

Pathologie de l'humidité. Parois revêtues en bâtiment

Analyse du phénomène

par **Paul DAHAN**

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

1. Décoration D2 : peinture type « Pliolite »	C 7 144 - 2
1.1 Fissuration	— 2
1.2 Salissures.....	— 2
1.3 Décollement de l'enduit.....	— 2
1.4 Éclatement du béton sous la poussée de la rouille.....	— 2
1.5 Moisissures de la face intérieure de la paroi	— 2
2. Imperméabilité : « classe I4 »	— 3
2.1 Fissuration	— 3
2.2 Salissures.....	— 3
2.3 Décollement de l'enduit	— 3
2.4 Éclatement du béton sous la poussée de la rouille	— 4
2.5 Moisissures sur la face intérieure de la paroi	— 4
3. Isolation thermique par l'intérieur (ITI)	— 4
3.1 Polystyrène sur plâtre cartonné avec pare-vapeur	— 4
3.2 Polystyrène sur plâtre cartonné sans pare-vapeur	— 5
4. Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	— 7
4.1 Enduit épais sur polystyrène expansé	— 7
4.2 Enduit mince sur polystyrène expansé	— 8
Pour en savoir plus	Doc. C 7 140

Les diagrammes de Glaser nous ont permis une approche quantitative scientifique des agressions climatiques naturelles (chaleur et eau agissant séparément ou ensemble) sur les constituants :

- soit de la paroi simple (cf. dossiers [C 7 130] et suivants) ;
- soit de la paroi revêtue par un système :
 - de décoration D2 : peinture type « Pliolite »,
 - d'imperméabilité : de la classe « I4 »,
 - d'isolation thermique : par l'intérieur ou par l'extérieur.

L'étude de la paroi simple a eu pour objectif de comprendre les causes potentielles :

- en réhabilitation, qui sont à l'origine de la pathologie avérée, ou ;
- en travaux neufs, qui peuvent donner naissance à la pathologie à venir.

L'étude de la paroi revêtue a pour but d'être en mesure de statuer sur la solution appliquée (ou prévue) dont la finalité est d'éliminer la ou les causes de cette pathologie, et ainsi, d'en faire disparaître les effets.

Elle permet d'apprécier les performances de la solution appliquée (ou prévue) mais aussi et surtout d'en préciser ses limites.

Autrement dit : l'étude hygrothermique, avant la mise en œuvre de la solution qui a pour objectif d'éliminer la ou les causes de la pathologie afin d'en faire disparaître les effets doit permettre de démontrer, d'une part, que le problème est résolu, et, d'autre part, que la solution envisagée (ou appliquée) ne doit pas être la cause d'une pathologie nouvelle, latente et/ou potentielle.

Rappelons les désordres récurrents qui peuvent affecter les parois simples :

- fissurations avec ou sans infiltrations d'eau ;
- salissures ;
- décollement de l'enduit extérieur ou intérieur ;
- éclatement du béton ;
- moisissures sur la face intérieure de la paroi.

Les mécanismes à l'origine de ces désordres potentiels ont été décrits dans le dossier [C 7 132], § 9.2.

L'exploitation analytique, des diagrammes de Glaser des parois revêtues successivement par les différents produits ou systèmes, doit permettre au constructeur d'en évaluer leurs propriétés curatives face aux désordres potentiels énumérés ci-dessus, tout en soulignant leurs performances et leurs limites.

1. Décoration D2 : peinture type « Pliolite »

1.1 Fissuration

Si l'enduit hydraulique est le siège de faïencage, donc de microfissures dont l'ouverture reste inférieure à $2/10^{\text{e}}$ de millimètre : le feuil de peinture « Pliolite » pourra masquer ce faïencage.

Cette faculté de « souplesse du feuil » réside dans la formulation de cette peinture (marque déposée et breveté par le fabricant de pneumatiques Goodyear) dont l'adjuvant, la « paraffine chlorée », lui confère une certaine élasticité rémanente. La préconisation de ce type de réfection doit se limiter à des parois « en service », c'est-à-dire, à des parois « anciennes » ayant subies un certain nombre de cycles climatiques (hiver/été).

La **Pliolite** pourra être appliquée en réhabilitation, à titre **curatif** sur un **faïencage** existant.

Ce type de revêtement fait l'objet d'une garantie légale de « bon fonctionnement », connue auparavant sous le vocable de « garantie biennale ». Pour que la garantie soit effective, il est impératif que l'application ait été effectuée par une entreprise agréée à jour de ses primes d'assurance.

1.2 Salissures

Il n'y a pas actuellement de textes ou de normes qui réglementent ce type de désordre.

Les salissures sont qualifiées par les assureurs de désordres « esthétiques » et sont généralement exclues du champ d'application de la police d'assurance, car elles ne rendent pas l'ouvrage impropre à sa destination, selon l'article 1792 du code civil.

Néanmoins, d'une façon générale, ce qui fait la qualité d'une peinture, et son prix également, c'est la teneur en résine qui va polymériser pour donner le feuil de peinture.

Il faut savoir que les peintures utilisées en extérieur dans le bâtiment sont des **résines artificielles thermodurcissables, vinyliques ou acryliques**, c'est-à-dire qu'elles durcissent sous l'action de la chaleur en formant un réseau tridimensionnel rigide, qui ne facilite pas l'accroche des poussières et des micro-organismes.

Un entretien périodique, par un lavage à l'eau froide à moyenne pression (10 à 12 bar), peut contribuer à l'élimination de **70 à 80 % des salissures** et autres micro-organismes.

1.3 Décollement de l'enduit

Comme le **choc thermique** est souvent la cause principale du décollement de l'enduit hydraulique extérieur (cf. dossier [C 7 132] § 9.2.3), et que la résistance thermique R_{th} de la paroi n'est pas modifiée par l'application de la peinture, on peut dire que la **Pliolite** ne sera pas une solution, à envisager, pour pallier le **décollement** de l'enduit hydraulique.

1.4 Éclatement du béton sous la poussée de la rouille

Comme il a été souvent répété : pour supprimer les effets, il faut éliminer la ou les causes qui sont à l'origine de la pathologie.

Les conditions nécessaires pour que les fers à béton puissent être attaqués par la rouille sont les suivantes :

- béton faiblement basique, pH inférieur à 9 ou 10 ;
- béton poreux et/ou présence de fissures infiltrantes (largeur des fissures supérieure à $5/10^{\text{e}}$ de mm), permettant à l'eau de pluie chargée en oxygène dissous d'arriver jusqu'aux armatures ;
- enrobage insuffisant des aciers.

En conclusion, la **Pliolite** ainsi que tous les revêtements appartenant aux classes de **décoration D2 et D3 ne sont pas des solutions envisageables pour protéger les fers à béton de l'oxydation.**

1.5 Moisissures de la face intérieure de la paroi

L'application de la **Pliolite** ne modifie pas les caractéristiques thermiques R_{th} de l'ensemble de la paroi qui reste, thermiquement parlant, une paroi froide dans les conditions hygrothermiques retenues. Autrement dit : le plâtre reste à des températures inférieures à la température du point de rosée et est, ainsi, le siège de condensations superficielles et internes (cf. figure 3 de [C 7 140]). Par contre, la résistance de diffusion à la vapeur d'eau de la paroi revêtue ($R_{Dp.r.} = 59,42 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$) a augmenté par rapport à

celle de la paroi simple ($R_{D,p,s} = 56,60 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$), entraînant une légère augmentation de la quantité totale de vapeur d'eau condensable q :

$$q = 11,1409 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \text{ au lieu de } q = 11,1349 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}.$$

Pour le plâtre de 1 cm d'épaisseur, le taux d'humidité critique $\tau = 5\%$ (soit une quantité d'eau liquide : $Q = 100 \times 100 \times 1 \times 5 / 100 = 500 \text{ cm}^3 = 500 \text{ g}$ d'eau) sera atteint au bout d'un temps t égal à :

$$t = Q / q = 500 / 11,1409 = 44,8797 \text{ heures, soit } 1 \text{ j } 20 \text{ h } 52 \text{ min}.$$

soit quasiment le même temps (à 2 min près) que pour la paroi simple, pour que le plâtre soit complètement mouillé.

Les conséquences sont identiques à celles décrites dans le § 9.2.5.1. de [C 7 132] :

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

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

Il faut avoir présent à l'esprit qu'un plâtre voit ses performances mécaniques (contraintes d'adhérence et de traction) chuter de près de 50 % quand il passe de l'état sec à l'état humide :

- à l'état sec : $11 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_{r,t} < 12 \text{ kg/cm}^2$;
- à l'état humide : $5 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_{r,t} < 6 \text{ kg/cm}^2$.

Sous l'effet du choc thermique saisonnier, le plâtre va être soumis successivement à des gonflements (à l'état humide) et des retraites (à l'état sec) qui vont générer des contraintes de traction qui pourront être supérieures ou égales aux contraintes de ruptures, **et entraîner sa décohérence du support** (plâtre sonnant le creux).

Exemple : plâtre ayant un coefficient de dilatation linéaire $\alpha = 0,9 \times 10^{-5}$ par $^\circ\text{C}$, et un module d'élasticité dynamique $E = 60\,000 \text{ kg/cm}^2$.

Sous l'effet du choc thermique saisonnier qui entraîne une chute de température $\Delta T = 9,9517^\circ\text{C}$, la contrainte de traction σ_t dans le plâtre sera égale à :

$$\sigma_t = 60\,000 \times 0,9 \cdot 10^{-5} \times 9,9517 \approx 5,37 \text{ kg/cm}^2.$$

Ce qui peut être à l'origine de fissures et entraîner également une perte d'adhérence du plâtre sur le voile en béton.

Toutefois, comme nous l'avons calculé § 2.2.3.2 de [C 7 140].

Si $HR_i \leq 48\%$ quand $T_i = 19^\circ\text{C}$, les **condensations superficielles et internes** ne pourront pas s'établir dans le plâtre et, par conséquent, empêcher le développement de **moisissures**.

2. Imperméabilité : « classe I4 »

2.1 Fissuration

Si l'enduit hydraulique est le siège de fissures existantes ou à venir, dont l'ouverture reste inférieure à $20/10^6$ de millimètres, **l'imperméabilité « I4 » sera une solution pour masquer ces fissures**.

Cette faculté de « souplesse du feuill » réside dans la formulation de ce système, dont un adjuvant est un plastifiant lui conférant ainsi une certaine élasticité rémanente après polymérisation de la résine.

Notons qu'en fonction de l'ouverture des fissures, la norme NF P 84-402 préconise une classe de performance allant de I1 à I4 (cf. § 9.2.1.2.1 de [C 7 132]).

Rappel

Le DTU 42.1 (norme NF P 84-404 et suivantes) précise la destination des systèmes : « Réfection des façades en service par revêtements d'imperméabilité à base de polymères ».

Ce type de revêtement fait l'objet d'une garantie légale décennale.

L'entreprise doit être agréée et doit être à jour de ses primes d'assurance.

2.2 Salissures

Actuellement, il n'y a pas de textes ou de normes qui réglementent ce type de désordre.

Les salissures sont qualifiées par les assureurs de désordres « esthétiques » et sont exclues généralement du champ d'application de la police d'assurance, car ils ne rendent pas l'ouvrage impropre à sa destination, selon l'article 1792 du code civil, et ne nuisent en rien à la fonction du revêtement.

Néanmoins, ces défauts esthétiques restent peu appréciés par le constructeur qui a procédé à un ravalement technique et qui entend que l'aspect extérieur perdure le plus longtemps possible, (comme la garantie décennale).

Les systèmes d'imperméabilité, finitions lisses ou satinées, sont une réponse plutôt favorable au « non-encrassement » par leur côté « autolavable ».

Dans la course à l'allongement sans rupture du feuill, certains fabricants ont eu recours à l'augmentation importante du taux de plastifiant dans la formulation. Le résultat, positif sur le plan commercial (moins de produit au m^2 , ou, à consommation égale, allongement amélioré de 30 à 80 %), fut obtenu au détriment de désordres esthétiques survenus à court et à moyen termes (feuill restant poisseux en surface en y facilitant l'accroche des poussières).

Il faut donc qu'il y ait, pour ces systèmes, un compromis raisonnable entre l'**élasticité** obtenue par un dopage en adjuvants réduit au juste nécessaire (la nature et la quantité d'adjuvants entrant dans la formulation restent un secret jalousement gardé par chaque fabricant), et le **taux de résines** (thermodurcissables ou réticulables) qui peut varier entre 25 et 35 % (la qualité croît avec le pourcentage de résine mais en augmente également sensiblement le coût).

La surface du revêtement doit rester « dure » pour éviter l'accroche des poussières, mais elle doit rester « souple » par fonction.

Ce paradoxe facilite l'entretien dans le temps, car les poussières qui s'y déposent « sans s'incruster » peuvent être éliminées par l'eau de pluie, ou, éventuellement par un lavage périodique, tous les 4 ou 5 ans (suivant l'environnement), à l'eau froide ou chaude à basse pression (15 à 20 bar), ou, éventuellement avec une solution aqueuse de soude caustique (type lessive St Marc).

2.3 Décollement de l'enduit

Comme le choc thermique est souvent la cause principale du décollement de l'enduit hydraulique extérieur (cf. § 9.2.3 de [C 7 132]) et que la résistance thermique (R_{th}) de la paroi n'est pas modifiée par l'imperméabilité, l'application de l'**imperméabilité ne sera pas une solution à envisager pour pallier le décollement de l'enduit hydraulique**.

Dans le cas, uniquement, où le décollement serait dû à des fissures « infiltrantes » (ouverture des fissures supérieure à $5/10^6$ de mm et inférieure à $20/10^6$ de mm), après réparation des zones « sonnant le creux », (en choisissant la classe correspondant à l'ouverture des fissures, cf. [C 7 132]) l'imperméabilité pourrait être une solution curative.

2.4 Éclatement du béton sous la poussée de la rouille

Pour qu'il y ait oxydation des fers à béton, il faut que le béton qui enrobe les armatures soit faiblement basique (pH inférieur à 9 ou 10), qu'il y ait de l'humidité (eau liquide) et de l'oxygène (dissous dans l'eau).

En supprimant, un ou plusieurs de ces facteurs, la réaction d'oxydation des fers ne peut se produire.

Alors, une fois que les aciers ont été nettoyés, par tous les moyens (brossage métallique, sablage à sec avec protection des personnels), puis passivés et enfin le support reconstitué avec un mortier hydraulique ou époxy, l'ensemble de la paroi sera revêtu par un système d'imperméabilité.

Le revêtement agira comme une barrière étanche à l'eau de pluie, ce qui aura pour effet de retarder la carbonatation (cf. dossier [C 7 132] § 9.2.4) de la partie reconstituée et, par conséquent, de protéger plus efficacement les fers à béton de l'oxydation (l'oxygène dissous dans l'eau n'entrant pas en contact avec l'armature).

Dans ces conditions et dans ces conditions seulement, **l'imperméabilité (I2 à I4) sera une solution envisageable pour empêcher l'oxydation des fers à béton.**

2.5 Moisissures sur la face intérieure de la paroi

L'application du système d'imperméabilité I4 ne modifie pas les caractéristiques thermiques R_{th} de l'ensemble de la paroi qui reste, thermiquement parlant, une paroi froide, c'est-à-dire reste, dans les conditions hygrothermiques retenues, le siège de condensations superficielles et internes sur et dans le plâtre (cf. figure 8 de [C 7 140]).

Par contre, la résistance de diffusion à la vapeur d'eau de la paroi revêtue ($R_{Dp.r.} = 63,27 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$) a augmenté par rapport à celle de la paroi simple ($R_{Dp.s.} = 56,60 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$), entraînant une légère augmentation de la quantité totale de vapeur d'eau condensable q :

$$q = 11,1482 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \text{ (au lieu de } q = 11,1349 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}).$$

Le taux d'humidité critique $\tau = 5\%$ (pour le plâtre de 1 cm d'épaisseur, soit une quantité d'eau liquide : $Q = 100 \times 100 \times 1 \times 5 / 100 = 500 \text{ cm}^3 = 500 \text{ g d'eau}$), sera atteint au bout d'un temps t égal à :

$$t = Q / q = 500 / 11,1482 = 44,8503 \text{ heures, soit } 1 \text{ j } 20 \text{ h } 51 \text{ min.}$$

Donc quasiment le même temps (à 3 min près) que pour la paroi simple (§ 9.2.5.1 de [C 7 132]), pour que le plâtre soit complètement mouillé.

Les conséquences sont identiques à celles décrites dans le dossier [C 7 132] § 9.2.5.1, à savoir :

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

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

Dans ces conditions, l'imperméabilité « I4 » n'est pas une solution.

Nous pouvons reprendre ici, *in extenso*, l'incidence du choc thermique sur le plâtre intérieur complètement mouillé, c'est-à-dire quand il a atteint son taux d'humidité critique $\tau = 5\%$ (cf. § 1.5), entraînant une perte de 50 % de ses performances mécaniques.

Toutefois, comme nous l'avons calculé au § 4.3.2 de [C 7 132] : si $HR_i \leq 48\%$ quand $T_i = 19^\circ\text{C}$, **les condensations superficielles et internes** ne pourront pas s'établir dans le plâtre et, par conséquent, les **moisissures** ne pourront pas s'y développer.

3. Isolation thermique par l'intérieur (ITI)

3.1 Polystyrène sur plâtre cartonné avec pare-vapeur

3.1.1 Fissuration

La barrière thermique (PSE) se trouve côté intérieur.

Le flux de chaleur :

– en hiver, il va de l'intérieur vers l'extérieur. Le PSE freine le passage des calories, ce qui a pour conséquence de rendre le voile en béton « extérieur » froid (température proche de celle qui règne à l'extérieur) ;

– en été, il va de l'extérieur vers l'intérieur. Le PSE freine toujours le passage des calories qui vont s'accumuler dans le voile en béton « extérieur », d'où un supplément d'échauffement (température supérieure à celle qui règne à l'extérieur).

Conséquences pour l'enduit hydraulique :

- le choc thermique, $\Delta T_{se.h./b.}$ augmente de 31,90 à 38,64 °C (+ 21 %) ;
- la contrainte de traction passe de 11,88 à 13,73 kg/cm² (+ 15 %).

Les fissures existantes s'ouvriront davantage (de l'ordre de 15 à 20 %), le risque de voir apparaître de nouvelles fissures est hautement probable.

En conclusion, si la **fissuration** est la pathologie dominante, **l'ITI ne la supprimera pas**, elle sera, au contraire, un **facteur aggravant**.

3.1.2 Salissures

L'ITI ne modifie pas l'aspect extérieur ; ainsi, l'enduit hydraulique aura le même comportement que celui du voile « simple ». (cf. dossier [C 7 132], § 9.2.2).

La seule modification apportée par l'ITI est celui de la **température superficielle de l'enduit**, qui sera :

- plus basse en hiver : $-4,17^\circ\text{C}$ au lieu de $0,10^\circ\text{C}$;
- plus forte en été : $34,55^\circ\text{C}$ au lieu de $32,34^\circ\text{C}$.

La température superficielle hivernale négative pourra être bénéfique. Elle contribuera à tuer certaines souches de micro-organismes et contrariera ainsi le développement des lichens, mousses et autres champignons.

3.1.3 Décollement de l'enduit

Comme nous l'avons constaté au § 3.1.1, le choc thermique $\Delta T_{se.h./b.}$ et la contrainte de traction augmentent lorsque l'on passe d'une paroi simple à une paroi revêtue par l'ITI.

On est donc en mesure d'affirmer que **l'isolation thermique par l'intérieur ne solutionne pas le décollement**, elle peut même l'aggraver.

3.1.4 Éclatement du béton sous la poussée de la rouille

Comme nous l'avons décrit (dossier [C 7 132], § 9.2.4), nous constatons que l'ITI n'apporte aucune modification au processus qui conduit à l'éclatement du béton sous la poussée de la rouille qui se développe sur les fers à béton.

Comme nous l'avons dit ci-dessus (cf. § 3.1.1), l'ITI entraîne une augmentation du choc thermique et de la contrainte de traction, aussi bien sur l'enduit hydraulique que dans son plan d'adhérence sur le voile de béton ; par conséquent, si la pathologie dominante est **l'éclatement du béton** sous la poussée de la rouille, la **solution isolation thermique par l'intérieur** sera une **solution aggravante**.

3.1.5 Moisissures sur la face intérieure de la paroi

■ L'étude du diagramme 2 de [C 7 142] nous montre que le plâtre « 2 » a une température superficielle $\theta_{\text{pl.}«2»} = 17,4927 \approx 17,5$ °C.

Rappelons que dans un air où $T_i = 19$ °C et $HR_i = 60$ %, le point de rosée T_d s'établit pour :

$$T_d = 11,0686 \approx 11,1$$
 °C.

Comme : $\theta_{\text{pl.}«2»} > T_d$, on peut donc affirmer que, si les désordres dominants sont les **moisissures** sur la face intérieure, **l'isolation thermique par l'intérieur sera une solution qui empêchera celles-ci de s'établir.**

On peut ajouter qu'il n'y aura pas de condensations superficielles et internes dans le plâtre « 2 », et pas de développement potentiel de moisissures, tant que :

$$HR_i \leq 89 \text{ \% quand } T_i = 19 \text{ °C.}$$

■ Par contre le plâtre « 1 » reste le siège de condensations internes $q_{\text{totale}} = 0,1458 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ (dont $0,0040 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ dans le plâtre « 1 »).

Que penser de cette condensation interne *a priori* « cachée » ?

Peut-elle être à l'origine d'une pathologie latente ?

Pour statuer, il faut connaître le temps nécessaire pour que l'humidité critique, $\tau = 5$ %, soit atteinte :

- d'une part, dans 1 cm de plâtre « 1 » et ;
- d'autre part, dans 1 mm de plâtre « 1 ».

• Temps nécessaire pour mouiller 1 cm de plâtre.

La quantité $Q_{1\text{cm}}$ de vapeur d'eau condensable nécessaire pour humidifier 1 m² de plâtre de 1 cm d'épaisseur est égale à :

$$Q_{1\text{cm}} = 100 \times 100 \times 1 \times 5 / 100 = 500 \text{ cm}^3 = 500 \text{ g d'eau.}$$

En régime permanent, la condensation hivernale potentielle étant de : $q_{\text{totale}} = 0,1458 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$, l'humidité critique sera atteinte au bout d'un temps t_1 égal à :

$$t_1 = Q_{1\text{cm}} / q_{\text{totale}} = 500 / 0,1458 = 3\,429,3553 \text{ heures.}$$

$$\text{Soit } t_1 = 142 \text{ jours } 21 \text{ heures } 21 \text{ minutes.}$$

Sous notre climat tempéré, et compte tenu de l'évaporation potentielle en saison estivale, le plâtre « 1 » n'atteindra jamais l'humidité critique.

• Temps nécessaire pour mouiller 1 mm de plâtre.

La quantité $Q_{1\text{mm}}$ de vapeur d'eau condensable pour humidifier 1 m² de plâtre de 1 mm d'épaisseur, à l'interface béton/plaque cartonnée du plâtre « 1 », est égale à :

$$Q_{1\text{mm}} = 100 \times 100 \times 0,1 \times 5 / 100 = 50 \text{ cm}^3 = 50 \text{ g d'eau.}$$

En régime permanent, la quantité potentielle d'eau condensable, en période hivernale, à l'interface béton/plâtre « 1 » étant de $q_2 = 0,1418 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$, l'humidité critique sera atteinte au bout d'un temps t_2 égal à :

$$t_2 = Q_{1\text{mm}} / q_{\text{totale}} = 50 / 0,1418 = 352,6093 \text{ heures.}$$

$$\text{Soit } t_2 = 14 \text{ jours } 16 \text{ heures } 36 \text{ minutes.}$$

Ce temps, selon des hivers rigoureux et/ou suivant les régions, peut être atteint.

Quels risques peuvent découler de cette humidification dans le plâtre « 1 » ?

Comme nous l'avons analysé au § 1.5, un plâtre « mouillé » voit chuter de 50 % certaines de ses caractéristiques mécaniques telles que contrainte d'adhérence et contrainte de traction. Cela peut avoir des conséquences dans deux plans.

– plan plâtre « 1 »/PSE : pour que ce plan commence à s'humidifier, à raison de $0,0040 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$, il faut que le plan de l'interface béton/plâtre soit complètement mouillée. Donc *a priori* pas d'incidence dans un premier temps sur le collage du PSE sur le plâtre « 1 » ;

– plan béton/plâtre « 1 » : sous l'effet du choc thermique saisonnier $\Delta T_s = 36,71097$ °C, une contrainte de cisaillement va prendre naissance dans le plan d'adhérence du plâtre « 1 » sur le béton. Elle se partage en :

– une baisse de $\Delta T_s = 18,3110 \approx 18,3$ °C qui engendre une contrainte de traction $\sigma'_t = 9,89 \text{ kg/cm}^2$ supérieure à celle de rupture d'un plâtre mouillé ($\sigma'_{rt} = 5$ à 6 kg/m^2) ;

– une élévation $\Delta T_s = 18,3999 \approx 18,4$ °C qui engendre une contrainte de compression $\sigma_c = 9,94 \text{ kg/cm}^2$.

Il est raisonnable de penser que les cycles successifs de traction et de compression engendreront une **contrainte de cisaillement**, dans le plan d'adhérence béton/plâtre « 1 », qui risque de se traduire par une **décohésion des premiers millimètres du plâtre « 1 »**.

Pour confirmer ou infirmer ce risque, il faudrait établir des diagrammes de Glaser en faisant varier les hypothèses hygrothermiques extérieures.

3.2 Polystyrène sur plâtre cartonné sans pare-vapeur

Le pare-vapeur ayant une résistance thermique négligeable par rapport à la résistance thermique d'ensemble, le fait de le supprimer n'a pas d'incidence sur la courbe des températures, et par conséquent ne change pas la courbe des pressions saturantes. Donc il n'y a pas de changement pour les chocs thermiques.

Seule la résistance de diffusion à la vapeur d'eau R_D va passer de $177,37 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ (avec pare-vapeur) à $77,37 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g}$ (sans pare-vapeur).

Passons en revues les conséquences entraînées par la suppression du pare-vapeur sur les pathologies potentielles.

3.2.1 Fissuration

Pas d'incidence. On peut reprendre *in extenso* le § 3.1.1 et sa conclusion : si la **fissuration** est la pathologie dominante, **l'ITI ne la supprimera pas ; au contraire, elle l'aggraver.**

3.2.2 Salissures

Pas d'incidence. On peut reprendre *in extenso* le § 3.1.2.

3.2.3 Décollement de l'enduit

Pas d'incidence. On peut reprendre *in extenso* le § 3.1.3 et sa conclusion.

La conclusion est donc identique et on peut affirmer que **l'isolation thermique par l'intérieur ne solutionne pas le décollement, elle peut l'aggraver.**

3.2.4 Éclatement du béton sous la poussée

Pas d'incidence. On peut reprendre *in extenso* le § 3.1.4 et avoir une conclusion identique : si la pathologie dominante est **l'éclatement du béton** sous la poussée de la rouille, la solution **isolation thermique par l'intérieur sera une solution aggravante.**

3.2.5 Moisissures sur la face intérieure de la paroi

L'étude de la figure 5 de [C 7 142] nous montre que le plâtre « 2 » a une température superficielle $\theta_{\text{pl.}«2»} = 17,4927$ °C.

Rappelons que dans un air où $T_i = 19$ °C et $HR_i = 60$ %, le point de rosée T_d s'établit pour $T_d = 11,0686$ °C.

Comme : $\theta_{\text{pl.}«2»} > T_d$, on peut donc affirmer que, si les désordres dominants sont les **moisissures sur la face intérieure**, **l'isolation thermique par l'intérieur sera une solution qui empêchera celles-ci de s'y établir.**

On peut ajouter qu'il n'y aura pas de condensations superficielles et internes dans le plâtre « 2 », et pas de développement potentiel de moisissures, tant que :

$$HR_i \leq 89 \% \text{ quand } T_i = 19^\circ\text{C}.$$

Par contre, le plâtre « 1 » reste le siège de condensations internes $q_{\text{totale}} = 0,2946 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ (dont $0,1504 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ dans le plâtre « 1 »).

Que penser de cette condensation interne *a priori* « cachée » ? Peut-elle être à l'origine d'une pathologie latente ?

Pour statuer, il faut connaître le temps nécessaire pour que l'humidité critique $\tau = 5 \%$ soit atteinte :

- d'une part, dans 1 cm de plâtre « 1 », et ;
- d'autre part, dans 1 mm de plâtre « 1 ».

• Temps nécessaire pour mouiller 1 cm de plâtre.

La quantité $Q_{1\text{cm}}$ de vapeur d'eau condensable nécessaire pour humidifier 1 m^2 de plâtre de 1 cm d'épaisseur est égale à :

$$Q_{1\text{cm}} = 100 \times 100 \times 1 \times 5 / 100 = 500 \text{ cm}^3 = 500 \text{ g d'eau}.$$

En régime permanent, la condensation hivernale potentielle étant de : $q_{\text{totale}} = 0,2946 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$, l'humidité critique sera atteinte au bout d'un temps t_1 égal à :

$$t_1 = Q_{1\text{cm}} / q_{\text{totale}} = 500 / 0,2946 = 1\,697,2166 \text{ heures}.$$

$$\text{Soit } t_1 = 70 \text{ jours } 17 \text{ heures } 13 \text{ minutes}.$$

Sous notre climat tempéré, et compte tenu de l'évaporation potentielle en saison estivale, le plâtre « 1 » ne devrait jamais atteindre le taux d'humidité critique.

Pour les régions de montagne, il faudrait avoir les relevés météorologiques indiquant les nombres d'heures pendant lesquelles la température extérieure reste inférieure à 0°C . Puis établir un bilan condensation/évaporation pour être en mesure de statuer.

Notons au passage que la condensation ($0,1504 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$) dans les 10 mm de plâtre « 1 » est 37 fois plus importante en l'absence de pare-vapeur.

• Temps nécessaire pour mouiller 1 mm de plâtre.

La quantité $Q_{1\text{mm}}$ de vapeur d'eau condensable pour humidifier 1 m^2 de plâtre de 1 mm d'épaisseur, à l'interface béton/plâtre « 1 », est égale à :

$$Q_{1\text{mm}} = 100 \times 100 \times 0,1 \times 5 / 100 = 50 \text{ cm}^3 = 50 \text{ g d'eau}.$$

En régime permanent, la quantité potentielle d'eau condensable, en période hivernale, à l'interface béton/plâtre « 1 » étant de : $q_2 = 0,1442 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$, l'humidité critique sera atteinte au bout d'un temps t_2 égal à :

$$t_2 = Q_{1\text{mm}} / q_{\text{totale}} = 50 / 0,1442 = 346,7406 \text{ heures}.$$

$$\text{Soit } t_2 = 14 \text{ jours } 10 \text{ heures } 44 \text{ minutes}.$$

Ce temps, selon des hivers rigoureux et/ou suivant les régions, peut être atteint. Quels risques peuvent découler de cette humidification dans le plâtre « 1 » ?

Comme nous l'avons analysé au § 1.5, un plâtre « mouillé » voit chuter de 50 % certaines de ses caractéristiques mécaniques telles que contrainte d'adhérence et/ou contrainte de traction. Et cela peut avoir des conséquences au niveau de deux plans :

– plan plâtre « 1 »/PSE : ce plan est humidifié quand le centimètre de plâtre « 1 » a atteint son taux d'humidité critique, c'est-à-dire au bout de $t_1 = 70$ jours de régime permanent.

Donc *a priori* il n'y a pas d'incidence, dans un premier temps, sur le collage du PSE sur le plâtre « 1 » ;

– plan béton/plâtre « 1 » : l'absence de pare-vapeur n'a pas d'effet sur le choc thermique saisonnier qui reste égal à : $\Delta T_s = 36,71097^\circ\text{C}$ et qui donne naissance à une contrainte de cisaillement pratiquement identique à celle engendrée lorsque l'ITI a un pare-vapeur :

– une baisse de $\Delta T_s = 18,3110 \approx 18,3^\circ\text{C}$ provoque une contrainte de traction,

– une élévation $\Delta T_s = 18,3999 \approx 18,4^\circ\text{C}$ engendre une contrainte de compression.

On peut reprendre ici la même conclusion, à savoir qu'il y a un **risque de décohesion des premiers millimètres du plâtre « 1 »**.

Remarques importantes

Il est évident qu'avec des conditions climatiques plus sévères, le temps d'humidification pour « mouiller » 1 mm de plâtre serait écourté.

Plan de collage : dans un souci de simplification, nous n'avons pas tenu compte de l'épaisseur des plots de colle qui maintiennent le système isolant. En pratique, ces plots créent un espace variable de 0 à 2 cm. Cet espace va se comporter, vis-à-vis de la migration de la vapeur d'eau, comme « une lame d'air non ventilée ».

Dans cette zone, la courbe des pressions partielles sera en surpression.

Le plâtre « 1 » va être le siège de condensations superficielles (effet de « paroi froide »). L'humidification sera plus importante. La contrainte d'adhérence des plots de colle (souvent en « plâtre ») va chuter et, par cisaillement, entraîner leur rupture adhésive. Les plaques de PSE peuvent se décoller et ainsi créer un espace plus important qui aggravera le phénomène de condensation en vertu de l'effet « paroi froide ».

Seul le calcul et le tracé de nouveaux diagrammes de Glaser (avec lame d'air dans le plan de collage du système isolant) permettraient d'obtenir des valeurs exactes, nécessaires pour apprécier cette pathologie latente potentielle.

En conclusion, **avec ou sans pare-vapeur**, si le **système d'isolation thermique par l'intérieur** supprime bien les **moisissures** sur la face intérieure de la paroi, il peut engendrer un phénomène latent de **décollement** soit du plâtre « 1 », soit des plots de colle du système isolant, si ces deux matériaux (plâtre et plots de colle) sont sensibles à l'humidité.

Quelques commentaires sur l'isolation thermique « par l'intérieur ».

Afin de pouvoir comparer l'étude hygrothermique du voile revêtu avec celles du voile simple étudié dans [C 7 132], nous avons conservé le plâtre de 1 cm à l'intérieur.

• On peut admettre, par exemple, qu'il s'agit là, d'un cas de travaux de **réhabilitation lourde en milieu non occupé**.

La mise en œuvre d'un système d'isolation par l'intérieur devra respecter certaines conditions particulières, notamment :

- le plâtre existant doit avoir une bonne cohésion (satisfaire à des essais d'adhérence) ;
- les moisissures éventuelles doivent être éliminées (application de produits fongicides et anticryptogamiques) ;
- le plâtre existant et la colle du système d'ITI doivent être compatibles.

• **Dans le cadre de travaux neufs**, le système ITI serait directement collé sur le voile en béton brut de décoffrage, en ayant eu soin de vérifier sa porosité. (Absence d'huile de décoffrage. Sur un béton « neuf », la mise en œuvre peut être entreprise qu'après qu'il ait atteint un minimum de 45 jours d'âge.)

4. Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

4.1 Enduit épais sur polystyrène expansé

4.1.1 Fissuration

Le choc thermique, qui est le vecteur des variations linéaires et des contraintes de traction et de compression, passe de 31,9 °C à 7,61 °C (pour l'enduit hydraulique de 0,5 cm), soit une diminution dans le rapport de 4,2 à 1.

Sur le plan de la physique des matériaux, cela se traduit par une diminution, dans le même rapport, de l'amplitude de l'ouverture des fissures existantes.

Autrement dit, des fissures qui pouvaient s'ouvrir de 0,6 à 0,8 mm verront leur amplitude d'ouverture restée inférieure à 0,2 mm.

Ces mouvements restent négligeables et sont sans incidence sur le système ITE collé ou fixé mécaniquement.

Si le choc thermique est fortement réduit au niveau de l'enduit hydraulique existant, ce n'est pas pour autant qu'il a été supprimé : il s'est déplacé vers l'extérieur (dans le plan de l'enduit épais de finition) et a augmenté ($\Delta T_{\text{end.finit.}} = 38,54 \text{ °C}$) en valeur absolue.

Cette conséquence doit être prise en compte par le détenteur du système vis-à-vis de l'enduit de finition, qui est généralement un monocouche à base de liant hydraulique, dont la composition est analogue à un mortier bâtard, qui doit avoir un module d'élasticité dynamique le plus faible possible ; une contrainte de traction la plus forte possible, et dont la toile d'armature (ou le treillis métallique) devra être correctement positionnée (bien tendue dans l'axe du monocouche). La présence de l'armature est à notre avis indispensable pour résister aux contraintes de traction qui prennent naissance dans le monocouche (cf. tableau 8 [C 7 142]).

Les précautions à prendre lors de la mise en œuvre sont les suivantes :

- éviter l'excès d'eau lors du gâchage. En effet, cela entraînerait une chute sensible des résistances mécaniques (traction et compression) du monocouche ;
- l'excès d'eau favorise l'apparition des efflorescences blanchâtres, très inesthétiques sur un monocouche pigmenté ;
- l'excès d'eau augmente la porosité finale, par accroissement du réseau capillaire induit par l'évaporation de l'eau en excès. Cette porosité peut « favoriser » le vieillissement prématuré de la toile d'armature en fibres de verre (perte de résistance en traction en milieu humide et alcalin).

4.1.2 Salissures

Ce qui a été décrit dans le dossier [C 7 132] (§ 9.2.2) est entièrement valable pour le monocouche de ce système ITE.

Les salissures s'accrochent d'autant moins que le monocouche :

- présente une finition « grattée », plutôt que structurée ;
- est très faiblement poreux : l'essai du verre d'eau renseigne suffisamment sur cet état.

Dans un environnement très boisé, prévoir périodiquement un traitement fongicide et anticryptogamique du monocouche.

Une **hydrofugation superficielle** prolonge l'effet fongicide et anticryptogamique.

4.1.3 Décollement de l'enduit

Le choc thermique à l'interface enduit hydraulique/béton est très fortement réduit : de 31 °C, il chute à 7,61 °C.

La conséquence est que l'ensemble de la structure (y compris les enduits existants) est beaucoup moins sollicité, aussi bien en traction qu'en compression ; le corollaire est que les nouvelles contraintes engendrées sont largement inférieures aux contraintes de rupture des différents matériaux.

Après la mise en œuvre d'un **système ITE**, le **risque de décollement de l'enduit hydraulique** de 0,5 cm de son support béton est **pratiquement nul**.

En ce qui concerne le monocouche, enduit de finition du système ITE, il faut veiller à ce que la toile d'armature, bien marouflée à mi-épaisseur du monocouche, ait une contrainte initiale de rupture élevée ($\sigma'_{rt} > 25 \text{ kg/cm}^2$), pour pouvoir s'opposer efficacement, après vieillissement normal inhérent à l'alcalinité du ciment, aux mouvements potentiels (allongement et contrainte de traction) générés par les chocs thermiques successifs.

Il faut dire que cette résistance fait l'objet des contrôles prévus dans le protocole des essais effectués par le CSTB lors de l'instruction de l'avis technique du système d'ITE.

Nota : Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

4.1.4 Éclatement du béton sous la poussée de la rouille

Après traitement des zones où la rouille a produit ses effets, la mise en œuvre du **système ITE par enduit épais va supprimer toutes les conditions nécessaires à la réaction chimique de l'oxydation des fers à béton**, à savoir :

- réduction du choc thermique, dans un rapport de 4 à 1, qui agit, dans le même rapport, pour le travail longitudinal des armatures ;
- plus de contact de l'eau liquide, de l'oxygène et du dioxyde de carbone dissous nécessaires à la réaction d'oxydation et pas de diminution du pH du béton qui a reconstitué les zones éclatées (cf. § 9.2.4 dossier [C 7 132]).

4.1.5 Moisissures sur la face intérieure des parois

Le diagramme de la figure 7 de [C 7 142] montre que le plâtre « 1 » et le voile de béton sont constamment à des températures supérieures à la température du point de rosée.

Ils ne peuvent donc être le siège ni de condensations superficielles, ni de condensations internes.

Ainsi, l'humidité qui était nécessaire au développement des champignons noirâtres est supprimée.

Le processus d'apparition de nouvelles moisissures est arrêté.

Avant de remplacer les revêtements intérieurs (peintures, papiers peints, etc.), il faudra bien sûr éliminer par tous les moyens les moisissures existantes ainsi que leurs souches par application de produits fongicides et anticryptogamiques. Cela nécessitera, souvent, l'élimination complète du plâtre noirci. Il est fortement recommandé d'appliquer un fongicide sur l'ensemble des zones moisies (pour tuer les souches), surtout si les nouveaux revêtements intérieurs sont appliqués moins de 6 mois après les travaux d'ITE.

En résumé, la mise en œuvre d'une isolation thermique par l'extérieur a supprimé, à l'intérieur, l'effet « paroi froide », qui était la cause de la pathologie.

Le corollaire est le gain d'une forte inertie thermique qui a pour conséquences :

- en hiver : le voile de béton joue le rôle d'accumulateur de chaleur (d'où une économie d'énergie) ;

– en été : la barrière thermique, PSE, freine le passage des calories et maintient le voile de béton à une température inférieure à la température extérieure. C'est ce que l'on nomme : le « confort d'été ».

Dans le cas où il y a une climatisation, celle-ci sera moins énergivore.

Dans les deux cas, l'ITE participe à l'effort de protection environnementale en générant moins de CO₂ (gaz à effet de serre).

L'isolation thermique par l'extérieur supprime les moisissures, son inertie thermique conduit à un meilleur confort, tout en agissant sur la protection environnementale.

4.2 Enduit mince sur polystyrène expansé

4.2.1 Fissuration

Le choc thermique, à l'interface enduit hydraulique/béton est fortement réduit ($\Delta T_{s.e.h./b.}$ passe de 31,9 à 7,63 °C). Pour les commentaires relatifs à ce plan, nous pouvons reprendre ceux du § 4.1.1.

En ce qui concerne le choc thermique au niveau du sous-enduit armé et de la finition organique (RPE) du système ITE, celui-ci a comparativement augmenté par rapport à celui du mur simple, passant ainsi de 31,9 °C à $\Delta T_{s.finiton/PSE} = 38,70$ °C.

Toute la pérennité du système est fondée :

– en premier lieu, sur la résistance à la non-fissuration du sous-enduit armé et de la finition. Autrement dit, l'armature constituée de fibres de verre tissées doit résister aux efforts de traction.

Compte tenu des hypothèses climatiques retenues et des valeurs du module d'élasticité dynamique E du sous-enduit, les contraintes de traction varieront entre 15,5 et 17,5 kg/cm², ce qui correspond à un « travail potentiel total », pour la toile d'armature, compris entre 31,0 et 35,0 kg/cm.

La toile de fibre de verre, malgré sa protection contre l'alcalinité du ciment, subit un vieillissement en milieu basique, qui peut faire chuter sa résistance initiale de plus de 50 %.

Il est donc très important de mettre en œuvre des toiles d'armatures présentant une résistance en traction initiale élevée (cf. § 4.2.3).

– en second lieu, il est fondamental que le sous-enduit, en plus d'une bonne résistance en traction, ait une faible reprise d'humidité, de façon que la toile de fibre de verre soit le moins possible en milieu humide et alcalin de manière à ralentir son vieillissement.

L'application de la couche d'imprégnation (souvent nommée « régulateur de fond »), qui est appliquée avant le RPE (même et surtout si du ciment blanc entre dans la préparation du sous-enduit), diminue la reprise potentielle d'humidité du sous-enduit.

Pour que ces deux points soient respectés, il faut et il suffit que la toile de fibre de verre ait :

- d'une part, une contrainte de traction initiale élevée, et ;
- d'autre part, une contrainte de traction après vieillissement supérieure ou égale à 35 kg/cm². Ces résultats font l'objet d'un PV dans le dossier de l'avis technique du système.

Important

N'oublions pas que dans le temps et l'espace, les conditions climatiques peuvent être plus sévères que celles retenues dans l'étude.

4.2.2 Salissures

La finition du système ITE, par enduit mince, doit suivre la règle générale de la **planéité**.

Choisir de préférence un RPE taloché, à la rigueur un ribbé, mais proscrire les finitions roulées.

Ces dernières présentent des reliefs qui sont autant « de nids à poussières » favorables à la rétention d'eau, créant ainsi « un bouillon de culture » nourricier des micro-organismes (mousses, lichens, champignons, etc.).

Lorsque la végétation environnante est importante, il faut prévoir périodiquement un lavage du RPE avec une solution aqueuse d'eau de javel, suivi si possible d'une application d'un produit fongicide et algicide.

Ce traitement relève de l'entretien normal, qui reste à la charge du maître d'ouvrage après la réception des travaux (cf. DTU 42.1, annexe D : conditions d'usage et d'entretien).

4.2.3 Décollement de l'enduit

En ce qui concerne l'enduit hydraulique de 5 mm, nous pouvons reprendre les mêmes commentaires qu'au § 4.1.3.

De même, le choc thermique à l'interface sous-enduit/PSE est augmenté, ΔT_s passe de 31,9 à 38,9 °C. Les efforts de traction qui en résultent, seront repris essentiellement par la toile d'armature. Il faut donc satisfaire les deux points suivants :

– **choix de la toile.** Exiger une toile d'armature qui présente une bonne résistance initiale en traction (50 kg/cm ou plus) et une résistance en traction (après vieillissement conventionnel à 90 jours dans une solution aqueuse alcaline) qui soit égale ou supérieure à 35 kg/cm ;

– **mise en œuvre de la toile.** Veiller à ce qu'elle soit, d'une part, bien enrobée dans une épaisseur suffisante de sous-enduit (de l'ordre de 3 mm) et, d'autre part, bien tendue lors de son marouflage dans la première passe de sous-enduit (ne pas piéger de bulle d'air). Cela implique le ponçage systématique des joints des plaques de PSE.

Le respect de ces deux exigences sera le gage de la pérennité du système d'ITE, au-delà de la garantie décennale.

Il est évident que pour parfaire cette pérennité, il faut choisir sur les façades sud à ouest (exposées au rayonnement direct du soleil) des tons pastel dont le coefficient α d'absorption du rayonnement solaire reste inférieur à 0,7 (pour le blanc $\alpha = 0,15$, alors que pour le noir $\alpha = 1,0$).

Quand on passe du blanc au noir, les sollicitations mécaniques croissent dans le rapport de 1 à 1,7.

4.2.4 Éclatement du béton sous la poussée de la rouille

Après traitement des zones où la rouille a produit ses effets, la mise en œuvre du système ITE par enduit mince, va supprimer toutes les causes qui permettaient l'oxydation des fers à béton (cf. § 4.1.4).

4.2.5 Moisissures sur la face intérieure des parois

Là encore, les commentaires et les conclusions du § 4.1.5 peuvent être repris dans leur ensemble aussi bien en hiver (pour les économies d'énergie) qu'en été (pour le confort).

Ainsi, on peut affirmer que l'isolation thermique par l'extérieur supprime les moisissures, son inertie thermique conduit à des économies d'énergie en hiver, à un meilleur confort en été, tout en améliorant la protection environnementale.