

Comportement de la moquette en béton à hautes performances sous sollicitations thermiques et trafic accéléré

François de LARRARD,
Jean-Pierre KERZRÉHO

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

La moquette BHP (Béton à Hautes Performances) est un concept innovant de chaussée en matériaux hydrauliques, associant une fondation relativement épaisse, et généralement fissurée, à une couche de roulement en béton armé à hautes performances, mince et non adhérente à son support. On peut *a priori* craindre deux types de dégradation pour ce type de chaussée : le flambement de la couche de roulement par temps chaud et son endommagement par le trafic poids lourds. Afin de mieux évaluer ces risques, une planche d'essai de 10 m par 1,50 m a été construite. Ses déformations ont été suivies pendant un an, et elle a subi un million de cycles de chargement de type poids lourd (jumelage de 6,5 t) grâce à une machine de fatigue linéaire dite « machine Fabac ».

Un calcul théorique, en partie validé par les mesures de déformations *in situ*, laisse présager d'une compression maximale de 3,4 MPa, valeur très insuffisante pour provoquer une instabilité élastique, compte tenu des rayons de courbure typiques des chaussées neuves. Par ailleurs, les dégradations constatées lors du chargement de fatigue se sont limitées à trois fissures transversales, fines et non évolutives. À ce stade, on peut donc conclure que le concept est prometteur, et qu'il serait à présent utile de poursuivre son développement par une expérimentation à l'échelle d'un chantier réel.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

BEHAVIOR OF HIGH-PERFORMANCE CONCRETE COVERING SUBMITTED TO THERMAL LOADS AND ACCELERATED TRAFFIC CONDITIONS

"High-performance concrete carpet" is an innovative concept in the area of hydraulic pavement materials and consists of associating a relatively thick and usually cracked base layer with a thin, reinforced high-performance concrete wearing course that does not bond to its support. This pavement may be assumed vulnerable to two types of deterioration: buckling of the wearing course during hot weather periods, and damage due to truck traffic. In order to better evaluate these risks, a 10 m x 1.50 m test section was built at the LCPC Research Center in Nantes. Section deformations were monitored during an entire year and a million truck-type loading cycles (with a 6.5-ton twinning) were imposed using the so-called "Fabac Machine" linear fatigue device.

A theoretical computation, partially validated by in situ deformation measurements, would suggest a maximum compression of 3.4 MPa, which represents a value largely insufficient to cause elastic instability given the typical radius of curvature for new pavements. Furthermore, the deterioration observed during fatigue loading was limited to three transverse, narrow and non-propagating cracks. At this stage of the work program, it can thus be concluded that the concept seems promising and that pursuing its development by means of a full-scale jobsite experiment would constitute the next worthwhile step.

FIELD: Roads.

Introduction

La moquette BHP (pour « Béton à Hautes Performances ») est une couche de roulement mince, armée et non adhérente avec son support, proposée pour entrer dans la conception de nouvelles structures de chaussées à base de matériaux hydrauliques [1]. Cette technique innovante permettrait, en théorie, de concilier les avantages du béton armé continu (BAC) en matière d'aspect et d'uni avec ceux des chaussées semi-rigides (eu égard notamment à la gestion de la ressource en granulats, le besoin en granulats nobles étant limité à la couche de roulement). La faible taille du granulat devrait également améliorer le comportement acoustique, par rapport aux chaussées en béton classique désactivé. Enfin, la diminution de la quantité de ciment consommée par unité de surface, par rapport aux structures classiques de chaussée en BAC sur fondation hydraulique, laisse espérer une compé-

titivité économique de la combinaison moquette BHP/couche d'assise hydraulique, dans le marché actuel des chaussées soumises à des trafics moyens ou forts.

Certains aspects techniques devaient cependant faire l'objet d'une étude en laboratoire, avant de procéder à toute expérimentation sur chaussée circulée. Tout d'abord, la réalisation d'une couche à la fois mince, rigide et non adhérente soulève la question du comportement de cette couche en cas d'élévation de la température (mise en compression et risque de flambement associé). Ensuite, alors que les chaussées en béton classiques sont conçues pour ne pas se rompre sous l'effet de la fatigue – les seules fissures acceptées étant celles provoquées par le retrait du béton – la moquette pourrait au contraire se fissurer en flexion après quelques passages de poids lourds, du fait de sa minceur. On parie alors sur la capacité de l'armature métallique (un treillis soudé) à maintenir attachés les fragments de béton, le composite acier-béton se comportant alors comme une sorte de « cote de mailles », sans rôle structurel important, mais apte à protéger durablement les couches d'assises, y compris lorsque ces dernières sont fissurées. La seconde question est alors celle de l'intégrité de la couche de surface soumise à la circulation de poids lourds. Ces deux problèmes (risques de dégradations par flambement ou par l'effet de la circulation) sont présentés et discutés à la lumière des enseignements acquis lors de la construction au LCPC d'une planche d'essai de 10 m de longueur, sur laquelle une expérience de fatigue a été réalisée.

Réalisation d'une planche d'essai au LCPC Centre de Nantes

Lors de l'opération de recherches « Matériaux hydrauliques dans la route » [2], il a été décidé de construire une maquette de moquette BHP, afin d'étudier successivement :

- la mise en œuvre du BHP,
- l'aspect de surface du BHP dénudé,
- le comportement à la fissuration par retrait empêché,
- l'étanchéité à l'eau d'une telle couche,
- et, enfin, son comportement sous trafic, à l'aide d'un des deux simulateurs Fabac (machines de fatigue linéaire issues du projet national Fabac [3]).

Le béton de la moquette BHP

Dans la publication d'origine [1], il avait été montré que le béton de la moquette devait répondre à un cahier des charges assez inhabituel (tableau I). On prescrivait notamment de fortes valeurs de retrait de façon à garantir une fissuration relativement rapide de la moquette, et le maintien d'un certain état de traction afin d'empêcher la mise en compression par temps chaud, avec les risques d'instabilité élastique que cela pouvait entraîner. La résistance en compression du béton, en tant qu'indicateur général de qualité du matériau, devait quant à elle garantir à la fois la tenue de surface et la conservation des armatures qui, du fait de la minceur de la couche, ne sont éloignées de la surface que de 2 à 3 cm.

À l'aide du logiciel BétonlabPro [4], et en utilisant des matériaux disponibles localement, le béton dont les caractéristiques figurent dans le tableau II a été formulé et mis au point en laboratoire. La teneur en gravillon a été fixée forfaitairement à 60 % de la masse totale de granulats, pour assurer une texture suffisamment grenue. La rhéologie obtenue laissait augurer une mise en œuvre facile.

TABLEAU I
Cahier des charges du béton de la moquette BHP [1]

Propriété	Valeur
Taille maximale du granulats	de l'ordre de 6 mm
Affaissement au cône d'Abrams	entre 10 et 20 cm
Indice de serrage	inférieur ou égal à 7,5
Résistance en compression à 28 jours	supérieure ou égale à 80 MPa
Retrait endogène	supérieur ou égal à $200 \cdot 10^{-6}$
Retrait total à 50 % d'humidité	supérieur ou égal à $600 \cdot 10^{-6}$

TABLEAU II
Composition et propriétés du béton mis en œuvre dans la planche d'essai

	Étude	Planche d'essai
Gravillon Pontreaux 2,5/6,3 (kg/m ³)		912
Sable Estuaire 0/4 (kg/m ³)		608
Ciment CEM I PM ES du Havre (kg/m ³)		408
Filler Piketty (kg/m ³)		139
Fumée de silice d'Anglefort densifiée mécanique (kg/m ³)		39
Superplastifiant Glenium 27 (kg/m ³)		5,615
Eau d'ajout sur granulats secs (l/m ³)	190	(210)*
Affaissement au cône (cm)	16	22
Seuil de cisaillement (Pa)	670	n.d.
Viscosité plastique (Pa.s)	120	n.d.
Temps de fin de prise Vicat (sur le mortier du béton)	9 h 14 min	n.d.
Résistance en compression à 7 jours (MPa)	59,9	n.d.
Résistance en compression à 28 jours (MPa)	78,1	68,7

* Valeur probable compte tenu de l'affaissement et de la résistance mesurés.

Le seuil de cisaillement mesuré τ_0 permet en principe de couler, avec un béton de masse volumique ρ , une dalle d'épaisseur h et d'une pente maximale θ , avec :

$$\tau_0 = \rho g h \sin \theta$$

Pour $\rho = 2\,300 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ et $h = 0,06 \text{ m}$, on trouve $\theta = 29^\circ$. Ce calcul ne tient pas compte de la vibration appliquée au béton, qui réduit fortement le seuil de cisaillement. Le rôle stabilisant des armatures est également négligé. À ce stade de mise au point du matériau, on peut cependant être rassuré sur la capacité de ce type de béton à « tenir la pente », pour les profils en long usuels.

Le temps de fin de prise Vicat a été mesuré sur le mortier du béton, et trouvé égal à 9 h 14, valeur sensiblement plus élevée que celle rencontrée usuellement avec les bétons de chaussée. Cela est dû bien sûr à l'effet secondaire retardateur du superplastifiant. On sait que ce type de béton rattrape vite son retard en matière de résistance ; la mesure du temps de prise avait pour objectif de fournir des indications sur une procédure de dénudage chimique du béton. À cet effet, quatre dalles de $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}$ ont été fabriquées en laboratoire et ont subi l'application successive d'un retardateur de surface et d'un produit de cure. Un lavage à haute pression a ensuite été entrepris, le béton ayant un âge variant de 9 h 14 (temps de prise) à 24 heures et la température étant maintenue à 20°C . Les valeurs de hauteur au sable mesurées après lavage variaient de 1,35 à 1,80 mm, sans effet notable de l'âge du béton au moment du lavage (dans cette plage). On a donc conclu à ce stade que la procédure de dénudage chimique était bien adaptée à ce type de béton, et que, malgré le durcissement rapide généralement observé pour les BHP (une fois la prise commencée), le chantier disposerait d'un certain laps de temps pour laver la surface du béton et obtenir une texture satisfaisante, garantissant une adhérence adéquate lorsque la chaussée serait en service.

Conception et construction de la planche d'essai

Les différentes contraintes régissant la conception de cette planche d'essai étaient les suivantes :

- épaisseur et ferrailage correspondant au dimensionnement réel envisagé [1] ;
- volume de béton d'une taille semi-industrielle, le matériau devant être fabriqué à la station d'étude du malaxage du LCPC ;
- section courante représentative d'une chaussée réelle, pouvant faire l'objet d'une expérience de fatigue par une machine de fatigue linéaire issue du projet national Fabac. Ces machines assurent le

passage d'un essieu sur une bande d'une longueur d'environ deux mètres, et d'une largeur de 60 cm (trace d'un jumelage type, sans balayage transversal) ;

➤ fondation semi-rigide présentant une macrofissure de retrait dans la zone sollicitée. On sait en effet que les chaussées en matériaux traités aux liants hydrauliques se fissurent progressivement au bout de quelques années, sous l'effet de la combinaison du retrait thermique été-hiver et d'un éventuel retrait hydraulique. On est alors en présence d'une série de dalles plus ou moins engrenées, qui peuvent à la longue être sujettes à un certain battement au passage des poids lourds. Le joint « naturel » entre ces dalles constitue donc, *a priori*, un point sensible pour la pérennité de la couche de roulement. Les techniques hydrocarbonées n'ont d'ailleurs pas pu jusqu'à présent proposer de solutions pérennes à long terme pour ces points singuliers.

Les voies du site du LCPC Centre de Nantes sont pour la plupart des chaussées semi-rigides construites dans les années 70. Parmi celles-ci, une desserte désaffectée, ayant pendant quelques années subi une circulation, présentait justement une fissuration de retrait au pas d'environ 6 m, et constituait donc un bon site pour l'expérience envisagée. Afin de tendre vers un comportement représentatif d'une chaussée de grande longueur, il importait de bloquer autant que possible les déformations horizontales de la moquette. Compte tenu du gigantisme des fondations théoriquement nécessaires pour s'opposer au retrait du béton, il a été choisi de mettre en jeu l'adhérence naturelle entre ce matériau et les mélanges hydrocarbonés. La chaussée ancienne étant constituée d'une couche de 20 cm de grave-ciment, surmontée d'une couche de 5 cm de béton bitumineux, cette dernière a donc été fraisée sur deux longueurs de trois mètres (correspondant aux extrémités de la dalle – fig. 1), de façon à assurer un ancrage par adhérence de la couche de béton à hautes performances. Par contre, la partie centrale, d'une longueur de 4 m, a été recouverte d'un géotextile épais et d'une double feuille de polyane. On était bien alors en présence d'une couche glissante, selon la conception de base de cette nouvelle structure.



Les dimensions du corps d'épreuve sont indiquées sur la figure 2. L'épaisseur de la planche d'essai était en fait de 0,065 m dans les zones d'ancrage et de 0,055 m dans la zone centrale non adhérente. Le ferrailage était constitué d'un treillis soudé de maille 10 cm (fil de diamètre 7 mm), sur lequel des barres rectilignes HA 6 avaient été ajoutées dans le sens longitudinal, la distance entre les axes des armatures longitudinales se trouvant ainsi réduite à 5 cm (fig. 3a). Signalons qu'un dispositif de drainage avait été implanté, visant à recueillir les eaux infiltrées à travers la moquette, cela dans le but d'évaluer son niveau d'étanchéité. Le dévers transversal de la chaussée ancienne était d'environ 2 %.

Le béton, fabriqué sur le site du LCPC de Nantes, fut transporté à l'aide d'un chargeur (fig. 3b), mis en place par simple versement, taloché manuellement et fini à l'aide d'une règle vibrante (fig. 3c).

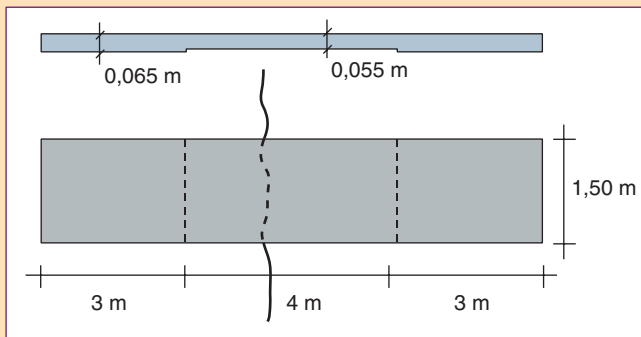


Fig. 2 - Plan de la planche d'essai. La partie centrale non adhérente chevauche une fissure de la chaussée ancienne. Les distances sont indiquées en mètres.

L'affaissement au cône était supérieur à celui obtenu en laboratoire (cf. tableau II). Compte tenu également de la résistance en compression obtenue (plus faible que lors de l'étude), on peut penser que l'eau a été quelque peu surdosée par rapport à la formulation initiale, par suite d'une difficulté de contrôle de la teneur en eau dans le sable. La mise en œuvre s'effectua sans aucune difficulté, malgré l'absence d'aiguille vibrante, superflue compte tenu de la faible épaisseur mise en œuvre (6 cm) et de l'efficacité de la règle vibrante. On n'a pas constaté le caractère « collant » parfois rapporté pour les bétons à hautes performances. Cette rhéologie favorable doit sans doute être mise en

Fig. 3 - Construction de la planche d'essai de moquette BHP.



a) Vue du coffrage et du ferrailage.



b) Coulage du béton.

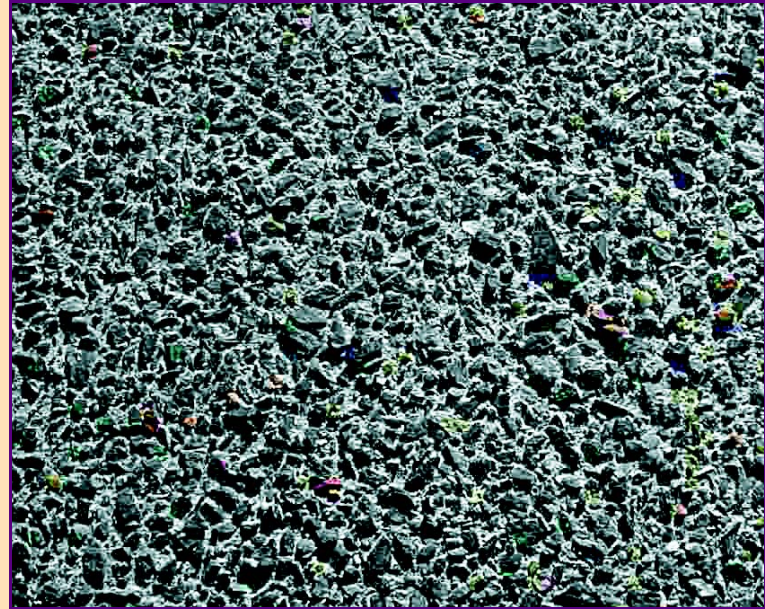


c) Finition à la règle vibrante.

relation avec la viscosité plastique modérée, qui avait été mesurée lors de l'étude, et qui devait être encore plus faible, compte tenu de la différence de dosage en eau.

La mise en œuvre a été immédiatement suivie de l'application du retardateur et du produit de cure, le lavage ayant été effectué en fin de journée. L'aspect du béton est conforme à celui obtenu sur les dalles d'études (fig. 4).

Fig. 4 - Aspect de surface obtenu.



Déplacements mesurés

Des mire optiques avaient été implantées aux quatre coins de la planche d'essai, ainsi que sur la chaussée ancienne, à une certaine distance des coins. En suivant la distance entre les mire à l'aide d'un télémètre laser (dans le sens longitudinal), on pouvait ainsi détecter un raccourcissement éventuel de la dalle, une déformation du support (sous l'effet des contraintes exercées par la dalle soumise à son retrait), ou encore un glissement entre la dalle et son support. Le résultat des mesures (sur une période de deux années) est représenté sur la figure 5.

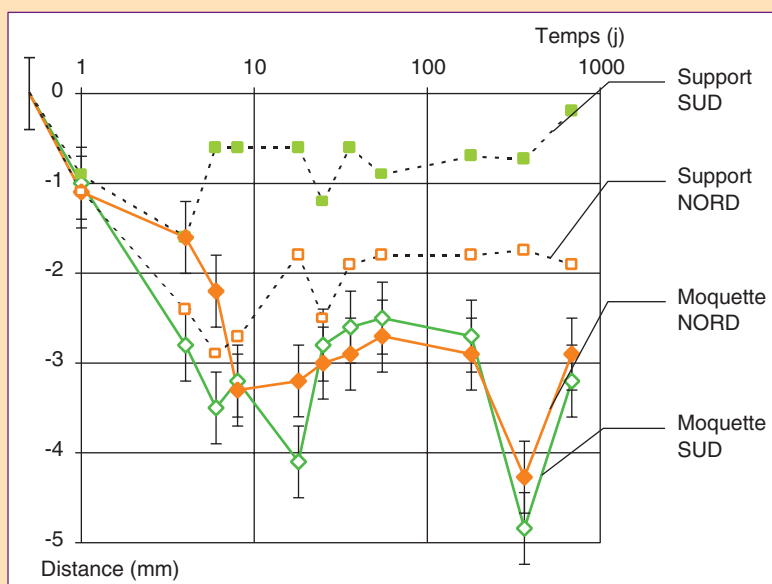


Fig. 5 - Déplacements mesurés sur la planche d'essai. Les points dits « Support » sont solidaires de la couche d'enrobé, et situés près des extrémités de la planche d'essai. Les points dits « Moquette » sont solidaires du béton.

On constate que le support et la dalle s'étaient déjà raccourcis d'environ 1 mm dans les premières vingt-quatre heures. On peut penser que ce déplacement correspond à une fermeture partielle de la fissure du corps de chaussée. Ensuite, la longueur du support instrumentée côté Sud est restée à peu près constante, alors qu'un raccourcissement supplémentaire d'environ 1 mm est apparu côté Nord, accompagné d'une sorte de déchirure de l'enrobé, à 45° par rapport à l'angle de la planche d'essai, provoqué par le retrait de la dalle.

La différence de déplacement entre les mirettes ancrées dans la dalle et dans le support avoisinant témoigne ensuite d'un glissement à l'interface enrobé-grave ciment, de l'ordre de 1 à 3 mm. Par ailleurs, le son rendu par la dalle soumise à des chocs localisés tend à montrer que le contact s'est maintenu entre le béton et l'enrobé, dans les deux zones d'ancrages (sauf aux coins, qui « sonnent le creux »). Entre l'avant-dernière et la dernière échéance de mesure, ont été effectués des essais de fatigue, pendant lesquels sont apparues trois fissures transversales. Le développement de ces fissures s'est accompagné d'un allongement de la dalle d'environ 1,5 mm. Avant les essais de fatigue, aucune fissuration n'était visible à la surface de la planche d'essai de moquette BHP.

Le suivi des déplacements a donc montré que l'on n'avait pas réussi à bloquer le retrait de la dalle, lequel avoisine $3 \text{ à } 4 \cdot 10^{-4}$ sur une durée d'environ un an. De ce fait, la dalle obtenue n'est pas tout à fait représentative d'une chaussée réelle. En particulier, l'absence de fissuration visible conduit certainement à une perméabilité beaucoup plus faible que celle d'une chaussée véritable. On ne relatara donc pas le résultat de ces essais de perméabilité à l'eau, au demeurant délicats à interpréter.

Intéressons-nous à présent aux aspects plus théoriques des déformations et des contraintes dues au retrait de la dalle, en relation avec les mesures précédemment présentées.

Étude des risques de flambement de la structure sous sollicitation thermique

Retrait libre du BHP

Le retrait des BHP est décrit par un modèle, développé dans le cadre des travaux d'un groupe de l'Afrem [5], à présent repris dans les règles BPEL (Béton Précontraint aux États-Limites). Selon ce modèle, on calcule séparément le retrait endogène (lié aux réactions chimiques à l'origine du durcissement du béton) et le retrait de séchage. Pour le retrait endogène, on a :

- pour $t < 28$ jours,
- si $fc(t)/fc_{28} < 0,1$, alors :

$$\varepsilon_{re}^{AFREM}(t, fc_{28}) = 0$$

- si $fc(t)/fc_{28} \geq 0,1$, alors :

$$\varepsilon_{re}^{AFREM}(t, fc_{28}) = (fc_{28} - 20) \left(2,2 \frac{fc(t)}{fc_{28}} - 0,2 \right) \cdot 10^{-6}$$

où ε_{re}^{AFREM} est le retrait endogène effectué entre la prise du béton et l'instant t (exprimé en jours), $fc(t)$ la résistance caractéristique au même instant, et fc_{28} la résistance à 28 jours.

- pour $t \geq 28$ jours,

$$\varepsilon_{re}^{AFREM}(t, fc_{28}) = (fc_{28} - 20) [2,8 - 1,1 \exp(-t/96)] \cdot 10^{-6}$$

Pour le retrait de dessiccation, le modèle proposé par l'Afrem pour les bétons aux fumées de silice est le suivant :

$$\varepsilon_{rd}^{AFREM}(t, t_0, fc_{28}, r_m, \rho_h) = \frac{K(fc_{28}) \cdot [72 \exp(-0,046fc_{28}) + 75 - \rho_h]}{1 + 2,8 \frac{r_m^2}{(t - t_0)}} \cdot 10^{-6}$$

où t est l'âge du béton à l'instant considéré, t_0 l'âge à partir duquel la dessiccation commence, r_m le rayon moyen de la pièce, ρ_h l'humidité du milieu environnant, et $K(fc_{28}) = 30 - 0,21 fc_{28}$ si

$f_{c28} \geq 57$ MPa (ce qui est le cas pour le présent béton). Le retrait total est la somme des deux déformations et d'un éventuel retrait thermique, lié à l'échauffement du béton en cours de prise.

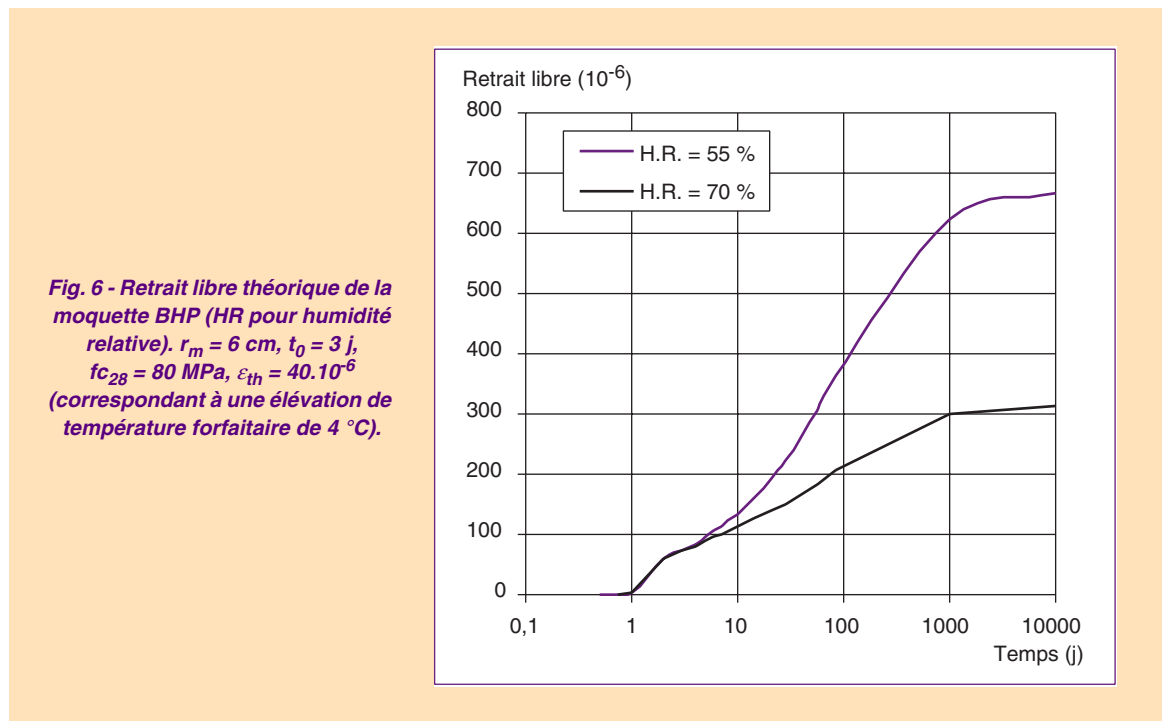
Le béton de la moquette BHP a, comme on l'a souligné, une composition spécifique, se traduisant notamment par une faible taille de granulat, et par la présence de filler calcaire. De plus, son retrait est maximisé par rapport à celui d'un BHP courant. De façon à ce que les prévisions du logiciel BétonlabPro* (pour lesquelles les valeurs ultimes de retrait endogène et de dessiccation sont respectivement de 111 et $750 \cdot 10^{-6}$) coïncident avec le modèle Afrem, on applique des coefficients correcteurs, et on en déduit une prévision du retrait total ε_{rt} du béton de la moquette BHP selon le modèle suivant :

$$\varepsilon_{rt}(t) = 0,66 \varepsilon_{re}^{AFREM}(t) + 1,81 \varepsilon_{rd}^{AFREM}(t) + \varepsilon_{th}(t)$$

Des essais spécifiques de retrait à plusieurs températures ont permis de s'assurer du caractère superposable du retrait thermique et des retraits d'origine hydriques [7].

La figure 6 indique l'allure du retrait prévu par ce modèle, pour les deux valeurs d'hygrométrie moyenne typiques du territoire national (soit, d'après le règlement, 55 % pour le quart Sud-Est, et 70 % pour le reste de la métropole, dont la région nantaise).

L'application du modèle au cas particulier de la planche d'essai construite au LCPC Centre de Nantes, dont le béton avait une résistance plus faible que la valeur théorique de 80 MPa, donne un retrait total prévisionnel à un an de $3,2 \cdot 10^{-4}$, valeur tout à fait cohérente avec les mesures relatives dans la section précédente, et qui confirme le caractère quasi-libre du retrait de la planche d'essai.



Contraintes dues au retrait empêché

Plaçons-nous à présent en section courante d'une chaussée réelle en moquette BHP. En partie courante, le retrait s'y trouve totalement empêché. À chaque incrément de temps $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, le béton est donc soumis à une augmentation de contrainte de traction $\Delta\sigma(t_i)$, qui crée une déformation élastique et un fluage. La déformation totale, somme du retrait et des deux déformations précédentes, reste nulle. On a donc :

$$0 = \varepsilon_{rt}(t_n) + \frac{\Delta\sigma(t_n)}{E(t_n)} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta\sigma(t_i)}{E(t_n)} [1 + K_{fl}(t_i, t_n)]$$

* On a vérifié, dans le cadre du programme MHyR, que le modèle de retrait de BétonlabPro donnait des prévisions acceptables pour des bétons de formulation proche [6].

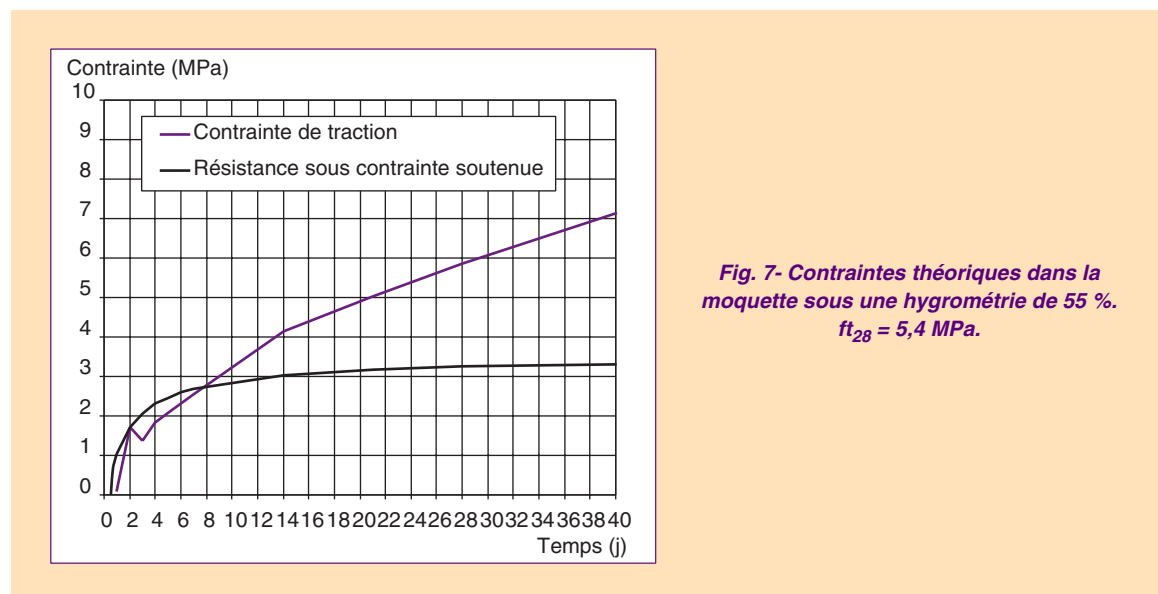
où $E(t_n)$ est le module élastique à l'instant t_n , et $K_{fl}(t_i, t_n)$ le coefficient de fluage entre les âges t_i et t_n . La suite des $\Delta\sigma(t_i)$ est donc calculée par récurrence, et la somme de la série donne l'évolution de la contrainte due à l'empêchement du retrait.

On prend pour les termes de fluage l'expression du fluage propre proposée dans le modèle Afrem [5] :

$$K_{fl}(t_i, t_n) = \frac{3,6}{f_c(t_i)^{0,37}} \cdot \frac{E(t_i)}{E_{i28}} \cdot \frac{\sqrt{t_n - t_i}}{\left[\sqrt{t_n - t_i} + 0,37 \exp\left(2,8 \frac{f_c(t_i)}{f_{c28}}\right) \right]}$$

où E_{i28} est le module élastique à 28 jours.

La figure 7 montre alors le développement de la contrainte prévu par le modèle, pour une hygrométrie de 55 %. On voit que cette contrainte atteint au bout d'un certain temps l'ordre de grandeur de la résistance en traction du matériau.



D'après la littérature [8, 9], lorsque l'on réalise des essais de retrait empêché en laboratoire, la valeur de la contrainte au moment de la rupture est sensiblement inférieure à la résistance à la traction instantanée du matériau. Tout se passe comme si le béton était sujet à une « fatigue statique », c'est-à-dire à un cumul de dommage issu de la période précédant la rupture, pendant laquelle le matériau est soumis à une traction croissante. Afin d'estimer le moment où survient la rupture, on a également tracé sur la figure 7 la courbe de résistance sous contrainte soutenue, prise forfaitairement à 60 % de la résistance en traction instantanée. Cette dernière est supposée proportionnelle à la résistance en compression du béton, avec une puissance 0,57 [10] :

$$f_t(t) = f_{t28} \left(\frac{f_c(t)}{f_{c28}} \right)^{0,57}$$

où $f_t(t)$ est la résistance en traction par fendage à l'âge t . On voit alors, d'après ce modèle, que la fissuration de la moquette par retrait empêché intervient entre 2 et 8 jours, prévision conforme aux essais de laboratoire précédemment cités.

Scénario thermique et contraintes engendrées dans la couche de moquette

Le cas envisagé correspond à une section de moquette BHP dont la construction interviendrait en fin d'année, et qui subirait au printemps suivant un ensoleillement important. On se place donc dans les conditions météorologiques du quart Sud-Est (humidité moyenne annuelle de 55 %), et on admet que la température moyenne de la couche s'élève brutalement de 30 °C après 6 mois.

On a vu dans la section précédente que le béton sera fissuré au plus tard à 8 jours. D'après la théorie classique de fissuration du béton armé (théorie de Brice citée dans [11]), la contrainte moyenne dans le béton d'un tirant fissuré est au plus égale à la moitié de la valeur à la rupture. Afin de calculer le fluage en traction subi par le béton entre 8 et 180 jours (ou 6 mois), on admettra donc que celui-ci se trouve soumis pendant ce laps de temps à une contrainte constante égale à $0,5 \times 0,6 f_{t8}$ (le coefficient 0,6 tenant compte de l'effet de fatigue statique précédemment cité). La déformation totale du béton entre 8 et 180 jours correspond donc au retrait intervenant entre ces deux âges retranché du fluage précédemment calculé. Dans le cas qui nous intéresse, le retrait entre ces deux échéances vaut 341.10^{-6} , et la déformation totale 283.10^{-6} . Cette déformation sera annulée par une élévation de température correspondant au quotient de la déformation par le coefficient de dilatation du béton λ . Dans notre cas (béton de granulats siliceux), on prend $\lambda = 12.10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Il s'ensuit, d'après ce calcul, que les fissures se refermeront pour une élévation de température de 23,6 K. Dans notre scénario, l'échauffement supplémentaire entre cette température et les 30 °C envisagés se traduira finalement par une mise en compression de la dalle. Compte-tenu du module élastique du béton à 6 mois, on s'attend à une valeur maximale d'environ 3,4 MPa. La figure 8 récapitule l'historique des contraintes subies par le béton dans ce scénario.

Évaluation du risque de flambement

La question est à présent de savoir si cette compression peut provoquer une instabilité élastique de la dalle. Remarquons tout d'abord que cette contrainte n'apparaîtra qu'en partie courante, les extrémités (glissantes) étant le siège de contraintes inférieures.

De l'Hortet a étudié ce problème dans le cas des chaussées précontraintes [12]. Pour avoir flambement d'une poutre courbe (dans le sens du profil en long), il faut que le moment fléchissant d'ordre 2 engendré par la compression de la poutre dépasse le moment de rappel, dû au poids propre, intervenant au décollement de la poutre. Cela se traduit par une condition simple sur le rayon de courbure R :

$$R \leq R_{\text{crit}} = \frac{\sigma}{\rho g}$$

σ étant la contrainte de compression, et g l'accélération de la pesanteur. On remarque au passage que cette relation ne fait pas intervenir l'épaisseur de la dalle. À cet égard, on ne doit donc pas concevoir de crainte particulière liée à la minceur de la moquette BHP, si ce n'est bien sûr sa température moyenne, qui sera d'autant plus élevée qu'elle sera moins épaisse (en cas d'ensoleillement important).

Si cette condition est satisfaite, il faut encore qu'elle le soit sur une longueur supérieure au double de la longueur de flambement de la dalle, qui s'écrit classiquement :

$$l_f = \pi h \sqrt{\frac{E}{12 \sigma}}$$

Le rayon de courbure minimal, dans le sens longitudinal, peut s'estimer en considérant le maximum de défaut d'uni a pour une longueur d'onde L [13]. Le rayon de courbure s'écrit alors :

$$R = \frac{L^2}{4 \pi^2 a}$$

On peut faire de ces formules l'application numérique suivante. Pour $\sigma = 3,4 \text{ MPa}$ (valeur trouvée précédemment), $\rho = 2\,400 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, $a = 0,10 \text{ m}$, $L = 50 \text{ m}$, on trouve :

$$R = 633 \text{ m} > R_{\text{crit}} = 141 \text{ m}$$

La condition de non-flambement est réalisée avec un coefficient de sécurité supérieur à 4, et ce malgré un défaut d'uni sévère et une élévation de température également pessimiste. On n'a pas non plus tenu compte du gradient de température dans la dalle, qui crée un moment supplémentaire tendant à s'opposer au soulèvement de la couche. De même, la fissuration préalable du béton tend à diminuer le module équivalent de la moquette, et donc la contrainte de compression calculée. On

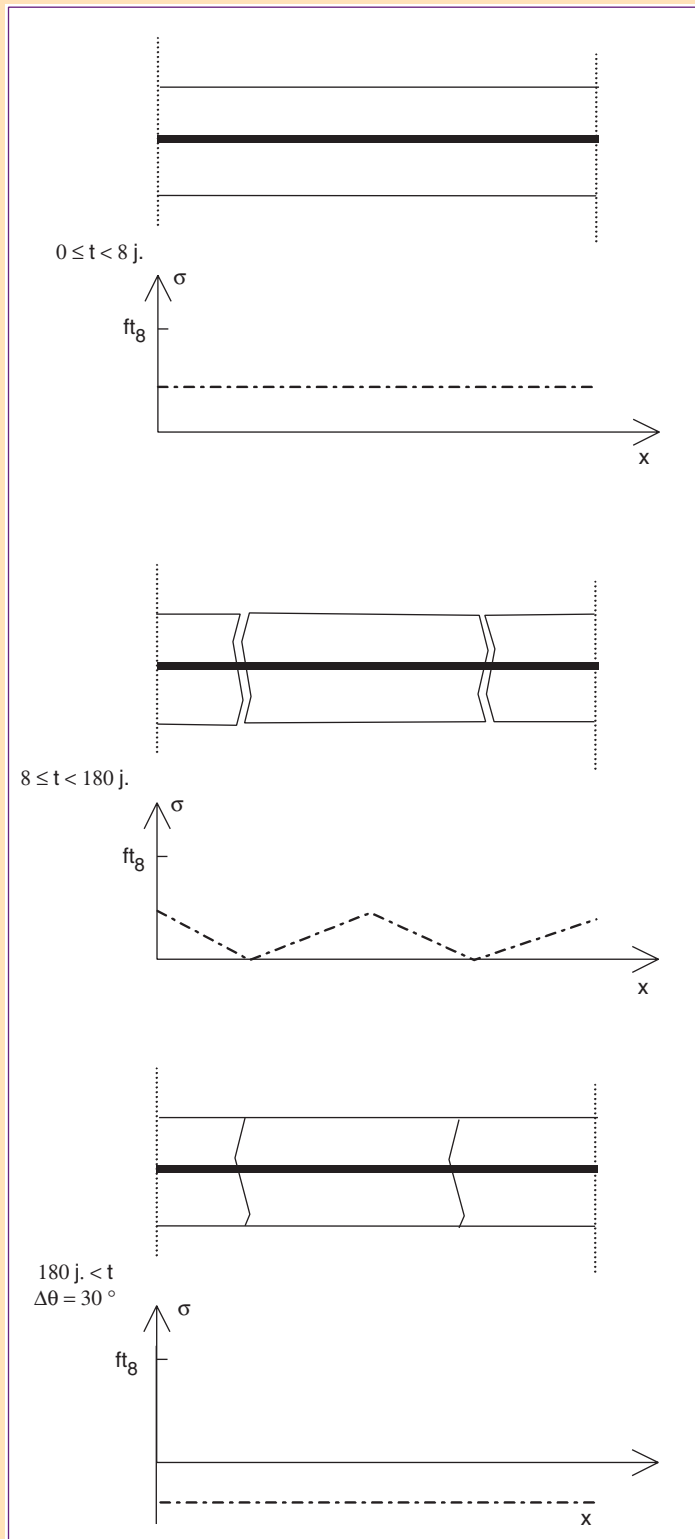


Fig. 8 - Évolution théorique des contraintes subies par le béton de la moquette entre le coulage et 180 jours. Les contraintes positives correspondent à des tractions.

peut donc, à ce stade de l'analyse, et dans le cadre des hypothèses formulées, considérer que le risque de flambement est écarté.

Comportement de la planche d'essai sous chargement accéléré

Les machines de fatigue Fabac

Les machines de fatigue Fabac (Fatigue du BAC – béton armé continu) sont des simulateurs de trafic lourd développés dans le cadre du projet de recherche national Fabac (1997-2001), dédié au dimensionnement des chaussées en béton armé continu (fig. 9). Ces deux simulateurs ont regagné le LCPC – centre de Nantes, à l'issue du projet national en 2001. Ils sont aujourd'hui utilisés en complément du manège de fatigue des structures routières.



Fig. 9 - Vue en élévation de la machine Fabac.

Ils comportent quatre trains de roulement montés sur galets et entraînés par deux chaînes, montées elles-mêmes chacune sur deux barbotins, l'un d'entre eux étant mis en rotation par un moteur électrique de 32 kW muni d'un réducteur.

Les trains de roulement sont, suivant le type d'essai, des jumelages types (expériences de fatigue) ou des roues simples larges (expériences d'orniérage). Ces charges roulent à la surface de la chaussée sur laquelle est positionnée la machine, sur une longueur de deux mètres. En fin de course, elles sont soulevées, ramenées à quatre mètres de leur point de départ, et repositionnées pour un nouveau cycle de chargement (fig. 10). On peut faire varier les charges roulantes entre 40 kN et 70 kN, selon les consignes propres à l'expérience en cours. La vitesse de déplacement des charges roulantes à la surface de la chaussée est au maximum de 7,2 km/h. Les roues conservent la même trajectoire sur la chaussée et il n'y a pas de balayage latéral en cours d'essai.

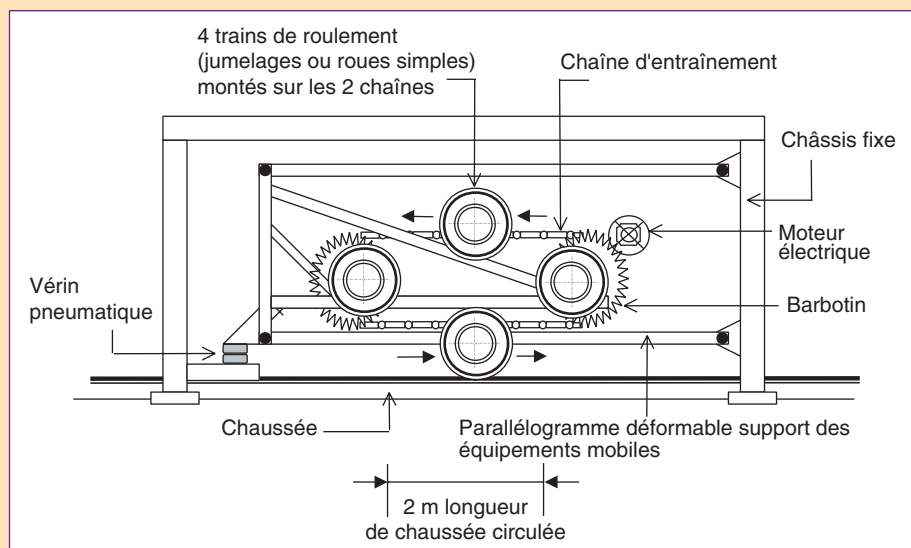


Fig. 10 - La machine Fabac, application des charges. Schéma de principe.

Déroulement de l'expérience de fatigue sur la planche d'essai en moquette BHP

Les charges appliquées à la chaussée pendant l'expérience de fatigue étaient des jumelages standard de poids 65 kN. La pression de gonflage des pneumatiques était de 0,80 MPa. La vitesse de déplacement linéaire des pneumatiques a été réglée à 3,6 km/h pendant toute la durée de l'essai, correspondant à l'application d'un chargement toutes les 2 secondes.

Les chargements ont été appliqués entre fin novembre 2001 et mai 2002, pendant trois périodes durant lesquelles la température extérieure a varié entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (fig. 11). Deux pannes sérieuses, survenues pendant l'expérience, ont entraîné de longs délais d'immobilisation, portant à six mois la durée totale de l'essai, alors que des conditions normales de fonctionnement auraient nécessité 2,5 à 3 mois d'essais pour réaliser le nombre de chargements prévu, fixé forfaitairement à 1 million*. En dehors des périodes de panne, la machine était en fonctionnement continu pendant la semaine, à l'exception des arrêts pour entretien ou observation visuelle de la chaussée testée.

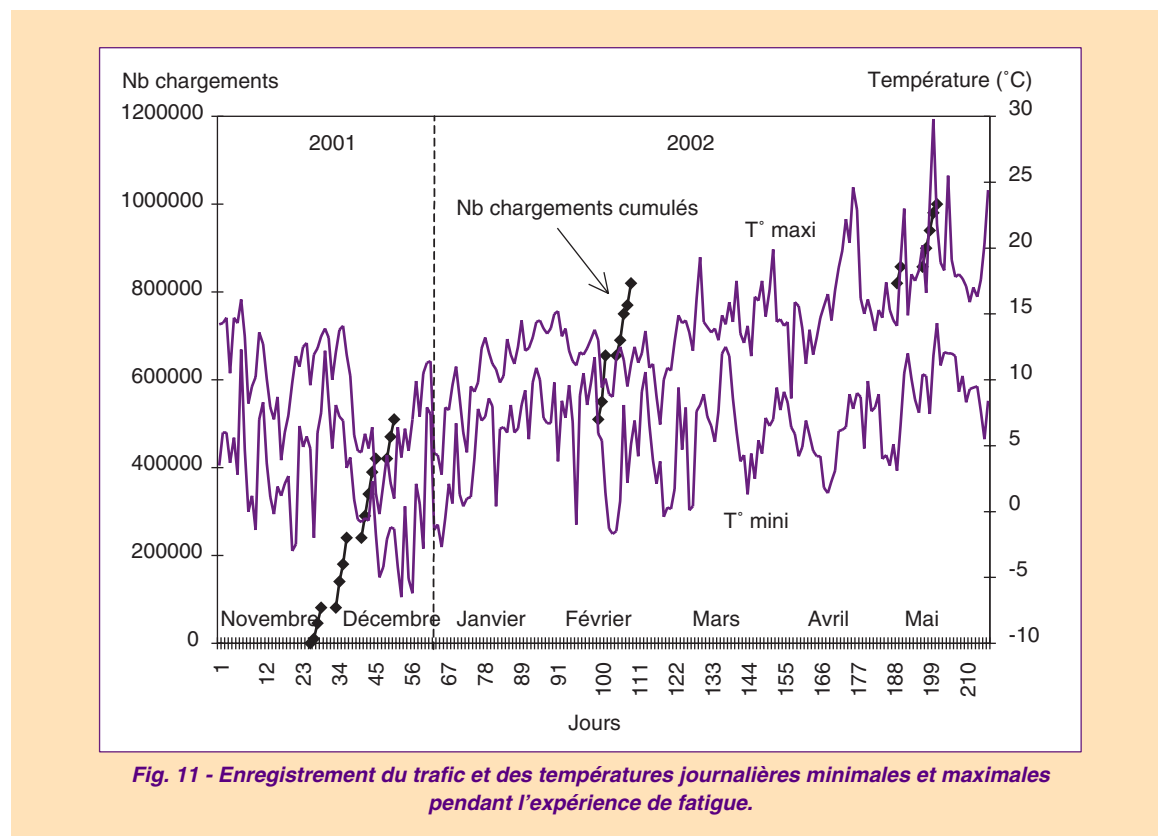


Fig. 11 - Enregistrement du trafic et des températures journalières minimales et maximales pendant l'expérience de fatigue.

Mesures de déflexion et état de la planche d'essai à la fin des essais

Cinq campagnes de mesures de la déflexion sous charge ont été réalisées en cours d'expérience, au moyen de la poutre Benkelman munie d'un capteur électronique. Les mesures se font classiquement dans l'entre-jumelage, à vitesse de déplacement des charges très lente (de l'ordre de 1 km/h). Les résultats de ces mesures sont reproduits dans le tableau III.

On observe premièrement que les déflexions n'évoluent pratiquement pas pendant toute la durée de l'expérience : elles restent en effet comprises entre 74 mm/100 et 84 mm/100, leur valeur moyenne étant de 80 mm/100. Cela atteste de la bonne tenue de la couche de roulement en BHP tout au long de l'essai, sans évolution notable de sa rigidité structurelle. Par ailleurs, on observe que la mise en place de la moquette se traduit par un assouplissement global de la chaussée : la déflexion passe en effet de la valeur 32 mm/100 avant construction de la moquette, à la valeur moyenne de 80 mm/100

* Cette valeur est sensiblement inférieure au nombre total de chargement de type poids lourds qu'une chaussée soumise à un trafic fort subit pendant sa durée de vie. Cependant, il était nécessaire de limiter la durée et le coût de l'expérience. Plus que la tenue en fatigue au sens classique de la conception des chaussées, on recherchait surtout dans cette expérience à tester la tenue de surface, et à vérifier l'absence de départ de matériau (*punch-out*).

TABLEAU III
Mesures de déflexion sous les jumelages de 65 kN de la machine Fabac

Date de la mesure	Nombre de chargements	Déflexion (mm/100)	Température ambiante (°C)
23-11-2001	0	74	10
05-12-2001	140 500	75	10
20-12-2001	509 000	84	5
19-02-2002	692 000	76	10
29-05-2002	1 000 000	80	15

après construction. C'est en fait la forte compressibilité du géotextile épais (5 mm), placé à l'interface entre le béton bitumineux ancien et la moquette, qui entraîne cette baisse de rigidité structurelle globale observée en partie centrale de la planche.

Les observations visuelles réalisées après repliement final de la machine et le nettoyage à l'eau du revêtement BHP viennent confirmer les relevés de dégradation effectués périodiquement sous la machine à l'arrêt pendant toute la durée de l'expérience. Les dégradations visibles se limitent à trois fissures transversales très fines du revêtement en BHP, repérées à la fois à la surface de la moquette et sur l'une ou l'autre de ses faces verticales longitudinales (fig. 12).

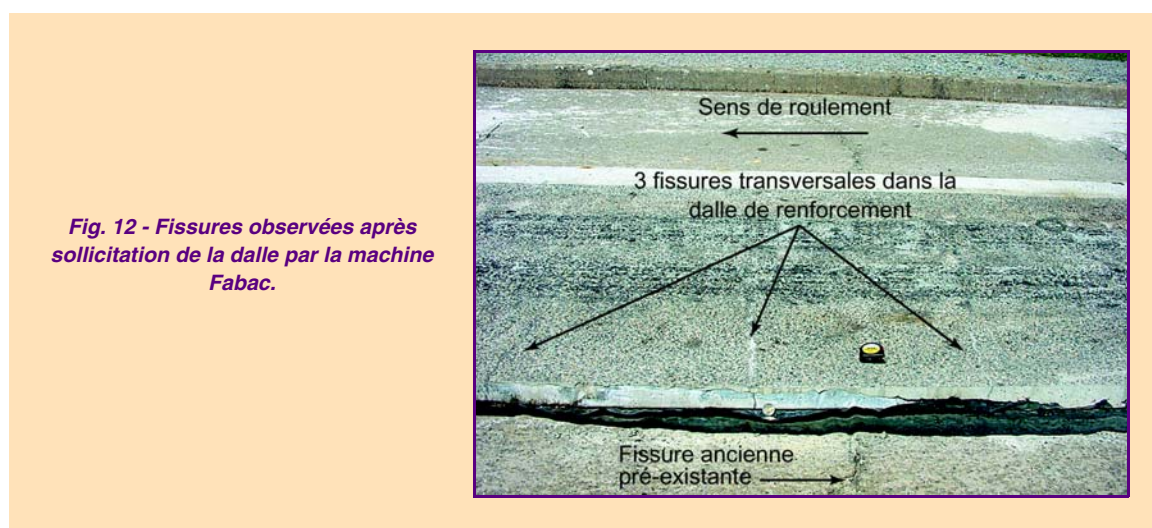


Fig. 12 - Fissures observées après sollicitation de la dalle par la machine Fabac.

La première fissure se situe à 30 cm en amont de la fissure transversale pré-existante dans la chaussée ancienne. La seconde se situe à 20 cm en aval de cette fissure ancienne. Enfin, la troisième fissure est placée à 75 cm. Ces trois fissures sont apparues en début d'expérience, avant 100 000 chargements, et elles n'ont pas évolué au cours de l'essai. Leur faciès fait bien sûr penser à des fissures de retrait. On peut penser que malgré la refermeture partielle de la fissure du substratum, et en dépit du décollement qui s'est probablement produit à l'interface béton bitumineux/grave-ciment (voir plus haut), le retrait du béton a engendré un certain état de traction longitudinale dans la couche de roulement. Lorsque les contraintes dues aux charges de roulement ont été appliquées, la fissuration transversale s'est produite, relaxant du même coup une partie de cette traction rémanente. Enfin, précisons que la surface du béton est apparue inchangée – mis à part un certain dépôt adhérent de gomme dû à l'usure des pneus – avant et après l'essai de fatigue. En particulier, on n'a pas noté de déchaussement de granulats, grâce à l'excellente adhérence mortier/gravillon qui se développe dans les BHP.

Conclusion

À l'issue de cette expérimentation, et au stade actuel des investigations théoriques sur le fonctionnement mécanique de la moquette BHP, on arrive aux conclusions suivantes :

- la mise en œuvre du BHP pour la réalisation d'une dalle armée de 6 cm d'épaisseur ne pose pas de difficulté particulière dans un contexte « artisanal ». Sous réserve de respecter l'affaissement spécifié (compris entre 10 et 20 cm), on ne devrait pas rencontrer de problème de tenue de pente. Dans le contexte industriel des chaussées en béton construites à la machine à coffrages glissants, des adaptations des pratiques seront sans doute nécessaires et restent à développer dans le cadre d'un chantier expérimental ;
- la technique du dénudage chimique paraît adaptée à ces bétons, et permet d'obtenir des états de surface satisfaisants, en matière d'aspect et de hauteur au sable. Contrairement aux craintes initiales des auteurs, la date d'exécution du lavage ne semble pas plus critique que lors de l'utilisation des bétons de chaussée classique;
- le BHP de formulation spéciale utilisé dans la moquette développe un retrait important, qui devrait entraîner, pour une chaussée de longueur suffisante, une fissuration transversale apparaissant dans la première semaine après le coulage. Les fissures de retrait ne se refermeraient que dans le cas d'une élévation de température moyenne du béton supérieure à 20 °C, par rapport à la température initiale. Au-delà, une certaine compression s'installera dans la moquette, mais celle-ci ne devrait pas engendrer d'instabilité élastique tant que le rayon de courbure de la chaussée reste supérieur à une valeur minimale, condition largement respectée dès que les exigences minimales d'uni sont satisfaites ;
- après un million de passage d'essieux lourds, l'état de surface du BHP reste pratiquement inchangé. L'expérience de la planche d'essai du LCPC a montré la capacité de la moquette à « ponter » une fissure importante de la fondation, sans aucun endommagement visible ou mesurable. Cette propriété de la moquette BHP pourrait en faire une solution technique attractive pour la réhabilitation de chaussées semi-rigides ou rigides, anciennes et dégradées. Cependant, le non-empêchement du retrait, à l'origine de la faible fissuration transversale observée, diminue la représentativité de l'essai par rapport à la partie courante d'une chaussée réelle, dont le retrait est totalement bloqué, les fissures plus ouvertes, et le risque de dégradation par départ de matériau (*punch-out*) plus présent.

Il est donc encore un peu tôt pour conclure à la parfaite tenue de ce revêtement sous trafic lourd, compte tenu en plus du nombre limité de cycles appliqué, et du caractère plus agressif d'une circulation non canalisée. D'un autre côté, du fait de la grande difficulté à résister au retrait d'une dalle béton, et compte tenu du caractère encourageant des résultats de l'expérience relatée dans cet article, on peut penser que c'est sur un chantier expérimental qu'il faut à présent poursuivre le développement de cette solution hydraulique innovante.

***Remerciements.** Les auteurs remercient les équipes techniques des divisions TGCE « Technologies du Génie Civil et Environnement » (pour la fabrication, la mise en œuvre et le suivi des déformations de la planche d'essai) et MSC « Matériaux et Structures de Chaussées » (pour l'essai à la machine Fabac) du LCPC Centre de Nantes, avec une mention spéciale à Jean Balay pour ses conseils dans la rédaction du présent article. Ils associent également à cette aventure, Ahmed Loukili et Philippe Turcry (de l'École Centrale de Nantes) pour leur contribution à l'étude du retrait du BHP.*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] de LARRARD F., La moquette en BHP – Un nouveau concept de couche de roulement, Note technique, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **223**, septembre-octobre, **1999**, pp. 105-110, .
- [2] de LARRARD F., SEDRAN T., BALAY J., LAURENT G., Le programme de recherche Matériaux Hydrauliques dans la Route du LCPC, *Revue Générale des Routes et Aéroports*, **798**, **2001**, septembre, pp. 29-33,
- [3] AUNIS J., BALAY J., An applied research program on continuous reinforced concrete pavement: the Fabac project, *8th International Symposium on Concrete Roads*, theme 2, **1998**, Lisbonne, September, pp. 177-184.

- [4] SEDRAN T., de LARRARD F., *BétonlabPro 2 – Logiciel de formulation de bétons - Version exécutable sous Windows*, logiciel sur CD-ROM avec aide en ligne, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, juin, **2000**.
- [5] LE ROY R., de LARRARD F., PONS G., Calcul des déformations instantanées et différées des BHP, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Numéro spécial **XIX**, **1996**, pp. 63-84.
- [6] LOUKILI A., *Retrait des BHP – Rapport d'avancement 1*, Rapport de l'École Centrale de Nantes pour le thème de recherche « Matériaux hydrauliques dans la route » du LCPC, 8 p. + annexes, mars, **2000**.
- [7] LOUKILI A., TURCRY P., *Retrait des BHP – Rapport d'avancement 2*, Rapport de l'École Centrale de Nantes pour le thème de recherche « Matériaux hydrauliques dans la route » du LCPC, octobre, 10 p., **2001**.
- [8] PAILLÈRE A.-M., BUIL M., SERRANO J.-J., Durabilité du béton à très hautes performances : incidence du retrait d'hydratation sur la fissuration au jeune âge, *Comptes rendus du congrès RILEM : De la science des matériaux au génie des matériaux de construction*, Paris, septembre, vol. 3, pp. 990-997, **1987**.
- [9] BLOOM R., BENTUR A., Free and Restrained Shrinkage of Normal and High-Strength Concretes, *ACI Materials Journal*, vol. 92, **2**, mars-avril, **1995**, pp. 211-217.
- [10] de LARRARD F., *Structures granulaires et formulation des bétons*, traduit de l'anglais par A. Lecomte, Études et recherches des LPC, **OA 34**, 414 p., **2000**.
- [11] LACROIX R., FUENTES A., THONIER H., *Traité de béton armé*, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, Paris, **1982**, 609 pages.
- [12] de L'HORTET R., La chaussée en béton très mince, fortement précontrainte, est-elle la chaussée de demain ?, *Routes et Aéroports*, octobre **1963**, pp. 101-115.
- [13] DELANNE Y., Communication personnelle (LCPC), octobre **2002**.