

UTILISATION DES MATERIAUX LOCAUX DANS LA CONSTRUCTION DES ROUTES AU SAHARA ET CRITERES DE CHOIX

B. ALLOUL

Université des Sciences de la Terre Houari - Boumediene – Alger – Algérie

A.BENTABET

EEG SIMECSOL – Sèvres – France

abentabe@paris.simecsol.fr

RESUME

Le climat des régions sèches du Sahara permet l'utilisation en construction routière d'une large gamme de matériaux qui seraient prohibés dans les zones humides à sub-humides des régions méditerranéennes. Leurs gisements sont guidés par des conditions géologiques et géomorphologiques locales. Les spécifications pour leur utilisation en technique routière tiennent compte des critères géotechniques en relation avec une zonalité climatique. Parmi les matériaux les plus couramment employés on peut citer :

- *Les sables de dunes* qui recouvrent d'immense superficie que sont les grands ergs orientaux et occidentaux. Ces sables sont soit à dominante siliceuse soit gypseux soit arénitique en fonction de la géologie régionale.

- *Les sables d'arènes granitiques et gneissiques* qui couvrent une grande partie du Hoggar. Ils sont le produit d'altération exogène en place de la partie supérieure du massif granitique ou gneissique des massifs cristallophylliens.

- *Les basaltes altérés* qui se débitent soit en boules soit en grave à granulométrie continue sur une épaisseur d'altération d'épaisseur voisine de 1 à 2 mètres. Ils sont liés à des zones d'épanchement basaltiques ou andésitiques du Hoggar. Ces roches sont souvent utilisées en corps de chaussée dans la région de Tamanrasset.

- *Les argiles de la série de Zarzaitine du Trias* dans la région d'In amenas qui se débitent en grave à l'extraction. Ce sont des roches très indurées et compactes

- *Les tout venants de plateaux*. Ce sont des immenses surfaces recouvertes par des formations superficielles sablo-argilo-graveleuses

- *Les encroûtements calcaires, gypseux ou mixtes* plus connus sous le nom de *tufs* couvrent de grandes superficies tant dans le domaine de l'Atlas saharien que dans la plate-forme saharienne.

A partir des cas d'études d'axes routiers du Sahara et des études de recherche réalisées dans différents laboratoires dont celui de l'université d'Alger, cette communication des spécifications admises quant à leur utilisation dans le domaine routier ainsi que de certains désordres qui sont apparus sur certains ouvrages routiers ces trente dernières années..

Mots clés : *Construction routière au Sahara – Sable de dunes – sables d'arène granitiques – basaltes altérés – argiles de la série de Zarzaitine – Tout venant des plateaux – encroûtements calcaires*

1. INTRODUCTION

Le développement des infrastructures routières et aéroportuaires vers les années 1955/56 en ALGERIE a créé un besoin important en matériaux de chaussée. Pour l'Algérie du Nord les ingénieurs de l'époque avaient résolu le problème de choix de ces matériaux en se rapprochant des moyens et techniques européens et américains. Ainsi le relief accidenté et une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 600 mm ont permis l'utilisation de matériaux locaux tels que tout venants d'oued et concassés de roches. Pour les régions sèches de l'Algérie du Nord (pluviométrie comprise entre 100 et 350 mm), et les zones sahariennes (pluviométrie < 100mm), les distances de transport étant excessivement grandes et les moyens réduits ont obligé les ingénieurs à utiliser soit : des encroûtements calcaires, gypseux, ou mixtes, soit des tout venants de plateaux, des arènes granitiques, ou parfois même des argiles plus ou moins indurées. Toujours guidés par des techniques et spécifications de pays tempérés, les ingénieurs de l'époque ont utilisé parfois à tort ces matériaux locaux. Les premières chaussées en « tufs » présentaient des épaisseurs en couche de base de 40 à 50 cm. Compte tenu des trafics de l'époque, ce dimensionnement était exagéré. D'autres matériaux inadaptés ont été utilisés, les chantiers ont durés en longueur et certaines routes se sont vite dégradées.

Petit à petit des ingénieurs tels que FENZY, FONKENEL, se sont intéressés à la pédologie, à la géologie et à la géotechnique de ces matériaux et à l'adaptation de la technique classique aux zones arides et semi-arides. Les épaisseurs de chaussées ainsi que les déboires ont commencé à diminuer. L'étude géotechnique et géologique de différents itinéraires routiers a permis de recenser une large gamme de matériaux sahariens. Parmi ces axes étudiés entre 1956 et 1960, on peut citer :

Ghardaia – El Golea	: 270 Km
Ghardaia – Ouargla	: 200 Km
Ouargla – Hassi Messaoud	: 100 Km
Fort Allemand – Edjele	: 140 Km
Tougourt – Square Bresson	: 80 Km
Square Bresson – Ouargla	: 160 Km
El-Golea – In Salah	: 420 Km

C'est ainsi qu'en 1965, au congrès de la route qui s'est déroulé à Beni-Abbés (ALGERIE), ces spécifications sahariennes ont été créées sous la direction de Monsieur FENZY. Après cette mise au point, les ingénieurs du LCPC Division d'ALGERIE, d'abord et du LNTPB (Laboratoire d'Algérie) ensuite, ont affiné cette technique tout en conservant les principes acquis avant 1965. Pour les matériaux du grand Sud (pluviométrie annuelle < 100 mm), la majorité d'entre eux obéissent à ces spécifications. Pour les matériaux des zones semi-arides à steppiques, certains principes tels que « phénomène de prise » des tufs méritent d'être vérifiés, pour dégager en fonction des techniques modernes, des critères plus réalistes de choix et de mise en place.

2. APERÇU SOMMAIRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DE L'ALGERIE

Le relief du Maghreb en général et de l'ALGERIE en particulier est caractérisé par une série de chaînons grossièrement orientés Est-Ouest, séparés par des dépressions de même orientation où coulent des oueds tels que Chellif, la Soummam. Ces montagnes représentant les chaînes de l'Atlas, lui-même subdivisé en Atlas tellien ou tell et l'Atlas saharien. Plus au sud s'étend la plate-forme saharienne sur plus de 700 km, qui se continue par l'immense chaîne du Hoggar.

3. APERÇU CLIMATOLOGIQUE

La carte pluviométrique montre des isohyètes décroissants entre les zones côtières arrosées (hauteur de pluie annuelle >600 mm) et les zones sahariennes arides ($H < 100$ mm).

Zone I : Méditerranéenne humide	$H > 600$ mm
Zone II : Méditerranéenne sub humide	$600\text{mm} < H < 350$ mm
Zone III : Semi-aride ou steppique	$350\text{ mm} < H < 100$ mm
Zone IV : Aride ou désertique	$H < 100$ mm

Cette répartition est dirigée Est – Ouest par le relief , mais l'altitude et certains couloirs à micro – climat la complique .

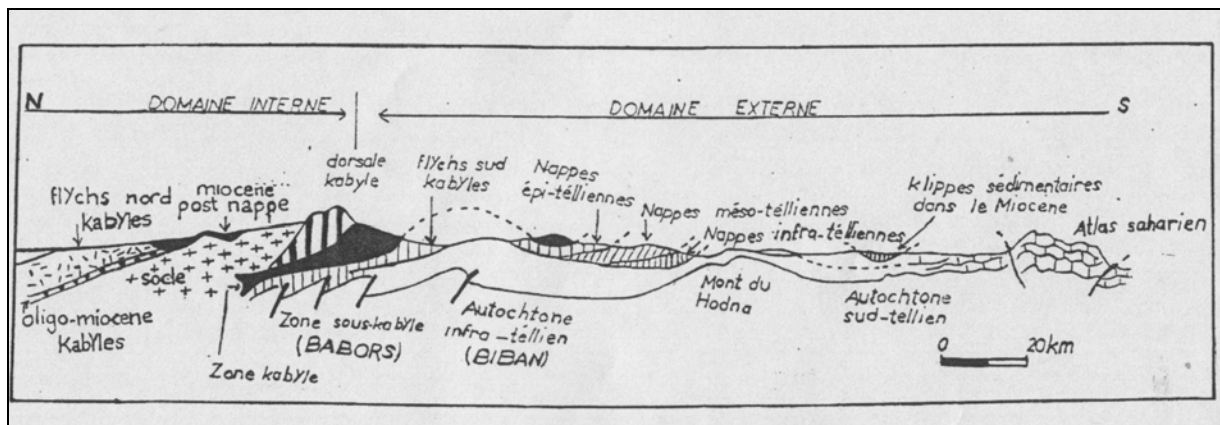


Figure 1 : Coupe géologique synthétique Nord -Sud de l'Algérie

4. LES MATERIAUX SAHARIENS

Considérant plusieurs facteurs dont : la pluviométrie très faible parfois < 30 mm de pluie par an , le trafic aussi très faible (< 100 PL / j) et une géologie assez monotone (grandes séries de formations superficielles uniformes), les matériaux disponibles aux abords des tracés ont été identifiés et classés selon des critères géotechniques qui permettent leur utilisation dans différents organes du corps de chaussée. Les matériaux ont été classés en trois grands ensembles selon des critères granulométriques, (fuseau de référence dit de Beni Abbes -1965) de cohésion, et de dureté de leur squelette.

1. Matériaux à angle de frottement élevé , appelés aussi matériaux à ossature analogues aux matériaux classiques des régions humides . Ces matériaux doivent s'inscrire dans le fuseau de référence , le coefficient Los Angeles doit être inférieur à 40. Un I_p compris entre 6 et 12 . Il est de plus souhaité d'avoir une résistance à la compression voisine de 10 à 15 bars. Les sols rentrant dans cette catégorie sont le plus souvent : des tout venants d'oueds , des tous venants de plateaux, des tout venants gypso-calcaires graviers et cailloux calcaires avec fines gypseuses .
2. Les matériaux à cohésion élevée qui doivent leur résistance en compression simple à l'existence de fines calcaires, gypseuses et argileuses. Les combinaisons et les proportions entre ces trois minéraux dans la partie $< 0.08\text{mm}$ en fait un critère de choix pour les assises de chaussées. Il s'agit des

tufs calcaires, des encroûtements salins gypseux et d'autres tout venants à dominante argileux tels que les arènes granitiques. Si les tufs calcaires présentent parfois des granulométries le plus souvent grossières < 20 mm, les tufs gypseux ou sables gypseux présentent des granulométries souvent de type sable bien au dessus du fuseau avec des éléments < 0.08 mm dépassant les 50%.

3. Les matériaux intermédiaires : Ce sont des matériaux possédant une ossature insuffisante avec des courbes granulométriques sortant partiellement ou totalement du fuseau et une résistance à la compression simple insuffisante. Il s'agit là de tout venants de toute sortes mal gradués dont les proportions combinées des différents minéraux de calcaire de gypse et d'argile satisfont au cas par cas les conditions d'utilisation.

5. LES MATERIAUX A OSSATURE

5.1. Les tout venants d'oued

Il existe de multitudes de petits oueds dans les régions sèches. Les pluies étant très rares et violentes lorsqu'elles surviennent, trouvent le sol sec et facilement érodable. Les forts courants qui se créent charrient d'importantes masses de sols et les déposent selon les lois de la sédimentation tout au long de leur parcours. Cependant, lorsque les chenaux d'écoulement sont assez vastes, ils recèlent des matériaux qui sont parfois plus appropriés que les matériaux d'épandage. Ils sont plus propres souvent mieux gradués. Ils conviennent mieux au corps de chaussée.

5.2. Les tout venants de plateaux

Ce sont des matériaux de hamadas ou des colluvions de pentes .La fragmentation est souvent due au gel. Les épaisseurs des gisements ne sont pas généralement importantes. Des niveaux peuvent être partiellement encroûtés en calcaire ou en gypse et parfois mixte.

6. LES MATERIAUX A COHESION ELEVEE

6.1. Les tufs

Les encroûtements tuffacés existent dans la plupart des pays du bassin méditerranéen. Ils occupent actuellement des zones à climat sec. En ALGERIE ils couvrent environ 50% de La superficie du Nord du pays (J.H DURAND 1959). C'est une formation superficielle d'origine pédologique qui se développe aux abords des massifs calcaires ou marneux d'Afrique du nord et du Sahara.

6.1.1. Précision sur le mot tuf :

le petit Larousse illustré (édition 1980) donne la définition suivante du mot tuf « roche poreuse légère formée de cendres volcaniques cimentées (cinérites) ou de concrétions calcaires déposée dans les sources ou dans les lacs ». pour le géologue une définition plus élaborée est donnée par : L.MORET (1962)

« Les tufs volcaniques sont des produits de projection volcaniques, lapillis ou cendres, stratifiés par l'action de l'eau » .« Les tufs sédimentaires sont des incrustations irrégulières et spongieuses qui se produisent à l'émergence des sources calcaires et qui renferment de nombreux moulages de plantes et de coquilles. Lorsque ces sources s'épanchent dans un bassin lacustre , le calcaire précipite en une fine poudre cristalline qui se stratifie en couches régulières. La roche est alors plus compacte qu'un tuf et prend le nom de travertin. « En Afrique du Nord le problème est plus complexe. Les formations appelées « tufs » sont en vérité des encroûtements calcaires, gypseux ou mixtes, néanmoins la liaison entre les tufs définis par L.MORET (1962) et les encroûtements, peut se trouver réalisée dans la nature sous forme de passage graduel entre l'une et l'autre des formations ».

6.1.2. Situation et extension géographique des tufs

La carte de J . H . DURAND (1959) montre que les tufs calcaires occupent les zones climatiques II et III . Ils existent néanmoins en zone I mais souvent à l'état peu différencié et en zone IV . Ils se trouvent rarement en altitude . Ils sont présents dans les bassins relativement plats irrigués par les eaux de ruissellement provenant des massifs calcaires limitrophes .Les tufs à dominante calcaires couvrent approximativement une superficie de 300.000 Km² en Algérie. Les tufs d'encroûtement calcaire, très répandus dans les zones à climat sub-humide à semi-aride d'Algérie sont des formations pédologiques qui datent pour les plus anciennes du Villafranchien ou Moulouyen. Le calcaire solubilisé des massifs montagneux est transporté parfois très loin et déposé dans les sols. Le calcaire se concentre vers la surface et forme une carapace de 1 à 2 m d'épaisseur.

Les encroûtements gypseux sont des formations analogues aux tufs calcaires. Ils sont très abondants dans les régions à climat aride où le gypse existe déjà dans les formations géologiques anciennes (Crétacé à Miopliocène). Les fluctuations de la nappe phréatique ainsi que l'évaporation de la frange capillaire entraînent le dépôt du gypse. Les encroûtements tendres, d'extraction facile sont utilisés comme matériaux de chaussée et appelés sables gypseux.

Les calcaires lacustres de Constantine, parfois encroûtés en surface sont aussi considérés comme tufs mais ne le sont que parfois dans leur partie sommitale.

Les calcaires pulvérulents d'Alger, appelés aussi tufs appartiennent à une formation molassique de delta d'âge Astien.

6.1.3. Critère de choix des matériaux

Les tufs d'encroûtements calcaires sont constitués d'une carapace calcaire et d'un horizon inférieur pauvre en calcaire et qui passe graduellement au sol d'assise de l'encroûtement. Cette carapace comprend une dalle de 3 à 4 cm d'épaisseur fortement calcaire (90 à 95%), le reste étant essentiellement du quartz et de l'attapulгите. Sous la dalle, la croûte est aussi essentiellement calcaire avec une plus forte teneur en argile fibreuse dans la fraction fine. Les grains de calcite qui composent cette fraction poudreuse de l'encroûtement, sont très fins (1/10 μ à 10 μ) c'est l'importance de ces fines calcaires et argileuses qui va jouer un rôle dans la qualité du matériau de chaussée qu'est le tuf.

Des critères de choix liés aux essais de laboratoire et aux études des formations géologiques en place doivent être définis séparément pour les matériaux essentiellement

calcaires et essentiellement gypseux. Une déduction logique doit aboutir à la définition des critères de choix et d'utilisation des matériaux où le gypse et la calcite se côtoient dans des proportions quelque peu équitables.

Le CBR imbibé à 4J pour ces régions steppiques à désertiques est en vérité un essai non adapté car il pleut très peu. Mais ces pluies rares mais violentes pendant un temps très court (quelques heures) amènent le sol à s'imbibber fortement. A cela s'ajoutent des phénomènes de succion qui maintiennent les matériaux sous la chaussée dans un état d'hygrométrie, pour la période hivernale, voisin de la teneur en eau OPM. Nous raisonnerons en CRR imbibé et non, en résistance à la compression simple à sec car cette dernière représente un état idéal qui n'est pas réalisé toute l'année.

L'étude d'une cinquantaine d'échantillons prélevés lors de l'étude du renforcement de la RN1 entre Djelfa et Laghouat (100 Km) a montré que le produit $(I_p \times \frac{0,4}{100})$ se corrèle avec le pourcentage en « carbonate + sulfate » et le CBR imbibé à 4J. Signalons que le pourcentage en sulfate est faible, (de l'ordre de 0 à 5%).

Pour un indice de groupe simplifié faible (<2) les matériaux présentent des CRR> 80% même si le pourcentage en calcite + gypse est faible < 20%. Pour avoir un CRR>80% il est nécessaire, pour des matériaux fortement carbonatés ($\text{CaCO}_3 = 60\%$) d'avoir $(I_p \times \frac{0,4}{100}) < 3$. Les critères actuels de choix des matériaux sont plus restrictifs, L' I_p doit être < 13% en zone III et $IP < 10$ en zone II. La granulométrie étant définie indépendamment de la plasticité, rejoint la corrélation liée au CBR.



Figure 2 : Paysage de l'Atlas saharien : Talus de route en encroûtement calcaire feuilleté



Figure 3: Route nationale N° 3 au niveau d'El Oued : couche de base en sable gypseux bonne tenue de la chaussée

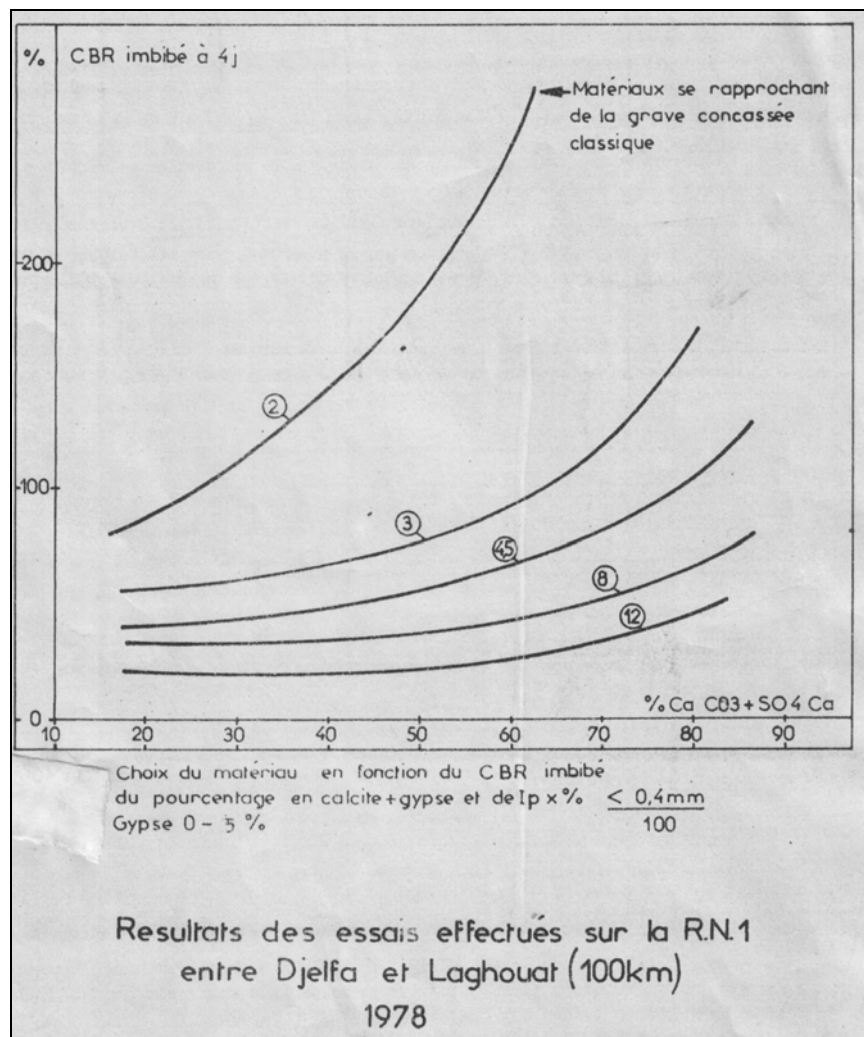


Figure 4 : diagramme CBR imbibé avec le % en carbonate et sulfate paramétré par IP
* < 0.4/100

Fig: 80 Utilisation des tufs en couche de base
Zone II et III.

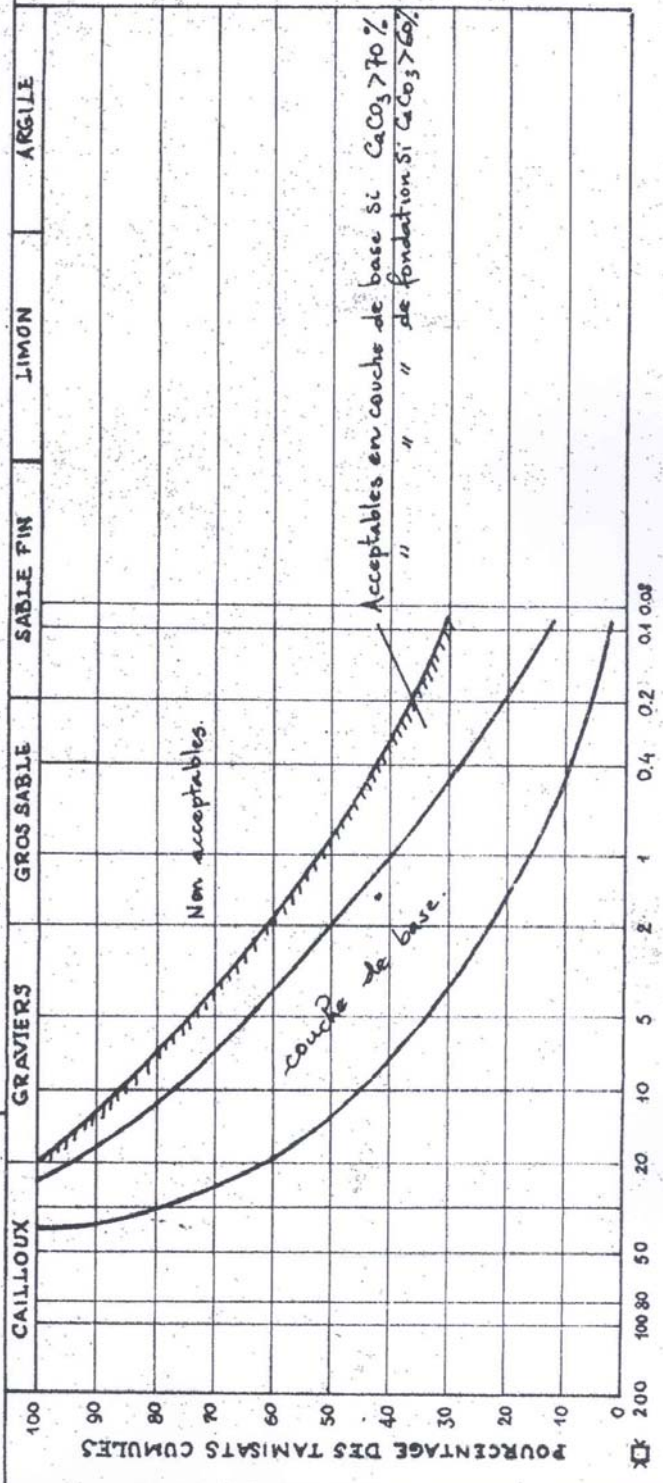


Figure 5 : Fuseau de référence pour les tufs calcaires



Figure 6 : croûte feuilletée et dalle compacte d'un encroûtement calcaire

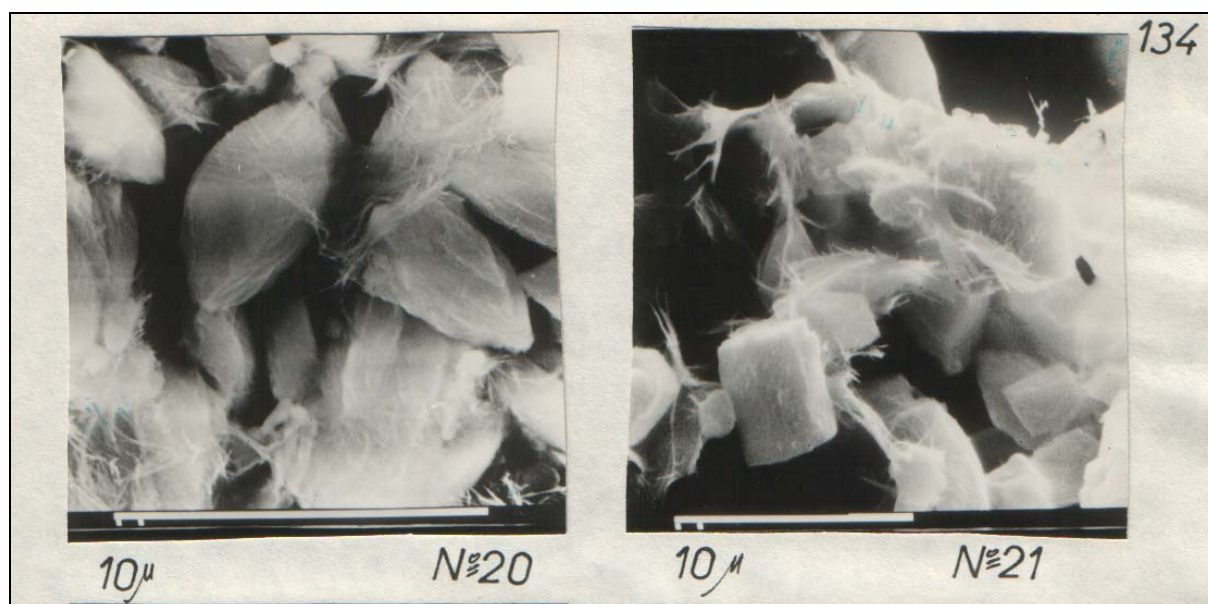


Figure 7: tuf calcaire compacté au BEB : granules de calcite et attapulgite fibreuse imbriquées



Figure 8 RN 3 : corps de chaussée en sables gypseux : dégradation par faïençage

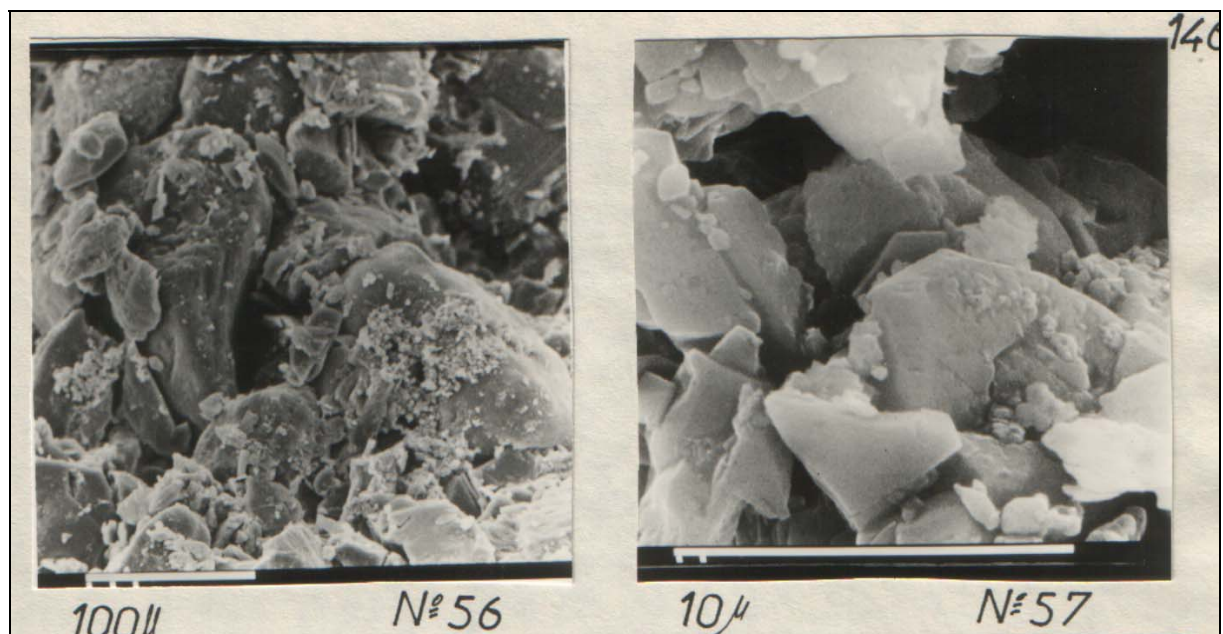


Figure 9 : tuf gypseux au MEB paillètes de gypses très fines colmatant les vides entre les gros grains

6.1.4. Critère de choix des tufs gypseux routiers

Les sables gypseux se comportent comme des matériaux fins sableux, mais présentent de fortes caractéristiques liées à la présence de gypse et de calcite. Il est néanmoins difficile d'attribuer ces fortes caractéristiques (C , φ , CBR) à la seule présence du gypse ou à la finesse du matériau.

C'est la contribution de ces 2 phénomènes, et seulement dans des conditions de sécheresse qui permet aux sables gypseux d'acquérir des résistances fortes et une faible déformabilité.

Dans les conditions de teneurs en eaux voisines de l'OPM ces matériaux sont peu différents des sables d'une autre nature minéralogique. Leur utilisation est assujettie à des conditions parfois locales d'humidité sous la chaussée.

- 1) En zone IV. Le gypse ne risquant pas de solubilisation, c'est le pourcentage de gypse + pourcentage de calcite qui est pris en compte. : carbonates + sulfates > 70 %, R_c doit être > 20 bars.
- 2) En zone III – Le gypse risque de se solubiliser sous la chaussée, un pourcentage maximum de gypse toléré est de 5% dans la fraction < 1mm.
- 3) En zone II – Le gypse risque de se solubiliser. Il n'est donc pas admis en couche de base non traitée.
- 4) Les critères de plasticité et de granulométrie restent les mêmes que pour les matériaux de zone IV car ils ne sont utilisés que dans cette zone en couche de base.

7. LES ARENES GRANITIQUES

Le massif du Hoggar est presque entièrement composé de roches cristallophylliennes très anciennes. Produit d'altération exogène et en place de la partie supérieure des massifs granitiques ou gneissique les sables et graves d'arènes sont des matériaux routiers des régions de l'extrême sud du pays. Cette altération sur plusieurs mètres de profondeur (jusqu'à 10m) a permis l'existence de matériaux de chaussée en abondance. Les matériaux utilisés proviennent soit du chapeau d'altération qui donne lieu à des arènes grenues ayant peu de cohésion .soit d'arène plus cohésives résultant du mélange de tout venants fins et de sables arénitique à dominante quartzeux . Cela donne des arènes cohérentes de granulométrie 0/5mm. La recherche des carrières pour corps de chaussée obéit à une méthodologie de reconnaissance et de test de laboratoire bien connus des ingénieurs et techniciens des laboratoires d'Algérie . Nous citons en particulier en particulier l'ex LNTPB au sein duquel Mr Domec , ingénieur a dirigé plusieurs équipes de prospection. Il a en outre dressé des fuseaux de références des matériaux d'arènes ainsi que la plupart des matériaux rencontrés sur le tracé. (fig 10)

Certaines arènes du tronçon Arak –Tamanrasset de granulométrie 0/5mm ont donné des valeurs de 30 bars en compression simple.

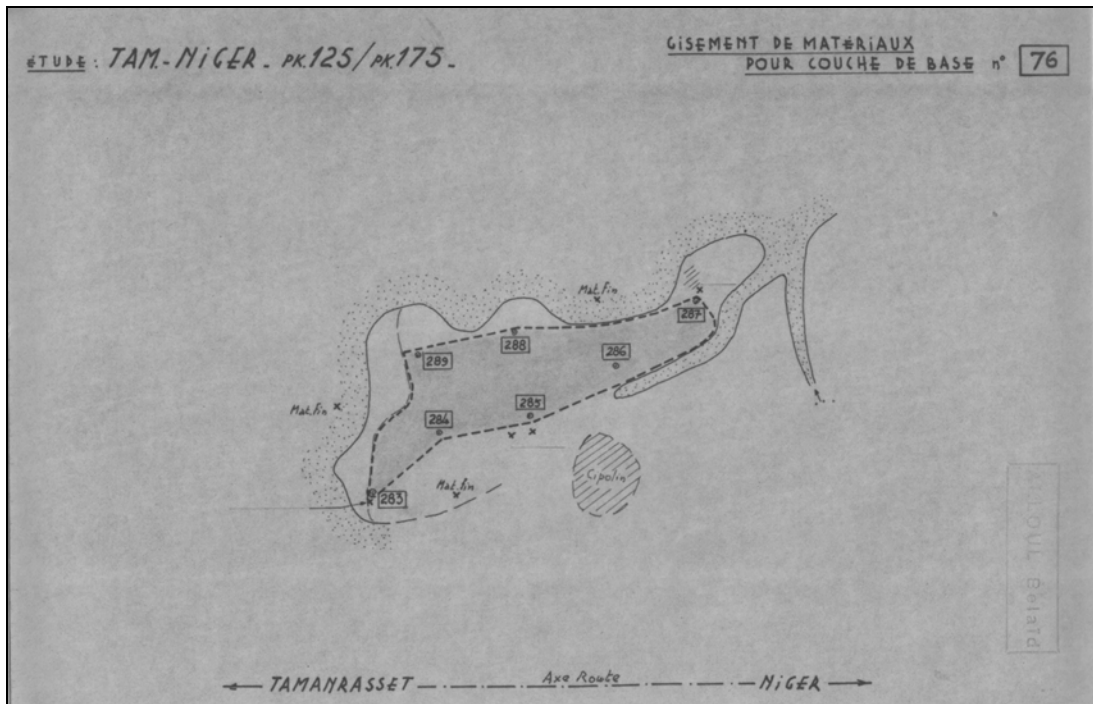


Figure 10 : Plan d'une carrière de matériaux de chaussée sur la transsaharienne (Etude LNTPB : Mr Domec)

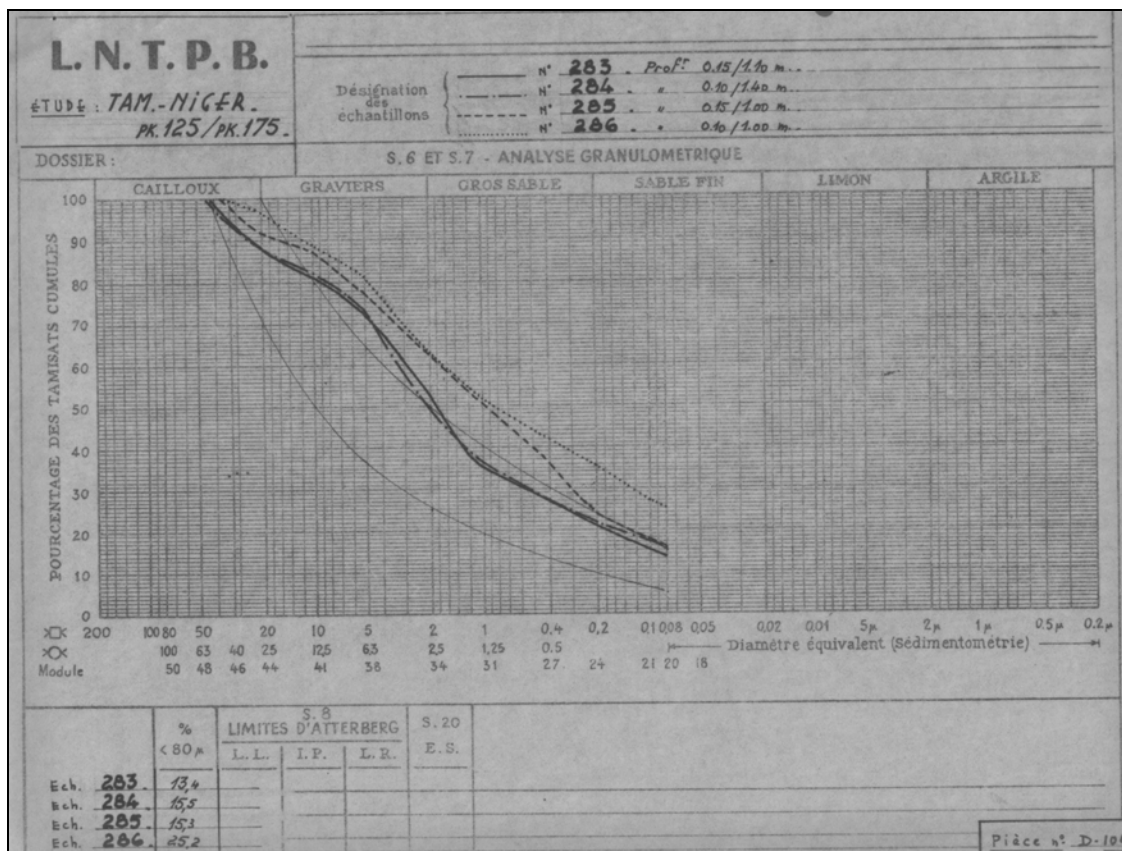


Figure 11 : fuseau des arènes granitiques du Hoggar et granulométrie des matériaux d'une carrière (Etude LNTPB Mr Domec)



Figure 12 : Route transsaharienne à Tamanrasset aérodrome :
Couche de base en arène granitique

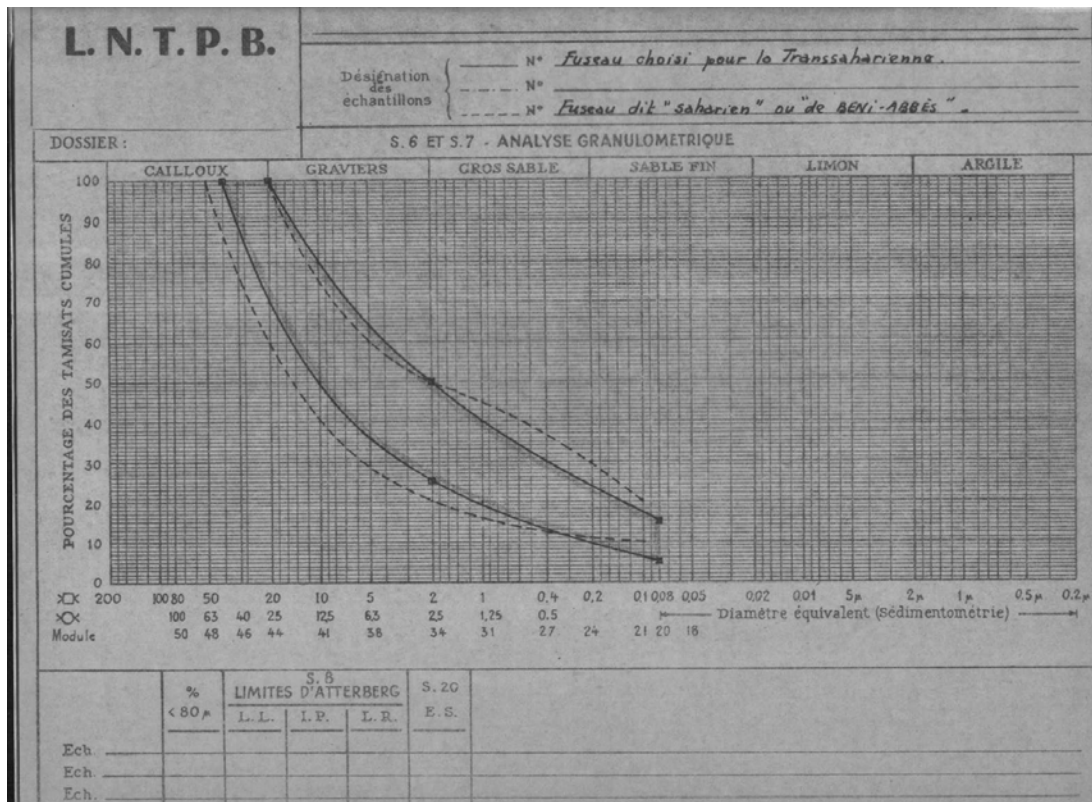


Figure 13 : Fuseau de Beni Abbes et fuseau retenu pour la transsaharienne
(LNTPB : Mr Domec)

8. LES BASALTES ALTERES

Lorsqu'un basalte est altéré il se débite en éboulis caractéristiques, gros blocs qui recouvrent des gisements graveleux 0/25mm, grave souvent bien graduée du type grave concassée prête à l'utilisation .Ce type de gisement est assez rare aux abords des tracés en raison de la dispersion des zones volcaniques dans le hoggar. Par contre les cheminées de volcans et les épandages d'éboulis provenant d'un volcanisme du type explosif peut servir comme matériaux de concassage pour couches de roulement.

9. LES ARGILES

Certaines séries argileuses très anciennes sont très indurées et se présentent sous forme de roches. Exemple : les argiles de la série triasique de Zarzaitine, à In Aménas. Ces argiles se débitent en grave à l'extraction au bull et sont utilisées en corps de chaussée sur la route saut du mouflon à In Aménas en couche de base et en couche de fondation de l'aérodrome de In Aménas. Humidifiés à une teneur en eau de 8 % à 10 % bien en deçà de l'OPM, ces matériaux ont été compactés au rouleau à pneu léger. Cependant, des désordres sont apparus sur ces chaussées .

10. CONCLUSION

L'utilisation de matériaux naturels non traités dans la construction de chaussées au Sahara a donné de bons résultats à de rares exceptions. La connaissance de la géologie et de la géomorphologie régionales ainsi que les conditions locales de mise en place des formations superficielles conditionnent la recherche des matériaux au Sahara. Guidé par des spécifications maintenant bien établies ainsi que par des tests en laboratoires de campagne souvent itinérants , l'ingénieur peut faire le choix dans la vaste gamme des matériaux non conventionnels .

BIBLIOGRAPHIE

- 1) ALLOUL .B (1981) : Etude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux Algérie en vue de leur valorisation routière . thèse de doctorat de 3^{ème} cycle : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris . centre de géologie de l'Ingénieur
- 2) J.H.DURAND (1959) – Les sols rouges et les croûtes en ALGERIE , SES ALGER 1.188.
- 3) J.H.DURAND (1959) – Les sols rouges et les croûtes en ALGERIE , SES ALGER 1.188.
- 4) E.FENZY 51966) – Particularité de la technique routière en Sahara – Revue générale routes et aérodromes N° 411 – pages 57 à 71.
- 5) A.INAL(1980) Routes en milieu désertique IV ème conférence routière africaine : IRF à Nairobi
- 6) LNTPB (J.J.FRY) – Renforcement RN 1 – Djelfa – Laghouat (1978).
- 7) LNTPB (R.DOMEC) – Prospection El Oued Ghadamès (1976) ,Tamanrasset Arak 1982 . et Tamanrasset –Niger 1980.
- 8) L.MORET – Pécis de géologie – Masson et Cie 1962.