

L'EXPERIMENTATION EN RENFORCEMENT DE LA TECHNIQUE DES GRAVES-CIMENT

M. HIMMI

Chef du service recherche au CNER

Pour améliorer les caractéristiques géotechniques des matériaux de chaussée on procède, entre autres, à un traitement au ciment. Au fur et à mesure de l'utilisation de cette technique, il est apparu qu'avec une utilisation des granulats à caractéristiques bien définies, et une mise en oeuvre soignée, on obtient un mélange ayant des performances élevées. Ce matériau (la grave-ciment) peut servir pour réaliser des couches de base de chaussées de haute qualité technique.

Les premières études pour l'introduction de cette technique au Maroc ont été entamées au début de cette décennie. Cette action a été motivée par la nécessité de diversifier les techniques de construction de chaussée, de rechercher des nouvelles techniques offrant un bon niveau de service tout en réduisant les opérations d'entretien et en utilisant autant que possible le ciment.

Les études entamées ont été marquées, en 1983, par la réalisation d'une première section expérimentale sur la route principale n°3, du PK 52+300 au PK 53+600. L'objectif poursuivi est le suivi d'une réalisation dans les conditions du pays dans le but de :

- Déceler, parmi les difficultés qui semblent handicaper l'introduction de cette technique, celles qui sont réellement fondées et comment elles peuvent être résolues.*
- Suivre le comportement à court, à moyen et à long termes d'un tronçon expérimental, avant de conclure quant à la performance de la technique et à son adaptation au contexte technico-économique du pays.*

Cette communication a pour objet de :

- Présenter, brièvement, l'expérimentation et les conditions de sa réalisation*
- Présenter quelques résultats du suivi de son évolution.*

I/ HISTORIQUE DE LA REALISATION DE LA SECTION EXPERIMENTALE

A/ Etude au laboratoire.

1) Les matériaux.

La formulation au laboratoire de la grave-ciment a été faite sur la base des matériaux suivants :

- Un sable 0/6 de concassage assez homogène élaboré à partir d'une ballastière sur l'oued OUERHA. Les caractéristiques sont telles que :

- * Filler : 14% à 18%
- * Equivalent de sable : 50% à 59%
- * Matière organique : 0,11%

- Un gravillon 6/25 de même origine que le sable et possédant les caractéristiques suivantes :

- * Coefficient d'aplatissement CA = 4%
- * Micro-Deval humide 16%
- * 2 à 3,5% d'éléments inférieurs à 1 mm
- * Teneur en éléments organiques 0,15%

- Le ciment CPA 325 de CADEM

2) Méthodologie d'étude.

Les proportions du sable et des gravillons ont été fixées de manière à avoir une courbe granulométrique qui s'inscrit bien dans le fuseau 0/25 des spécifications pour la grave-ciment.

La meilleure composition (courbe continue au centre du fuseau) a été obtenue pour les proportions suivantes :

- 40% sable 0/6
- 60% gravillons 6/25

L'étude de formulation a consisté ensuite à déterminer les caractéristiques Proctor modifié et la résistance mécanique du matériau, et ce pour trois dosages différents : 3%; 4,5% et 6%.

Le tableau n°1 présente les densités et les teneurs en eau Proctor pour chaque dosage en ciment.

Dosage en ciment	Densité sèche maximale	Teneur en eau optimale
3%	2,230	5,7%
4,5%	2,245	5,8%
6%	2,250	5,9%

Les tableaux n°2 et n°3 présentent les résultats des résistances à la compression et à la traction par fendage à 7 jours, ainsi que les densités correspondantes. Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques (D=10 cm et H=15 cm) avec un serrage par pression (190 bars environ), pour atteindre une compacité de 95% O.P.M. du matériau. La conservation a été faite à l'air à 18°C.

Tableau n°2 : Résistance à la compression à 7 jours

Dosage Ciment	Hauteur Eprouvette	Densité Humide	Densité Sèche	Indice Compacité	RC a 7j Kg/cm ²
3%	15,5	2,316	2,185	98%	16,2
	15,3	2,346	2,213	99%	15,0
4,5%	15,5	2,326	2,194	97,7%	25,6
	15,4	2,342	2,209	98%	25,1
6%	15,2	2,382	2,247	99,8%	39,4
	15,3	2,366	2,232	99,2%	35,0

Tableau n°3 : Résistance à la traction par fendage à 7 jours

Dosage Ciment	Hauteur Eprouvette cm	Densité Humide	Densité Sèche	Indice Compacité Proctor	Charge Rupture Kg	RT en Kg/cm ²
3%	15,9	2,258	2,130	95,5	700	4,46
	15,4	2,331	2,199	98,6	850	5,41
4,5%	15,3	2,357	2,223	99,0	1100	7,00
	15,2	2,372	2,238	99,6	950	6,05
6%	15,4	2,352	2,219	98,6	1200	7,64
	15,9	2,278	2,146	95,5	1300	8,28

Suite à cette étude, la formulation suivante a été retenue :

- Sable 0/6 : 40%
- Gravillon 6/20 : 60%
- Ciment CPAZ 325 : 4%
- Retardateur de prise "SODAP" : 0,6% (par rapport au ciment)
- Eau : 5,7%

B/ Choix de la section et données de base.

La section considérée est située entre les PK 52+300 et PK 53+600 de la RP3 (Sidi Slimane). Cette section présentait un état de fatigue avancé et nécessitait un renforcement. La structure de la chaussée est constituée :

- D'une couche de roulement composée d'une succession d'enduit superficiel (3 à 5 cm)
- D'une couche en pierre cassée (7 à 18 cm)
- D'une couche de blocage (12 à 19 cm).

Le sol de plateforme est un limon argileux se caractérisant par :

- Un indice de plasticité compris entre 17 et 18%
- Un indice C.B.R. avant imbibition variant entre 3% et 5% et inférieur à 3% après imbibition.

Les mesures d'auscultation réalisées sur cette section montrent un état de dégradation très avancé :

- La déflexion caractéristique (D90) moyenne était de 233/100 mm
- Le coefficient de planéité au bump intégrator était RI=5000 mm/Km.
- Les déformations des profils en travers, mesurées au transversoprofilographe, sont comprises entre 3 et 4 cm.

Le trafic relevé sur la section, avant renforcement, correspond à la classe T3 du catalogue des structures type de chaussées.

En tenant compte de ces caractéristiques, l'étude de renforcement a donné un renforcement de 22 cm de grave-ciment + 6 cm d'enrobé.

Pour soumettre la couche de grave-ciment à une sollicitation agressive et tirer des conclusions dans un moyen terme, il a été décidé de différer la mise en oeuvre de la couche de roulement de 6 cm d'enrobé bitumineux.

C/ Réalisation de la section expérimentale.

Les travaux ont été réalisés durant le mois d'Octobre 1983 (du 7 au 21/10/83) en l'absence de précipitation et avec une température diurne assez élevée.

1) Contrôle avant mise en oeuvre.

Un contrôle des matériaux approvisionnés sur chantier a fait constater que :

- Par rapport aux matériaux qui ont servi pour l'étude de formulation, ceux sur chantier présentent quelques variations de leurs caractéristiques, qui restent dans les tolérances admises (courbes granulométriques, propreté, forme et angularité).

- Le ciment présente de bonnes caractéristiques mécaniques :

 - * RC 28 j = 500 bars

 - * RF 28 j = 86 bars

L'entreprise a montré un grand intérêt à cette expérimentation et a procédé à l'adaptation d'une centrale d'enrobé du type continue d'une capacité horaire de 40 à 60 t/h.

Le contrôle du matériau à la sortie de la centrale a permis de faire les constatations suivantes :

- La courbe granulométrique moyenne des contrôles ne rentre pas totalement dans le fuseau prescrit. Elle présente un creux entre les fractions 0,63 et 2 mm, et ce malgré plusieurs modifications du réglage.

- L'absence d'un débitmètre a rendu difficile la maîtrise du dosage en eau.

- Le retardateur de prise, prévu initialement, a été remplacé par un produit similaire (SIKA) à un dosage de 1,25% par rapport au poids du ciment. Comme pour le dosage en eau, les équipements de la centrale n'ont pas permis de bien maîtriser le dosage en retardateur de prise.

2) Mise en oeuvre.

L'atelier de mise en oeuvre a été composé comme suit :

- Deux camions bennes pour le transport, à partir de la centrale située au milieu du tronçon

- Une niveleuse pour l'épandage du matériau et son dressage (hauteur de 30 cm environ)

- Un compacteur vibrant SISMO PACTOR de 8 tonnes

- Un compacteur à pneus ORTOPACTOR avec 4 et 5 roues chargées à 25 tonnes.

Le répandage a été fait par demie largeur sur les 385 premiers mètres. A cause des difficultés du respect de l'épaisseur, le reste de la section a été réalisé sur toute la largeur (7 m).

La cadence du compactage a été arrêtée à 5 passes du compacteur vibrant et 15 passes du compacteur à pneus et ce après la réalisation d'une planche d'essai et la comparaison des résultats de trois cadences différentes.

Il y a lieu de signaler qu'après avoir observé une dessiccation en surface de la grave-ciment, un arrosage léger a été pratiqué après le dressage par la niveleuse et avant compactage :

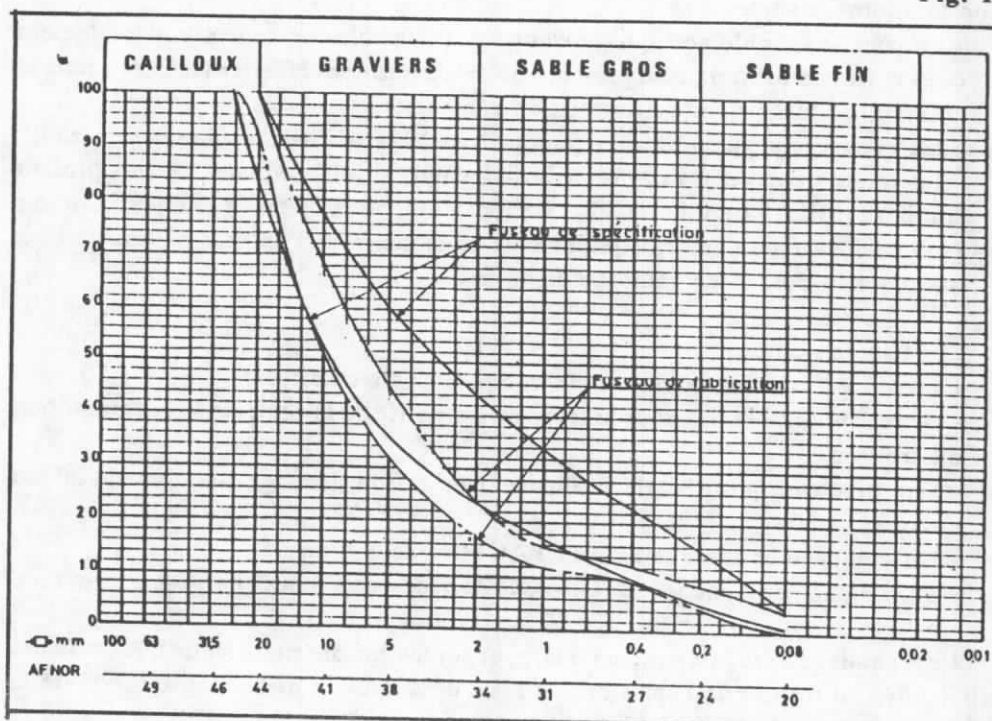
Une protection contre l'évaporation précoce de l'eau a été assurée par le répandage d'une émulsion de bitume à la fin du compactage.

3) Contrôle de mise en oeuvre.

Pour ce qui concerne le contrôle de fabrication, les constatations faites avant le début de mise en oeuvre du matériau ont été reconfirmées :

- Le fuseau granulométrique de fabrication (fig. n°1) présente toujours un creux dans sa partie inférieure où il sort du fuseau des spécifications. Les dispersions étaient, par contre, assez faibles et la fabrication peut être considérée comme étant assez homogène.

Fig. 1



- Il était difficile de maîtriser la teneur en eau. Les mesures faites étant très dispersées (fig. n°2). Ceci a entraîné une dispersion dans le dosage en retardateur de prise qui était ajouté dans l'eau.
Par ailleurs, il n'a pas été facile de contrôler le dosage en ciment à la fabrication.

Le contrôle d'exécution portait, essentiellement, sur la compacité et l'épaisseur mise en oeuvre.

Le traitement des mesures de compacité effectuées (fig. n°3) montre que :

- La densité sèche moyenne de toutes les mesures est de $2,22 \text{ t/m}^3$ avec un écart type de $0,105 \text{ t/m}^3$.
- 36% des valeurs sont inférieures à la valeur correspondante à 97% de l'O.P.M. demandé dans le C.P.S. Il a été constaté que les valeurs faibles de densité ne sont pas liées à un faible compactage mais à la faiblesse des teneurs en eau et à un début de prise avant la fin du compactage.

L'analyse des épaisseurs mesurées sur les carottes prélevées (fig. n°4) montre que :

- La valeur moyenne est de 23,6 cm avec une forte concentration des valeurs entre 24 et 26 cm.
- 20% des mesures sont inférieures à 22 cm demandée dans le C.P.S.

Fig. 2

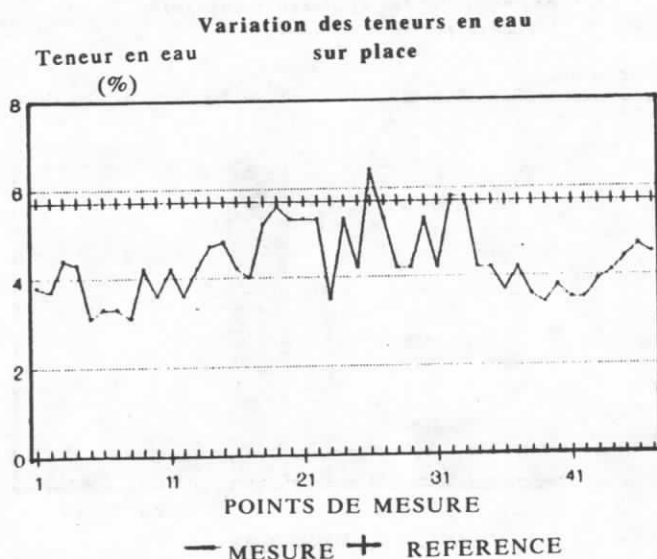


Fig. 3
Variation des densités
en place

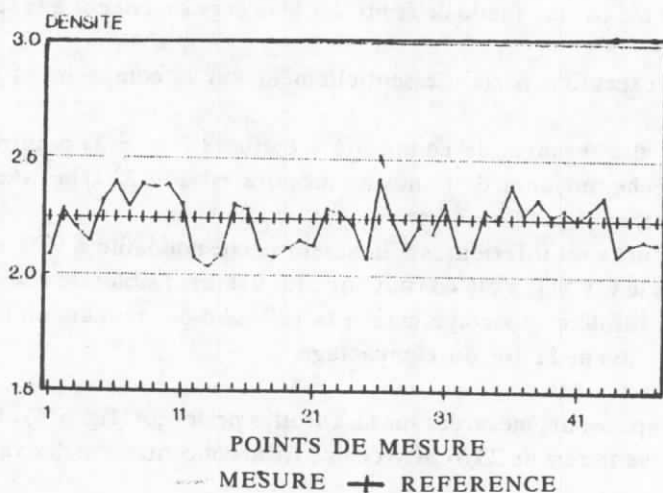
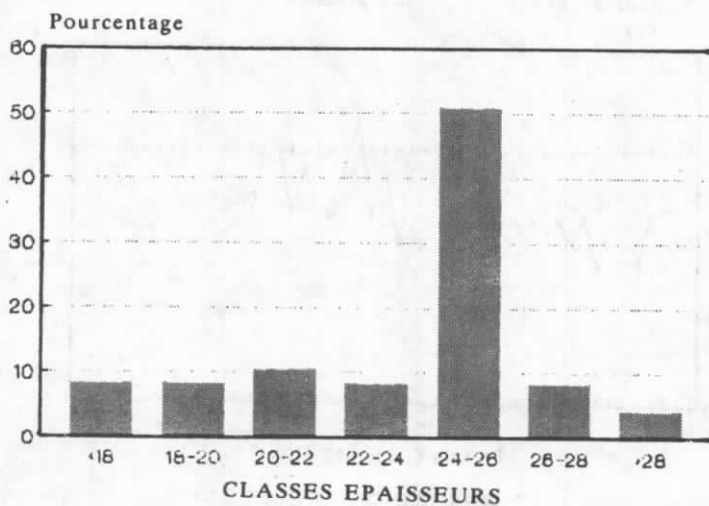


Fig. 4
Répartition des épaisseurs contrôlés
sur carottes



II/ SUIVI DU COMPORTEMENT DE LA SECTION EXPERIMENTALE

A/ Rappel sur le comportement des chaussées à couche de base traitée aux liants hydrauliques.

1) Mode de fonctionnement.

Le mode de fonctionnement théorique des couches de chaussées traitées aux liants hydrauliques, type graves-ciment, est tel qu'une fois la prise faite, la contrainte de traction à la base de la couche joue un rôle prépondérant.

A la différence des couches de chaussées souples, ce paramètre conditionne le dimensionnement de la couche, dont le principe est, essentiellement, basé sur la comparaison de cette contrainte de traction avec la contrainte admissible du matériau.

2) Comportement du matériau.

On distingue, généralement, deux phases du comportement des graves traitées au ciment :

a)- Une phase d'évolution rapide des propriétés mécaniques qui correspond à la période de prise et de durcissement, au bout de laquelle le matériau atteint ses caractéristiques finales (variable selon le type de ciment).

b)- Un état au bout duquel se manifestent des phénomènes de fatigue de la chaussée (entre dix et vingt ans).

3) Evolution de l'état de surface.

Le phénomène de fissuration transversale par retrait thermique est systématique pour les couches de chaussées en grave-ciment. Son évolution est tributaire de l'épaisseur de la couche de roulement et de la densité du trafic.

L'évolution des fissures conduit à l'apparition d'un faïençage à mailles de plus en plus fines sous l'effet des chocs au passage des roues et des infiltrations d'eau, à des épaufures de plus en plus profondes provoquant un arrachement du revêtement et de la grave-ciment.

B/ Point zéro de suivi du comportement.

1) Détermination du produit R.D (rayon de courbure * déflexion).

La détermination du produit R.D est particulièrement utile parce qu'il peut renseigner sur les zones fragiles.

Les mesures ont été faites sur la première moitié de la section expérimentale à partir du PK 52 + 300, à l'aide d'une poutre Benkelman par l'enregistrement de la courbe d'influence engendrée par le déplacement de la charge correspondante au demi-essieu de 13 tonnes. Les résultats de détermination des paramètres R, d et R * d sont présentés dans le tableau n°4. Une évaluation de l'état structural de la chaussée, aux différents points de mesure, est faite sur la base d'un critère issu de l'expérience internationale.

Ces résultats mettent en évidence une insuffisance et une hétérogénéité de la rigidité de la couche de base en grave-ciment au niveau de certains points de mesure. Mis à part, les 20 premiers mètres, sur lesquels le carottage a montré une insuffisance de l'épaisseur ($H \simeq 19,3$ cm), les autres points de mesure semblent correspondre à des épaisseurs supérieures à l'épaisseur déterminée lors du dimensionnement (22 cm).

Tableau n°4 : Produit R * d

Point de mesure	RC1 52 - 300	RC2	RC3	RC4	RC5	RC7	RC8	RC9	RC10	RC12
Rayon courbure (cm)	360	18	350	500	1920	1610	293	2210	1390	800
Déflexion maximale (1/100 mm)	84	48	84	11	9	10	21	34	5	5
R * D m*1/1000 mm	30240	882	29400	500	17280	16100	150	75140	6950	4000
Appréciation	B D S D	B D S C	B D S D	B D S C	B B S C	B B S C	B D S C	B B S C	B B S C	B D S C
H moyenne (cm)	19,3	25	24	25,2	22,3	24,3	27,5	23,3	21	17,7

Appréciation : B B = Base Bonne S D = Support Défectueux
 B D = Base Défectueuse S C = Support Correct

Ceci laisse penser plutôt à des problèmes d'exécution comme cause de ce mauvais comportement localisé, au début de la mise en service de la section expérimentale.

2) Mesure de déflexion au déflectographe La-croix.

Une première mesure de déflexion au déflectographe La-croix, a été réalisée sur la section au mois de Novembre 1983, un mois environ, après la fin des travaux de réalisation.

De manière générale, les déflexions étaient assez élevées :

- La moyenne des valeurs individuelles est égale à 82,5/100 de mm avec un écart type de 27,75/100 mm.
- La moyenne des valeurs caractéristiques (D 90) est de 107/100 mm avec un écart type de 13,7/100 mm.

Ces mesures mettent en évidence une zone particulièrement mauvaise correspondant aux premiers 150 m à partir du PK 52 + 300 (dernière partie réalisée). (D 90 moyenne = 125/100 mm); ces déflexions élevées peuvent être expliquées, en partie, par le fait que le grave-ciment n'a pas encore atteint ses caractéristiques mécaniques définitives.

3) Mesure de l'uni longitudinal au bump integrator.

La première mesure faite en 1983 a montré que la section présentait un bon uni. La valeur moyenne du coefficient de planéité était RI = 1744 mm/Km. La section présentait donc un bon confort malgré les déformations de la chaussée ancienne.

C/ Evolution du comportement.

Les caractéristiques d'auscultation prises en compte pour analyser l'évolution de la section expérimentale sont la déflexion, l'uni longitudinal et le relevé visuel des dégradations.

1) Evolution de la déflexion.

La déflexion est, essentiellement, un indicateur de mauvaise qualité pour le cas d'une chaussée à couche de base traitée.

En plus de la mesure effectuée en 1983, deux autres mesures ont été faites en 1987 et 1989, en vu de pouvoir suivre l'évolution de ce paramètre dans le temps.

Le tableau n°5 récapitule les résultats d'une analyse statistique des mesures des trois campagnes de mesure effectuées. Pour chaque campagne on présente la moyenne de la déflexion caractéristique D90M, l'écart type correspondant (ET) et ce pour les mesures en rive et sur l'axe :

Tableau n° 5

	1983		1987		1989	
	Rive	Axe	Rive	Axe	Rive	Axe
D 90M(1/100mm)	119	107	85	80	85	76
ET 1/100 mm	42,7	13,7	22,8	15,1	8	12

L'analyse des résultats de ce tableau permet de faire les constatations suivantes :

- Les déflexions sont plus élevées au début de la mise en service de la section. Il en est de même pour la dispersion des valeurs (surtout en rive). Comme il a été déjà mentionné, ceci peut être expliqué par le fait que la section n'avait pas encore atteint ses performances mécaniques définitives (1 mois d'âge).

- Il n'y a pas d'évolution appréciable de la déflexion entre les campagnes de 1987 à 1989.

Outre l'analyse, précédente, des déflexions caractéristiques, il a été procédé à un dépouillement des valeurs individuelles de déflexion (valeurs brutes avant lissage - mesure 1987 et 1989) qui sont plus parlantes dans le cas des couches semi-rigides.

L'histogramme de la figure n°5 présente la répartition, par classe, de déflexion en rive de chaussée. Cette répartition montre que près de 40% des valeurs ponctuelles de déflexion sont supérieures à 60/100 mm, seuil à partir duquel une couche en grave-ciment est jugée mauvaise de point de vue comportement structurel (expérience française).

Fig. 5

Répartition des valeurs
ponctuelles de déflexion

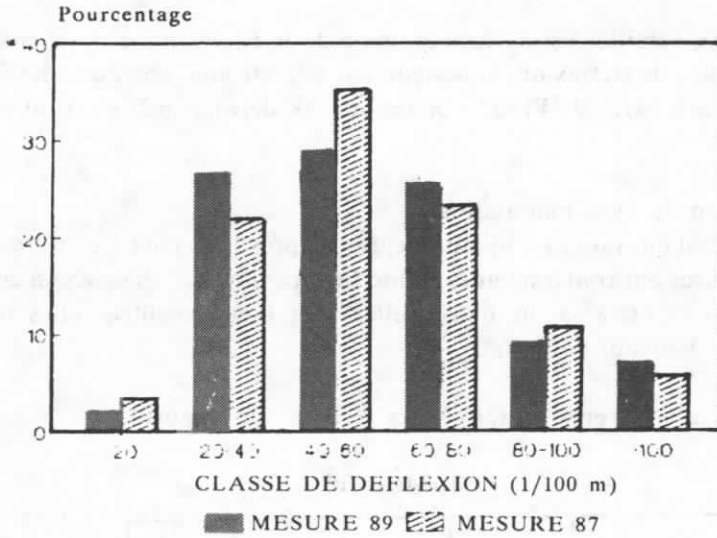
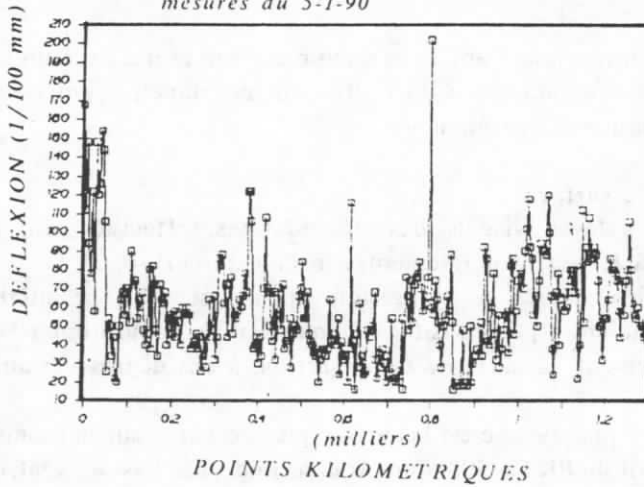


Fig. 6

Fluctuation des déflexions brutes
mesures du 5-1-90



Les valeurs moyennes de ces mesures, en rive, pour les années 1987 et 1989 sont pratiquement les mêmes : 56/100 mm, et les écarts types sont respectivement 22,1 et 23,6/100 m, ce qui montre une grande dispersion des valeurs.

Une analyse détaillée du déflectogramme de la figure n°6 montre que près de 80% des valeurs de déflexion, supérieures à 60/100 mm, correspondent aux 400 premiers mètres à partir du PK 52 + 300 et aux 300 derniers mètres avant le PK 53 + 600.

2) Evolution de l'uni longitudinal.

Les mesures d'uni faites au bump integrator après 1983 l'ont été en 1984, 1986 et 1988. Ces mesures ont confirmé une qualité bien connue des chaussées à couches de base en grâs-ciment, à savoir que si elles sont bien exécutées elles offrent et conservent un bon uni de surface.

Le tableau n°6 ci-après récapitule les résultats de mesures :

Tableau n° 6

Années	1983	1984	1986	1988
RI (mm/Km)	1744	2421	2400	2423

Ces mesures montrent que l'uni de la section est bon et n'a pas subi une grande évolution. La faible augmentation du coefficient de planéité peut être attribuée plutôt à la dégradation du revêtement.

3) Etat visuel de surface.

Les différents relevés visuels des dégradations, effectués sur la section permettent de caractériser, généralement, son état du surface. Deux années environ, après sa réalisation, apparaissent les premières fissures transversales qui étaient à peine visibles. Depuis lors, la fissuration a évolué pour concerner, actuellement, la majorité de la section, à des degrés variables.

En particulier, le phénomène est beaucoup plus accentué sur la première moitié de la section (à partir du PK 52+300) que sur la seconde. Les fissures sont, en général, perpendiculaires à l'axe de la chaussée et l'affectent sur toute la largeur.

Les fissures se répartissent de façon hétérogène sur la section; l'espacement entre fissures varie généralement, de 1,5 à 10 m.

On constate peu de fissures longitudinales isolées. Elles apparaissent plutôt combinées avec les fissures transversales pour former du faïençage à mailles fines localisé (surtout pour la première moitié côté PK 52). La comparaison des relevés de 1987 et 1989 montre que ce type de dégradation évolue rapidement et tend, en certains points, au stade de perte de cohésion entre les éléments de la maille (état critique qui nécessite une intervention immédiate).

Les autres dégradations rencontrées sont, surtout, des dégradations du revêtement, en particulier des arrachements de matériaux. Il y a lieu de signaler que mis à part quelques défléchages très limités, aucune autre intervention n'a eu lieu sur la section depuis sa réalisation en 1983.

Conclusion

Après un suivi de près de sept années, du comportement de la section expérimentale de renforcement en grave-ciment, réalisée sur la RP3, le bilan de comportement de cette section peut être donné :

- A la réalisation, le problème majeur constaté résidait dans la difficulté de maîtrise de la teneur en eau, qui a entraîné des prises rapides et une insuffisance de compactage, par endroits. Ce problème a dû être accentué par le fait que la réalisation a été faite sous des températures relativement élevées. Mis à part ce problème, la réalisation de la section est satisfaisante même avec une centrale adaptée.
- Malgré quelques insuffisances de portance et quelques dégradations localisées, mises en évidence par les moyens d'auscultation, le comportement de la section au cours de sept années de service est jugé satisfaisante et l'expérimentation est concluante.

En effet, le renforcement réalisé a permis :

- D'améliorer considérablement le service offert (le coefficient de planéité évalué, avant renforcement, à 5000 mm/Km est resté inférieur à 2500 mm/Km, depuis la réalisation du renforcement).

- D'améliorer aussi, considérablement la capacité portante de la chaussée (la déflexion caractéristique moyenne qui était évaluée avant renforcement à 230/100 mm n'est actuellement que de 85/100 mm, après sept années de service).

Les performances signalées ont été atteintes malgré que la structure initialement prévue, d'après le dimensionnement de la chaussée, n'a pas été respectée. En effet, il était prévu de réaliser un tapis de 6 cm d'enrobé sur le grave-ciment. Celui-ci a été remplacé par un enduit superficiel bicouche, sur lequel seules quelques opérations très limitées de déflâchage ont été pratiquées, durant toute cette période de service.

Ainsi on peut signaler, encore une fois, que cette première application de la grave-ciment est jugée satisfaisante tant au niveau du service offert que de l'entretien nécessaire.

En guise de conclusion, je tiens à signaler qu'étant donné l'apparition d'une dégradation critique en certains points localisés de la section et vu que l'évolution de la dégradation des structures semi-rigides est rapide (surtout en l'absence d'une couche de roulement portante), il est recommandé d'intervenir le plus rapidement possible sur la section, par la réalisation du tapis d'enrobés initialement prévu, en vue de rallonger sa durée de vie.

Cette première expérience assez concluante doit, enfin, donner suite à d'autres réalisations plus importantes et diversifiées, en renforcement de chaussées existantes ou en constructions neuves pour pouvoir maîtriser la technique et conclure, définitivement, quant à son efficacité et à son adaptation aux conditions du pays.

BIBLIOGRAPHIE

- Les graves-ciment. Numéro spécial du bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. Mars 1979.
- Les ciments et la chaux dans les routes. Numéro spécial de la revue générale des routes et des aérodromes. Janvier 1981.
- Guide pour l'auscultation des chaussées à assise traitée au liants hydrauliques L.C.P.C 1979.
- Transposition des techniques nouvelles par Mr. JAKANI 1^{er} Congrès National de la Route. Marrakech 1984.
- Planche expérimentale de la grave-ciment. Dossier LPEE n°82-16-0.1069. Septembre 1982.
- Grave-ciment. Contrôle de réalisation. Dossier LPEE n°83-164-1.103. Décembre 1983.