en été peut être tracée. Sur le même graphique, nous traçons également la courbe des températures « hiver » (cf. tableau 6).

##### 3.2.1.2 Courbe des pressions saturantes

###### Rappel

Pour permettre un tracé précis de la courbe des pressions saturantes, il faut calculer des températures intermédiaires tous les :

- 2 cm dans le PSE (2 points intermédiaires) ;
- 8 cm dans le béton (1 point).

##### 3.2.1.3 Courbe des pressions partielles

Pour la tracer, il faut répartir le gradient de pression :

$\Delta P_p = P_{pe} - P_{pi} = 14,763 - 7,932 = 6,8310 \text{ mmHg}$ , proportionnellement aux résistances de diffusion à la vapeur d'eau ( $e_n/\pi_n$ ) des  $n$  éléments constituant la paroi (cf. tableau 7).

En reportant ces valeurs, ainsi calculées, nous obtenons le diagramme de Glaser en saison estivale (cf. figure 8).

###### Constat

La courbe des pressions partielles étant constamment inférieure à la courbe des pressions saturantes, on peut affirmer que la migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur et, en conséquence, ne donne lieu à aucune condensation.

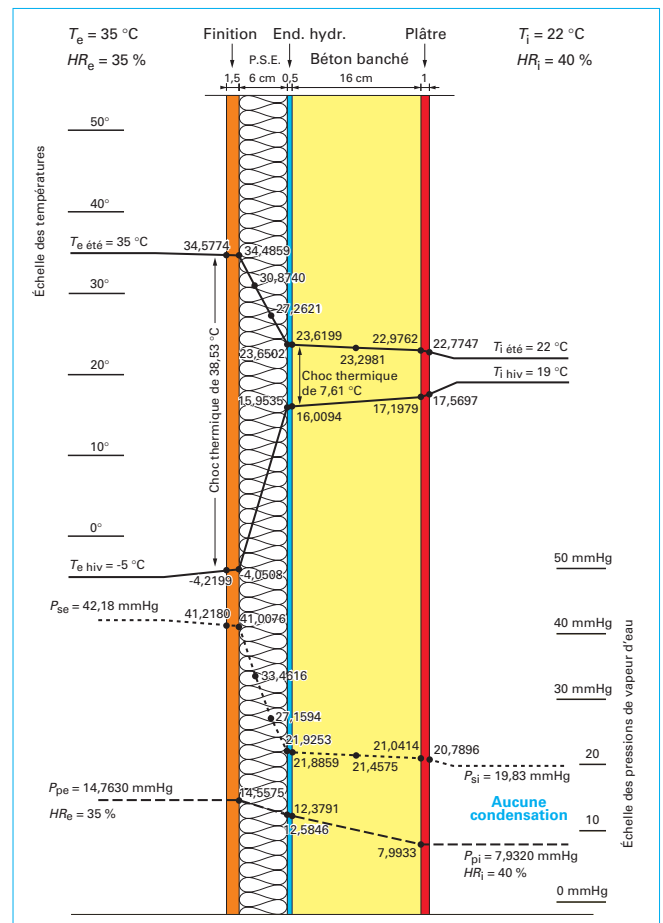


Figure 8 – Diagramme de Glaser en période estivale

Tableau 7 – Note de calcul d'un voile de béton recouvert d'une ITE « en été »

Résist. à la diffusion $e_n/\pi_n$ (en $m^2 \cdot h \cdot mmHg/g$ )	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 19,83 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 13 \text{ °C}$	$T_i = 22 \text{ °C}$	
Plâtre	0,77	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0596	22,7747	20,7896
Béton	53,33	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0155	22,9762	21,0414
End. hydr.	2,50	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0495	23,6199	21,8859
PSE	24,00	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	23,6502	21,9253
Finition	2,50	$\frac{0,06}{0,039} = 1,5385$	0,8335	34,4859	41,0076
		$\frac{0,015}{1,15} = 0,0130$	0,0070	34,5774	41,2180
		$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0325	35,0000	42,18
<b>Total</b>	$R_D = 83,10$	<b>Total</b>	$R_{th} = 1,8458$		
	<b>Coefficient de déperdition surfacique</b> $K = 0,5418 = 0,54 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$				

### 3.2.2 Choc thermique

Calculons le choc thermique saisonnier  $\Delta T_s$  dans les plans suivants :

- face extérieure du béton :  $\Delta T_a = 7,6105\text{ °C}$  ;
- interface PSE/enduit hydraulique :  $\Delta T_b = 7,6967\text{ °C}$  ;
- interface enduit épais/PSE :  $\Delta T_c = 38,5367\text{ °C}$  ;
- surface enduit épais ( finition ) :  $\Delta T_d = 38,7973\text{ °C}$ .

### 3.2.3 Effets du choc thermique

#### 3.2.3.1 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  $\ell_0$  (en mm) longueur initiale,

$\alpha$  coefficient de dilatation linéaire ( $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$  par °C pour le béton et l'enduit hydraulique),

$\Delta T$  (en °C) choc thermique.

À partir de température moyenne ( $T_{mi} = 20\text{ °C}$  et  $T_{me} = 15\text{ °C}$ ) et en faisant des calculs analogues à ceux effectués au § 7.1 de [C 7 132], on trouvera respectivement les variations linéaires suivantes :

- $\Delta \ell_a = 0,076\text{ mm/m}$  (allongement de 0,043 mm/m, retrait de 0,033 mm/m) ;
- $\Delta \ell_b = 0,077\text{ mm/m}$  (allongement de 0,043 mm/m, retrait de 0,034 mm/m) ;
- $\Delta \ell_c = 0,385\text{ mm/m}$  (allongement de 0,193 mm/m, retrait de 0,192 mm/m) ;
- $\Delta \ell_d = 0,388\text{ mm/m}$  (allongement de 0,194 mm/m, retrait de 0,194 mm/m).

#### 3.2.3.2 Contraintes internes

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

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

avec  $\sigma_t$  contrainte de traction si la température baisse,

$\sigma_c$  contrainte de compression si la température s'élève.

Les valeurs des différentes contraintes subies par l'enduit hydraulique et les faces (extérieure et intérieure) du voile en béton ainsi que celles subies par les constituants de l'ITE sont données dans le tableau 8.

**Nota** : voir les remarques définies au paragraphe 1.2.3.2.

**Tableau 8 – Tableau des contraintes**

Matériaux	Contraintes	
	Traction	Compression
Enduit hydraulique $E = 75\,000\text{ kg/cm}^2$ (sur le béton)	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 3,4118$ $\sigma_t = 2,56\text{ kg/cm}^2$	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 4,2847$ $\sigma_c = 3,21\text{ kg/cm}^2$
Béton banché $E = 225\,000\text{ kg/cm}^2$ – face extérieure	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 3,3676$ $\sigma_t = 7,58\text{ kg/cm}^2$	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 4,2429$ $\sigma_c = 9,55\text{ kg/cm}^2$
– face intérieure	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 2,2500$ $\sigma_t = 5,46\text{ kg/cm}^2$	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 3,3516$ $\sigma_c = 7,54\text{ kg/cm}^2$
PSE $E = 1\,000\text{ kg/cm}^2$ (face extérieure)	$1\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,2485$ $\sigma_t = 0,19\text{ kg/cm}^2$	$1\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,2882$ $\sigma_c = 0,19\text{ kg/cm}^2$
Monocouche $E = 40\,000\text{ kg/cm}^2$ (face extérieure)	$40\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,4176$ $\sigma_t = 7,77\text{ kg/cm}^2$	$40\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,3797$ $\sigma_c = 7,75\text{ kg/cm}^2$

## 4. Cas d'une paroi avec isolation thermique par l'extérieur (enduit mince sur polystyrène)

### 4.1 Voile de béton avec ITE (enduit mince) « en hiver »

Le tableau 9 présente la note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser du mur revêtu dans les conditions hygro-thermiques hivernales retenues (cf. § 1.2.2 de [C 7 140]).

Le système d'isolation thermique par l'extérieur que l'on va considérer collé ou fixé mécaniquement sur l'enduit hydraulique extérieur du voile en béton « étudié » est constitué par :

- un polystyrène expansé (PSE) de 60 mm d'épaisseur ( $\lambda = 0,039\text{ W/m} \cdot \text{°C}$ ,  $\pi = 25 \times 10^{-4}\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$  et  $E \approx 1\,000\text{ kg/cm}^2$ ) ;
- un sous-enduit armé et une finition organique (RPE = revêtement plastique épais), l'ensemble ayant une épaisseur de 5 mm (dont 2 mm pour le RPE).

Généralement, le sous-enduit armé provient d'une pâte prête à l'emploi, composée d'une résine de copolymères acryliques en dispersion aqueuse, de charges minérales et d'adjuvants à mélanger à du ciment (gris ou blanc) dans des proportions variables (0 à 35 % en poids de la pâte) selon les fabricants.

Le dosage relativement important en ciment conduit à des modules d'élasticité dynamique élevés, mais confère en contre partie une bonne résistance au poinçonnement du sous-enduit armé ( $\lambda = 1,15\text{ W/m} \cdot \text{°C}$ ,  $\pi = 11,25 \times 10^{-4}\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ , contrainte d'adhérence sur béton :  $10 < \sigma_t' < 25\text{ kg/cm}^2$ , module d'élasticité :  $E = 80\,000$  à  $90\,000\text{ kg/cm}^2$ ).

#### 4.1.1 Épure

##### 4.1.1.1 Courbe des pressions saturantes

###### Rappel

Pour permettre un tracé précis de la courbe des pressions saturantes, il faut calculer des températures intermédiaires tous les :

- 2 cm dans le PSE (2 points intermédiaires) ;
- 8 cm dans le béton (1 point intermédiaire).

**Tableau 9 – Note de calcul : voile de béton avec ITE « en hiver »**

Résist. à la diffusion $e_n / \pi_n$ (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ )	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 24 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_i = 19 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0599	1,4370	17,5630	15,0630
Plâtre 0,77	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0156	0,3736	17,1893	14,7093
Béton 53,33	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0498	1,1941	15,9953	13,6262
End. hydr. 2,50	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0562	15,9391	13,5813
PSE 24,00	$\frac{0,06}{0,039} = 1,5385$	0,8375	20,0991	- 4,1600	3,2380
S.-end. + finition 4,44	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0562	- 4,2162	3,2251
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0327	0,7838	- 5,0000	3,01
<b>Total</b> $R_D = 85,04$	<b>Total</b> $R_{th} = 1,8371$				
<b>Coefficient de déperdition surfacique</b> $K = 0,5443 = 0,54 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$					

**4.1.1.2 Courbe des pressions partielles**

Pour la tracer, il faut répartir le gradient de pression :  $\Delta P_p = P_{pi} - P_{pe} = 7,0285 \text{ mmHg}$ , proportionnellement aux résistances de diffusion à la vapeur d'eau ( $e_n / \pi_n$ ) des  $n$  éléments constituant la paroi (cf. tableau 9) :

- pression partielle intérieure :  $P_{pi} = 9,888 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le plâtre :  
 $P_{ppl.} = 9,888 - 7,0285 \times 0,77 / 85,04 = 9,8244 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le béton :  
 $P_{pb.} = 9,8244 - 7,0285 \times 53,33 / 85,04 = 5,4167 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après l'enduit hydraulique :  
 $P_{pe.h.} = 5,4167 - 7,0285 \times 2,50 / 85,04 = 5,2101 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après le PSE :  
 $P_{pPSE} = 5,2101 - 7,0285 \times 24,00 / 85,04 = 3,2265 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle après la finition :  
 $P_{p\text{finition}} = 3,2265 - 7,0285 \times 4,44 / 85,04 = 2,8595 \text{ mmHg}$  ;
- pression partielle extérieure :  $P_{pe} = 2,8595 \text{ mmHg}$ .

Reportons sur la figure 9 les points représentatifs de la courbe des pressions partielles.

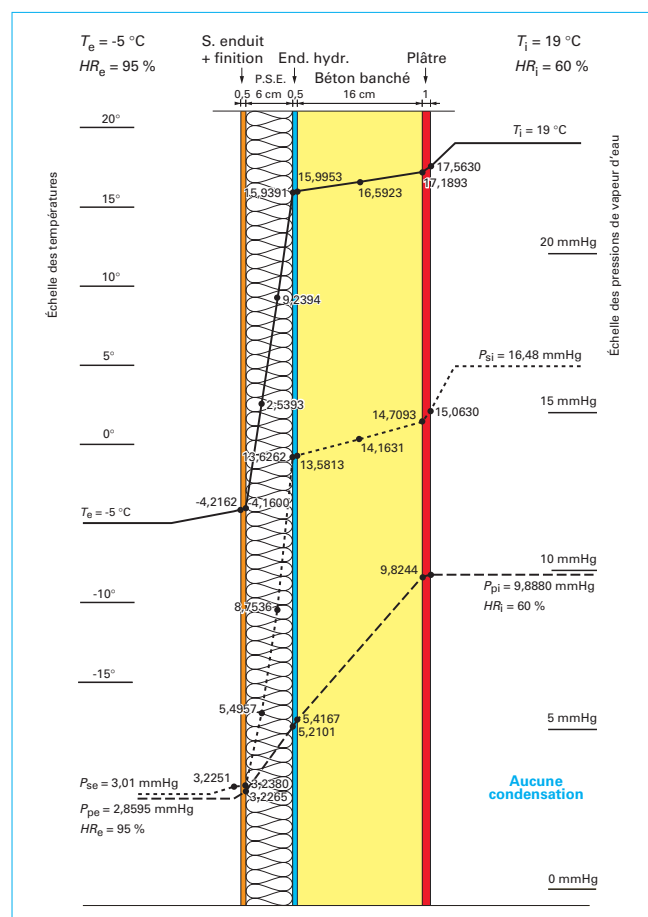
**4.1.2 Flux de vapeur d'eau**

Sur le diagramme, on constate que la courbe des pressions partielles reste constamment inférieure à la courbe des pressions saturantes.

La migration de la vapeur d'eau à travers la paroi isolée par l'extérieur avec le système enduit mince sur polystyrène se fait à l'état vapeur, à raison du flux constant égal à :

$$\Delta P = (P_{pi} - P_{pe}) / R_D = (9,888 - 2,8595) / 85,04 = 0,0826 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}.$$

On peut donc affirmer que, dans les conditions hygrothermiques hivernales retenues, la migration de la vapeur d'eau, à travers la paroi isolée par l'extérieur, se fait à l'état vapeur. Elle n'est donc le siège d'aucune condensation, superficielle ou interne : le mur « respire ».

**Figure 9 – Diagramme de Glaser d'un mur revêtu d'une ITE (enduit mince) en période hivernale**

### 4.1.3 Seuil d'humidité relative intérieure

On peut ainsi déterminer l'humidité relative intérieure,  $HR_i$ , à ne pas dépasser pour éviter les condensations superficielles et/ou internes.

Pour qu'il n'y ait pas de condensations internes, 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 tangence que la courbe des pressions partielles ne doit pas dépasser est la pression de saturation régnant à « l'interface sous-enduit armé/PSE, soit :

$$P_{s.s.-end/PSE} = 3,2380 \text{ mmHg.}$$

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

$$(P_{pxi} - P_{s.s.-end/PSE}) / R_{D.s.-end/PSE} = (P_{pxi} - P_{pe}) / R_D.$$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, on trouve :

$$(P_{pxi} - 3,2380) / 80,60 = (P_{pxi} - 2,8595) / 85,04.$$

$$\text{Soit } (85,04 - 80,60) \times P_{pxi} = (85,04 \times 3,2380) - (0,77 \times 2,8595)$$

$$P_{pxi} = 44,8838/4,44$$

$$P_{pxi} = 10,1090 \text{ mmHg.}$$

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

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

$$HR_{i \text{ limite}} < (10,1090/16,48) \times 100$$

$$HR_{i \text{ limite}} < 61,34 \text{ \%}.$$

Ainsi, la migration de la vapeur d'eau à travers la paroi (dans les conditions hivernales retenues) se fera à l'état vapeur si  $HR_i \leq 61 \text{ \%}$  quand  $T_i = 19 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Nota :** il n'y a pas de condensation dans le plâtre tant que  $HR_i < (14,7093/16,48) \times 100 \approx 89 \text{ \%}$ . Dans le cas où l'humidité relative intérieure atteindrait ce niveau de 89 %, il y aurait un dépôt de cristaux de glace à l'interface PSE/s.-end égal à 0,0641 g/m<sup>2</sup>.h. Pour que 10 µm de sous-enduit ait atteint le taux d'humidité critique de 20 % (soit 2 g d'eau), il faudrait que le régime permanent perdure, en continu, un temps  $t$  égal à :  $t = 2 / 0,0641 = 31,2012$  heures, soit 1 jour 7 heures et 12 min. Ce qui peut être exceptionnellement envisageable en montagne dans des locaux humides, peu ou mal ventilés.

## 4.2 Voile de béton avec ITE (enduit mince) « en été »

Dans le tableau 10 sont portées les données nécessaires au tracé du diagramme de Glaser du mur revêtu dans les conditions hygrothermiques estivales retenues (cf. § 1.2.2 [C 7 140]).

### 4.2.1 Épure

#### 4.2.1.1 Courbe des températures

À l'aide des valeurs du tableau 10, la courbe des températures en été peut être tracée. Sur le même graphique, nous traçons également la courbe des températures hivernales (cf. tableau 9).

#### 4.2.1.2 Courbe des pressions saturantes

##### Rappel

Pour permettre un tracé précis de la courbe des pressions saturantes, il faut calculer des températures intermédiaires tous les :

- 2 cm dans le PSE (2 points intermédiaires) ;
- 8 cm dans le béton (1 point).

#### 4.2.1.3 Courbe des pressions partielles

Pour la tracer, il faut répartir le gradient de pression :

$\Delta P_p = P_{pe} - P_{pi} = 14,763 - 7,932 = 6,8310 \text{ mmHg}$ , proportionnellement aux résistances de diffusion à la vapeur d'eau ( $e_n/\pi_n$ ) des  $n$  éléments constituant la paroi (cf. tableau 10).

En reportant ces valeurs, ainsi calculées, nous obtenons le diagramme de Glaser en saison estivale (cf. figure 10).

##### Constat

La courbe des pressions partielles étant constamment inférieure à la courbe des pressions saturantes, on peut affirmer que la migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur et en conséquence ne donne lieu à aucune condensation.

### 4.2.2 Choc thermique

Calculons le choc thermique saisonnier  $\Delta T_s$  dans les plans suivants :

– face extérieure du béton :  $\Delta T_a = 7,6323 \text{ }^\circ\text{C}$  ;

**Tableau 10 – Note de calcul d'un voile de béton avec ITE « en été »**

Résist. à la diffusion $e_n/\pi_n$ (en m <sup>2</sup> .h.mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 19,83 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 13 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_i = 22 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0599	0,7784	22,7784	20,7941
Plâtre 0,77	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0156	0,2024	22,9808	21,0470
Béton 53,33	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0498	0,6468	23,6276	21,8959
End. hydr. 2,50	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0304	23,6580	21,9354
PSE 24,00	$\frac{0,06}{0,039} = 1,5385$	0,8375	10,8870	34,5450	41,1435
S.-end. + finition 4,44	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0304	34,5754	41,2134
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0327	0,4246	35,0000	42,18
<b>Total</b> $R_D = 85,04$	<b>Total</b> $R_{th} = 1,8371$				
	<b>Coefficient de déperdition surfacique</b> $K = 0,5443 = 0,54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$				



- interface PSE/enduit hydraulique :  $\Delta T_b = 7,7189 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- interface enduit mince/PSE :  $\Delta T_c = 38,7050 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- surface enduit mince ( finition) :  $\Delta T_d = 38,7916 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 4.2.3 Effets du choc thermique

#### 4.2.3.1 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  $\ell_0$  (en mm) longueur initiale,

$\alpha$  coefficient de dilatation linéaire ( $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$  par  $^\circ\text{C}$  pour le béton et l'enduit hydraulique),

$\Delta T$  (en  $^\circ\text{C}$ ) choc thermique.

À partir de la température moyenne  $T_{mi} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $T_{me} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , et des calculs analogues à ceux déjà effectués (au § 2.3.3 de [C 7 140]), on trouvera respectivement les variations linéaires suivantes :

- $\Delta \ell_a = 0,076 \text{ mm/m}$  (avec un allongement de 0,042 mm/m et un retrait de 0,034 mm/m) ;
- $\Delta \ell_b = 0,077 \text{ mm/m}$  (avec un allongement de 0,043 mm/m et un retrait de 0,034 mm/m) ;
- $\Delta \ell_c = 0,387 \text{ mm/m}$  (avec un allongement de 0,194 mm/m et un retrait de 0,193 mm/m) ;
- $\Delta \ell_d = 0,388 \text{ mm/m}$  (avec un allongement de 0,194 mm/m et un retrait de 0,194 mm/m).

#### 4.2.3.2 Contraintes internes

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

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

avec  $\sigma'_t$  contrainte de traction si la température baisse,

$\sigma_c$  contrainte de compression si la température s'élève.

Calculons les valeurs des différentes contraintes subies par l'enduit hydraulique et les faces (extérieure et intérieure) du voile en béton ainsi que celles subies par les constituants de l'ITE (tableau 11).

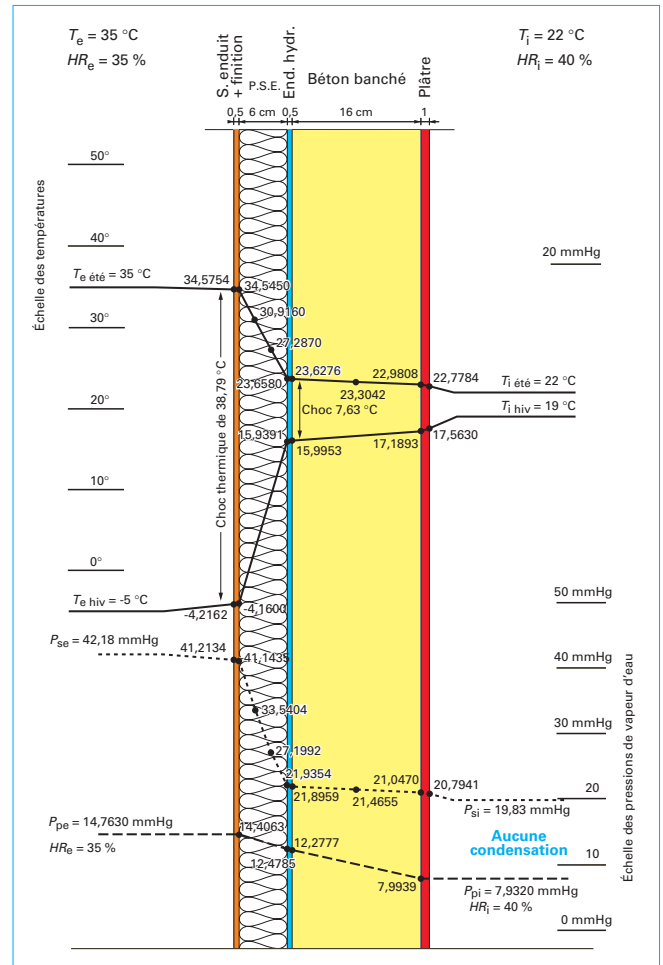


Figure 10 – Diagramme de Glaser d'un voile de béton revêtu d'une ITE (enduit mince) en été

Tableau 11 – Tableau des contraintes

Matériaux	Contraintes	
	Traction	Compression
Enduit hydraulique $E = 75\,000 \text{ kg/cm}^2$ (sur le béton)	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 3,4232$ $\sigma'_t = 2,57 \text{ kg/cm}^2$	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 4,2948$ $\sigma_c = 3,22 \text{ kg/cm}^2$
Béton banché $E = 225\,000 \text{ kg/cm}^2$ – face extérieure – face intérieure	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 3,3787$ $\sigma'_t = 7,60 \text{ kg/cm}^2$ $225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 2,4335$ $\sigma'_t = 5,48 \text{ kg/cm}^2$	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 4,2536$ $\sigma_c = 9,57 \text{ kg/cm}^2$ $225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 3,3580$ $\sigma_c = 7,54 \text{ kg/cm}^2$
PSE $E = 1\,000 \text{ kg/cm}^2$ (face extérieure)	$1\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,3350$ $\sigma'_t = 0,19 \text{ kg/cm}^2$	$1\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,3700$ $\sigma_c = 0,19 \text{ kg/cm}^2$
Sous-enduit $E = 90\,000 \text{ kg/cm}^2$	$90\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,3912$ $\sigma'_t = 17,45 \text{ kg/cm}^2$	$90\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 19,4004$ $\sigma_c = 17,46 \text{ kg/cm}^2$