

SECTIONS EXPERIMENTALES DE ROUTES EN MILIEU DESERTIQUE

**MM.
N. MOUSSADDYKINE
A. BELKEZIZ**

L.P.E.E./C.T.R.SUD

L'emploi des matériaux non traditionnels dans les chaussées souples ne cesse de progresser un peu partout dans le monde. Les études et les recherches en laboratoire et en vraie grandeur ont permis d'aboutir à des résultats souvent encourageants.

Les critères, sur lesquels se fonde l'emploi de ces matériaux, sont souvent des critères économiques ou écologiques.

D'une manière globale, entrent dans cette catégorie, les matériaux trouvés à leur état naturel, dont les caractéristiques ne répondent pas aux normes et spécifications généralement utilisées en construction routière.

La valorisation de ces matériaux, quelque soit leur degré d'emploi dans d'autres contrées ne peut échapper à la loi de l'expérience propre à chaque pays; c'est ainsi que les études en laboratoire et les expérimentations en grandeur nature restent les moyens les plus objectifs pour l'évaluation et l'appréciation des matériaux à promouvoir.

Les responsables routiers marocains, comme à l'accoutumé, n'ont pas laissé passer l'occasion pour tester cette technique dans nos zones sahariennes. Ainsi, lors de la réalisation de la route Zaag-Mahbès-Farçya, il a été décidé de programmer des sections expérimentales sur cette liaison.

Le programme de suivi de ces sections a permis d'obtenir les renseignements nécessaires aussi bien au moment de la mise en œuvre qu'au stade final des travaux, et ce grâce aux essais effectués en laboratoire et in-situ.

Un dernier constat visuel récemment fait après une mise en service d'environ quatre ans, a permis d'évaluer le comportement de ces sections.

1/ PRESENTATION DES SPECIFICATIONS RETENUES POUR CES EXPERIMENTATIONS

A/ Structures de chaussée.

Les nouvelles spécifications (en cours d'expérimentation) tiennent compte des fonctions et des particularités de la chaussée en milieu désertique :

- Le trafic est habituellement faible
- Le climat aride autorise l'utilisation de matériaux plastiques, voire solubles (gypses).

a) La classe du trafic est déterminée de la manière suivante :

- La proportion de poids lourds, si elle n'est pas connue par des mesures, est de 50% (au lieu de 35% au Maroc-Nord)
- En l'absence de résultats de pesées, un poids lourd est supposé équivalent à 0,5 essieux de 13T (au lieu de 0,11 au Maroc-Nord).

b) La chaussée est formée d'une couche de base et d'un revêtement superficiel (sauf là où, exceptionnellement, la nappe phréatique est proche de la surface (Sebkhas), ou que le trafic prévu est supérieur à la classe T.4).

Dans les autres cas, les couches de chaussée sont dimensionnées conformément aux prescriptions du catalogue des structures de chaussée pour la zone aride.

B/ Classification des matériaux.

Les matériaux sont classés en premier lieu en 3 classes selon leur granularité d'après le "fuseau discriminant" représenté ci-dessous (fig. n°1).

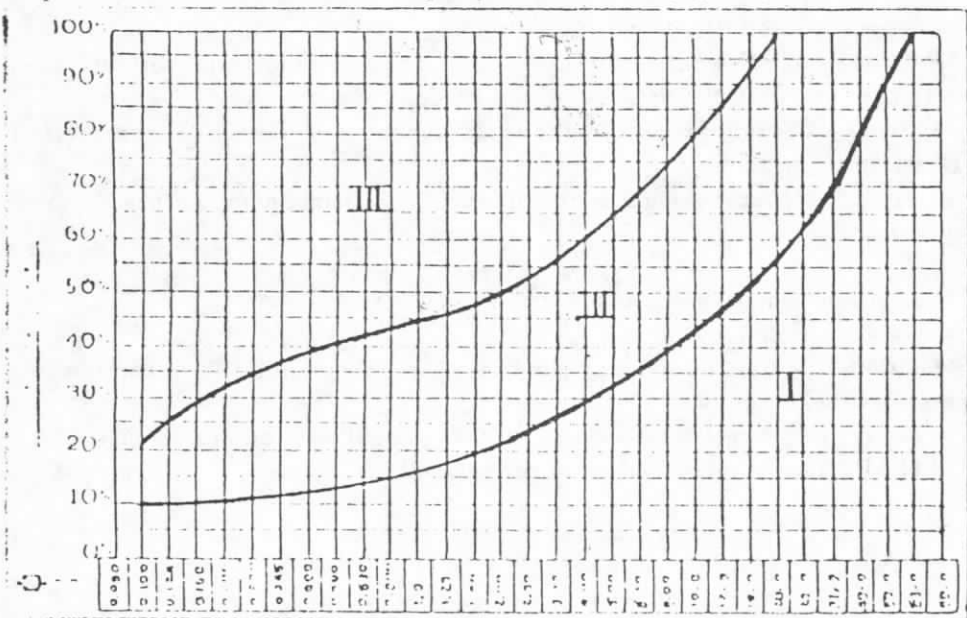


fig.1

Fuseau discriminant présentant les différentes classes

- En classe II, les matériaux dont la courbe granulométrique est entièrement à l'intérieur du fuseau (Zone II du graphique)
- En classe I, ceux dont la courbe granulométrique se trouve au dessous du fuseau (Zone I du graphique) ou en partie dans les zones I et II
- En classe III, tous les autres matériaux.

A l'intérieur de ces classes, quelques types de matériaux sont caractérisés par un ou plusieurs paramètres dont :

- Los-Angelès
- Teneur en carbonates
- Teneur en sulfates solubles
- Limites d'Atterberg

1) Types de matériaux de classe I :

a) Graves caillouteuses :

Matériaux naturels ou obtenus par criblage mécanique, écrêtement manuel ou concassage dont la courbe granulométrique ne sort de la zone II que vers le haut (gravier).

b) Graves creuses :

Matériaux généralement naturels, dont la courbe granulométrique ne sort de la zone II qu'au milieu (sable).

c) Graves à faible teneur en fines :

Matériaux généralement naturels, dont la courbe granulométrique sort du fuseau vers le bas (limon). Ce type se subdivise en deux sous-types :

- 1-3B-graves à granulométrie continue : contenant au moins 6% de sable grossier (fraction 0,5 à 2mm).
- 1-3p-graves à granulométrie discontinue : contenant moins de 6% de sable grossier.

2) Types de matériaux de classe II :

a) Graves continues :

Matériaux naturels ou obtenus par concassage, de granulométrie continue, ce type se décompose en :

II-1B : Los-Angelès inférieur à 40 (sur prise d'essai de granulométrie A).

II-1P : Los-Angelès égal ou supérieur à 40.

b) Graves discontinues :

Matériaux généralement **naturels**, de granulométrie discontinue, ce type se décompose en:

II-2B : Los-Angelès inférieur à 40

II-2B': Los-Angelès supérieur à 40 et indice de plasticité supérieur à 6 ou teneur en carbonates (CaCO_3) supérieur à 20%.

II-2P : Ne satisfaisant aucune des conditions ci-dessus.

Les matériaux ne satisfaisant pas à ces deux conditions sont reclassées en classe III.

3) Types de matériaux de classe III :

a) Graves, sols fins carbonatés :

Matériaux dont la teneur en carbonates exprimée en CaCO_3 est supérieure à 70%.

b) Graves sables et limons gypseux :

Matériaux dont la teneur en sulfates exprimée en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est supérieure à 70%.

c) Argiles très plastiques :

Argiles de limite de liquidité supérieure à 50.

d) Matériaux subnormaux :

Tous autres matériaux de classe III, à l'exception des sables sans cohésion, limons et argiles peu plastiques.

C/ UTILISATION DE CES MATERIAUX EN CHAUSSEE

Pour être utilisé, en coprs de chaussé et en accôttements, ces matériaux doivent répondre à certaines caractéristiques intrinsèques ou normalisées définies par :

- La dureté
- La plasticité
- La teneur en eau
- La teneur en carbonate CaCO_3
- La teneur en sulfate $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Etc...

Le tableau suivant résume ces conditions pour les différentes classes considérées :

Sous-Classes	Sous-Classes		Coulée de base		Coulée de fondation		Coulée de revêtement		Appareils	
	Cas général	Submersion ou nasse étiologique proche.	Cas général	Submersion ou nasse étiologique proche.	Cas général	Submersion ou nasse étiologique proche.	Cas général	Submersion ou nasse étiologique proche.	Cas général	Submersion ou nasse étiologique proche.
I	I.1 Grave caillouteuse	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.
	I.2 Grave creuse	C	I.P. < 6	C	I.P. < 6	C	I.P. < 6	C	I.P. < 6	C
	I.3 Grave à faible teneur en fines.	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.
II	II.1 Graves	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	II.2 Graves discontinues	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.
	II.3 Graves discontinues	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.
III	III.1 Graves, sables, ripio-carboglaciés	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.
	III.2 Graves, sables et limons gypseux	R.I.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.	I.P. < 6	S.R.
	III.3 Argiles très plastiques M. > 50%	N.R.	X	X	X	X	X	X	X	X
IV	IV.1 Matériaux subminéraux (sceptiles 1°)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	IV.2 Matériaux subminéraux (sceptiles 2°)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	IV.3 Matériaux subminéraux (sceptiles 3°)	X	X	X	X	X	X	X	X	X

- S.R. : Sans réserve.
 - C : Sous réserve d'être acceptable.
 - R.I. : Avec restriction très importante.
 - N.R. : Clauses non revêtues.

II/ PRESENTATION DES SECTIONS EXPERIMENTALES

Cinq sections ont été retenues pour ces expérimentations selon le programme suivant :

1) Liaison Zaag-Mehbès :

- * Section n°1 (PK.193+850 à 194+200) : Réduction de l'épaisseur de la couche de base en G.N.A. de 20 cm à 12,5 cm.
- * Section n°2 (PK.194+200 à 194+625) : En graves creuses naturelles.
- * Section n°3 (PK.220+750 à 221+200) : En graves naturelles continues.
- * Section n°4 (PK.221+200 à 221+700) : En graves discontinues de dureté correcte.

2) Liaison Mahbès-Farcya :

- * Section n°5 (PK.0+000 à 0+500) : En graves discontinues de faible dureté.

le choix d'implantation de ces sections a été dicté par des conditions pratiques du chantier dont nous citons :

- La proximité des lieux d'emprunts des matériaux utilisés sur ces sections;
- La commodité technique de la mise en oeuvre et des essais que présentent deux sections mitoyennes.

A/ Première section expérimentale.

Dans cette section, il a été décidé de tester le comportement de la chaussée avec une épaisseur minimale égale à quatre fois la dimension des plus gros éléments -soit 12,5 cm pour une grave de 0/31,5mm.

La longueur totale retenue pour cette section est de 350m.

Les essais de laboratoire réalisés sur les matériaux utilisés en couche de base ont fait sortir les résultats suivants :

Identification.

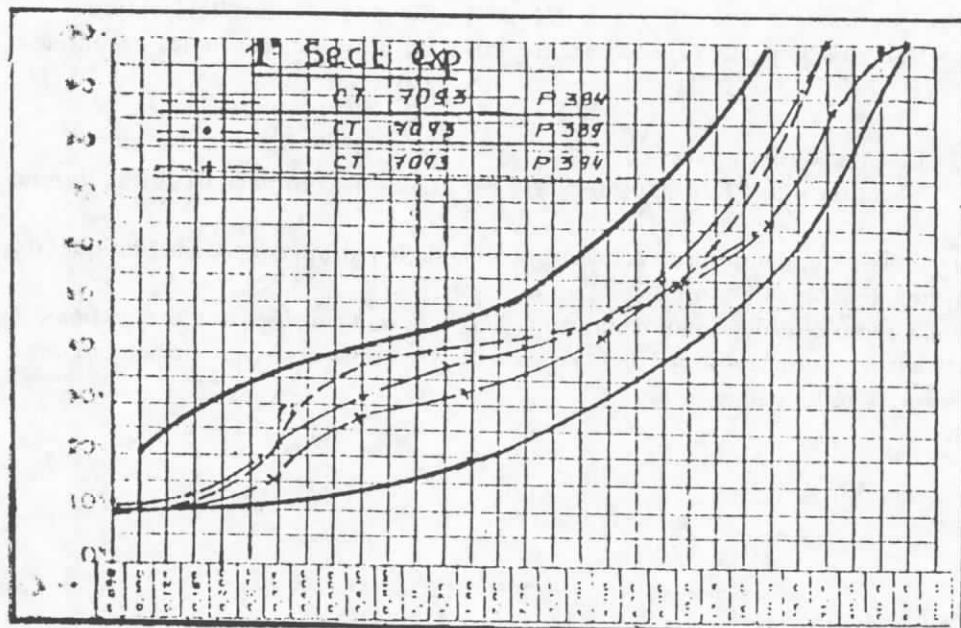


Fig n° 2

Courbes granulométriques des matériaux de couche de base (1^{ère} section).

Les matériaux analysés sont dépourvus de plasticité et la dureté mesurée à l'essai "Los-Angelès" varie entre 16 et 18%.

La propreté mesurée à l'essai Equivalent de sable donne des valeurs comprises entre 12 et 20%.

Les caractéristiques "Proctor Modifié" donnent une densité sèche maximale égale à 2,11 T/m³ pour une teneur en eau optimale de 8,5%.

Mise en oeuvre.

- Compactage in-situ :

L'atelier de compactage est composé :

- * D'un cylindre CA.30
- * D'un compacteur à pneu lesté.

L'indice de compactage atteint en place est situé entre 95 et 100% de l'O.P.M.

- Essais à la plaque et de déflexion : Les modules de déformation au premier et au second chargement (E.1 et E.2), donnent un rapport K compris entre 1,6 et 2,1. Les valeurs de déflexion obtenues varient entre 48 et 92 centièmes de mm.

Conclusion sur la 1^{ère} section expérimentale.

La réduction de l'épaisseur de la couche de base à 12,5 cm, n'a pas posé de problème de mise en oeuvre, aussi bien au niveau du malaxage qu'au niveau du compactage.

Les essais de plaque et de déflexion effectués sur la couche de base ont donné des résultats respectant largement les valeurs admises.

B/ Deuxième section expérimentale.

Les matériaux de couche de base expérimentés sur cette section sont des graves creuses naturelles.

La longueur totale de cette section est égale à 425m.

Les résultats des essais d'identification et des mesures in-situ sont comme suit :

Identification.

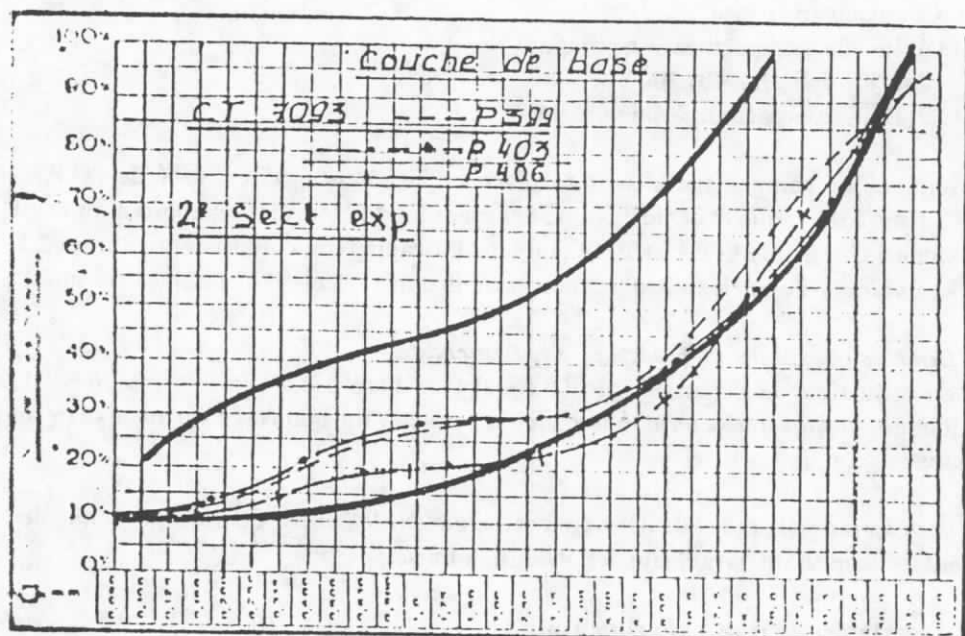


Fig n° 3

Courbes granulométriques des matériaux de couche de base (2ème section).

Le pourcentage des fines est de l'ordre de 10% seulement.

La plasticité du matériau est de 7 à 8% et la dureté mesurée par essai "Los-Angelès" est de 19%.

Les caractéristiques "Proctor Modifié" sont :

$$\sigma_{d,max} = 2,18 \text{ T/m}^3$$

$$W_{opt} = 6,6\%$$

Des essais de poinçonnement réalisés sur ces matériaux ont donné un compactage à 95% de l'O.P.M; des valeurs C.B.R. égales à 31, à zéro jour, et 18 après quatre jours d'imbibition dans l'eau.

Mise en oeuvre.

- Compactage in-situ :

Les engins utilisés pour le compactage sont les mêmes que ceux utilisés pour la première section expérimentale.

Après deux opérations de reprise de compactage, les compacités atteintes se situent entre 95,5 et 99% de l'O.P.M.

- Déflexion et essais à la plaque :

Dans les 100 premiers mètres le module E.1. correspondant au premier chargement est légèrement faible, le module E.2. atteint des valeurs élevées (entre 1110 et 1760).

La déflexion moyenne obtenue est de 95/ centième de mm.

Conclusion sur la 2^{ème} section expérimentale.

Les matériaux utilisés en couche de base sont essentiellement composés de graves creuses à faible teneur en fines. Ils sont classés en I.2.

Leur mise en oeuvre constitue le problème majeur; aussi bien au niveau du réglage qu'au niveau du compactage.

Cette difficulté réside dans le fait que le malaxage du matériau engendre une ségrégation des gros éléments en surface.

Pour remédier à cet état (ségrégation), l'entreprise a procédé à l'épandage d'une couche de sable au droit des zones affectées par ce phénomène.

Les valeurs obtenues par les essais de déflexion et de plaque sont acceptables, avec tout de même des valeurs de K élevées tout au début de la section.

C/ Troisième section expérimentale.

Les matériaux testés en couche de base de cette section sont essentiellement des graves naturelles continues.

La longueur totale de cette section est de 450 ml.

Résultat de laboratoire

Granulométrie

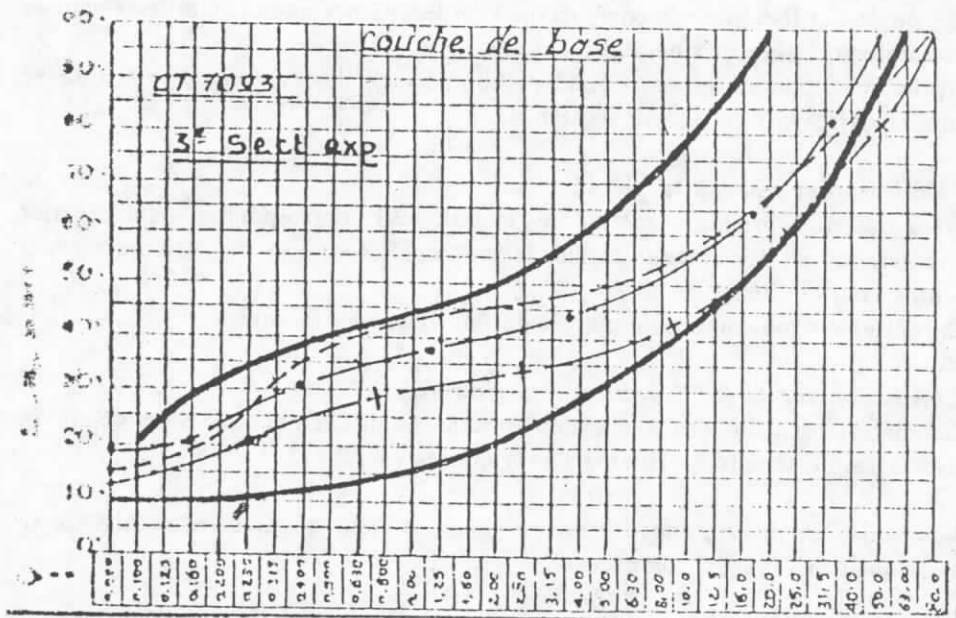


Fig n° 4

Courbes granulométriques des matériaux de couche de base (3^{ème} section).

L'indice de plasticité est compris entre 5 et 8%, et la dureté "Los-Angeles" varie de 23 à 29%.

Selon "La classification en milieu désertique", les matériaux utilisés en couche de base de la troisième section sont de type II-IB.

La densité sèche maximale est égale à 2T/m^3 pour une teneur en eau optimale de 11%.

Du point de vue portance, les indices C.B.R. obtenus pour un moulage à 95% de l'O.P.M. sont :

- Poinçonnement immédiat CBR = 71
- Imbibition pendant 4 jours CBR = 17

Mise en oeuvre.

Après trois opérations de reprise de compactage à l'aide d'un cylindre CA.25 et d'un compacteur à pneus, les compacités atteintes sur la couche de base sont comme suit :

- I.C. maximum = 100% de l'O.P.M.
- I.C. minimum = 97% de l'O.P.M.
- I.C. moyen = 98% de l'O.P.M.

Essais sur la plaque et déflexion.

Les modules obtenus au second chargement sont compris entre 790 et 1150 bars, le rapport K est inférieur ou égal à 1,9.

La déflexion obtenue est comprise entre 71 et 100 centièmes de mm.

Conclusion sur la 3^{ème} section expérimentale.

La 3^{ème} section d'essai prévue au cours de ce programme est entièrement réalisées en grave continue classée en II-IB.

Comme le laisse voir la granulométrie de ce matériau (paliers de discontinuité), le compactage des couches a posé d'énormes difficultés.

La présence des gros éléments de cette grave rend délicat le malaxage et le réglage, et empêche d'avoir une surface convenable.

Néanmoins, les modules de déformation et déflexion obtenus sur cette section indiquent un bon comportement et une bonne mise en place de ces matériaux.

D/ Quatrième section expérimentale.

Sur une longueur totale de 500 ml, les matériaux testés en couche de base sont cette fois-ci composés de graves discontinuées de dureté suffisante.

Les résultats des essais de laboratoire réalisés sur les matériaux prélevés après mise en oeuvre sont comme suit :

Identification.

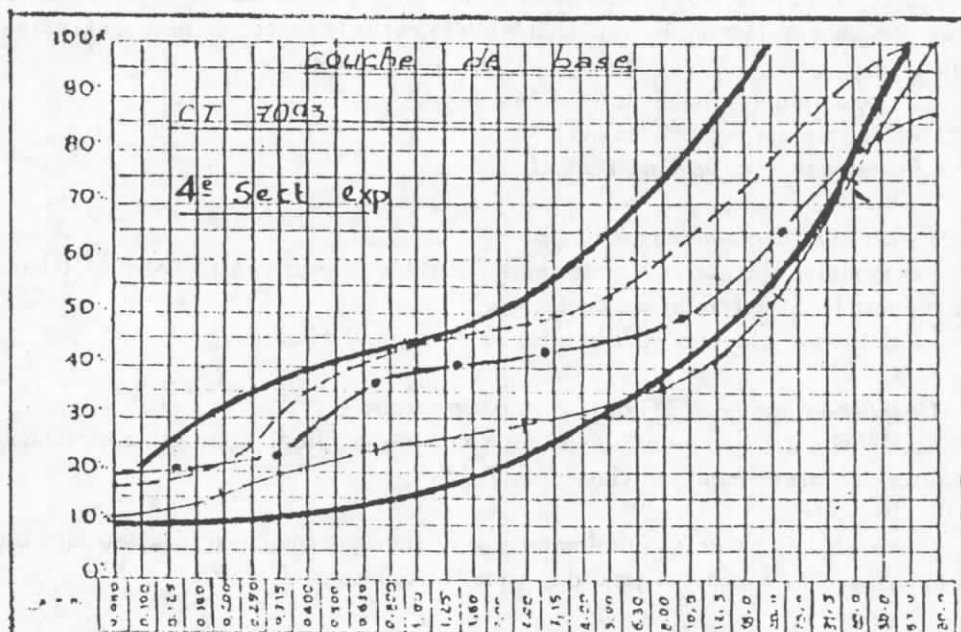


Fig. n° 5

Courbes granulométriques des matériaux de la couche de base (4^{ème} section).

La plasticité des matériaux analysés est faible ($< 6\%$), et leur dureté est de l'ordre de 23% (valeurs Los-Angelès).

Ces matériaux font partie donc de la classe II - 2B des graves discontinues.

Les caractéristiques "Proctor Modifié" sont :

$$\sigma_{d,max} = 2,13 \text{ T/m}^3$$

$$W_{opt} = 8,3\%$$

Les valeurs C.B.R. obtenues pour un moulage à 95% sont :

- Ponçonnement immédiat CBR = 65
- Imbibition pendant 4 jours 47 CBR = 47

Mise en oeuvre.

Toujours à l'aide du même atelier de compactage, la compacité relevée sur cette section est de 97 à 100% de l'optimum "Proctor Modifié".

Essais de déflexion et de plaque : Les déflexions relevées sur la couche de base de la 4^{ème} section expérimentale sont comprises entre 96 et 52 centièmes de mm.

Les modules de déformation enregistrés sont :

$$570 < E.1 < 880$$

$$1070 < E.2 < 1670$$

Le rapport K est inférieur ou égal à 1,9.

Conclusion sur la 4^{ème} section expérimentale.

Les matériaux utilisés dans cette section sont des graves discontinues. Elles se caractérisent par une granulométrie présentant un palier de discontinuité (entre 0,31 et 3,15 mm).

La plasticité et la dureté sont correctes dans l'ensemble.

La portance, même en présence d'eau, reste très bonne.

les modules de déformation et les déflexions obtenues sur la couche de base sont très satisfaisants.

E/ Cinquième section expérimentale.

La cinquième section expérimentale est située à l'origine de la liaison Mahbès-Farcva. Sa longueur totale est de 500 ml.

Les matériaux expérimentaux ici sont également des graves discontinues, mais utilisés cette fois-ci, avec une dureté faible par rapport à celle des matériaux testés sur la quatrième section.

Caractéristiques des matériaux utilisés.

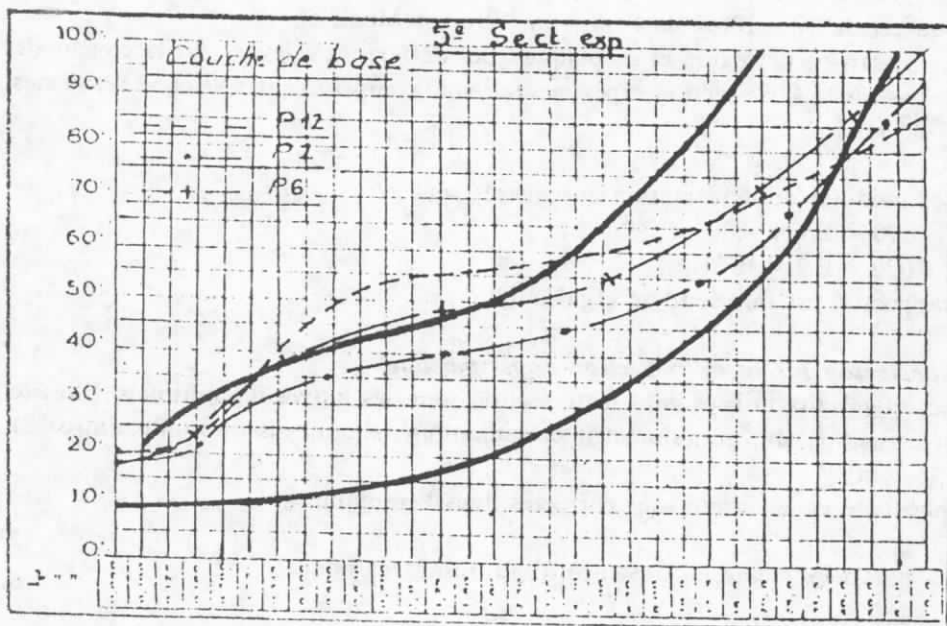


Fig. n° 6

Courbes granulométriques des matériaux de la couche de base (5^{ème} section).

Les matériaux utilisés sont dépourvus de plasticité, leur dureté, mesurée à l'essai "Los-Angelès", est de l'ordre de 37 à 40%.

Ces matériaux sont classés en II-2B

La densité sèche maximale est de $1,96 \text{ T/m}^3$ pour une teneur en eau optimale de 10%.

Pour un compactage à 95% de l'O.P.M., l'indice portant C.B.R. à poinçonnement immédiat est de 47, après 4 jours d'imbibition dans l'eau celui-ci est ramené à 37.

Mise en oeuvre.

- Compactage : Le compactage de la couche de base de la 5^{ème} section expérimentale a été effectué à l'aide d'un cylindre de type CA.25.

Les compacités mesurées (après une seule reprise) sont comprises entre 94 et 98%.

La compacité moyenne est de 96,5% de l'O.P.M.

Les modules obtenus sont comme suit :

$$107 < E.1 < 560$$

$$610 < E.2 < 1667$$

$$1,8 < K < 4,1$$

Les déflexions obtenues sont comprises entre 140 et 220 centièmes mm.

Conclusion sur la 5ème section expérimentale.

Les graves discontinues utilisées dans cette section présentent une dureté faible, il a fallu donc prendre en compte ce paramètre au moment du compactage de la couche de base. Une seule reprise a été effectuée, et elle a permis d'obtenir une compacité moyenne de l'ordre de 96,5% de l'O.P.M.

L'insuffisance de compactage en quelques points d'une part, et la faible dureté des matériaux d'autre part, étaient à l'origine des résultats modestes enregistrés par les essais de plaques et de déflexion en comparaison avec les valeurs obtenues sur les sections précédentes.

III/ REVETEMENT

Comme pour le reste du tronçon Zaag-Mahbès-Farcya, le revêtement superficiel a été réalisé avec le même dosage et dans les mêmes conditions :

- Revêtement bicouche (6/10 et 10/14)
- Cut-back 0/1 et 400/600

D'une manière générale, l'imprégnation des différentes sections n'a pas posé de difficultés, malgré la plasticité quelquefois élevée des couches imprégnées.

IV/ COMPORTEMENT DES SECTIONS EXPERIMENTALES

Le dernier constat visuel effectué au mois de Mars 1990, a permis d'évaluer le comportement de ces sections après quatre années de mise en service. Quoiqu'il soit encore prématuré de tirer des conclusions, cette évaluation permet néanmoins d'avoir des renseignements périodiques sur l'évaluation et le comportement de la chaussée dans le temps.

A/ Première section expérimentale.

Cette section réalisée avec une grave concassée (GNA) sur une épaisseur réduite à 12,5 cm; ne présente pas de différence avec les autres sections (réalisées avec une couche de base de 20 cm GNA).

Aucune dégradation n'est à signaler et son comportement est jusqu'à présent tout à fait normal.

B/ Deuxième section expérimentale.

La seconde section réalisée avec une grave creuse, présente également un comportement correct. Il n'a pas été relevé de dégradations ou d'arrachements.

On note cependant, quelques déformations de faibles amplitudes, mais qui restent sans effet sur le confort ou la sécurité de l'utilisateur.

Ces déformations étaient d'ailleurs apparues dès les premiers jours de la réalisation de cette section.

C/ Troisième section expérimentale.

La troisième section réalisée à l'aide d'une grave continue II-IB est la seule section où l'on note des zones de dégradations importantes.

On relève des arrachements représentés par la formation de nids de poules, un peignage et un plumage généralisé.

Cette situation, à notre avis, n'est pas due au matériau lui-même, mais à un défaut de mise en oeuvre qui a été signalé au moment de la réalisation de cette section.

En effet, celle-ci a été scacrifiée entièrement après son compactage par suite des anomalies constatées sur l'uni et la couche de base. Les mêmes matériaux ont été répandus mais toujours sans grand soin.

D/ Quatrième section expérimentale.

Les matériaux testés sur cette section présentent un palier de discontinuité entre la fraction 0,31 et 3,15 mm. Leur comportement en couche de base est tout à fait correcte.

Quelques déformations en tôle ondulées (remarquées lors de la mise en oeuvre) sont à signaler par endroits, elles restent toutefois peu perceptibles par l'utilisateur.

E/ Cinquième section expérimentale.

La cinquième section, malgré qu'elle fut réalisée avec une grave discontinue à faible dureté, présente un comportement correct.

Aucune dégradation n'a été relevée sur cette section.

La seule remarque à faire peut intéresser l'uni où l'on relève quelques déformations de faibles amplitudes.

CONCLUSION

L'utilisation des matériaux non traditionnels aussi bien pour des raisons économiques qu'écologiques, occupe de plus en plus une place importante dans les domaines des études et des recherches routières.

Dans de nombreux pays, des progrès sensibles ont été réalisés ces dernières années, et des recommandations ou des spécifications ont été déjà mises au point ou sont en cours d'élaboration.

Le Maroc, pour faire face aux besoins croissants en infrastructure routière, a accordé une grande importance à l'utilisation des matériaux non traditionnels. L'expérience tentée à l'aide de sections expérimentales vise dans un premier stade à exploiter les matériaux locaux, tels qu'ils se trouvent dans la nature, pour leur utilisation lors de la construction des voies de desserte locale ou de désenclavement.

En fonction des résultats obtenus sur le comportement de ces sections, d'autres recherches, éventuellement sur l'amélioration de ces matériaux seront à envisager en vue d'étudier les possibilités de leur utilisation pour d'autres catégories de voies.

Pour l'instant, il serait prématuré de tirer des conclusions, mais néanmoins, on peut d'ores et déjà évaluer certains paramètres concernant aussi bien la mise en oeuvre que le comportement de ces sections après quatre ans de mise en service :

- Du point de vue mise en oeuvre, les matériaux utilisés posent un certain nombre de difficultés au malaxage et au compactage. Cependant ces difficultés ne peuvent être attribuées uniquement à l'aspect compositionnel et structural de ces matériaux, mais également, à notre avis au matériel utilisé et à la technicité et l'expérience de l'entreprise.

- L'énergie de compactage, nécessaire à l'obtention d'une densité suffisante, est supérieure à celle fournie habituellement pour le compactage d'une couche de base en grave concassée.

- L'uni de la chaussée présente des déformations caractérisées par de très faibles amplitudes, mais qui restent sans influence sur le confort ou la sécurité de l'usager. Des efforts sont donc à faire à ce sujet, que ce soit sur les moyens utilisés pour le répandage des matériaux, ou encore pour le contrôle au stade de l'exécution du processus de mise en oeuvre.

Enfin, le dernier constat visuel (effectué au mois de Mars 1990), fait apparaître un bilan globalement positif malgré le comportement négatif de la section n°3, que nous imputons plutôt à la mise en oeuvre.

En conclusion, cette technique de valorisation des matériaux locaux non traditionnels doit être encouragée voire même recommandée pour les voies de desserte locale ou de désenclavement, surtout pour les régions à climat aride ou semi-aride. Mieux encore du fait de son intérêt économique indiscutable, cette technique peut-être testée sur des voies de catégories supérieures, particulièrement dans les régions à faibles ressources en matériaux conventionnels.