

Pathologie de l'humidité. Parois revêtues en bâtiment

Étude d'un cas concret

par **Paul DAHAN**

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

1. Support de l'étude	C 7 146 – 2
1.1 État des façades.....	— 2
1.2 Étude hygrothermique	— 2
2. Voile béton avec ITI (60 + 10), en saison hivernale	— 4
2.1 Paramètres étudiés.....	— 4
2.2 Notes de calcul	— 4
3. Voile béton + ITI (60 + 10), en saison estivale	— 10
3.1 Notes de calcul avec $T_e = 35\text{ °C}$ et $HR_e = 35\%$	— 10
3.2 Choc thermique	— 12
3.3 Effets du choc thermique	— 12
4. Analyse et commentaires	— 13
4.1 Condensations	— 13
4.2 Effets du choc thermique	— 18
4.3 Effets de la lame d'air créée par les plots de colle	— 18
5. Étude hygrothermique de la solution curative	— 18
6. ITE enduit mince sur voile béton + ITI (60 + 10 conservée), en saison hivernale	— 19
6.1 Note de calcul avec $T_e = -5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$	— 19
6.2 Épure.....	— 20
6.3 Calcul des flux	— 20
6.4 Calcul des condensations.....	— 20
7. ITE enduit mince sur voile béton + ITI (60 + 10 conservée), en saison estivale.....	— 20
7.1 Note de calcul avec $T_e = 35\text{ °C}$ et $HR_e = 35\%$	— 20
7.2 Épure.....	— 20
7.3 Calcul des flux	— 21
7.4 Calcul des condensations.....	— 21
7.5 Choc thermique	— 21
7.6 Effets du choc thermique	— 21
7.7 Analyse et commentaires.....	— 22
8. Analyse de la présence d'une lame d'air.....	— 22
8.1 Partie courante	— 23
8.2 Partie ventilée	— 25
9. Commentaires.....	— 25
9.1 Bilan « condensation/évaporation » dans l'absolu	— 25
9.2 Pondération du bilan « condensation/évaporation »	— 26
9.3 Lame d'air en relation avec l'ambiance intérieure.....	— 27
9.4 Réflexions sur la méthodologie	— 27
9.5 Conclusion	— 27
Pour en savoir plus.....	Doc. C 7 146

Cette étude de cas a pour objectif de comprendre, par une approche scientifique, la pathologie qui est survenue, en moins de 10 ans, sur les murs périmétriques d'un ensemble pavillonnaire R + 1 (rez-de-chaussée + 1 étage).

Remarque : les caractéristiques physiques des matériaux de construction, les tables de Regnault et les coefficients d'échange superficiels conventionnels sont consultables dans le dossier [Form C 7 137].

1. Support de l'étude

Les murs font la hauteur de l'étage, aussi bien en façade, qu'en pignon (figure 1). Ils sont constitués par des panneaux préfabriqués en béton armé de 13 cm, isolés thermiquement par l'intérieur (ITI).

1.1 État des façades

■ Intérieures

L'isolation thermique, constituée par un complexe polystyrène expansé collé sur un plâtre cartonné (50 + 10) sans pare vapeur, présente :

- des décollements du complexe d'ITI au droit des ouvertures (figures 2 et 3), ainsi que des papiers peints (figure 4) ;
- des moisissures noirâtres principalement situées autour des baies (figure 5), des plinthes (figure 6) et à la cueillie du plafond avec le mur périmétrique (figure 7).

■ Extérieures

Les façades revêtues d'un RPE (revêtement plastique épais) « roulé » présentent :

- des fissures horizontales au droit du plancher, et verticales à la jonction des panneaux préfabriqués entre eux (figure 8) ;
- des éclatements de béton au droit des fers rouillés, où l'enrobage est apparemment insuffisant (figures 9a et 9b).



Figure 1 – Angle de panneaux préfabriqués. Fissures à la jonction des panneaux avec couloires de rouille et décollement du revêtement plastique épais (RPE)

1.2 Étude hygrothermique

L'étude doit permettre :

- de diagnostiquer, d'une façon incontestable, (la ou) les cause(s) qui sont (est) à l'origine des désordres avérés ;
- d'appréhender, scientifiquement, (la ou) les solution(s) curative(s) potentielle(s) ;
- de valider la suppression (de la ou) des cause(s) qui produisent (produit) les effets.

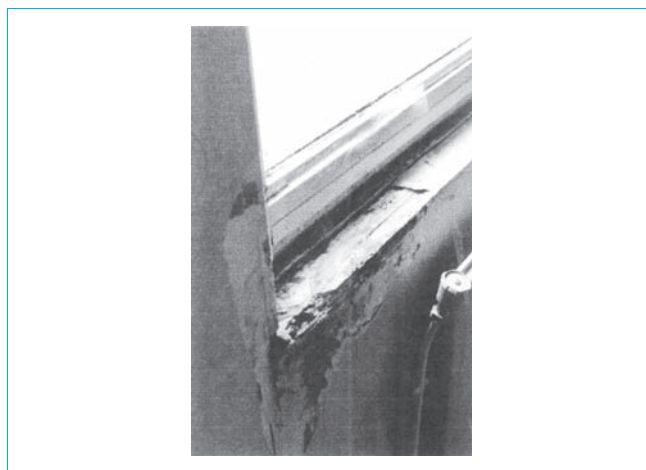


Figure 2 – Décollement du système ITI. Plâtre moisi et décollement du papier peint



Figure 3 – Décollement du système ITI au droit de l'appui de baie



Figure 4 – Décollement du papier peint avec moisissures au niveau de l'appui de baie



Figure 7 – Moisissures noirâtres importantes à la cueillie du plafond

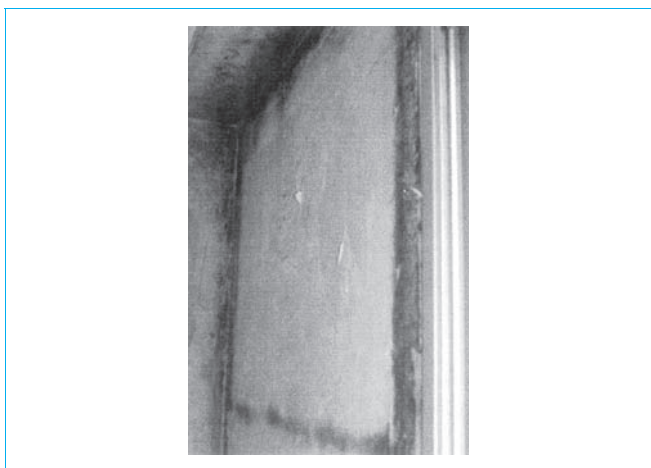


Figure 5 – Moisissures noirâtres au droit du bâti de la baie



Figure 8 – Fissures horizontales et verticales à la jonction des panneaux préfabriqués

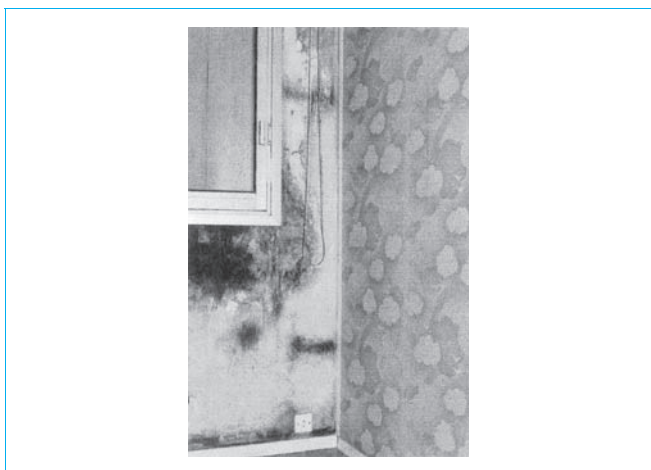
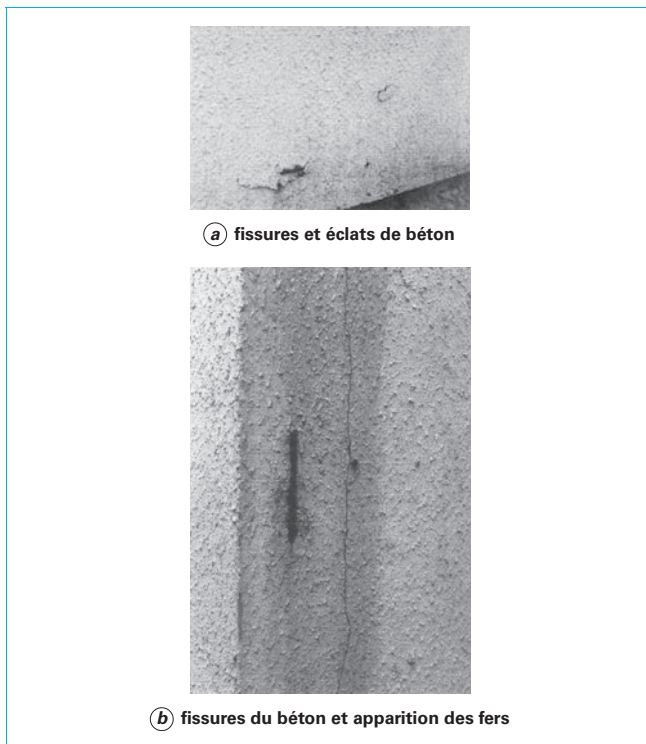


Figure 6 – Moisissures noirâtres le long de la plinthe



(a) fissures et éclats de béton

(b) fissures du béton et apparition des fers

Figure 9 – Enrobage insuffisant des aciers

■ Analyse visuelle

- **À l'intérieur**, les panneaux isolants sont maintenus au mur par l'intermédiaire de plots de colle à base de plâtre (*dont l'épaisseur est variable : de 0 à 2 cm*) qui créent ainsi une lame d'air non ventilée. Mais, avec quelles conséquences ?
- **À l'extérieur**, des fissures apparaissent à la jonction des panneaux. Peut-on en préciser la cause ?

Les panneaux ont pour dimensions :

- en façade, 7,5 x 3 m de hauteur ;
- en pignon, 4,5 x 3 m de hauteur.

■ Constat

La *pathologie dominante*, dans le cas présent, est incontestablement le décollement du système isolant appliqué sur les panneaux préfabriqués. Ceux-ci sont alors sans protection thermique. Sont-ils de ce fait dans une situation assimilable à une *paroi simple* [1] avec, pour conséquences, les désordres ci-dessus décrits (cf. § 1.1).

Afin de pouvoir appréhender, d'une façon plus exhaustive, les conséquences pathologiques éventuelles dues à cette lame d'air non ventilée créée par les plots de colle, **apportons les modifications suivantes aux panneaux préfabriqués** (figure 10) :

- épaisseur du béton, 16 cm, *au lieu de 13 cm* ;
- ITI, 60 + 10 avec pare vapeur, *au lieu de 50 + 10 sans pare vapeur* ;
- plots de colle en plâtre d'une épaisseur constante de 1 cm, *au lieu d'une épaisseur variable (entre 0 et 2 cm)* ;
- enduit hydraulique de 0,5 cm, *au lieu du RPE « roulé »*.

Ces modifications ont pour objectif la comparaison avec la *paroi revêtue* étudiée sans lame d'air au paragraphe 1 du dossier [2].

■ Plan de l'étude

L'étude *hygrothermique* sera constituée par une série de diagramme de Glaser :

- en saison hivernale : en faisant varier la température extérieure de 5 °C, à partir de $T_e = -5$ °C, et cela jusqu'à une température extérieure positive qui permettra à la vapeur d'eau de migrer à l'état vapeur ;
- en saison estivale : en considérant que $T_e = 35$ °C et $HR_e = 35$ %.

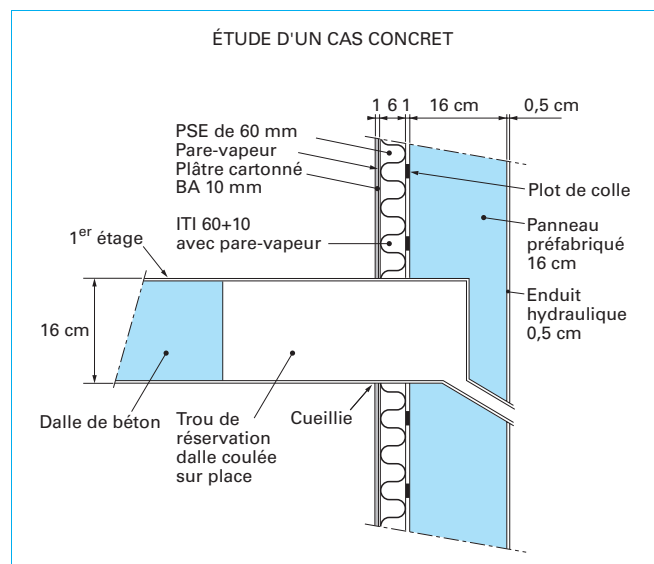


Figure 10 – Coupe verticale au droit de la liaison dalle du 1^{er} étage avec les panneaux préfabriqués du rez-de-chaussée et du 1^{er} étage

■ Conclusion

L'analyse de ces diagrammes devra permettre de statuer, d'une façon irréfutable, sur la (ou les) cause(s) des différents désordres constatés, et, bien sûr, de *valider par une approche scientifique les solutions curatives potentielles*.

La validation devra également en préciser les performances et les limites.

2. Voile béton avec ITI (60 + 10), en saison hivernale

2.1 Paramètres étudiés

Successivement, dans le contexte hivernal, seront analysés les conditions aux cinq variables suivantes :

$$T_e = -5 \text{ °C et } HR_e = 95 \text{ \%}$$

$$T_e = 0 \text{ °C et } HR_e = 95 \text{ \%}$$

$$T_e = 5 \text{ °C et } HR_e = 95 \text{ \%}$$

$$T_e = 7 \text{ °C et } HR_e = 95 \text{ \%}$$

$$T_e = 10 \text{ °C et } HR_e = 95 \text{ \%}$$

Cette étude tient compte de la lame d'air créée par les plots de colle.

2.2 Notes de calcul

2.2.1 Avec $T_e = -5$ °C et $HR_e = 95$ %

Ci-après, la note de calcul du tableau 1 nécessaire au tracé du diagramme de Glaser.

■ Épure

En suivant la même méthode (cf. § 1.1.1 du [2]), nous traçons successivement la courbe des températures, des pressions saturantes et des pressions partielles, d'où le diagramme de la figure 11.

Constatons que, dans le plan de collage du système d'ITI, la vapeur d'eau est en surpression. Il y a donc « condensation ».

■ Calcul des flux : voir le tableau 1.

■ Calcul des condensations : voir le tableau 1.

Inscrivons ces différentes condensations dans les plans concernés, du diagramme de la figure 11.

2.2.2 Avec $T_e = 0$ °C et $HR_e = 95$ %

Ci-après, la note de calcul du tableau 2 nécessaire au tracé du diagramme de Glaser.

■ Épure

En suivant le même procédé, nous traçons successivement la courbe des températures, des pressions saturantes et des pressions partielles, d'où le diagramme de la figure 12.

Constatons que, dans le plan de collage du système d'ITI, la vapeur d'eau est en surpression. Il y a donc « condensation ».

■ Calcul des flux : voir le tableau 2.

■ Calcul des condensations : voir le tableau 2.

Inscrivons ces différentes condensations dans les plans concernés, du diagramme de la figure 12.

Tableau 1 – Notes de calcul avec $T_e = -5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Résist. $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en m ² .h. mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48$ mmHg	Pressions partielles	Flux (en g/m ² · h)	Condensations sur plâtre « 1 » (en g/m ² · h)	Conden- sations sur plâtre « 1 »
			$T = 24\text{ °C}$	$T_i = 19\text{ °C}$					
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0582	1,3957	17,6043	15,1387	$P_{pi} = 9,888\text{ m-mmHg}$	• Flux traversant le PSE : $\frac{(5,8973 - 4,264)}{20} =$ 0,0816	• Condensations superficielles : $(15,9839 - 14,0145) + (14,0145 - 0,1446) = 1,9694 + 13,8699 = 15,8393$	• interne dans plâtre « 1 »
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,3624	17,2414	14,7573	9,8576	• Flux entrant dans la lame d'air : $\frac{900 \times 10^{-4}}{0,025} \times 0,5287 \times 24 \times 0,35 = 15,9839$	• Condensation interne : $0,1446 - 0,1317 = 0,0129$	• interface béton/plâtre « 1 »
100,00	Pare-vapeur = 0,0000	0,0000	0,0000	17,2414	14,7573	5,8973	• Flux sortant de la lame d'air : $\frac{900 \times 10^{-4}}{0,025} \times 0,5287 \times 24 \times 0,3068 = 14,0145$	• Condensation à l'interface béton/plâtre « 1 » : $0,1317 - 0,0113 = 0,1204$	
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,7553	18,1266	- 0,8852	4,2644	5,1053	• Flux entrant dans le plâtre « 1 » : $\frac{130 \times 10^{-4}}{0,035} \times 0,5287 \times 24 \times 0,3068 = 0,1446$		
$\frac{0,01}{0,09} = 0,11$	Plot de colle 1 cm = 0,1400	0,0740	1,7764	- 2,6615	3,6716	5,1010	• Flux sortant du plâtre « 1 » : $\frac{130 \times 10^{-4}}{0,035} \times 0,5287 \times 24 \times 0,2795 = 0,1317$		
0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,3629	- 3,0244	3,5627	5,0705	• Flux traversant le béton : $(3,5627 - 2,9585) / 53,33 = 0,0113$		
53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0483	1,1597	- 4,1841	3,2332	2,9595			
2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0546	- 4,2387	3,2184	$P_{pi} = -2,8595$			
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0317	0,7613	- 5,0000	3,01				
$R_D = 177,48$	$R_{th} = 1,8915$ $K = 0,5287\text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$							Condensation totale = 15,9726	

Tableau 2 – Notes de calcul avec $T_e = 0\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Résist. $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en m ² .h. mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48$ mmHg	Pressions partielles	Flux (en g/m ² · h)	Condensations sur plâtre « 1 » (en g/m ² · h)
			$T_i = 19\text{ °C}$	$T = 19\text{ °C}$				
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0582	1,1049	17,8951	15,3756	$P_i = 9,888$	• Flux entrant ds « es- pace plot » $\frac{900 \times 10^{-4}}{0,025} \times 0,5287 \times 19$ $\times 0,4075 = 14,7363$	interne dans plâtre « 1 »
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,2873	17,6078	15,1070	9,8640		interface béton/plâtre « 1 »
100,00	Pare-vapeur = 0,0000	0,0000	0,0000	17,6078	15,1070	6,7442		Condensations su- perficielles (14,7363 – 13,5792) + (13,5792 – 0,1401) = 1,1571 + 13,4391 = 14,5962
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,7553	14,3502	3,2576	5,7888	6,1202	• Flux sortant de la lame d'air : $\frac{900 \times 10^{-4}}{0,025} \times 0,5287 \times 19$ $\times 0,3755 = 13,5792$	Condensation interne : 0,1401 – 0,1369 = 0,0032
$\frac{0,01}{0,09} = 0,11$	Plot de colle 1 cm = 0,1400	0,0740	1,4063	1,8513	5,2355	6,1168	• Flux entrant dans le plâtre « 1 » : $\frac{130 \times 10^{-4}}{0,35} \times 0,5287 \times 24$ $\times 0,3755 = 0,1401$	Condensation à l'in- terface béton / plâtre « 1 » : 0,1369 – 0,0132 = 0,1229
0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,2873	1,5640	5,1356	6,0928	• Flux sortant du plâtre « 1 » : $\frac{130 \times 10^{-4}}{0,35} \times 0,5287 \times 24$ $\times 0,3669 = 0,1369$	
53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0483	0,9181	0,6459	4,8084	4,4290	• Flux traversant le bé- ton : $\frac{(5,1356 - 4,4290)}{53,33} =$ 0,0132	
2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0432	0,6027	4,7911	$P_i = 4,3510$		
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0317	0,6027	0,0000	4,58			
$R_D = 177,48$	$R_{th} = 1,8915$ $K = 0,5287\text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$						Condensation totale = 14,7223	

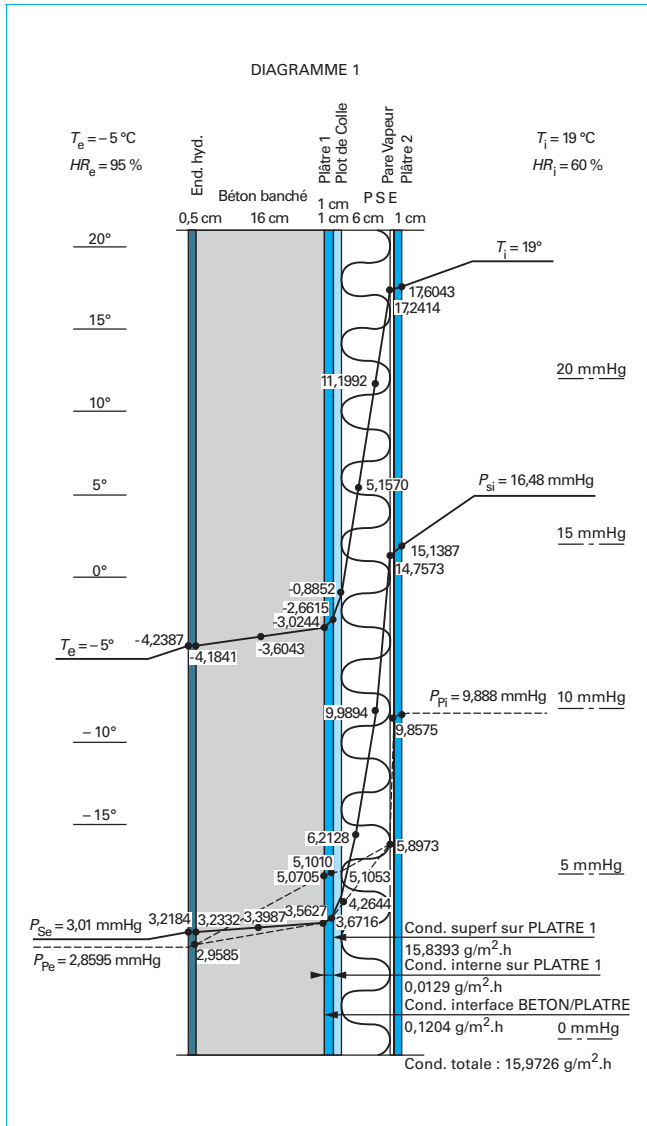


Figure 11 – Diagramme de Glaser 1

2.2.3 Avec $T_e = 5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Ci-après, la note de calcul du tableau 3 nécessaire au tracé du diagramme de Glaser.

■ Épure

Elle est tracée comme pour les cas précédents. Nous obtenons ainsi le diagramme de la figure 13.

Constatons que, dans le plan de collage du système d'ITI, la vapeur d'eau est en surpression. Il y a donc « condensation ».

■ Calcul des flux : voir le tableau 3.

■ Calcul des condensations : voir le tableau 3.

Inscrivons ces différentes condensations dans les plans concernés, du diagramme de la figure 13.

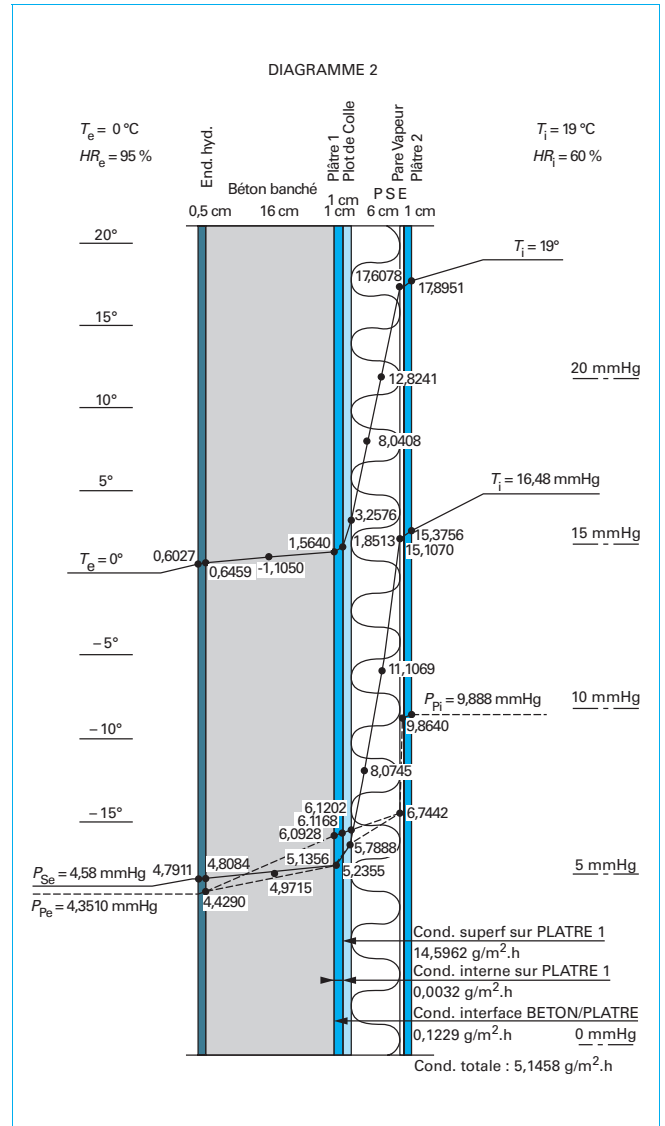


Figure 12 – Diagramme de Glaser 2

2.2.4 Avec $T_e = 7\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Ci-après, la note de calcul du tableau 4 nécessaire au tracé du diagramme de Glaser correspondant.

■ Épure

Toujours suivant la même méthodologie, nous traçons successivement la courbe des températures, des pressions saturantes et des pressions partielles.

Nous obtenons ainsi le diagramme de la figure 14.

On constate que la courbe des pressions partielles est constamment inférieure à celle des pressions saturantes. La migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur.

Il n'y a donc pas de condensation.

Tableau 3 – Notes de calcul avec $T_e = 5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Résist $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en m ² .h. mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de pro- port.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48$ mmHg	Pressions partielles	Flux (en g/m ² · h)	Condensations superficielles sur plâtre « 1 » (en g/m ² · h)
			$T = 14\text{ °C}$	$T_i = 19\text{ °C}$				
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0582	0,8142	18,1858	16,0658	$P_{Pi} = 9,888$	• Flux traversant le PSE : $\frac{(7,8014 - 7,3873)}{20} = 0,0207$	• Condensations superficielles : $2,7328 + (1,7745 - 0,1377) = 2,7328$ $+ 1,6368 = 4,3696$
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,2117	17,9741	15,4541	9,8721	• Flux traversant la lame d'air : $(7,3873 - 7,1921) \times 14 = 2,7328$	• Condensation interne : $0,1377 - 0,1364 = 0,0013$
100,00	Pare-vapeur $= 0,0000$	0,0000	0,0000	17,9741	15,4541	7,8014	• Flux arrivant sur le plâtre « 1 » : $\frac{(7,3873 - 7,1921)}{0,11} = 1,7745$	• Interface béton/plâtre « 1 » : $0,1364 - 0,0154 = 0,1210$
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,7553	10,5738	7,4003	7,7302	7,3873	• Flux entrant dans le plâtre « 1 » : $\frac{130 \times 10^{-4}}{0,35} \times 0,5287 \times 24 \times 0,5009 = 0,1377$	
$\frac{0,01}{0,09} = 0,11$	Plot de colle 1 cm $= 0,1400$	0,0740	1,0362	6,3641	7,1921	7,3850	• Flux sortant du plâtre « 1 » : $\frac{130 \times 10^{-4}}{0,35} \times 0,5287 \times 24 \times 0,4961 = 0,1364$	
0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,2117	6,1524	7,0862	7,3690	• Flux traversant le béton : $\frac{(7,0862 - 6,2648)}{53,33} = 0,0154$	
53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0483	0,6765	5,4759	6,7755	6,2648		
2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0318	5,4441	6,7476	$P_{Pe} = 6,2130$		
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0317	0,4441	5,0000	6,54			
$R_D = 177,48$	$R_{th} = 1,8915$ $K = 0,5287\text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$						Condensation totale = 4,4919	

Tableau 4 – Notes de calcul avec $T_e = 7^\circ\text{C}$ et $HR_e = 95\%$

Résist. $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si}=16,48\text{-mmHg}$	Pressions partielles	Flux (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)	Condensations (d'après [2])
			$^\circ\text{T} = 12^\circ\text{C}$	$\text{T}_i = 19^\circ\text{C}$				
0,77	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0582	0,6979	18,3021	15,7821	$P_{pi} = 9,888$	• Flux traversant l'ensemble du mur : $\frac{(9,8880 - 7,1345)}{177,48} = 0,0155$ • Humidité relative intérieure « HR_i » à ne pas dépasser pour éviter les condensations internes Il suffit que la pression partielle, à l'interface béton / plâtre « 1 », soit égale ou inférieure à la valeur de la pression saturante qui y règne : $P_s = 8,0439\text{ mmHg}$. $\frac{P_{p \times i} - 8,0439}{121,45} = \frac{P_{p \times i} - 7,1345}{177,48}$ Soit : $P_{p \times i} = 10,0254\text{ mmHg}$. C'est-à-dire : $HR_i \leq \frac{10,0254}{16,48} \times 100 = 60,83\%$	• Constat : il n'y a aucune condensation
	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,1814	18,1207	15,6007	9,8761		
	100,00	Pare-vapeur = 0,0000	0,0000	18,1207	15,6007	8,3246		
	20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,7553	9,0633	9,0574	8,6444	8,0143	
	$\frac{0,01}{0,09} = 0,11$	Plot de colle 1 cm = 0,1400	0,0740	0,8882	8,1692	8,1446	8,0126	
	0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,1814	7,9878	8,0439	8,0007	
	53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0483	0,5799	7,4079	7,7340	7,1733	
	2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0273	7,3807	7,7184	$P_{pe} = 7,1345$	
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0317	0,3807	7,0000	7,51			
$R_D = 177,48$	$R_{th} = 1,8915$ $K = 0,5287\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$							

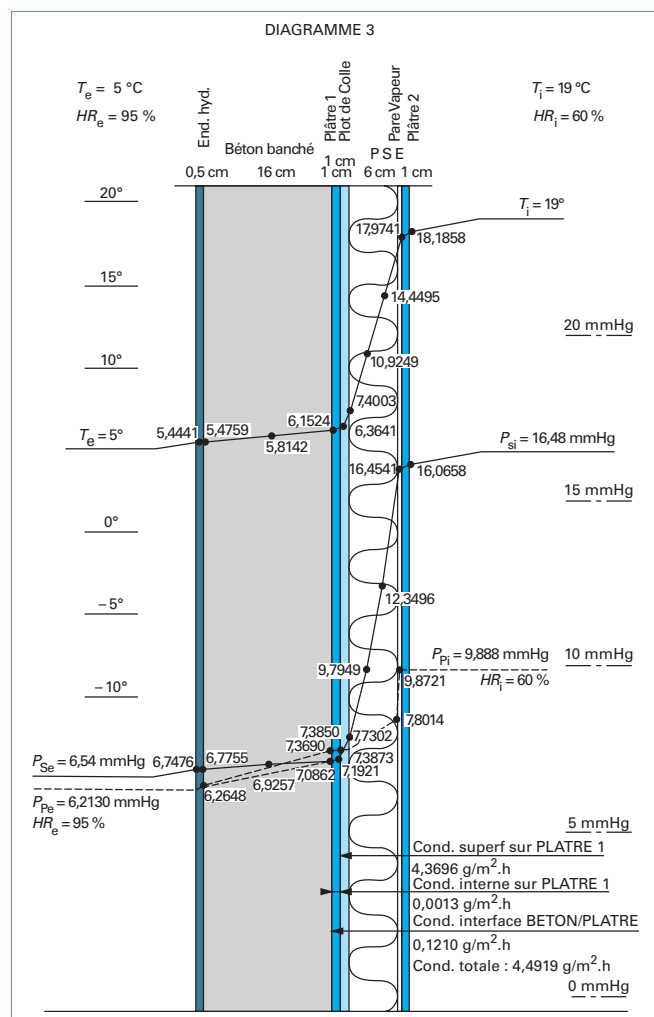


Figure 13 – Diagramme de Glaser 3

- Calcul des flux : voir le tableau 4.
- Calcul des condensations : voir le tableau 4.

Donc, aucune condensation, tant que :
 $HR_i \leq 60\%$ quand $T_i = 19^\circ\text{C}$.

Inscrivons ce résultat sur le diagramme de la figure 14.

2.2.5 Avec $T_e = 10^\circ\text{C}$ et $HR_e = 95\%$

Ci-après, la note de calcul du tableau 5 nécessaire au tracé du diagramme de Glaser de la figure 15.

■ Épure

Nous traçons successivement la courbe des températures, des pressions saturantes et des pressions partielles. Nous obtenons ainsi le diagramme de la figure 15.

Nous constatons que la courbe des pressions partielles est constamment inférieure à celle des pressions saturantes. La migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur : donc **pas de condensation**.

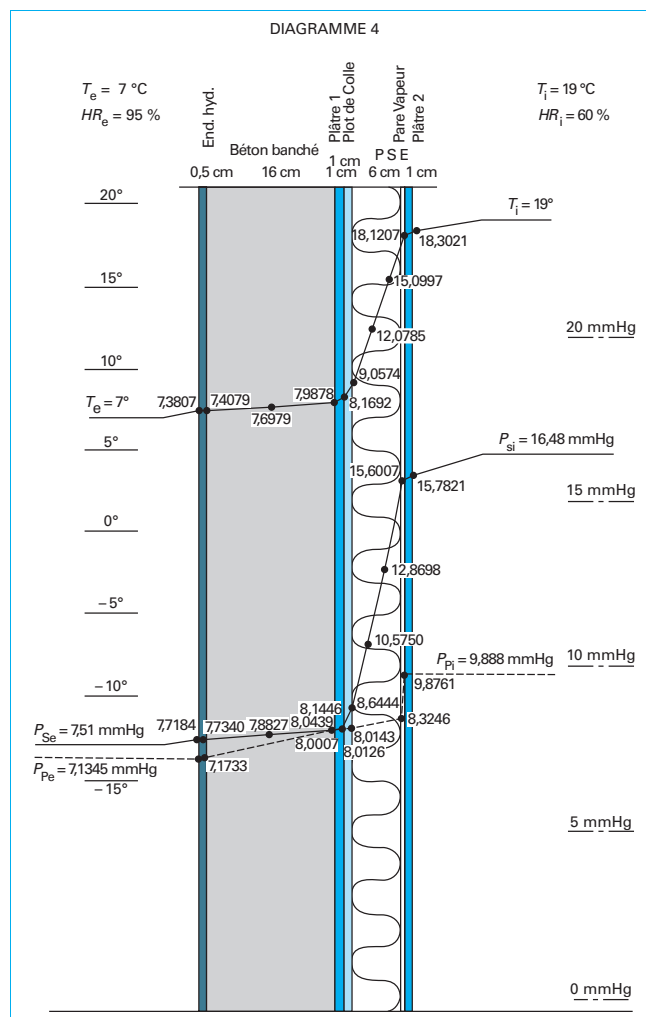


Figure 14 – Diagramme de Glaser 4

- Calcul des flux : voir le tableau 5.
- Calcul des condensations : voir le tableau 5.

Donc, aucune condensation, tant que :
 $HR_i \leq 70\%$ quand $T_i = 19^\circ\text{C}$.

Inscrivons ce résultat sur le diagramme de la figure 15.

3. Voile béton + ITI (60 + 10), en saison estivale

Il est tenu compte de la lame d'air créée par les plots de colle.

3.1 Notes de calcul avec $T_e = 35^\circ\text{C}$ et $HR_e = 35\%$

Ci-après la note de calcul du tableau 6 nécessaire au tracé du diagramme de Glaser.

Tableau 5 – Notes de calcul avec $T_e = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $HR_e = 95\%$

Résist $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en m ² .h. mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48$ mmHg	Pressions partielles	Flux (en g/m ² · h)	Condensations
			$\Delta T = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_i = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$				
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0582	0,5234	18,4766	15,9566	$P_{pi} = 9,888$	Flux traversant le plâtre « 2 » $\frac{(9,888 - 9,8831)}{0,77} =$ 0,0064	• Constat : il n’y a aucune condensation
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,1361	18,3405	15,8205	9,8831	Flux traversant le PSE $\frac{(9,2416 - 9,1133)}{20,00} =$ 0,0064	• Humidité relative intérieure « HR _i » à ne pas dépasser pour éviter les condensa- tions internes. Il faut que la pression par- tielle, à l’interface bé- ton / plâtre « 1 », soit égale ou inférieure à la valeur de la pression saturante qui y règne : Ps = 9,6745 mmHg. D’où l’équation : $\frac{Pp_{x.i.} - 9,6745}{121,45} =$ $\frac{Pp_{x.i.} - 8,7495}{177,48}$ Soit, $Pp_{x.i.} = 11,69\text{ mmHg.}$ C’est-à-dire : $HRi \leq \frac{11,69}{16,48} \times 100 = 70,93\%$
100,00	Pare-vapeur = 0,0000	0,0000	0,0000	18,3405	15,8205	9,2416	Flux traversant l’en- semble du mur : $\frac{(9,8880 - 8,7495)}{177,48} =$ 0,0064	
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,7553	6,7975	11,5431	10,2102	9,1133		
$\frac{0,01}{0,09} =$ 0,11	Plot de colle 1 cm = 0,1400	0,0740	0,6661	10,8769	9,7638	9,1126		
0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,1361	10,7408	9,6745	9,1076		
53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0483	0,4349	10,3059	9,4035	8,7655		
2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0205	10,2855	9,3913	$P_{pe} = 8,7495$		
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0317	0,2855	10,0000	9,21			
R _D =177,48	R _{th} = 1,8915 K = 0,5287 W/m ² · °C							

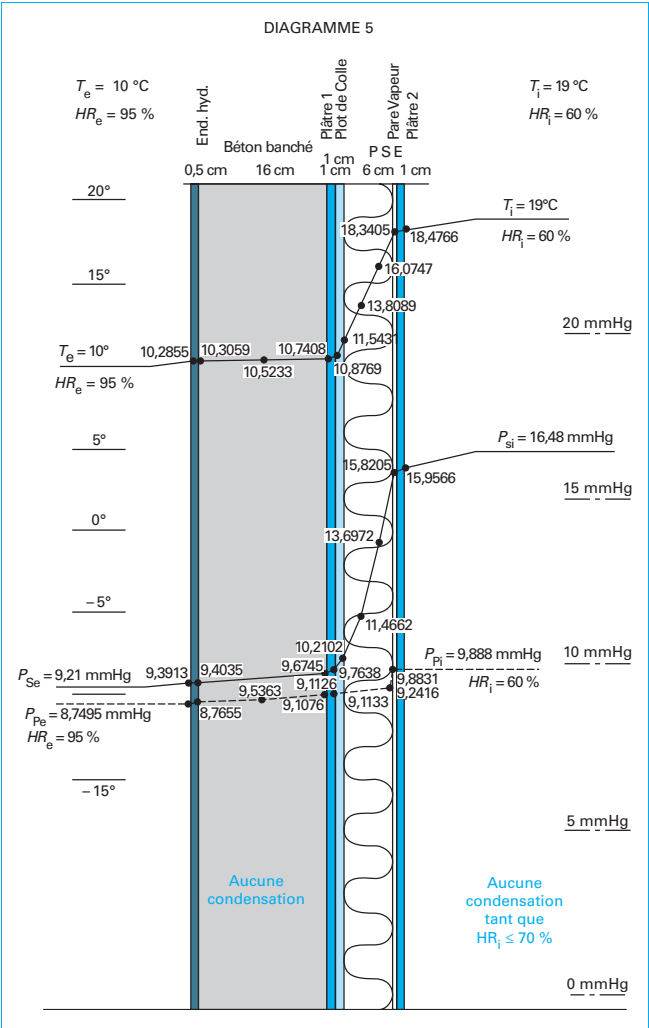


Figure 15 – Diagramme de Glaser 5

3.1.1 Épure

La courbe des températures, des pressions saturantes et des pressions partielles une fois tracées, nous obtenons ainsi le diagramme de la figure 16.

La courbe des pressions partielles est constamment inférieure à celle des pressions saturantes : la migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur, et il ne peut y avoir condensation.

3.1.2 Calcul des flux

Voir le tableau 6.

3.1.3 Calcul des condensations

Aucune condensation n'apparaît (voir tableau 6).

3.2 Choc thermique

Calculons le choc thermique saisonnier « ΔTs » dans les plans suivants :

- enduit hydraulique de 0,5 cm ΔTs. end. hyd. = 38,8368 °C ;
- béton face extérieure ΔTs. béton. ext. = 38,7422 °C ;

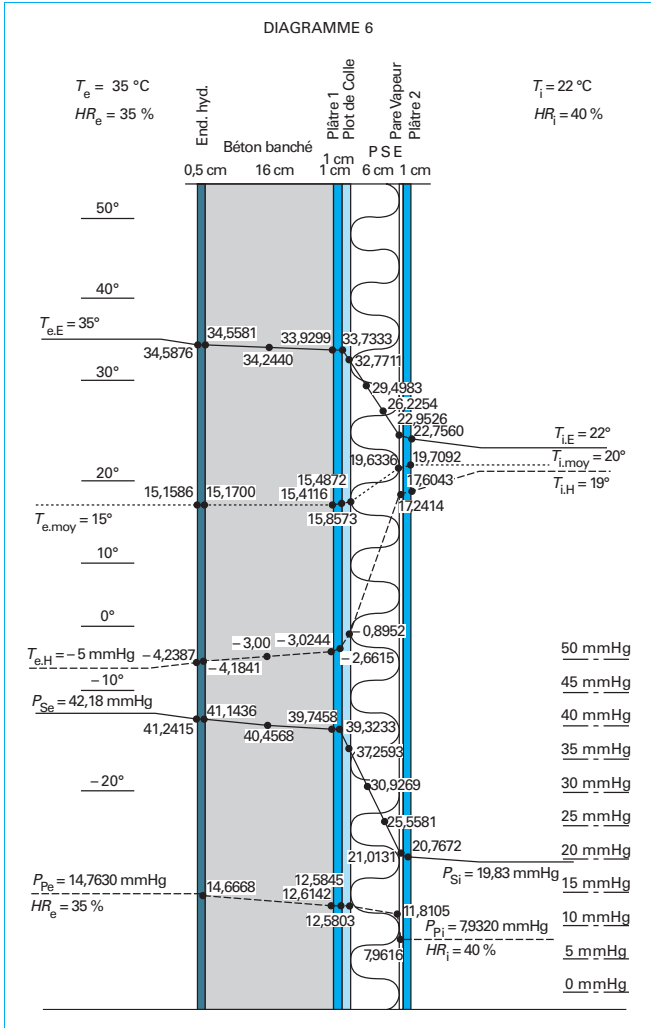


Figure 16 – Diagramme de Glaser 6

– plots de colle ΔTs. plots. colle. = 36,3948 °C.

3.3 Effets du choc thermique

3.3.1 Variations linéaires

Sous l'effet de la température, la variation linéaire « Δl », (allongement ou raccourcissement), est égale à :

$$\Delta l = l_0 \times \alpha \times \Delta T_s$$

Ce qui donne les variations suivantes pour l₀ = 1 000 mm (tableau 7) :

3.3.2 Contraintes internes

Pour les matériaux ayant des liaisons, les variations de la température engendrent des contraintes internes « σ » égales à :

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

■ Pour l'enduit hydraulique

Contrainte totale : 75 000 × 1,10⁻⁵ × 38,8263 ≈ 29,12 kg/cm², qui peut engendrer :

- une contrainte de traction égale à σ_{tr.} = 14,56 kg/cm² ;
- une contrainte de compression égale à σ_{c.} = 14,56 kg/cm².

Tableau 6 – Notes de calcul avec $T_e = 35\text{ °C}$ et $HR_e = 35\%$

Résist. $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en m ² .h. mmHg/g)	Résistances ther- miques élémen- taires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si}=19,83$ - mmHg	Pressions partielles	Tempéra- tures moyen- nes	Flux (en g/m ² · h)	Conden- sation
			$\Delta T = 13\text{ °C}$	$T_i = 22\text{ °C}$					
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0582	0,7560	22,7560	20,7672	$P_{pi} = 7,9320$	$T_i = 20\text{ °C}$		Aucune
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,1966	22,9526	21,0131	7,9616	19,7092	$\frac{P_{pxe} - 21,0131}{76,71} = \frac{P_{pxe} - 7,9320}{177,48}$	
100,00	Pare-vapeur = 0,0000	0,0000	0,0000	22,9526	21,0131	11,8105	19,6336	$(177,48 - 76,71) P_{pxe} = 21,0131 \times 177,4 - 7,9320 \times 76,7$	
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,7553	9,8186	32,7711	37,2593	12,5803	19,6336	$P_{pxe} = 3120,9413$ $100,77 = 30,9709$	
$\frac{0,01}{0,09} = 0,11$	Plot de colle 1 cm = 0,1400	0,0740	0,9622	33,7333	39,3233	12,5845	15,8573	$HR_{xe} \leq \frac{30,9709}{42,18} \times 100 \leq 73,425$	
0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0151	0,1966	33,9299	39,7458	12,6142	15,4872	$HR_{xe} \leq 73\%$	
53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0483	0,6282	34,5581	41,1436	14,6668	15,4116	Flux traversant l'ensemble du mur : $\frac{(14,7630 - 7,932)}{177,48} = 0,0385$	
2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0296	34,5876	41,2415	$P_{pe}=14,7630$	15,1700		
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0317	0,4124	35,00	42,18		15,1586		
$R_D = 177,48$	$R_{th} = 1,8915$ $K = 0,5287\text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$		15,000						

■ Pour la face extérieure du béton

Contrainte totale : $225\,000 \times 1,10^{-5} \times 38,7422 \approx 87,17\text{ kg/cm}^2$, qui peut engendrer :

- une contrainte de traction égale à $\sigma_{tr} = 43,55\text{ kg/cm}^2$;
- une contrainte de compression égale à $\sigma_c = 43,62\text{ kg/cm}^2$.

■ Pour le plan d'adhérence des plots de colle

Contrainte totale : $60\,000 \times 0,9 \times 10^{-5} \times 36,3948 \approx 19,65\text{ kg/cm}^2$, qui peut engendrer :

- une contrainte de traction égale à $\sigma_{tr} = 9,80\text{ kg/cm}^2$;
- une contrainte de compression égale à $\sigma_{tr} = 9,85\text{ kg/cm}^2$.

4. Analyse et commentaires

4.1 Condensations

Pour évaluer la quantité de vapeur d'eau condensable ou évaporable, en fonction des *degrés/jours* issus des relevés hygrothermiques annuels (établis par le centre régional de Météo France dont dépend le lieu de la construction), il faut calculer les périodes de temps où il y a condensation et celles où il y a évaporation.

Tableau 7 – Variations linéaires (Δl) lorsque $l_0 = 1\,000\text{ mm}$

Δl	Totale (en mm/m)	Allongement (en mm/m)	Retrait (en mm/m)
$\Delta l_{s. \text{ end. hyd.}}$	0,388	0,194	0,193
$\Delta l_{s. \text{ béton. ext.}}$	0,387	0,194	0,193
$\Delta l_{s. \text{ plots. colle.}}$	0,364	0,182	0,182

En fonction du bilan « condensation/évaporation », on pourra statuer sur les désordres *potentiels* ou *réels*.

À titre d'**exemple**, nous établissons ce bilan à partir du relevé météo du mois de février 1997 à Villacoublay, en région parisienne (cf. 4.1.1 et [Doc. C 7 146]).

4.1.1 Relevés de Météo France : station départementale de Villacoublay (année 1997)

■ Nature des relevés

Météo France possède des centres départementaux répartis sur l'ensemble du territoire, qui sont ainsi en mesure de fournir des renseignements climatologiques relatifs au lieu où se trouve la construction devant faire l'objet d'une étude hygrothermique (cf. [Doc. C 7 146]).

Sur demande écrite, chaque centre fournit les relevés climatiques (*température et humidité relative*) suivant la périodicité souhaitée.

■ Périodicité

Les informations fournies peuvent être les suivantes :

- **pour chaque heure** (*de chaque jour d'un même mois*) (cf. tableau 1 dans [Doc. C 7 146]) : température et humidité relatives ;
- **pour chaque jour** (*d'un même mois*) : température et humidité relatives minimales, température et humidité relatives maximales, température moyenne de la journée ;

- **par décade** (*d'un même mois*) : température et humidité relatives minimales, température et humidité relatives maximales, température moyenne de la décade ;

- **pour le mois** (cf. tableau 2 dans [Doc. C 7 146]) : température et humidité relatives minimales moyennes, température et humidité relatives maximales moyennes, température moyenne du mois.

■ Exploitation

• Bilan journalier

Pour cette étude hygrothermique, nous avons pris le parti (*par expérience*) de regrouper pour chaque jour le nombre d'heures où la température extérieure reste à l'intérieure d'une même tranche de 5 °C. L'objectif est de limiter le nombre de diagrammes de Glaser, tout en restant aussi près que possible des variations climatiques.

Le tableau 8 représente le nombre d'heures où les températures restent dans les limites des 5 °C. On calcule la température moyenne pondérée à l'intérieur d'une même tranche, ainsi que celle de l'humidité relative correspondante, pour chaque journée.

Tableau 8 – Ensemble des relevés hygrothermiques de Météo France (station de Villacoublay) pour le mois de février 1997

Dates	Variations de T_e dans une tranche de 5 °C (en h)				
	– 7 à – 0,1 °C	0 à 4,9 °C	5 à 9,9 °C	10 à 14,9 °C	15 °C et plus
1	19 $T_e = -1,07$ °C $HR_e = 93,79$ %	5 $T_e = 0,34$ °C $HR_e = 91,2$ %			
2	18 $T_e = -1,29$ °C $HR_e = 96,22$ %	6 $T_e = 0,92$ °C $HR_e = 94,67$ %			
3		24 $T_e = 2,14$ °C $HR_e = 97$ %			
4		18 $T_e = 3,08$ °C $HR_e = 97$ %	6 $T_e = 6,10$ °C $HR_e = 84,17$ %		
5		9 $T_e = 3,19$ °C $HR_e = 93,56$ %	15 $T_e = 6,96$ °C $HR_e = 84,22$ %		
6		15 $T_e = 2,34$ °C $HR_e = 90,93$ %	9 $T_e = 7,88$ °C $HR_e = 63,67$ %		
7		13 $T_e = 1,87$ °C $HR_e = 85,08$ %	7 $T_e = 6,99$ °C $HR_e = 63,67$ %	4 $T_e = 11,25$ °C $HR_e = 56,25$ %	
8		11 $T_e = 3,82$ °C $HR_e = 88,18$ %	8 $T_e = 7,34$ °C $HR_e = 78,25$ %	5 $T_e = 12,20$ °C $HR_e = 60,80$ %	
9		10 $T_e = 3,10$ °C $HR_e = 93,70$ %	9 $T_e = 7,78$ °C $HR_e = 77,22$ %	5 $T_e = 11,40$ °C $HR_e = 64,40$ %	
10		3 $T_e = 4,67$ °C $HR_e = 87,33$ %	17 $T_e = 7,09$ °C $HR_e = 89,41$ %	4 $T_e = 10,75$ °C $HR_e = 72,75$ %	
11		10 $T_e = 3,17$ °C $HR_e = 87,8$ %	13 $T_e = 7,75$ °C $HR_e = 85,69$ %	1 $T_e = 10,00$ °C $HR_e = 96$ %	
12			4 $T_e = 9,75$ °C $HR_e = 92,65$ %	20 $T_e = 10,90$ °C $HR_e = 87,05$ %	

Tableau 8 – Ensemble des relevés hygrothermiques de Météo France (station de Villacoublay) pour le mois de février 1997 (suite)

Dates	Variations de T_e dans une tranche de 5 °C (en h)				
	- 7 à - 0,1 °C	0 à 4,9 °C	5 à 9,9 °C	10 à 14,9 °C	15 °C et plus
13		4 $T_e = 4,32$ °C $HR_e = 79,75$ %	20 $T_e = 7,17$ °C $HR_e = 72,95$ %		
14		12 $T_e = 3,70$ °C $HR_e = 93,75$ %	8 $T_e = 8,07$ °C $HR_e = 94,62$ %	4 $T_e = 11,75$ °C $HR_e = 81,50$ %	
15		17 $T_e = 3,10$ °C $HR_e = 85,71$ %	7 $T_e = 6,84$ °C $HR_e = 64,14$ %		
16	1 $T_e = - 0,10$ °C $HR_e = 93,00$ %	14 $T_e = 2,26$ °C $HR_e = 88,34$ %	9 $T_e = 6,50$ °C $HR_e = 60,11$ %		
17		1 $T_e = 4,90$ °C $HR_e = 94$ %	19 $T_e = 7,44$ °C $HR_e = 90,16$ %	4 $T_e = 10,25$ °C $HR_e = 72,50$ %	
18		5 $T_e = 4,26$ °C $HR_e = 80$ %	17 $T_e = 8,05$ °C $HR_e = 83,53$ %	2 $T_e = 11,50$ °C $HR_e = 86$ %	
19		11 $T_e = 2,85$ °C $HR_e = 88,36$ %	12 $T_e = 8,86$ °C $HR_e = 74,75$ %	1 $T_e = 10$ °C $HR_e = 85$ %	
20			19 $T_e = 8,14$ °C $HR_e = 77,26$ %	5 $T_e = 11,20$ °C $HR_e = 58,8$ %	
21			16 $T_e = 7,95$ °C $HR_e = 84,81$ %	8 $T_e = 10,87$ °C $HR_e = 75,5$ %	
22			12 $T_e = 7,31$ °C $HR_e = 88,92$ %	12 $T_e = 12,08$ °C $HR_e = 67,08$ %	
23			17 $T_e = 7,56$ °C $HR_e = 88,82$ %	7 $T_e = 11$ °C $HR_e = 80,29$ %	
24			4 $T_e = 9,82$ °C $HR_e = 90$ %	20 $T_e = 10,85$ °C $HR_e = 87,5$ %	
25			5 $T_e = 9,56$ °C $HR_e = 90,8$ %	19 $T_e = 11,21$ °C $HR_e = 89$ %	
26			20 $T_e = 7,8$ °C $HR_e = 80,2$ %	4 $T_e = 11$ °C $HR_e = 65,75$ %	
27		5 $T_e = 3,74$ °C $HR_e = 92,2$ %	14 $T_e = 7,51$ °C $HR_e = 76,93$ %	5 $T_e = 10,8$ °C $HR_e = 59,8$ %	
28		3 $T_e = 4,4$ °C $HR_e = 71,33$ %	7 $T_e = 6,3$ °C $HR_e = 66,57$ %	10 $T_e = 12,1$ °C $HR_e = 54$ %	4 $T_e = 16,1$ °C $HR_e = 36,75$ %

• Bilan par décade

Il est intéressant de tracer l'histogramme des relevés des températures moyennes de chaque décade, aussi bien pour les températures minimales, maximales que moyennes pour les 12 mois d'une même année.

Au préalable, il faut avoir déterminé la température extérieure pour laquelle la migration de la vapeur d'eau au travers de la paroi étudiée commence à se faire à l'état vapeur. Autrement dit, connaître la température extérieure (qui est, dans le cas étudié, cf. § 2.4, égale à $T_e = 7$ °C) à partir de laquelle il n'y a plus de condensations potentielles (*internes et superficielles*).

Sur deux axes orthogonaux cartésiens, on porte :

- en ordonnées, les températures extérieures ;
- en abscisse (à la température $T_e = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$, dans le cas étudié) le temps par décade.

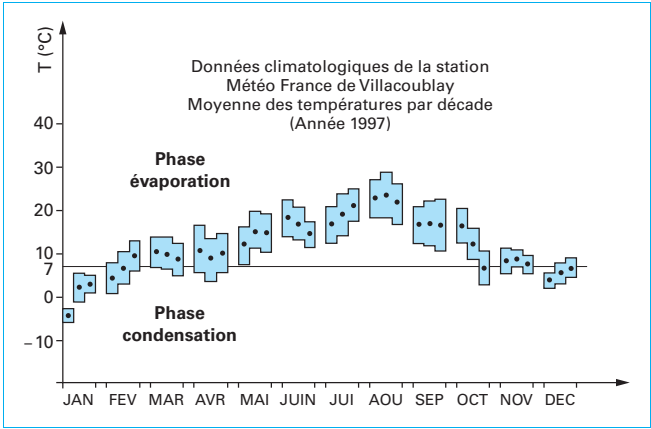


Figure 17 – Moyenne des températures par décade (Crédit Météo France)

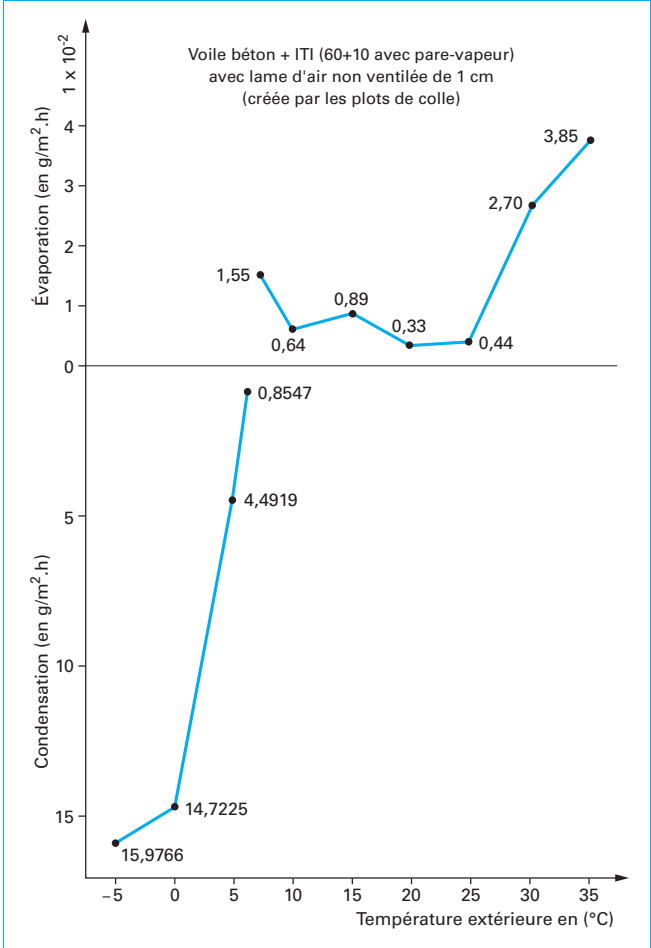


Figure 18 – Condensation et évaporation potentielle en fonction de T_e

Sur un même histogramme, on porte les températures minimales et maximales :

- la zone inférieure à $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ correspond à des phases de condensation ;
- la zone supérieure à $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ correspond à des phases d'évaporation.

On trace également la courbe des températures moyennes de la décade (figure 17).

On visualise ainsi les périodes dominantes (*phases de condensation et phases d'évaporation potentielle*) pour la paroi étudiée, pour l'année écoulée, pour un lieu donné. Cette visualisation sera une aide précieuse dans l'analyse de risque, soit lors de :

- l'étude de l'avant-projet sommaire (APS) ;
- l'expertise qui suit la déclaration de sinistre.

4.1.2 Renseignements à associer aux relevés de Météo France

Pour être en mesure de calculer les quantités de vapeur d'eau condensables ou évaporables pendant une période donnée, en fonction des conditions hygrothermiques régnant à l'extérieur, il faut regrouper sur un même graphique ces résultats pour chaque paroi (tableau 9).

Regroupons ces quantités (*condensables ou évaporables*) sur le graphique de la figure 18 avec :

- en abscisse, l'axe des températures extérieures T_e en $^{\circ}\text{C}$;
- en ordonnée, l'axe des quantités de vapeur, d'une part condensables, en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$ (*vers le bas*), et, d'autre part, évaporables (*vers le haut*) en $1 \cdot 10^{-2} \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ (*attention aux échelles*).

Tableau 9 – Résultats des quantités condensables ou évaporables pour le voile de béton + ITI (60 + 10 avec pare-vapeur) lame d'air non ventilée de 1 cm (crée par les plots de colle)				
T_e (en $^{\circ}\text{C}$)	T_i (en $^{\circ}\text{C}$)	Condensation (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)	Évaporation (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)	Aucune condensation tant que :
HR_e (en %)	HR_i (en %)			
- 5	19	15,9766		$HR_i < 30\%$
95	60			
0	19	14,7225		$HR_i < 41\%$
95	60			
5	19	4,4919		$HR_i < 54\%$
95	60			
6	19	0,8547		$HR_i < 57\%$
95	60			
7	19		0,0155	$HR_i < 60\%$
95	60			
10	19		0,0064	$HR_i < 70\%$
95	60			
15	20		0,0091	$HR_i < 95\%$
90	60			
20	21		0,0038	Voir nota*
70	60			
25	21		0,0044	
45	50			
30	22		0,0270	
40	40			
35	22		0,0385	
35	40			

* Nota : lorsque la température extérieure « T_e » est telle que : $T_e \geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Il faut prévoir la climatisation des locaux, pour que la température intérieure ne croisse pas en même temps que la température extérieure (*par effet de serre par exemple*). Au fur et à mesure que la température extérieure (en saison estivale) va s'élever, l'humidité relative correspondante va diminuer (*et ce phénomène naturel est valable sur l'ensemble du territoire national*).

Exemple : pour $T_e > 20^\circ\text{C}$, on aura $HR_e < 75\%$.

Quand $T_e > 30^\circ\text{C}$, on aura $HR_e < 45\%$.

En effet, nous avons vu (cf. [3]) qu'en été, l'humidité absolue de l'air est sensiblement égale à : $W \approx 12 \text{ g/m}^3$, alors que la saturation W_s de l'air, pour 20°C et 30°C , est atteinte pour des quantités respectivement égales à : 16 et 26 g/m^3 .

Sur ce graphique de la figure 18, on effectuera directement les interpolations lorsqu'il faudra évaluer les quantités de vapeur d'eau condensables ou évaporables pour des conditions hygrothermiques intermédiaires (cf. § 4.1.1 Bilan journalier).

Remarquons les grandes différences entre les quantités condensables et évaporables [*rapport pouvant aller de 2 300 (ou 700) à 1*] (tableau 9).

Tableau 10 – Résultats des quantités évaporables suite à l'application de l'ITE sur le voile de béton ayant une ITI (60 + 10 avec pare-vapeur) en tenant compte de la lame d'air non ventilée de 1 cm (créée par les plots de colle)

T_e (en $^\circ\text{C}$) HR_e (en %)	T_i (en $^\circ\text{C}$) HR_i (en %)	Condensation (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)	Évaporation (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)	Aucune condensation tant que :
- 5 95	19 60		0,0341	$HR_i < 83\%$
0 95	19 60		0,0269	$HR_i < 97\%$
5 95	19 60		0,0178	$HR_i < 98\%$
7 95	19 60		0,0134	$HR_i < 98\%$
10 95	19 60		0,0055	$HR_i < 99\%$
15 70	20 60		0,0074	$HR_i < 99\%$
20 60	21 60		0,0032	Voir nota*
25 45	22 50		0,0038	
30 40	22 40		0,0233	
35 35	22 40		0,0332	

* **Nota :** lorsque la température extérieure « T_e » est telle que $T_e \geq 20^\circ\text{C}$

Nous constatons qu'en appliquant à l'extérieur un isolant thermique ayant une épaisseur égale à 2 fois celle de l'isolant intérieur, la migration de la vapeur d'eau à travers l'ensemble de la paroi ainsi revêtue, se fait à l'état vapeur. On supprime donc les causes (*condensations et dilatations*) qui produisent les effets (*moisissures noirâtres et fissurations*) (tableau 10).

Représentons ces résultats sur le graphique de la figure 19.

4.1.3 Exploitation des données

On regroupe, jour par jour, le nombre d'heures pendant lequel la température extérieure « T_e » reste dans une tranche de 5°C . On note également l'humidité relative moyenne correspondante « HR_e ».

■ Total des heures par tranche

- de -7 à $-0,1^\circ\text{C}$: 38 heures à la température moyenne de $-1,15^\circ\text{C}$;
- de 0 à $4,9^\circ\text{C}$: 196 heures à la température moyenne de $2,84^\circ\text{C}$;
- de 5 à $6,9^\circ\text{C}$: 51 heures à la température moyenne de $6,67^\circ\text{C}$;
- de 7 à $9,9^\circ\text{C}$: 243 heures à la température moyenne de $7,82^\circ\text{C}$;
- de 10 à $14,9^\circ\text{C}$: 144 heures à la température moyenne de $11,34^\circ\text{C}$.

■ Condensation ou évaporation par tranche horaire

En admettant une interpolation linéaire correspondant aux températures moyennes par tranche d'heures, nous avons :

- de -7 à $-0,1^\circ\text{C}$: condensation égale à $15,0109 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- de 0 à $4,9^\circ\text{C}$: condensation égale à $8,9115 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- de 5 à $6,9^\circ\text{C}$: condensation égale à $0,7412 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- de 7 à $9,9^\circ\text{C}$: évaporation égale à $0,0130 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- de 10 à $14,9^\circ\text{C}$: évaporation égale à $0,0064 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$.

■ Bilan par tranche

- de -7 à $-0,1^\circ\text{C}$: condensation égale à $570,4158 \text{ g/m}^2$;
- de 0 à $4,9^\circ\text{C}$: condensation égale à $1746,6578 \text{ g/m}^2$;
- de 5 à $6,9^\circ\text{C}$: condensation égale à $37,8012 \text{ g/m}^2$;
- de 7 à $9,9^\circ\text{C}$: évaporation égale à $3,1469 \text{ g/m}^2$;
- de 10 à $14,9^\circ\text{C}$: évaporation égale à $0,9216 \text{ g/m}^2$.

Le bilan mensuel est en faveur d'une condensation potentielle dont la quantité totale « q_{totale} » est égale à :

$$q_{\text{totale}} = 2,359,8063 \text{ g/m}^2$$

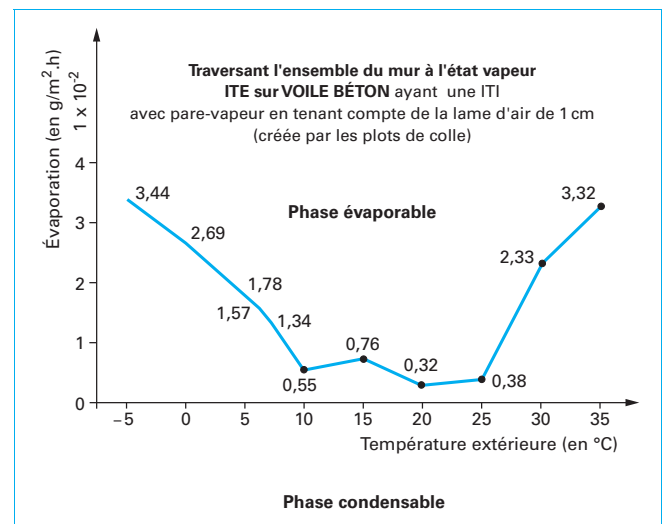


Figure 19 – Visualisation de la phase condensable

■ Commentaires

- Ainsi, le plâtre « 1 » après avoir absorbé 500 g/m^2 de vapeur d'eau condensée, atteindra son taux d'humidité critique de 5 %. Le reste, à savoir : $2\,359,8063 - 500,0000 = 1\,859,8063 \text{ g/m}^2$, va s'accumuler, par gravité, sur la dalle béton (de 16 cm d'épaisseur).
- Les panneaux préfabriqués ayant une hauteur de 3 m , la dalle va recevoir de la façade : $1\,859,8063 \times 3 = 5\,552,4189 \text{ g}$ d'eau au ml. La dalle (et éventuellement son revêtement de sol) va pouvoir absorber à son tour, par capillarité, cette quantité d'eau.

Exemple. Quelle quantité « q » d'eau serait nécessaire pour qu'une largeur de 1 cm de dalle sur une longueur de 1 m ait atteint le taux d'humidité critique de 20 % ?

Il faut : $q = 1 \times 100 \times 16 \times 20/100 = 320 \text{ cm}^3$, soit 320 g . Autrement dit, si seul la dalle absorbe l'eau en excès, il y aura une largeur « l » égale à :

$l = 5\,552,4189/320 \approx 17,3 \text{ cm}$ qui sera potentiellement *mouillée*

- Notons la grande différence quantitative entre les phénomènes potentiels de condensation et d'évaporation. En saison hivernale, la condensation se chiffre entre 4 et $15 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$, alors que l'évaporation en saison estivale est 100 à 400 fois plus faible. Ce qui permet d'affirmer : *lorsque le phénomène de condensation s'établit il est lent à disparaître*. Il en va de même pour la pathologie.
- Faisons le bilan annuel en supposant que, seul le mois de février représente la saison hivernale, c'est-à-dire une condensation potentielle de $5\,552,4189 \text{ g}$.

Pendant les 11 autres mois (337 jours), 1 ml de panneau préfabriqué (de 3 m de haut) pourra évaporer :

$(0,0064 \text{ à } 0,0385) \times 3 \text{ m}^2 \times 24 \text{ h} \times 337 \text{ j} = 155,2896 \text{ à } 934,1640 \text{ g}$ d'eau

Au bout d'une année (*théorique*) il restera dans le mur entre $5\,397,1293$ et $4\,618,2549 \text{ g}$.

Est-ce que cette quantité va rester à l'état liquide pendant la saison estivale ?

La réponse est évidemment non. En fonction de la température régnant dans la paroi, la plus grande partie de cette quantité restera dans le panneau, mais, à l'état vapeur.

Par contre, au retour de la saison froide, les nouvelles condensations s'ajouteront aux condensations rémanentes du cycle précédent.

C'est ainsi, selon ce lent processus, *qu'en moins de 10 ans* (3 à 4 ans dans la réalité) *des moisissures sont apparues* à la cueil-
lie formée par les panneaux préfabriqués et la dalle de plafond.

4.2 Effets du choc thermique

4.2.1 Décollement de l'ITI

Le fait qu'un plâtre mouillé voit ses performances mécaniques chuter de 50 %, sous l'effet du choc thermique (*allongement et retrait*), les contraintes qui prennent naissance dans le plan des plots de colle ($\sigma_{tr} = 9,80 \text{ kg/cm}^2$), sont largement supérieures à celles de rupture du plâtre mouillé ($\sigma_{p. mr.} = 5$ à 6 kg/cm^2). Cela a pour conséquence le cisaillement des plots de colle entraînant le décollement du système d'ITI.

4.2.2 Fissures horizontales et verticales

Pour un béton normalement dosé en ciment, dont la contrainte de compression est : $\sigma_c = 35 \text{ MPa}$ (350 kg/cm^2), on aura une contrainte de traction à la rupture $\sigma'_{tr.} = 2,33 \text{ MPa}$ ($23,3 \text{ kg/cm}^2$).

Or, sous l'effet du choc thermique, la contrainte de traction engendrée est égale à : $\sigma'_{tr.} = 43,55 \text{ kg/cm}^2$, donc supérieure à la contrainte de rupture $\sigma'_{tr.} = 23,3 \text{ kg/cm}^2$.

Conséquence : *les fissures libèrent les contraintes*.

4.3 Effets de la lame d'air créée par les plots de colle

4.3.1 Condensations totales

Dans les mêmes conditions hygrothermiques ($T_e = -5^\circ\text{C}$ et $HR_e = 95\%$), la prise en compte de la lame d'air créée par les plots de colle a pour conséquence une augmentation importante des quantités de vapeur d'eau condensable ($15,9766 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ au lieu de $0,1458 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$, soit 109 fois plus).

Nous pouvons ainsi affirmer qu'elle est bien la cause de la pathologie dominante, avec, comme conséquence, de mettre le voile béton dans un état de paroi *un peu plus froide*. En effet, le coefficient « K » de déperdition surfacique est amélioré de 8 %, mais la température à l'interface voile béton/ITI, y chute de 7 %, ce qui multiplie par 109 la quantité de vapeur d'eau condensée.

Pour qu'il n'y ait aucune condensation interne, il faudrait que $HR_i < 30\%$ (au lieu de 31 % lorsqu'il n'y a pas de lame d'air).

4.3.2 Choc thermique

En valeur absolue, l'incidence de la lame d'air sur la contrainte de traction de l'enduit hydraulique extérieur, reste négligeable ($14,56$ au lieu de $14,51 \text{ kg/cm}^2$ – cf. tableau 3 dans [2]) : soit + 0,3 %.

Si la première contrainte engendrait des désordres (*fissurations*), la présence de la lame d'air les maintiendra en l'état.

5. Étude hygrothermique de la solution curative

La cause de la pathologie dominante a incontestablement, pour origine la lame d'air créée par les plots de colle et, pour conséquence, le maintien du plâtre « 1 » dans une situation de « *paroi froide* » qui atteint très rapidement son taux d'humidité critique.

L'objectif de la solution curative est de transformer, thermiquement parlant, cette zone en « *paroi chaude* ». Il y a trois façons d'y parvenir.

■ **Solution 1.** Abaisser et maintenir constamment l'humidité relative intérieure $HR_i < 30\%$, quand $T_i = 19^\circ\text{C}$ et $T_e = -5^\circ\text{C}$.

Et être également, en mesure de faire varier HR_i en fonction des variations de T_e . À savoir :

- quand $T_e = 0^\circ\text{C}$ avoir $HR_i < 41\%$;
- quand $T_e = 5^\circ\text{C}$ avoir $HR_i < 54\%$.

Cela relève de « *la mission impossible* ».

■ **Solution 2.** Élever la température intérieure de telle façon que celle qui règne à l'interface béton/plâtre soit supérieure à la température du point de rosée.

Cette hypothèse conduirait à élever et à maintenir constamment $T_i > 73^\circ\text{C}$, quand $T_e = -5^\circ\text{C}$!!! **Évidemment, cela est inenvisageable.**

Dans le même esprit, il faudrait maintenir :

- $T_i > 45^\circ\text{C}$, quand $T_e = 0^\circ\text{C}$;
- $T_i > 25^\circ\text{C}$, quand $T_e = 5^\circ\text{C}$.

Donc, cela est exclu d'office.

■ **Solution 3.** La troisième possibilité est le recours à un système d'isolation thermique par l'extérieur. L'idée directrice est de faire jouer au voile béton le rôle « *d'accumulateur de calories* ». En effet, en hiver, le flux de chaleur allant des hautes températures vers les basses températures, l'isolant extérieur (*barrière thermique*) freine le passage de la chaleur. Conséquence : la température du voile de béton va s'élever au-dessus de la température du point de rosée. Ainsi, l'objectif d'éliminer (ou de diminuer d'une façon significative) la cause de la pathologie dominante sera atteint.

Exemple 1 : dans le cas d'une réhabilitation *lourde* : éliminer purement et simplement le système d'ITI existant, et mettre en œuvre un système d'ITE avec la même épaisseur de PSE (*analogue au système : soit du § 3. ou du § 4. du dossier [2]*).

Exemple 2 : dans le cas, où l'ITI est conservée (*réhabilitation en milieu occupé*) ; mettre en œuvre un système d'ITE, et l'expérience nous conduit à doubler l'épaisseur du PSE existant à l'intérieur.

6. ITE enduit mince sur voile béton + ITI (60 + 10 conservée), en saison hivernale

Il est tenu compte de la lame d'air créée par les plots de colle.

6.1 Note de calcul avec $T_e = -5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Ci-après, la note de calcul du tableau 11 nécessaire au tracé du diagramme de Glaser.

Tableau 11 – Notes de calcul avec $T_e = -5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Résist $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en m ² .h. mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48$ mmHg	Pressions partielles	Flux (en g/m ² · h)	Condensations
			$\Delta T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_i = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$				
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0221	0,5309	18,4691	15,9291	$P_{Pi} = 9,888$	Flux traversant l'ensemble du mur : $\frac{(9,8880 - 2,8595)}{205,92}$ = 0,0341	Constat : il n'y a aucune condensation • Humidité relative intérieure « HR _i » à ne pas dépasser pour éviter les condensations inter- nes
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0058	0,1380	18,3311	15,8111	9,8617		Il faut que la pression partielle, à l'interface sous enduit armé/ PSE extérieur, soit égale où inférieure à la valeur de la pression saturante qui y règne : $P_s = 3,0931$ mmHg
100,00	Pare vapeur = 0,0000	0,0000	0,0000	18,3311	15,8111	6,4485		Soit $P_{p.x.i.}$ la pression partielle intérieure à ne pas dépasser.
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,2873	6,8949	11,4361	10,1353	5,7659		D'où l'équation classique : $\frac{P_{p.x.i.} - 3,0931}{201,48} = \frac{P_{p.x.i.} - 2,8595}{205,92}$
0,11	Plot de colle 1 cm = 0,1400	0,0282	0,6757	10,7605	9,6863	5,7621		Soit : $P_{p.x.i.} = 13,6935$ mmHg
0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0058	0,1380	10,6224	9,6034	5,7358		C'est-à-dire : $HRi \leq \frac{13,0935}{16,48} \times 100 = 83,09$
53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0184	0,4411	10,1813	9,3269	3,9155		
250	Enduit hyd. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0009	0,0208	10,1605	9,3124	3,8302		
24,00	PSE $\frac{0,12}{0,039} = 3,0769$	0,6188	14,8502	− 4,6897	3,0931	3,0110		
4,44	Sous-end. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0009	0,0208	− 4,7105	3,0869	$P_{Pe} = 2,8595$		
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0121	0,2896	− 5,0000	3,01			
$R_D = 205,92$	$R_{th} = 4,9727$ $K = 0,2011\text{ v/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$							

6.2 Épure

La courbe des températures, celle des pressions saturantes et celle des pressions partielles donnent le diagramme de la figure 20.

Constatons que la courbe des pressions partielles est constamment inférieure à celle des pressions saturantes. La migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur : il ne peut pas y avoir condensation.

6.3 Calcul des flux

Voir le tableau 11.

6.4 Calcul des condensations

Voir le tableau 11.

Donc aucune condensation tant que : $HR_i \leq 83\%$ quand $T_i = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Inscrivons ce résultat sur le diagramme de la figure 20.

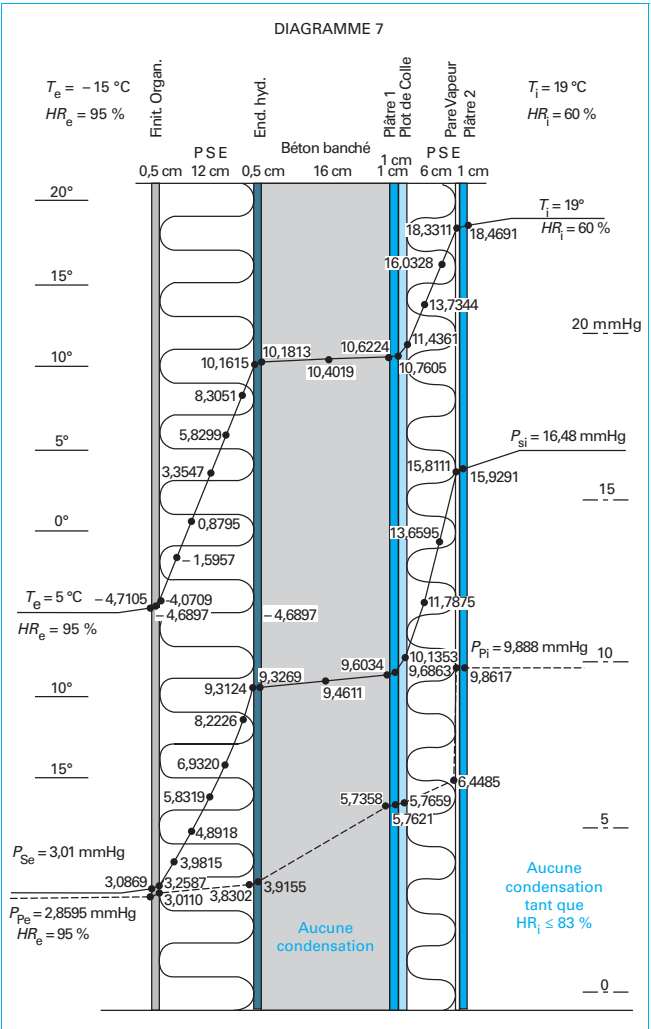


Figure 20 – Diagramme de Glaser 7

7. ITE enduit mince sur voile béton + ITI (60 + 10 conservée), en saison estivale

Il est tenu compte de la lame d'air créée par les plots de colle.

7.1 Note de calcul pour T_e = 35 °C et HR_e = 35 %

La note de calcul du tableau 12 est nécessaire au tracé du nouveau diagramme de Glaser.

7.2 Épure

Nous traçons successivement la courbe des températures, des pressions saturantes et des pressions partielles. Nous obtenons ainsi le diagramme de la figure 21.

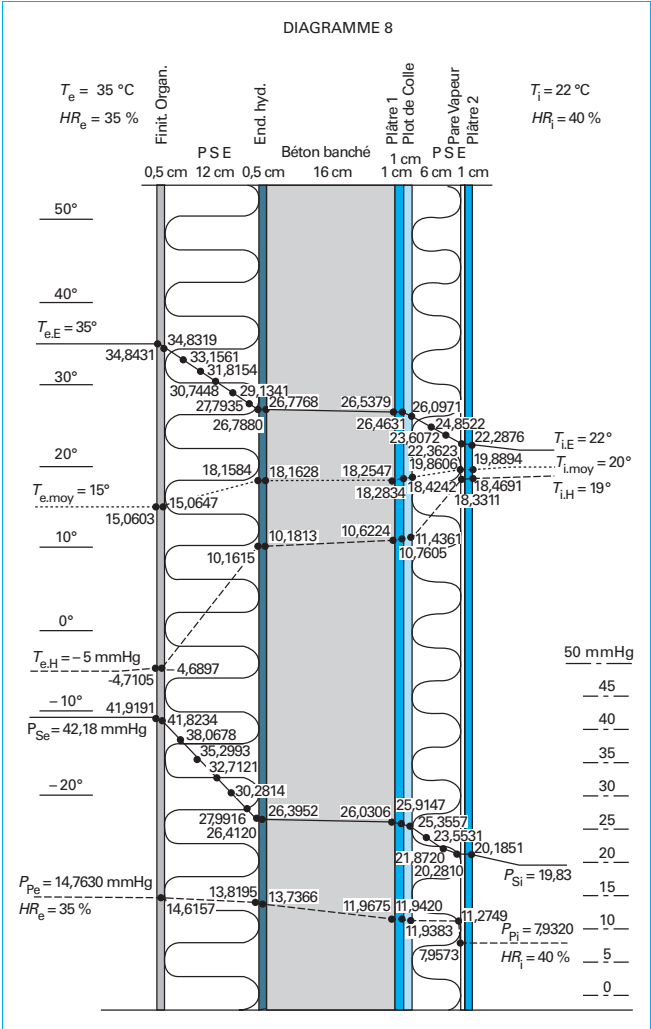


Figure 21 – Diagramme de Glaser 8

Tableau 12 – Notes de calcul avec $T_e = 35\text{ °C}$ et $HR_e = 35\%$

Résist. $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en m ² .h. mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si}=19,83$ - mmHg	Pressions partielles	Température moyenne	Flux (en g/m ² · h)	Conden- sations
$T = 13\text{ °C}$	$T_i = 22\text{ °C}$								
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0221	0,2876	22,2876	20,1851	$P_{Pi} = 7,9320$	$T_i = 20\text{ °C}$	Flux traversant l'ensemble du mur : $\frac{(14,7630 - 7,932)}{205,92} = 0,0332$	Aucune
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0058	0,0748	22,3623	20,2810	7,9575	19,8894		
100,00	Pare vapeur = 0,0000	0,0000	0,0000	22,3623	20,2810	11,2749	19,8606		
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,2873	3,7348	26,0971	25,3557	11,9383	19,8606		
0,11	Plot de colle 1 cm = 0,1400	0,0282	0,3660	26,4631	25,9147	11,9420	18,4242		
0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0058	0,0748	26,5379	26,0306	11,9675	18,2834		
53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0184	0,2389	26,7768	26,3952	13,7366	18,2547		
2,50	Enduit hyd. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0009	0,0112	26,7880	26,4120	13,8195	18,1628		
24,00	PSE $\frac{0,12}{0,039} = 3,0763$	0,6188	8,0439	34,8319	41,8234	14,6157	18,1584		
4,44	Sous-end. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0049$	0,0009	0,0112	34,8431	41,9191	$P_{Pe}=14,7630$	15,0647		
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0121	0,1569	35,0000	42,18		18,0603		
$R_D = 205,92$	$R_{th} = 4,9727$ $K = 0,2011\text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$						$T_e = 15,0000$		

7.3 Calcul des flux

Voir tableau 12.

7.4 Calcul des condensations

Voir tableau 12. Il n'y a aucune condensation.

7.5 Choc thermique

Calculons le choc thermique saisonnier « ΔT_s » dans les plans suivants :

- plots de colle $\Delta T_{S, \text{plots colle}} = 15,7023\text{ °C}$;
- béton face extérieure $\Delta T_{S, \text{béton ext.}} = 16,5955\text{ °C}$;
- enduit hydraulique de 0,5 cm $\Delta T_{S, \text{end. hyd.}} = 16,6265\text{ °C}$;
- sous enduit armé $\Delta T_{S, \text{sous end.}} = 39,5936\text{ °C}$.

7.6 Effets du choc thermique

7.6.1 Variations linéaires

Sous l'effet de la température, la variation linéaire « Δl » est égale à :

$$\Delta l = l_0 \times \alpha \times \Delta T_s$$

Ce qui donne les variations suivantes pour $l_0 = 1\,000\text{ mm}$ reportées au tableau 13.

Tableau 13 – Variations linéaires (Δl) lorsque $l_0 = 1\,000\text{ mm}$

Δl	Totale (en mm/m)	Allongement (en mm/m)	Retrait (en mm/m)
$\Delta l_{S, \text{plots colle}}$	0,141	0,074	0,067
$\Delta T_{S, \text{béton ext.}}$	0,166	0,086	0,080
$\Delta T_{S, \text{end. hyd.}}$	0,166	0,086	0,080
$\Delta T_{S, \text{sous en d.}}$	0,396	0,198	0,198

7.6.2 Contraintes internes

Pour les matériaux ayant des liaisons, les variations de la température engendrent des contraintes internes « σ » égales à :

$$\sigma = E \times \alpha \times \Delta T_s$$

■ Pour le plan d'adhérence des plots de colle

Contrainte totale : $60\,000 \times 0,9 \times 10^{-5} \times 15,7028 \approx 8,48\text{ kg/cm}^2$, qui peut engendrer :

- une contrainte de traction égale à $\sigma_{tr} = 4,03\text{ kg/cm}^2$;
- une contrainte de compression égale à $\sigma_c = 4,45\text{ kg/cm}^2$.

■ Pour le béton face extérieure

Contrainte totale : $225\,000 \times 1 \times 10^{-5} \times 16,5955 \approx 37,34 \text{ kg/cm}^2$, qui peut engendrer :

- une contrainte de traction égale à $\sigma_{tr} = 18,00 \text{ kg/cm}^2$;
- une contrainte de compression égale à $\sigma_c = 19,34 \text{ kg/cm}^2$.

■ Pour l'enduit hydraulique

Contrainte totale : $75\,000 \times 1 \times 10^{-5} \times 16,6265 \approx 12,47 \text{ kg/cm}^2$, qui peut engendrer :

- une contrainte de traction égale à $\sigma_{tr} = 6,01 \text{ kg/cm}^2$;
- une contrainte de compression égale à $\sigma_c = 6,46 \text{ kg/cm}^2$.

■ Pour le sous-enduit armé

Contrainte totale : $90\,000 \times 1 \times 10^{-5} \times 39,5536 \approx 35,60 \text{ kg/cm}^2$, qui peut engendrer :

- une contrainte de traction égale à $\sigma_{tr} = 17,80 \text{ kg/cm}^2$;
- une contrainte de compression égale à $\sigma_c = 17,80 \text{ kg/cm}^2$.

7.7 Analyse et commentaires**7.7.1 Condensations**

Nous constatons qu'en période hivernale (cf. figure 11), il n'y a aucune *condensation superficielle et interne* et cela tant que, l'humidité relative intérieure « HR_i » reste inférieure ou égale à 83 %, quand $T_i = 19^\circ\text{C}$.

Ainsi, nous pouvons affirmer que la solution curative envisagée supprime bien la condensation qui est la cause de la pathologie dominante : humidification des plots de colle, avec, pour conséquence, une chute de leur contrainte d'adhérence et le cisaillement des plots de colle qui maintenaient l'ITI (cf. § 7.7.2).

Si, exceptionnellement, HR_i était supérieur à 83 %, la condensation potentielle prendrait naissance à l'interface sous-enduit armé/PSE, sous la forme de cristaux de glace. Cela serait cependant sans conséquence sur le système d'ITE. En effet, lors de l'instruction de l'avis technique, le système est soumis à 75 cycles de 24 h de gel (à 20°C) et dégel par arrosage d'eau (à 20°C) à température ambiante du laboratoire ou en atmosphère saturée (100 % en vapeur d'eau). Pour valider l'avis technique, le système d'ITE ne doit être le siège d'aucun désordre lors des 75 cycles.

7.7.2 Effets du choc thermique**■ Décollement de l'ITI**

Le fait que le plâtre mouillé voit ses performances mécaniques chuter de 50 %, (contrainte d'adhérence atteignant seulement : 5 à 6 kg/cm^2), il faut que l'adhérence des plots de colle ayant résisté au cisaillement aient, une fois leur état de siccité retrouvé, une contrainte d'adhérence inférieure à celle qui entraîne la rupture (cf. § 7.6.2 : $4,0 < \sigma < 4,5 \text{ kg/cm}^2$).

Dans le cas où la solution curative choisie sera l'ITE, les zones décollées, du système d'ITI, seront fixées mécaniquement aux panneaux préfabriqués par des chevilles en polypropylène avec collerette.

■ Fissures horizontales et verticales.

Pour un béton normalement dosé en ciment, à la contrainte de compression de 35 MPa (350 kg/cm^2), correspond une contrainte de traction à la rupture $\sigma'_{tr.e.} = 23,3 \text{ kg/cm}^2$. Or, sous l'effet du choc thermique, la contrainte de traction qui se développe après la mise en œuvre du système d'ITE, est égale à : $\sigma'_{tr.} = 18 \text{ kg/cm}^2 < \sigma'_{tr.e.} = 23,3 \text{ kg/cm}^2$ (au lieu de 43,55 kg/cm^2 subis par la face extérieure du béton).

Conséquence : les fissures existantes seront stabilisées.

En ce qui concerne les armatures rouillées, elles seront simplement passivées, le béton éclaté sera éliminé, et, selon l'importance des manques, éventuellement, reconstitué pour obtenir la planéité du support sur lequel le système d'ITE doit être appliqué.

Le système d'ITE joue le rôle de barrière d'étanchéité à l'eau de pluie et, ainsi, protège les fers de l'oxydation, d'autant plus que le béton reconstitué a un pH basique.

■ Sous-enduit armé

Le choc thermique qui se produisait dans le plan de l'enduit hydraulique est diminué dans le rapport de 2,4 à 1 (38,8368 $^\circ\text{C}$ à 16,5955 $^\circ\text{C}$). Par contre, il est déplacé dans le plan du sous-enduit armé avec une valeur supérieure de 22 % à celle qui se produisait précédemment dans le plan de l'enduit hydraulique.

Les efforts de traction sont équilibrés par la toile de fibre de verre marouflée dans le sous-enduit. (cf. § 4.2.1 du dossier [4] sur les critères requis pour les toiles d'armature).

Notons que, lors des cycles conventionnels de vieillissement, la maquette est soumise à des variations de température de 60 à 20°C .

7.7.3 Commentaires

Enumérons les avantages et les inconvénients induits par cette solution curative.

■ Avantages

- Le coefficient « K » de déperdition surfacique est amélioré de plus de 60 % (avant : $K = 0,53 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; après : $K = 0,20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
- Les ponts thermiques, au droit des planchers et des murs de refend, sont diminués d'une façon significative (dans le rapport de 10 à 1).
- Conséquence : dans des conditions d'utilisation annuelle analogue, ces deux améliorations entraîneront une diminution significative (plus de 15 %) de la consommation énergétique annuelle totale requise pour le chauffage du pavillon.

■ Inconvénients

- Le coût financier généré par la mise en œuvre de la solution curative est largement supérieur au budget qu'il aurait été nécessaire de consacrer à une étude hygrothermique préventive.
- Le temps passé en expertises, souvent judiciaires, pour déterminer les responsabilités, sans parler des frais engagés qui en découlent, est très important.
- La perte éventuelle de revenus locatifs pour le bailleur, inhérents au défaut d'occupation des lieux à cause des désordres avérés, doit aussi être prise en compte.

8. Analyse de la présence d'une lame d'air

On parle souvent d'une lame d'air ventilée, comme la solution potentielle à une pathologie dont la cause a pour origine la condensation de la vapeur d'eau. Cela découle, implicitement, de l'idée reçue qu'un linge mouillé étendu à l'extérieur, sèche plus vite lorsqu'il y a du vent.

On distingue les lames d'air non ventilées et celles qui le sont. Sont considérées comme :

- **non ventilées**, des lames d'air, soit sans contact avec l'extérieur (cf. paroi du § 2), soit des lames d'air dont la surface des orifices, les mettant en contact avec l'extérieur, est inférieure à 500 mm^2 par mètre linéaire (ml) de façade ;

– **ventilées**, des lames d'air dont la surface des orifices, les mettant en contact avec l'extérieur, est comprise entre 500 et 1 500 mm² par ml de façade (ce qui correspond à une fente horizontale de 5 cm de long par 1 à 3 cm de haut).

Dans une cheminée, la circulation (*tirage*) des gaz dépend, soit de la différence de température, soit du gradient de pression existant entre sa base et son sommet soit d'une combinaison de ces deux paramètres.

Rappel : le flux de vapeur se déplace toujours des hautes températures vers les basses températures et des hautes pressions vers les basses pressions.

Exemple. Dans le cas d'un panneau de façade, de 3 m de hauteur, le tirage ne pourra être que faible : la température y est pratiquement identique tout le long des 3 m de hauteur du panneau et la différence de pression sur 3 m de hauteur reste faible (de l'ordre de 0,22 à 0,25 mmHg).

Du point de vue du modèle mathématique, on peut considérer, dans l'absolu, que 1 ml de façade est composé :

- d'une part, par 95 cm de partie courante analogue à celle qui a fait l'objet de l'étude du panneau préfabriqué (cf. § 2) ;
- d'autre part, par 5 cm d'une partie contiguë dans laquelle on fait abstraction du voile de béton, considérant la lame d'air en contact, presque direct, avec l'ambiance extérieure.

Rappelons que l'idée de ventiler une lame d'air procède de l'analogie avec le fait de mettre en contact de l'air froid et sec qui, en se réchauffant, va absorber de l'humidité et ainsi faire baisser l'humidité relative et *ipso facto* la pression partielle, de telle sorte que la courbe des pressions partielles soit inférieure à celle des pressions saturantes. Si tel est le cas, la migration de la vapeur d'eau se fera alors à l'état vapeur et on pourra affirmer qu'il n'y a pas de condensations potentielles.

Exemple : supposons que la lame d'air ait 5 cm d'épaisseur. Quels sont les paramètres qui vont changer dans la note de calcul de la paroi étudiée au § 2.

D'une part, la résistance thermique « $R_{th, \text{lame d'air}}$ » qui vaut 0,15 m² · °C/W pour une lame d'air faiblement ventilée (au lieu de 0,14 m² · °C/W pour la lame d'air non ventilée).

D'autre part la résistance de diffusion « $RD_{\text{lame d'air}}$ » égale à :

$$e/\pi = 0,05/0,09 = 0,56 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$$

au lieu de 0,11 m² · h · mmHg/g quand elle a une épaisseur de 1 cm.

L'incidence sur la note de calcul sera pratiquement négligeable, compte tenu de la faible variation relative de ces deux paramètres.

En effet, pour l'ensemble de la paroi revêtue, la résistance thermique et la résistance de diffusion qui étaient respectivement égales à :

- $R_{th} = 1,8915 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ deviendra égale à :.. 1,9015 m² · °C/W ;
- $RD = 177,48 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ deviendra égale à :. 177,93 m² · h · mmHg/g).

Établissons la note de calcul, voir les tableaux 14 et 15, aussi bien pour la partie courante, que pour la partie contiguë ventilée.

8.1 Partie courante

8.1.1 Note de calcul pour $T_e = -5 \text{ °C}$ et $HR_e = 95 \%$

La note de calcul (tableau 14) permet de tracer un nouveau diagramme de Glaser (figure 22).

8.1.2 Épure

En suivant le même procédé qu'indiqué au dossier [2] nous traçons successivement la courbe des températures, des pressions saturantes et des pressions partielles, d'où le diagramme de la figure 22.

Nous constatons que dans la zone de la lame d'air, la vapeur d'eau est en surpression : il y a donc **condensation**.

8.1.3 Calcul des flux

Voir tableau 14.

8.1.4 Calcul des condensations

Voir tableau 14.

Inscrivons ces différentes condensations dans les plans concernés, du diagramme de la figure 22.

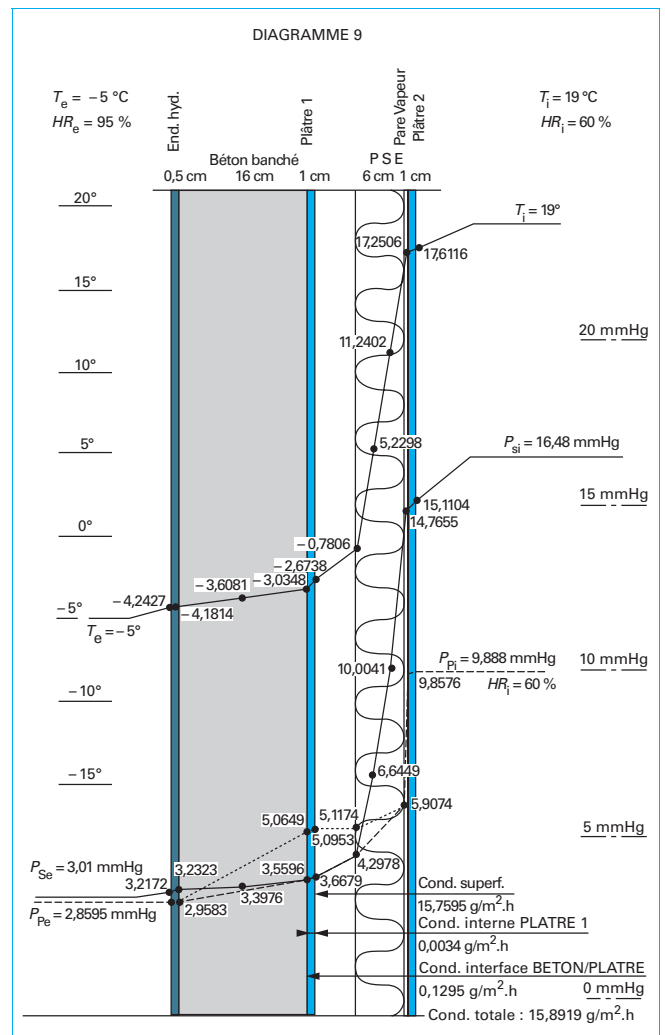


Figure 22 – Diagramme de Glaser 9

Tableau 14 – Notes de calcul pour la partie courante avec $T_e = -5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Résist. $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$)	Résistance thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si}=16,48\text{-mmHg}$	Pressions partielles	Flux (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)	Condensations
			$T = 24\text{ °C}$	$T_i = 19\text{ °C}$				
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0578	1,3884	17,6116	15,1104	$P_{pe} = 9,888$	• Flux traversant le PSE : $\frac{(5,9074 - 4,2978)}{20,00} = 0,0805$	Condensation superficielle sur le plâtre « 1 » : $(15,9032 - 13,9267)$ $+ (13,9267 - 0,1437) =$ $1,9765 + 13,7830 =$ $15,7595\text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0150	0,3610	17,2506	14,7655	9,8576	• Flux entrant dans la lame d'air : $\frac{900 \times 10^{-4}}{0,025} \times 0,5259 \times 24 \times$ $0,3500 = 15,9032$	Condensation interne dans le plâtre « 1 » : $0,1437 - 0,1403 =$ $0,0034\text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$
100,00	Pare-vapeur $= 0,0000$	0,0000	0,0000	17,2506	14,7655	5,9074	• Flux sortant de la lame d'air : $\frac{900 \times 10^{-4}}{0,025} \times 0,5259 \times 24 \times$ $0,3065 = 13,9267$	Condensation à l'interface béton/plâtre « 1 » : $0,1403 - 0,0113 =$ $0,1290\text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,7577	18,0312	- 0,7806	4,2978	5,1174	• Flux entrant dans le plâtre « 1 » : $\frac{130 \times 10^{-4}}{0,35} \times 0,5259 \times 24 \times$ $0,3065 = 0,1437$	Condensation totale dans plâtre « 1 » : 15,8919 $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$
$\frac{0,05}{0,09} =$ $\frac{0,56}{0,56}$	Lame d'air 5 cm $= 0,1500$	0,0789	1,8932	- 2,6738	3,6679	5,0953	• Flux sortant du plâtre « 1 » : $\frac{130 \times 10^{-4}}{0,35} \times 0,5259 \times 24 \times$ $0,2993 = 0,1403$	
0,77	Plâtre « 1 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0150	0,3610	- 3,0348	3,5596	5,0649	• Flux traversant le béton : $\frac{(3,5596 - 2,9583)}{53,33} = 0,0113$	
53,33	Béton $\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,0481	1,1536	- 4,1884	3,2323	2,9583		
2,50	End. hydr. $\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0023	0,0543	- 4,2427	3,2172	$P_{pe}=2,8595$		
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0316	0,7573	- 5,0000	3,01			
$R_D=177,93$	$R_{th} = 1,9015$ $K = 0,5259\text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$							

Tableau 15 – Notes de calcul pour la partie ventilée avec $T_e = -5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Résist. $\frac{e_n}{\pi_m}$ à la diff. (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48$ mmHg	Pressions partielles	Flux (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$)	Condensations
			$T = 24\text{ °C}$	$T_i = 19\text{ °C}$				
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,0619	1,4855	17,5145	15,0145	$P_{pi} = 9,888$	Flux traversant au droit de la ventilation, $(9,888 - 2,8595) : 121,33 = 0,0579\text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$	Aucune
0,77	Plâtre « 2 » $\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0161	0,3862	17,1283	14,6483	9,8434		
100,00	Pare-vapeur = 0,0000	0,0000	0,0000	17,1283	14,6483	4,0505		
20,00	PSE $\frac{0,06}{0,042} = 1,4286$	0,8038	19,2924	- 2,1641	3,8308	2,8919		
$\frac{0,0}{0,009} = 0,56$	Lame d'air de 5 cm = 0,1500	0,0844	2,0257	- 4,1897	3,2321	$P_{pe} = 2,8595$		
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,0338	0,8103	- 5,0000	3,01			
$R_D = 121,33$	$R_{th} = 1,7772$ $K = 0,56271\text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$							

8.2 Partie ventilée

8.2.1 Note de calcul avec $T_e = -5\text{ °C}$ et $HR_e = 95\%$

Ci-après, la note de calcul (tableau 15) nécessaire au tracé du diagramme de Glaser.

8.2.2 Épure

En traçant successivement la courbe des températures, des pressions saturantes et des pressions partielles, nous obtenons ainsi le diagramme de la figure 23.

La courbe des pressions partielles est constamment inférieure à celle des pressions saturantes. La migration de la vapeur d'eau se fait à l'état vapeur. Il n'y a donc **aucune condensation**.

8.2.3 Calcul des flux

9. Commentaires

9.1 Bilan « condensation/évaporation » dans l'absolu

Il reste à faire le bilan « condensation/évaporation potentielle » pour 1 mètre linéaire (m.l.) de façade, (en supposant une hauteur d'étage de 3 m), soit :

- condensation : $15,8919\text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \times 0,95\text{ m} \times 3,00\text{ m} = 45,2919\text{ g/h}$;
- évaporation : $- 0,0579\text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \times 0,05\text{ m} \times 3,00\text{ m} = - 0,0087\text{ g/h}$;
- **total condensable par m.l. de façade : 45,2832 g/h.**

Le bilan est largement « *en faveur* » de la condensation. Cela explique et justifie le dispositif constructif préconisé dans le DTU 20.1 de maçonnerie de petits éléments (*parois et murs*) relatifs au cas particulier des murs doubles (*murs type II a, II b et III*), mais qui, à notre avis, doit être généralisé dès qu'il y a une lame d'air (*faiblement ventilée ou pas*) entre la paroi et l'isolation en position intérieure.

Le dispositif (figure 24) consiste à prévoir au pied du mur une cornière PVC, ou un feutre bitumé, ou bien un polyéthylène, destiné à collecter la vapeur d'eau condensée et à l'évacuer à l'extérieur *via* l'orifice d'amenée d'air frais.

Dans le cas où la lame d'air n'est pas ventilée il faut prévoir un exutoire (*pisserie : petit tube métallique incliné vers l'extérieur*). La mise en œuvre demande un soin particulier pour éviter les contre-pentes, en partie basse au niveau de la dalle, et veiller à ce que les orifices ne soient pas obturés lors du ravalement des façades.

La question qui se pose est de savoir dans quelles circonstances on est amené à mettre en œuvre une lame d'air non ventilée. Généralement, cela se produit lorsque l'on souhaite avoir simultanément, pour une paroi, l'isolation thermique et acoustique. L'isolant à mettre en œuvre à l'intérieur sera alors une laine minérale : *laine de verre ou laine de roche*.

Du point de vue acoustique, on aura ainsi créé le dispositif connu sous l'appellation : *masse – ressort – masse*.

Exemple : voile béton – cales d'épaisseur sur lesquelles viennent prendre appui les panneaux rigides ou semi-rigides de laine minérale – une ou deux plaques de plâtre cartoné BA 13.

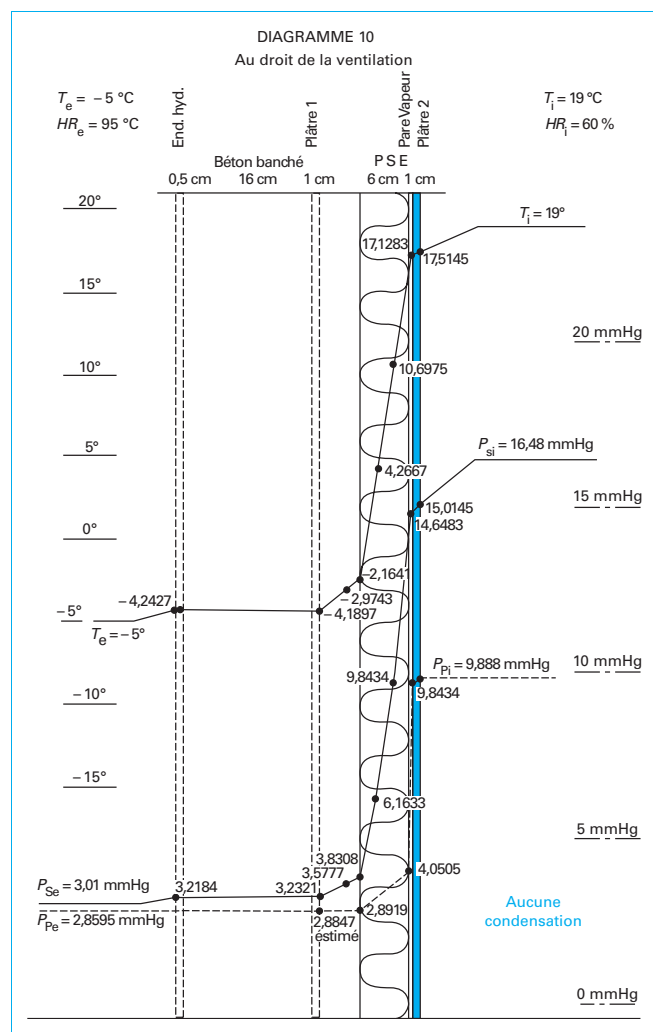


Figure 23 – Diagramme de Glaser 10

Ainsi, dans les conditions hygrothermiques hivernales identiques ($T_e = -5^\circ\text{C}$ et $HR_e = 95\%$), si nous récapitulons les résultats et que nous les comparons :

- avec une lame d'air non ventilée de 1 cm, la condensation potentielle, pour 1 m.l. de façade de 3 m de hauteur, est égale à : $q_1 = 47,9298\text{ g/h}$;
- avec une lame d'air faiblement ventilée de 5 cm, la condensation potentielle, pour 1 m.l. (mètre linéaire) de façade de 3 m de hauteur, est égale à : $q_2 = 45,2832\text{ g/h}$.

Conclusion : la ventilation n'élimine pas les condensations. Elle les diminue faiblement (de l'ordre de 5 %).

9.2 Pondération du bilan « condensation/évaporation »

Dans l'absolu, le modèle mathématique nous a conduit à considérer deux zones verticales distinctes juxtaposées : une de 95 cm de large, correspondant à la partie courante, et l'autre de 5 cm, correspondant à « la cheminée de ventilation ».

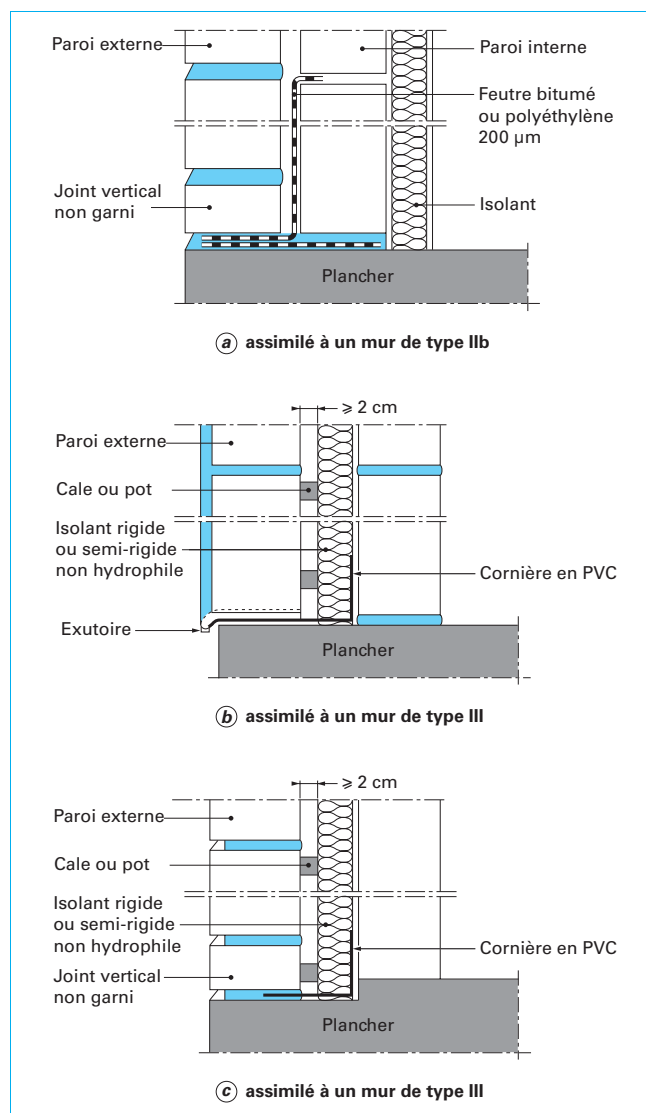


Figure 24 – Solutions possibles

Dans la réalité, une interaction va se produire aux frontières de ces deux zones : à savoir, autour des orifices de ventilation (d'une façon concentrique et ellipsoïdale – voir figure 25 – ainsi que dans une colonne (plus ou moins curviligne) qui relie ces deux zones (autour des orifices bas et hauts), les deux paramètres (*température et pression partielle*) seront sensiblement égaux à ceux qui règnent à l'extérieur. C'est-à-dire que, pour l'ensemble de cette zone (que l'on peut estimer, d'une façon empirique, de 30 à 55 % maximum) : la migration de la vapeur d'eau s'y fera à l'état vapeur, donc *sans condensation*.

Le reste de la surface se comportera comme une partie courante et sera le siège de condensations. Par conséquent, le bilan « condensation/évaporation » peut être *rectifié*, et, estimé de la façon suivante :

- condensation : $15,8919\text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \times 3,00\text{ m}^2 \times (70 \text{ à } 45\%) = 33,3730 \text{ à } 21,4541\text{ g/h}$;
- évaporation : $-0,0579\text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \times 3,00\text{ m}^2 \times (30 \text{ à } 55\%) = -0,0521 \text{ à } -0,0955\text{ g/h}$;
- **total condensable par m.l. de façade : ... 33,3209 à 21,3585 g/h.**

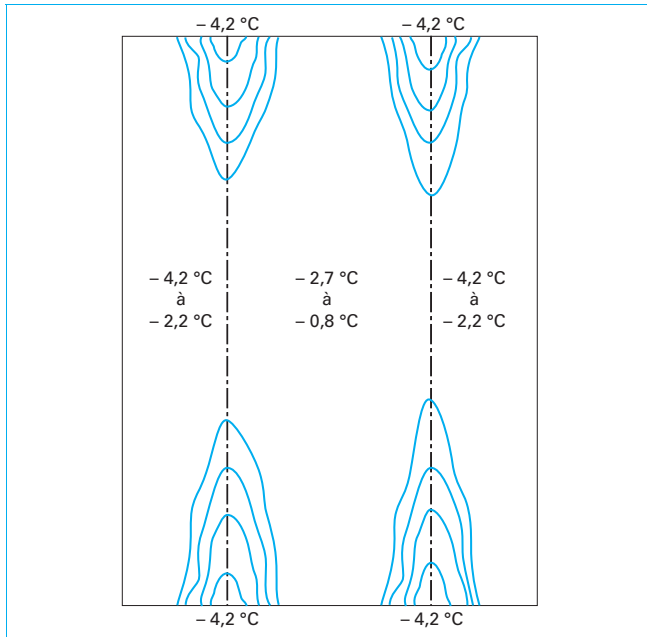


Figure 25 – Condensation/évaporation à l'interface

Ce qui diminue les condensations potentielles de 30 à 55 %, dans une paroi ayant une lame d'air faiblement ventilée, par rapport à une paroi dont la lame d'air ne l'est pas.

Conclusion : à titre préventif, en présence d'une lame d'air, faiblement ventilée ou non, située entre le mur porteur et l'isolant thermique positionné à l'intérieur, la présence d'un dispositif, à la base du mur, de rejet des eaux de condensation, vers l'extérieur, est largement justifié.

9.3 Lame d'air en relation avec l'ambiance intérieure

Que se passe-t-il si la lame d'air est mise en contact avec l'ambiance intérieure (en positionnant la prise d'air en partie basse dans le PSE) ?

Au premier abord, cette idée peut être séduisante, si l'on pense uniquement en termes de tirage de la cheminée ainsi créée. En effet les gradients de température et de pression de la vapeur d'eau sont importants, entre les deux orifices (l'un positionné côté intérieur en partie basse, l'autre côté extérieur en partie haute).

Conséquence : le tirage est amélioré.

Mais, avec ce dispositif, c'est de l'air chaud et chargé en humidité qui est mis en contact avec une paroi « froide ». En valeur absolue, la quantité de vapeur contenue dans cet air chaud est supérieure à celle de la saturation correspondant à la température régnant à la surface de la paroi. Nous sommes dans les conditions hygrothermiques analogues à celles du phénomène de condensation qui se produit sur une bouteille d'eau congelée se couvrant de buée dès qu'elle est sortie du congélateur.

Une autre approche « semi quantitative » permet de comprendre pourquoi cette solution de ventilation n'est pas satisfaisante. En effet, pour des températures comprises entre -10 et $+15$ °C, le nombre en g/m^3 d'air sec qui représente la quantité de la vapeur d'eau en valeur absolue est sensiblement égal à celui qui représente sa pression partielle.

Ainsi, pour :

$T_i = 19$ °C, $P_{pi} = 9,888$ mmHg, on aura : $W_i \approx 10$ g/m^3 ;

$T_e = -5$ °C, $P_{pe} = 2,8595$ mmHg, on aura : $W_e \approx 3$ g/m^3 .

On conçoit aisément que, sur les 10 g/m^3 de vapeur d'eau arrivant à travers l'orifice bas, seuls 3 g/m^3 pourront sortir dans l'air extérieur à l'état vapeur, la différence changeant d'état (en devenant liquide ou solide suivant la température rencontrée le long de la paroi). L'air extérieur, étant saturé à 3 g/m^3 , ne pourra pas en recevoir d'avantage.

9.4 Réflexions sur la méthodologie

Avec l'étude de ce cas concret, nous avons compris et pu expliquer, au moyen de diagrammes de Glaser, le comportement d'un panneau préfabriqué revêtu par un système d'isolation thermique par l'intérieur (ITI).

Il y a deux façons d'exploiter cette étude hygrothermique, soit :

- *a posteriori*, lorsque la pathologie est avérée. L'objectif est alors de l'expliquer, de la quantifier et éventuellement de valider la solution de réfection, en en précisant les performances et, surtout, les limites (cela devrait être le cas lors d'une éventuelle expertise judiciaire) ;
- *a priori*, le plus en amont possible, lors de la conception du projet de construction. Cette étude hygrothermique devrait être demandée par le maître d'ouvrage à son maître d'œuvre qui la confierait à un bureau d'études techniques.

Ajoutons, par **exemple**, que, dans le cas de l'étude d'une paroi isolée par l'intérieur et comportant une lame d'air faiblement ventilée, nous avons été amenés à faire « des estimations » qui montrent ainsi les limites du calcul.

Pour confirmer ou infirmer les résultats qui en découlent, à partir d'hypothèses définies, seul l'expérimentation permet de valider objectivement la (ou les) conclusion(s).

9.5 Conclusion

Rappelons, une fois de plus, qu'un diagramme de Glaser a la rigueur d'un calcul mathématique. Il caractérise à l'instant « t », l'état hygrothermique d'un élément de la construction, en considérant le régime permanent. Or, nous savons, que les conditions climatiques sont éminemment variables dans le temps et l'espace. Il faut donc rester prudent et ne tirer aucune conclusion hâtive, à partir d'un seul diagramme, que celui-ci soit favorable ou non.

Ainsi, par **exemple**, lorsque le diagramme considéré indique qu'il y a condensations (superficielles et/ou internes), ce n'est pas pour autant qu'il faut conclure systématiquement à l'apparition du désordre : celui-ci reste « potentiel ».

Par contre, si le *bilan annuel*, pour cet élément, conduit à une quantité d'eau condensable supérieure aux quantités évaporables, le désordre de « potentiel » deviendra certainement « réel ».

Toutefois, lorsque le calcul, dans des conditions climatiques extrêmes, permet de conclure que le désordre potentiel ne pourra pas s'établir, on peut affirmer que la solution appliquée ou retenue atteindra l'objectif fixé.

Enfin, cette méthodologie a été appliquée à un mur, mais, en changeant quelques paramètres, elle peut être reconduite pour d'autres parois, quelles soient verticales ou horizontales, opaques ou vitrées, avec des conditions climatiques désirées.

Cette méthodologie est à considérer comme un outil de travail par l'ensemble de la profession participant à l'acte de construire, et, en cas de pathologie, également par les professionnels qui ont à juger de la chose construite.