

L'ETANCHEITE DES TABLIERS DE PONTS : L'IMPREGNATION DU BETON, UN MOYEN POUR LUTTER CONTRE LE CLOQUAGE

**JEAN WIERTZ
LICENCIE EN SCIENCES CHIMIQUES
HABIB DANGO
INGENIEUR INDUSTRIEL EN CONSTRUCTION
Service public de Wallonie
Département des Expertises techniques
Direction des Structures en Béton**

Résumé

Les cloques sont des soulèvements hémisphériques ou allongés de la couche d'étanchéité.

Le cloquage est dû à une augmentation de pression de l'air et/ou de la vapeur d'eau à l'interface entre le support et la couche d'étanchéité. L'importance relative des 2 facteurs dépend de la température de l'interface.

Une des mesures préconisées pour réduire le risque de cloquage lors de la pose de la couche de protection est l'application préalable d'une imprégnation pare-vapeur à la surface du béton.

En Belgique, différents types d'imprégnation pare-vapeur sont proposés par les fabricants : résine époxy bicomposante, résine époxy en dispersion aqueuse, résine époxy solvantée, résine polyuréthane monocomposante, ...

Les spécifications techniques sur ces produits portent sur les éléments suivants :

- perméabilité à la vapeur d'eau.
- susceptibilité thermique;
- compatibilité avec la couche d'étanchéité;
- résistance aux chocs thermiques;

Samenvatting

De afdichting van brugdekken : betonimpregnatie, als middel om blaasvorming te voorkomen.

Blazen zijn halve-bolvormige of lijnvormige opheffingen van de waterdichtingslaag. Blazen worden veroorzaakt door een drukverhoging van lucht en/of waterdamp op het tussenvlak drager/waterdichtingslaag.

De relatieve belangrijkheid van de twee factoren hangt af van de temperatuur van het tussenvlak. Eén van de aangeraadde maatregelen om blaasvorming te voorkomen tijdens het plaatsen van de beschermingslaag is het voorafgaand aanbrengen van een impregnatie als dampscherm.

In België worden verschillende impregnaties door de fabrikanten voorgesteld : twee componenten epoxy hars, epoxy hars in waterdispersie, met solventen verdunde epoxy hars, polyurethaan hars, ...

De project-eisen op deze producten slaan op volgende eigenschappen :

- waterdampdoorlaatbaarheid
- thermische susceptibiliteit
- verenigbaarheid met de waterdichtingslaag
- weerstand tegen thermische schokken

1 Historique

1.1 Description du chantier

Pendant l'année 2006, d'importants travaux de remplacement de la couche d'étanchéité et du revêtement routier ont été entrepris sur différents ponts de l'échangeur de Loncin.

Le complexe étanchéité - protection a été remplacé par une couche d'étanchéité à base de résines et une couche de protection à base d'asphalte coulé.

D'importantes cloques sont apparues, lors de la pose de la couche de protection et de la couche de liaison. Il s'agissait d'un cloquage dit de deuxième génération, aucun cloquage de la couche d'étanchéité n'étant apparu avant pose de la couche de protection.

Le décollement à l'origine du cloquage se produisait entre le support et la couche d'étanchéité.

Un élément important à signaler est que la mise en œuvre des couches de protection et de liaison avait lieu à des conditions atmosphériques très chaudes, la température ambiante dépassant les 30 °C.

1.2 Spécifications relatives à la teneur en eau du support

Afin de limiter les risques de cloquage et d'assurer une bonne adhérence de la couche d'étanchéité, des spécifications ont été émises, concernant la teneur maximale en eau du support.

Ces spécifications sont les suivantes dans le texte de l'agrément technique :

"Le support doit être sec; sa teneur en humidité ne peut dépasser 60 % de son taux de saturation en eau (ce qui, pour les bétons courants, représente moins de 4 % mesurés par étuvage)".

Le taux de saturation est défini comme suit :

$$\text{Taux de saturation (\%)} = 100 \times \frac{\text{Teneur en humidité}}{\text{Absorption d'eau}}$$

1.3 Constatations expérimentales

Des mesures de teneur en humidité ont été effectuées sur des dalles de béton et de mortier de correction de planéité appliqué en 20 mm d'épaisseur sur béton, maintenues horizontalement sur les trottoirs des tabliers de ponts à réparer.

Le béton était du type MC (0,4) selon la NBN EN 1766.

Le mortier de correction de planéité était un mortier répondant aux exigences de la classe R4 selon la NBN EN 1504-3.

Leur absorption d'eau, mesurée selon la NBN B15-215 était respectivement de 6,5 % et 9,0 %.

Bien que les échantillons de béton et de béton + mortier avaient plus de 28 jours d'âge, il est apparu que le taux de saturation dépassant la valeur maximale autorisée, même par temps très chaud; les résultats obtenus sont repris au tableau 1 ci-après.

Tableau 1 - Teneur en eau (en % du poids sec)

Ouvrage	Béton	Mortier de correction de planéité	Remarque
Pont 7	4,7 (68) ¹⁾ (4 + 16 jours) ²⁾	5,25 (61) ¹⁾ (16 jours) ²⁾	Temps très chaud
Pont 11	5,47 (86) ¹⁾ (15 jours) ²⁾	-	Temps variable
Pont L8	5,74 (92) ¹⁾ (7 + 26 jours) ²⁾	7,63 (82) ¹⁾ (26 jours) ²⁾	Temps variable
¹⁾ Le chiffre entre parenthèses désigne le taux de saturation. ²⁾ Durée d'exposition aux conditions naturelles.			

Ceci nous semble dû à la succession des cycles de condensation/évaporation se produisant en fin de nuit et début de journée : l'humidité absorbée par le béton en fin de nuit n'est pas totalement évacuée pendant la journée.

Un 2^{ème} élément d'importance à signaler est le suivant : des relevés de température ont montré que la température à l'interface entre la couche d'étanchéité et le béton peut atteindre 95 °C, lors de l'application d'une couche de protection en asphalte coulé de 240 °C, en 25 mm d'épaisseur, lorsque la couche d'étanchéité et son support ont subi un ensoleillement intense.

Enfin, un 3^{ème} élément à signaler est que, pour la couche d'étanchéité mise en œuvre, la couche d'accrochage utilisée était une résine thermoplastique en solution; des mesures d'adhérence réalisées en laboratoire à 95 °C ont montré que l'adhérence chutait à 0,084 N/mm², alors que les résultats des mesures réalisées à ± 20 °C, aussi bien en laboratoire qu'in situ étaient supérieurs à 2 N/mm².

2 Mécanisme du cloquage

Ces différentes constatations nous ont amené à proposer les mécanismes du cloquage (ne sont pas considérés ici, les mécanismes liés au phénomène d'osmose).

Pour qu'une cloque se forme entre le support et la couche d'étanchéité, une pression doit se développer à l'interface.

On peut distinguer 2 mécanismes :

- augmentation de pression de l'air occlus suite à une augmentation de température;
- augmentation de la pression de vapeur saturante de l'eau contenue dans le béton, suite à une augmentation de température.

Nous allons expliciter ces 2 mécanismes, en posant les hypothèses simplificatrices suivantes : les phénomènes décrits se produisent dans un volume confiné, constitué de béton, d'eau libre ou adsorbée, et d'air occlus situé à l'interface ou dans les pores du béton. La température de ce volume est considérée comme homogène.

2.1 Mécanisme 1

Augmentation de pression de l'air occlus suite à une augmentation de température.

La relation entre le volume, la pression, la quantité de gaz et la température est décrite par la loi de Boyle-Gay-Lussac.

$$PV = nRT$$

Dans cette formule :

P = pression de l'air occlus.

V = volume de l'air occlus.

n = nombre de moles.

R = constante des gaz parfaits.

T = température de l'air occlus. La température est exprimée en degré Kelvin (20 °C correspondant à 293 °K).

En volume confiné, la pression p_2 atteinte par l'air occlus, lorsque la température atteint T_2 est donnée par la relation :

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1}$$

dans laquelle T_1 et p_1 sont les températures et pressions initiales.

2.2 Mécanisme 2

Augmentation de la pression de vapeur saturante de l'eau contenue dans le béton, suite à une augmentation de température.

Les mesures de teneur en eau du béton ont montré que la teneur en eau d'un béton, soumis aux influences climatiques extérieures, varie de 4 à 6 %, même par temps réputé sec et chaud. Il s'agit d'eau absorbée (retenue mécaniquement dans les pores du béton) et d'eau adsorbée (résultant de la mise en équilibre hygrothermique du ciment avec les conditions ambiantes. A 75 % d'humidité relative de l'air, la teneur est de $\pm 1,5$ % en poids).

L'eau ainsi contenue dans le béton, en milieu confiné, se met en équilibre avec la vapeur d'eau; la pression de vapeur d'eau en équilibre avec l'eau liquide est appelée "pression de vapeur saturante", et dépend de la température.

En général, on utilise des tables donnant la correspondance entre la température et la pression de vapeur saturante; ces tables sont basées sur les relations de Goff et Gratch.

Il convient de signaler ici que, dans les conditions habituelles, le béton contient suffisamment d'eau pour que cette pression de vapeur saturante se développe; elle est donc indépendante de la valeur absolue de la teneur en eau du béton.

2.3 Importance relative des 2 mécanismes

Les mécanismes 1 et 2 sont mis en jeu lors d'une augmentation de température à l'interface support/couche d'étanchéité.

L'importance relative des mécanismes 1 et 2 dépend des températures atteintes à l'interface.

Envisageons 2 cas typiques, que l'on peut rencontrer en pratique :

- Température à l'interface de 50 °C

Il s'agit d'une température que l'on peut rencontrer en dessous d'une feuille bitumineuse, exposée au soleil.

Si on admet que l'air occlus était à la température initiale de 20 °C et à la pression atmosphérique (soit 0,1013 N/mm²), la pression de l'air en volume confiné atteint 0,1117 N/mm², soit une augmentation de pression de 0,0104 N/mm².

La pression de vapeur saturante passe de 0,0023 N/mm² à 0,0123 N/mm², soit une augmentation de 0,0100 N/mm².

Selon la loi de Dalton (la pression totale d'un mélange de gaz est égale à la somme des pressions partielles de ses constituants), l'augmentation totale de pression à l'interface est de 0,021 N/mm². Les contributions à cette augmentation de pression sont sensiblement les mêmes pour l'air occlus et l'humidité dans le béton.

Une telle augmentation de pression n'est pas à même de provoquer le décollement d'une feuille adhérente (son adhérence à 20 °C, mesurée par un essai d'adhérence-traction, est de 0,4 N/mm²).

Par contre, elle peut provoquer une déformation de la feuille non adhérente.

Il apparaît donc en première approximation que le cloquage de 1^{ère} génération se produit essentiellement aux zones de non-adhérence.

- Température à l'interface de 95 °C

Il s'agit d'une température que l'on peut rencontrer à 5 mm en dessous de l'étanchéité, lorsqu'on applique une couche de protection en asphalte coulé sur une couche d'étanchéité par temps très chaud.

A cette température, la pression de l'air en volume confiné atteint 0,1272 N/mm², soit une augmentation de 0,0259 N/mm².

La pression de vapeur saturante de l'eau passe à 0,0845 N/mm², soit une augmentation de 0,0822 N/mm².

L'augmentation totale de pression vaut 0,108 N/mm². La contribution la plus importante de cette augmentation de pression est due à l'eau dans le béton.

Une telle augmentation de pression est à même de provoquer le décollement (le cloquage) d'une feuille adhérente, et même de certaines couches d'étanchéité à base de résines, puisque la sollicitation s'exerce à température élevée (95 °C).

Il apparaît donc que le cloquage de 2^{ème} génération peut affecter les chapes adhérentes, et ne se limite pas aux zones de non-adhérence.

3 Mesures prévues dans le projet de RW 99 (2009) pour limiter le risque de cloquage

Afin de limiter les risques de cloquage de 2^{ème} génération, la nouvelle version du RW 99 prévoit un paragraphe "Précautions contre le cloquage", stipulant ce qui suit :
"Cloquage entre la couche d'étanchéité et le support, pendant ou peu après la pose de la protection, pour des températures prévisionnelles supérieures à 25 °C à 11 h.

- Utilisation préalable d'une imprégnation pare-vapeur à la surface du béton, lorsque la couche d'étanchéité est à base de feuille bitumineuse armée.
- Utilisation d'une couche d'accrochage en résine thermodurcissable, lorsque la couche d'étanchéité est à base de résine.
- Application de la couche de protection en fin de nuit, la température du support et de la couche d'étanchéité ayant chuté pendant la nuit.
- Utilisation de couche de protection pouvant être mise en œuvre à basse température".

4 Imprégnation pare-vapeur

4.1 Exigences en Allemagne et Luxembourg

Les réglementations allemandes et luxembourgeoises prévoient l'application d'une imprégnation époxydique sur le béton, avant la mise en œuvre de la couche d'étanchéité.

Une imprégnation monocouche est prévue lorsque le béton a plus de 21 jours d'âge; pour les bétons de plus de 14 jours d'âge, une imprégnation bi-couche est prévue.

L'imprégnation bi-couche est en pratique la plus utilisée, même pour des bétons de 28 jours d'âge.

L'imprégnation doit être à base de résine époxy sans solvants, à haut pouvoir de pénétration (viscosité inférieure à 4000 mPa.s) et résistante aux températures rencontrées lors de la mise en œuvre de la couche d'étanchéité.

La mise en œuvre en monocouche est décrite comme suit :

- application de la résine époxy au taux de 300 à 500 g/m²;
- égalisation à la raclette en caoutchouc et élimination des excès locaux au rouleau;
- saupoudrage au taux de 500 à 800 g/m² de sable siliceux (granulométrie de 0,2 mm à 0,7 mm);
- élimination des grains non adhérents après durcissement.

4.2 Perméabilité à la vapeur d'eau

La caractéristique principale de l'imprégnation pare-vapeur est donnée par sa capacité à freiner la diffusion de la vapeur d'eau du support béton ou mortier vers l'interface avec la couche d'étanchéité.

4.2.1 Description de la mesure

Celle-ci a été mesurée à température ambiante sur diverses imprégnations pare-vapeur qui nous ont été proposées par les fabricants.

La perméabilité à la vapeur d'eau est mesurée comme décrit dans la norme EN ISO 7783-2.

Le principe de l'essai est de mesurer le taux de transmission de vapeur d'eau à travers une éprouvette de surface connue, dans des conditions constantes d'humidité relative sur chaque face de l'éprouvette.

Ce taux est exprimé en g/m² 24h.

Les conditions de mesure retenues sont les suivantes :

- L'éprouvette est constituée de l'imprégnation pare-vapeur appliqué au taux nominal prévu par le fabricant sur support béton du type MC (0,4) conforme à la NBN EN 1766.
L'épaisseur du support béton est de (15 ± 3) mm.
- Les conditions d'humidité relative sont : 93 % du côté de la face revêtue et (50 ± 5) % du côté de la face non revêtue.
- La température d'essai est de (23 ± 2) °C.

Le taux de transmission de vapeur d'eau est converti en épaisseur de couche d'air équivalente en régime de diffusion s_d , qui est l'épaisseur en m de la couche statique d'air qui possède, dans les mêmes conditions, le même taux de transmission de la vapeur d'eau que l'imprégnation pare-vapeur.

En divisant s_d par l'épaisseur "e" de l'éprouvette, on obtient le facteur μ : facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau du produit. Ce facteur est le rapport entre la résistance à la diffusion de la vapeur du produit et celle d'une couche d'air de même épaisseur. Le facteur μ est une grandeur sans dimensions, caractéristique du produit, indépendante des conditions de mesure.

Les valeurs obtenues des s_d sont les résultantes de 2 contributions : celle du support béton et celle de l'imprégnation pare-vapeur, selon la relation :

$$s_d = s_{db} + s_{di} \quad (1)$$

dans laquelle s vaut l'épaisseur de couche d'air présentant une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau équivalente :

- à l'éprouvette (s_d);
- au support béton (s_{db});
- à l'imprégnation (s_{di}).

La relation (1) peut aussi s'écrire :

$$\mu_d e = \mu_b e + \mu_i e_i$$

dans laquelle :

e = épaisseur de l'éprouvette;

e_i = épaisseur de la couche d'imprégnation;

μ_d = facteur apparent de résistance à la diffusion du système "béton + imprégnation";

μ_b = facteur de résistance à la diffusion du béton;

μ_i = facteur de résistance à la diffusion de l'imprégnation hydrophobe.

L'effet "barrière" de l'imprégnation pare-vapeur est évalué par la grandeur :

$$s_{di} = \mu_i e_i = \mu_d e - \mu_b e$$

La valeur de μ_b est déterminée en effectuant l'essai sur support non imprégné.

Il est à remarquer que μ_i ne peut être évalué, étant donné que l'épaisseur e_i de l'imprégnation n'est pas connue.

L'imprégnation est en effet essentiellement un produit destiné à réduire la porosité de surface, en remplissant partiellement ou complètement les pores et capillaires du béton et forme en surface un film discontinu.

Les essais ont été réalisés sur différents types d'imprégnations : époxy, époxy en émulsion polyuréthane mono composant, époxy solvanté + époxy, acrylique réactif, acrylique solvanté.

A titre de comparaison, l'essai a également été réalisé sur des vernis bitumineux utilisés comme couche d'accrochage pour feuilles bitumineuses armées.

Afin d'évaluer l'influence du support sur l'effet "barrière", deux imprégnations ont été appliquées sur un mortier de réparation.

4.2.2 Résultats

Les résultats obtenus sont repris au tableau 2 ci-après.

Tableau 2 - Résultats des essais de perméabilité à la vapeur d'eau

Imprégnation pare-vapeur	Taux d'application humide (g/m ²)	Extrait sec (%)	Taux d'application sec (g/m ²)	Epaisseur de couche d'air présentant une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau équivalente à l'imprégnation (s _{di}) (m)
Polyuréthane monocomposant I	200	50	100	2,93
Polyuréthane monocomposant II	200	35	70	Négligeable
Epoxy I	200	98,5	197	5,30
Epoxy II	125 + 75	99,1	198	3,61
Epoxy solvanté + Epoxy III	200 + 200	-		15,64
Epoxy à l'eau I	250	28	70	10,36
Epoxy à l'eau II	200	33	66	11,10
Acrylique réactif	200	76,8	152	2,79
Acrylique monocomposant	200	19,7	39	1,97
Acrylique monocomposant ¹⁾	200	100	39	1,74
Acrylique monocomposant ¹⁾	200 + 200	19,7	79	2,74
Vernis bitumineux I	200	48	96	17,9
Vernis bitumineux II	200	41,4	83	21,5
¹⁾ Sur mortier de réparation				

Les valeurs de facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ mesurées sur les supports sont :

Béton : 189

Mortier de réparation : 130

4.2.3 Discussion des résultats

Les résultats obtenus permettent d'émettre les considérations suivantes :

- En tout premier lieu, la valeur du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ du béton support est supérieure à celle du mortier de réparation utilisé; ceci corrobore les constatations effectuées sur les ponts de Loncin : le cloquage se produisait préférentiellement sur les zones réparées.
Il n'y a néanmoins pas lieu de généraliser cette constatation; le béton support utilisé en laboratoire est un béton d'excellentes caractéristiques mécaniques (résistance en compression sur cube supérieure à 60 N/mm², résistance en traction supérieure à 3 N/mm²) confectionné avec un rapport E/C de 0,4. Le mortier de réparation testé, du type PCC, n'est qu'un mortier parmi des dizaines d'autres mortiers disponibles sur le marché, se différenciant par la courbe granulométrique, la teneur en ciment, le type et la teneur en polymères.
- Une classification provisoire des imprégnations pare-vapeur peut être établie, sur base de leur résistance à la diffusion de la vapeur d'eau :
 - Les meilleurs produits sont les 2 vernis bitumineux et un système bi-couche époxy, dont la première couche est un époxy solvanté.
 - Les 2 systèmes à base d'époxy en émulsion dans l'eau présentent d'excellentes performances, nettement plus élevées que celles de 2 systèmes époxy classiques. Ces résultats sont à priori surprenants, d'une part, parce que les émulsions sont habituellement réputées plus poreuses que les systèmes résineux ou en solution, d'autre part, parce que le taux d'application en matières sèches est inférieur à celui des systèmes purement résineux.
 - Les 2 systèmes à base d'acryliques et le système à base de polyuréthane monocomposant présentent des performances relativement faibles. Un second système à base de polyuréthane monocomposant n'a pas d'effet mesurable sur la diffusion de la vapeur d'eau.
- Les performances de l'imprégnation acrylique monocomposante ne sont que peu modifiées par le type de support. Les résultats obtenus sur support béton ou sur support "mortier de réparation" plus poreux sont comparables (1,97 et 1,74 m), à taux d'application identique. Appliqué en double couche sur support "mortier de réparation", il atteint les valeurs obtenues par l'acrylique réactif.

4.3 Susceptibilité thermique

Néanmoins, une bonne résistance à la diffusion de la vapeur d'eau est une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour limiter le cloquage. Ainsi l'utilisation de vernis bitumineux, bien que très performants en termes d'imperméabilité à la vapeur d'eau, ne permet pas de limiter le cloquage qu'à basse température.

La raison en est que les vernis bitumineux se ramollissent à haute température. La vapeur d'eau et l'air dans le béton développent une augmentation de la pression en dessous de la couche d'étanchéité, qui va de 0,02 N/mm² à 50 °C à 0,11 N/mm² à 95 °C. Ces pressions peuvent provoquer un décollement de la couche d'étanchéité vu la perte de cohésion du vernis suite à son ramollissement.

Il y a dès lors lieu d'utiliser des imprégnations qui ne fondent pas, où ne se ramollissent pas jusqu'à des températures de l'ordre de 90 - 95 °C.

Il convient donc d'utiliser plutôt des résines thermodurcissables, que des résines thermoplastiques. Les résines thermodurcissables (les résines époxy, polyuréthane, polyesters et acryliques non saturées appartiennent à cette famille) forment des réseaux polymériques tridimensionnels, ne présentant pas le phénomène de fusion à haute température, ce qui n'est pas le cas des résines thermoplastiques, constituées de macromolécules linéaires.

En toute rigueur, il fait signaler que les résines thermodurcissables subissent un changement d'état, à une température appelée "température de transition vitreuse", à laquelle on observe une chute du module d'élasticité. Cette chute du module E s'accompagne d'une diminution de la cohésion et des propriétés adhésives, mais elle n'est pas suffisante pour fragiliser l'adhérence aux pressions développées par l'air et l'eau contenu dans le béton. A titre d'information, la température de transition vitreuse des résines époxy polymérisées se situe aux environs de 40 à 60 °C, en fonction de la formulation.

5 Projet de spécifications

En l'absence actuelle d'un essai de laboratoire permettant d'évaluer de manière directe les performances d'une imprégnation pare-vapeur contre le cloquage de la couche d'étanchéité, nous proposons les spécifications suivantes :

- perméabilité à la vapeur d'eau : épaisseur de couche d'air équivalente $s_d > 3$ m. Essai selon NBN EN ISO 7783-2, l'imprégnation étant appliquée sur support de 15 mm d'épaisseur en béton MC 0,4 selon NBN EN 1766;
- composition : l'imprégnation pare-vapeur est en résine thermodurcissable.

- compatibilité avec la couche d'étanchéité et résistance aux chocs thermiques liés à la mise en œuvre de l'étanchéité et de la couche de protection.

La compatibilité est mesurée par un essai d'adhérence selon la NBN EN 13596, sur des éprouvettes constituées d'un support béton, la couche d'imprégnation pare-vapeur, la couche d'étanchéité et une couche de protection en asphalte coulé.

L'éprouvette est préparée comme décrit dans la NBN EN 13375, c'est-à-dire que :

- la couche d'étanchéité est mise en œuvre par soudage au chalumeau, conformément aux instructions du fabricant;
- la couche de protection est mise en œuvre par coulage en épaisseur de (40 ± 5) mm d'asphalte coulé à la température de (250 ± 10) °C.

Ainsi, lors de la fabrication de l'éprouvette, l'imprégnation pare-vapeur est soumise aux sollicitations thermiques accompagnant la mise en œuvre du complexe étanchéité/protection.

A 20 °C, l'adhérence de la couche d'étanchéité sur l'imprégnation pare-vapeur doit être $\geq 0,4$ N/mm².