

OFFICE DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE OUTRE-MER  
20, rue Monsieur  
PARIS VII<sup>e</sup>

COTE DE CLASSEMENT N° 1354

PÉDOLOGIE

OBSERVATIONS SUR LE RÔLE DES PROPRIÉTÉS DES SOLS DANS LA CONSTRUCTION  
DES ROUTES EN RÉGION ÉQUATORIALE

par

A. COMBEAU

B 17.999 a 1

64

— AOUT 1985  
O. R. S. I. O. M. FUNDUS DOCUMENTATION

N° : 17.999

Cote :

B ex 1 P 30

PÉDOLOGIE

CAM. 53.3

N° 1354

I. R. CAM.

OBSERVATIONS SUR LE ROLE DES PROPRIETES DES SOLS  
DANS LA CONSTRUCTION DES ROUTES EN REGION EQUATORIALE

---:---

A la demande du Chef de l'Arrondissement des Travaux Publics de Yaoundé, et dans le cadre du programme de développement du réseau routier du Cameroun, nous avons fait quelques observations sur les problèmes posés par l'établissement de routes bitumées dans les régions tropicales. Nos connaissances en matière de construction de routes étaient inexistantes lorsque nous avons commencé ces observations. Par conséquent, l'objectif de ce rapport sera tout au plus de situer le problème dans ces grandes lignes et de préciser quelques unes des questions posées par l'établissement des routes.

Nos observations ont porté, en premier lieu, sur la route de M'BALMAYO à SANGMELIMA, route bitumée sur 120 Km. environ, et en second lieu, sur les routes de la région de YAOUNDE. Elles auront donc comme caractéristiques principales :

a/- d'avoir trait essentiellement à la construction de routes bitumées type béton de sol ;

b/- d'avoir été faites dans la zone forestière (entre le 3ème et le 4ème parallèle Nord).

Quelques unes parmi les remarques que nous avons faites seront peut être valables en pays de savane ou pour l'établissement de routes en terre. Elles seront signalées au passage.

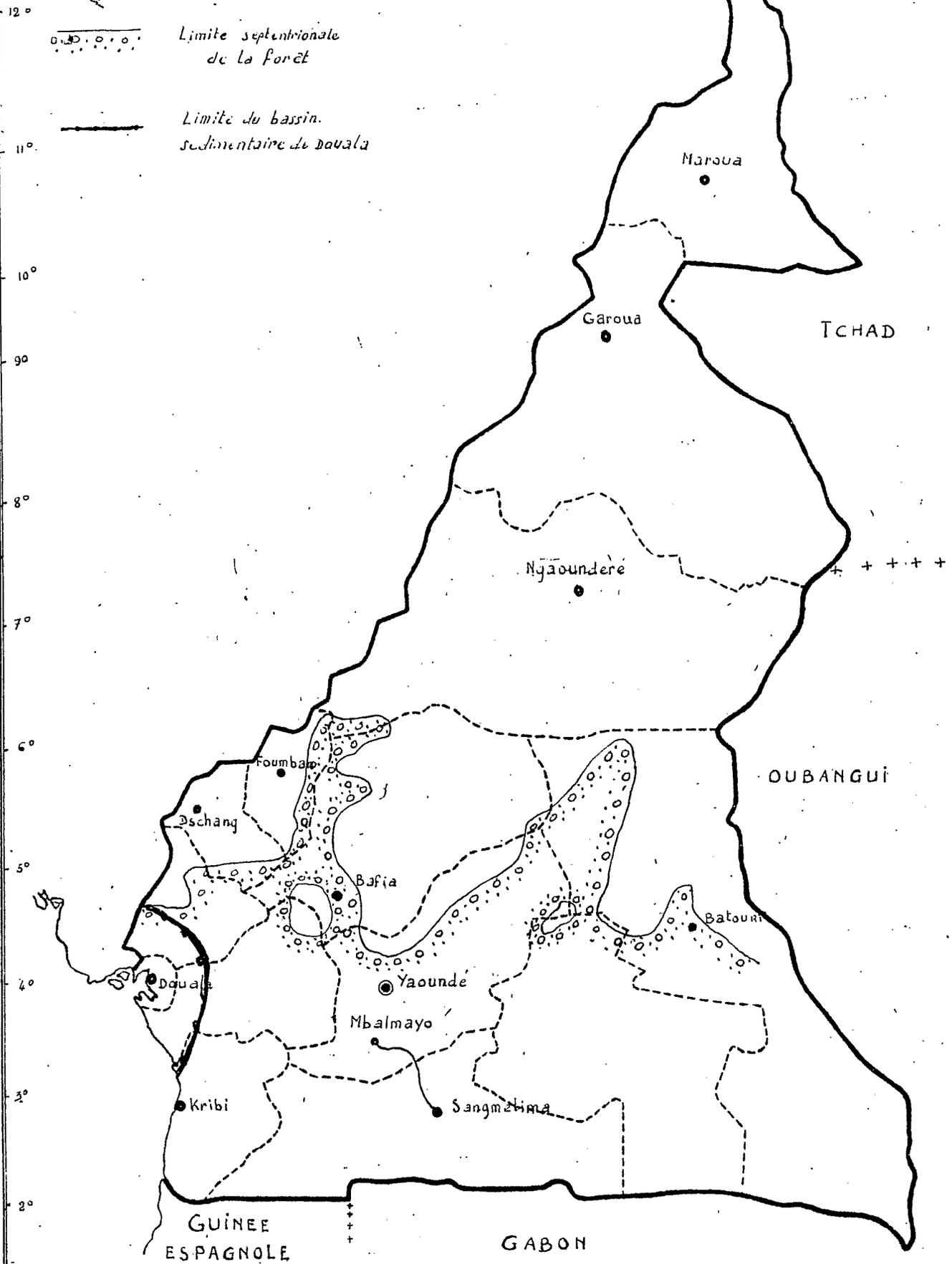
Nous verrons successivement :

A/- Classification sommaire des différents types de routes ;

B/- Réalisation d'une route bitumée type béton de sol synthétique ;

.../...

# CAMEROUN



Localisation de la zone forestière sur le socle cristallin au Cameroun

C/- Conditions requises lors de l'établissement d'une  
chaussée bitumée :

- 1) Observations sur le sol naturel.-
- 2) Matériaux d'apport.-
  - plasticité
  - granulométrie
- 3) L'imprégnation.-
  - rôle de l'humidité
  - lissage
  - influence de la température du liant.

A/- Classification sommaire des types de routes (1).-

Le type le plus courant est naturellement la route en terre améliorée technique simple et économique. Le profilage de la plateforme terminée, on apporte une couche générale d'amélioration. Cette couche est constituée de matériaux prélevés dans les déblais de la route ou, de préférence, dans des gisements proches du tracé : terre meuble compactée, sable (si la plateforme est trop argileuse), argile sur sol sableux, etc ....

Notons que la route en terre est considérée comme un stade devant obligatoirement précéder, pour de nombreuses raisons, celui de la route perfectionnée. Cette dernière ne sera exécutée que le plus tard possible, et, en tout cas, après au moins un hivernage.

Les types de chaussées perfectionnées peuvent prendre place dans la classification suivante :

- 1) macadams
- 2) bétons de sols
- 3) sols stabilisés
- 4) sols ciments.

1/- Les macadams :

Technique ancienne et éprouvée, ils restent la solution de choix. Un macadam comporte :

- une couche de fondation en matériaux de grosse taille, genre hériçon, qui devra être parfaitement tassée par roulage ;
- une couche de roulement en pierres soigneusement calibrées ;
- une semi pénétration à l'émulsion de bitume et un revêtement superficiel.

Un macadam est une solution sûre, qui n'est malheureusement applicable en pays tropical que dans de rares circonstances, par suite du manque de matériaux adéquats (pierres calibrées) et du coût d'exécution (transports, rareté et faible rendement des carrières).

---

(1) Les renseignements qui nous ont permis de rédiger ce chapitre sont empruntés au rapport "Une mission en Afrique Noire (Mai-Juin 1950)" par J.L. BONNENFANT et R. PELTIER. Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre-Mer - Service des routes.-

---

### II/- Les bétons de sols :

Ils rassemblent les types de chaussées dont la cohésion est obtenue par les seuls phénomènes hydrocapillaires, sans intervention du liant hydraulique ou hydrocarboné. Ils se distinguent des routes en terre :

- 1) par une composition plus étudiée ;
- 2) par une aptitude à recevoir un revêtement hydrocarboné.

On distingue :

- a) les sols sélectionnés : le béton de sol est constitué à partir du sol naturel, sans correction ;
- b) les sols améliorés : le sol naturel est corrigé par l'apport de certains éléments minéraux ;
- c) les bétons de sols synthétiques : constitués par un apport intégral d'agrégats ou de sols sélectionnés, indépendants de la plateforme.

Les bétons de sol présentent, du point de vue de la résistance mécanique, des analogies avec les bétons de ciment. Nous reparlerons de cette analogie à propos de la granulométrie.

Les bétons synthétiques, permettant un contrôle plus poussé, présentent le maximum de chance de réussite mais aussi un prix de revient élevé.

Les bétons de sols doivent recevoir un revêtement sans lequel ils s'useraient rapidement ; toutefois, si le béton est trop argileux, ou s'il est susceptible d'être imbibé d'eau, il ne doit pas être revêtu. Le revêtement consiste à un tapis superficiel, accroché sur une imprégnation réalisée avec un liant fluide.

Nous reparlerons ultérieurement de cette question, les routes réalisées autour de Yaoundé étant du type béton de sol synthétique.

Signalons dès maintenant que les chaussées type béton de sol manifestent une grande sensibilité à l'eau, en particulier aux phénomènes de remontée capillaire, ce qui pose de graves problèmes dans leur exécution et leur entretien en pays tropical.

### III/- Les sols stabilisés :

Cette technique consiste à incorporer dans la masse d'un sol un liant hydrocarboné : le mélange est effectué par un malaxage du sol en présence du liant, malaxage réalisé mécaniquement. On distingue :

- Les sols enrobés, avec des liants hydrocarbonés, méthode appli-

cable aux sols pauvres en éléments fins et susceptibles d'un bon ressuyage. L'eau ne joue aucun rôle dans leur cohésion.

- Les sols bitume : utilisés avec des sols riches en éléments fins et incorporation d'eau. On obtient un complexe agrégats-eau-liant. Le rôle de l'eau est encore mal élucidé.

Les sols-bitume constituent la fondation de la chaussée. Ils doivent être complétés par un revêtement. Les chaussées de ce type sont assez peu sensibles à l'eau.

IV/- Les sols ciment :

Ils sont obtenus par incorporation de ciment au sol. Ils sont insensibles à l'eau et s'accroissent de sols assez argileux, mais leur imprégnation est difficilement réalisable. Leur prix de revient est très élevé et leur exécution difficile. Ils conviennent particulièrement aux chaussées submersibles et aux zones où une remontée capillaire importante est à craindre.

B/- Réalisation d'une chaussée type béton de sol synthétique.-

Le tracé des routes bitumées épouse généralement celui d'anciennes pistes en terre. Les différents stades de la construction sont les suivants :

a) mise en forme de l'ancienne piste -

Cette opération n'est autre qu'un nivellement des inégalités de la plateforme ;

b) relèvement systématique et construction de fossés et de passages de buses, destinés à l'assainissement vers les points bas d'un à deux mètres pour mettre la route hors d'eau ;

c) rechargement de la plateforme -

Il consiste en un apport d'une couche de "latérite" qui va constituer le béton de sol. En fait, le matériau utilisé dans les exemples que nous avons pu observer, consiste en un mélange de gravillons et de terre fine ; les pelles mécaniques ou les scrapers, exploitent intégralement l'horizon concrétionné des sols rouges latéritiques, là où cet horizon se trouve à faible profondeur, en général aux ruptures de pentes. Le taux des "fines" est généralement compris entre 20 et 50 %.

Un compactage de la couche de latérite est alors réalisé au cylindre. L'épaisseur de la couche apportée est variable : de 5 à 20 cm. en général (après compactage) selon la résistance du sol sous jacent. C'est sur la couche de latérite que se manifestent les efforts exercés par le passage des véhicules.

d) imprégnation -

L'opération suivante consiste en un épandage sur la surface compactée d'un "liant hydrocarboné". Ce liant agglomère entre elles les particules, et, par ses propriétés hydrophobes, il doit arrêter la remontée de l'eau. Son rôle principal est d'"accrocher" le tapis de revêtement superficiel au béton de sol. Le produit que nous avons vu utiliser est un "cut back" très fluide.

Les liants hydrocarbonés se caractérisent par leurs propriétés hydrophobes. Ils se répartissent en deux grandes classes :

- a ) les goudrons et brais de houille ;
- b) les bitumes naturels et brais de pétrole.

Les "cut back" appartiennent à la seconde classe : ce sont des bitumes fluidifiés. Ils sont obtenus en ajoutant à des bitumes des fluxants : pétrole, gas oil, kérosène, plus ou moins volatils, et en plus ou moins grande quantité, suivant la viscosité recherchée. Sous climat tropical, le solvant utilisé est peu volatil : on emploie le gas oil.

Le cut back est répandu à chaud (60 à 70° environ). Sa pénétration est considérée comme terminée 24 heures après l'épandage. La profondeur d'imprégnation peut varier de 0 à 15 mm. environ.

e) revêtement superficiel -

Vingt quatre heures environ après l'épandage de la couche d'imprégnation, on répand une couche d'un liant, constitué cette fois par une émulsion à 50 % de bitume dans l'eau, ou un cut back visqueux (150 - 200), et, immédiatement après, une couche de gravier concassé. L'ensemble est cylindré. On a alors un tapis monocouche. Dans certains cas, on procède à un nouvel épandage de liant et de graviers, pour obtenir un tapis bicouche. Un cylindrage termine l'ensemble des opérations.

Des "couches d'entretien" seront apportées ultérieurement, à une cadence variant avec l'intensité de la circulation (2 à 3 ans).

.../...

C/- Conditions requises lors de l'établissement d'une chaussée.  
Déformation et accidents possibles.-

Pour que la route résiste le plus longtemps possible aux conditions climatiques, et à l'action mécanique due au passage des véhicules, un certain nombre de conditions doivent être remplies lors de la construction. Ces conditions, pour une chaussée type béton de sol sont encore mal définies. Des divergences assez sensibles existent entre les différentes conceptions des normes d'application de cette technique. Les théories classiques retiennent les principes suivants :

1 - Le béton de sol est formellement contre-indiqué lorsque la plateforme est susceptible d'inondation.

2 - Ce type de chaussée ne doit pas être revêtu lorsqu'il est soumis à une remontée capillaire active.

De cette dernière considération, il découle que la construction d'un béton de sol sera délicate dans les zones basses, sur les sols très argileux et d'une façon générale dans les régions où le bilan Evaporation-Précipitations est négatif pendant une longue période de l'année, cas des régions équatoriales ; l'eau imbibera le béton de sol et entraînera sa destruction rapide.

3 - Par analogie avec les bétons de ciment, un béton de sol sera d'autant mieux réussi que sa granulométrie sera plus proche d'une répartition optimum définie par les courbes de TALBOT.

4 - Un facteur important de longévité des chaussées serait l'indice de plasticité du béton de sol. Cet indice doit être d'autant plus faible que le climat est plus humide. En particulier, dans les environs de Yaoundé, le chiffre de  $I_p = 4$  à  $6$  a été recommandé. Ce chiffre doit être encore plus faible ( $I_p = 0$ ) si le béton de sol doit recevoir un revêtement (le revêtement arrêtant l'évaporation favorise les remontées capillaires). Le revêtement ne doit s'effectuer que par une imprégnation au cut back très fluide à solvant peu volatil, suivie de la pose d'un tapis superficiel bicouche. Plus l'imprégnation est profonde, meilleur sera le revêtement. Il a été conseillé d'atteindre une profondeur d'imprégnation au moins égale à  $10$  mm. Une imprégnation insuffisante serait un facteur d'échec certain.

Ces quelques indications connues, il est possible de rechercher dans quelle mesure les conditions requises se trouvent remplies dans la zone forestière.

1 - Observations sur le sol naturel

Envisagé sous l'angle des constructions routières, le caractère dominant des sols de la zone forestière semble bien être leur forte teneur en argile. Nous faisons évidemment une exception en ce qui concerne les sols formés sur roches sédimentaires, en particulier dans l'étroite bande longeant localement la côte (Route DOUALA-EDEA par exemple). Mais ces sols ne couvrent qu'une faible superficie dans le zone équatoriale.

Nous citons ici quelques chiffres relatifs à la composition granulométrique de certains sols de la zone forestière.

Localisation	type de sol	roche-mère	prof.	argile	limon	sab.f	Sab.g
YAOUNDE (1)	Sol rouge latéritique	Embréchite	70 cm	57 %	12 %	23 %	7,5 %
Route YAOUNDE	sol rouge latéritique	"	50 cm	58,5 %	7 %	22 %	11,5 %
MBALMAYO Km. 28 (1)	"	"	"	"	"	"	"
" " (1)	"	"	400cm	66,5 %	5,5%	18,5%	9,2 %
Route MBALMAYO	sol jaune latéritique	Micaschistes de MBALMAYO	60cm	50,2 %	6,5%	38,6%	5
SANGMELIMA Km. 74	"	"	"	"	"	"	"
AKONOLINGA (2)	?	Gneiss	25-65	55,4 %	6,5%	23	13,4 %

Le teneur en argile semble osciller en moyenne entre 50 et 60 %. De plus, lorsque l'horizon gravillonnaire ou la cuirasse n'affleurent pas, les horizons supérieurs sont presque totalement dépourvus d'éléments supérieurs à 2 mm.

Dans l'ensemble, ces sols sont généralement profonds. Cuirasse ou horizon gravillonnaire apparaissent en général à ux ruptures de pente et sur les flancs des vallées, réduisant l'épaisseur du sol meuble. Mais en topographie plane, la roche-mère n'apparaît qu'à une grande profondeur (exemple : 11 mètres sur la route YAOUNDE-MBALMAYO Km. 28). Horizon gravillonnaire, ou cuirasse sont alors absents ou très incomplètement durcis.

(1) D'après G. BACHELIER

(2) D'après BÉTRÉMIEUX et Jacques FÉLIS.

De ce fait découlent un certain nombre de conséquences du point de vue routier.

- a) Ces sols présentent généralement un indice de plasticité élevé ;
- b) La hauteur d'ascension capillaire est généralement forte ;
- c) Les eaux de pluie sont fortement retenues dès la traversée des horizons supérieurs.

Nous avons pu constater que le taux d'humidité du sol en place est généralement élevé. Des dosages ont été réalisés sur le terrain (méthode à l'alcool) : les résultats obtenus sont uniformes.

Localisation :	Type de sol :	Profondeur :	Argile % :	Eau en % de terre séchée à 105 ° :
ROUE MBALMAYO :	Jaune	40 cm :	51,5 % :	34 % :
SANGMELIMA :	Latéritique	:	:	:
" " :	" "	110 cm :	58 :	34 % :
" " :	Rouge	50 cm :	57 :	33 % :
	Latéritique	:	:	:
YAOUNDE	Fin de l'horizon gravillonnaire d'un sol rouge	100 cm :	42 % :	31,5 % :
Carrière		:	:	:

On peut donc considérer que le pourcentage d'humidité du sol en place, presque toujours supérieur à 25 %, atteint fréquemment 33 % et plus.

Nous n'avons pu mesurer les indices de plasticité du sol naturel, mais il semble que cet indice soit fort élevé. Deux échantillons de carrière ont été analysés par le Laboratoire des Travaux Publics de DOUALA. L'un en provenance d'une carrière de YAOUNDE pour lequel l'indice de plasticité des fines  $I_p = 26$ . L'autre prélevé dans une carrière proche de la route de MBALMAYO-SANGMELIMA (Km. 117) et pour lequel  $I_p = 17,9$ . Nous avons vu précédemment que pour la région de YAOUNDE la limite admise est  $I_p = 5$  par un béton de sol revêtu (amors qu'en zone aride on admet que  $I_p$  doit être compris entre 8 et 12).

L'ensemble de ces conditions est donc assez en opposition avec les normes admises pour l'établissement des bétons de sol. Or certains tronçons de la route MBALMAYO-SANGMELIMA sont établis maintenant depuis plus de deux ans et se comportent de façon satisfaisante.

Il en est de même pour les rues de YAOUNDE. On pourrait supposer que les matériaux d'apport ou l'imprégnation apportent une correction aux défauts du substratum. En fait, nous verrons plus loin que c'est peu probable.

Il faut donc conclure que, dans certains cas, un béton de sol peut donner de bons résultats, même s'il sort des limites de sécurité admise.

On peut toutefois rechercher les moyens d'améliorer la qualité du sol naturel constituant la plateforme. Ce doit être possible sans travaux excessifs dans certains cas précis.

Parmi les déformations que nous avons pu observer, certains semblent bien avoir leur source dans le mauvais état du sol naturel.

Il est à remarquer que les déformations observées sont plus souvent localisées sur les pentes qu'en topographie plane.

Les accidents qui se produisent sur des sections de route horizontale ne semblent pas devoir être imputés à des phénomènes de plasticité ou de cohésion, mais plutôt à un excès d'humidité (mauvais écoulement, infiltrations ou remontées capillaires). Sur les pentes au contraire, les deux facteurs peuvent jouer, séparément ou simultanément. Dans les bas fonds, aux abords des ponceaux, on incriminera surtout les remontées capillaires.

Par exemple, au Km. 55 de la route YAOUNDE-SANGMELIMA, la chaussée passe en déblai dans une butte. Son profil est sensiblement horizontal à cet endroit, on note une sorte de desquamation du revêtement superficiel, consécutive au craquement <sup>ttc</sup> du tapis. Nous avons pu observer que l'écoulement de part et d'autre de la chaussée était nul tout au long de la tranchée, en corrélation avec la présence d'un horizon de gley, gris bleuté, à 20 cm. de profondeur environ.

Dans un tel cas, affectant une longueur de chaussée restreinte (de l'ordre d'une vingtaine de mètres) deux solutions sont possibles :

a) faciliter le drainage du tronçon de la route en déblai en creusant un fossé assez profond assurant une évacuation rapide des eaux de pluie (cette solution paraît possible malgré la faible pente de terrain) ;

b) refaire la chaussée en interposant entre la couche de rechargement et le sol une couche de sable grossier jouant le rôle

d'écran filtre, qui arrêtera les remontées capillaires.

Une autre déformation plus grave, observée au village de NDIK (Km. 74) pourrait avoir également une origine dans les caractéristiques physiques du sol naturel.

A cet endroit, la pente de la route est forte, et de plus, un fossé profond parfois de 2 mètres, la borde d'un côté. Le tapis superficiel est craquelé et de plus on remarque des déformations en vagues dans le revêtement. Il semble qu'on puisse attribuer cette déformation à une plasticité trop élevée du substratum qui se traduit sur une forte rampe, par un décollement de la chaussée sous l'influence de son propre poids et des efforts mécaniques, la cohésion longitudinale et transversale étant faible. Dans ce cas, une atténuation de la pente de la route serait le meilleur moyen de lutte, mais le remède est difficilement applicable car il entraînera des terrassements considérables.

L'apport d'une épaisse couche de gravillons et de sable sur la plateforme, permettant une meilleure répartition des efforts mécaniques appliqués sur la chaussée freinerait peut être les phénomènes de cisaillement.

A YAOUNDE, sur la route reliant la ville à l'aérodrome, des déformations importantes en vagues se sont produites sur une section de pente moyenne et exclusivement sur une moitié de la chaussée, côté intérieur d'un virage. Il semble que ces accidents soient imputables à un excès d'humidité, du à la nature très argileuses du sous-sol. Les déformations cessent peu à peu lorsque la plateforme atteint le niveau de gravillons, à proximité du sommet de la pente. Le sol naturel, sur une partie importante du tronçon endommagé, est constitué par une argile très plastique se modelant très facilement au doigt. La moitié intacte de la chaussée correspond à la partie remblayée pour le virage, où la couche de matériaux d'apport est considérablement plus épaisse. La section vient d'être restaurée par la mise en place d'une couche de gravillons épaisse de 20 centimètres qui devrait freiner la remontée capillaire, et donner de la cohésion à la fondation de la route.

Signalons que, s'il est délicat de lutter contre les remontées capillaires et les excès d'humidité, dans certains cas, par contre, il semble assez facile de réduire les risques de déformations consécutives à une plasticité élevée ; en effet sur les

pentés, qui sont particulièrement sensibles à ce facteur, les phénomènes d'érosion ont fréquemment entraîné la formation d'un banc de gravillons ou d'une cuirasse, généralement pisolithique ; la présence de ce banc abaisse l'indice de plasticité de 2 façons différentes :

a) par la présence d'éléments grossiers durcis qui réduisent la proportion de terre fine de l'ensemble ;

b) par la réduction du taux d'argile pour 100 de terre fine. Nous donnons les résultats de quelques analyses montrant la baisse relative et absolue du pourcentage d'argile dans l'horizon gravillonnaire. La courbe représentant le taux d'éléments inférieurs à 2 microns en fonctions de la profondeur du sol passe par un maximum net dans les quelques centimètres surmontant directement le niveau de gravillons (Voir tableau 1).

Granulométrie : Sol rouge latéritique sur embréchite - (1)

YAOUNDE -

Prof.	Argile		Limon	S.F.	S.G.	Gravillons
	% fine	% total				
Surface	13,5 %	13,5 %	24,5	46,8	15	Traces
40 cm.	50	50	14,3	28,5	7	"
70 cm.	57	57	12	23	7,5	0,5
100 cm.	53	49	10	19,5	13,5	8
150 cm.	42	33	11	20,5	13,5	22
290 cm.	45,5	44,2	23	21	9	2,8
370 cm.	33,3	33	20	32,5	13,5	1

Evolution du taux d'argile avec la profondeur

Sol rouge latéritique (1) Route YAOUNDE-MBALMAYO				Sol jaune latéritique NDIK			
Prof.	Gravier	A% fine	A% total	Prof.	Gravier	A% fine	A% total
50	traces	58,5	58,5	20-40	traces	61,6	58,5
250	-	67,5	67,5	130-150	4,5 %	66,4	68
850	5,2	58,2	55,5	200	48 %	53,5	27
860	56	41	18				
980	45,5	42	23,1				
1110	3,5	38,5	37				

(1) D'après G. BACHELIER

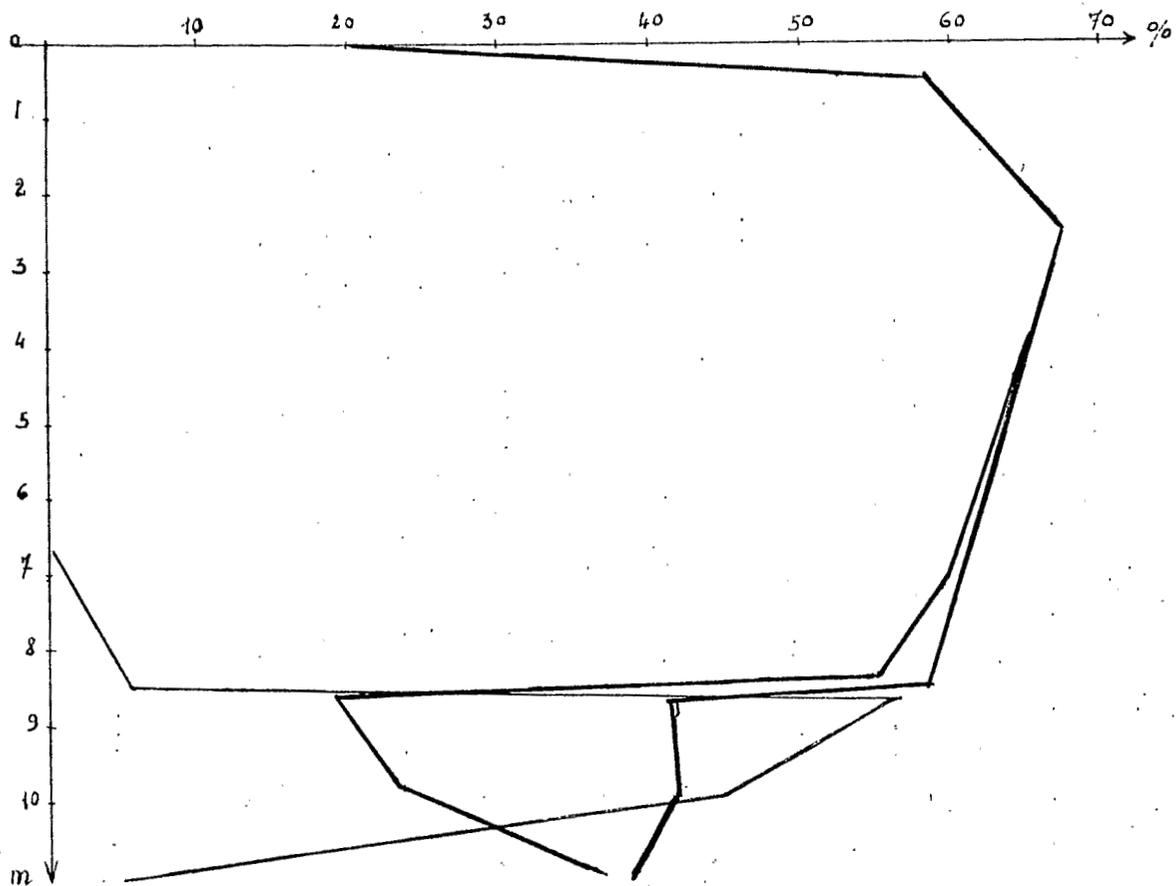
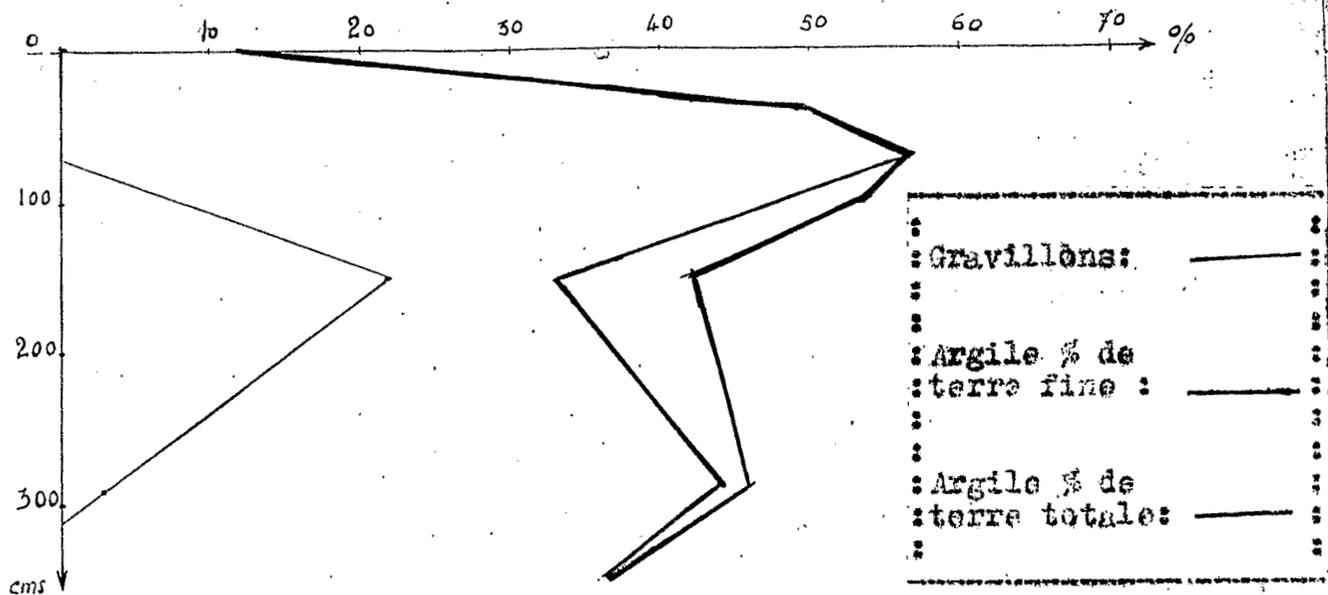


Tableau I - Evolution du taux d'argile avec la profondeur dans les sols rouges latéritiques -  
 Relation avec le taux de gravillons ferrugineux (supérieur à 2 mm)  
 1 - Sol rouge latéritique - Yaoundé - (en haut)  
 2 - Sol rouge latéritique - Route Yaoundé - Mbalmayo - (en bas)

De plus, mais dans certains cas seulement, l'horizon gravillonnaire surmonte un niveau dans lequel le taux d'argile tend à croître.

Sur les pentes il y aura donc intérêt, chaque fois que ce sera possible sans terrassement considérable, à ce que le profil de la plateforme descende jusqu'au niveau de gravillons. En particulier, il faudra éviter que l'arase de la plateforme se trouve dans les quelques décimètres surmontant ce niveau.

On pourra ainsi abaisser l'indice de plasticité et réduire l'importance des remontées capillaires.

Il est nécessaire de remarquer que, par contre, sur certaines pentes soumises à une forte érosion ou plus proches de la roche-mère, on ne trouve pas d'horizon gravillonnaire, mais, soit une zone de décomposition de la roche-mère, soit une sorte de zone de départ plus ou moins argileuse et imperméable lorsqu'elle a été dénudée et formant nappe phréatique en saison des pluies. Il semble que ce soit le cas au Km. 58 de la route YAOUNDE-SANGMELIMA. Nous poursuivrons nos observations sur ce point, mais il importe de connaître cette particularité pour éviter d'abaisser systématiquement le niveau de la route, ce qui, dans le cas présent, irait à l'encontre du but recherché.

#### 11 - Observations sur le béton de sol

On considère généralement que deux facteurs relatifs aux matériaux d'apport conditionnent la réussite du béton de sol. Ce sont la plasticité et la granulométrie.

Faute d'appareillage pour déterminer la limite de liquidité dans les mêmes conditions que les Laboratoires des Travaux Publics, nous n'avons pu entreprendre l'étude systématique de l'indice de plasticité. Les résultats, déjà cités, obtenus par les T.P. semblent indiquer que les bétons des sols des environs de YAOUNDE se trouvent, sans aucun doute possible, très en dehors des limites de sécurité permises en théorie. Nous avons signalé déjà que l'indice de plasticité, qui théoriquement devrait être de l'ordre de 4 ou 5 dans une région soumise à ce climat, est en fait voisin de 20, valeur considérée inacceptable, même en région aride. Nous nous bornerons donc à constater que ces chiffres sont très nettement supérieurs aux limites officiellement admises.

Nos observations ont donc porté principalement sur la granulométrie des gravillons de carrière.

.../...

Nous avons signalé déjà que le matériau utilisé provient de l'exploitation intégrale de l'horizon gravillonnaire des sols latéritiques, là où cet horizon existe et à faible profondeur. Ces conditions sont généralement remplies aux ruptures de pentes. Dans le but de diminuer les distances de transport, on cherche à exploiter un nombre important de carrières échelonnées à peu de distance les unes des autres le long de la plateforme.

Nous avons vu également que l'optimum de résistance mécanique du béton est obtenu pour une répartition granulométrique régulière, représentée par les courbes de TALBOT. Ces courbes sont représentées sur les graphiques ci-joints.

Quelques remarques s'imposent d'emblée :

a) le béton de sol ne peut être homogène. Dans une même carrière la densité de gravillons varie considérablement de haut en bas de l'horizon concrétionné. La proportion du mortier aux éléments grossiers ne sera donc pas constante, et, de plus, la taille des gravillons variant tout le long du profil, deux éléments interviennent pour modifier la granulométrie du béton.

b) l'hétérogénéité se manifeste surtout aux extrémités de l'horizon concrétionné. Il importe donc d'éliminer la partie supérieure de cet horizon et d'arrêter l'exploitation avant d'atteindre la partie inférieure.

c) l'importance du rôle tenu par la couche d'apport est mise en évidence par le fait suivant : deux carrières situées à 30 Km. l'une de l'autre sur la route de MBALMAYO-SANGMELIMA (Km. 117 et Km. 146,5) ont donné des résultats très différents ; les sections construites avec les matériaux issus de la première n'ont pas résisté au passage des véhicules. Avec la seconde par contre, des tronçons en service depuis deux ans paraissent intacts.

#### A - Analyse granulométrique

Nos observations ont porté sur la granulométrie totale des échantillons, puis sur la proportion des différentes classes de gravillons. Il est nécessaire d'opérer sur des échantillons importants, 5 Kgs. environ, pour limiter les erreurs dues à l'hétérogénéité dans le prélèvement. Nous nous sommes efforcés de choisir un échantillon moyen de la zone exploitée par les pelles mécaniques. Les opérations sont les suivantes :

- Pesée de l'échantillon total
- Tamisage grossier au tamis de 2 mm.
- Lavage des gravillons à l'eau ammoniacale et séchage.

- Classement des gravillons et pesée
- Taux d'humidité des fines
- Analyse mécanique des fines
- Etablissement des proportions totales
- Représentation en courbe de sommation à échelle semi-logarithmique.

Après quelques tâtonnements, nous avons été amené à classer les gravillons en 4 catégories :

2 - 5 mm., 5 - 10 mm., 10 - 15 mm., au dessus de 15 mm.

Les résultats des analyses granulométriques sont résumés sur les tableaux et graphiques joints, graphiques sur lesquels sont également figurées les courbes de référence de TALBOT (Voir tableau 2 et 3).

Ces analyses concernent des échantillons prélevés soit à YAOUNDE, soit sur la route de MBALMAYO-SANGMELIMA, et, pour quelques uns d'entre eux, les estimations de valeur en tant que bétons de sol sont connues.

De l'examen des courbes, on peut tirer les conclusions suivantes :

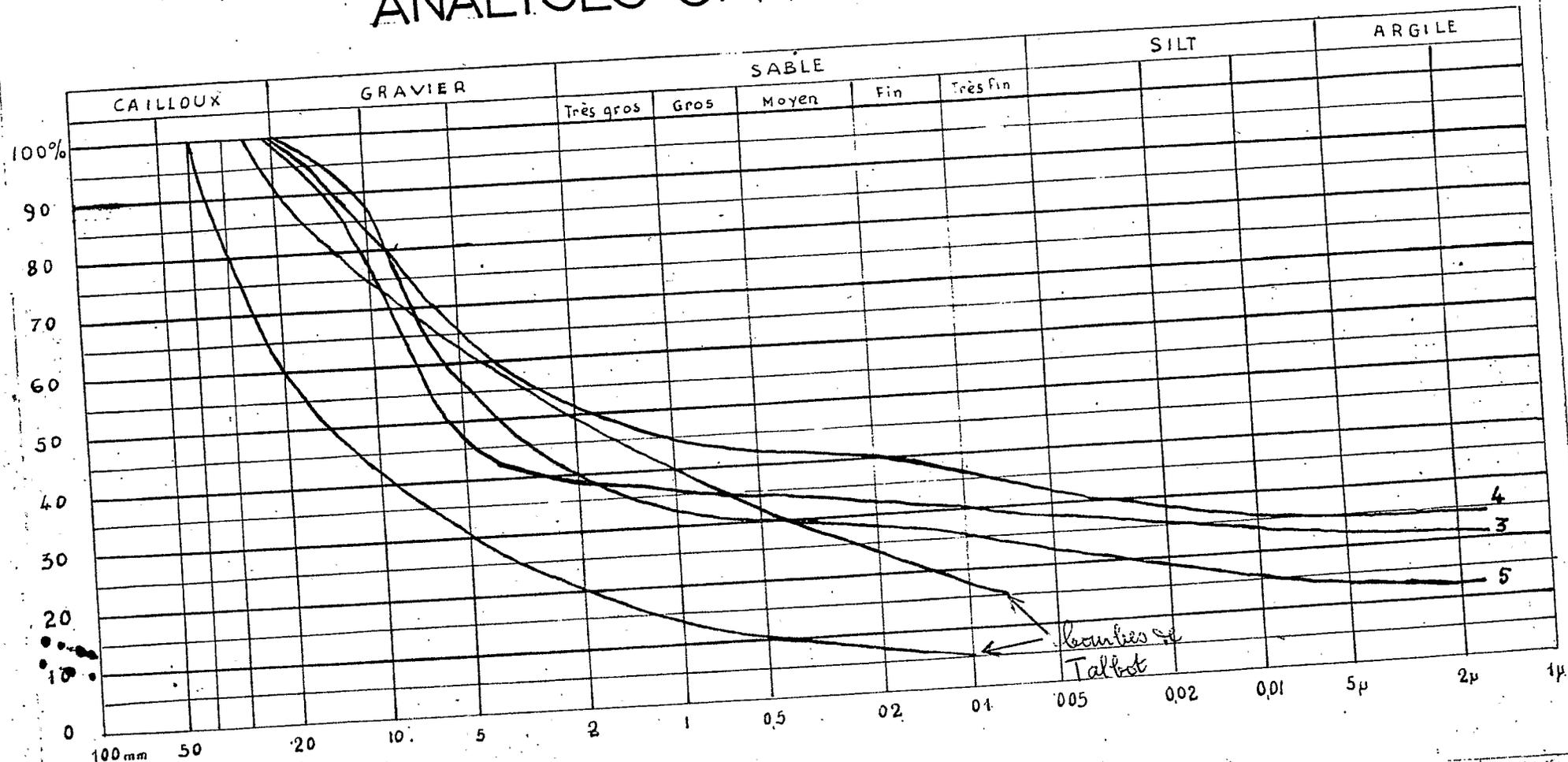
- 1) Il n'y a pas de solution de continuité nette entre les différentes courbes représentées ;
- 2) Toutefois, on peut remarquer que toutes les courbes représentatives des échantillons prélevés dans des carrières ayant de mauvaises qualités routières occupent la partie supérieure du graphique, et qu'elles ne se trouvent entre les courbes de TALBOT que sur une faible longueur;
- 3) Pour tous les échantillons, la somme des éléments inférieurs à 2 mm. est comprise dans les limites continuées par les courbes de TALBOT. Mais les meilleurs bétons ont les teneurs les plus faibles.
- 4) Tous les échantillons ont une richesse en éléments fins, argile et limon, supérieure aux normes;
- 5) Les échantillons provenant des mauvaises carrières sont pauvres en gros éléments et sortent nettement des limites de TALBOT pour les éléments de plus d'un centimètre de diamètre.

#### B - Répartition des gravillons

La première et la dernière de ces remarques nous ont incité à chercher un mode de représentation graphique qui mette en évidence l'existence de familles de courbes. Pour cela, nous avons

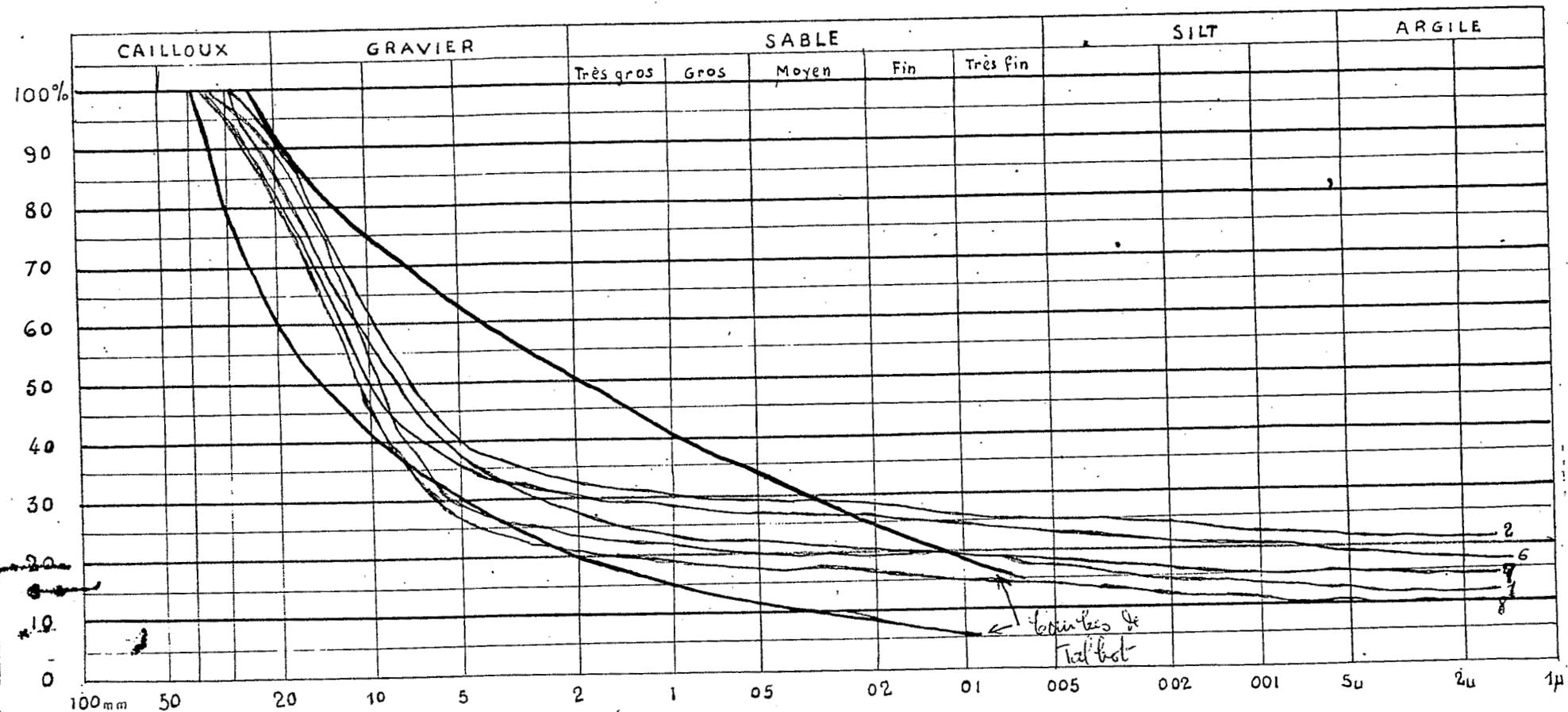
.../...

# ANALYSES GRANULOMETRIQUES



**Tableau 2** - Granulométrie de matériaux utilisés comme bétons de sol  
 Carrières ayant donné de mauvais résultats  
 3 - Carrière route Mbalmayo-Sangmélima Km 117  
 4 - Carrière route Mbalmayo-Sangmélima Km 67  
 5 - Carrière Yaoundé (utilisée pour routr de l'Intendance)  
 (Voir tableaux en annexe)

# ANALYSES GRANULOMETRIQUES



**Tableau 3** - Granulométrie de matériaux utilisés comme bétons de sols  
 Carrières ayant donné de bons résultats

1	-	Carrière route Mbalmayo-Sangmélima	Km 166,5
2	-	-----	Km 166
6	-	Carrière SECRAC route de Kribi	
7	-	Carrière Bastos Yaoundé	
8	-	Carrière Yaoundé (utilisée pour route Mvolyé)	

(Voir tableaux en annexe)

comparé les différentes classes de gravillons entre elles, en faisant abstraction des fines. Nous avons traduit les résultats en deux graphiques différents : l'un figurant les courbes de sommation, l'autre n'ayant qu'une valeur représentative de l'importance des différentes classes (Tableaux 5 et 4). Dans les deux cas, nous avons représenté également les courbes obtenues en convertissant les courbes de TALBOT, à titre de comparaison. Ces graphiques confirment les remarques précédentes.

a) les gravillons des matériaux ayant donné des résultats satisfaisants ont une granulométrie continue et équilibrée, qui se traduit par une courbe généralement comprise entre les courbes de TALBOT;

b) le second graphique traduit les défauts des matériaux non satisfaisants : un excès d'éléments compris entre 5 et 10 mm., une insuffisance en éléments supérieurs à 15 mm.

Il serait prématuré de tirer des conclusions définitives de ces quelques résultats ; d'une part, ils sont extraits d'un nombre restreint d'analyses, alors qu'une étude statistique est indispensable; d'autre part, il s'agit d'un matériau très hétérogène ; en troisième lieu, il est encore difficile de déterminer, dans le comportement d'une chaussée, la part qui revient au béton proprement dit, au sol naturel et aux phénomènes consécutifs à l'imprégnation. Il semble toutefois qu'une poursuite des observations dans ce sens soit souhaitable dans le but d'augmenter le nombre des données sur la granulométrie des bétons de sol, ce qui permettrait de confirmer ou d'infirmer ces premiers résultats.

### III - Observations sur l'imprégnation

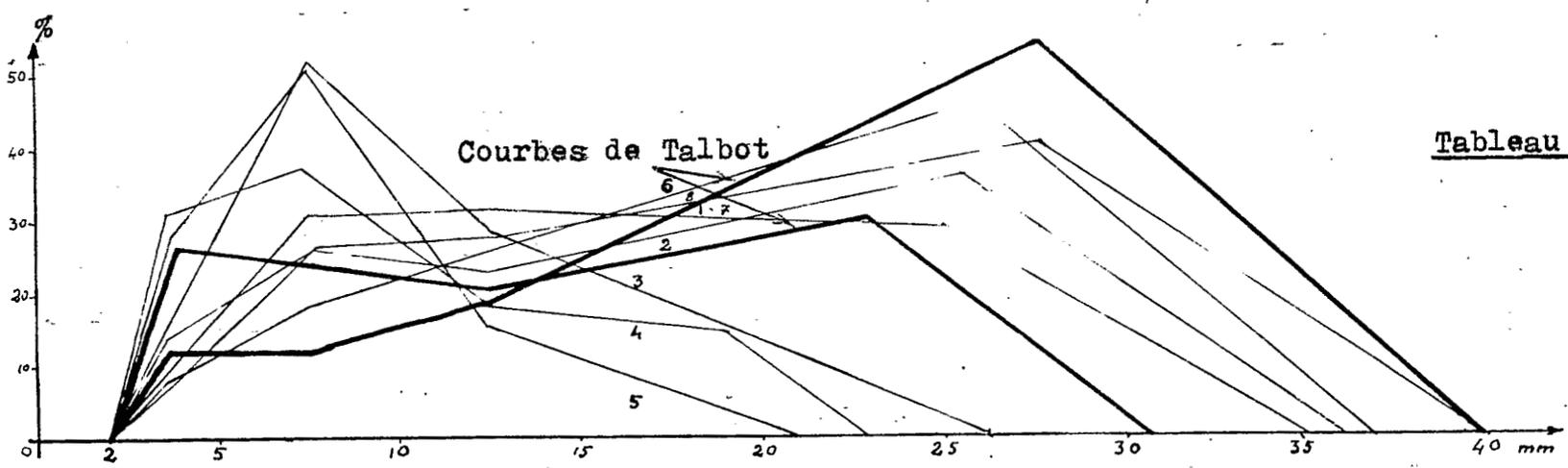
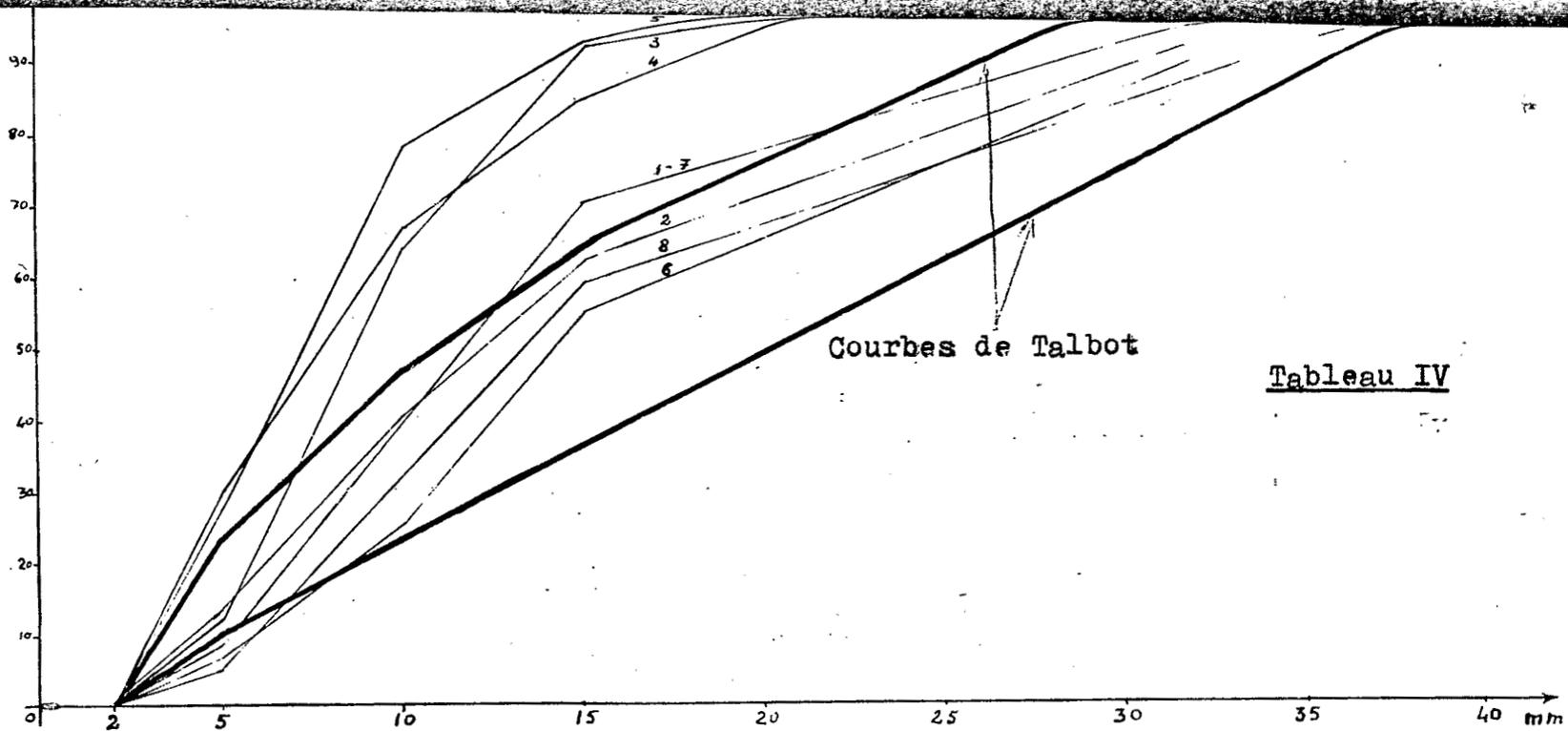
Les conditions considérées comme fondamentales pour la réussite de l'imprégnation sont les suivantes :

- 1) Pour pénétrer dans un béton de sol, le liant doit être très fluide ;
- 2) Un revêtement superficiel ne peut tenir sur un béton de sol s'il lui est appliqué directement, sans imprégnation préalable ;
- 3) Un tapis superficiel ne tiendra d'une manière durable que si l'imprégnation a pénétré de plus d'un centimètre dans le béton ;

L'imprégnation est une pénétration capillaire du liant dans le sol, suivie de l'évaporation d'une partie du solvant.

La profondeur de pénétration du liant est proportionnelle à la racine carrée du temps d'infiltration et inversement proportion-

Eau IV - Granulométrie des gravillons - Courbe de sommation  
 Eau V - Granulométrie des gravillons - Répartition par classe  
 Numérotation des courbes : voir tableaux III et IV



nelle à la racine carrée de la viscosité. La vitesse de pénétration est une fonction inverse de la durée. De plus, la viscosité du liant s'accroît rapidement par exposition à l'air et ceci d'autant plus vite que le solvant utilisé est plus volatil. La vitesse de pénétration diminuera par conséquent avec le temps et on considère que la profondeur d'imprégnation est atteinte au bout de deux heures environ.

Nous avons cherché si une teneur en eau plus ou moins élevée du béton de sol lors de son imprégnation pouvait influencer sur la profondeur de pénétration. Cette question est encore controversée Elle présente deux aspects différents :

- d'une part, l'influence de la teneur en eau elle-même
- d'autre part, l'incidence des conséquences de cette teneur en eau, en particulier, le lissage superficiel.

a) Le lissage :

Le passage des engins de compactage sur la couche de rechargement de la plateforme provoque fréquemment un phénomène de lissage de la surface. L'expérience montre que cette surface lissée est presque parfaitement imperméable au cut-back.

Si l'on met dans plusieurs capsules plates des échantillons de terre fine d'un même prélèvement, mais amenés à des taux d'humidité différents, et si l'on réalise artificiellement le compactage de ces échantillons, on constate que le lissage est de plus en plus net lorsque le taux d'humidité croît d'un point inférieur à la limite de plasticité jusqu'à un autre point, inférieur à la limite de liquidité, mais à partir duquel le sol n'a plus une consistance suffisante pour pouvoir être compacté. L'aspect des échantillons lissés, vus à la binoculaire, est caractéristique : la surface est unie, glacée et ne présente aucune solution de continuité. Par contre, les échantillons moins humides ont un aspect grumeleux typique.

Il semble que l'on se trouve en présence d'un phénomène de dispersion des colloïdes argileux qui aboutit à la formation d'une surface parfaitement fermée. Si le lissage ne peut être exprimé par un chiffre, par contre le temps d'imprégnation d'une quantité de cut-back donnée, peut être mesuré et exprimé en fonction de la teneur en eau. On considère l'imprégnation comme terminée lorsque la surface de l'échantillon contenu dans la coupelle et arrosé de cut-back perd sa couleur noire et devient grise, brillante et sèche. Le cut-back était apporté à une dose correspondant à 2 Kgs./m<sup>2</sup>, dose utilisée dans la pratique. Les résultats obtenus ont été exprimés sur le graphique ci-joint (Tableau 6).

On peut en conclure que, au-dessus d'une certaine teneur en eau, le lissage est tel que la pénétration du liant est pratiquement impossible ou trop lente pour être compatible avec les nécessités pratiques d'exécution de la chaussée. Dans la pratique, le lissage n'est jamais parfait. Le passage répété des engins de compactage arrache localement la pellicule lissée. D'autre part, la courte période comprise entre le compactage et l'imprégnation est suffisante pour que se forment des fentes de retrait sous l'action de la dessiccation. L'imprégnation sera cependant très irrégulière. Elle aura lieu sur les plages non lissées et par les fentes de retrait présentant ainsi le caractère d'une "pénétration" plutôt que celui d'une imprégnation.

Il importe donc, pour effectuer l'imprégnation, d'opérer le compactage à un taux d'humidité inférieur à la "limite pratique d'imprégnation", telle qu'elle résulte de l'examen du tableau VI.

Par contre il ne faudrait pas imprégner un béton de sol trop sec, le cut-back ayant alors tendance à jouer le rôle d'un lubrifiant entre les particules du sol qui ne présente plus la moindre cohésion. Le cas ne paraît pas être possible dans la pratique, sauf dans le cas de formation de poussière sur le béton.

Les expériences réalisées sur une terre fine provenant d'une carrière de YAOUNDE ont porté sur des teneurs en eau variant de 20 à 28 pour cent de terre sèche. L'optimum de pénétration correspondant aux conditions pratiques de l'imprégnation est obtenu pour une teneur en eau de 24 %. A ce taux, la quantité de cut-back répandu (2 Kg./m<sup>2</sup>) a pénétré en deux heures environ. La pénétration devenait très lente au-dessus de 25 %. (Voir tableau VI). Au-dessus de cette teneur il serait nécessaire :

1) ou bien de ne pas compacter la couche de rechargement tant qu'un ressuyage n'est pas intervenu ;

2) ou bien de la compacter mais avec un rouleau à pneus (au lieu d'un cylindre lisse) ce qui permettrait peut-être de réduire le lissage ;

3) ou encore, après compactage, de décaper la couche lissée, au "grader" par exemple.

b) La teneur en eau

Abstraction faite des phénomènes de lissage, la teneur en eau semble pouvoir modifier la vitesse et la profondeur de l'imprégnation.

Une expérience a été réalisée de la façon suivante :

Des échantillons d'une même terre ont été amenés à des

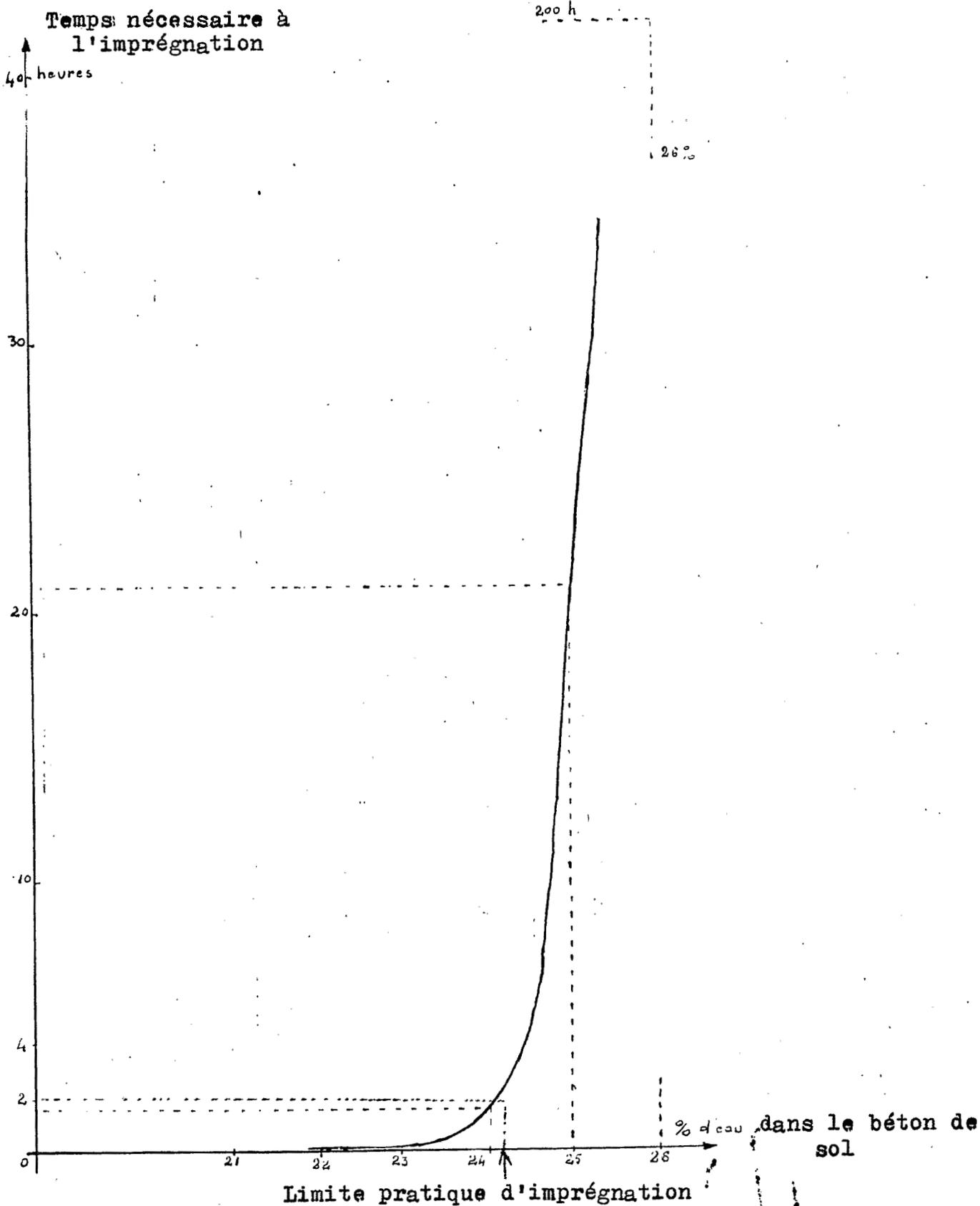


Tableau VI - Influence du lissage sur le temps d'imprégnation

taux d'humidité différents et mis dans des tubes à essai dont le fond avait été percé au préalable. Le compactage a été réalisé par la partie supérieure du tube, et le fond des tubes plongé dans un récipient contenant du cut-back. Les échantillons les plus humides ayant été lissés par le compactage, la surface a été percée par une aiguille afin d'empêcher que l'air emprisonné ne s'oppose à la remontée du cut-back. L'influence du lissage est ainsi éliminée. Les hauteurs de remontée capillaire ont été observées à des temps différents. Les courbes de hauteur d'imprégnation en fonction du temps ont été établies pour chaque taux d'humidité (Tableau VII).

Au-dessus d'un certain taux d'humidité, voisin de 37 % pour les fines d'une carrière de YAOUNDE, le tassement agglomère plus ou moins les agrégats entre eux et provoque une imperméabilité du sol au liant, et même à l'air partiellement.

En-dessous de 23 %, l'humidité est insuffisante pour agglomérer les particules terreuses. Les espaces lacunaires sont considérables. L'ascension capillaire est alors anarchique, et varie avec la ségrégation plus ou moins irrégulière des particules fines au cours du remplissage du tube.

Entre ces deux teneurs critiques, 23 et 37 %, la hauteur d'ascension capillaire est d'autant plus grande que l'humidité est plus forte. L'équilibre est atteint d'autant plus vite que le sol est <sup>plus</sup> sec. La pénétration très rapide au début se stabilise assez vite.

Par conséquent, des terres de plus en plus humides se comportent vis-à-vis du liant comme si le diamètre de leurs capillaires était de plus en plus réduit, et l'effet produit est le même que si le taux d'argile augmentait progressivement.

Le sol fixant plus fortement l'eau que le liant, et ce dernier étant plus visqueux, il est logique de penser :

- 1) que dans un sol humide, l'eau occupe d'abord les petits capillaires ;
- 2) que l'imprégnation se produit préférentiellement à travers les gros capillaires, par suite de la viscosité du liant. Ce fait peut être vérifié à la loupe binoculaire ; des agrégats brisés après enrobage montrent une section absolument dépourvue de liant ;
- 3) que le tassement est d'autant plus important que le taux d'humidité est plus élevé, ce qui diminue le diamètre moyen des capillaires.

Une expérience permet de se faire une idée des différences de comportement du liant en milieu sec et humide ; si l'on observe à la loupe binoculaire la pénétration d'une goutte de liant dans un

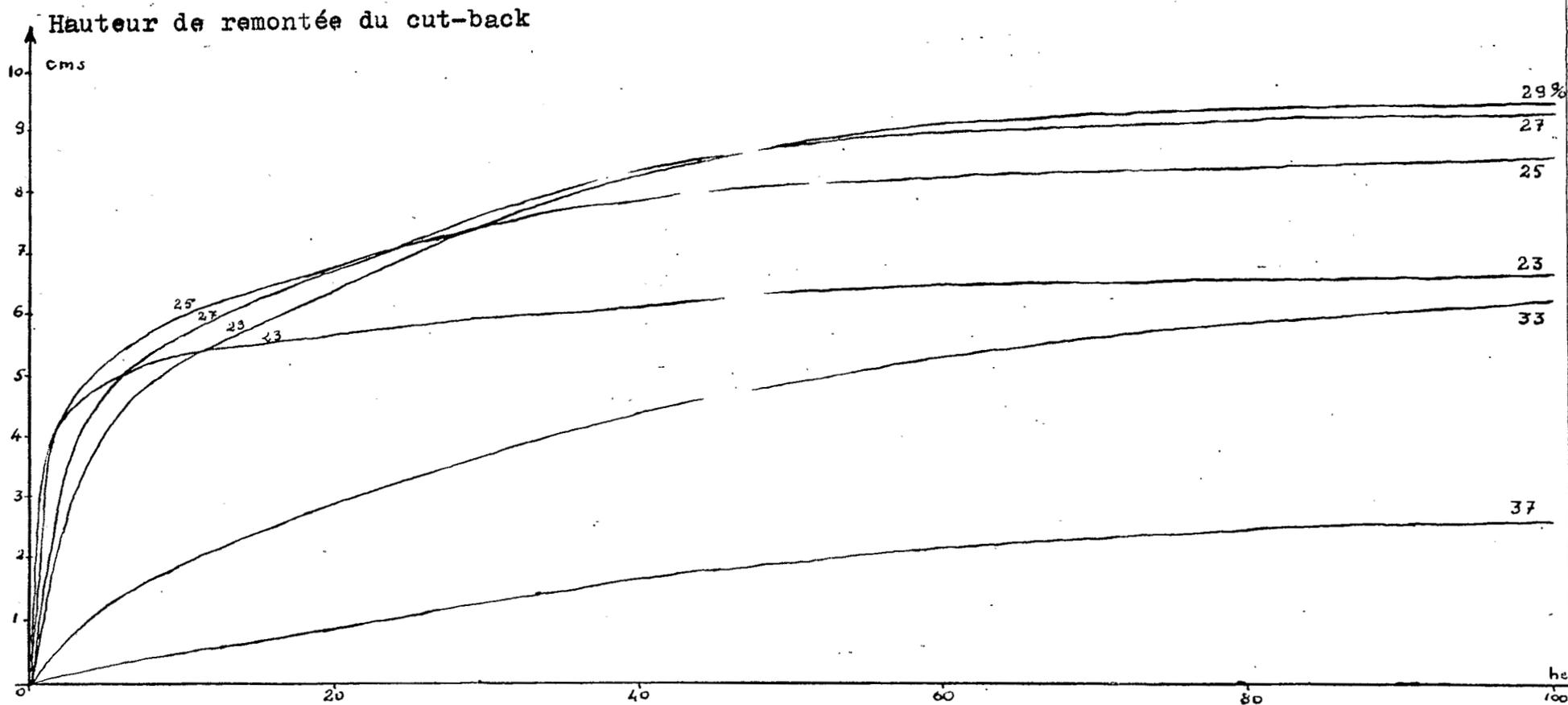


Tableau VII - Influence du taux d'humidité d'un béton de sol sur la pénétration capillaire du liant.

sable fin, sec, et dans ce même sable humidifié, les phénomènes sont différents :

- sur le sable sec le liant se répand lentement, l'angle de mouillage est faible, et l'on peut observer le déplacement des grains de quartz littéralement aspirés par le bord de la goutte de cut-back ;

- sur le sable mouillé, la goutte s'étale plus rapidement, l'angle de mouillage est nettement plus élevé et les grains de quartz ne se déplacent pas de façon appréciable. L'aspect des grains de quartz après séchage de cut-back, est très différent dans les deux cas ;

- sur sable sec, le grain de quartz examiné à la binoculaire semble enrobé d'une pellicule de cut-back assez épaisse. Sa couleur est franchement noire;

- sur sable humide au contraire, la couleur est beaucoup plus claire, le film de liant paraît mince et dilué à la surface du film d'eau qui mouille le grain.

Le phénomène semble être identique sur la terre fine, quoique plus difficile à voir.

Dans l'exemple étudié en laboratoire (terre fine d'une carrière de gravillons de YAOUNDE) l'optimum de pénétration, en tenant compte à la fois du temps et de la profondeur d'imprégnation, est obtenu pour un taux d'humidité de 25 % environ.

En résumé, l'imprégnation se fera dans les meilleures conditions si, dans l'ensemble étudié, la latérite constituant le béton de sol à un taux d'humidité de 24 % lors du compactage et de l'imprégnation. Le lissage sera alors limité, et la pénétration du liant sera bonne.

Rappelons que les fines sur lesquelles ont été réalisées ces expériences de laboratoire avaient une teneur en argile de 46 % environ à l'analyse. Toutefois la teneur réelle est plus élevée, car une partie de l'argile, non dispensée par le pyrophosphate, se trouverait sous forme de pseudo-sables. Le pourcentage d'argile doit donc être en réalité voisin de 50 %.

Quoiqu'il en soit, toute augmentation du taux d'argile favorisera le lissage et ralentira la vitesse d'imprégnation. Par conséquent, plus la teneur en argile est élevée, plus le degré optimum d'humidité devra être abaissé.

### c) Influence de la température du liant sur l'imprégnation

Nous avons comparé les imprégnations obtenues lorsque le

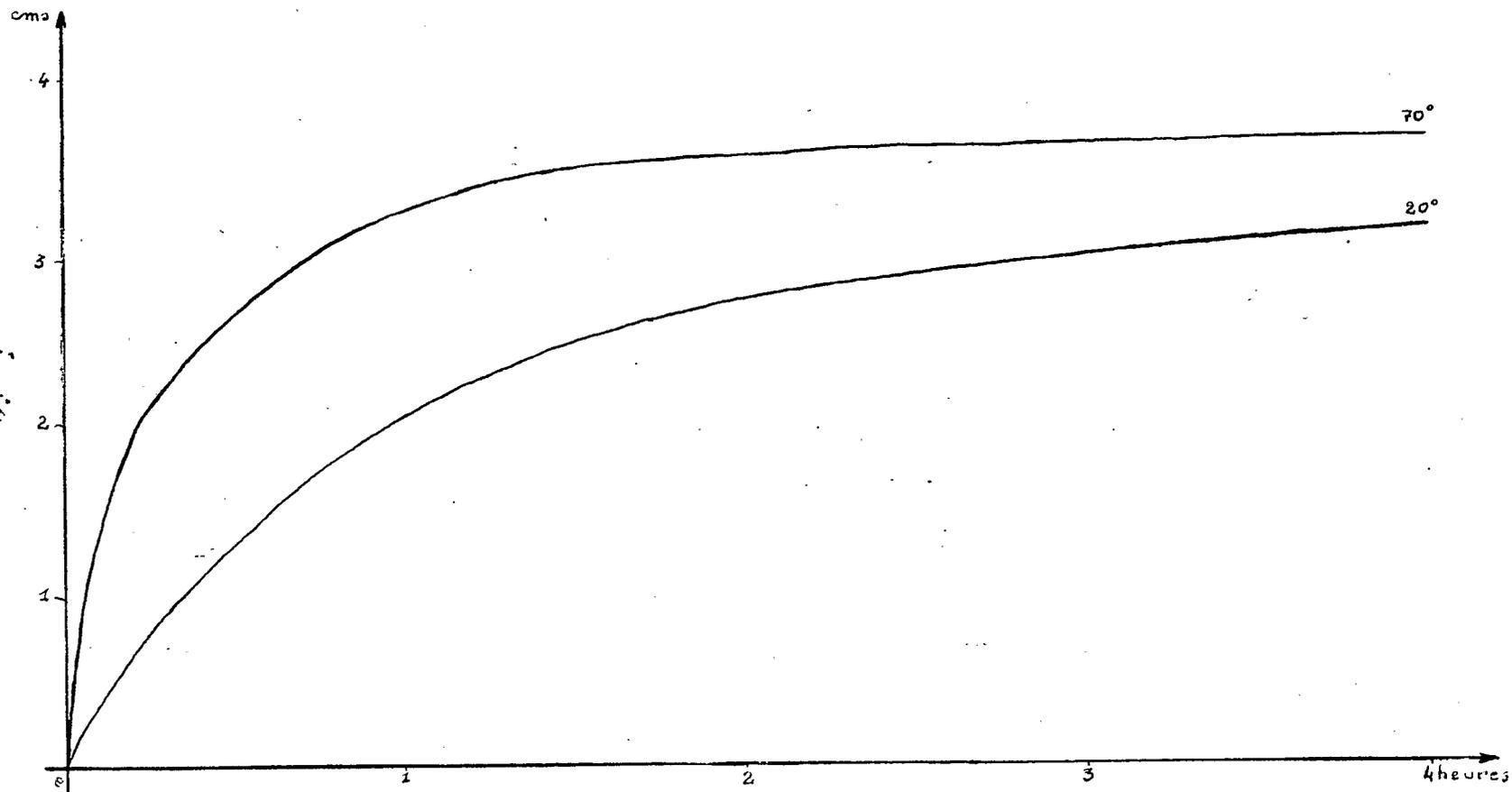


Tableau VIII - Influence de la température du liant sur la profondeur et le temps d'imprégnation.

liant est répandu à chaud (60 à 70 °) ou au froid (25 % environ).

A chaud, la viscosité du liant diminue considérablement et la pénétration est initialement très rapide. Par contre, le chauffage n'est efficace que pendant quelques minutes et la température s'égalise rapidement avec la température du sol. De plus, le chauffage ayant fait disparaître une partie du solvant, le cut-back devient alors plus visqueux, et l'équilibre de pénétration est atteint plus rapidement. La profondeur finale de l'imprégnation semble donc ne pas différer de façon notable. Seul le taux de pénétration initiale varie (Voir Tableau VIII).

### C O N C L U S I O N

En conclusion, il importe de mettre l'accent sur l'importance que revêtent, en zone forestière plus qu'ailleurs, d'une part l'humidité et d'autre part la plasticité des sols. Ces deux facteurs sont à la base des difficultés rencontrées en technique routière dans la zone équatoriale.

Il importe donc de pousser les travaux de recherches dans différentes directions :

1) Plasticité et cohésion des sols naturels - Variations en fonction de la topographie, du taux d'argile et de la profondeur - Rôle d'un horizon gravillonnaire, d'une zone de départ, d'une cuirasse ;

2) Les remontées capillaires - Influence de la roche-mère d'un horizon gravillonnaire ou de la cuirasse - Les remontées à travers le béton de sol ;

3) Plasticité et cohésion des matériaux d'apport.

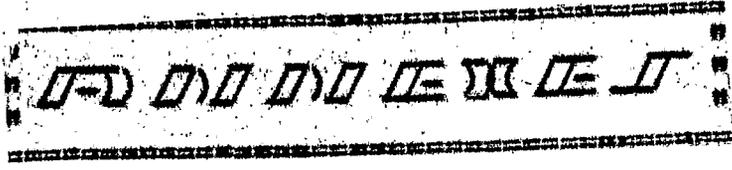
Il importe également d'éclaircir les phénomènes de pénétration des liants hydrocarbonés, leur imperméabilité à l'eau et leur rôle d'écran.

De plus, une étude plus poussée de la granulométrie des bétons de sols pourrait préciser l'importance éventuelle de ce facteur.

Nous avons fait quelques observations sur la teneur en fer des sols utilisés ; les premiers résultats d'analyses ne montraient pas de différence sensible entre les échantillons étudiés. La teneur en Fe 203 est voisine de 12 - 15 % dans les fines des sols rouges. (Attaque par ClH concentré et chaud). Toutefois, la présence des oxydes métalliques étant un des caractères fondamentaux, dans la différenciation des sols des régions tropicales et tempérées, il







GRANULOMETRIE DES GRAVILLONS

	Gravillons %	2 - 5 m.	5 - 10	10 - 15	15
1	74,6	14	26	24,7	36,8
2	66	9	32	30	30
3	61,4	13	51,2	28,2	7,5
4	50	30	37,1	17,8	14,7
5	62	28	50,5	15	6,3
6	70	7,3	19,1	27,7	45,6
7	76,8	8,3	30,9	31,3	29,4
8	79	6,7	25,6	27,4	40,2
9	71	15	34	28	22,5

-----

ANALYSE MECANIQUE DES FINES

Prof.	Fines %	Argile	Limon	Sable fin	Sable gros.
1	25,4	45,4	12,6	20,5	19,2
2	33	61,6	10,6	10,8	15
3	38,3	57,6	10,8	17,1	10,9
4	50	49	7,5	25	15,4
5	38	32,5	15	25,5	22
6	30	54,8	13	17	11,8
7	23,2	60,8	10,9	14	10,8
8	21	46,4	9,4	18,3	21,1

ANALYSE GRANULOMETRIQUE TOTALE

	Argile	Limon	Sable f.	Sable g.	2 - 5	5 - 10	10-15	15
1	11,5	3,2	5,2	4,9	10,8	19,4	16,9	27,5
2	20,5	3,5	3,6	5	6	21,2	20	20
3	22	4,1	6,5	4,2	8	31,5	12,3	4,6
4	24,5	3,8	12,5	7,7	14,8	18,5	8,8	7,5
5	12,4	5,7	9,7	8,4	17,4	31,3	9,3	3,9
6	16,4	3,9	5,1	3,5	5,1	13,3	19,4	31,9
7	14,1	2,5	3,2	2,5	6,4	23,7	24	22,5
8	9,7	2	3,8	4,4	5,2	20,2	21,7	31,8
9	-	-	-	-	10,6	24,1	19,9	16

- 1 - Carrière - Km. 146 - Route YAOUNDE-SANGMELIMA - Bons résultats
- 2 - " " - Km. 166,5 " " " - " "
- 3 - " " - Km. 117 - " " " - Mauvais résultats
- 4 - " " - ? " " " - " "
- 5 - " " - SECRAC YAOUNDE (Abandonné après début d'exploitation) - Résultats présumés - mauvais
- 6 - " " - SECRAC YAOUNDE (Carrefour route Kribi) - Bons résultats
- 7 - " " - Route Usine BASTOS YAOUNDE - " "
- 8 - " " - SECRAC YAOUNDE (Utilisé pour route Mvolye) - Résultats présumés - satisfaisants
- 9 - " " - T.P. YAOUNDE (Utilisé pour route Aéroport) - Résultats présumés - moyens.