

EXPÉRIMENTATION DU GYPSE DANS LE DOMAINE ROUTIER EXPÉRIENCE MAROCAINE

M.HIMMI

Centre National d'Etudes et de Recherches Routières, ministère de l'Équipement et
des Transports, Maroc

himmi@mtpnet.gov.ma

M. AFECHKAR

Centre National d'Etudes et de Recherches Routières, ministère de l'Équipement et
des Transports, Maroc

afechkar@mtpnet.gov.ma

RÉSUMÉ

Au Maroc, le gypse en tant que minéral constitutif, est très répandu au niveau d'un grand nombre d'argiles sédimentaires tout au long de l'histoire géologique marocaine. La région de Safi (200Km au sud de Casablanca) est réputée ses grandes carrières de gypse qui permettent de fournir plusieurs centaines de tonnes par jour. Les estimations sommaires établies par les services du Ministère de l'Énergie et des Mines prévoient une réserve globale, dans la région, de l'ordre de six milliards et demi de tonnes. Une grande partie de la production est exportée à l'état brut et le reste alimente la consommation nationale, essentiellement pour l'industrie cimentière et la fabrication du plâtre.

La dureté moyenne à faible du gypse, sa sensibilité à l'eau et son altération fréquente par la marne ont fait que celui-ci ne répond pas aux spécifications actuelles des matériaux pour assises de chaussées (couches de base et couches de fondation). Ainsi, l'idée selon laquelle le gypse est un matériau à proscrire pour la construction et la maintenance routière a dû régner pendant très longtemps.

Dans le cadre du développement durable et la recherche de nouvelles possibilités de matériaux routiers, pour pallier au problème de surcoût excessif du transport de matériaux, la Direction des Routes (CNER) au Maroc, a réalisé en 1984, une route expérimentale dans la région de Safi qui est riche en gypse et qui souffre en même temps d'un déficit de matériaux répondant aux spécifications en vigueur.

Ladite route expérimentale avait pour objectif de tester toutes les possibilités qui pourraient être offertes par l'utilisation du gypse dans le domaine routier.

Le présent papier a pour objectif de faire partager cette expérience en :

- Rappelant les résultats des études de laboratoires ;
- La présentation de la section expérimentale
- La présentation du résultat de suivi
- Conclure sur le comportement du gypse en corps de chaussées.

❖ *CNER : Centre National d'Etudes et de Recherches Routières*

GYPSUM IN THE ROAD FIELD

1. MOROCCAN EXPERIENCE

The region of Safi (200Km in the South of Casablanca) is considered its big gypsum quarries which allow to supply several hundreds of tons by day. the Ministry of the Energy and Mines estimate a global reserve, in the region, of the order of six and a half billion tons. A big part of the production is exported and the rest feeds the national consumption, essentially for the industry of cement and the manufacturing of the plaster.

The weak abrasive resistance of the gypsum and its sensibility in the water make that this material does not answer the current specifications of materials used by roads administration. So, the gypsum is a wrong material and isn't acceptable by road engineers.

This paper try to present results of an experimental road in the region of Safi in Morocco, built in 1984, with gypsum. Then, it's important to point out that this area suffers from a deficit of materials answering the current specifications.

La présente communication a pour objet de :

- Rappeler brièvement les résultats des études de laboratoire sur le gypse et les mélanges gypse-marne ;
- Présenter la section expérimentale réalisée sur le CT 6511 ;
- Présenter les résultats de suivi de cette section expérimentale ;
- Conclure sur le comportement du gypse en corps de chaussée et en accotement d'après les résultats de l'expérimentation ;
- Tirer quelques recommandations pour le développement de l'utilisation de ce matériau dans les travaux routiers ;

2. GENERALITES

2.1 Définition du gypse

^A Le gypse ou sulfate de calcium est un minéral incolore ou de couleur claire qui se présente dans la nature sous deux formes :

- Forme hydratée : LE GYPSE
- $(CaSO_4, 2H_2O)$.
- Système monoclinique

- Densité = 2,32
- Dureté = 2 (rayé à l'ongle)
- Chaleur spécifique = 0,273 entre 12° et 100°c
- Forme anhydre : L'ANHYDRITE
- (CaSO₄)
- Système orthorhombique
- Densité: 2,98
- Dureté 3 à 3,5
- Chaleur spécifique: 0,275 entre 0° et 100° c
- Dans la nature le gypse se rencontre soit sous forme :
 - de masses terreuses ou saccharoïdes,
 - d'agrégats fibreux,
 - de cristaux limpides.
- L'anhydrite se rencontre sous forme :
 - de minéral généralement blanc;
 - de masses saccharoïdes;
 - d'agrégats lamellaires dont les éléments sont en disposition radiée ou parallèle.

2.2 Estimation des réserves dans la région de SAFI

Des estimations sommaires réalisées par le service des études des gîtes minéraux du Ministère et de l'Energie et des Mines (IL MAZEAS et M. NATAF), ont abouti à une réserve totale de l'ordre de 6 Milliards et demi de tonnes, répartie dans les régions suivantes :

- ARBAA SIDI LAROUSSI,
- SEBT G'ZOULA,
- OUEST DE YOUSOUFIA
- SIDI AHMED TIJI,
- SAFI.

2.3 Caractéristiques particulières du gypse

Le sulfate de calcium s'hydrate et se cristallise dans le système monoclinique pour former le minéral appelé gypse.



(Anhydrite)

(Gypse)

L'hydratation s'accompagne de gonflement (30 à 50 %).

Le gypse est soluble dans l'eau. la solubilité est variable en fonction de la température et augmente en présence du NaCl. Donc, l'ennemi principal du gypse est l'eau, d'après la documentation, des chaussées réalisées en sable gypseux dans le Sahara Algérien (précipitations inférieures à 100 mm) ont eu une durée de vie de 10 à 20 ans. Ces chaussées ont été caractérisées par des fissurations très fréquentes ne portant pas atteinte au comportement structurel de la chaussée. Des dégradations plus graves (faïençage, flaches..) ont été repérées en des points d'eau, des palmerais ou des zones où la nappe phréatique est peu profonde. Ces dégradations ont été expliquées par une perte de cohésion des assises due à la dissolution du gypse.

Un autre problème posé par le gypse est sa friabilité qui le classe parmi les matériaux susceptibles d'évoluer une fois mis en place. Aussi, le gypse se déshydrate partiellement sous l'effet du soleil et constitue une croute assez résistante.

3. L'EXPERIMENTATION SUR LE CT 6511

La région de Safi (sud de Casablanca) est riche en gypse et elle est connue par une carence en matériaux qui répondent aux spécifications en vigueur. Etant donné que sur le front de taille le gypse est souvent altéré par des couches de faible épaisseur en marne, il a été considéré intéressant de tester non seulement le gypse pur de concassage, mais aussi un mélange gypse-marne (coût moins élevé). A cet effet, il a été procédé à l'étude des formulations suivantes :

- gypse seul;
- marne seule;
- mélange : 80% gypse + 20% marne;
- mélange : 60% gypse + 40% marne;
- mélange : 80% gypse + 20% marne + 4% de chaux;
- mélange : 60% gypse + 40% marne + 4% de chaux;

L'étude en question s'est basée sur des essais qui ont porté, après identification, essentiellement sur le Proctor, le CBR, le suivi du gonflement sur éprouvettes anglaises et l'essai à la compression simple.

3.1 Résumé des résultats des essais de laboratoire

Les essais Deval sec réalisés sur le gypse ont donné une valeur moyenne de 4, qui montre que la dureté du matériau est faible. Les limites d'Atterberg déterminées pour la marne étudiée sont :

- limite de liquidité L.L = 50%
- limite de plasticité L.P = 33%
- Indice de plasticité I.P = 23%

Les tableaux n°1 et n°2 résument les résultats des essais Proctor modifié et des essais C.B.R réalisés sur les différents matériaux étudiés :

TABLEAU n°1
PROCTOR MODIFIE

Natures des matériaux	γ_d (Proctor) (T/m ³)	Teneur en eau OPM
gypse seul	2004	4.50
marne seule	1854	13.40
mélange : 80% gypse + 20% marne	2028	6.50
mélange : 60% gypse + 40% marne	1973	7.80
mélange : 80% gypse + 20% marne + 4% de chaux	1945	7.22
mélange : 60% gypse + 40% marne + 4% de chaux	1887	7.94

TABLEAU n° 2
TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS C.B.R

		Groupe1	Groupe2	Groupe3

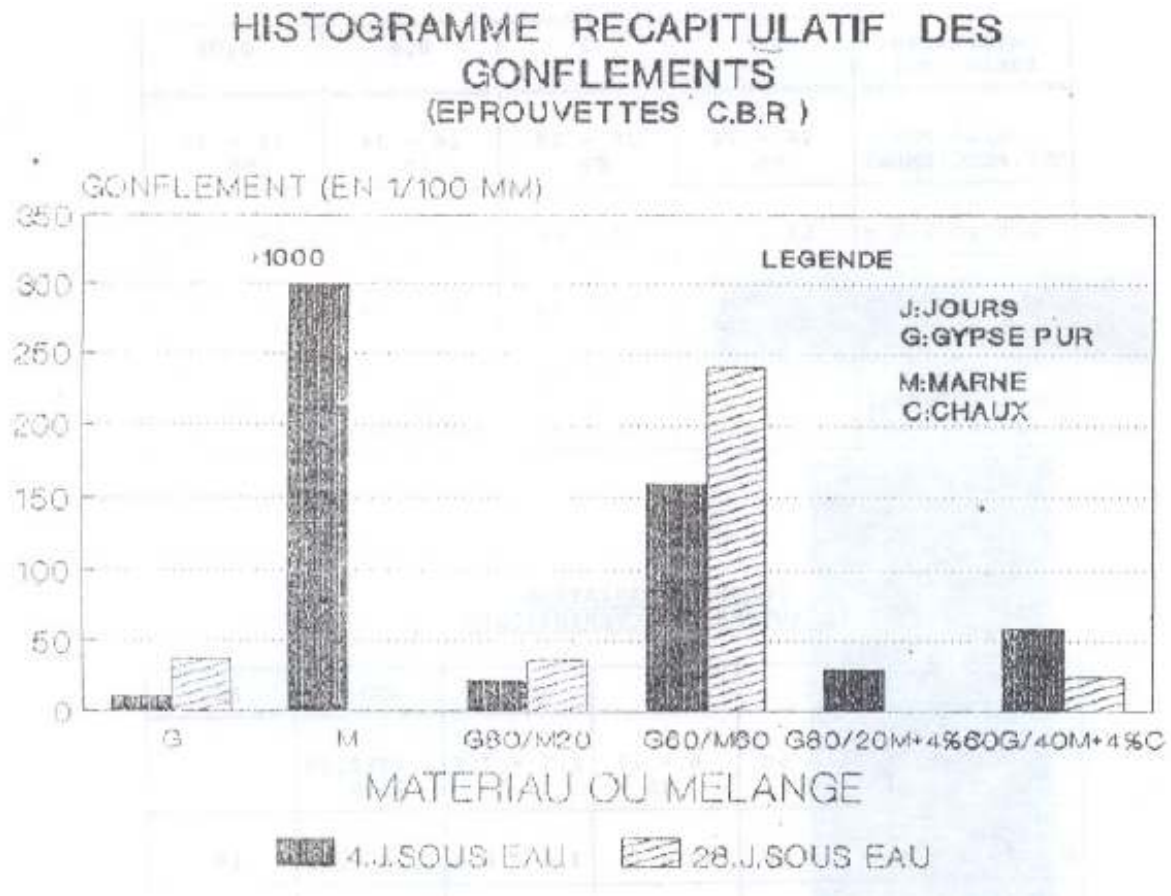
Type D'essai	Enfoncement A	Marne	Gypse	80% gypse + 20% marne	60% gypse + 40% marne	80% gypse + 20% marne + 4% de chaux	60% gypse + 40% marne + 4% de chaux
Immédiat	2,5mm	101	214	96	100	186	204
	5mm	98	*	114	113	*	*
4 jours d'imbibition	2,5mm	0,19	189	77	69	233	229
	5mm	0,25	*	98	78	*	*
28j d'imbibition	2,5mm		110	86	33		
	5mm		126	113	44		
28j à l'air+4j d'imbibition	2,5mm					*	214
	5mm					*	*
28j à l'air+28j d'imbibition	2,5mm					*	250
	5mm					*	*

* : poinçonnement rendu impossible du fait de la dureté du matériau (effet de dalle)

Ces résultats montrent que la portance du matériau, même dans des conditions sévères d'imbibition et de conservation dans l'eau, reste excellente. Les valeurs CBR pour des poinçonnements directement exécutés sur le matériau, après fabrication des éprouvettes, sont, mêmes, à la limite de la perte de leur signification et attestent d'une certaine rigidité du matériau. A la suite de ces essais, il a été conclu qu'en plus du gypse seul, des mélanges gypse-marne dans la limite d'une proportion de 20 % de cette dernière, peuvent être envisagés pour l'expérimentation in-situ.

La variante mélange gypse-marne + chaux, malgré son intérêt, mis en évidence par les essais de laboratoire, a été écarté à cause de l'absence, dans la région, d'une fabrication industrielle de la chaux.

Le diagramme de la figure suivante récapitule les résultats des essais de gonflement réalisés.



3.2 Présentation du tronçon expérimental sur le CT 6511

3.2.1 Quelques données de base

Le CT 6511 est une route qui relie la RP 12 et le Douar Hnichatt sur 10 kilomètres. L'étude géotechnique réalisée par le LPEE préconisait pour le dimensionnement une structure de 20 GNB + R5 (trafic T4, sol S2). Du PK 0 au PK 3, la route est affectée par un trafic lourd constitué par les camions d'exploitation des carrières de gypse. Le sol de plate-forme, au droit du tronçon expérimental est un limon fin brun à marron classé Ap - Lp (argile peu plastique ou limon peu plastique). Il correspond à la classe S2 selon la classification du catalogue de structure type de chaussées marocaines de 1977.

Etant donné que le matériau gypse présente des qualités moins bonnes que celles de la GNB (matériau utilisé dans la couche de base), il a été décidé de réaliser la couche de base en gypse avec une épaisseur de 30 cm.

3.2.2 Section expérimentale

Le tronçon expérimental est constituée de quatre sections de 200 m chacune, réparties de la manière suivante:

- SECTION 1: Couche de base en gypse 0/40
- SECTION II: Couche de base en mélange gypse 0/40 (80%) et marne (20%)
- SECTION III: Couche de base en mélange gypse 0/100 (80%) et marne (20%).
- SECTIONIV: Chaussée avec accotements en gypse 0/40 concassé.

L'expérimentation du gypse en accotement a porté sur les variantes suivantes :

- gypse pur 0/40 concassé seul;
- gypse pur 0/40 concassé imprégné au cut-bak 0/1 en surface;
- gypse pur 0/40 concassé surmonté de 10 cm de tuf;
- mélange gypse 0/40 +marne;
- mélange gypse+ marne + tuf.

4. SUIVI DU COMPORTEMENT DE LA SECTION EXPERIMENTALE

Après sa réalisation, à la fin de l'année 1984, la section expérimentale a fait l'objet d'un suivi de son comportement à l'aide d'un relevé périodique des dégradations et par la réalisation de différentes mesures:

Mesure de l'uni longitudinal à l'aide de l'analyseur de profil en long (APL) et à l'aide du bump integrator, Mesure de la déflexion au déflectographe Lacroix.

4.1 Mesures de la déflexion

Depuis son ouverture à la circulation, la section expérimentale a fait l'objet de plusieurs missions de mesure de déflexion au déflectographe Lacroix, la dernière a été réalisée en janvier 2011. Il y'a lieu de noter que la section expérimentale en question n'a fait l'objet d'aucune opération d'entretien .Le tableau ci après récapitule les résultats moyens par section des cinq missions de mesure.

Section	Déflexion axe (1/100mm)	Déflexion en rive (1/100mm)
---------	-------------------------	-----------------------------

	1985	1986	1988	1989	1992	1985	1986	1988	1989	1992
I	80	53	83	107	101	120	50	86	110	91
II	144	49	78	94	88	166	58	93	112	88
III	114	51	93	90	86	152	51	98	122	102
IV	179	53	96	102	100	214	51	109	134	105

Pour ce qui est de la dernière campagne de déflexion, après 27 ans, la mesure n'a pas pu être réalisée pour ne pas endommager le matériel de mesure, du fait que la route a atteint un niveau de dégradation très avancé.

D'après ces résultats de mesure on peut constater que :

A l'âge d'un mois, environ, (mesure 1985) les déflexions étaient assez élevées pour toutes les sections expérimentales. Celles-ci ont subies une nette décroissance après, à peu près, deux années de service (mesure 1986) puis elles présentent, à nouveau, une tendance à la croissance. Ceci peut traduire le mode de fonctionnement normal d'une chaussée souple (période de consolidation, période de comportement élastique, puis la période de comportement élastoplastique).

En se basant sur les valeurs moyennes des cinq années de mesure, une classification des sections expérimentales peut être tentée. Par ordre de portance décroissante, cette classification est :

SI : Gypse 0/40 (30 cm d'épaisseur)
 SII et SIII : mélange gypse-marne (30 cm)
 SN: chaussée traditionnelle (couche de base en GNB en 20 cm)

L'analyse des différents résultats présentés dans le tableau ci avant montre que, d'une manière générale, la section 1 en gypse 0/40 présente la meilleure portance, alors que la section IV, en chaussée traditionnelle présente portance la moins bonne.

Les sections II et III en gypse marneux se sont compactées, vis à vis de la déflexion, d'une manière variable, selon les mesures; mais elles sont pratiquement similaires en considérant la moyenne des résultats.

En se basant sur la mesure de déflexion, on peut conclure que les sections expérimentales en gypse ou en gypse marneux présentent un bon comportement structurel caractérisé par des déflexions qui restent inférieures aux déflexions limites des assises non traitées, pour un trafic T3 -T4. La portance sur ces sections expérimentales est, en général, meilleure que sur la section en chaussée traditionnelle en grave non traitée de type B : GNB (on ne doit cependant pas oublier la différence d'épaisseur des couches de base).

4.2 Mesure de l'uni longitudinal

Mesure à L'APL

Les mesures ont été effectuées en Janvier 1985, Mars 1985 et en Janvier 1988. Le tableau n04, ci-après, présente les résultats moyens (pour les grandes, moyennes et petites longueurs d'ondes) des coefficients de planités des mesures effectuées dans le sens aller (RP12 ----->N'GA).

Sections	CP40			CP10			CP2,5		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
I	277	504	350	135	135	262	85	89	240
II	324	476	306	142	193	240	84	90	221
III	463	500	389	157	183	249	77	102	230
IV	249	494	361	104	130	245	55	57	233

A : mesures du 04/01/85

B: mesures du 03/06/86

C: mesures du 27/06/88

En limitant l'analyse aux résultats des CP2,5, correspondant aux petites longueurs d'ondes qui peuvent refléter la qualité d'uni due au comportement, en surface, des matériaux expérimentés, on peut constater ce qui suit :

Les valeurs du CP2,5, qui étaient sensiblement les mêmes, juste après la construction et après 6 mois, ont subi plus de 150 % d'augmentation après 3 années de service.

L'analyse des résultats par section montre que les coefficients de planité sont sensiblement les mêmes pour les trois sections expérimentales en gypse et en gypse marneux. Ceux-ci sont cependant, légèrement inférieurs sur la section en chaussée traditionnelle.

En se basant sur ces mesures, on peut conclure que les sections expérimentales ont subi une forte évolution de l'uni longitudinal, après 3 années et demi de mise en service (la classe d'uni a passé de moyen à mauvais).

Une autre mesure effectuée en 1990 à l'APL, avec un traitement des mesures en notes d'uni, a permis d'aboutir à la conclusion suivante : l'uni sur le tronçon expérimental est mauvais pour toutes les longueurs d'ondes. Il est mauvais d'avantage dans le cas des petites longueurs d'ondes.

L'évolution de l'uni, de manière similaire, sur la section en chaussée traditionnelle, laisse penser que cette évolution n'est peut être pas due à un comportement spécifique du matériau gypse ou du mélange gypse-marne, mais il pourrait être due au mode de mise en œuvre.

4.3 Mesure de planéité au bump integrator

Quatre mesures au bump integrator ont été effectuées en 1988 , en 1990 , en 1992 et en 2002 ont confirmé que l'uni est mauvais sur les sections expérimentales.

Depuis le début, (RI moyen =4500 mm/km). Ces mesures ont montré, également que :

- L'uni est légèrement meilleur sur la section témoin en GNB;
- L'évolution de l'uni est plus appréciable pour les sections II et III (mélange gypse-marne) que pour la section I (gypse seul).
- L'uni de la dernière campagne était complètement détérioré (6000mm/Km).

4.4 Uni transversal

L'Uni transversal des sections expérimentales a été effectué par un relevé au transversoprofilographe . Huit profils en travers ont été relevés en Janvier 1985 (juste après la réalisation) puis en Mars 1988(2 profils par section). Les résultats (pentes et variances) des relevés sont comme suit :

Section	Pente moyenne	Variance (10 ⁻⁴)	
		1985	1988
I	0.150	14.0	4.7
II	0.250	21.5	10.8
	0.350	8.6	3.5
III	0.450	10.5	17.1
	0.550	12.0	7.4
IV	0.650	11.4	6.1
	0.750	9.2	7.4

L'analyse des résultats précédents permet de constater qu'il y a eu une évolution des profils choisis entre 1985 et 1988. Cette évolution est particulièrement plus marquée pour la section I en gypse 0/40 seul et pour la section II en mélange gypse 0/40 à 80% et marne à 20% .On ne constate pratiquement pas d'évolution dans le cas de la section

témoin en chaussée traditionnelle. Ceci laisse penser à ce que cette évolution du profil en travers caractérise le matériau gypse et peut être due à sa forte friabilité qui peut entraîner la modification de sa granulométrie sous trafic.

Par ailleurs, les valeurs de la variance permettent de conclure que l'état du profil en travers est assez bon pour toutes les sections expérimentales.

En 2002 et 2011, les profils sont bien surs très altérés.

4.5 Relevé visuel des dégradations

Chaussée

Durant les six premières années la section expérimentale a été caractérisée par un état généralement bon. Son état en 2002 était qualifiée de moyen, en 2011, après 27 ans, la chaussée est très dégradée, cependant on peut toujours constater des sections dispersées qui sont saines.

L'analyse du relevé visuel des dégradations au niveau des quatre planches expérimentales a permis de conclure ce qui suit :

- la première section en gypse pur et la seconde en mélange gypse 0/40 + marne ont été les premières sections qui ont connu des dégradations sous forme des fissures fines ramifiées accompagnées de quelques affaissements localisés qui sont plus marquées sur la première section en gypse pur 0/40. En deux endroits localisés sur la première et la deuxième section, ces fissures ont évolué vers des petits nids de poule.
- La section II (gypse 0/40 et marne) ,se distingue des autres par une dégradation importante, au niveau d'un ouvrage hydraulique (buse), survenue à l'occasion d'une forte stagnation d'eau au niveau de l'ouvrage, entraînée par un colmatage de la buse. Ceci a ainsi favorisé une chute de portance et probablement une dissolution du gypse. Par ailleurs cette section s'est caractérisée par quelques arrachements localisés.

Accotements

De façon générale, les sections d'accotements en gypse pur, en gypse/marne seul puis les sections en ces mêmes matériaux avec une imprégnation au cut-back se sont bien comportés. La couche d'imprégnation a cependant, été arrachée en plusieurs endroits, sous l'action de la circulation, lors des croisements et des dépassements (chaussée de 4m de large), et sous l'action de la circulation des charrettes.

Après neuf ans de mise en service, ces accotements pouvaient être caractérisés par :

- Bonne liaison entre la chaussée et l'accotement (en général) avec absence de dénivelée importante;
- Bonne tenue de l'accotement face à la circulation des charrettes, très importantes sur cette route;
- Peu de dépôts de matériaux. L'action érosive des pluies sur les sections d'accotement en gypse seul ou en gypse imprégné au cut-back semble être très faible, à l'inverse à ce que l'on s'attendrait (hypothèse de dissolution du gypse).

Les sections d'accotements construites avec une couche de tuf (10cm) en surface se distinguent nettement par une dégradation de cette couche.

CONCLUSION

Après un suivi (27ans) du comportement de l'expérimentation du gypse en couche de base et en accotements de chaussée (CT 6511), nous pouvons conclure ce qui suit :

Expérimentation en couche de base :

les mesures de déflexion mettent en évidence un bon comportement structurel (déflexions inférieures aux limites admises pour le niveau de trafic considéré). La portance est si bonne sur les sections en gypse ou en mélange gypse-marne que sur la section en chaussée traditionnelle, avec un résultat, encore meilleur, sur la section en gypse pur 0/40 (S I).

Les mesures d'uni longitudinal montrent que l'uni est plutôt mauvais et a subi une altération particulièrement pour les sections correspondantes au mélange gypse-marne. Ce niveau d'uni peut être, néanmoins, considéré comme étant acceptable sur ce type de route vue le niveau de trafic et la nature de la desserte.

Le relevé visuel des dégradations a permis de constater que l'aspect visuel général des sections expérimentales était resté assez bon pendant pratiquement neuf ans, ce qui correspond à une durée de vie qui peut être qualifiée d'acceptable

Expérimentation en accotement :

Mis à part les sections d'accotements ayant reçu une couverture en Tuf , qui a été dégradée sous l'effet de la circulation lors des pluies, de façon générale, les autres variantes se sont bien comportées. Ceci confirme les bons résultats obtenues, auparavant, sur la RP12 et la RP8 .

Ainsi, de façon globale, le comportement du matériau gypse en couche de base et en accotements du CT 6511 peut être qualifié de bon, excepté la qualité d'uni insuffisante,

depuis la réalisation des planches expérimentales. Cette insuffisance pourrait être améliorée sur d'autres sites en soignant l'exécution des travaux et en procédant à un meilleur choix de la granulométrie du matériau (diamètre maximum) et des techniques de mise en œuvre.

Les réserves importantes du gypse dans la région de SAFI (sud de Casablanca), le climat favorable de la région, la punerie des matériaux dans la région, le prix intéressant du matériau comparé à celui d'autres matériaux (répondant aux spécifications en vigueur), transportées, souvent sur de longues distances et les résultats concluants de cette expérimentation, sont tous des atouts permettant de conclure que ce matériau peut être utilisé :

- Comme matériau de couche de base pour les routes faiblement à moyennement circulées ;
- Comme matériau de couche de base pour les routes de désenclavement du monde rurale ;
- Comme matériau sélectionné pour accotements.

Une attention particulière doit être prêtée au drainage des chaussées, l'eau étant l'ennemi principal de ce matériau.

Les résultats très positifs obtenus d'après le comportement du gypse en accotement laissent penser qu'il serait très intéressant d'expérimenter la possibilité d'étendre l'utilisation de ce matériau pour l'aménagement des pistes non revêtues dans la région dans le cadre du programme de désenclavement du monde rural.

RÉFÉRENCES

- 1- Le gypse de la région de SAFI - gisements - Utilisations marché. Par J.L. MAZEAS et M.NA TAF. Service des gites minéraux - Rabat.
- 2- Dossier du LPEE N° 81.16.0.09412.1982. Etude de dimensionnement du CT 6511.
- 3- Dossier du LPEE N° 83.164.0.104 - 1985
- 4- Le gypse, matériau routier, par M. AHMAR - LEGROUM et MI L.AYACHE premier congrès national de la route. Exposés complémentaires.
- 5- Dossier de l'expérimentation du gypse. Centre National d'Etudes et de Recherches Routières (CNER).