

Pathologie de l'humidité. Parois revêtues en bâtiment

Spécificités

par **Paul DAHAN**

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

1. Paroi et revêtements	C 7 140 - 2
1.1 Fonctions des revêtements	— 2
1.2 Plan de l'étude hygrothermique d'une paroi revêtue	— 3
2. Paroi et décoration	— 4
2.1 Calcul de la perméance intrinsèque d'une Pliolite	— 4
2.2 Voile de béton et Pliolite en hiver	— 4
2.3 Voile de béton et Pliolite en été	— 7
3. Paroi et imperméabilité	— 9
3.1 Voile de béton et imperméabilité I4 « en hiver »	— 9
3.2 Voile de béton et imperméabilité I4 en été	— 12
Pour en savoir plus	Doc. C 7 140

Construire dans les règles de l'art, conserver ou réhabiliter le patrimoine, éviter les désordres, diagnostiquer les causes de la pathologie, tous ces concepts doivent se traduire dans l'acte de construire.

La pathologie potentielle récurrente sur les parois des bâtiments est souvent la suivante :

- fissures avec ou sans infiltration d'eau ;
- salissures ;
- décollement de l'enduit extérieur ;
- éclatement du béton consécutif à l'oxydation des fers d'armatures ;
- moisissures sur la face intérieure des parois.

Selon la pathologie dominante (existante ou à venir), le maître d'œuvre et/ou le maître d'ouvrage ont à leur disposition un certain nombre de produits ou de systèmes pour intervenir et revêtir la paroi.

En réhabilitation, le diagnostic a pour objectif de déterminer la (ou les) cause(s) de cette pathologie.

En travaux neufs, les règles de l'art, souvent traduites en « réglementation » (normes, DTU, règles professionnelles, etc.) ont pour objectif « d'atteindre des résultats » tout en évitant « la pathologie ».

Le législateur a défini dans la norme NFP 84 401 quatre fonctions possibles pour le revêtement, à savoir :

- le maintien de l'aspect : le revêtement permet de maintenir l'aspect d'origine du parement. Ce sont en général des produits incolores ou légèrement pigmentés, filmogènes ou non, destinés à améliorer temporairement le comportement à l'eau et/ou le comportement aux salissures ;
- la décoration : le revêtement permet d'agrémenter ou d'embellir le support en jouant sur l'aspect : couleur, brillance, granulométrie. Les solutions utilisées sont des produits pigmentés, filmogènes, qui jouent aussi le rôle de protection superficielle du support ;

– *l'imperméabilité : le revêtement permet au mur d'obtenir l'imperméabilité à l'eau de pluie. Il s'agit de systèmes multicouches souples, et pour certains, la couche intermédiaire comporte une armature : un voile, tissé ou non, ou des fibres en dispersion ;*

Remarque : le mot « imperméabilité » couvre deux actions : « imperméabilisation » et « étanchéité ».

– *l'isolation thermique : le revêtement accroît de façon significative l'isolation thermique de la paroi. Il s'agit, soit de systèmes d'isolation thermique par l'intérieur (ITI), soit de systèmes d'isolation thermique par l'extérieur (ITE).*

La question que le constructeur (maître d'œuvre et/ou maître d'ouvrage) doit se poser est : compte tenu de la pathologie à traiter, quelles sont les performances et les limites du revêtement retenu ou appliqué ?

Ce dossier a pour objectif d'étudier le bon comportement ou la dégradation de la paroi simple une fois revêtue (par l'un des systèmes décrit dans la norme NF P 84 401) quand celle-ci subit les agressions des agents naturels que sont la chaleur et l'eau, sous toutes leurs formes, agissant séparément ou ensemble.

La théorie de « la migration de la vapeur d'eau dans la masse » permet une approche qualitative et quantitative de ces phénomènes naturels (cf. [C 7 130] et [C 7 132]).

L'intérêt de quantifier cette migration est de pouvoir :

- *comprendre et résoudre les problèmes d'humidité existants ou à venir ;*
- *intervenir le plus en amont possible, lors de la conception du projet, et être ainsi à même de prévenir, plutôt que de guérir, la (ou les) pathologie(s) potentielle(s).*

1. Paroi et revêtements

1.1 Fonctions des revêtements

Appliqués sur la paroi, les revêtements sont destinés à remplir les fonctions suivantes :

- maintien de l'aspect, décoration ;
- imperméabilité à la pluie ;
- isolation thermique.

Passons en revue ce que le législateur attend de ces revêtements relevant de la norme NF P 84 403.

1.1.1 Maintien de l'aspect – Décoration

1.1.1.1 Classe D1

Le revêtement permet de maintenir l'aspect d'origine du parement de la paroi et de lui donner un aspect un peu différent.

Les critères permettant aux produits de satisfaire cette norme seront déterminés ultérieurement.

Rentrent dans cette catégorie les produits d'hydrofugation de surface. Ce sont des produits en phase solvant contenant en solution des molécules de silicone ou des dérivés siliconés. Ils ont pour fonction principale d'augmenter de façon significative la tension superficielle de l'eau. La pénétration de l'eau dans le sujet est ainsi « contrariée » : l'eau « glisse » et « lave » le parement des salissures qui pourraient s'y accrocher.

Commentaires : l'hydrofugation ne fait l'objet « d'aucune garantie légale ».

1.1.1.2 Classe D2

Le revêtement a une fonction décorative. Sont classés D2 tous les revêtements satisfaisants aux critères de la norme NF T 30 804 (peintures).

1.1.1.3 Classe D3

Le revêtement apporte une protection superficielle de nature à masquer le faïençage du support.

Sont classés D3 tous les revêtements satisfaisants les critères de la norme NF T 30 700 (RPE = revêtement plastique épais et RSE = revêtement semi-épais).

Commentaires : les revêtements des classes D2 et D3 font l'objet d'une garantie légale de « bon fonctionnement » qui correspond à l'ancienne garantie « biennale ».

1.1.2 Imperméabilité

Le classement présenté ici s'appuie sur le critère fonctionnel de résistance au passage de l'eau de pluie ainsi que sur la conservation des différentes propriétés : résistance au cloquage, à la fissuration et à l'arrachement notamment.

Les essais correspondants sont décrits dans la norme expérimentale NF P 84 402. Plus l'indice affecté est élevé, plus le revêtement possède des caractéristiques élevées de résistance à la fissuration du fond.

Classement :

- I1 : résiste à une microfissuration existante < 0,2 mm.
- I2 : résiste à une fissuration existante < 0,5 mm.
- I3 : résiste à des fissures existantes et à venir < 1,0 mm.
- I4 : résiste à des fissures existantes et à venir < 2,0 mm.

Important : tous les revêtements doivent posséder les caractéristiques minimales suivantes :

- indice conventionnel de la transmission de la vapeur d'eau $I_{TV} > 40 \text{ g/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ (cf. norme NF P 84 402, § 3.43) ;
- pas de cloquage ;
- imperméabilité de l'eau : imperméable à l'eau pendant 7 jours, pas de trace en sous face (cf. norme NF P 84 402, § 3.42) ;

– adhérence : après les cycles climatiques de vieillissement artificiel, la contrainte d'adhérence du revêtement d'imperméabilité sur son support à base de liant hydraulique doit être supérieure ou égale à :

- 0,7 MPa (7 daN/cm², environ 7 kg/cm²) si la rupture est adhésive,
- 0,5 MPa (5 daN/cm², environ 5 kg/cm²) si la rupture est cohésive.

1.1.3 Isolation thermique

Certains systèmes d'isolation thermique utilisent en parement des RPE, aussi, le groupe de travail du SNJF et de l'UNPVF qui a élaboré à l'origine (avril 1990) les « règles professionnelles » a-t-il jugé utile de proposer un classement de l'isolation thermique, en fonction de la résistance thermique R (en m²·K/W).

Nota : Syndicat national des joints et façades (SNJF) et l'Union nationale des entrepreneurs de peinture vitrerie et finitions (UNPVF).

Ces règles qui concernaient les travaux de réfection de façades en service par revêtement à base de polymères ont été la base du travail qui a donné naissance à l'ensemble des normes NF P 84 401 à 84 405.

Classement :

T1 : résistance thermique utile minimale $R_{th} < 0,05$ m²·K/W :

- épaisseur $e < 1,5$ mm de polystyrène extrudé ou de polyuréthane ;
- épaisseur $e < 2,0$ mm de polystyrène (produit type Dépron).

T2 : résistance thermique utile minimale $R_{th} < 1,00$ m²·K/W :

- épaisseur $e \leq 85$ mm de mortier isolant ;
- épaisseur $e \leq 41$ mm de laine de verre ;
- épaisseur $e \leq 39$ mm de polystyrène expansé.

T3 : résistance thermique utile minimale $R_{th} > 1,00$ m²·K/W :

- épaisseur $e > 41$ mm de laine de verre ;
- épaisseur $e > 39$ mm de polystyrène expansé ;
- épaisseur $e > 29$ mm de polyuréthane.

Remarque importante

Toutes les réglementations thermiques qui ont vu le jour après le premier choc pétrolier en 1973 (de Th-K 77 à RT 2005) conduisent à mettre en œuvre des épaisseurs largement supérieures à celles du classement ci-dessus.

1.2 Plan de l'étude hygrothermique d'une paroi revêtue

Pour appréhender le comportement hygrothermique d'une paroi et de son (ou ses) revêtement(s) extérieur(s) et/ou intérieur(s), il faut tracer des diagrammes de Glaser pour cette paroi dans des conditions climatiques définies.

1.2.1 Diagramme de Glaser : rappels

Pour obtenir un diagramme de Glaser, il faut tracer un ensemble de trois courbes :

- **La courbe des températures** qui est fonction :

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

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

Nota : dans la RT 2005 :

- le coefficient « K » devient le coefficient « U » de transmission surfacique ;
- $1/h_i$ et $1/h_e$ deviennent R_i et R_e .

Les valeurs respectives de ces coefficients sont récapitulées dans le formulaire [C 7 137]. Ils ne changent pas fondamentalement d'une réglementation à l'autre. La RT 2005 supprime des nuances qui existaient dans les règles Th-K 77.

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

• **La courbe des pressions saturantes** qui est une fonction directe de la température de l'air occlus dans l'épaisseur de la paroi (cf. tables de Regnault [C 7 137]).

- **La courbe des pressions partielles** qui est fonction :

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

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

avec e_n épaisseur (en m) des n constituants de la paroi,

π_n coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau de chaque constituant (en g/m·h·mmHg).

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

1.2.2 Conditions hygrothermiques

Reprenons le mur de façade constitué (cf. [C 7 132]) par :

- un voile en béton dont l'épaisseur est de 16 cm ;
- à l'intérieur, un enduit plâtre de 1 cm ;
- à l'extérieur, un enduit hydraulique de 5 mm.

Appliquons-lui successivement les revêtements suivants :

- décoration D2 ;
- imperméabilité I4 ;
- isolation thermique (cas développé dans l'article [C 7 142]) :
 - par l'intérieur avec et sans pare-vapeur,
 - par l'extérieur.

Soumettons cette paroi ainsi revêtue aux conditions hygrothermiques extrêmes définies dans le tableau 1.

1.2.3 Problèmes à résoudre

1.2.3.1 Comportements du mur revêtu en hiver

Y a-t-il sur le plâtre des condensations : superficielles et/ou internes ? Si oui : quelle quantité ?

Quelle est l'humidité relative intérieure (HR_i) à ne pas dépasser pour que le mur ne soit pas le siège :

- de condensations superficielles ?
- de condensations internes ?

1.2.3.2 Comportements du mur en été

Quel est le choc thermique subi par l'enduit hydraulique ?

Tableau 1 – Conditions hygrothermiques

Saison	Extérieur		Intérieur	
	Température T_e (en °C)	Humidité relative HR_e (en %)	Température T_i (en °C)	Humidité relative HR_i (en %)
Hiver	– 5	95	19	60
Été	35	35	22	40

Dans le plan d'adhérence de l'enduit hydraulique sous l'effet du choc thermique, quels sont :

- les allongements unitaires ?
 - les contraintes de traction et de compression qui y règnent ?
- En prenant comme :

- températures médianes : $T_{me} = 15\text{ °C}$ et $T_{mi} = 20\text{ °C}$;
- module d'élasticité :
 - du béton : $E_b = 225\,000\text{ daN/cm}^2$,
 - de l'enduit hydraulique $E_{e.h.} = 75\,000\text{ daN/cm}^2$.

Rappel des unités

$$1\text{ daN/cm}^2 = 1,02\text{ kg/cm}^2 = 1,00\text{ bar} = 0,1\text{ MPa}$$

$$1\text{ bar} = 100\,000\text{ Pa}$$

$$1\text{ Pascal} = 1\text{ Newton/m}^2 = 0,1\text{ kg/m}^2$$

2. Paroi et décoration

Pour déterminer la résistance de diffusion R_D à la vapeur d'un feuillet de peinture, ou d'une façon plus générale d'un système d'imperméabilité, il faut connaître la **perméance intrinsèque du système** : $(\pi/e)_s$ (en $\text{g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$).

En effet, aussi bien les PV d'essais officiels que les documents techniques fournis par les fabricants expriment la **perméance de l'éprouvette revêtue** du système : $(\pi/e)_r$ en $\text{g/m}^2 \cdot 24\text{ h}$.

L'explication est la suivante : d'une part, les mesures de flux de vapeur se font par période de 24 heures (faible perte de masse de la coupelle humide) ; d'autre part, le gradient de pression est fonction des températures auxquelles sont effectués les essais (en conformité avec la norme appliquée).

Rappel des modalités d'essais (norme NF P 84 402, § 3.4)

Les essais sont effectués sur 3 éprouvettes, (300 mm × 300 mm × 20 mm) en mortier de ciment conforme aux spécifications du § 3.1 de ladite norme.

Le revêtement est appliqué sur deux éprouvettes, la 3^e, nue, servant de témoin.

Les conditions d'essais sont les suivantes :

- l'étuve est thermorégulée à $T_i = 38\text{ °C}$ (humidité relative à l'intérieur de la coupelle remplie d'eau, $HR_i = 95\%$) placée dans une ambiance de 23 °C et d'humidité extérieure $HR_e = 50\%$;
- le gradient de pression est égal à :

$$\Delta P = P_{si} \times 0,95 - P_{se} \times 0,50$$

$$\Delta P = 49,69 \times 0,95 - 21,07 \times 0,50 = 36,6705\text{ mmHg}.$$

Le PV d'essai note la transmission de la vapeur d'eau pour l'éprouvette témoin $(\pi/e)_t$, et la moyenne arithmétique pour les deux éprouvettes revêtues $(\pi/e)_r$. Ces données permettent le calcul de la perméance intrinsèque du système $(\pi/e)_s$.

En effet, la résistance de l'éprouvette revêtue est égale à la somme des résistances partielles rencontrées, d'où l'égalité suivante :

$$\frac{1}{(\pi/e)_r} = \frac{1}{(\pi/e)_t} + \frac{1}{(\pi/e)_s} \quad (1)$$

Nota important : malgré le soin apporté dans la confection normalisée des éprouvettes (en mortier de ciment, support du futur revêtement), la valeur de leurs perméances peut varier de 90 à 150 $\text{g/m}^2 \cdot 24\text{ h}$ d'une éprouvette à l'autre, ce qui peut fausser la comparaison de résultats de perméance à la vapeur d'eau de revêtements de la même famille mais provenant de deux fabricants différents.

« Les règles professionnelles de la réfection de façades en mortier de plâtre type parisien par revêtement d'imperméabilité à base de polymères » publiées en juin 1997, agréées par le Conseil des Professions de la FFB (Fédération française du bâtiment) et acceptées par l'APSAD (Assemblée plénière des sociétés d'assurance dommages) ont fait

suite au rapport d'étude (sur la migration et le comportement de la vapeur d'eau sur des éprouvettes en mortier de plâtre et chaux) confié par la Commission Technique du SNJF et de l'UNPVF au CEBTP (Centre expérimental du bâtiment et des travaux publics).

La valeur de la perméance des éprouvettes témoins (en mortier de plâtre et chaux conforme au DTU 26.1) pouvait varier de **260 à 300 $\text{g/m}^2 \cdot 24\text{ h}$** .

2.1 Calcul de la perméance intrinsèque d'une Pliolite

La Pliolite est une marque de peinture déposée par le fabricant de pneumatique Goodyear qui avait ajouté dans la formule un plastifiant (paraffine chlorée) pour conférer au feuillet sec une certaine élasticité et ainsi être en mesure de résister au faïençage du béton.

Les résultats expérimentaux donnent :

- pour la perméance des éprouvettes revêtues $(\pi/e)_r$: 105, 116 et 118 $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- pour la perméance des éprouvettes témoins $(\pi/e)_t$: 261, 275 et 299 $\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- pour les épaisseurs appliquées du système e_s : 220 et 200 μm .

En remplaçant dans l'équation (1) les lettres par leurs valeurs, on trouve pour le système une perméance intrinsèque :

$$(\pi/e)_s = 312,54 (+ \text{ ou } - 30)\text{ g/m}^2 \cdot 24\text{ h}$$

Nous pouvons donc chiffrer la perméance, la résistance de diffusion et le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau du système pour :

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

Soit pour le système :

– perméance intrinsèque :

$$(\pi/e)_s = 312,54 / (24 \times 36,6705) = 0,3551\text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} ;$$

– résistance de diffusion à la vapeur d'eau :

$$R_D = 1/(\pi/e)_s = 1 / 0,3551 = 2,82\text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}.$$

Soit pour le revêtement :

Coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau de la Pliolite :

$$\pi = 0,3551 \times 0,000207 = 0,00007351\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$$

$$\pi = 0,7351 \times 10^{-4}\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} (\text{à } + \text{ ou } - 10\%).$$

2.2 Voile de béton et Pliolite en hiver

Le tableau 2 présente la note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser du mur de béton revêtu de Pliolite (200 μm), dans des conditions hygrothermiques hivernales (cf. § 1.2.2).

Notons que le feuillet de peinture ne modifie pas suffisamment la résistance thermique R_{th} du mur ainsi revêtu, donc la température de surface de l'enduit hydraulique est également celle de la Pliolite. Par conséquent, la courbe des pressions saturantes est identique à celle du voile de béton non revêtu.

En revanche, la résistance de diffusion à la vapeur d'eau $R_{D(\text{voile}+Pliolite)}$ (59,42 $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$) est supérieure à $R_{D(\text{voile simple})}$ (56,60 $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$).

2.2.1 Épure

La résistance thermique élémentaire de la Pliolite ($R_{th} = 0,00017$) étant négligeable par rapport à la résistance thermique totale ($R_{th} = 0,2943$), les courbes de températures et de pressions saturantes sont identiques à celle du diagramme du voile non revêtu (cf. figure 3 de [C 7 132]).

Tableau 2 – Note de calcul « en hiver »

Résist. à la diffusion e_n/π_n (en $m^2 \cdot h \cdot mmHg/g$)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 24 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_i = 19 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,3738	8,7904	10,0296	9,2278
Plâtre 0,77	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0972	2,3323	7,6972	7,8883
Béton 53,33	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,3106	7,4536	0,2436	4,6674
End. hydr. 2,50	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0146	0,3507	- 0,1070	4,5379
Pliol. 2,82	$\frac{0,0002}{1,15} = (0,0002)$	0,0000	0,0000	- 0,1070	4,5379
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,2039	4,8930	- 5,0000	3,01
Total $R_D = 59,42$	Total $R_{th} = 0,2943$				
	Coefficient de déperdition surfacique $K = 3,3979 = 3,40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$				

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 des constituants traversés :

- pression partielle intérieure :
 $P_{pi} = 9,8880 \text{ mmHg}$;
- pression partielle après le plâtre :
 $P_{ppl.} = 9,8880 - 7,0285 \times 0,77 / 59,42 = 9,7969 \text{ mmHg}$;
- pression partielle après le béton :
 $P_{pb.} = 9,7969 - 7,0285 \times 53,33 / 59,42 = 3,4888 \text{ mmHg}$;
- pression partielle après l'enduit hydraulique :
 $P_{pe.h.} = 3,4888 - 7,0285 \times 2,50 / 59,42 = 3,1931 \text{ mmHg}$;
- pression partielle après la Pliolite :
 $P_{ppliol.} = 3,1931 - 7,0285 \times 2,82 / 59,42 = 2,8595 \text{ mmHg}$;
- pression partielle extérieure :
 $P_{pe} = 2,8595 \text{ mmHg}$.

Reportons sur la figure 1 : d'une part, la matérialisation du feuil de peinture Pliolite ; d'autre part, les points représentatifs de la courbe des pressions partielles.

Nous constatons que la courbe des pressions partielles est supérieure, en partie, à la courbe des pressions saturantes. La vapeur d'eau se trouve en surpression au niveau de la face extérieure du plâtre ; une certaine quantité q_1 va donc changer d'état (vapeur se transformant en eau liquide), au rythme du coefficient de transfert : $\beta = 14 \text{ g/m}^2 \cdot h \cdot mmHg$:

$$q_1 = (9,888 - 9,2278) \times 14 = 9,2428 \text{ g} \cdot m^2 \cdot h$$

Cette condensation superficielle se maintient tant que le régime hygrothermique reste permanent.

Sur le plan graphique, la courbe des pressions partielles doit être inférieure (ou au plus confondue), à celle des pressions saturantes. La figure 1 est donc modifiée (cf. figure 2). À partir de cette figure 2, calculons les flux de vapeur traversant les différents matériaux et déterminons les plans et les quantités potentielles de vapeur d'eau « condensable ».

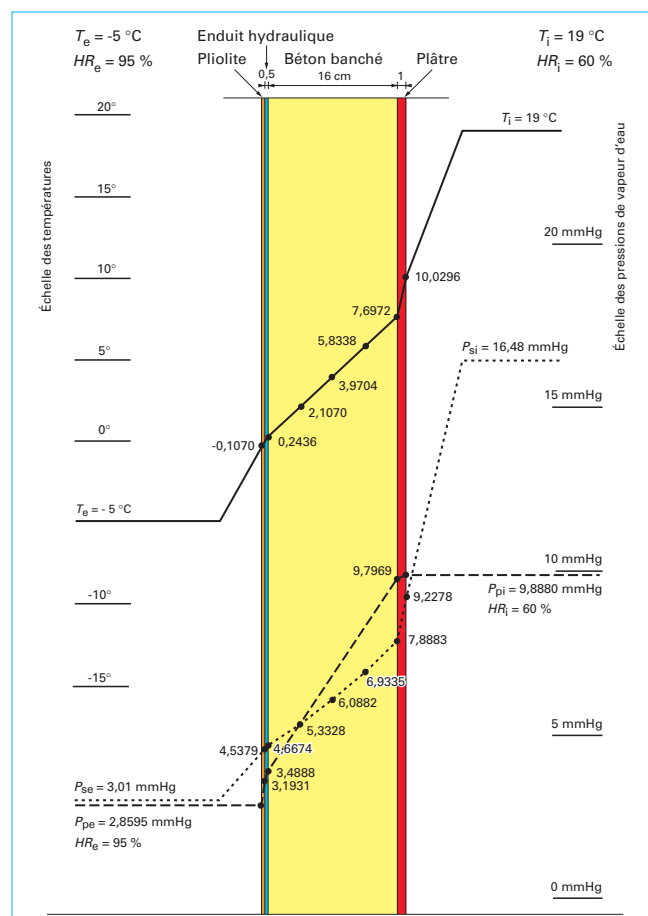


Figure 1 – Diagramme de Glaser d'un voile en béton revêtu de Pliolite

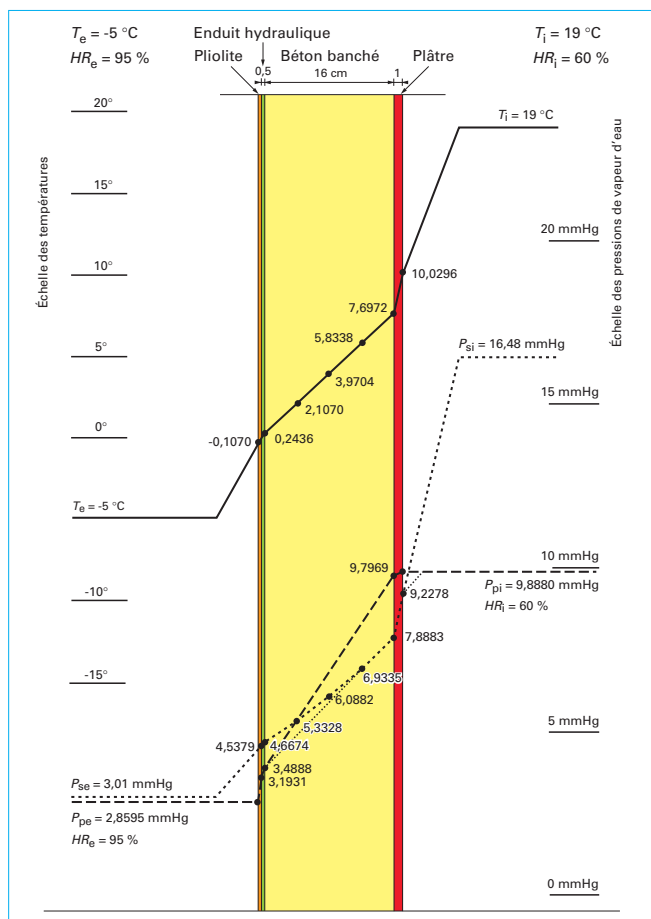


Figure 2 – Diagramme de Glaser modifié

2.2.2 Flux de vapeur d'eau

À l'aide des formules (1) et (2) de [C 7 132] (§ 4.2.2), on peut calculer les différents flux de vapeur d'eau g arrivant, entrant ou sortant, des différents constituants du mur :

- flux arrivant sur le plâtre :
 $g_1 = (9,8880 - 9,2278) / (0,03 / 900 \cdot 10^{-4}) = 1,9806 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux entrant dans le plâtre :
 $g_2 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 3,3979 \times 24 \times 0,6112 = 1,8513 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux sortant du plâtre :
 $g_3 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 3,3979 \times 24 \times 0,5409 = 1,6383 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux traversant le béton :
 $g_4 = (7,8883 - 3,4888) / 53,33 = 0,0825 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux traversant l'enduit hydraulique :
 $g_5 = (3,4888 - 3,1931) / 2,50 = 0,1183 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux traversant la Pliolite :
 $g_6 = (3,1931 - 2,8595) / 2,82 = 0,1183 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$.

Lorsque le flux arrivant d'une couche, noté g_a , est supérieur 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 superficielle sur le plâtre :
 $q_2 = g_1 - g_2 = 1,9806 - 1,8513 = 0,1293 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;

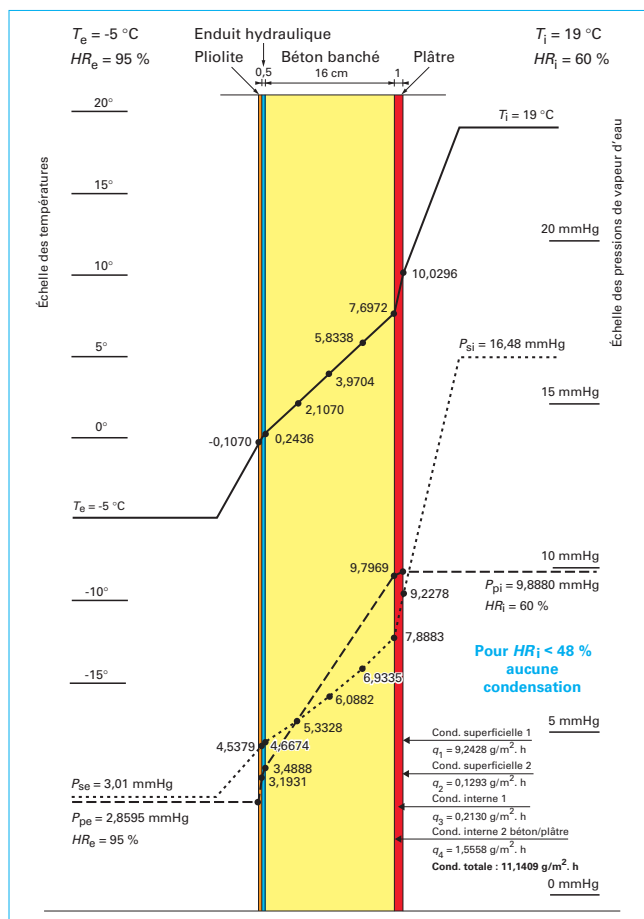


Figure 3 – Diagramme de Glaser : condensation en période hivernale

- condensation interne dans le plâtre :
 $q_3 = g_2 - g_3 = 1,8513 - 1,6383 = 0,2130 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- condensation interface béton/plâtre :
 $q_4 = g_3 - g_4 = 1,6383 - 0,0825 = 1,5558 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- 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 ;
- condensation interne dans la Pliolite : aucune, car la courbe P_p est inférieure à la courbe P_s .

Portons sur la figure 3 les quatre condensations : q_1 , q_2 , q_3 et q_4 .

2.2.3 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.

2.2.3.1 Suppression des condensations superficielles

Pour qu'il n'y ait pas de condensations superficielles sur le plâtre, il faut que la pression partielle intérieure P_{pi} de la vapeur d'eau soit égale (ou inférieure) à la pression saturante intérieure P_{si} de la vapeur d'eau en contact avec la face extérieure du plâtre, dont la température est :

$$\theta_{pl} = 10,0296 \text{ °C}$$

Tableau 3 – Note de calcul « en été »

Résist. à la diffusion e_n/π_n (en $m^2 \cdot h \cdot mmHg/g$)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 19,83 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 13 \text{ °C}$	$T_i = 22 \text{ °C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,3738	4,8590	26,8590	26,5185
Plâtre 0,77	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0972	1,2633	28,1223	28,5579
Béton 53,33	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,3106	4,0374	32,1597	35,9934
End. hydr. 2,50	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0146	0,1899	32,3496	36,3842
Pliol. 2,82	$\frac{0,0002}{1,15} = 0,0002$	0,0000	0,0000	32,3496	36,3842
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,2039	2,6504	35,0000	42,18
Total $R_D = 59,42$	Total $R_{th} = 0,2943$				
	Coefficient de déperdition surfacique $K = 3,3979 = 3,40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$				

Il faut donc que :

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

Ce qui permet le calcul de $HR_{i \text{ limite}}$ à ne pas dépasser :

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

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

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

$$\text{Soit } HR_{i \text{ limite}} \leq 55 \%, \text{ quand } T_i = 19 \text{ °C.}$$

2.2.3.2 Suppression des condensations internes

Pour qu'il n'y ait pas de condensations internes dans le plâtre, il suffit que la courbe des pressions partielles soit inférieure (ou au maximum tangente en un seul point) à la courbe des pressions saturantes.

Il faut donc que le flux qui migre jusqu'au point de tangence soit égal au flux de vapeur migrant dans l'ensemble de la paroi.

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

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

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

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, on trouve :

$$(P_{pxi} - 7,8883) / 0,77 = (P_{pxi} - 2,8595) / 56,60$$

$$\text{Soit : } (56,60 - 0,77) \times P_{pxi} = (56,60 \times 7,8883 - 0,77 \times 2,8595)$$

$$P_{pxi} = 444,2759/55,83$$

$$P_{pxi} = 7,9577 \text{ mmHg.}$$

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

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

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

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

On peut ainsi affirmer : pour que les condensations q_3 et q_4 ne puissent pas s'établir, ou 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 : $HR_i \leq 48 \%$ quand $T_i = 19 \text{ °C}$.

2.3 Voile de béton et Pliolite en été

La note de calcul est donnée dans le tableau 3. Elle est nécessaire au tracé du diagramme de Glaser, du mur revêtu de Pliolite ($200 \mu m$) dans des conditions hygrothermiques estivales : (cf. § 1.2.2).

2.3.1 Épure

La résistance thermique élémentaire de la Pliolite ($R_{th} = 0,00017$) étant négligeable par rapport à la résistance thermique totale ($R_{th} = 0,2943$), les courbes de températures et de pressions saturantes sont identiques à celle du diagramme du voile non revêtu. (cf. figure 9 de [C 7 132]).

Il faut néanmoins tracer la courbe des pressions partielles en tenant compte de la résistance de diffusion à la vapeur d'eau du mur revêtu de Pliolite (cf. figure 4).

2.3.2 Choc thermique

En traçant sur le diagramme 4, qui devient la figure 5, la courbe des températures hivernales, nous visualisons dans chaque plan le choc thermique correspondant.

Ainsi, dans le plan enduit hydraulique/béton, le choc thermique saisonnier $\Delta T_{se.h./b.}$ sera égal à :

$$\Delta T_{se.h./b.} = 32,1597 - 0,2436 \approx 31,9 \text{ °C,}$$

c'est-à-dire, identique à celui du voile béton non revêtu (cf. figure 10 de [C 7 132]).

Le choc thermique, dans les mêmes conditions, à l'interface Pliolite/enduit hydraulique est égal à :

$$\Delta T_{spliol./e.h.} = 32,3493 - (-0,1070) \approx 32,4 \text{ °C}$$

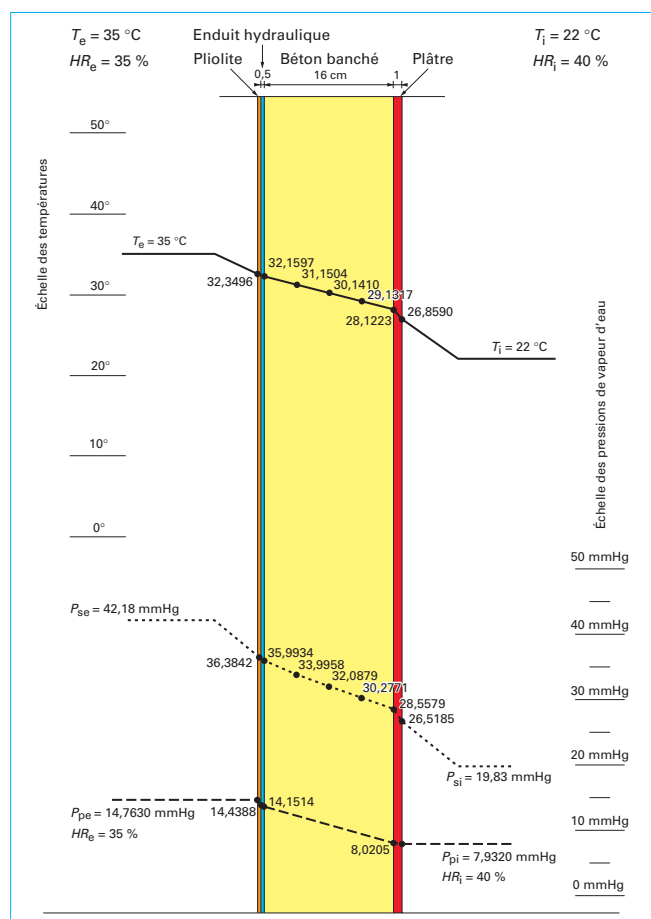


Figure 4 - Diagramme de Glaser en période estivale

2.3.3 Effets du choc thermique

2.3.3.1 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 ℓ_0 (en mm) longueur initiale,

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

ΔT (en °C) choc thermique.

Pour un mètre linéaire de béton ou d'enduit hydraulique, sous l'effet de :

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

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

– la baisse de la température $\Delta T_{\text{baisse}} = 15,8448$ °C (choc thermique hivernal), le raccourcissement est de :

$$\Delta\ell = 1\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 15,8448 = 0,158 \text{ mm/m.}$$

Nota : pour plus de détail, le lecteur pourra se reporter au § 7 de [C 7 132].

2.3.3.2 Contraintes internes

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

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

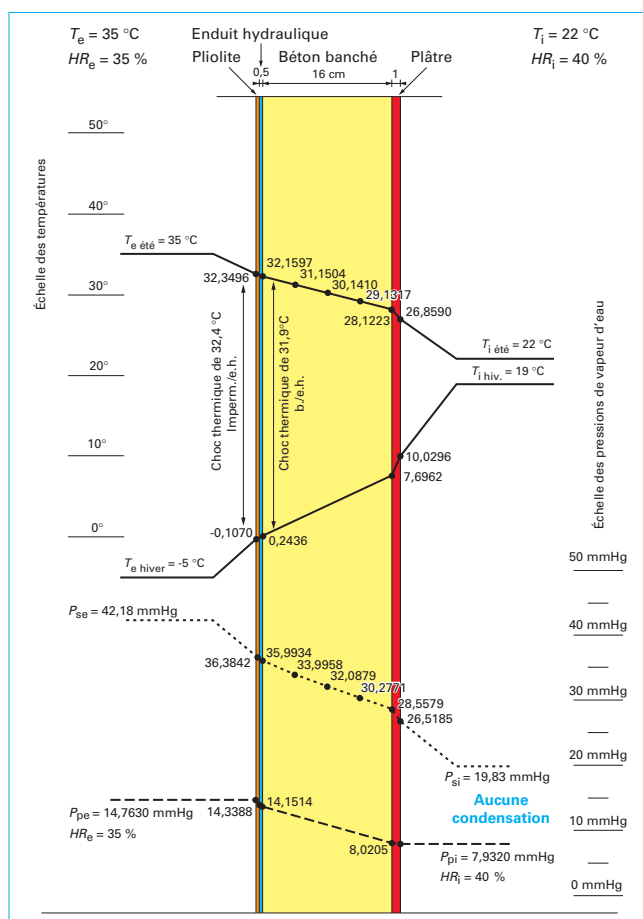


Figure 5 - Choc thermique saisonnier d'un mur en béton revêtu de Pliolite

avec σ_t contrainte de traction si la température baisse,

σ_c contrainte de compression si la température s'élève.

Pour la paroi type, objet de notre étude, les valeurs des différentes contraintes subies par l'enduit hydraulique et la face extérieure du voile en béton sont rassemblées dans le tableau 4.

Remarque importante

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

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

Les enduits hydrauliques « bâtards » qui ont des modules d'élasticité plus faibles ($30\,000 < E < 45\,000$ kg/cm²) conduiront dans les mêmes conditions à des contraintes de traction plus faibles ($4,8 < \sigma_t < 7,1$ kg/cm²).

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.

Tableau 4 – Récapitulatif des contraintes

Matériaux	Contraintes	
	Traction	Compression
Enduit hydraulique $E = 75\,000\text{ kg/cm}^2$	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 15,8448$ $\sigma'_t = 11,88\text{ kg/cm}^2$	$75\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 16,0673$ $\sigma_c = 12,05\text{ kg/cm}^2$
Béton banché $E = 225\,000\text{ kg/cm}^2$ (face extérieure)	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 15,8448$ $\sigma'_t = 35,65\text{ kg/cm}^2$	$225\,000 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 16,0673$ $\sigma_c = 36,15\text{ kg/cm}^2$

3. Paroi et imperméabilité

Comme dans le paragraphe 2, pour établir la note de calcul nécessaire au tracé des trois courbes qui constituent le diagramme de Glaser, il faut au préalable, soit, connaître les caractéristiques physiques du revêtement, soit, dans le cas contraire, les calculer à partir des PV d'essais établis par un laboratoire officiel (PV d'essais que le fabricant doit fournir à toutes demandes formulées par le constructeur).

D'après le tableau 1 de [Form. C 7 137], on constate que le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau π_s des systèmes d'imperméabilité (appelé, avant la parution de la norme NF P 84 401, « imperméabilisation » ou « étanchéité » quand un voile d'armature y est marouflé) peut varier de : $0,2898 \cdot 10^{-4}$ à $1,2888 \cdot 10^{-4}\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$.

Le DTU 42.1 (norme NF P 84-404-3) précise les prescriptions minimales du revêtement en partie courante : épaisseur sèche théorique totale « minimale » du feuillet (0,2 à 0,6 mm) en fonction de la classe, (I1 à I4) du système appliqué.

En théorie, la résistance de diffusion à la vapeur d'eau $R_{D\text{sys}}$ du système peut être ainsi « bornée » :

$$6,90 \geq R_{D\text{sys}} \geq 4,66\text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}.$$

Les PV d'essais indiquent, d'une part, la préparation des éprouvettes effectuée dans le laboratoire officiel par un technicien du fabricant précisant les consommations en gramme au m^2 de chaque couche du système, les temps et conditions climatiques de séchage, et, d'autre part, le résultat de l'indice conventionnel de transmission de la vapeur d'eau noté I_{TV} .

Exemple d'un extrait de PV d'essais

Système imperméabilité I4

• Éprouvettes.

Application à la brosse d'une couche de fixateur en phase solvant (suivi du nom commercial).

Poids du fixateur appliqué au m^2 : 180 g.

Séchage 24 h à 23 °C et 50 % d'humidité relative.

Application au rouleau laine à poils moyens d'une première couche de revêtement (nom commercial) dilué à 8 % d'eau en poids.

Pose et marouflage de l'armature, voile polyester non tissé (marque commerciale) : 100 g/m^2 .

Application au rouleau laine à poils moyens d'une deuxième couche de revêtement (nom commercial) dilué à 8 % d'eau en poids.

Poids du revêtement pur appliqué au m^2 : 750 g.

Séchage 24 h à 23 °C et 50 % d'humidité relative.

Application au rouleau laine à poils moyens d'une couche de revêtement (nom commercial).

Poids du revêtement appliqué au m^2 : 400 g.

• Indice conventionnel de transfert de vapeur d'eau.

Au cours de l'exposition des maquettes à 38 °C en étuve ventilée, le système ne présente aucun cloquage, ni désordre.

I_{TV} en $\text{g/m}^2 \cdot 24\text{ h}$.

Éprouvette témoin non revêtue : 130.

Éprouvettes revêtues du système : 69.

Calcul de la perméance intrinsèque du système I4

En appliquant la formule (1) :

$$1/69 = 1/130 + 1/(\pi/e)_s \text{ soit } (\pi/e)_s = 147,0492\text{ g/m}^2 \cdot 24\text{ h}.$$

Ce qui donne pour le système :

– la perméance intrinsèque :

$$(\pi/e)_s = 147,0492/24 \times 36,6705 = 0,1671\text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} ;$$

– la résistance de diffusion à la vapeur d'eau :

$$R_{Ds} = 1/(\pi/e)_s = 1/0,1671 = 5,9850\text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g} ;$$

– son coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau (en supposant que l'épaisseur e_s du système appliqué sur la maquette soit égale à 600 μm), on trouve pour le revêtement :

$$\pi = 0,1671 \times 0,000600 = 0,00010025\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg},$$

$$\pi = 1,0025 \times 10^{-4}\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}.$$

3.1 Voile de béton et imperméabilité I4, « en hiver »

La note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser (du mur revêtu) dans les conditions hygrothermiques hivernales retenues (cf. § 1.2.2) est présentée tableau 5.

Nous supposons que l'imperméabilité I4 a un coefficient de perméabilité : $\pi = 0,8996 \cdot 10^{-4}\text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$, et que l'épaisseur moyenne du système est égale à $e_s = 600\text{ }\mu\text{m}$.

Notons que le feuil de peinture ne modifie pas suffisamment la résistance thermique R_{th} du mur ainsi revêtu, donc la température de surface de l'enduit hydraulique est également celle de l'imperméabilité I4. Par conséquent, la courbe des pressions saturantes est identique à celle du voile de béton non revêtu.

Par contre, la résistance de diffusion à la vapeur d'eau $R_{D\text{voile+I4}}$ (63,27 $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$) est supérieure à $R_{D\text{voile simple}}$ (56,60 $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$).

Tableau 5 – Note de calcul « en hiver »					
Résist. à la diffusion e_n/π_n (en m ² ·h·mmHg/g)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 16,48 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 24 \text{ °C}$	$T_i = 19 \text{ °C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,3738	8,7904	10,0296	9,2278
Plâtre 0,77	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0972	2,3323	7,6972	7,8883
Béton 53,33	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,3106	7,4536	0,2436	4,6674
End. hydr. 2,50	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0146	0,3507	– 0,1070	4,5379
Imperm. 6,67	$\frac{0,0006}{1,15} = (0,0005)$	0,0000	0,0000	– 0,1070	4,5379
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,2039	4,8930	– 5,0000	3,01
Total $R_D = 63,27$	Total $R_{th} = 0,2943$				
	Coefficient de déperdition surfacique $K = 3,3979 = 3,40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$				

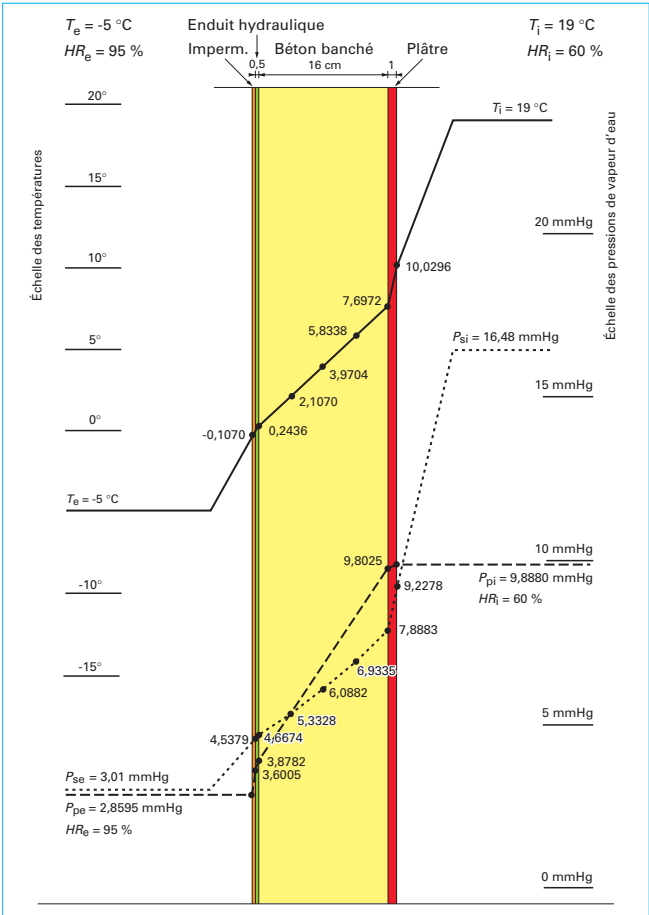


Figure 6 – Diagramme de Glaser d’une paroi de béton revêtue de l’impermeabilité I4

3.1.1 Épure

La résistance thermique élémentaire de l’impermeabilité I4 ($R_{thI4} = 0,0005$) étant négligeable par rapport à la résistance thermique totale ($R_{th} = 0,2943$), les courbes de températures et de pressions saturantes sont identiques à celle du diagramme du voile non revêtu (cf. figure 3 de [C 7 132]).

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 des constituants traversés.

Pression partielle intérieure : $P_{pi} = 9,888 \text{ mmHg}$.

Pression partielle après le plâtre :
 $P_{ppl} = 9,888 - 7,0285 \times 0,77 / 63,27 = 9,8025 \text{ mmHg}$.

Pression partielle après le béton :
 $P_{pbb} = 9,8025 - 7,0285 \times 53,33 / 63,27 = 3,8782 \text{ mmHg}$.

Pression partielle après l’enduit hydraulique :
 $P_{peh} = 3,8782 - 7,0285 \times 2,50 / 63,27 = 3,6005 \text{ mmHg}$.

Pression partielle après l’impermeabilité I4 :
 $P_{pI4} = 3,6005 - 7,0285 \times 6,67 / 63,27 = 2,8595 \text{ mmHg}$.

Pression partielle extérieure : $P_{pe} = 2,8595 \text{ mmHg}$.

Reportons sur la figure 6 d’une part, la matérialisation du feuil de peinture imperméabilité I4 ; d’autre part, les points représentatifs de la courbe des pressions partielles.

Nous constatons que la courbe des pressions partielles est supérieure, en partie, à la courbe des pressions saturantes. La vapeur d’eau se trouve en surpression au niveau de la face extérieure du plâtre ; une certaine quantité q_1 va donc changer d’état (vapeur se transformant en eau liquide), au rythme du coefficient de transfert : $\beta = 14 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$:

$$q_1 = (9,888 - 9,2278) \times 14 = 9,2428 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$$

Cette condensation superficielle se maintient tant que le régime hygrothermique reste permanent.

Remarque : cette quantité q_1 est identique à la condensation qui se produit que le voile soit revêtu (cf. § 2.2.1) ou non (cf. § 4.1.3.2 de [C 7 132]) par une Pliolite ou une imperméabilité I4.

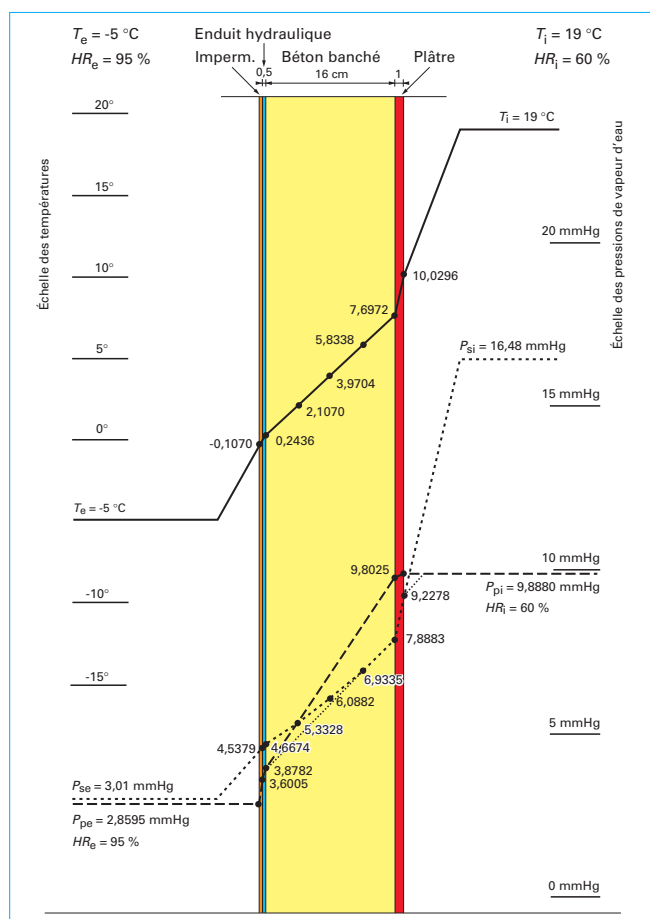


Figure 7 - Diagramme de Glaser modifié

Sur le plan graphique, la courbe des pressions partielles doit être inférieure (ou au plus confondue) à celle des pressions saturantes. La figure 6 est donc modifiée (figure 7).

À partir de cette figure 7, calculons les flux de vapeur traversant les différents matériaux et déterminons les plans et les quantités potentielles de vapeur d'eau « condensables ».

3.1.2 Flux de vapeur d'eau

À l'aide des formules (1) et (2) de [C 7 132], calculons les différents flux de vapeur d'eau g arrivant, entrant ou sortant des différents constituants du mur :

- flux arrivant sur le plâtre :
 $g_1 = (9,8880 - 9,2278) / (0,03/900 \cdot 10^{-4}) = 1,9806 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux entrant dans le plâtre :
 $g_2 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 3,3979 \times 24 \times 0,6112 = 1,8513 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux sortant du plâtre :
 $g_3 = (130 \cdot 10^{-4} / 0,35) \times 3,3979 \times 24 \times 0,5409 = 1,6384 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux traversant le béton :
 $g_4 = (7,8883 - 3,8782) / 53,33 = 0,0752 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux traversant l'enduit hydraulique :
 $g_5 = (3,8782 - 3,6005) / 2,50 = 0,1111 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- flux traversant l'imperméabilité I4 :
 $g_6 = (3,6005 - 2,8595) / 6,67 = 0,1111 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$.

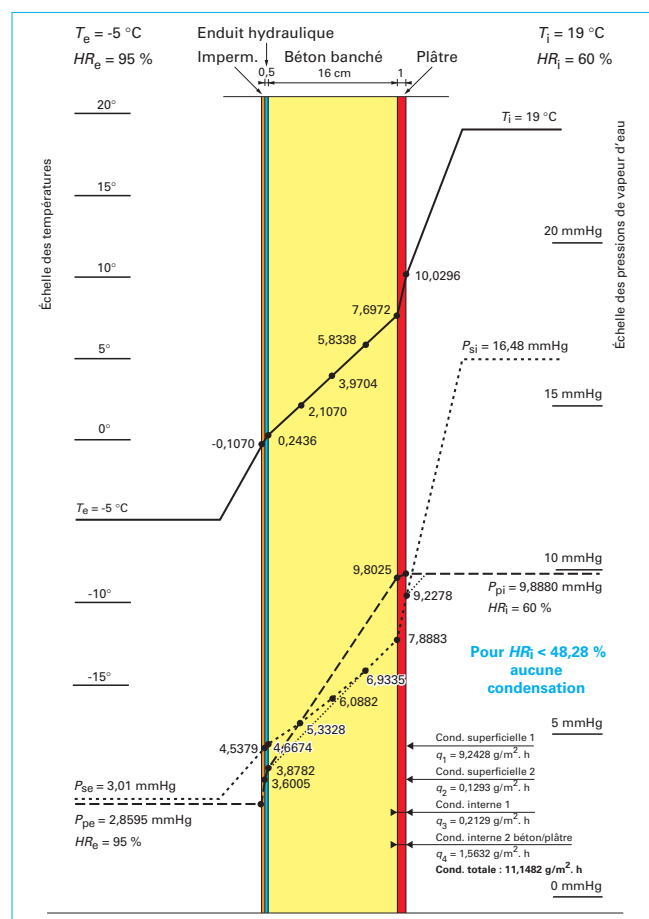


Figure 8 - Diagramme de Glaser, condensation en période hivernale

Lorsque le flux arrivant d'une couche, noté g_a , 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 superficielle sur le plâtre :
 $q_2 = g_1 - g_2 = 1,9806 - 1,8513 = 0,1293 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- condensation interne dans le plâtre :
 $q_3 = g_2 - g_3 = 1,8513 - 1,6384 = 0,2129 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- condensation interface béton/plâtre :
 $q_4 = g_3 - g_4 = 1,6384 - 0,0752 = 1,5632 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$;
- condensation interne dans le béton : aucune, car la courbe des P_p est inférieure à la courbe des P_s ;
- condensation interne dans l'enduit hydraulique : aucune, car la courbe des P_p est inférieure à la courbe des P_s ;
- condensation interne dans I4 : aucune, car la courbe des P_p est inférieure à la courbe des P_s .

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

Remarques importantes

- Les quantités de vapeur d'eau condensables q_1 , q_2 et q_3 sont identiques que le voile soit revêtu par une Pliolite ou une imperméabilité I4.
- Seule la quantité $q_{4\text{imperm}}$ est très légèrement supérieure :
 $q_{4\text{imperm}} = 1,5632 > q_{4\text{Pliolite}} = 1,5558 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$.

Tableau 6 – Note de calcul « en été »

Résist. à la diffusion e_n/π_n (en $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$)	Résistances thermiques élémentaires de la paroi	Coeff. de proport.	Température		Pression saturante $P_{si} = 19,83 \text{ mmHg}$
			$\Delta T = 13^\circ \text{C}$	$T_i = 22^\circ \text{C}$	
	$\frac{1}{h_i} = 0,1100$	0,3738	4,8590	26,8590	26,5185
Plâtre 0,77	$\frac{0,01}{0,35} = 0,0286$	0,0972	1,2633	28,1223	28,5579
Béton 53,33	$\frac{0,16}{1,75} = 0,0914$	0,3106	4,0374	32,1597	35,9934
End. hydr. 2,50	$\frac{0,005}{1,15} = 0,0043$	0,0146	0,1899	32,3496	36,3842
Imperm. 6,67	$\frac{0,0006}{1,15} = (0,0005)$	0,0000	0,0000	32,3496	36,3842
	$\frac{1}{h_e} = 0,0600$	0,2039	2,6504	35,0000	42,18
Total $R_D = 63,27$	Total $R_{th} = 0,2943$				
	Coefficient de déperdition surfacique $K = 3,3979 = 3,40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$				

3.1.3 Seuil d'humidité relative intérieure

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

3.1.3.1 Suppression des condensations superficielles

Le fait de revêtir le voile par un système d'imperméabilité I4, en lieu et place de la Pliolite, n'a eu aucune incidence sur les courbes de températures et de pressions saturantes (cf. § 2.2.2).

En conséquence, nous arrivons à la même limite à ne pas dépasser pour qu'il n'y ait pas de condensations superficielles sur le plâtre (cf. § 2.2.3.1), il faut et il suffit que : $HR_{i \text{ limite}} \leq 55\%$ quand $T_i = 19^\circ \text{C}$.

3.1.3.2 Suppression des condensations internes

Comme ci-dessus, le fait de revêtir le voile par un système d'imperméabilité I4, en lieu et place de la Pliolite, n'a eu aucune incidence sur les courbes de températures et de pressions saturantes (cf. § 2.2.3). Seule la diffusion R_D a changé ($63,27 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ au lieu de $56,60 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$).

En conséquence, nous arrivons sensiblement à la même limite à ne pas dépasser pour qu'il n'y ait pas de condensations internes dans le plâtre (cf. § 2.2.3.2), il faut que : $HR_{i \text{ limite}} < 48,28\%$.

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

3.2 Voile de béton et imperméabilité I4 en été

La note de calcul nécessaire au tracé du diagramme de Glaser, dans les conditions hygrothermiques estivales (cf. § 1.2.1) est décrite dans le tableau 6.

3.2.1 Épure

L'imperméabilité ne change pas, d'une façon significative, la résistance thermique « R_{th} » du voile ainsi revêtu.

Les courbes de température et de pressions saturantes sont donc inchangées par rapport à celles du voile non revêtu (cf. figure 9 de [C 7 132]).

Par contre, il faut tracer la courbe des pressions partielles en tenant compte de la résistance de diffusion à la vapeur d'eau du système I4.

Nous traçons ainsi le diagramme 9.

3.2.2 Choc thermique

En traçant sur le diagramme 9 qui devient le diagramme 10, la courbe des températures hivernales, nous visualisons dans chaque plan le choc thermique correspondant.

Ainsi, dans le plan enduit hydraulique/béton, le choc thermique saisonnier $\Delta T_{se.h/b.}$ sera égal à :

$$\Delta T_{se.h/b.} = 32,1597 - 0,2436 \approx 31,9^\circ \text{C}.$$

Il est identique à celui du voile béton non revêtu (cf. figure 10 de [C 7 132]).

Le choc thermique, dans les mêmes conditions, à l'interface imperméabilité/enduit hydraulique est égal à :

$$\Delta T_{s \text{ perm./e.h.}} = 32,3493 - (-0,1070) \approx 32,4^\circ \text{C}$$

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 :

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

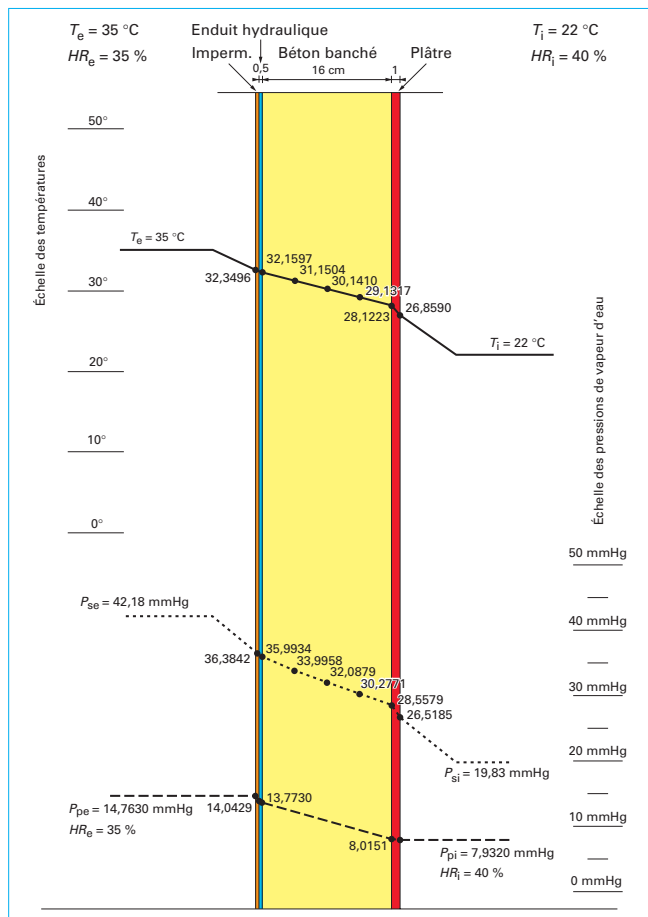


Figure 9 – Diagramme de Glaser en période estivale

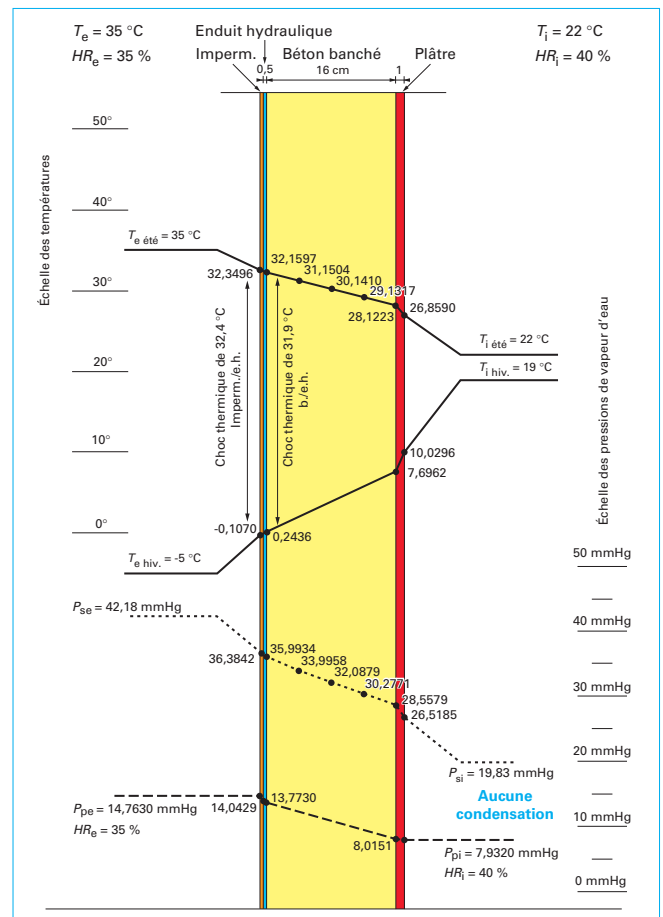


Figure 10 – Choc thermique saisonnier

avec ℓ_0 (en mm) longueur initiale,

α coefficient de dilatation linéaire, égal à « $1 \cdot 10^{-5}$ par °C », pour le béton et l'enduit hydraulique,

ΔT (en °C) choc thermique.

Pour les calculs, se reporter à ceux du § 2.3.3 qui sont identiques pour le voile revêtu par une Pliolite.

$\Delta \ell = 0,158$ mm/m (retrait) et $\Delta \ell = 0,158$ mm/m (allongement).

3.2.3.2 Contraintes internes

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

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

avec σ_t contrainte de traction si la température baisse,

σ_c contrainte de compression si la température s'élève.

Pour la paroi type, objet de notre étude, les valeurs des différentes contraintes subies par l'enduit hydraulique et la face extérieure du voile en béton sont les mêmes que celles regroupées dans le tableau 4.

Remarques importantes

En général les **contraintes de compression** prenant naissance 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/cm²), la contrainte de traction correspondante sera 10 à 15 fois plus faible (35 à 23,3 kg/cm²) et pourra, en conséquence, engendrer des désordres.

Les enduits hydrauliques « bâtards » qui ont des modules d'élasticité plus faibles ($30\,000 < E < 45\,000$ kg/cm²) conduiront dans les mêmes conditions à des contraintes de traction plus faibles ($4,8 < \sigma_t < 7,1$ kg/cm²).

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.