

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

GC. 0143

PROJET DE FIN D'ÉTUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

**TITRE : ETUDE DE L'UTILISATION DES GRANULATS DE
TYPE SILEXITE EN GÉOTECHNIQUE ROUTIÈRE**
(NOTAMMENT EN COUCHES DE BASE ET REVÊTEMENT DES COUCHES
DE CHAUSSÉES).

AUTEUR : Maïmouna SIDIBÉ
DIRECTEUR : M. Ismaïla GUËYE
CO-DIRECTEUR : Massamba DIÈNE
DIRECTEUR EXTERNE : Youssouf SAKHO

DATE : Lundi 17 juillet 1995

Dédicaces

*Par la grâce de DIEU le tout puissant,
et de son illustre prophète Mohamed (PSE),
à ma très chère mère,
à mon cher père,
à mes frères et soeurs,
et à tous ceux qui me sont chers.*

" Via Vita est "

pour reprendre une belle formule des Romains de l'Antiquité

*" La route est la vie", ou plutôt
" est source de vie"*

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements aux professeurs de l'Ecole Polytechnique de Thiès qui ont bien voulu nous encadrer, pour leur disponibilité, leurs conseils et leur collaboration.

Nous citons:

- **M. Ismaïla GUEYE**, notre directeur interne,
- **M. Massamba DIENE**, notre co - directeur,
- **M. Youssouf SAKHO**, notre directeur externe.

Ces remerciements vont aussi à l'endroit de tous les professeurs de l'Ecole, pour la bonne formation qu'il nous ont dispensée, et de **M. Mbagnick BOUSSO** pour son assistance lors des séances de laboratoire, qui furent nombreuses et nécessitèrent beaucoup d'énergie.

Nous tenons à remercier certaines personnes extérieures à l'Ecole et qui ont contribué à l'aboutissement de ce projet, parmi lesquelles nous pouvons citer:

- **M. Meïssa FALL**, professeur à l'I.S.T. qui nous a proposé ce sujet et nous a beaucoup encouragé,
- **Mrs SALL, GUETTE, et DIAKHATE**, Ingénieurs à la Direction des Travaux Publics,
- **M. Maphathé NDIUCK**, transporteur et exploitant de la carrière de silixite et son fils Bassirou,
- **M. Dominique NDONG**, ainsi que tout le personnel du **C.E.R.E.E.Q.**

Enfin nous terminerons par remercier tous les collègues et élèves-ingénieurs, qui malgré les nombreuses contraintes scolaires ont bien voulu participer à nos travaux et tous ceux que je n'ai pu citer et qui nous ont aidé dans notre projet.

SOMMAIRE

L'objectif principal de cette présente étude est d'étudier les possibilités d'utilisation des granulats type silexite en géotechnique routière notamment en couche de base et revêtement des couches de chassées, en vue d'en faire un matériau de substitution afin de répondre à un souci de résoudre les effets de raréfaction des matériaux routiers (utilisation abusive de basalte et de latérite, chéreté des ressources énergétiques entraînant une augmentation des coûts de transports).

C'est ainsi que dans cette présente étude, nous avons cherché à estimer les performances techniques des granulats type silexite utilisés sans traitement ou avec traitement par adjonction de latérite(en couches de base) et de basalte (grave-bitume en couches de base et bétons bitumineux en couches de surface).

Nous avons établi des formulations conformes aux spécifications techniques en construction routière et les résultats obtenus satisfont en majeure partie aux exigences de stabilité et de fluage. Nous avons ainsi pu constater que l'amélioration avec le basalte donne des résultats plus performants.

Les rapports de stabilité (avec imbibition/sans imbibition) sont supérieurs à ceux exigés , mais nous avons tenu à étudier l'effet des dopes dans les bétons bitumineux à base de granulats siliceux qui sont souvent sujet à l'effet du désenrobage et procéder à une étude comparative de l'apport des dopes et de celui des fillers calcaires. Ce dernier s'avère plus important que les dopes, ce qui est intéressant d'autant plus que les dopes ne sont pas du tout d'usage courant.

L'évaluation financière nous a permis de constater que l'utilisation du silexite amélioré avec les matériaux routiers performants est plus judicieuse, vu les opportunités qu'elle offre par rapport à la faiblesse des différences de coûts engendrée.

Pour terminer cette étude, nous avons donné quelques suggestions, quant à l'amélioration de la qualité du matériau (granulométrie et forme) par un équipement plus adapté en vue d'obtenir des résultats aussi performants que ceux du basalte et proposé quelques perspectives de recherche notamment sur le remplacement de la fraction 0/3 de silex comportant beaucoup d'impuretés par un matériau plus propre et plus riche en fines, et enfin sur l'utilisation des émulsions cationiques qui pourrait améliorer encore l'adhésivité.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	I
Sommaire	II
Table des matières	IV
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	VIII
Introduction	1
Chapitre 1 : Description de la situation actuelle	
1.1 : Généralités sur les granulats routiers	2
1.2 : Matériaux d'usage courant au Sénégal	5
1.3 : Analyse des problèmes rencontrés en construction routière	9
1.4 : Propositions de stratégie de résolution	9
1.5 : Disponibilité du silexite comme produits dérivés	10
1.5.1 : Processus de production du silexite	10
1.5.2 : Dernières données statistiques	12
Chapitre 2 : Etude bibliographique	
2.1 : Généralités sur la construction routière et les techniques de traitement des matériaux	
2.1.1 : Généralités sur la construction routière	13
2.1.2 : Les techniques de traitement des matériaux	15
2.1.2.1 : Généralités	15
2.1.2.2 : Différents modes de traitement des matériaux	16
2.1.2.2.1 : Stabilisation chimique	16
2.1.2.2.1.1 : Stabilisation à la chaux	16
2.1.2.2.1.2 : Stabilisation au ciment	17
2.1.2.2.2 : Stabilisation mécanique	17
2.1.2.2.3 : Traitement aux liants bitumineux	17

Suite table des matières

2.2 : Dopes	22
2.3 : Fillers	23
2.3.1 : Généralités	23
2.3.2 : Utilisation des fillers dans la réalisation des enrobés bitumineux	23
2.3.3 : Utilisation des fillers dans la réalisation des couches constituant le corps de la chaussée	24
2.4 : Formulations et contrôles	24
2.4.1 : Influence du rapport filler/bitume	26
2.4.2 : Influence des différents paramètres	27
2.4.2.1 : Influence du pourcentage des vides	27
2.4.2.2 : Influence de la teneur en bitume	27
2.4.2.3 : Influence des granulats	27
2.5 : Conclusion et recommandations	28
Chapitre 3 : Etude technique	
3.1 : Caractéristiques du tout-venant de concassage	29
3.1.1 : Composition	29
3.1.2 : Pétrologie	29
3.1.3 : Minéralogie	29
3.1.4 : Résultats de l'essai de réactivité et interprétation	30
3.1.5 : Identification des matériaux	30
3.1.5.1 : Caractéristiques physiques	30
3.1.5.2 : Caractéristiques mécaniques	34
3.1.5.3 : Caractéristiques granulométriques	35
3.2 : Caractéristiques de l'agrégat concassé	
3.2.1 : Aspects et caractéristiques granulométriques des granulats échantillonnés	35
3.2.1.1 : Présentation et aspect externe	35
3.2.1.2 : Caractéristiques granulométriques	35
3.2.1.3 : Propriétés mécaniques	38

Suite table des matières

3.3 : Les différents formulations retenues et résultats obtenus	
3.3.1 : En couche de base	
3.3.1.1 : Utilisation du concassé 0/40 silex scalpé	39
3.3.1.1.1 : Concassé 0/40 Silex seul	
3.3.1.1.2 : Mélanges 0/40 Silex et 0/40 latérite	40
3.3.1.1.3 : Analyse et interprétation des résultats obtenus	40
3.3.1.2 : Utilisation des concassés pour la confection de grave-bitume 0/25	
3.3.1.2.1 : Concassés de silex seuls	45
3.3.1.2.2 : Mélanges de silex et de basalte	45
3.3.1.2.3 : Analyse et interprétation des résultats obtenus	50
3.3.2 : En couches de revêtement: Utilisation des concassés pour la confection de bétons bitumineux 0/12 et 0/16	
3.3.2.1 : Concassés de silex seuls	52
3.3.2.2 : Mélanges de silex et de basalte	52
3.3.2.3 : Analyse et interprétation des résultats obtenus	57
3.3.3 : Dopes et fillers	57
3.3.4 : Comparaison des apports en filler et en dope	58
Chapitre 4 : Analyse Economique	60
Conclusion et Recommandations	65
Références Bibliographiques	67
Annexes	69

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Répartition de la production de granulats (en m ³) pour le quinquennat 1986-1991	3
Tableau 1.2 : Estimation de la demande nationale en granulats (en m ³) pour le quinquennat 1992-1997	3
Tableau 2.1 : Fuseaux pour grave-bitume proposés par le Guide	18
Tableau 2.2 : Fuseaux pour grave-bitume 0/20 et 0/31,5 proposés par le L.C.P.C. Français	18
Tableau 2.3 : Classes de trafic en nombre cumulé d'un essieu équivalent	19
Tableau 2.4 : Fuseaux pour béton bitumineux proposés par le Guide	20
Tableau 2.5 : Fuseaux pour enrobés denses ED et bétons bitumineux BB proposés par le Guide	20
Tableau 3.1 : Résultats de l'essai de réactivité des granulats	33
Tableau 3.2 : Quelques caractéristiques techniques des granulats	33
Tableau 3.3 : Coefficients de forme des fractions de silex disponibles	33
Tableau 3.4 : Résultats de la blocométrie sur le tout-venant	36
Tableau 3.5 : Résultats de la granulométrie sur le tout-venant	37
Tableau 3.6 : Recommandations d'utilisation des matériaux de la couche de base par le Guide	39
Tableau 3.7 : Résultats des C.B.R. obtenus après 96 h. d'imbibition	41
Tableau 3.8 : Coefficients d'uniformité et de courbure des mélanges avant et après C.B.R.	44
Tableau 3.9 : Formulation du 10/20 Silex	46
Tableau 3.10 : Formulation du 15/25 Silex	47
Tableau 3.11 : Récapitulatif des résultats des différents essais de grave-bitume et de béton bitumineux	51
Tableau 3.12 : Formulation du 0/12 Silex	53
Tableau 3.13 : Formulation du 0/16 Silex	54
Tableau 3.14 : Résultats des meilleures formulations avec et sans filler calcaire	59
Tableau 4.1 : Calcul des volumes et des tonnages de matériaux	62
Tableau 4.2 : Prix des matériaux en F CFA par T/km sauf exception	62
Tableau 4.3 : Coûts des variantes retenues pour la couche de base en concassés 0/40	62
Tableau 4.4 : Coûts des différentes variantes de la grave-bitume	63
Tableau 4.5 : Coûts des différentes variantes du béton bitumineux	63
Tableau 4.6 : Récapitulatif des coûts des variantes	64

Liste des figures

Figure 1.1 : Régions de production des granulats concassés	4
Figure 1.2 : Zones climatiques et Zones d'éloignement	6
Figure 1.3 : Evolution de la production en granulats quinquennat 1986-1991	7
Figure 1.4: Estimation de la demande en granulats pour quelques secteurs d'activités quinquennat 1992-1997	8
Figure 1.5 : Schéma de l'opération de débouillage à la C.S.P.T	11
Figure 301: Position et variation du pourcentage de silex au niveau du log type de la série phosphatée de Taïba	31
Figure 302: Diagramme de classification des granulats selon leur réactivité aux alcalins (A.S.T.M.C. 289-71)	32
Figure 3.0 : Résultats de la blocométrie et de la granulométrie sur le tout-venant	37
Figure 3.1 : Evolution du C.B.R. en fonction du pourcentage de latérite ajouté	41
Figure 3.2 : Courbe granulométrique avant et après C.B.R. du mélange de silex 80% et latérite 20%	43
Figure 3.3 : Courbe granulométrique de la formulation du 10/20	48
Figure 3.4 : Courbe granulométrique de la formulation du 15/25	49
Figure 3.5 : Graphique de comparaison des rapports de stabilités (dopées et non dopées) obtenues avec et sans imbibition	50
Figure 3.6 : Courbe granulométrique de la formulation du 0/12	55
Figure 3.7 : Courbe granulométrique de la formulation du 0/16	56
Figure 3.8 : Comparaison des résultats obtenus avec et sans filler calcaire	59
Figure 4.1 : Coupe transversale d'une route revêtue	61

Introduction .

Introduction

Le Sénégal, dans sa politique d'ajustement structurel, fait de la construction routière, une de ses principales priorités puisqu'elle constitue, de par son rôle économique et social, un important facteur de développement. C'est ainsi que sera élaboré un Programme d'Ajustement Structurel du Transport (P.A.S.T.), pour des travaux de renforcement de 854 km dont 347 ont été réalisés dans la région de Ross-Béthio-Ourossogui et 287 dans les régions de Thiés, Diourbel, Kaolack et Dakar. Actuellement, avec la tranche B du P.A.S.T, des travaux sont sur le point d'être réalisés dans les régions Thiés, Diourbel, Saint-Louis, Louga, Fatick, Kaolack, Kolda et Ziguinchor.

Pour la réalisation de cette tranche, les études ont montré qu'ils existent beaucoup de carrières de latérite mais ces gisements ne sont pas exploitables pour les besoins du renforcement, vu la faible qualité de la latérite. La seule carrière de latérite disponible est celle de Lam-Lam située à environ 10 km de Thiés-ville. Cela a conduit à la proposition de l'utilisation du sable de construction qui est un matériau uniformément réparti sur le territoire, et aussi des graves concassées.

C'est ainsi que des études techniques ont été menées sur le sable-bitume et les graves concassées 0/25 de basalte et c'est ce qui explique la nécessité de rechercher des matériaux de substitution disponibles en quantités suffisantes comme les granulats de type silexite, déchets d'exploitation de la C.S.P.T. pour satisfaire les besoins des projets routiers (entretien, renforcement, reconstruction et construction de routes bitumées).

Par conséquent, dans la présente étude, nous ferons d'abord une description de la situation actuelle pour mieux poser le problème de raréfaction des matériaux routiers, puis une étude bibliographique pour décrire les différentes techniques de traitement des matériaux et les formulations proposées dans les manuels de dimensionnement, et enfin une étude technique où nous ferons le tour d'horizon des possibilités d'utilisation des silexites en géotechnique routière. Nous terminerons cette étude par une analyse économique et ferons des propositions et des recommandations en vue d'une future utilisation de ces granulats.

CHAPITRE I :

*Description de la
situation actuelle.*

Chapitre I: Description de la situation actuelle.

1.1) Généralités sur les granulats routiers

Les granulats routiers sont des matériaux qui entrent dans la composition des bétons et enrobés bitumineux des chaussées routières et des ballasts de voie ferrée, provenant soit des matériaux naturels comme les alluvions ou les formations résiduelles, soit du concassage des roches massives (roches éruptives, métamorphiques ou sédimentaires).

Ils ont en commun d'être définis non par une teneur en eau, comme les minerais métalliques, mais par des propriétés essentiellement physiques, mécaniques et chimiques: granularité, forme, état de surface, propreté, altérabilité, résistances mécaniques, affinité pour les liants, etc... La qualité des granulats est directement conditionnée par la nature pétrographique (composition minéralogique et texture) de la roche et le mode d'élaboration du granulats.

Ce sont des pondéreux et leur valeur pour l'usager est directement fonction des coûts de transport. On admet que le coût d'un parcours de 30 km est équivalent au prix des matériaux départ carrière

Les granulats routiers proviennent en majeure partie du concassage des roches basaltiques, des calcaires et des grès et de l'extraction des sables et des graveleux latéritiques (cf. Tableau 1.1 Source: Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G.). Les installations de production de granulats concassés varient en fonction de la nature de la roche exploitée et du débouché commercial des granulats produits qui couvre une large gamme: 0/3, 3/8, 8/16, 16/25, 25/40 et les tout-venants de concassages 0/25, 0/40, 0/60.

Les régions administratives de Dakar et de Thiés assurent l'essentiel de la production de granulats concassés du pays (cf. Figure 1.1 Source: Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G.).

Années	1986	1987	1988	1989	1990	1991	TOTAL	%
Granulats								
Grès	2834	4115	4182	5417	23792	10167	50507	8.9
Calcaires	15934	18502	21248	24834	34626	39276	154420	27.1
Basaltes	3270	8466	12219	12445	13659	15844	65903	11.6
Sables	19030	26898	31972	40510	61200	80753	260363	45.8
Graveleux latéritiques	4362	4733	3700	4000	7680	13209	37684	6.6
TOTAL	45430	62714	73321	87206	140957	159249	568877	100
%	8.0	11.0	12.9	15.3	24.8	28.0	100	

Tab 4.1: Répartition de la production nationale de granulats (en m³) pour le quinquennat 1986-1991.

Source : Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie (D.E.M.G) [Référence n°6]

Années	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Nature de la demande						
Construction routière	32200	35500	46000	68100	98800	128950
Entretien Routier	37400	48200	59350	98200	128800	158910
Régie des Chemins Fer	40500	49700	76000	105900	150900	160000
Entretien Régie	32600	38600	56600	99200	112600	152400
Canal du Cayer	32000	32000	32000	32000	32000	32000
Bâtiment	59175	63900	94450	95450	130950	207100
TOTAL	234875	269900	339050	498850	654050	839360

Tab 4.2: Estimation de la demande nationale en granulats (m³) pour le quinquennat 1992-1997.

1.2) Matériaux de chaussée d'usage courant au Sénégal

La latérite, qui est le matériau le plus utilisé en construction routière, pose aujourd'hui d'énormes problèmes. En effet, sur l'étendue du territoire national, il y a beaucoup de gisements latéritiques mais l'exploitation coûte chère vu l'éloignement de ces derniers par rapport aux régions concernées par les projets routiers (cf. Fig 1.2. Source: Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G.). Il se pose aussi un problème de disponibilité car les carrières actuelles tendent à s'épuiser vu l'évolution de la production, la répartition et l'estimation de la demande en granulats (cf. Fig. 1.2 et 1.3 et Tableaux 1.1 et 1.2 Source: Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G.) et la latérite ne serait plus de bonne qualité ou le degré de latérisation serait assez faible.

Par rapport aux matériaux routiers proprement dits, nous avons constaté qu'une bonne partie de ces matériaux ne sont pas utilisés en route:

- la production de grès est surtout destinée à la confection de bétons hydrauliques.
- les 3/4 de la production de granulats calcaires sont destinés à l'industrie du Bâtiment, le reste est consacré à la réalisation de dalles de trottoirs, de pierres ornementales, à la cimenterie de Rufisque et aux ballasts de voie ferrée.
- le calcaire crayeux de Bandia et de la Région du Fleuve à forte teneur de CaO est utilisé comme intrant par la C.S.S. à raison de 20 t/j.

Seuls les granulats suivants sont d'usage courant en construction routière:

- le basalte dont la moitié de la production, pour des raisons stratégiques, est utilisée pour la réalisation d'enrobés bitumineux, le reste étant réparti entre l'industrie du Bâtiment, les travaux de Génie Civil et la Régie des Chemins de Fer.
- la quasi totalité des graveleux latéritiques extraits est utilisée pour la réalisation des couches de fondation et de base, le reste étant consommé dans l'industrie du Bâtiment.

En conclusion, il apparaît que ce sont les secteurs routiers et ferroviaires qui consomment la plus grande part des granulats produits (cf. Fig 1.3 et Tableau 1.2 Source: Direction de l'Energie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G.)

Fig 1.2: DECOMPOSITION DU SENEGAL EN ZONES POUR
 TENIR COMPTE DE L'ELOIGNEMENT ET DES CON-
 DITIONS D'ENVIRONNEMENT

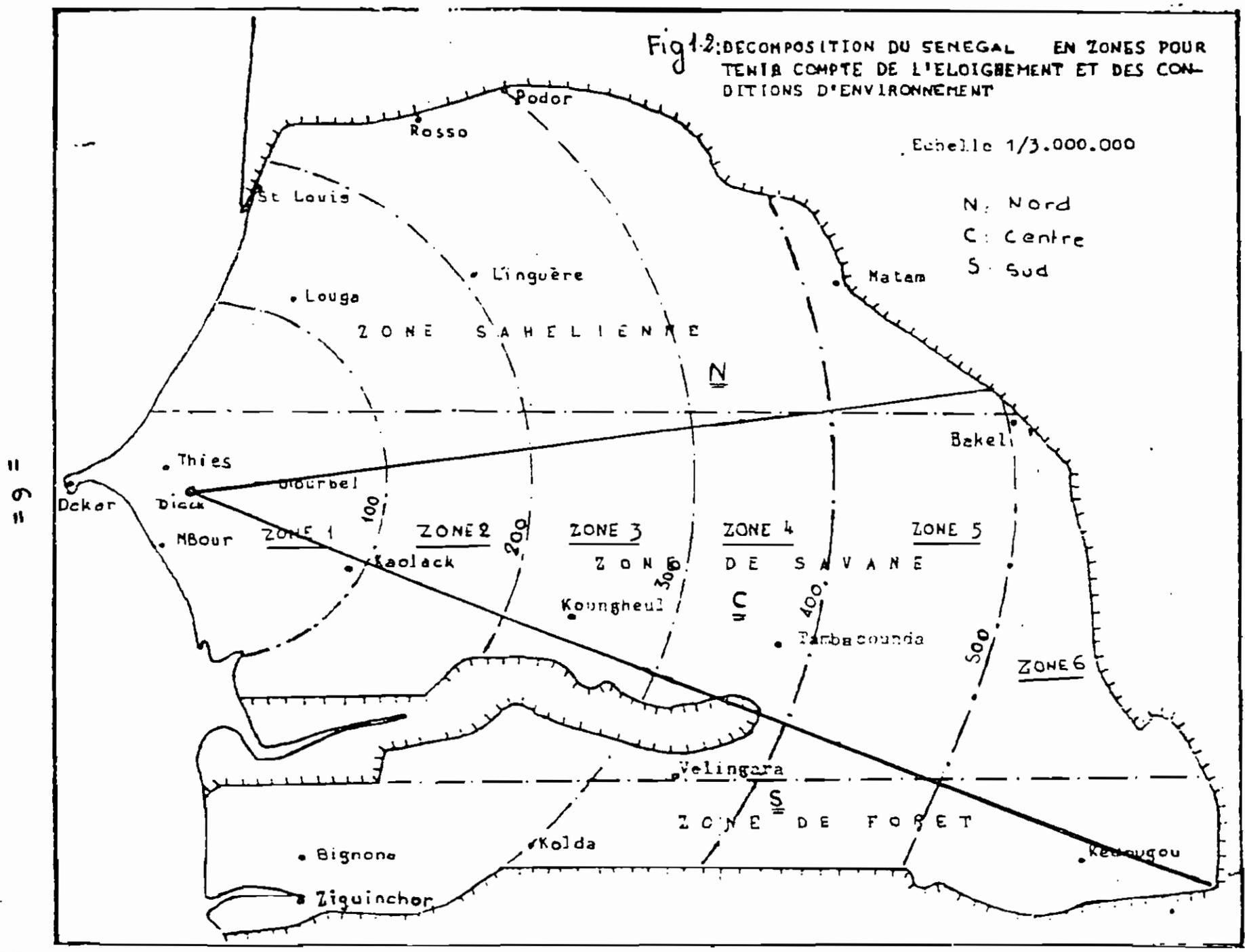


Fig 1.2: ZONES CLIMATIQUES ET ZONES D'ELOIGNEMENT

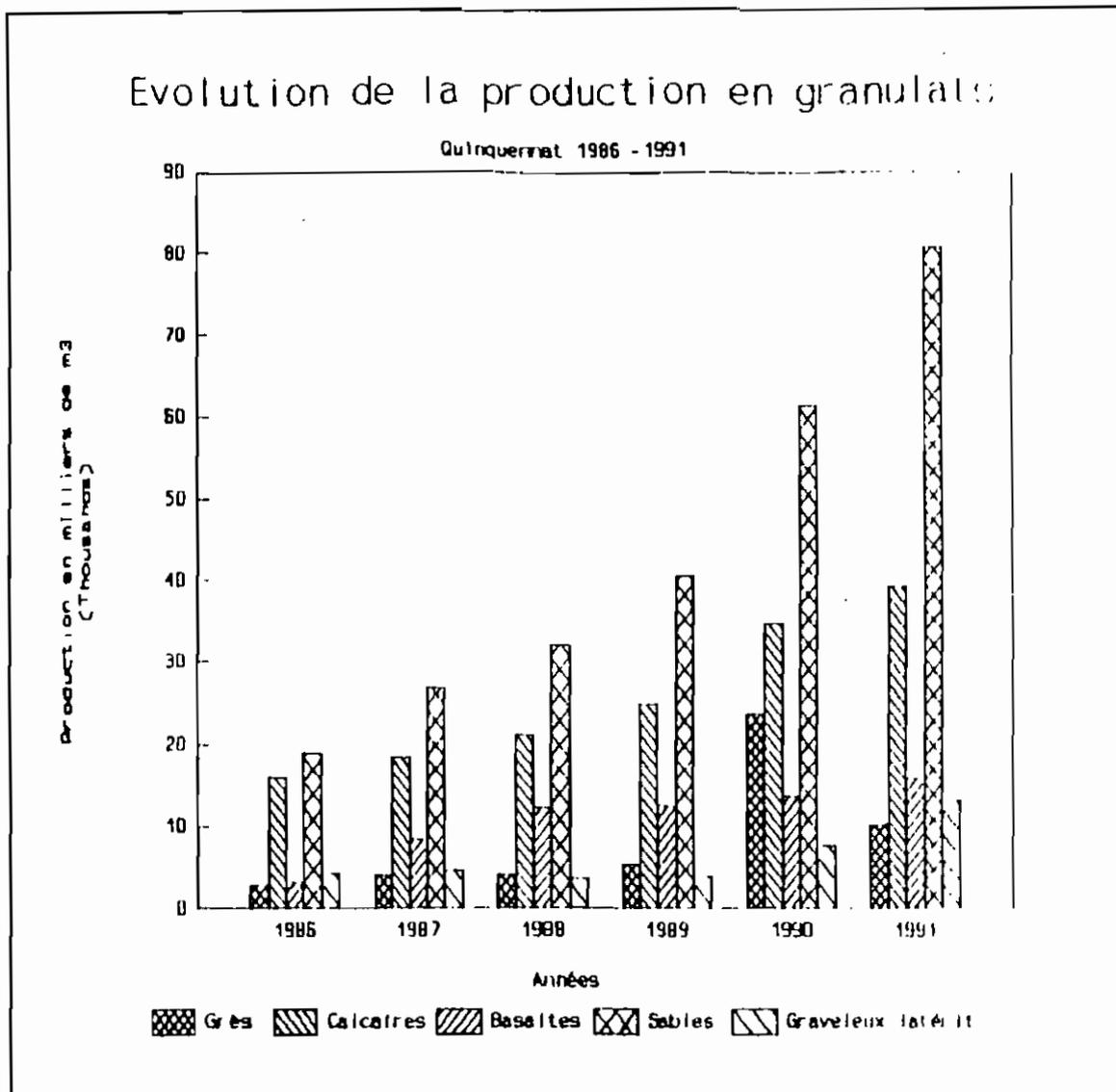


Fig 1-3: Evolution de la production en granulats quinquennat 1986-1991

Cette production devrait augmenter encore dans les années à venir, avec la mise en oeuvre du Programme d'Adjustement Sectoriel des Transports (P.A.S.T) et la réalisation des grands projets comme ceux du Canal du Cayor et celui de la MIFERSSO.

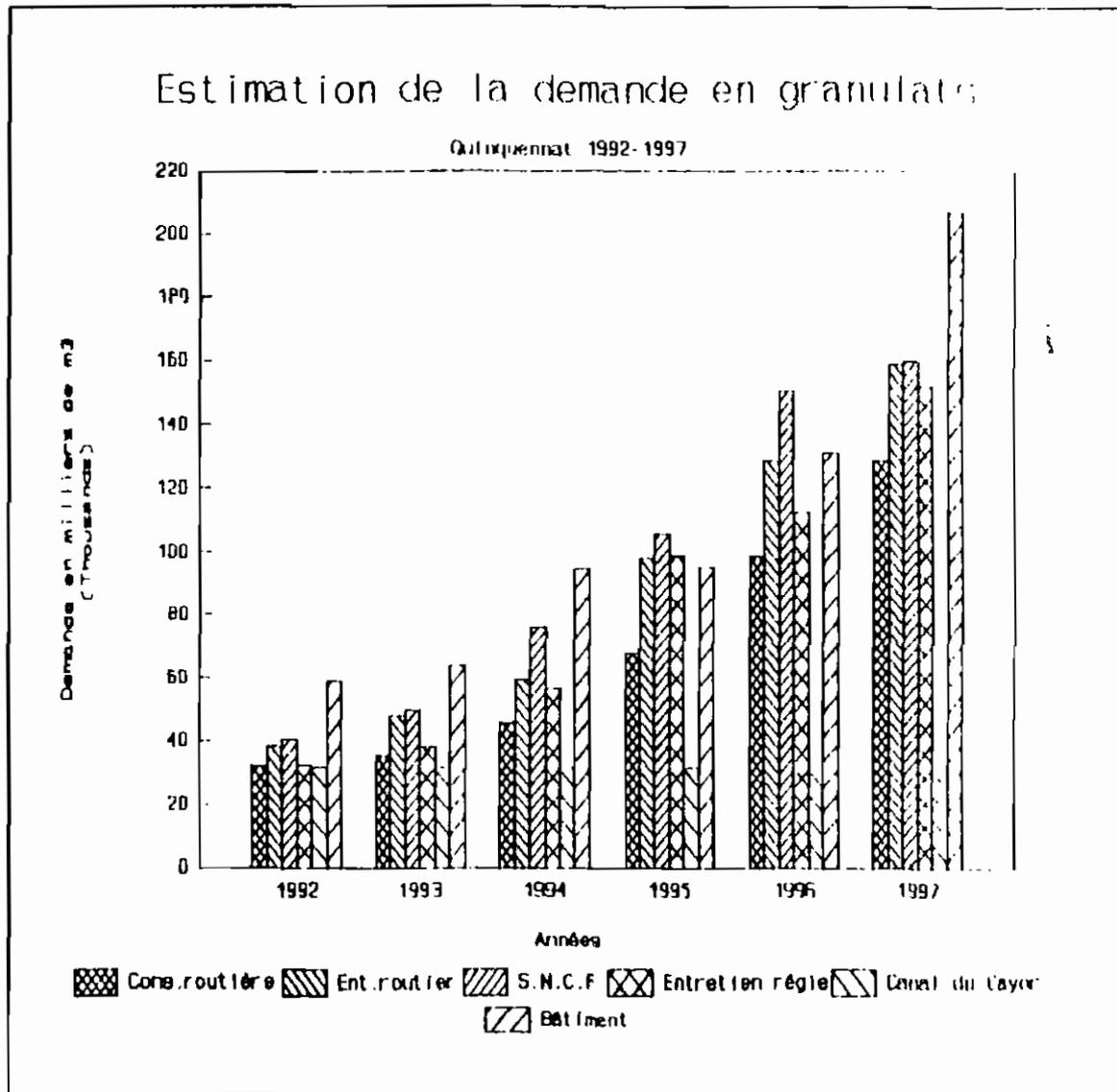


Fig 4.4: Estimation de la demande en granulats pour quelques secteurs d'activités quinquennat 1992-1997

1.3) Analyse des problèmes rencontrés en construction routière

Par rapport à la localisation des carrières, il se pose les problèmes suivants:

- l'éloignement des sites dû à une répartition géographique inégale: par exemple, les zones 5 et 6 correspondant aux régions de Tambacounda-Bakel et de Kédougou, sont riches en gisements latéritiques, en grès et calcaires contrairement à celle de Louga qui en est presque dépourvu.
- les coûts d'exploitation élevés: matériels et pièces de rechange pour les stations de concassage, ressources énergétiques importées.

Concernant les quantités de matériaux disponibles, l'estimation n'est pas trop fiable à cause de:

- la non remise à jour des quantités prélevées,
- l'exploitation clandestine,
- l'accentuation de l'exploitation si les problèmes de fonctionnement dus aux manques de pièces de rechange sont résolus,
- la sous traitance fausse aussi les quantités estimées,
- l'épuisement de certaines carrières due à une mauvaise gestion de l'exploitation.

1.4) Propositions de stratégies de résolution

L'analyse a fait ressortir l'inégalité de la répartition des granulats routiers mais aussi leur insuffisance. Il s'avère dès lors nécessaire, dans le court terme, de trouver des matériaux de substitution, mais aussi de penser lors de la conception, à l'utilisation de granulats trouvés en place.

Un matériau comme le concassé de basalte est le matériau le plus utilisé en revêtement routier au Sénégal, ce qui constitue l'une des causes de son exploitation abusive. C'est pourquoi, nous pensons qu'il faudrait:

- utiliser d'autres matériaux selon les potentialités régionales comme les concassés de grès et de calcaire qui sont généralement destinés aux ouvrages d'art, et qui pourtant pourraient fournir des résultats comparables, ainsi que le banco-coquillage au Sud de la Casamance, le marno-calcaire à

Louga, la dolorite à Tambacounda pour le revêtement et le silixite à Thiès pour les couches de base et de revêtement;

- utiliser le sable de mer ou de dune, l'expérimenter davantage en vue de déterminer des formulations intéressantes qui pourraient diminuer les risques d'ornièrabilité et est nécessaire dans la mesure où le Sénégal dispose d'assez importantes quantités de sable et uniformément réparties;

- enfin, l'étude géotechnique de nouveaux matériaux (par exemple, les granulats de type silixite) à laquelle ce projet de fin d'études est destiné) utilisables en construction routière: déchets d'exploitation, cendres et ordures ménagères etc., devrait être faite, expérimentée (planches d'essai) et étendue en vue de diversifier et d'accroître le volume des matériaux routiers.

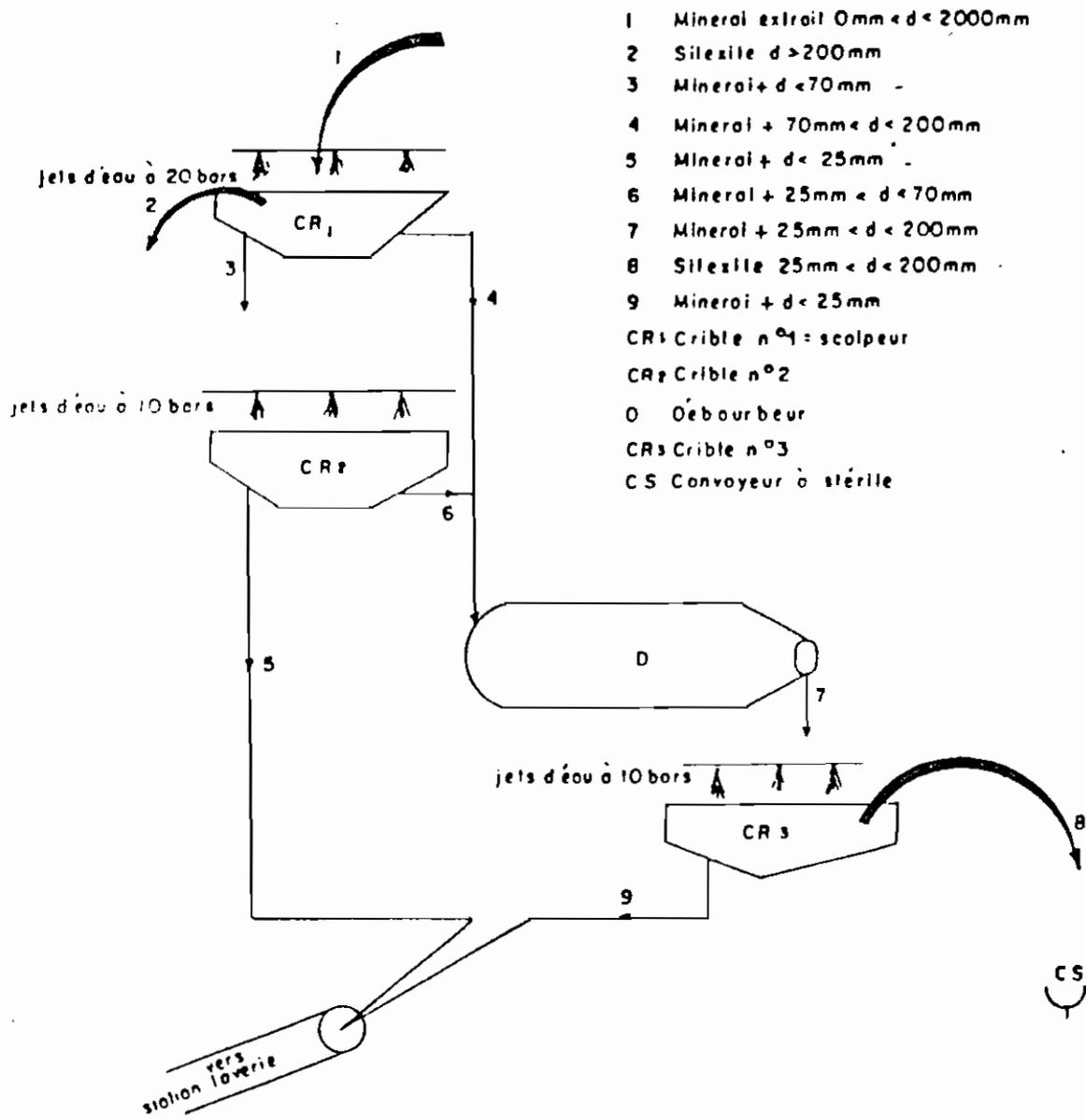
Il serait aussi pertinent d'élaborer un programme de recherche sur les matériaux, dans un proche avenir, en vue de concevoir les routes en fonction de matériaux trouvés en place. Ceci permettrait une meilleure utilisation des matériaux et réduirait considérablement les coûts de construction et de réhabilitation des routes par une baisse des coûts de transport.

1.5) Disponibilité du silex comme produits dérivés

1.5.1) Processus de production du silixite.

Le terme de "silixite", purement descriptif, est donné à un produit composite issu de la valorisation du minerai phosphatique. Des études pétrographiques et minéralogiques permettent de mieux caractériser ce produit.

Le minerai abattu est livré par des camions de 100 Tonnes ou Dumpers sous forme d'un tout venant de granulométrie 0/2000 mm au niveau du crible n°1 encore appelé Scalpeur ou épierreur (cf Fig. 1.5 Source: Abdoulaye DIEME, Mémoire d'Ingénieur-Géologue I.S.T,1991) qui le soumet à des jets d'eau à 20 bars pour séparer les blocs des particules minérales.



- 1 Mineral extrait $0\text{mm} < d < 2000\text{mm}$
- 2 Silice $d > 200\text{mm}$
- 3 Mineral $+ d < 70\text{mm}$ -
- 4 Mineral $+ 70\text{mm} < d < 200\text{mm}$
- 5 Mineral $+ d < 25\text{mm}$ -
- 6 Mineral $+ 25\text{mm} < d < 70\text{mm}$
- 7 Mineral $+ 25\text{mm} < d < 200\text{mm}$
- 8 Silice $25\text{mm} < d < 200\text{mm}$
- 9 Mineral $+ d < 25\text{mm}$
- CR1 Crible n°1 = scolpeur
- CR2 Crible n°2
- D Débourbeur
- CR3 Crible n°3
- CS Convoyeur à stérile

Fig 15 Schéma de l'opération de débourbage à la C.S.P.T.

Les blocs de diamètre supérieur à 200 mm sont évacués au niveau des alvéoles d'où ils sont repris par les dumpers pour être disposés en de petits amas dispersés. Le reste des éléments (0/200 mm) poursuit le processus de débouillage jusqu'au crible n°3 d'où, après soumission à des jets d'eau de 100 bars, il est scindé en une pulpe minérale ($d < 25$ mm) à destination de la station de laverie et en un résidu transporté par un convoyeur à stérile vers un terril.

Les statistiques disponibles (Source: Direction d'Exploitation de la C.S.P.T.) font ressortir rien que pour le mois de Septembre 1991 une production mensuelle de stérile de 95133 tonnes La production quotidienne moyenne de silixite peut être estimée à environ 5000t/j:

- les 3/4 de cette production, de granulométrie 25/200 mm sont stockés sur un terril.
- le 1/4 restant de dimension supérieure à 200 mm disposé de manière éparsé dans la mine.

Les réserves de stérile disponibles tant à Ndomor Diop qu'au Panneau II de la C.S.P.T., et sont estimées à plus de 12 millions de m³.

1.5.2) Dernières données statistiques (Source: Direction d'Exploitation de la C.S.P.T.).

La production annuelle de silixites est estimée à environ 1 500 000 tonnes et celle des dix dernières années à 12 400 000 tonnes.

Les terrils de Keur Mor Fall et Ndomor Diop constituent les deux stocks actuels et comportent respectivement 28 800 000 et 16 800 000 tonnes.

D'énormes quantités constituent les réserves disponibles et non encore exploitées. Elles sont localisées au Panneau IV (ou 2002) et à Tobéne et estimées à 84 000 000 tonnes à 9 780 000 tonnes respectivement.

CHAPITRE II:
*Etude
bibliographique.*

Chapitre II: Etude bibliographique.

Le Sénégal offre des ressources en matériaux satisfaisant aux normes traditionnelles. Cependant, les ingénieurs routiers, par souci d'économie, sont appelés à tenir en compte des distances de transport et des moyens d'exploitation des gisements. Cela les a conduits à utiliser des matériaux présentant des qualités inférieures ou des matériaux très particuliers et cela dans toutes les couches du corps de chaussée.

Le problème du choix du matériaux, de sa préparation, de son traitement et de sa mise en oeuvre est fortement tributaire de toutes les autres conditions naturelles (climat, trafic). Il n'est pas toujours évident de pouvoir toujours utiliser des tout-venants latéritiques capables de constituer de bonnes couches de base. Si on en trouve, répondant aux spécifications techniques, il faudra mettre au point une solution économique, lorsque les trafics demeurent modérés.

Mais on peut penser qu'au fur et à mesure du développement du trafic lourd, la technique routière évoluera de plus en plus vers des formules d'amélioration des matériaux naturels: dans un premier temps, on a employé des tout-venants de concassage ou des bétons de sols obtenus par mélange, puis on est passé à des techniques de stabilisation des matériaux naturels en y incorporant, soit de la chaux ou du ciment, soit des liants bitumineux.

Dans bien des cas difficiles, la stabilisation aux liants bitumineux a apporté une solution parfaitement valable, grâce surtout à la grande souplesse des chaussées ainsi réalisées.

2.1) Généralités sur la construction routière et les techniques de traitement des matériaux

2.1.1) Généralités sur la construction routière

La construction des routes revient essentiellement à manipuler des volumes considérables de sols et de roches. Sont considérés comme roches, les matériaux durs qu' il faut abattre la plupart du temps à l'explosif ou avec des moyens mécaniques puissants.

La part représentée par les opérations d'exécution, de traitement et de mise en oeuvre de ces matériaux est, dans le cas particulier des pays tropicaux où les coûts fonciers sont réduits, tout à fait prédominante. Il est donc fondamental de bien connaître les propriétés des sols dans lesquels les projets se développent et les ressources en matériaux qui sont utilisés dans les chaussées.

De nombreux pays, se sont livrés ces dernières années à des inventaires de matériaux et à des synthèses de données géotechniques permettant de caractériser les types de roches et de sols disponibles afin de rationaliser leur utilisation en construction routière. Les connaissances acquises permettent de mieux cibler les différentes familles de matériaux régionalement disponibles au voisinage des projets et de rationaliser les prélèvements d'échantillons à confier au laboratoire.

Sur de vastes espaces, les matériaux dits " traditionnels ", satisfaisant aux spécifications techniques sont rares. Aussi faut-il concevoir des solutions de substitution étudiées par les laboratoires qui ont joué et continuent à jouer un rôle éminent pour l'économie des projets.

Depuis les années 1970, l'utilisation des roches sous forme de concassés pour couches de chaussées et revêtements s'est beaucoup développée. Les carrières connues ont été inventoriées et de nouveaux sites sont activement recherchés. La mise en exploitation d'un site rocheux ne se décide qu'après avoir vérifié que les quantités disponibles sont suffisantes et que le matériau possède les caractéristiques mécaniques requises par les spécifications. La politique des granulats tend actuellement à privilégier l'installation de grandes carrières équipées de matériels modernes permettant d'agir sur divers paramètres afin d'obtenir des produits de qualité.

Les roches convenant le mieux aux usagers routiers sont celles associant un grain fin, une texture équante, une bonne dureté et une résistance suffisante à l'usure. On recherche ainsi préférentiellement les granites et roches associées à grains fins : roches volcaniques de type basalte, les quartzites et les calcaires durs bien que ces derniers soient assez rares sous les Tropiques.

2.1.2) Techniques de traitement des matériaux

2.1.2.1) Généralités

Les conditions d'utilisation des matériaux naturels doivent satisfaire à certaines exigences:

- teneur en eau compatible avec l'exécution des terrassements et du compactage,
- gonflements faibles,
- cohésion et résistance à la compression,
- portance et résistance mécanique suffisantes leur permettant de supporter les contraintes répétées dues au trafic,
- résistance à l'attrition spécialement importante pour les concassés qui tiennent leur stabilité de leur frottement interne,
- insensibilité à l'eau,
- dimension limitée des gros éléments à 40 mm pour les matériaux de la couche de base et à 60 mm pour ceux de la couche de fondation pour éviter la ségrégation et faciliter la mise en place.

Peuvent être considérés comme traitements physiques, les divers procédés liés au concassage des roches, aux recompositions de courbes granulométriques, aux mélanges de sols et de concassés. Ces traitements visent de façon général à agir sur la plasticité des matériaux et/ou à corriger leur granulométrie.

Lorsque les matériaux ne possèdent pas une ou plusieurs de ces propriétés, il faut recourir à des techniques d'amélioration souvent " pointues ", consistant en traitements physiques et / ou chimiques dont l'emploi tend à se généraliser. Le traitement à la chaux, au ciment, aux liants pouzzolaniques mobilise les possibilités de réactions chimiques entre ces produits et les matériaux auxquels ils sont mélangés.

Quant aux traitements à la base de liants hydrocarbonés, ils mettent en jeu les propriétés physico-chimiques de surface des éléments en présence, il en est de même pour les hydrophobants qui sont à employer avec précaution.

2.1.2.2) Différents modes de traitement des matériaux

En technique routière, on appelle stabilité d'un matériau, sa propriété de résister à l'écoulement latéral lorsqu'il est soumis à une charge. En d'autres termes, elle est représentée par sa propriété relative de conserver son volume initial après l'application d'une charge, donc sa rigidité ou son indéformabilité relative.

Stabiliser un sol en place ou un matériau d'apport consiste à améliorer ses caractéristiques géotechniques soit par adjonction d'une fraction granulométrique d'un autre matériau, soit par adjonction d'un liant hydraulique ou hydrocarboné.

Les objectifs recherchés par une stabilisation sont les suivants:

- amélioration de l'aptitude au compactage;
- diminution de la sensibilité à l'eau;
- augmentation de la résistance mécanique et de la portance (augmentation du frottement interne et de la cohésion).

Une stabilisation est donc une amélioration planifiée des caractéristiques géotechniques du matériau par adjonction dosée d'un autre matériau.

2.1.2.2.1) Stabilisation chimique

Elle consiste en l'adjonction de produits chimiques tels que le chlorure de calcium CaCl_2 , les laitiers de hauts fourneaux etc. Il s'agit dans tous les cas d'augmenter la cohésion des matériaux en utilisant une réaction chimique provoquée par l'eau et les matériaux eux-mêmes. Les deux types de stabilisation chimique les plus courants sont:

2.1.2.2.1.1) Stabilisation à la chaux

Il s'agit de l'adjonction de chaux vive aux matériaux d'infrastructure dans le but de diminuer la teneur en eau, d'atteindre une densité optimum lors du compactage et d'augmenter ainsi la résistance mécanique du sol traité.

2.1.2.2.1.2) Stabilisation au ciment

Il s'agit de l'adjonction de ciment et selon les cas à un sol en place ou à un matériau d'apport afin d'augmenter la cohésion du mélange après la prise (meilleure portance, diminution de la sensibilité à l'eau). Lorsque la teneur en eau des matériaux à stabiliser est trop élevée, l'adjonction de chaux vive peut s'imposer.

2.1.2.2.2) Stabilisation mécanique

Elle porte sur l'amélioration de la composition granulométrique d'un sol en place ou d'un matériau d'apport par adjonction en petite quantité d'une fraction de matériaux pierreux, afin d'améliorer les possibilités de compactage.

Ce procédé a été utilisé par exemple pour améliorer les propriétés du concassé 0/40 de silex (cf. Chapitre III). En effet, le concassé 0/40 de silex scalpé comporte peu d'éléments fins (% d'éléments inférieurs à $80 < 10\%$), ce qui n'est pas étonnant car ce matériau se présente sous forme de blocs et de plaquettes, d'où un problème de cohésion lors de la mise en place pour le compactage. L'adjonction de latérite aura pour but de remédier à ce problème.

2.1.2.2.3) Traitement aux liants bitumineux

Les graves, si elles ne sont pas trop argileuses, peuvent également être stabilisées avec des liants hydrocarbonés. Les qualités obtenues par ces mélanges appelés graves-bitume ou graves-émulsion suivant le type de liant utilisé, sont supérieures à celles que l'on pouvait obtenir avec des matériaux fins.

Concernant la grave-bitume, les matériaux très performants doivent associer à une faible teneur en bitume, une forte compacité. Leur grande stabilité mécanique est assurée par le frottement interne élevé dû au squelette minéral et par la forte cohésion apportée par le bitume.

La granulométrie maximale de la grave-bitume doit être limitée à 31,5 mm. La granulométrie utilisée dans notre cas pour la grave-bitume 0/25, est reconstituée à partir des fractions 0/3, 3/8, 8/16, 16/25 et de filler calcaire. Pour les 0/31,5 et 0/20, le LCPC français propose aussi, quant à lui, des formules semi grenues et grenues dont on pourra aussi s'inspirer (cf. Tableaux 2.1 et 2.2).

Tableau 2.1: Fuseaux pour grave-bitume proposés par le Guide.

Source: " Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux ".

Diamètre (mm)	Fuseau 1 % passant	Fuseau 2 % passant
40	100	100
31,5	95-100	95-100
10	55-82	40-70
6,3	47-70	30-57
2	30-50	18-40
0,5	17-32	8-25
0,08	4-10	4-8

Tableau 2.2: Fuseaux pour grave-bitume 0/20 et 0/31,5 proposés par le LC.P.C. Français.

Source: "Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux".

Diamètre (mm)	Formules semi-grenues		Formules grenues	
	0/20	0/31,5	0/20	0/31,5
10		45-60		35-50
6	45-60		45-50	
2	25-40	20-35	20-35	15-30
0,6	16-29	14-25	14-25	11-22
0,08	6-9	6-9	6-9	6-9

L'indice de concassage devra être de 100%, le Los Angeles inférieur à 35, l'équivalent sable supérieur à 40 (la grave est non plastique). On utilisera un bitume dont la teneur sera de l'ordre 3,5 à 5% pour un module de richesse de 2,5 à 3.

Les formulations seront étudiées de façon à obtenir les performances suivantes à l'essai Marshall :

- stabilité Marshall: 500 kg à 60°C,
- compacité > 90%,
- fluage < 4 mm.
- rapport $\frac{R'c(\text{après..imbibition})}{Rc(\text{sans..imbibition})} \geq 0,6$.

Nous avons étudié les **bétons bitumineux** parce que ce sont des enrobés hautement élaborés que l'on utilisera surtout pour le revêtement des chaussées supportant les trafics T4 et T5 (cf. Tableau 2.3). Ils ne seront mis en oeuvre que si l'on est assuré de disposer d'un excellent support: couche de base en matériau traité peu déformable, chaussée réalisée dans l'optique d'un aménagement progressif et ayant acquis une certaine maturité sous le trafic.

Tableau 2.3: Classes de trafic en nombre cumulé de passages d'un essieu équivalent "Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux".

Essieu équivalent de 13 T	Essieu équivalent de 8,2 T
$T1 < 5.10^5$	$T1 < 3.10^6$
$5.10^5 < T2 < 1,5.10^6$	$3.10^6 < T2 < 10^7$
$1,5.10^6 < T3 < 4.10^6$	$10^7 < T3 < 2,5.10^7$
$4.10^6 < T4 < 10^7$	$2,5.10^7 < T4 < 6.10^7$
$10^7 < T5 < 2.10^7$	$6.10^7 < T5 < 10^8$

Les granulats doivent être de bonne qualité et la composition du mélange bien étudiée. Ils contiennent habituellement 5 à 8 % de bitume (module de richesse: 3,5 à 4) et les granulats entant dans leur composition sont des gravillons concassés de taille maximale 8 à 14 mm.

Les caractéristiques des granulats des bétons bitumineux sont les suivants:

- provenance: de roches dures (Los Angeles < 25) et non polissable (CPA > 0.5), surtout pour la couche d'usure (LA < 15 ou 20),
- qualité de forme (cubiques) et de propreté (lavés),
- concassés exclusivement (éventuellement sable rond),
- fuseau granulométrique étroit,
- teneur en filler élevée (environ 7%),

En ce qui concerne le liant, il faut:

- un bitume ou éventuellement un bitume-goudron (TB).
- un dosage en liant élevé (dépendant de la teneur en filler).

Les pourcentages des diverses fractions servant à constituer le mélange peuvent être calés à partir des fuseaux suivants (cf. Tableaux 2,4 et 2,5):

Tableau 2.4: Fuseaux pour béton bitumineux proposés par le "Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux".

Granulométrie du béton bitumineux	0/12	0/14
Refus à 6 mm	32 - 42	40 - 50
Refus à 2 mm	57 - 72	60 - 75
Teneur en fines	4 - 8	4 - 8

Nous avons reconstitué, pour nos formulations, les fuseaux proposés comme suit:

- pour le 0/12: 0/3, 3/8, 8/12 et filler calcaire,
- pour le 0/16: 0/3, 3/8, 8/16 et filler calcaire.

Les qualités à obtenir pour les mélanges peuvent être les suivantes:

Bitume 40/50 et Essai Marshall à 50 coups:

- compacité = 96 à 98%,
- fluage < 4 mm,
- stabilité à 60C > 1000 kg.
- rapport $\frac{R'c(\text{après..imbibition})}{Rc(\text{sans..imbibition})} \geq 0,75$.

Tableau 2.5: Fuseaux pour enrobés denses ED et bétons bitumineux BB proposés par le "Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux".

Granulats	Granulométrie	ED	BB
Bitume	Tamis %	Passant	
40/50	10	80 - 100	90 - 100
60/70 ou 80/100	6,3	60 - 80	65 - 75
	2	25 - 75	45 - 60
	0,2	6 - 25	8 - 14
	0,08	3 - 7	5 - 9

Les matériaux stabilisés au bitume sont caractérisés par une souplesse remarquable qui permet de s'adapter aux déformations inévitables lorsqu'on réalise des chaussées économiques. Des échecs ont cependant été enregistrés et les causes en sont bien connues:

- épaisseur insuffisante: des couches de base ont été réalisées en quelques centimètres d'épaisseur. Les épaisseurs minimales sont a priori de l'ordre de 15 cm. Pour les trafics lourds et en particulier des charges par essieu élevées, les matériaux fins stabilisés sont à déconseiller, seules les graves-bitume peuvent convenir;
- qualité de la fondation insuffisante: sous des couches de base minces, il est nécessaire d'avoir une fondation de qualité. Suivant le trafic, le CBR minimum à exiger variera de 30 à 40;
- stabilité insuffisante, la mise en oeuvre étant délicate, il faut absolument, sur le chantier, obtenir les stabilités minimales recommandées;

Concernant le liant, il doit assurer une bonne mouillabilité du granulat et rester cohésif dans une large gamme de température. En climat chaud, on utilise de préférence un bitume pur comme le 40/50 pour aller dans le sens d'une moindre orniérabilité, des bitumes fluidifiés moyennement visqueux et des émulsions cationiques.

Une des caractéristiques que doit posséder un liant bitumineux destiné à la confection des revêtements est son adhérence aux granulats. Même lorsque les spécifications habituelles relatives aux granulats et au liant sont respectées (propreté des granulats, température et dosage du liant, etc), il subsiste toujours des cas de mauvaise adhésivité dont les causes principales sont l'acidité des granulats et la présence d'eau souvent difficile à éliminer. L'affinité liant granulats est un phénomène interfacial qui peut être amélioré par des dopes.

Un critère décisif dans le cas d'utilisation de cut-back est l'affinité liant-granat (adhésion globale) qui dépend du mouillage (adhésion active) et de la permanence de la liaison (adhésion passive). Ces propriétés sont testées par les essais VIALIT et TWIT. En cas d'insuffisance d'affinité naturelle entre le granulat, s'il est siliceux, et le liant, on ajoute un dope tensio-actif (0,2 à 0,5% du poids du liant) qui est injecté au moyen d'une rampe à dope spéciale sur la répandeuse de liant.

Des techniques nouvelles améliorant sensiblement le mouillage des granulats consistent à pulvériser une mousse de bitume pur au moyen d'un jet de vapeur d'eau dans la rampe de répandage du liant, à préenrober ou à laquer les granulats.

La qualité des matériaux à employer dans les couches de chaussées est fixée par de spécifications qui prennent en compte la couche dans laquelle ils sont placés et l'intensité du trafic qu'ils auront à supporter.

2.2) Dopes

Les dopes, en général, sont à base d'amines grasses correspondant à la formule générale $R-NH_2$, le radical R désignant la chaîne grasse hydrophobe et le groupement NH_2 désignant la fonction amine ou basique hydrophile. Nous avons la nature des surfaces en présence:

- d'abord, le liant noir dont la partie active est la fonction acide qu'il contient, un bitume n'est en effet jamais alcalin,
- ensuite, le matériau, qui peut présenter un caractère acide comme la silice ou un caractère basique comme le calcaire, ou encore, le plus souvent, les deux caractères simultanément (silico-calcaires). La silice SiO_2 se comporte chimiquement comme si la surface était tapissée de charges négatives, alors que celle du calcaire $CaCO_3$ comporte essentiellement des charges positives.
- enfin, l'eau qui peut empêcher le mouillage du liant et donc l'accrochage de certains matériaux, par le liant.

L'adhésivité, nécessitant un mouillage préalable du granulat par le liant, ne peut généralement se manifester (sans recours aux dopes) que dans le cas des surfaces calcaires puisque celles-ci sont basiques et positives, alors que les liants bitumineux sont acides et négatifs. Par contre, l'adhésité sera médiocre sinon nulle, si l'on a à faire à des surfaces siliceuses qui sont elles-mêmes, comme le liant, acides et négatives. D'où la nécessité d'avoir recours aux dopes pour modifier les surfaces en présence en créant une affinité qui n'existe pas.

On s'est en effet rendu compte des phénomènes suivants:

- . si on met en un liant bitumineux contenant un faible pourcentage d'amines au contact de granulats siliceux, on obtient un enrobé qui résiste à une immersion prolongée dans l'eau.
- . si on traite un granulat siliceux avec un faible pourcentage d'amines et si on le met en contact avec un liant bitumineux, on observe également un enrobage parfait et une bonne résistance à l'eau.

On peut ainsi distinguer deux types de dopage, suivant qu'on incorpore le dope dans le liant ou qu'on l'utilise directement à l'interface liant-granulat. Les techniques d'emploi des dopes se répartissent selon les catégories suivantes: dopes incorporés dans la masse du liant, dopes en solution aqueuse, gravillons prétraités.

Le meilleur dispositif pour l'incorporation du dope dans le liant est celui par lequel on assure le recyclage d'une masse de liant au moyen d'une pompe, le dope étant introduit par le refoulement de la pompe. Il importe que le brassage soit suffisamment énergique et prolongé pour assurer une dispersion correcte du dope dans la masse du liant. En général, les doses des dopes utilisés sont de l'ordre de 2 à 5‰ en poids du liant. Pour que ce procédé soit efficace, il convient dans tous les cas, d'avoir des granulats propres, de ne pas surchauffer le liant dopé et de ne pas stocker à chaud au-delà des durées indiquées par le fabricant.

Il faut noter que les émulsions cationiques peuvent aussi résoudre le problème de l'adhésivité. Par rapport à leur emploi, il est constaté que leur utilisation met en jeu les mêmes phénomènes physico-chimiques que ceux provoqués par les dopes. Il en résulte que ces émulsions ont une bonne adhésivité, même vis à vis des granulats acides (siliceux). Par conséquent, l'emploi des émulsions cationiques dispense de l'addition d'un dope.

2.3) Fillers:

2.3.1) Généralités

Les fillers sont des matériaux fins de dimensions inférieures à 80 μ . La grosseur de leurs grains est de l'ordre de celle des grains de ciment. Les fillers peuvent être d'origine, soit naturelle, soit artificielle. Ils peuvent soit exister déjà dans le matériau de base, soit être incorporés comme fillers d'apport. D'une manière générale, on peut dire que la présence d'une certaine quantité de fillers est nécessaire à l'obtention d'une bonne compacité, qu'il s'agisse de tout-venants destinés aux couches de fondation et de base d'une chaussée, d'enrobés bitumineux ou de graves ciment.

2.3.2) Utilisation des fillers dans la réalisation des enrobés bitumineux.

L'incorporation de fillers dans les enrobés présente de multiples avantages: elle complète l'ossature minérale et par conséquent augmente la compacité, multiplie les points de contact entre les

différents grains et par conséquent augmente la résistance à la déformation du mélange, elle augmente la rigidification du liant (dans la mesure où ceci peut être considéré comme un objectif avantageux à poursuivre) elle diminue le risque de désenrobage.

Les fillers employés sont assez variés. On peut citer notamment la chaux (demi-grasse ou hydraulique), les ciments, les produits de concassage et de broyage des roches saines, de sables propres ou autres minéraux. Ils ne doivent absolument pas être argileux. La surface spécifique moyenne des fillers est de l'ordre de $135 \text{ m}^2/\text{kg}$. On exige souvent qu'au moins 90% du filler passe au tamis de 80μ .

2.3.3) Utilisation des fillers dans la réalisation des couches constituant le corps de la chaussée.

Les fuseaux utilisés pour les couches du corps de chaussée conduisent à un pourcentage de passant à 80μ , généralement compris entre 2% et 20%. Cette présence d'éléments fins, dans les graves ou les sables destinés aux assises de chaussée, est en effet indispensable à l'obtention d'une bonne stabilité mécanique. Cette dernière étant obtenue par une granularité bien pleine, on conçoit aisément que les éléments fins servent à occuper les vides restant entre les éléments grenus.

2.4) Formulations et contrôles

On doit exiger des enrobés et des bétons bitumineux deux qualités principales :

- Stabilité, soit résistance à la déformation plastique, au fluage, à l'orniérage; agir sur le frottement interne et sur la viscosité du liant.
- Flexibilité, soit aptitude à supporter sans fissures des déformations dues à la faiblesse éventuelle du support; agir sur la ductilité du liant à basse température.

Et d'autre part, on doit avoir :

- une bonne affinité liant-granulat (risque de désenrobage par l'eau),
- une bonne étanchéité, c'est à dire une compacité élevée,
- une bonne compactibilité.

Une étude de formulation est toujours nécessaire pour obtenir à partir des matériaux à disposition (différents de granulats et de liants) le meilleur mélange eu égard aux conditions de mise en oeuvre, aux sollicitations du trafic et aux conditions climatiques. Cette étude permettra de choisir :

- le type de granulat, origine, forme, pourcentage de concassé, teneur en filler, diamètre maximum, courbe granulométrique,
- le type de liant, origine, viscosité, dosage,
- intensité du compactage, compacité après mise en oeuvre.

Entre toutes les fonctions possibles, il faut choisir celle qui est la moins sensible aux écarts de fabrication inévitables. Il est évident également nécessaire de contrôler sur le chantier la conformité du produit posé avec le résultat de l'étude de formulation. Il faut remarquer qu'on dispose pas à l'heure actuelle d'essais universellement admis et permettant de faire cette étude de formulation et ces contrôles.

Les formulations de bétons bitumineux sont déterminées au moyen d'essais de laboratoire permettant d'évaluer le comportement des matériaux au compactage (Presse à cisaillement Giratoire P.C.G.), d'apprécier leurs caractéristiques mécaniques (essais de fatigue, essais MARSHALL, essais L.C.P.C. -DURIEZ) et d'estimer leurs risques de déformations permanentes (essais à l'ornièreur).

Le seul essai dont on dispose à l'E.P.T., d'après les normes est l'essai Marshall. Cet essai permet de contrôler la stabilité. Ce contrôle se fait au moyen de l'appareil Marshall. Cet appareil est une presse, munie de 2 mâchoires de forme cylindrique, destinée à écraser un échantillon d'enrobé ou de béton. L'éprouvette cylindrique de 10 cm de Diamètre et 6 cm de haut, est portée à 60° avant d'être placée horizontalement entre les deux mâchoires. Ces éprouvettes sont confectionnées en laboratoire par compactage à chaud de l'enrobé placé dans un moule. On applique à cet enrobé 100 coups de marteau (50 par face, hauteur de chute et poids du marteau normalisés) dans le cas d'un trafic moyen.

Cependant, il faut noter que les exigences de flexibilité et de stabilité sont contradictoires, l'essai Marshall à lui seul ne peut donc décrire un enrobé ou un béton bitumineux.

D'autre part, les conditions de l'essai (fabrication de l'éprouvette, frettage de celle-ci lors de l'essai, mode de rupture) ne sont absolument pas représentatives et surtout cet essai ne donne aucun renseignement quant aux grandeurs mécaniques définissant le matériau.

Des recherches sont actuellement en cours dans de nombreux laboratoires routiers pour déterminer l'influence des différents paramètres de formulation sur les propriétés du matériau d'une part et mettre au point des essais de contrôle représentatifs d'autre part. Ces recherches portent essentiellement sur : les modules et les caractéristiques de rupture, la fatigue, l'orniérage et la compactibilité.

2.4.1) Influence du rapport filler/bitume

On peut dire que l'agent qui agglomère l'ossature granulaire d'un enrobé est en réalité un mortier, soit un mélange filler-liant. Le filler est non seulement important en ce qui concerne la teneur en liant, mais est aussi indispensable pour les raisons suivantes :

- il complète la granulométrie en remplissant une partie des vides du granulat,
- il accroît la compacité du mélange; s'il était absent, il faudrait le remplacer par un complément de liant, ce qui serait néfaste,
- il permet d'utiliser un dosage élevé en liant, mais sans excès, ce qui accroît la cohésion et l'imperméabilité de l'enrobé,
- il augmente la viscosité du liant et par la même occasion celle de l'enrobé complet: or, on sait que la stabilité d'un enrobé dépend de la viscosité du liant de base,
- il diminue la susceptibilité thermique du liant et donc de l'enrobé dans son ensemble.

Les valeurs du rapport filler/bitume varient de 0.5 à 3, et, pour les tapis et les enrobés denses à chaud, les valeurs de 1.2 à 1.5 sont courantes. L'étude de l'influence du rapport filler/bitume, toutes choses égales par ailleurs, est malheureusement impossible. Cependant on peut dire que, tant que l'enrobage est suffisant, l'augmentation du rapport filler/bitume par apport de filler est le moyen le plus adéquat d'améliorer la performance d'un enrobé à structure minérale satisfaisante: c'est en effet le moyen d'augmenter la compacité tout en rigidifiant l'enrobé, donc en réduisant encore le risque.

2.4.2) Influence des différents paramètres

2.4.2.1) Influence du pourcentage de vides

Il semble que dans des conditions de température et de temps de charge identiques, le module soit nettement plus faible pour des enrobés à pourcentage de vide élevé que pour des enrobés compacts. Cependant, d'un point de vue strictement mécanique, il ne semble pas qu'il y ait une grande différence entre un enrobé mal compacté et un enrobé dont la granulométrie ne permet pas d'obtenir une forte compacité, alors que, sous le trafic, l'évolution de ces deux matériaux est différente.

2.4.2.2) Influence de la teneur en bitume

Les teneurs en bitume peuvent varier entre 3 et 9%, les valeurs habituelles des enrobés de surface oscillent autour de 6%. Pour un matériau donné, on observe fréquemment un accroissement des performances pour une augmentation de la teneur en bitume jusqu'à un extremum, puis une chute de ces performances (en général par sensibilité excessive au fluage). Ceci est vraisemblablement dû à l'augmentation de la compacité qui accompagne l'augmentation de la teneur en bitume. Cependant ces variations sont d'amplitude beaucoup plus restreinte que celle due au rapport filler/bitume ou à la qualité du liant.

2.4.2.3) Influence des granulats (granularité, angularité, nature)

Les modifications de la courbe granulométrique entraînent une variation de la compacité et de l'épaisseur du film de liant entre les granulats, cette variation correspond à un accroissement du module et des performances lorsque la compacité croît.

Des compacités élevées sont obtenues avec de fortes teneurs en fines; les courbes granulométriques discontinues conduisent à des compacités plus fortes que les courbes continues. Les résistances au cisaillement et en compression sont les meilleures pour les granulats anguleux de forme cubique, surtout comparées aux matériaux sphériques (roulés) qui permettent d'obtenir plus facilement des compacités élevées. La nature minéralogique des agrégats influe essentiellement sur le mode de rupture lors du concassage et donc sur leur forme ainsi que sur leur adhésivité avec les liants.

2.5) Conclusions et recommandations

Plusieurs auteurs ont en outre montré qu'un certain pourcentage conduit à une meilleure résistance au cisaillement. Le pourcentage en éléments fins susceptibles de fournir en même temps qu'une résistance maximale une densité sèche élevée se situe en général entre 5 et 10% pour les tout-venants de concassage. On note également qu'un matériau totalement dépourvu d'éléments fins est difficilement compactable. Cependant les fines doivent correspondre à des normes de plasticité bien précises. En effet, la sensibilité des matériaux à l'eau était liée à la présence de ces fines, la perte de stabilité mécanique est d'autant plus prononcée que les fines sont plus plastiques. C'est ainsi que les normes AASHO ou ASTM exigent que les graves pour couche de base aient un indice de plasticité inférieur à 6.

L'expérience a montré que pour les matériaux non traités, un CBR minimal de 80 est exigible pour la couche de base et de 30 pour la couche de fondation. Dans le cas des matériaux traités ou rigidifiés par un ajout de ciment ou pour des épaisseurs importantes de matériaux bitumineux, on vérifie que les contraintes par flexion ou les déformations horizontales à la base de la couche, restent admissibles compte tenu du trafic qu'ils auront à supporter et du risque accepté pour le dimensionnement.

Pour les matériaux bitumineux, on prend en compte la déformation transversale admissible (ϵ) qui est une fraction d'une déformation de référence connue, corrigée par plusieurs coefficients:

- coefficient lié à la droite de fatigue du matériau.
- coefficient dépendant de la température quand celle-ci est différente de 15°.
- coefficient faisant intervenir le niveau de confiance retenu.
- coefficient de calage reflétant les observations sur la tenue des matériaux en service et des données de laboratoire.

Au vue de tous les problèmes liés aux granulats de type silicite, et pour une utilisation judicieuse en géotechnique routière et pour un souci économique, il serait préférable d'étudier le granulat concassé amélioré avec des matériaux routiers de qualité comme la latérite et le basalte et adjonction de filler calcaire pour résoudre le problème de l'adhésivité du liant et du granulat qui est déterminant pour le revêtement.

CHAPITRE III:

Etude technique.

Chapitre III: Etude technique.

3.1) Caractéristiques du tout-venant de concassage.

Ces produits sont particulièrement importants et leur emploi se développe constamment. Il est recommandé de limiter les dimensions des plus gros éléments à 40 mm en couche de base et 60 mm en couche de fondation, comme pour les matériaux graveleux naturels. Les spécifications granulométriques sont surtout affaire d'expérience locale, les produits de concassage dépendent en effet largement de la nature de la roche et des types de concasseurs.

En ce qui concerne la dureté, on doit être plus exigeant qu'avec un graveleux naturel car le tout-venant de concassage est un matériau sans cohésion, tirant sa stabilité du seul frottement interne, donc sujet à l'attrition.

3.1.1) Composition (Source: DIEME, Mémoire d'Ingénieur-Géologue I.S.T.,1991)

Un échantillonnage d'un tout-venant de silixite effectué sur le terril montre que le stérile a la composition moyenne en poids suivant: 91% de silix , 6% d'induré de phosphate , 3% de fines à éléments phosphatés et argileux.

3.1.2) Pétrologie (Source: DIEME, Mémoire d'Ingénieur-Géologue I.S.T.,1991).

Le silixite se présente sous forme de blocs à coeur sombre et à cortex blanc et c'est le coeur qui est le plus souvent présent, le cortex ayant été éliminé ou réduit lors de la fragmentation dynamique des blocs au cours du processus de débouage.

3.1.3) Minéralogie (Source: DIEME, Mémoire d'Ingénieur-Géologue I.S.T.,1991).

L'observation au microscope optique montre 30 à 40% d'opale et 60 à 70% de calcédoine. Cette prédominance du calcédoine dans le silix s'explique par sa stabilité chimique plus grande que celle de l'opale.

La figure 3.1 (Source: DIEME, Mémoire d'Ingénieur-Géologue I.S.T.,1991) permettra de localiser la position et la variation du pourcentage de silex au niveau du log type de la série phosphatée de Taïba.

3.1.4) Résultats de l'essai de réactivité potentielle et interprétation (Source: DIEME, Mémoire d'Ingénieur-Géologue I.S.T., 1991).

Beaucoup de roches silicieuses sont alcali-réactives, d'où l'importance de cet essai sur les silexites. (la réaction alcali-silice se traduit par une attaque de certaines formes de silice des granulats siliceux par les alcalins (Na et K)). En effet, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences, notamment être composée de particules propres, dures et inaltérables et présenter une grande stabilité chimique vis-à-vis des alcalins afin d'être compatibles avec les liants.

Le silexite présente des caractères de matériau potentiellement réactif (à cause de la présence d'opale et de calcédoine). Il a été donc effectué un essai de réactivité potentielle aux alcalins du ciment en vue d'une étude comparative sur les granulats silexites, de calcaire et de grès.

Cet essai a été réalisé suivant la norme ASTM C 289-71 (cf. Figure 3.2 Source: DJIBA, Mémoire d'Ingénieur-Géologue, IST. 1993) et consiste à mesurer d'une part la quantité de silice dissoute dans 25 ml de soude en 24 h et d'autre part, celle de la soude consommée à cet effet et les résultats sont consignés dans le Tableau 3.1 (Source: ARNOUL, 1984). Cet essai montre que le silexite peut-être alcali-réactif tandis que le calcaire et le grès sont non alcali-réactifs.

3.1.5) Identification des matériaux

3.1.5.1) Caractéristiques physiques

Les propriétés physiques suivantes permettent d'identifier le matériau: poids spécifique, masse volumique réelle, masse volumique apparente, porosité, coefficient volumétrique Cv, coefficient de forme Cf et la propreté. Les résultats sont consignés dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Tableau 3.1: Résultats de l'essai de réactivité des granulats (Arnould 1984)

Granulats Paramètres	Silexite	Calcaire	Grès	Basalte
Réduction d'alcalinité (m.mole/l)	255	170	165	227,85
Silice dissoute (m.mole/l)	360	120	80	12,4

Tableau 3.2 : Quelques caractéristiques techniques des granulats

Caractéristiques	Silexite	Basalte
Dureté Los Angeles	9	14
Dureté Deval	21,4	16
Poids spécifique	2,63	2,91
Densité apparente	1,56	1,67
Propreté (%)	3	0,62
Coefficient volumétrique	0,18	0,21
Coefficient de forme	14%	7%

Source: DIEME, Mémoire d'ingénieur-géologue, I.S.T., 1991

Tableau 3.3: Coefficients de forme des fractions de silex disponibles

Fractions	(L+l)/e	e/L
Fraction 0/40	7,2	0,34
Fraction 16/25	11	0,33
Fraction 8/16	14	0,35
Fraction 3/8	34,64	0,29

L est la plus grande dimension du grain, l la plus petite et e, son épaisseur.

Les propriétés les plus importantes qui nous intéressent en construction routière sont les suivantes:

- le coefficient volumétrique C_v , défini par la relation suivante, donne une idée de la forme générale du granulat: $C_v = \frac{v}{\frac{\pi \times d^3}{6}}$ pour un grain, et $C_v = \frac{V}{\sum \frac{\pi \times d^3}{6}}$ pour un granulat constitué

d'un ensemble de grains. V étant le volume du grain considéré et d, le diamètre correspondant à la plus grande dimension du grain et associe un volume à la sphère circonscrite à ce grain.

Une faible valeur de C_v dénote un granulat contenant beaucoup de grains plats, des aiguilles ou des éclats; et une grande valeur de C_v signifie un granulat arrondi.

- le coefficient de forme Cf, défini par les relations suivantes, donne le pourcentage d'éléments plats par rapport à l'ensemble du granulat: $\frac{L+l}{E} > 6$ et $\frac{L}{E} > 0,40$ pour un bon granulat routier.

Le granulat de silixite présentant un Cf élevé et un Cv faible respectivement: 14 % et 0,18 %, contient donc beaucoup d'éléments plats

- la propreté, quant à elle, est à considérer sous un deux aspects, c'est-à-dire, chimique et physique. C'est une propriété qui est mesurée à l'aide de l'essai de propreté superficielle pour les gravillons. Les impuretés à la surface des grains peuvent compromettre l'adhérence liant-granulats et provoquer la chute des résistances mécaniques. Un bon granulat ne doit pas contenir plus de 5% d'impuretés (le silixite en possède 3%).

Ainsi, concernant le silixite, quelques réserves s'imposent:

- d'une part, le fort pourcentage d'éléments plats ainsi que l'état de surface des granulats de silixite font qu'ils sont moins performants que les granulats de basalte, de calcaire ou de grès. Le silixite a une surface lisse enveloppée de fines argileuses et phosphatées qui compromettent l'adhérence du mortier aux granulats;

- d'autre part, la réaction alcali-silice peut se développer dans les bétons de silixite car l'essai de réactivité potentielle des granulats a montré que les granulats de silixite sont potentiellement réactifs.

Cela permettra d'éviter l'utilisation du silixite avec le ciment par exemple, puisque dans les bétons hydrauliques, les réactions alcalis-granulats se traduisent par un fort gonflement dans la masse du béton et une fissuration abondante et multidirectionnelle, désordres pouvant conduire à terme, à la destruction complète de la structure en béton.

3.1.5.2) Caractéristiques mécaniques

Elles ont été déterminées grâce aux essais de dureté Deval Standard (caractérisation de l'usure progressive) et de dureté Los Angeles (caractérisation de la résistance aux chocs).Les résultats sont consignés au tableau de résultat et montrent que le silixite est matériau très dur (plus dur que le basalte).

En effet, plus un matériau est dur, plus son coefficient Deval Standard est élevé et plus son coefficient Los Angeles est faible.

3.1.5.3) Caractéristiques granulométriques

Des essais de blocométrie et de granulométrie ont été effectués respectivement sur des moellons lavés ou non et sur le tout-venant de carrière (suite de la blocométrie du tout-venant de carrière) et les résultats et courbes granulométriques sont compilés dans les tableaux et figures suivants.

3.2) Caractéristiques de l'agrégat concassé

3.2.1) Aspects et Caractéristiques granulométriques des granulats échantillonnés

3.2.1.1) Présentation et Aspect externe

L'agrégat concassé se présente comme celui du tout-venant mais avec une platitude beaucoup plus évidente. Le coefficient de forme de toutes les fractions granulométriques a été déterminée et les résultats sont consignés dans le Tableau 3.3, comme d'autres caractéristiques techniques liés à ces granulats, sont compilés dans le Tableau 3.2.

Nous pouvons faire les remarques suivantes concernant les coefficients de forme: plus la fraction est grossière, plus le pourcentage d'éléments plats est faible et plus elle est petite, plus les éléments plats sont nombreux. Ceci s'explique par le fait que la fraction grossière comme le 0/40 se présente plutôt sous forme de blocs, n'ayant pas subi un concassage poussé, contrairement à la fraction du 3/8 qui se présente sous forme de plaquettes.

3.2.1.2) Caractéristiques granulométriques

Une analyse granulométrique a été faite sur toutes les fractions granulométriques en vue d'établir les formulations pour la grave-bitume et pour le béton bitumineux en se calant sur les compositions granulométriques.

Tableau : 3.4

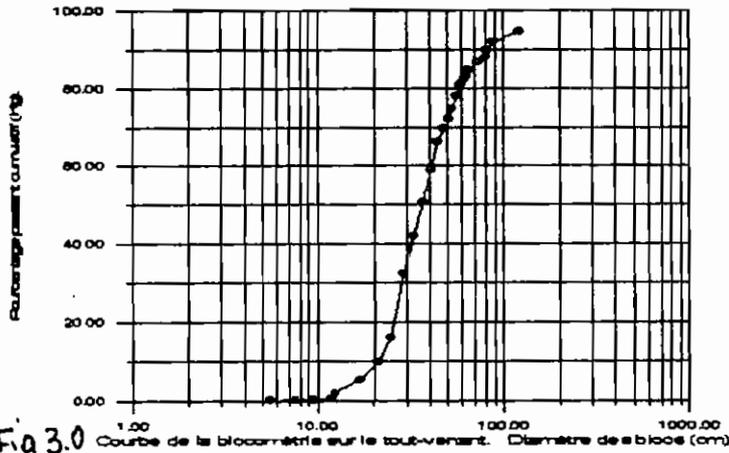
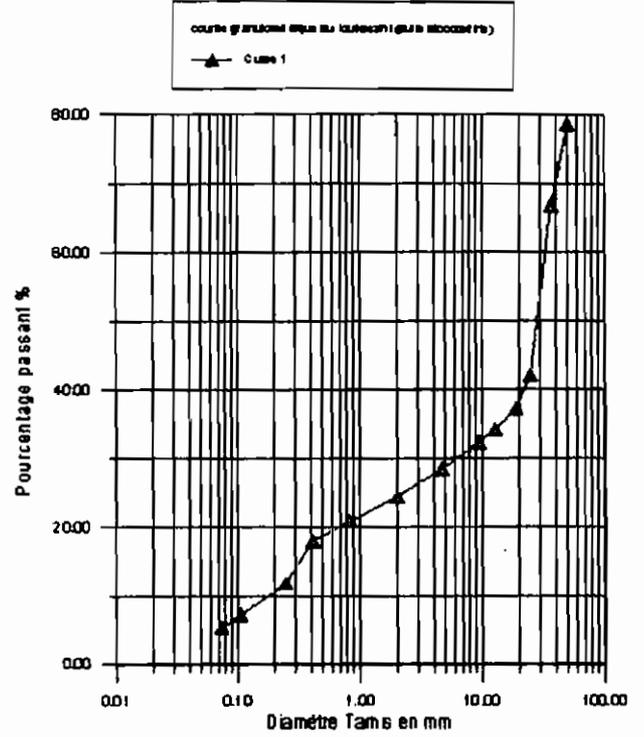
Résultats du blocométrie

Diamètre cm	Poids Kg	Poids cumulatif	% cumulatif
123.1	58.75	58.75	94.75
89.1	33.55	92.30	91.75
82.3	23.4	115.70	89.66
79.8	19.9	135.60	87.88
72.3	14.8	150.40	86.55
64.7	23.7	174.10	84.43
62.8	15.15	189.25	83.08
61.4	5.3	194.55	82.61
59.15	16.35	210.90	81.14
58.4	5.5	216.40	80.66
55.53	28.2	244.60	78.13
53	38.2	282.80	74.72
50.32	29.45	312.25	72.08
47.7	26.85	339.10	69.68
44.32	39.41	378.51	66.16
40.84	79.48	457.99	59.05
36.93	93.95	551.94	50.66
32.88	98.1	650.04	41.88
28.91	107.11	757.15	32.31
24.91	182.86	940.01	15.96
20.92	70.86	1010.87	9.62
16.95	48.35	1059.22	5.30
12.38	39.1	1098.32	1.80
11.83	17.79	1116.11	0.21
9.4	1.47	1117.58	0.08
7.63	0.86	1118.44	0.00
5.5	0.04	1118.48	0.00
	1118.48		

Tableau 3.5: Granulométrie du tout venant

Diamètre mm	% passant cumulatif
50	78,62
37,5	66,84
25	42
19	37,12
13	34,09
9,5	32,28
4,75	28,38
2	24,37
0,85	20,75
0,42	17,88
0,25	11,71
0,106	7,18
0,075	5,23

Fig. 30



3.2.1.3) Propriétés mécaniques des granulats concassés

Elles sont pareilles à celles du tout-venant et peuvent être déterminées par les essais suivants (dont certains résultats sont consignés dans le Tableau 3.2):

- Résistance à la compression statique des granulats concassés.
- Essai Los Angeles.
- Essai Micro-Deval humide.

3.3) Les différentes formulations retenues et les résultats obtenus

3.3.1) En couche de base

La couche de base étant soumise à des sollicitations importantes, les matériaux qui la constituent doivent avoir des qualités suffisantes. Plusieurs critères conditionnent leur choix:

- leur indice portance;
- leur stabilité;
- la dureté de leur squelette;
- la résistance à la traction des couches liées ou rigidifiées.

L'indice portance CBR sera au moins égal à 80 pour une densité sèche correspondant à 95 % de l'OPM. Si le matériau naturel n'atteint pas cette portance, il devra être amélioré ou traité. Un indice CBR de 60 peut être admis pour le trafic T1. La déformabilité de la couche de base sera vérifiée à partir des mesures de déflexion ou d'essais de plaque. La résistance à la fragmentation et à l'attrition sera définie par l'essai Los Angeles, l'essai Micro-Deval (MDE) ou l'essai anglais Aggregate Crushing Value (ACV). On retiendra les valeurs admissibles suivantes (cf Tableau 2.3)

- Trafics T1-T3 admettant l'essieu simple de 8 à 10 Tonnes.
- Trafics T4-T5 et tous les trafics admettant l'essieu de 13 Tonnes.

Il faut limiter la granulométrie à la dimension maximale de 40 mm, le fuseau de spécification peut être le suivant, étant entendu que les courbes granulométriques doivent rester parallèles aux enveloppes du fuseau. L'indice de plasticité de ces matériaux est souvent nul.

Le pourcentage de fines devra être inférieur à 12% (0/40) mais devra rester supérieur à 4% si l'indice de plasticité est nul. Si l'indice de plasticité est compris entre 0 et 6, la teneur en fines devra rester comprise entre 2 et 5%.

Tableau 2.3: Recommandations d'utilisation des matériaux de la couche de base par le "Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux".

	T1-T3	T4-T5
LA	<45	<30
MDE	<15	<12
ACV	<32	<25

Diamètre en mm	% passant 0/40
50	100
40	95 - 100
31,5	85 - 97
20	65 - 90
10	40 - 75
6,3	30 - 63
2	20 - 45
0,5	12 - 30
80 microns	4 - 12

L'indice CBR à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'imbibition du 0/40 scalpé de silex avec un pourcentage de fines (éléments inférieurs à 0,08 mm) de 6,5% est supérieur à 84%. donc le silex 0/40 peut être utilisé en couche de base, seul, sans traitement.

3.3.1.1) Utilisation du concassé 0/40 silex scalpé

3.3.1.1.1) 0/40 silex seul

Concernant les concassés 0/d, comme le 0/40 tout-venant de concassage, il est nécessaire, afin de disposer d'un matériau à angle de frottement interne le plus fort possible, d'exiger un indice de concassage d'autant plus élevé que le trafic est important et la charge légale par essieu est plus lourde. Les spécifications en vigueur pour les concassés 0/40, devront satisfaire les conditions suivantes:

- IP<10 pour les trafics T1 et T2,
- IP<6 pour les trafics plus élevés,
- le matériau atteint 80% de CBR à 95% de l' O.P.M.

Etant donné que le C.B.R. du 0/40 scalpé est de 85% à 95% le l' O.P.M., il peut être utilisé seul en couche de base. Cependant, pour obtenir une meilleure performance du matériau par l'amélioration de sa qualité des points de vue granulométrique, cohésion et forme, il s'avère nécessaire de procéder à la rectification des courbes granulométriques:

- par le réglage des appareils de concassage en vue d'obtenir des courbes granulométriques dont les coefficients de courbure seront adéquats.
- par l'adjonction de latérite de 10 à 40% vu la rareté et même l'épuisement de la plupart des carrières de graveleux latéritiques au Sénégal.

Il faudra cependant tenir compte du transport du silex dans certaines zones.

En effet, pour les zones éloignées mais riches en d'autres matériaux, il vaudrait mieux utiliser ces derniers, en vue d'économiser les coûts de transport.

3.3.1.1.2) Mélanges 0/40 silex et 0/40 latérite

Les valeurs de CBR obtenues après mélange de silexite et de latérite sont de l'ordre de 60% à 95% de l'Optimum Proctor Modifié à 4 jours d'imbibition. Donc, puisque ce sont des valeurs acceptables et obtenues dans les conditions les plus défavorables, il serait judicieux de mélanger le silex et la latérite jusqu'à 40% pour des raisons techniques et économiques:

- du point quantitatif, comme la latérite devient de plus en plus rare, on peut penser l'utiliser comme apport pour le silexite,
- du point qualitatif, on peut améliorer la latérite qui est de plus en plus de mauvaise qualité avec le silex.

3.3.1.1.3) Analyse et interprétation des résultats obtenus

Une étude d'identification complète sur les silexites menée par le CEREEQ donne une valeur élevée de l'indice de plasticité I.P. du 0/40 silex scalpé (24%), ce qui est excessif pour un matériau susceptible d'être utilisé en couche de base. Cette plasticité proviendrait de la gangue calcaireuse.

entourant le matériau d'où la nécessité de procéder à un lavage du matériau pour éliminer cette gangue avant toute utilisation afin de faire baisser l'indice de plasticité dans les limites acceptables ($IP < 10$).

Le scalpage qui consiste à diminuer la fraction de sable phosphatée et argileuse (mais n'élimine pas la gangue) est nécessaire d'autant plus que les fines argileuses sont dangereuses, car en présence d'eau, elles peuvent faire chuter le frottement interne voire même l'annuler et conduire à la déformation de la couche concernée qui sera ainsi soumise à l'ornièrage.

Tableau 3.7: Résultats des C.B.R. obtenus après 96 h d'imbibition

Formulations	N	C.B.R.
Silix prélevé à Louga série 1		
Silix 90% Latérite 10%	1	65
Silix 80% Latérite 20%	2	62
Silix 70% Latérite 30%	3	56
Silix 60% Latérite 40%	4	58
Silix de Taïba série 2		
Silix 85% Latérite 15%	1	54
Silix 75% Latérite 25%	2	60
Silix 65% Latérite 35%	3	66

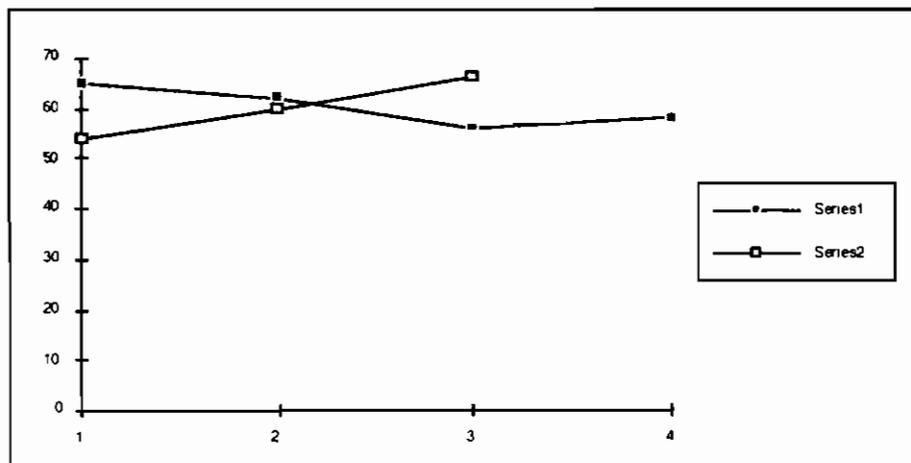


Figure 3.1 : Evolution du C.B.R. en fonction du pourcentage de latérite ajouté

Etant donné qu'en construction routière, c'est l'indice C.B.R. sur échantillon à 95% de l'O.P.M. à 4 jours d'imbibition qui est l'un des critères les plus utilisés, ce sont des essais C.B.R. à 96 heures d'imbibition sur les mélanges silix-latérite qui ont été effectués.

Les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux et graphiques joints en annexe.

Les C.B.R. obtenus sont compris entre 54 et 62% à 95% de l'O.P.M. à 4 jours d'imbibition (dont 3 C.B.R. de 60% et un C.B.R. de 62%). D'une part, il faut noter que les valeurs du C.B.R. n'ont pas varié avec l'augmentation du pourcentage de latérite dans l'ensemble.

Les différences sont surtout dues à la provenance du 0/40 scalpé:

- celui de Louga possède un pourcentage de fines plus faible (3%) dû sûrement à la ségrégation lors du transport.

- celui de Taïba donc de la station de concassage avec un pourcentage de fines de 6%.

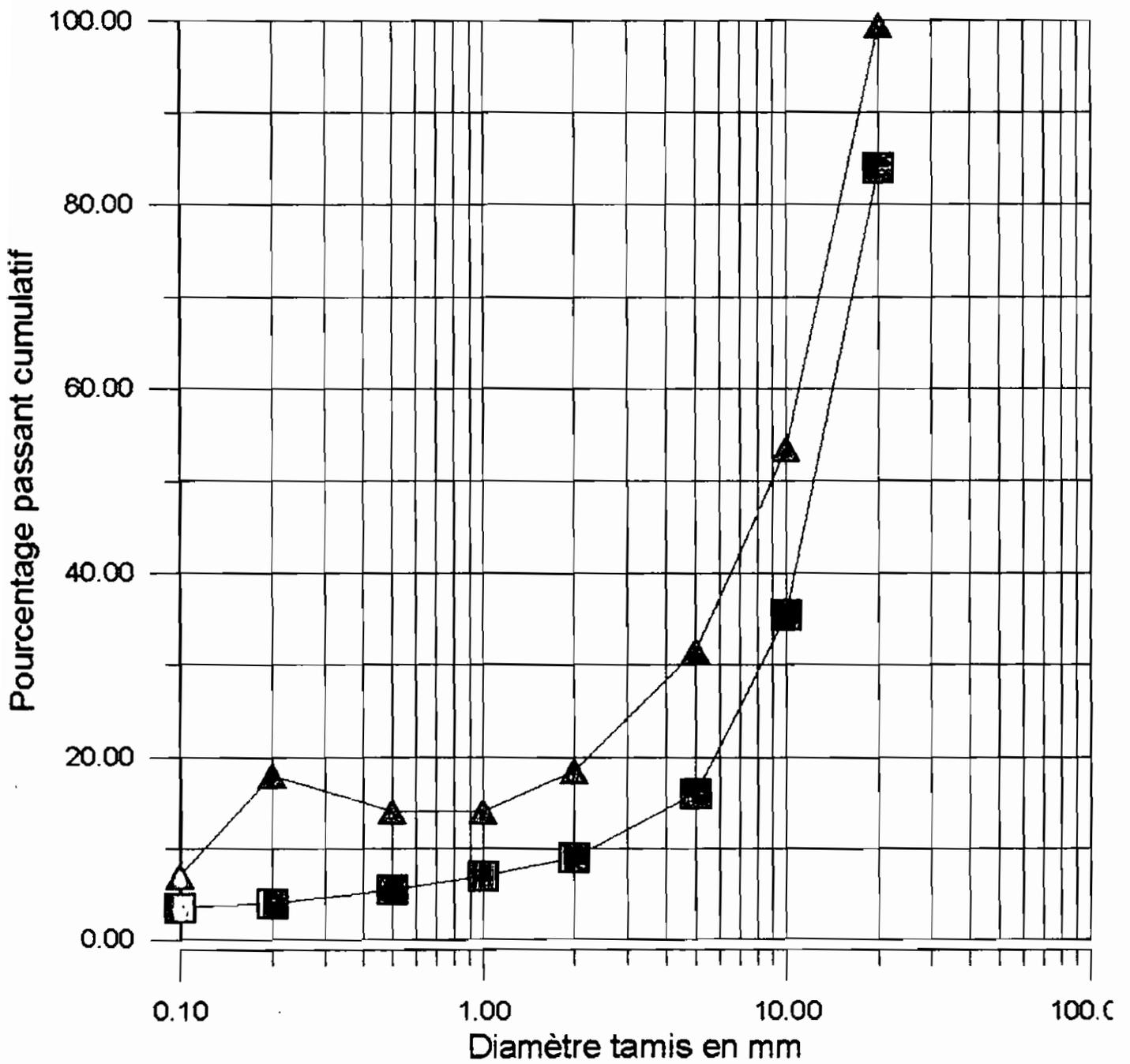
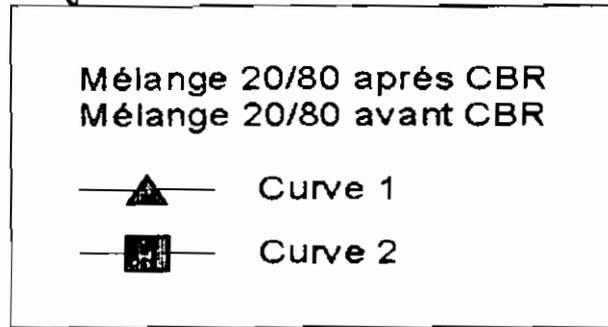
Quant à la latérite, elle provient de Ngoundiane et en stock depuis 1988 à l'Ecole Polytechnique de Thiès. Elle n'est plus aussi de bonne qualité à cause de la présence de matières organiques et végétales avec un pourcentage de fines de 5% seulement. Malgré toutes ces conditions non favorables les résultats obtenus sont acceptables dans l'ensemble pour un matériau de couche de base d'autant plus que ce sont des C.B.R. après imbibition.

D'autre part, afin d'apprécier l'influence du compactage sur la structure du matériau, les échantillons ont été soumis à l'analyse granulométrique avant et après compactage. L'analyse des deux courbes granulométriques des mélanges (cf. Figure 3.2) montre en général une transformation appréciable du squelette tandis que celles du silex 0/40 seul montre en général une transformation faible du squelette, ce qui traduit une dureté des nodules.

Cela est constaté aussi à travers les coefficients de courbure C et d'uniformité U des courbes granulométriques avant et après C.B.R. (cf. Tableau 3.8). On considère que si $1 < C < 3$, et $U > 4$, la granulométrie est bien étalée (dans le cas des graviers). Le degré d'uniformité renseigne sur la forme de la courbe. Pour des valeurs de $U > 15$, on a une granulométrie très étalée et plus elle est étalée, plus les performances mécaniques seront élevées.

La granulométrie des mélanges est continue avant C.B.R. et devient discontinue après C.B.R., tandis que celle du silex seul est toujours continue. Donc les transformations constatées sont surtout dues à la présence de la latérite qui est moins dure que le silex, contribuant ainsi à l'augmentation de la production de fines.

Fig 3.2



Il faut noter que les teneurs en eau des matériaux en couche de base sont fonction de la teneur en eau naturelle et de l'énergie de compactage. Pour cela, lors de la mise en place de ces matériaux, on contrôlera donc ces différentes teneurs en eau afin de sécher ou d'humidifier le matériau utilisé en couche de base avant de le compacter.

On ne saurait trop insister sur le grand soin à apporter à la composition et à l'exécution de la couche de base. Dans la plupart des cas, le corps de chaussée recevra un revêtement bitumineux mince, la couche de base sera soumise à des efforts de cisaillement importants dans sa partie supérieure; il risque également de se produire un effet de dalle entraînant à la partie inférieure des contraintes de traction. Il faut donc veiller à ce qu'il y ait une progression convenable dans la rigidité des différentes couches du corps de chaussée, ce qui est un élément essentiel et obtenir que la couche de base soit parfaitement compactée.

Nous terminerons cette partie par des recommandations relatives à l'utilisation des concassés qui sont des matériaux sans cohésion d'où la nécessité d'une bonne politique d'entretien. Pour une route en couche de base à base de concassés, et possédant un fort trafic, on doit faire de l'entretien une priorité. Il faut obligatoirement procéder au bouchage des trous dès l'apparition de ces derniers pour éviter la destruction complète de la structure.

Tableau 3.8 : Coefficients d'uniformité et de courbure des mélanges avant et après C.B.R.

Avant C.B.R.	D10	D30	D60	CU=coef d'uniformité D60/D10	CC= coef de courbure (D30 x D30) / (D10 x D60)
Silex 0/40 S	1,54	5,67	10,20	6,62	2,05
Latérite 0/40	13,70	8,70	15,40	4,16	1,33
90 S + 10 L	4,18	11,30	21,40	5,12	1,43
80 S + 20 L	2,43	8,59	15,05	6,19	2,02
70 S + 30 L	2,19	9,05	17,91	8,18	2,09
60 S + 40 L	2,43	8,59	15,05	6,19	2,02
65 S + 35 L	2,43	8,59	21,44	8,82	1,42
75 S + 25 L	2,43	8,59	15,05	6,19	2,02
85 S + 15 L	2,50	9,05	17,91	7,16	1,83
Après C.B.R.					
80 S + 20 L	0,13	4,65	11,41	87,77	14,58
70 S + 30 L	0,30	4,25	3,82	12,73	15,76
60 S + 40 L	0,20	3,29	8,86	44,30	6,11

Les diamètres D10, D30, D60, correspondant respectivement aux diamètres des particules à 10%, 30%, 60%, de passant.

3.3.1.2) Utilisation des granulats concassés pour la confection de grave-bitume

0/25

3.3.1.2.1) Concassés de silex seuls

Les deux formulations suivantes ont été étudiées:

- Le 10/20 comprenant 10% de filler calcaire et 20% de la fraction silex 0/3; les autres composantes sont: 30% de 16/25, 25% de 8/16 et 15% de 3/8.
- Le 15/25 comprenant 15% de filler calcaire et 25% de la fraction silex 0/3; les autres composantes sont: 25% de 16/25, 20% de 8/16 et 15% de 3/8.

La première engendre un faible pourcentage de fines et n'est pas très conforme aux spécifications, mais nous avons voulu étudier expérimentalement, un cas jugé défavorable. La deuxième formulation répond mieux aux exigences pour la confection de grave-bitume. C'est à partir d'elle que toutes les autres formulations seront proposées.

Les tableaux (cf. Tableaux 3.9 et 3.10) et courbes granulométriques (cf. Figures 3.3 et 3.4) suivants montrent en même temps les granulométries partielles, la granulométrie du mélange, le poids spécifique des granulats et du mélange et le pourcentage de bitume, p , obtenu par calcul suivant cette formule: $p = \frac{2,65}{P_{sa}} \times K \times \sqrt[3]{S}$, K étant le module de richesse, S , la surface spécifique des agrégats et P_{sa} , le poids spécifique des agrégats.

3.3.1.2.2) Mélange de concassés de silex et de basalte

Pour formuler ces mélanges, nous sommes partis comme nous l'avons signalé plus haut de la formulation du 15/25 puis nous avons procédé à des substitutions de fractions granulométriques du silex par celles du basaltes d'abord une à une, puis suivant les combinaisons suivantes:

(16/25 + 3/8) et (8/16 + 0/3).

Comme précédemment, les tableaux joints en annexe, permettront de connaître tous les renseignements disponibles.

Tableau 33: Formulation du 10/20

Fractions		16/25		8/16		3/8		0/3	Filler calcaire			Total
Pourcentage			30%		25%		15%		20%		10%	Passant
Tamis												100%
1* = 25 mm	25	100,00	30,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00	20,00	100,00	10,00	100,00
3/4 * = 19 mm	19	63,94	19,18	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00	20,00	100,00	10,00	89,18
1/2 * = 13 mm	13	2,90	0,87	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00	20,00	100,00	10,00	70,87
3/8 * = 9,5 mm	9,5	0,64	0,19	78,18	19,55	41,65	6,25	100,00	20,00	100,00	10,00	55,98
4 = 4,75 mm	4,75	0,36	0,11	2,29	0,57	1,05	0,16	100,00	20,00	99,87	9,99	30,83
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,25	18,05	87,34	8,73	26,78
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,19	13,04	64,15	6,42	19,45
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,78	9,76	50,23	5,02	14,78
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,50	6,90	42,76	4,28	11,18
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	4,58	36,40	3,64	8,22
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26	3,45	33,18	3,32	6,77
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,85	2,57	31,04	3,10	5,67

= 94 = 16

Fractions	Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	58,11
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	45,13
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	22,36
0/3	2	0,075	1,925	1,66	9,20
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	5,85

		100
G	dn > 10 mm	58,11
g	5 < dn < 10 mm	45,13
S	0,315 < dn < 5 mm	22,36
s	0,08 < dn < 0,315	9,20
f	dn < 0,08	5,85

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 2,5$$

$$976,35 \quad 100 S$$

$$9,76 \quad S$$

$$1,58 \quad S^{(1/5)}$$

$$p = 3,91 \quad K \cdot S^{(1/5)}$$

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

P_{sa} est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

Tableau 310 Formulation du 15/25

Fractions		16/25		8/16		3/8		0/3	Filler calcaire			Total
Pourcentage			25%		20%		15%		25%		15%	Passant
Tamis												100%
1* = 25 mm	25	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4* = 19 mm	19	63,94	15,99	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	90,99
1/2* = 13 mm	13	2,90	0,73	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	75,73
3/8* = 9,5 mm	9,5	0,64	0,16	78,18	15,64	41,65	6,25	100,00	25,00	100,00	15,00	62,04
4 = 4,75 mm	4,75	0,36	0,09	2,29	0,46	1,05	0,16	100,00	25,00	99,87	14,98	40,69
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,25	22,56	87,34	13,10	35,66
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,19	16,30	64,15	9,62	25,92
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,78	12,20	50,23	7,53	19,73
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,50	8,63	42,76	6,41	15,04
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	5,73	36,40	5,46	11,19
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26	4,32	33,18	4,98	9,29
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,85	3,21	31,04	4,66	7,87

= 47 =

Fractions	Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	77,91
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	70,34
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	39,80
0/3	2	0,075	1,925	1,66	12,47
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	8,10

		100
G	dn > 10 mm	77,91
g	5 < dn < 10 mm	70,34
s	0,315 < dn < 5 mm	39,80
s	0,08 < dn < 0,315	12,47
f	dn < 0,08	8,10

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot s + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

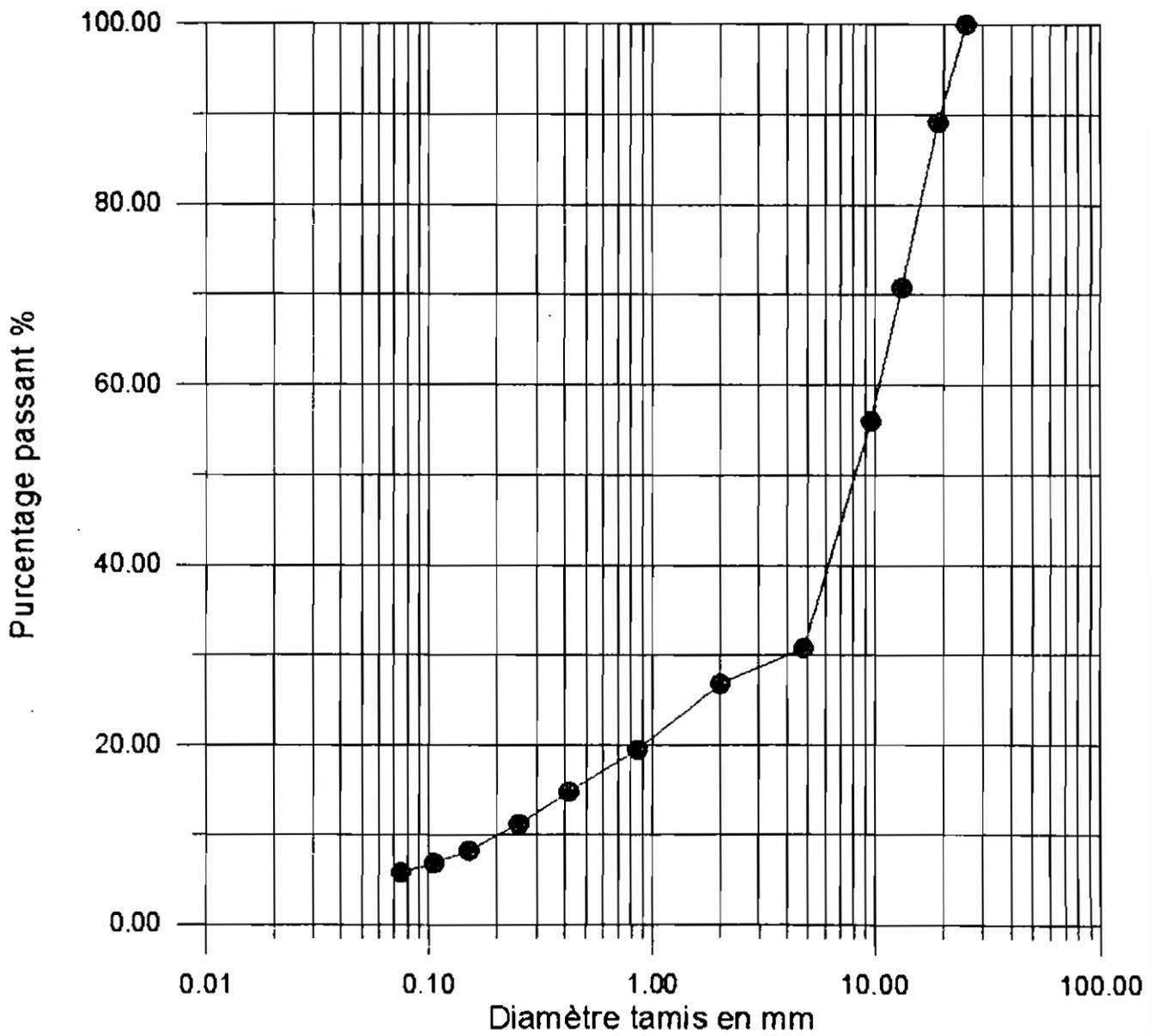
$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{0,5}) \text{ avec } K = 2,5$$

$$p = 4,19 \times K \times S^{(1/5)}$$

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume
 Psa est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

FIG 3.3: COURBE GRANULOMETRIQUE DU 10/20

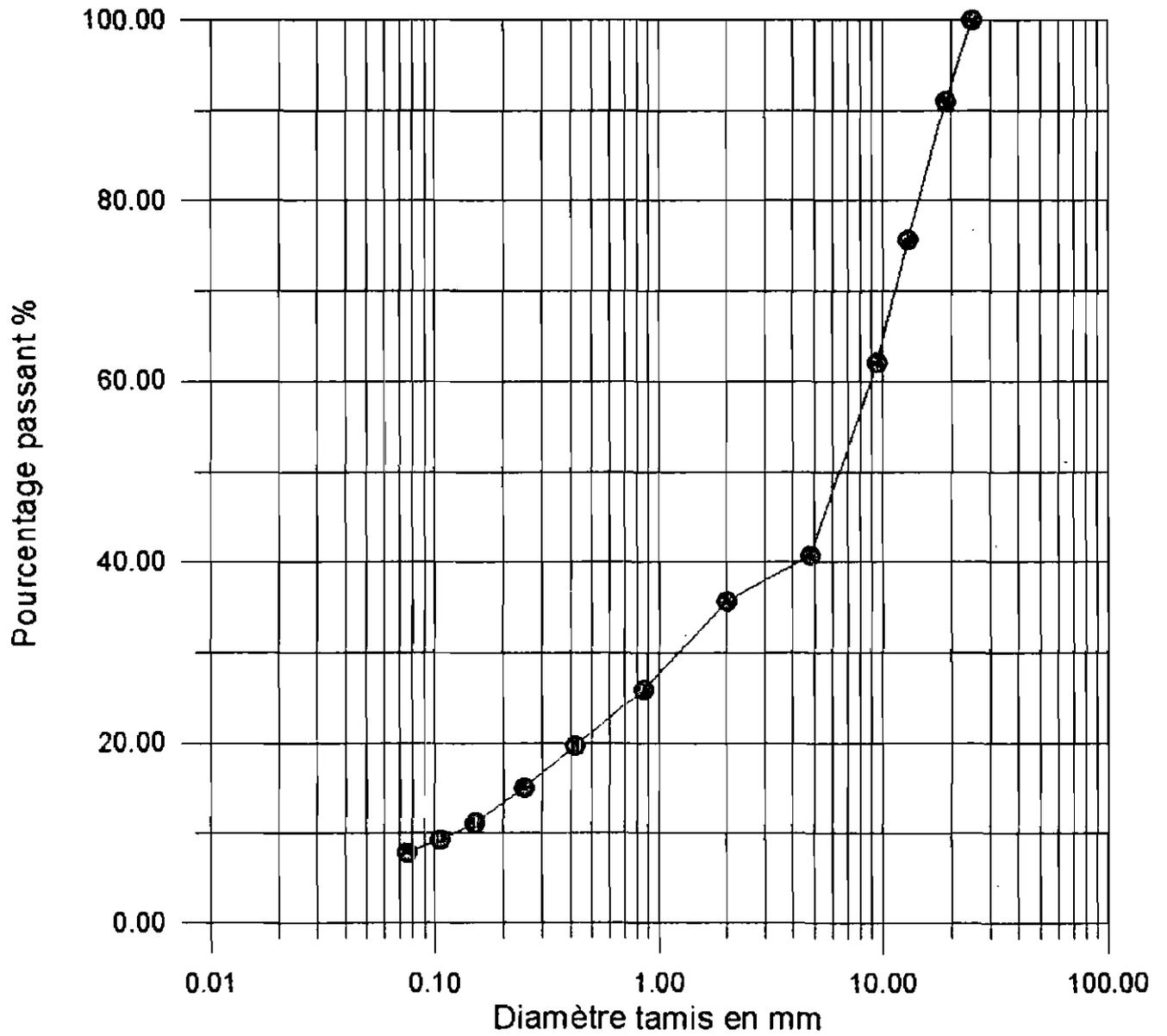
—●— Curve 1



= 48 =

FIG 3.4: COURBE GRANULOMETRIQUE DU 15/25

—●— Curve 2



3.3.1.2.3) Analyse et interprétation des résultats obtenus

Nous pouvons faire les remarques suivantes concernant la grave-bitume.

Seule la formulation du 10/20 (10% filler calcaire, 20% de silex fraction 0/3) n'est pas satisfaisante du fait de la faiblesse de la stabilité obtenue sans imbibition et sa nullité après imbibition. En effet, les éprouvettes n'ont pas pu résister au séjour dans l'eau à 60°C pendant 30 minutes lors de l'essai Marshall, après les sept jours d'imbibition et se sont désintégrées.

Nous pouvons expliquer ces résultats (cf Tableau 3.11 et Figure 3.5) par le fait que cette formulation ne répondait pas aux spécifications du B.C.E.O.M.-C.E.B.T.P. parce que sa courbe granulométrique n'entre pas dans le fuseau prescrit ce qui se voit à travers la faiblesse de la teneur en filler et par conséquent celle du rapport filler/bitume. Après l'étude bibliographique que nous avons menée, l'importance de ces deux paramètres qui sont dans tous les cas liés, n'est plus à démontrer.

Par contre, le silex utilisé seul à travers la formulation du 15/25 (15% de filler calcaire, 25% de silex fraction 0/3) donne de bons résultats, même plus performants que ceux obtenus à partir de certaines formulations avec des fractions de basalte notamment le 3/8 soit un pourcentage de 15%, les combinaisons (16/25 + 3/8) et (8/16 + 0/3) soient respectivement des pourcentages de 40% et 35%.

Les fractions 0/3 et 3/8 de basalte ne contiennent pas autant de fines (baisse du rapport filler/bitume) que celles du silex et sont même plus grossières et conviennent donc moins au fuseau granulométrique adopté que les fractions du silex. C'est la raison pour laquelle on obtient une baisse de performance avec ces formulations.

Seulement, le rapport immersion/non immersion pour le 15/25 est plus faible, montrant que le silex non amélioré est plus susceptible au phénomène de désenrobage.

Les formulations donnant les meilleurs résultats sont celles qui ont été obtenues à partir des fractions de basalte 16/25, 8/16 soient respectivement des pourcentages de 25% et 20%.

Tableau 3.11. Récapitulatif des résultats des différents essais de grave bitume et de béton bitumineux

Rc étant avec et sans imbibition

BB	Sec		Non dopées		Imbibées		Non dopées		Rc	Rc 1 %		
	Fluage (mm)		Stabilité (N)		Fluage (mm)		Stabilité (N)					
R 8/12 Silix	33	0,82	8087		25	0,62	7125,5		0,88	88,33		
R 8/16 Silix	32	0,91	8002		22	0,54	7253,9		0,91	90,65		
R 8/16 Basalte	30	0,76	9295		22	0,56	9194,09		0,99	98,91		
R 8/16 Silix + 3/8 Basalte	55	1,38	8890		20	0,5	7052,19		0,81	81,15		
R 8/12 Silix + 3/8 Basalte	37	0,93	10788		28	0,7	8007,36		0,74	74,22		
GB												
15/25	33	0,83	7513		24	0,81	6020,97		0,80	80,14		
16/25 + 3/8 Basalte	26	0,64	6314		23	0,58	5784,32		0,91	91,29		
8/16 + 0/3 Basalte	24	0,58	5020		36	0,83	5002,37		1,00	99,65		
16/25 Basalte	32	0,80	7690		24	0,81	7146,81		0,93	92,94		
8/16 Basalte	25	0,63	7721		37	0,93	7115,3		0,92	92,16		
3/8 Basalte	25	0,63	5815		28	0,70	5705,14		0,98	98,11		
BB + GB	Sec		Dopées		Imbibées		Dopées		N mélange	Rc	Rc 2 %	Rc1 - Rc2
	Fluage (mm)		Stabilité (N)		Fluage (mm)		Stabilité (N)					
R 8/12 Silix BB	33	0,82	9226,71		33	0,81	8249		1	0,89	89,38	88,33
R 8/16 Silix BB	32	0,91	8782		37	0,93	8724		2	0,99	99,34	90,65
R 8/12 Silix + 3/8 Basalte BB	33	0,82	10829		29	0,71	9049,63		3	0,84	83,57	74,22
8/16 Basalte GB	25	0,63	8133		37	0,93	8095		4	1,00	99,53	92,16
15/25 GB	31	0,79	7661		32	0,79	6337,85		5	0,83	82,73	80,14

BB : Béton bitumineux

- R 8/12 Silix 33% de 8/12 Silix + 27% de 3/8 Silix + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire
- R 8/16 Silix 33% de 8/16 Silix + 27% de 3/8 Silix + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire
- R 8/16 Basalte 33% de 8/16 Basalte + 27% de 3/8 Silix + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire
- R 8/16 Silix + 3/8 Basalte 33% de 8/16 Silix + 27% de 3/8 Basalte + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire
- R 8/12 Silix + 3/8 Basalte 33% de 8/12 Silix + 27% de 3/8 Basalte + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire

GB: grave-bitume

- 15/25 25% de 16/25 Silix + 20% de 8/16 Silix + 15% de 3/8 Silix + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire
- 16/25 + 3/8 Basalte 25% de 16/25 Basalte + 20% de 8/16 Silix + 15% de 3/8 Basalte + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire
- 8/16 + 0/3 Basalte 25% de 16/25 Silix + 20% de 8/16 Basalte + 15% de 3/8 Silix + 25% de 0/3 Basalte + 15% de filler calcaire
- 16/25 Basalte 25% de 16/25 Basalte + 20% de 8/16 Silix + 15% de 3/8 Silix + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire
- 8/16 Basalte 25% de 16/25 Silix + 20% de 8/16 Basalte + 15% de 3/8 Silix + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire
- 3/8 Basalte 25% de 16/25 Silix + 20% de 8/16 Silix + 15% de 3/8 Basalte + 25% de 0/3 Silix + 15% de filler calcaire

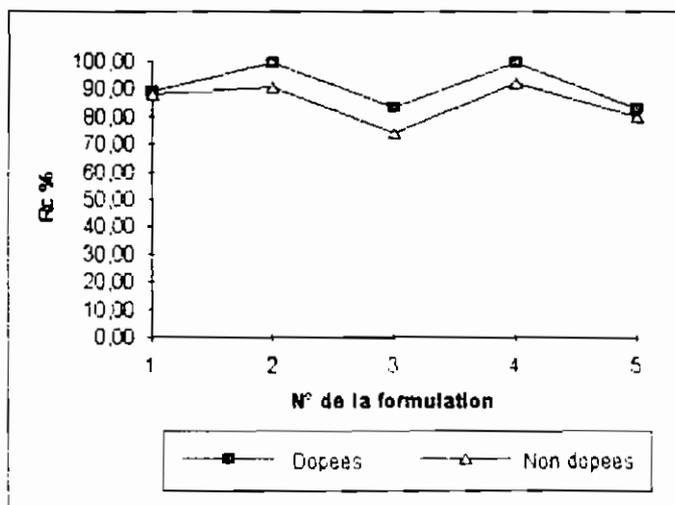


Figure 3.5. Graphique de comparaison des rapports de stabilités (dopées et non dopées) obtenus avec et sans imbibition

Les critères de forme des granulats sont mieux respectés d'une part et la teneur en filler et le rapport filler/bitume ne sont pas influencés par la substitution des fractions de silex par celles du basalte d'autre part.

La fraction 8/16 de basalte (20%) donnant les meilleurs résultats par substitution à celle du silex, nous retiendrons cette formulation comme étant la meilleure.

3.3.2) En couches de revêtement: Utilisation des granulats concassés pour la confection de bétons bitumineux 0/12 et 0/16

3.3.2.1) Concassés de silex seuls

Les formulations ont été faites pour:

- le 0/12, à partir de la reconstitution suivant les fractions: filler calcaire (15%), 0/3 (25%), 3/8 (27%) et 8/12 (33%);
- le 0/16, à partir de la reconstitution suivant les fractions: filler calcaire (15%), 0/3 (25%), 3/8 (27%) et 8/16 (33%).

Les tableaux 3.12 et 3.13 et courbes granulométriques (Figures 3.6 et 3.7) de ces formulations figurent aux pages suivantes.

3.3.2.2) Mélange de concassés de silex et de basalte

Pour formuler ces mélanges, nous avons procédé comme pour la grave-bitume en prenant en compte les caractéristiques propres aux bétons bitumineux. Les tableaux et courbes granulométriques de ces formulations figurent aux pages suivantes en Annexe.

3.3.2.3) Analyse et interprétation des résultats obtenus

Les mêmes remarques sont valables pour le béton bitumineux: le 0/16 et le 0/12 satisfont les spécifications mais les formulations avec le basalte donnent de meilleurs résultats (cf. Tableau 3.11 et Figure 3.5), notamment les fractions 8/16 et 3/8 correspondant respectivement à des pourcentages de 33% et 27%.

Tableau 312 Formulation du 0/12

Pourcentage			33%		27%		25%		15%	Passant
Tamis		8/12 S		3/8 S		03 S		filler calc		100%
1" = 25 mm	25	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4 " = 19 mm	19	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
1/2 " = 13 mm	13	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/8 " = 9,5 mm	9,5	78,39	25,87	41,65	11,25	100,00	25,00	100,00	15,00	77,11
4 = 4,75 mm	4,75	2,42	0,80	1,05	0,28	100,00	25,00	99,87	14,98	41,06
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	90,25	22,56	87,34	13,10	35,66
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	65,19	16,30	64,15	9,62	25,92
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	48,78	12,20	50,23	7,53	19,73
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	34,50	8,63	42,76	6,41	15,04
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	5,73	36,40	5,46	11,19
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26	4,32	33,18	4,98	9,29
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	12,85	3,21	31,04	4,66	7,87

11
53
11

Fractions	Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	80,38
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	61,67
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	29,90
0/3	2	0,075	1,925	1,66	12,47
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	8,10

		100
G	dn > 10 mm	80,38
g	5 < dn < 10 mm	61,67
S	0,315 < dn < 5 mm	29,90
s	0,08 < dn < 0,315	12,47
f	dn < 0,08	8,10

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 3,75$$

1345,93	100 S
13,46	S
1,68	S^(1/5)
6,19	p

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume
Psa est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

Tableau 313 Formulation du 0/16

Pourcentage			33%		27%		25%		15%	Passant
Tamis		8/16		3/8		0/3		filler calc		100%
1" = 25 mm	25	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
1/2" = 13 mm	13	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/8" = 9,5 mm	9,5	78,18	25,80	41,65	11,25	100,00	25,00	100,00	15,00	77,04
4 = 4,75 mm	4,75	2,29	0,76	1,05	0,28	100,00	25,00	99,87	14,98	41,02
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	90,25	22,56	87,34	13,10	35,66
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	65,19	16,30	64,15	9,62	25,92
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	48,78	12,20	50,23	7,53	19,73
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	34,50	8,63	42,76	6,41	15,04
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	5,73	36,40	5,46	11,19
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26	4,32	33,18	4,98	9,29
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	12,85	3,21	31,04	4,66	7,87

= 54 =

Fractions	Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	80,32
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	61,62
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	29,88
0/3	2	0,075	1,925	1,66	12,47
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	8,10

		100
G	dn > 10 mm	80,32
g	5 < dn < 10 mm	61,62
S	0,315 < dn < 5 mm	29,88
s	0,08 < dn < 0,315	12,47
f	dn < 0,08	8,10

$$100 S = 0,17 * G + 0,33 * g + 2,3 * S + 12 * s + 135 * f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) * K * (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 2,5$$

1345,85	100 S
13,46	S
1,68	S^(1/5)
6,19	p

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

Psa est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

FIG 3.8: COURBE GRANULOMETRIQUE DU 0/12

—▲— Curve 5

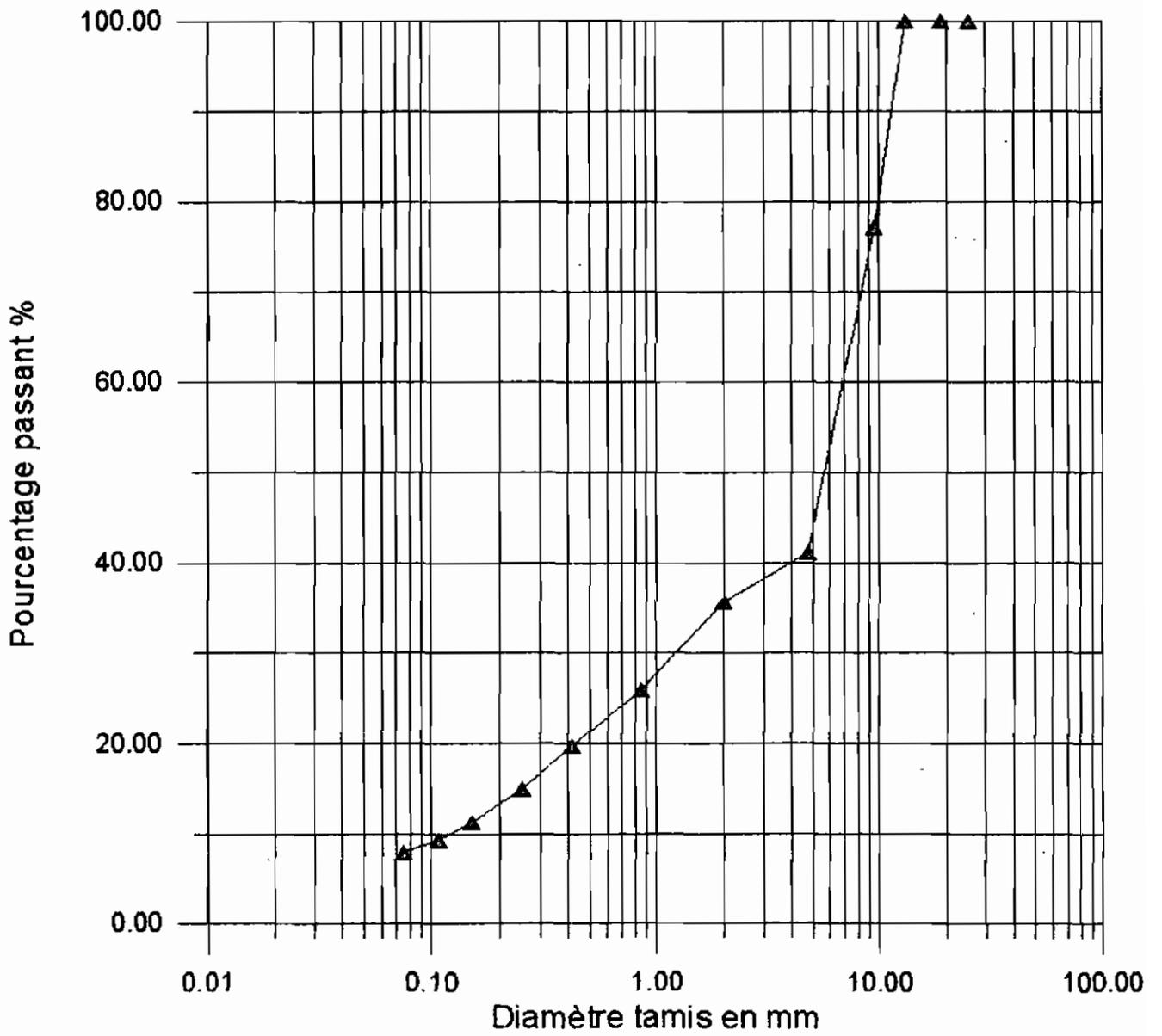
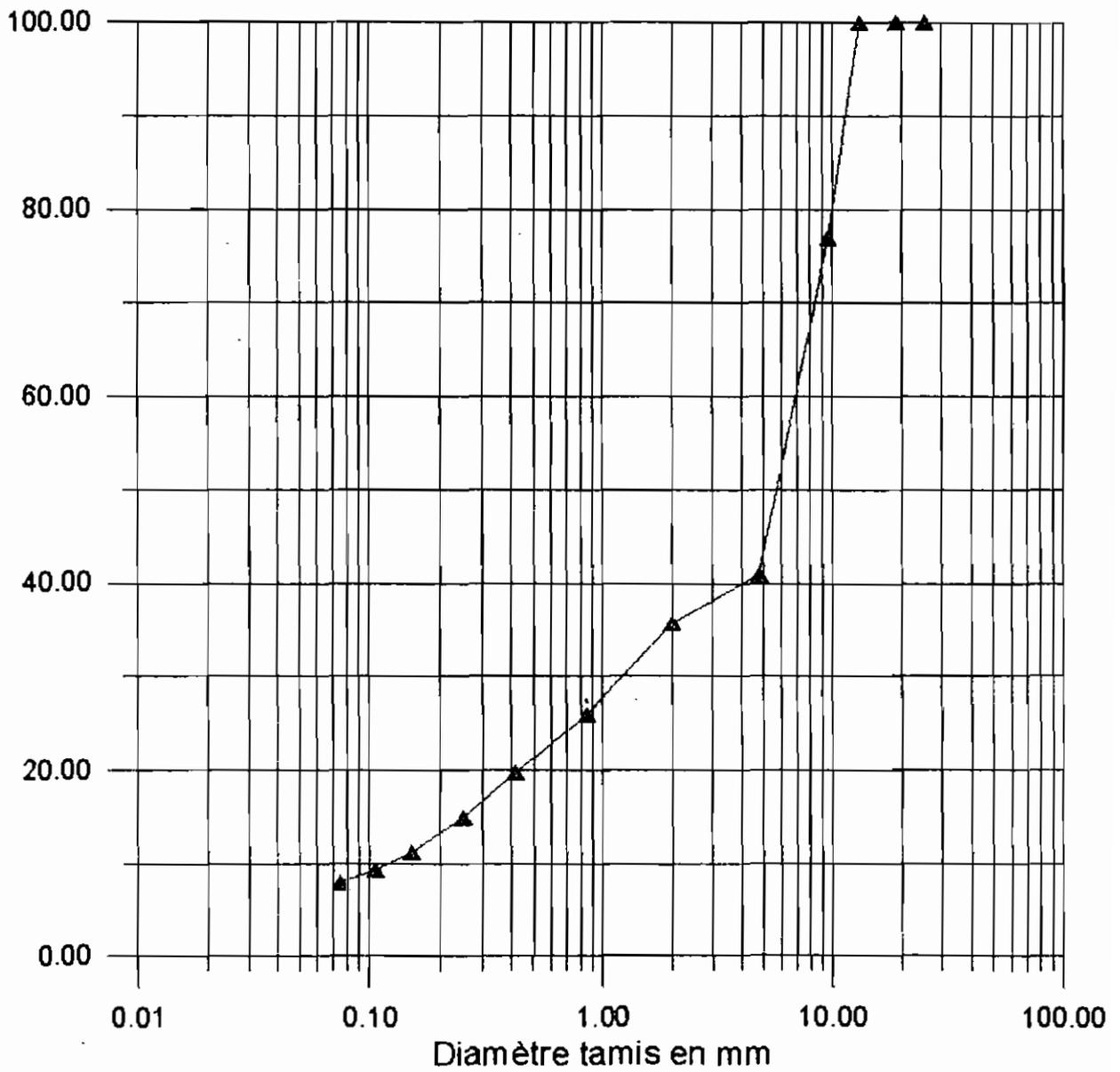


FIG 3.7: COURBE GRANULOMETRIQUE DU 0/16

—▲— Curve 4



Cependant, pour le béton bitumineux, c'est la fraction 3/8 (33%) de basalte qui par substitution, donne de meilleurs résultats. Comme nous l'avons déjà souligné, la fraction 3/8 de silex contient plus de fines que le basalte. Compte tenu du pourcentage élevé de cette fraction dans le béton bitumineux, la teneur en filler est plus importante et celle-ci nécessite beaucoup de bitume vu l'augmentation de la surface spécifique à enrober déjà importante, qu'elle engendre.

3.3.3) Dopes et fillers

Les valeurs des rapports immersion/non immersion, bien que satisfaisantes peuvent être améliorées. Nous pensons que du fait que le silexite est un granulats siliceux, l'adhésivité liant-granulat peut être influencée par sa nature et qu'il serait intéressant d'étudier expérimentalement l'apport des dopes dans le traitement du matériau.

Nous avons choisi les formulations à base de silexite seulement puis celles améliorées avec du basalte. Ce sont les suivantes et les résultats sont illustrés dans le tableau 3.11 et la figure 3.5:

- le 0/12 à partir de la reconstitution suivant les fractions: filler calcaire (15%), 0/3 (25%), 3/8 (27%) et 8/12 (33%).
- le 0/16 à partir de la reconstitution suivant les fractions: filler calcaire (15%), 0/3 (25%), 3/8 (27%) et 8/16 (33%).
- le 15/25 comprenant 15% de filler calcaire et 25% de la fraction silex 0/3; les autres composantes sont: 25% de 16/25, 20% de 8/16 et 15% de 3/8.
- le 0/12 amélioré avec le 3/8 de basalte à partir de la reconstitution suivant les fractions: filler calcaire (15%), 0/3 (25%), 3/8 (27%) et 8/12 (33%).
- le 15/25 amélioré avec le 8/16 de basalte à partir de la reconstitution suivant les fractions: 15% de filler calcaire et 25% de la fraction silex 0/3; les autres composantes sont: 25% de 16/25, 20% de 8/16 basalte et 15% de 3/8.

Les résultats obtenus après utilisation de dopes en l'occurrence le chlorure d'ammonium (environ 0,3% en poids du liant) montrent une nette amélioration du point de vue stabilité (cf. Tableau 3.11 et Figure 3.5).

Cela s'explique par le fait que les éprouvettes ne subissent pas l'effet du désenrobage lors de l'essai MARSHALL, lorsqu'elles sont trempées dans l'eau à 60°C pendant 30 minutes. Il faut souligner que l'état de surface des granulats étant de nature anionique et négative et celle du chlorure d'ammonium de nature cationique et positive, la réaction qui se passe ne peut être que positive.

Lors de l'étude bibliographique, nous avons parlé des dopes et de leur rôle dans les bétons bitumineux; nous voyons leur apport à travers les rapports de stabilité immersion/ non immersion qui sont meilleurs (respectivement 0,6 pour la grave-bitume et 0,75 pour le béton bitumineux), puisque l'action de l'eau est négligeable, les dopes améliorant l'adhésivité.

3.3.4) Comparaison des apports en filler et en dope

Pour comparer l'apport du filler et des dopes, nous avons éliminé le pourcentage de filler calcaire que nous avons remplacé par la fraction 0/3 de silex dans les formulations qui ont donné les meilleurs résultats (avec le 8/16 basalte pour la grave-bitume et le 3/8 pour le béton bitumineux). La teneur en filler est faible (de l'ordre de 3% pour la grave-bitume et 5% pour le béton bitumineux), de même évidemment que le rapport filler/bitume et nous avons dopé le liant.

Le manque de filler conduit inéluctablement vers une chute des résistances mécaniques tandis les dopes n'interviennent que dans l'amélioration de l'adhésivité liant-granulat donc dans la diminution du désenrobage et leur effet à long terme, ne peut être maîtrisé..

Cela nous a permis de constater davantage que l'apport du filler calcaire est plus important que celui des dopes car non seulement les stabilités (avec ou sans immersion) sont devenues plus faibles, mais les éprouvettes obtenues ne sont pas assez compactes (le dosage en liant étant faible).

Comme nous l'avons déjà dit dans l'étude bibliographique, tant que l'enrobage est suffisant, l'augmentation du rapport filler/bitume par apport de filler, est le moyen le plus adéquat d'améliorer la performance d'un enrobé à structure minérale satisfaisante; c'est en effet, le moyen d'augmenter la compacité, tout en rigidifiant l'enrobé et en réduisant le risque de désenrobage.

Le tableau 3.14 et la figure 3.8 permettent de mieux comparer les deux apports. Par la même occasion, nous voyons que le liant joue aussi un rôle prépondérant dans la stabilité des mélanges bitumineux, surtout dans la cohésion et le fluage.

Tableau 3.14 : Résultats des meilleures formulations avec ou sans filler calcaire

	N	Stabilité en N	Fluage en mm
Séries 1			
R 8/12 + 3/8 bas sans filler calcaire BB mais dopées	1	5551	1.03
8/16 basalte sans filler calcaire GB mais dopées	2	4540	0.64
Séries 2			
R 8/12 + 3/8 bas avec filler calcaire BB sans dopés	1	10788	0.93
8/16 basalte avec filler calcaire GB sans dopés	2	7721	0.63

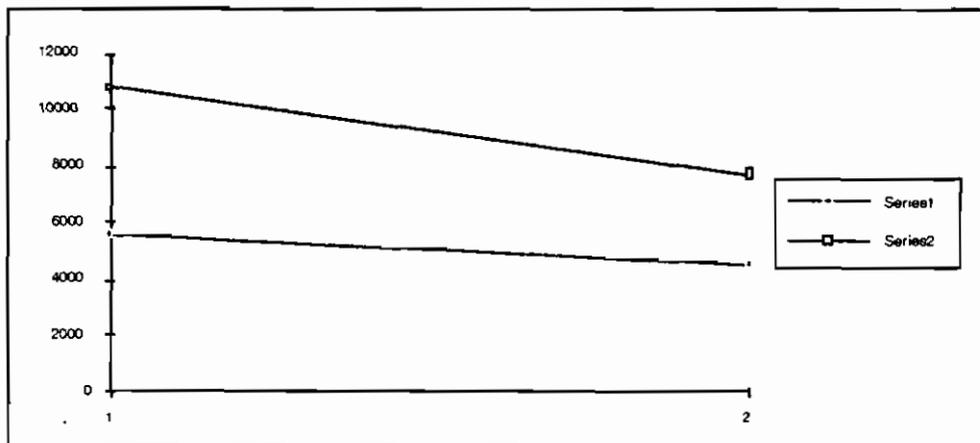


Figure 3.8: Comparaison des résultats obtenus avec et sans filler calcaire

CHAPITRE IV:

Analyse économique.

Chapitre IV: Analyse économique.

Elle porte uniquement sur l'évaluation du coût de chacune des variantes retenues pour leurs performances et la comparaison de ces coûts par rapport aux coûts spécifiques des couches correspondantes en matériaux traditionnels. Ces variantes sont les suivantes:

- pour les **concassés 0/40**: le silex scalpé seul (variante 1), le mélange silex 60% et latérite 40% (variante 2), la latérite seule (variante 3).
- pour la **grave-bitume**, les formulations du 15/25 (variante 1), celle du silex (80%) et basalte 8/16 (20%) (variante 2), et celle du basalte seul (variante 3).
- pour le **béton bitumineux**, les formulations de 0/12 et 0/16 à base de silex seulement (variante 1), celle à base de silex (73%) et de basalte 3/8 (27%) (variante 2), et celle du basalte seul (variante 3).

Les hypothèses suivantes ont été établies à cet effet, notamment:

- la couche de base (cf coupe Fig. 4.1) aura les dimensions suivantes: largeur 10,20 m y compris accotements et épaisseur 15 cm,
- la couche de roulement (cf coupe Fig. 4.1) aura les dimensions suivantes: largeur 7,20 m et épaisseur 4 cm,
- nous allons évaluer le coût pour un kilomètre de route,
- nous allons utiliser les prix fixés par les entreprises Mapathé Ndiouck pour la latérite, le silex et le basalte et Jean Lefebvre (Dakar) pour le bitume 40/50.
- nous tiendrons compte des quantités foisonnées (volume V_f) et celles des couches (volume V_c).
- pour uniformiser les pourcentages de bitume trouvés, nous prendrons 4% pour la couche de base et 6 % pour la couche de revêtement puisque les valeurs trouvées par calcul sont de cet ordre.

Les résultats sont consignés dans les tableaux récapitulatifs suivants.

Fig 4.1 : Coupe Transversale d'une route revêtue

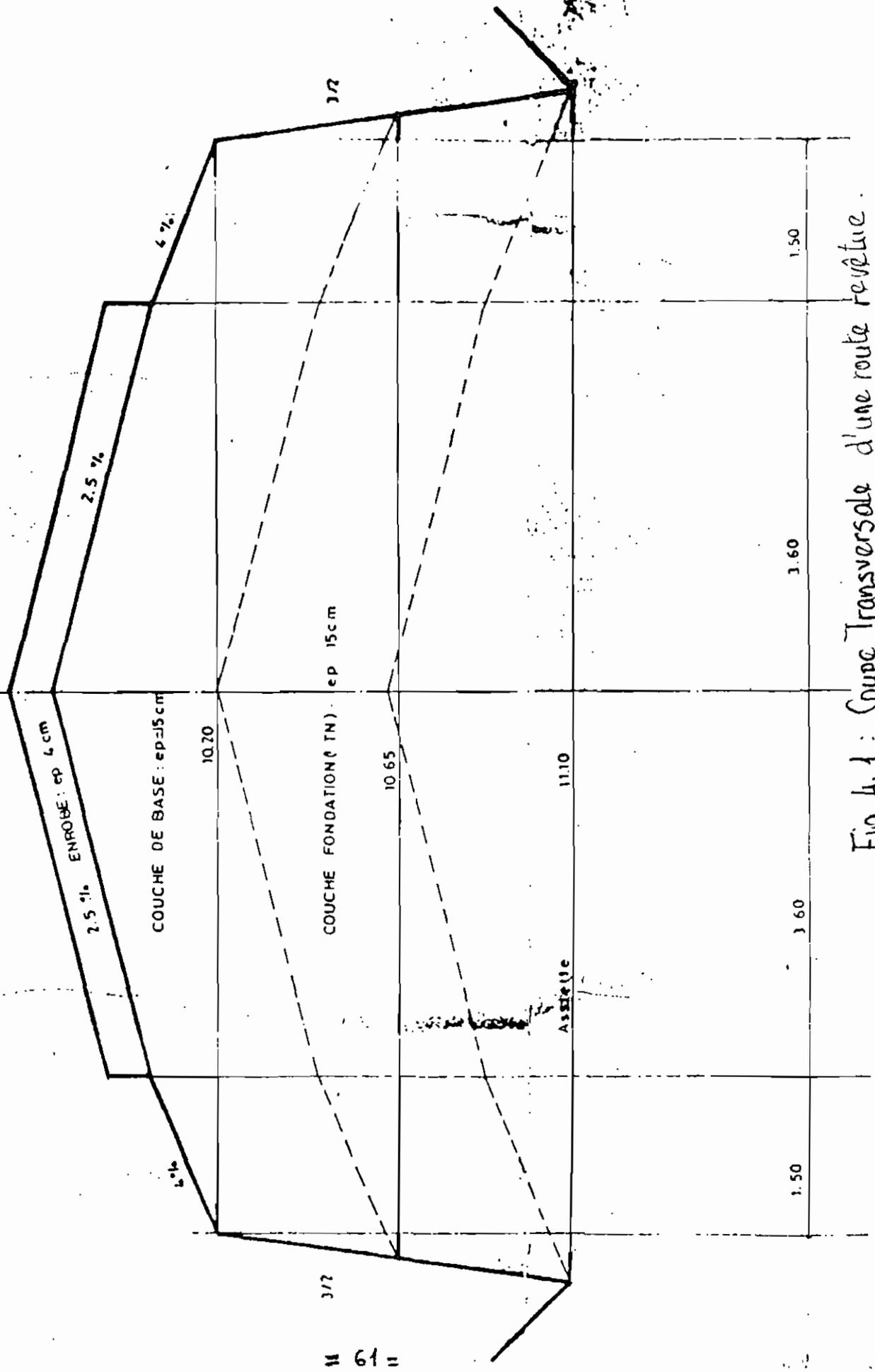


Fig 4.1 : Coupe Transversale d'une route revêtue

Tableau 4.1: Calcul des volumes et des tonnages de matériaux mis en oeuvre

Couche de base		
Concassé 0/40 + Grave-bitume 0/25		
$V_c = 10,2 \times 0,15 \times 1000$	=	1530 m3
$V_f = V_c \times Cr = 1,4 \times 10,2 \times 0,15 \times 1000$	=	2142 m3
$M_m = V_f / ((1/1500) + (4/((96 \times 1050)))$	=	3032494 kg
$M_b = M_m \times 4 / 96$	=	126354 kg
Revêtement		
Béton bitumineux 0/12 et 0/16		
$V_c = 7,2 \times 0,04 \times 1000$	=	288 m3
$V_f = V_c \times Cr = 1,4 \times 7,2 \times 0,04 \times 1000$	=	403,2 m3
$M_m = V_f / ((1/1500) + (6/((94 \times 1050)))$	=	554260 kg
$M_b = M_m \times 6 / 94$	=	35378 kg

Mm étant la masse des matériaux, et Mb, celle du bitume

Vc étant le volume de la couche, Vf, le volume foisonné et Cr, le coefficient de rendement

Tableau 4.2: Prix des matériaux en F CFA par T/km sauf exception

(Entreprise M)

0/3 Silex	3500	
3/8 Silex	4800	
8/12 Silex	4500	
8/16 Silex	4500 ✓	
16/25 Silex	4330	
0/40 Silex	6250	en F/m3/Km
0/3 Basalte	4000	
3/8 Basalte	6000	
8/12 Basalte	5800	
8/16 Basalte	5800 ↗	
16/25 Basalte	5700	
Filler calcaire	4000	Par hypothèse: seul prix non disp
Bitume 40/50	57500	(Entreprise Jean Lefèvre: prix inte
Latérite 0/40	3750	en F/m3/Km

Tableau 4.3: Coûts des variantes retenues pour la couche de base en concassés 0/40

Variante 1

Couche de base 0/40 : 100% Silex	
Coût du transport	149940
Silex seul	13387500
Coût total	13537440

Variante 2

Couche de base 0/40 : Mélange (60- 40)	
Coût du transport=	149940
Silex 60% + Latérite 40%	11245500
Coût total	11395440

Variante 3

Couche de base 0/40 : 100% Latérite	
Coût du transport=	149940
Latérite seul	8182440
Coût total	8332380

Grave-bitume 0/25

Transport = 45/T/km

T(Mm) = 3032,5 T

T(Mb) = 12,64 T

Coût Transport = CT = 137031,3

Coût matériaux = CM

Coût total = CT + CM

T(Mm): Poids des matériaux transportés

T(Mb): Poids du bitume transporté

Variante 1 : 15/25

Variante 2 : 8/16 Basalte

Variante 3 : Basalte

Tableau 4.4: Coûts des différentes variantes de la grave-bitume 0/25

Variante 1 Composantes	Prix	% utilisé	Prix partiels
0/3 Silex	3500	0,25	2653433
3/8 Silex	4800	0,15	2183396
8/16 Silex	4500	0,2	2729245
16/25 Silex	4330	0,25	3282675
Filler calcaire	4000	0,15	1819497
Bitume 40/50	57,5	126354	7265355
		Coût matériaux =	19933600
		Coût total =	20070632

Variante 2 Composantes	Prix	% utilisé	Prix partiels
0/3 Silex	3500	0,25	2653433
3/8 Silex	4800	0,15	2183396
8/16 Basalte	5800	0,2	3517693
16/25 Silex	4330	0,25	3282675
Filler calcaire	4000	0,15	1819497
Bitume 40/50	57,5	126354	7265355
		Coût matériaux =	20722049
		Coût total =	20859080

Variante 3 Composantes	Prix	% utilisé	Prix partiels
0/3 Basalte	4000	0,25	3032494
3/8 Basalte	6000	0,15	2729245
8/16 Basalte	5800	0,2	3517693
16/25 Silex	5700	0,25	4321304
Filler calcaire	4000	0,15	1819497
Bitume 40/50	57,5	126354	7265355
		Coût matériaux =	22685589
		Coût total =	22685589

Béton bitumineux 0/12 et 0/16

Transport = 45 F/T/km

T(Mm) = 554,3 T

T(Mb) = 35,4 T

Coût Transport = CT = 26536,5

Coût matériaux = CM

Coût total = CT + CM

Variante 1 : 8/12 ou 8/16 Silex

Variante 2 : 8/12 + 3/8 Basalte

Variante 3 : Basalte uniquement

Tableau 4.5: Coûts des différentes variantes du béton bitumineux

Variante 1 Composantes	Prix	% utilisé	Prix partiels
0/3 Silex	3500	0,25	484977
3/8 Silex	4800	0,27	718320
8/16 Silex	4500	0,33	823076
Filler calcaire	4000	0,15	332556
Bitume 40/50	57,5	35378	2034235
		Coût matériaux =	4393164
		Coût total =	4419700

Variante 2 Composantes	Prix	% utilisé	Prix partiels
0/3 Silex	3500	0,25	484977
3/8 Basalte	6000	0,27	897901
8/16 Silex	4500	0,33	823076
Filler calcaire	4000	0,15	332556
Bitume 40/50	57,5	35378	2034235
		Coût matériaux =	4572744
		Coût total =	4599281

Variante 3 Composantes	Prix	% utilisé	Prix partiels
0/3 Basalte	4000	0,25	554260
3/8 Basalte	6000	0,27	897901
8/16 Basalte	5800	0,33	1060853
Filler calcaire	4000	0,15	332556
Bitume 40/50	57,5	35378	2034235
		Coût matériaux =	4879804
		Coût total =	4906340

Après l'estimation financière, nous constatons que pour les concassés 0/40, la couche de base en latérite coûte moins chère que celle en silex. Mais vu les nombreux problèmes rencontrés aujourd'hui avec la latérite, il serait plus judicieux de l'améliorer avec le silex selon les pourcentages suivants: 90 à 60% de latérite et 10 à 40% de silex.

Pour les mélanges bitumineux, ce sont les variantes 2 qui sont les plus intéressantes, c'est-à-dire, le silex amélioré avec le basalte. Dans ce cas, les formulations à base de silex coûtent moins chères mais les formulations avec amélioration présentent beaucoup plus d'intérêt du point de vue gain en performance.

Les couches de base à base de concassés 0/40 coûtent moins chères que celles en grave-bitume. Mais le choix dépendra des opportunités qui se présenteront, c'est-à-dire, de la nécessité d'une route non bitumée ou bitumée, donc hautement élaborée et qui est à justifier économiquement.

Nous constatons par la même occasion que les coûts des mélanges bitumineux à base de basalte uniquement sont plus élevés. Même si le basalte est plus performant que le silex, nous pensons que si les problèmes granulométriques du silex sont résolus, il peut être plus performant que le basalte puisqu'il possède des qualités (comme sa dureté) parfois meilleures que celles du basalte.

Tableau 4.6: Récapitulatif des coûts des variantes

	Coûts totaux
Couche de base en concassés 0/40	
Silex seul	13 537 440
Mélange 60% Silex - 40% Latérite	11 395 440
Latérite seule	8 332 380
Couche de base en grave-bitume 0/25	
Variante 1: 15/25	20 070 632
Variante 2: 8/16 basalte	20 859 080
Variante 3: Basalte	22 685 589
Couche de revêtement en béton bitumineux	
Variante 1: 8/12 ou 8/16 Silex	4 418 700
Variante 2: 8/12 + 3/8 basalte	4 599 281
Variante 3: Basalte	4 906 340

Il faut aussi dire que compte tenu des résultats obtenus et de la localisation du silexite pour les coûts de transport, les prix des fractions de silexite devraient être revus à la baisse pour rendre ce matériau plus compétitif d'autant plus que c'est un matériau de substitution.

Conclusion et recommandations.

L'utilisation du silexite en construction routière a été étudiée en se basant sur les spécifications du B.C.E.O.M - C.E.B.T.P.. Les tentatives d'estimation ont porté dans un premier temps, sur les performances techniques du silexite seul à travers les couches de base et de revêtement et dans un second temps, par rapport aux premiers résultats obtenus, les performances obtenues après amélioration du silex par la latérite et le basalte et dans tous les cas, pour un trafic moyen.

Nous avons retenu les variantes (silex seul et silex amélioré) qui respectent le mieux les critères et les exigences et qui donnent les meilleures performances et avons procédé à l'analyse économique.

Pour comparer les performances du silex et celles du basalte qui est le matériau le plus couramment utilisé, nous avons consulté les spécifications techniques figurant dans des Cahiers de Prescriptions Techniques Particulières (C.P.T.P) de Routes du Sénégal. Pour la grave bitume, les exigences concernant les graves concassées 0/25 de basalte sont: stabilité supérieure à 1300 Kg (0/16) et 1200 Kg (0/8) et fluage inférieur à 2,5 mm; et pour le béton bitumineux 0/12 ou 0/16: stabilité supérieure à 800 Kg et fluage inférieur à 4 mm.

Ces performances peuvent être atteintes et pour cela, il faudra d'abord chercher à améliorer la qualité du matériau surtout du point de vue granulométrique et forme.

En effet, compte tenu de la dureté de la roche et après avoir visité la station de concassage (composée d'un concasseur primaire à mâchoires, d'un concasseur secondaire giratoire 3 pieds et d'un concasseur tertiaire identique au secondaire), nous pensons que cet équipement n'est pas adaptée au matériau et à tendance à donner des éléments plats. Cet équipement convient pour la réalisation des granulats à béton, où la forme n'est pas primordiale.

Dans le cas des bétons bitumineux, il faudrait, pour arriver à un résultat plus satisfaisant, un moulin à barres pour augmenter la production de fines, un giradisque en position tertiaire, et, pour améliorer la forme, un concasseur à marteau en position secondaire.

On pourrait aussi substituer la fraction 0/3 de silex par un autre matériau puisque celle-ci est une fraction à problèmes et un pourcentage de fines relativement faible (par rapport au filler calcaire) car comportant beaucoup d'impuretés difficiles à enlever (fines argileuses et phosphatées), donc augmentant la susceptibilité de ce matériau à l'imbibition.

Il faudra établir des fuseaux granulométriques (on n'en trouve pas dans les C.P.T.P.) qui permettront d'atteindre ces performances ce qui sera jours difficile si la forme des granulats n'est pas améliorée.

Pour le choix des variantes, il s'agira, selon les enjeux économiques, de choisir celle à utiliser. Nous recommandons, par conséquent, l'amélioration de la latérite par l'adjonction de silexite. Concernant les mélanges bitumineux, vu les gains considérables obtenus en performance avec l'amélioration par le basalte et la faible différence de coûts engendrée, nous estimons qu'il est plus judicieux de choisir les variantes avec basalte.

Pour terminer cette étude, nous suggérons l'exécution de planches d'essais en vue d'expérimenter ce matériau dans les véritables conditions d'exploitation des routes (climat, trafic, etc...)

*Références
bibliographiques.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAKHOUM A. (1984)- Phosphogypse comme matériau de construction. Projet de fin d'Etudes. E.P.T.

B.C.E.O.M. -C.E.B.T.P. - (2ème Edition 1991) Etudes et Construction . Tome III. Les routes dans les zones tropicales et désertiques. Ministère de la Coopération et du Développement. République Française.

C.E.B.T.P.- L.C.P.C. (1985)- Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux. Ministère de la Coopération et du Développement. République Française.

C.E.B.T.P.- L.C.P.C. (1985)- Manuel sur les Routes en zones tropicales et désertiques. Ministère de la Coopération et du Développement. République Française.

C.E.B.T.P. (1984) - Guide pratique de dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux. Ministère des Relations extérieures- Coopération et Développement. République Française.

CEREEQ. (Dec. 1994) - Compte Rendu : Essais d'identification complète sur les silixites de Taïba.

CHOQUET F. (1984) - Centre de recherches routières. Bruxelles.Etudes au laboratoire des possibilités de valorisation des scories d'aciéries et des laitiers de haut fourneau en construction routière. CR 22/84.

CROTTAZ R., PIGEONIS M.L.(1978)- Construction de la superstructure routière. Tome I. Conception générale, dimensionnement, matériaux pierreux et stabilisations. Laboratoire de recherche des voies de circulation de l'E.P.F.L.

CROTTAZ R., PIGEONIS M.L.(1978)- Construction de la superstructure routière. Tome II. Liants hydrocarbonés et Technologies de construction. Laboratoire de recherche des voies de circulation de l'E.P.F.L.

DIEME Abdoulaye. (1991)- Etude des performances de bétons hydrauliques à ciment Portland à ajout pouzzolanique: C.P.J.) et à granulats de type silixite : utilisation des produits volcaniques du Cap-Vert et des déchets d'exploitation de la C.S.P.T. comme matériaux de substitution. Mémoire d'Ingénieur-Géologue I.S.T..

DJIBA Younouss. (1993)- Importance économique des granulats au Sénégal et évaluation des performances d'un béton hydraulique à granulats de type siliceux et à ciment Portland à ajout pouzzolanique. Mémoire d'Ingénieur-Géologue I.S.T..

Direction des Travaux Publics (1993)-. Avenant N° 1 au Marché T/053/FM. Réhabilitation de la Route Nationale 2 entre Guéoul et Baralé. Tranche "B" du P.A.S.T. Ministère de l'Équipement et des Transports Terrestres .

Direction des Travaux Publics (1993)-. Rapport de surveillance et de contrôle N° 8 . Travaux de Réhabilitation de la Route Nationale 2 entre Guéoul et Baralé 39 km . Tranche "B" du P.A.S.T. Ministère de l'Équipement et des Transports Terrestres .

Direction des Travaux Publics (1993)- Renforcement de Routes bitumées du Centre-Sud. Route RN 4 Nioro du Rip- Keur Ayip 39,95 km. Dossier d'Appel d'Offres. Volume 2: Pièces écrites techniques.. Tranche "B" du P.A.S.T. Ministère de l'Équipement et des Transports Terrestres .

FALL M. (1993)- Identification et caractérisation mécanique des graveleux latéritiques du Sénégal.: Application au domaine routier. Thèse Doct. Génie Civil et M. INPL-Nancy. 250 p.

JEUFFROY G.- SAUTEREY R.- Cours de routes - Couches de roulement. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

MAIGNIEN R. (1965)- Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000 . ORSTOM (Centre de Dakar).

Manuel de laboratoire Voirie E.P.T.

NDIAYE K. (1993)- Etude de l'utilisation du sable-bitume en couche de base routière. Projet de fin d'Études. E.P.T..

THIJSM. (1984) - Etat des connaissances relatives à l'utilisation en remblais routiers des cendres volantes de fraîche production d'une ou de plusieurs centrales électriques.

Annexes.

Annexes

Annexe 1 : Résultats de la blocométrie des moellons

Annexe 2 : Poids spécifiques des constituants solides des agrégats
et des mélanges

Annexe 3 : Formulations de la grave-bitume

Annexe 4 : Courbes granulométriques des formulations de la grave-bitume

Annexe 5 : Formulations des bétons bitumineux

Annexe 6 : Courbes granulométriques des formulations des bétons bitumineux

Annexe 7 : Densité relative brute des éprouvettes saturées à surface sèches

Annexe 8 : Résultats des essais MARSHALL (cas des éprouvettes non dopées et
mais imbibées)

Annexe 9 : Résultats des essais MARSHALL (cas des éprouvettes non dopées et
non imbibées)

Annexe 10 : Résultats des essais MARSHALL (cas des éprouvettes dopées et
imbibées)

Annexe 11 : Résultats des essais MARSHALL (cas des éprouvettes dopées et
sans filler calcaire)

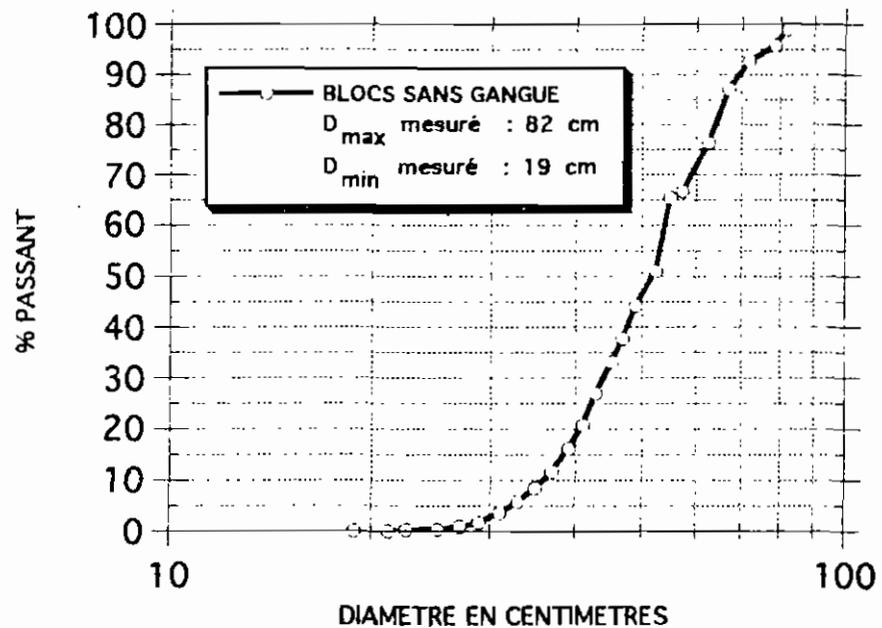
Annexe 12 : Résultats des essais Proctor et C.B.R.

Annexe 13 : Courbes granulométriques avant et après C.B.R.

Annexe 14 : Courbes de résultats des essais Proctor et C.B.R.

Annexe 15 : Courbes granulométriques du silex 0/40 et du latérite 0/40

A2 ; SILEX DE TAIBA
Granulométrie par mesure et pesée de blocs
obtenue par analyse statistique de plus de 1000 mesures



= A1 =

BLOCOMETRIE-1

Diamètre, cm	Poids, kg	%passant
82	30,95	98,99
78,65	98,2	95,77
71,86	93,4	92,71
66,99	173,05	87,05
62,58	328,85	76,28
57,29	294,6	66,63
55	37,05	65,42
52,41	440,8	50,99
48,98	205,55	44,26
46,88	201,35	37,67
45,11	138,65	33,13
42,72	191,15	26,87
40,94	185,55	20,79
39	142,35	16,13
36,92	134,25	11,74
34,9	101,65	8,41
32,99	80,35	5,78
31,02	67,35	3,57
28,87	56,35	1,73
27,04	25,45	0,89
25,08	16,6	0,35
22,58	3,9	0,22
21,25	4,6	0,07
18,9	2,2	0,000000
	3054,2	

=A1=

A2

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Silix 16-25		
Essai n	1	2	3
Pycnomètre	I	II	III
Volume du pycnomètre ml	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	693,49	716,63	706,1
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	661,55	683,4	673,17
Réceptier d'évaporation n	VO1	VO10	VO5
Précipent + sol sec (g)	191,76	192,94	193
Précipent Tare (g)	141,25	140,08	139,6
Psol sec Ps (g)	50,51	52,86	53,4
V = Ps + Ppe - Ppes	18,57	19,63	20,47
Gs à T (C) = Ps/V	2,72	2,69	2,61
Facteur de correction a à T (C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x a	2,71	2,68	2,60
Moyenne d'au moins 3 essais		2,67	

Poids spécifiques des Constituants solides			
Description	Filtre calcaire		
Essai n	1	2	3
Pycnomètre	A3	A4	A5
Volume du pycnomètre ml	250	250	250
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	384,96	384,66	382,77
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	352,48	351,9	348,86
Réceptier d'évaporation n	VO9	VO6	VO10
Précipent + sol sec (g)	195,73	193,27	194,25
Précipent Tare (g)	141,08	138,67	140,08
Psol sec Ps (g)	54,65	54,6	54,17
V = Ps + Ppe - Ppes	22,17	21,84	20,26
Gs à T (C) = Ps/V	2,47	2,50	2,67
Facteur de correction a à T (C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x a	2,46	2,49	2,67
Moyenne d'au moins 3 essais		2,54	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	silix 3-8		
Essai n	1	2	3
Pycnomètre	I	II	III
Volume du pycnomètre ml	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	963,59	989,51	980,25
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	661,55	683,4	673,17
Réceptier d'évaporation n	VO10	VO19	VO18
Précipent + sol sec (g)	715	731,15	720
Précipent Tare (g)	229,08	239,51	227,94
Psol sec Ps (g)	485,92	491,64	492,06
V = Ps + Ppe - Ppes	183,88	185,53	184,98
Gs à T (C) = Ps/V	2,64	2,65	2,66
Facteur de correction a à T (C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x a	2,63	2,64	2,65
Moyenne d'au moins 3 essais		2,64	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	R 8/16 Basalt	8/12 + 3/8 Basalt	R 8/12 Silix
Essai n	1	2	3
Pycnomètre	I	II	III
Volume du pycnomètre ml	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	957,24	998,95	986
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	660,05	681,4	671,17
Réceptier d'évaporation n	VOG4	VOG19	VOG3
Précipent + sol sec (g)	686,21	725,64	734,3
Précipent Tare (g)	224,84	231,51	230,23
Psol sec Ps (g)	461,37	494,33	504,07
V = Ps + Ppe - Ppes	164,18	176,78	189,24
Gs à T (C) = Ps/V	2,81	2,80	2,66
Facteur de correction a à T (C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x a	2,80	2,79	2,66
Moyenne d'au moins 3 essais			

= A2 =

A2

Tableaux : Poids spécifique des Constituants Solides des agrégats et des mélanges

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Silex 0-3		
Essai n	1	2	3
Pycnomètre	7	A2	10
Volume du pycnomètre ml	250	250	250
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	391,27	384,06	386,22
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	356,03	350,04	352,45
Réceptif d'évaporation n	VO14	VO12	VO3
Précipier + sol sec (g)	196,89	194,03	196,67
Précipier Tare (g)	140,44	139,21	141,37
Psol sec Ps (g)	56,45	54,82	55,3
V = Ps + Ppe - Ppes	21,21	20,8	21,53
Gs à T (C) = Ps/V	2,66	2,64	2,57
Facteur de correction a à T (C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x a	2,65	2,63	2,56
Moyenne d'au moins 3 essais		2,61	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Basalte 0-3		
Essai n	1	2	3
Pycnomètre	4	A1	3
Volume du pycnomètre ml	250	250	250
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	384,24	390	389,78
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	348,03	353,77	352,58
Réceptif d'évaporation n	VO14	VO12	VO3
Précipier + sol sec (g)	196,55	196,74	196,67
Précipier Tare (g)	141,23	141,45	138,92
Psol sec Ps (g)	55,32	55,29	57,75
V = Ps + Ppe - Ppes	19,11	19,06	20,55
Gs à T (C) = Ps/V	2,89	2,90	2,81
Facteur de correction a à T (C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x a	2,89	2,89	2,80
Moyenne d'au moins 3 essais		2,86	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Silex 8/16		
Essai n	1	2	3
Pycnomètre	I	II	III
Volume du pycnomètre ml	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	965,69	994,11	982,51
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	661,55	683,4	673,17
Réceptif d'évaporation n	VOG12	VOG9	VOG1
Précipier + sol sec (g)	718,26	721,16	733,75
Précipier Tare (g)	231,09	222,97	230,08
Psol sec Ps (g)	487,17	498,19	495,67
V = Ps + Ppe - Ppes	183,03	187,48	186,33
Gs à T (C) = Ps/V	2,66	2,66	2,66
Facteur de correction a à T (C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x a	2,65	2,65	2,65
Moyenne d'au moins 3 essais		2,65	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Silex 0/12		
Essai n	1	2	3
Pycnomètre	IV	V	VI
Volume du pycnomètre ml	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	981,26	990,96	980,01
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	671,64	678,96	671,64
Réceptif d'évaporation n	VOG17	VOG3	VOG8
Précipier + sol sec (g)	719,55	731,84	727,39
Précipier Tare (g)	224,68	230,23	230,34
Psol sec Ps (g)	494,87	501,61	497,05
V = Ps + Ppe - Ppes	185,25	189,61	188,68
Gs à T (C) = Ps/V	2,67	2,65	2,63
Facteur de correction a à T (C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x a	2,66	2,64	2,65
Moyenne d'au moins 3 essais		2,64	

= A2 =

A2

Poids spécifique des Constituants solides		
Description	15/25	8/16 Basalte
Essai n	1	2
Pycnomètre	I	II
Volume du pycnomètre ml	500	500
Méthode de désaération	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	964,55	996,85
Température (C)	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	660,55	681,4
Réceptacle d'évaporation n	VO10	VOG7
Précipité + sol sec (g)	715	720,74
Précipité Tare (g)	229,08	229,68
Psol sec Ps (g)	485,92	491,06
V - Ps + Ppe - Ppes	181,92	175,61
Gs à T (C) = Ps/V	2,67	2,80
Facteur de correction α à T (C) table	0,99681	0,99681
Gs à 20 C = Gs à T (C) x α	2,66	2,79
Moyenne d'au moins 3 essais		

Poids spécifique des Constituants solides		
Description		
basalte 16/25	2,92	
basalte 8/16	2,91	
basalte 3/8	2,90	
basalte 0/3	2,86	
bitume 40/50	1,05	

= A2 =

A3

Tableau : Formulation du 16/25 Basalte

Fractions		16/25		8/16		3/8		0/3		Filler calcaire		Total
Pourcentage		Basalte	25%		20%		15%		25%		15%	Passant
Tamis												100%
1" = 25 mm	25	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	53,84	13,46	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	88,46
1/2" = 13 mm	13	1,40	0,35	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	75,35
3/8" = 9,5 mm	9,5	0,13	0,03	78,18	15,64	41,65	6,25	100,00	25,00	100,00	15,00	61,92
4 = 4,75 mm	4,75	0,00	0,00	2,29	0,46	1,05	0,16	100,00	25,00	99,87	14,98	40,60
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,25	22,56	87,34	13,10	35,66
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,19	16,30	64,15	9,62	25,92
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,78	12,20	50,23	7,53	19,73
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,50	8,63	42,76	6,41	15,04
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	5,73	36,40	5,46	11,19
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26	4,32	33,18	4,98	9,29
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,85	3,21	31,04	4,66	7,87

= A3 =

Fractions	Du	à	Du-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	63,84
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	52,78
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	29,28
0/3	2	0,075	1,925	1,66	12,47
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	8,10
Total	4,75	0,075	4,675	1,06	8,10

		100
G	dn > 10 mm	63,84
g	5 < dn < 10 mm	52,78
s	0,315 < dn < 5 mm	29,28
s	0,08 < dn < 0,315	12,47
f	dn < 0,08	8,10

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot s + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 2,5$$

$$1338,75 \quad 100 S$$

$$13,39 \quad S$$

$$1,68 \quad S^{(1/5)}$$

$$4,12 \quad p$$

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

P_{sa} est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

A3

Tableau : Formulation du 8/16 Basalte

Fractions		16/25		8/16		3/8		0/3		Filler calcaire		Total
Pourcentage			25%	Basalte	20%		15%		25%		15%	Passant
Tamis												100%
1" = 25 mm	25	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	63,94	15,99	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	90,99
1/2" = 13 mm	13	2,90	0,73	72,00	14,40	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	70,13
3/8" = 9,5 mm	9,5	0,64	0,16	34,42	6,88	41,65	6,25	100,00	25,00	100,00	15,00	53,29
4 = 4,75 mm	4,75	0,36	0,09	0,64	0,13	1,05	0,16	100,00	25,00	99,87	14,98	40,36
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,25	22,56	87,34	13,10	35,66
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,19	16,30	64,15	9,62	25,92
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,78	12,20	50,23	7,53	19,73
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,50	8,63	42,76	6,41	15,04
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	5,73	36,40	5,46	11,19
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26	4,32	33,18	4,98	9,29
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,85	3,21	31,04	4,66	7,87

= A3 =

Fractions	Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	61,71
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	46,83
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	17,39
0/3	2	0,075	1,925	1,66	8,58
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	8,10
Total	4,75	0,075	4,675	1,06	8,10

		100
G	dn > 10 mm	61,71
g	5 < dn < 10 mm	46,83
S	0,315 < dn < 5 mm	17,39
s	0,08 < dn < 0,315	8,58
f	dn < 0,08	8,10
		7,00

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S \sqrt{0,5}) \text{ avec } K = 2,5$$

1262,40	100 S
12,62	S
1,66	S \sqrt{1/5}
4,07	p

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

Pea est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

AB

Tableau : Formulation du 16/25 + 3/8 Basalte

Fractions		16/25		8/16		3/8		0/3		Filler calcaire		Total
Pourcentage		Basalte	25%		20%	Basalte	15%		25%		15%	Passant
Tamis												100%
1" = 25 mm	25	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4 " = 19 mm	19	53,84	13,46	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	88,46
1/2 " = 13 mm	13	1,40	0,35	78,18	15,64	94,84	14,23	100,00	25,00	100,00	15,00	70,21
3/8 " = 9,5 mm	9,5	0,13	0,03	2,29	0,46	72,16	10,82	100,00	25,00	100,00	15,00	51,31
4 = 4,75 mm	4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	10,86	1,63	100,00	25,00	99,87	14,98	41,61
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	3,72	0,56	90,25	22,56	87,34	13,10	36,22
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	1,66	0,25	65,19	16,30	64,15	9,62	26,17
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	0,20	48,78	12,20	50,23	7,53	19,93
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	0,17	34,50	8,63	42,76	6,41	15,21
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,09	0,16	22,92	5,73	36,40	5,46	11,35
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,15	17,26	4,32	33,18	4,98	9,44
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	0,10	12,85	3,21	31,04	4,66	7,97

Fractions		Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	3600	19	4,75	14,25	0,61	70,21
8/16	3000	9,5	4,75	4,75	1,06	47,57
3/8	1800	9,5	4,75	4,75	1,06	29,57
0/3	2400	2	0,075	1,925	1,66	12,61
Filler calcaire	1200	4,75	0,075	4,675	1,06	8,21

		100
G	dn > 10 mm	70,21
g	5 < dn < 10 mm	47,57
S	0,315 < dn < 5 mm	29,57
s	0,08 < dn < 0,315	12,61
f	dn < 0,08	8,21

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot s + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 2,5$$

1355,31	100 S
13,55	S
1,68	$S^{(1/5)}$
3,94	p

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

P_{sa} est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

= A3 =

Tableau : Formulation du 8/16 et 0/3 Basalte

Fractions		16/25		8/16		3/8		0/3		Filler calcaire		Total
Pourcentage			25%	basalte	20%		15%	basalte	25%		15%	Passant
Tamis												100%
1" = 25 mm	25	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	63,94	15,99	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	90,99
1/2" = 13 mm	13	2,90	0,73	72,00	14,40	94,84	14,23	99,28	24,82	100,00	15,00	69,17
3/8" = 9,5 mm	9,5	0,64	0,16	34,42	6,88	72,16	10,82	97,77	24,44	100,00	15,00	57,31
4 = 4,75 mm	4,75	0,36	0,09	0,64	0,13	10,86	1,63	93,89	23,47	99,87	14,98	40,30
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	3,72	0,56	72,54	18,14	87,34	13,10	31,79
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	1,66	0,25	47,65	11,91	64,15	9,62	21,78
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	0,20	32,20	8,05	50,23	7,53	15,79
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	0,17	23,25	5,81	42,76	6,41	12,40
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,09	0,16	15,20	3,80	36,40	5,46	9,42
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,15	10,33	2,58	33,18	4,98	7,71
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	0,10	6,35	1,59	31,04	4,66	6,34

= A3 =

Fractions	Du	dn	Du-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	37,48
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	51,43
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	14,63
0/3	2	0,075	1,925	1,66	11,07
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	6,51

		100
G	dn > 10 mm	61,52
g	5 < dn < 10 mm	48,73
S	0,315 < dn < 5 mm	13,86
s	0,08 < dn < 0,315	6,68
f	dn < 0,08	6,12

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{(1/5)}) \text{ avec } K = 2,5$$

964,78	100 S
9,65	S
1,57	S^(1/5)
3,83	p

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

P_{sa} est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

Tableau : Formulation du 8/16 Basalte sans filler calcaire

Fractions		16/25		8/16		3/8		0/3		Total
Pourcentage			25%		20%		15%		40%	Passant
Tamis										100%
1" = 25 mm	25	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	40,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	63,94	15,99	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	75,99
1/2" = 13 mm	13	2,90	0,73	72,00	14,40	100,00	15,00	100,00	25,00	55,13
3/8" = 9,5 mm	9,5	0,64	0,16	34,42	6,88	41,65	6,25	100,00	25,00	38,29
4 = 4,75 mm	4,75	0,36	0,09	0,64	0,13	1,05	0,16	100,00	25,00	25,38
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,25	22,56	22,56
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,19	16,30	16,30
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,78	12,20	12,20
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,50	8,63	8,63
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	5,73	5,73
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26	4,32	4,32
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,85	3,21	3,21

= A3 =

Fractions	D _n	d _n	D _n -d _n	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	47,80
	9,5	4,75	4,75	1,06	36,50
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	13,00
0/3	2	0,075	1,925	1,66	7,60
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	3,38

		100
G	d _n > 10 mm	47,80
g	5 < d _n < 10 mm	36,50
s	0,315 < d _n < 5 mm	13,00
a	0,08 < d _n < 0,315	7,30
f	d _n < 0,08	3,38

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot s + 12 \cdot a + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{10}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 2,5$$

593,97	100 S
5,94	S
1,43	S^(1/5)
3,54	p

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

P₁₀ est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

Tableau : Formulation du 3/8 Basalte

Fractions		16/25		8/16		3/8		0/3		Filler calcaire		Total
Pourcentage			25%		20%	Basalte	15%		25%		15%	Passant
Tamis												100%
1" = 25 mm	25	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	63,94	15,99	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	25,00	100,00	15,00	90,99
1/2" = 13 mm	13	2,90	0,73	78,18	15,64	94,84	14,23	100,00	25,00	100,00	15,00	70,59
3/8" = 9,5 mm	9,5	0,64	0,16	2,29	0,46	72,16	10,82	100,00	25,00	100,00	15,00	51,44
4 = 4,75 mm	4,75	0,36	0,09	0,00	0,00	10,86	1,63	100,00	25,00	99,87	14,98	41,70
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	3,72	0,56	90,25	22,56	87,34	13,10	36,22
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	1,66	0,25	65,19	16,30	64,15	9,62	26,17
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34	0,20	48,78	12,20	50,23	7,53	19,93
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	0,17	34,50	8,63	42,76	6,41	15,21
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,09	0,16	22,92	5,73	36,40	5,46	11,35
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,15	17,26	4,32	33,18	4,98	9,44
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	0,10	12,85	3,21	31,04	4,66	7,97

Fractions		Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	3600	19	4,75	14,25	0,61	67,81
8/16	3000	9,5	4,75	4,75	1,06	55,63
3/8	1800	9,5	4,75	4,75	1,06	30,23
0/3	2400	2	0,075	1,925	1,66	12,61
Filler calcaire	1200	4,75	0,075	4,675	1,06	8,21

		100
G	dn > 10 mm	67,81
g	5 < dn < 10 mm	55,63
S	0,315 < dn < 5 mm	30,23
s	0,08 < dn < 0,315	12,61
f	dn < 0,08	8,21

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 2,5$$

$$1359,08 \quad 100 S$$

$$13,59 \quad S$$

$$1,69 \quad S^{(1/5)}$$

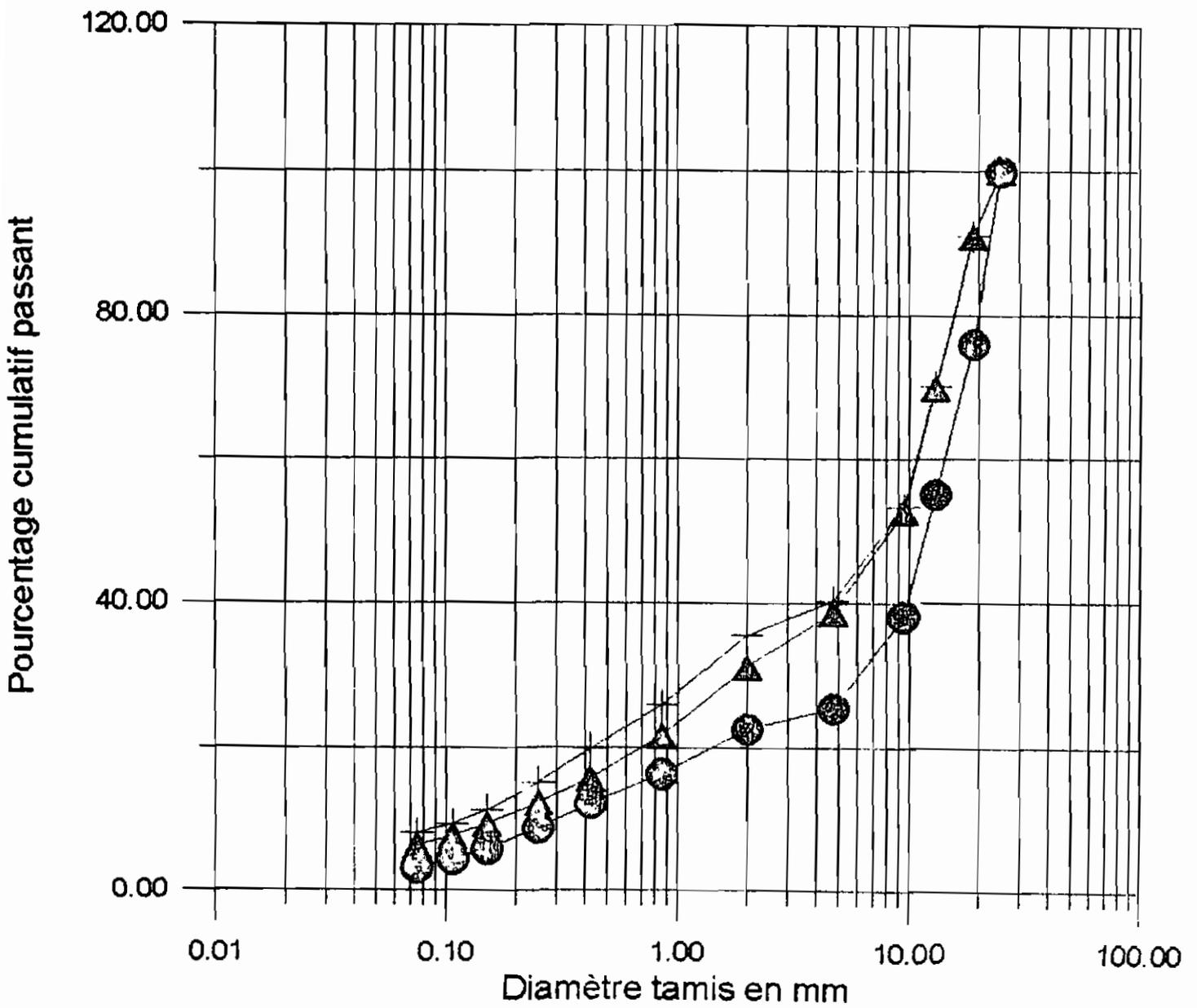
$$3,95 \quad p$$

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

P_{sa} est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

fig A4: Courbes granulométriques des mélanges

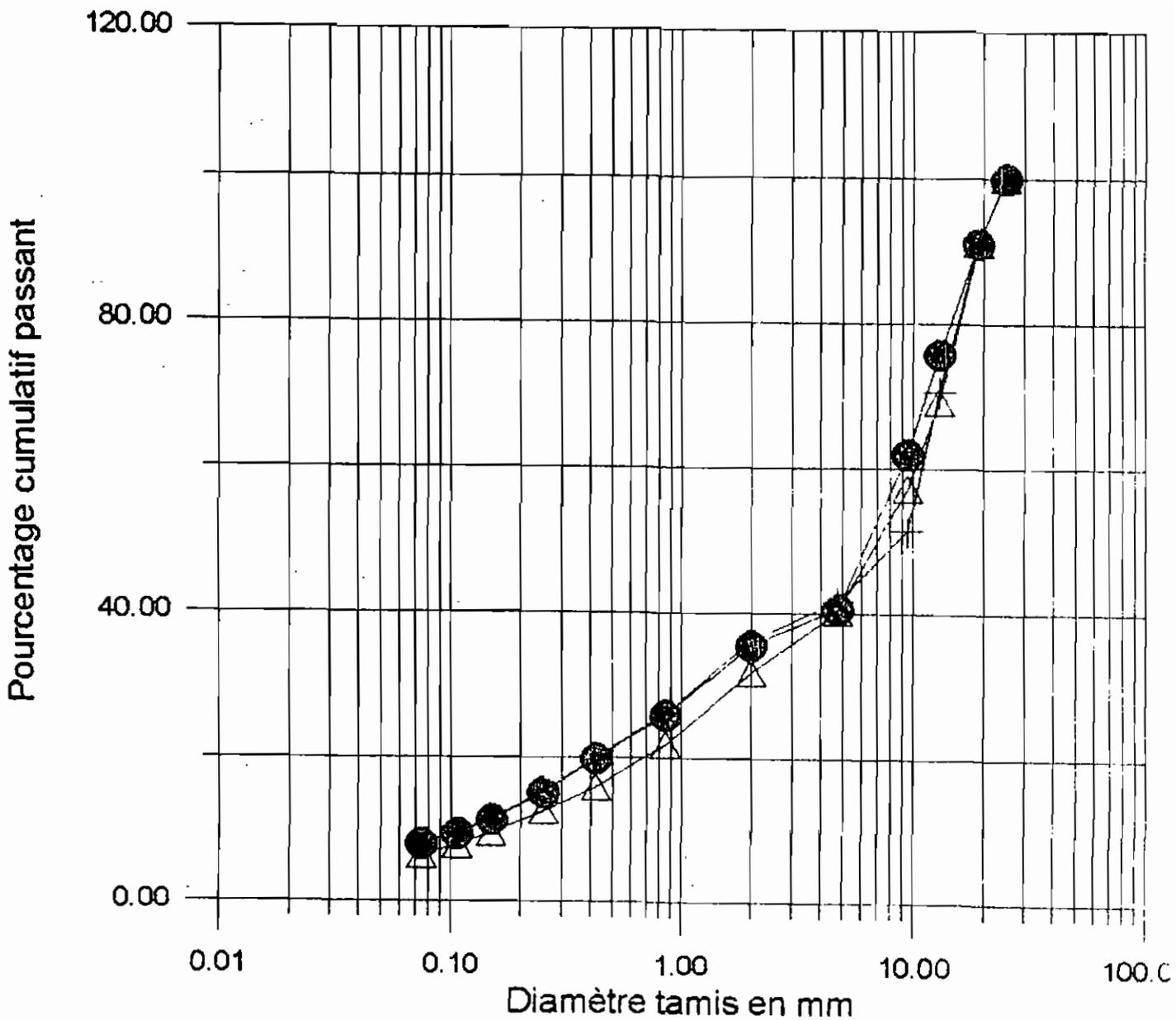
- +— 8/16 basalte
- △— 8/16 + 0/3 basalte
- 8/16 basalte sans filler calcaire



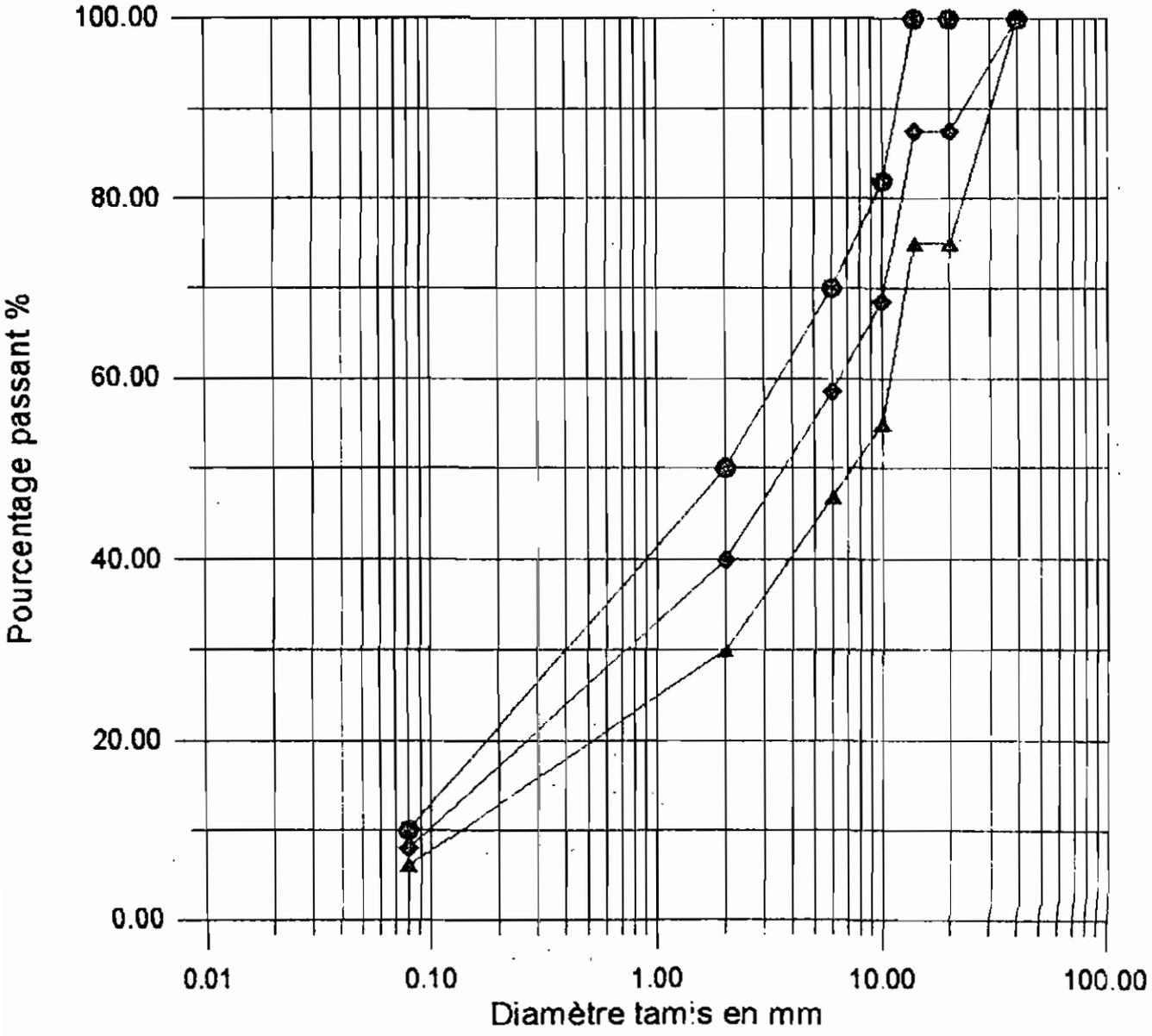
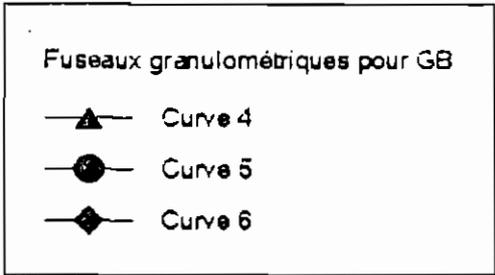
= A4 =

fig A4 : Courbes granulométriques des mélanges de grave-bitume

- +— 3/8 basalte
- △— 16/25 + 3/8 basalte
- 16/25 basalte



= A4 =

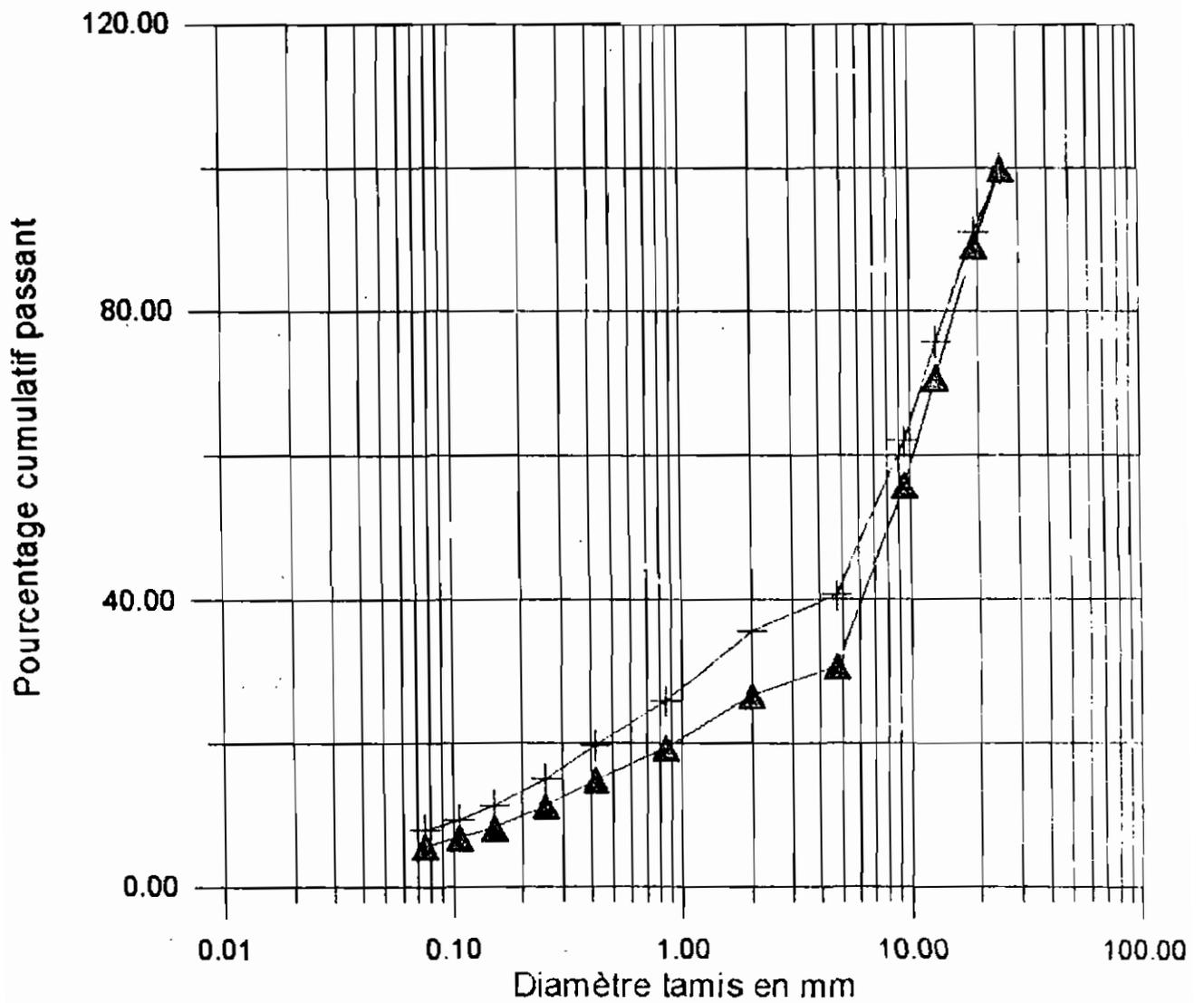


= A4 =

figA4: Courbes granulométriques des mélanges

—+— 15/25

—▲— 10/20



= A4 =

Tableau : Formulation du 8/16 S + 3/8 B

Pourcentage			33%		27%		25%		15%	Passant
Tamis		8/16 S		3/8 B		03 S		filler calc		100%
1" = 25 mm	25	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
1/2" = 13 mm	13	100,00	33,00	94,86	25,61	100,00	25,00	100,00	15,00	98,61
3/8" = 9,5 mm	9,5	78,18	25,80	72,16	19,48	100,00	25,00	100,00	15,00	85,28
4 = 4,75 mm	4,75	2,29	0,76	10,86	2,93	100,00	25,00	99,87	14,98	43,67
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	3,72	1,00	90,25	22,56	87,34	13,10	36,67
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	1,66	0,45	65,19	16,30	64,15	9,62	26,37
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	1,34	0,36	48,78	12,20	50,23	7,53	20,09
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	1,15	0,31	34,50	8,63	42,76	6,41	15,35
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	1,09	0,29	22,92	5,73	36,40	5,46	11,48
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,98	0,26	17,26	4,32	33,18	4,98	9,56
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,66	0,18	12,85	3,21	31,04	4,66	8,85

Fractions	Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s ⁰ %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	87,18
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	66,62
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	31,51
0/3	2	0,075	1,925	1,66	12,73
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	8,29

		100
G	dn > 10 mm	87,18
g	5 < dn < 10 mm	66,52
S	0,315 < dn < 5 mm	31,51
s	0,08 < dn < 0,315	12,73
f	dn < 0,08	8,29

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$P = (2,65/P_{sa}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 3,75$$

1381,16	100 S
13,81	S
1,69	S ^(1/5)
6,22	P

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume

P_{sa} est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

= AS =

Tableau : Formulation du 8/16 B

Pourcentage			33%		27%		25%		15%	Passant
Tamis		8/16B		3/8 S		03 S		filler calc		100%
1" = 25 mm	25	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
1/2" = 13 mm	13	72,00	23,76	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	90,76
3/8" = 9,5 mm	9,5	34,42	11,36	41,65	11,25	100,00	25,00	100,00	15,00	62,60
4 = 4,75 mm	4,75	0,64	0,21	1,05	0,28	100,00	25,00	99,87	14,98	40,48
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	0,00	0,00	90,25	22,56	87,34	13,10	35,66
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	65,19	16,30	64,15	9,62	25,92
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	48,78	12,20	50,23	7,53	19,73
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	34,50	8,63	42,76	6,41	15,04
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	5,73	36,40	5,46	11,19
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26	4,32	33,18	4,98	9,29
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00	12,85	3,21	31,04	4,66	7,87

Fractions	Du	dn	Du-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	66,62
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	54,13
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	29,24
0/3	2	0,075	1,925	1,66	12,47
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	8,10

		100
G	dn > 10 mm	66,62
g	5 < dn < 10 mm	54,13
S	0,315 < dn < 5 mm	29,24
s	0,08 < dn < 0,315	12,47
f	dn < 0,08	8,10

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 3,75$$

$$1339,58 \quad 100 S$$

$$13,40 \quad S$$

$$1,6S \quad S^{(1/5)}$$

$$6,18 \quad p$$

K est le module de richesse et p, le pourcentage de binôme

P_{sa} est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

Tableau : Formulation du 8/12 S + 3/8 B

Pourcentage			33%		27%		25%		15%	Passant
Tamis		8/12 S		3/8 B		03 S		filler calc		100%
1" = 25 mm	25	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/4 " = 19 mm	19	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
1/2 " = 13 mm	13	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	25,00	100,00	15,00	100,00
3/8 " = 9,5 mm	9,5	78,39	25,87	41,65	11,25	100,00	25,00	100,00	15,00	77,11
4 = 4,75 mm	4,75	2,42	0,80	1,05	0,28	100,00	25,00	99,87	14,98	41,06
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	3,72	1,00	90,25	22,56	87,34	13,10	36,67
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	1,66	0,45	65,19	16,30	64,15	9,62	26,37
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	1,34	0,36	48,78	12,20	50,23	7,53	20,09
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	1,15	0,31	34,50	8,63	42,76	6,41	15,35
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	1,09	0,29	22,92	5,73	36,40	5,46	11,48
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,98	0,26	17,26	4,32	33,18	4,98	9,56
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,66	0,18	12,85	3,21	31,04	4,66	8,05

Fractions	Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	87,24
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	66,57
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	31,53
0/3	2	0,075	1,925	1,66	12,73
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	8,29

		100
G	dn > 10 mm	87,24
g	5 < dn < 10 mm	66,57
S	0,315 < dn < 5 mm	31,53
s	0,08 < dn < 0,315	12,73
f	dn < 0,08	8,29

$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S \wedge 0,5) \text{ avec } K = 3,75$$

1381,23	100 S
13,81	S
1,69	S^(1/5)
6,22	p

K est le module de richesse et p, le pourcentage de binôme

P_{sa} est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

Tableau : Formulation du 8/12 S + 3/8 B sans filler calcaire

Pourcentage			33%		27%		40%	Passant
Tamis		8/12 S		3/8 B		0/3 S		100%
1" = 25 mm	25	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	40,00	100,00
3/4" = 19 mm	19	100,00	33,00	100,00	27,00	100,00	40,00	100,00
1/2" = 13 mm	13	100,00	25,87	94,86	25,61	100,00	40,00	91,48
3/8" = 9,5 mm	9,5	78,38	0,80	72,16	19,48	100,00	40,00	60,28
4 = 4,75 mm	4,75	2,42	0,80	10,86	2,93	100,00	40,00	43,73
10 = 2 mm	2	0,00	0,00	3,72	1,00	90,25	36,10	37,10
20 = 0,85 mm	0,85	0,00	0,00	1,66	0,45	65,19	26,08	26,52
40 = 0,42 mm	0,42	0,00	0,00	1,34	0,36	48,78	19,51	19,87
60 = 0,25 mm	0,25	0,00	0,00	1,15	0,31	34,50	13,80	14,11
100 = 0,15 mm	0,15	0,00	0,00	1,09	0,29	22,92	9,17	9,46
140 = 0,106 mm	0,106	0,00	0,00	0,98	0,26	17,26	6,90	7,17
200 = 0,075 mm	0,075	0,00	0,00	0,66	0,18	12,85	5,14	5,32

Fractions	Dn	dn	Dn-dn	Surf. Spéc.	s* %
16/25	19	4,75	14,25	0,61	62,37
8/16	9,5	4,75	4,75	1,06	32,43
3/8	9,5	4,75	4,75	1,06	28,94
0/3	2	0,075	1,925	1,66	10,78
Filler calcaire	4,75	0,075	4,675	1,06	5,72

		100
G	dn > 10 mm	62,37
g	5 < dn < 10 mm	32,43
S	0,315 < dn < 5 mm	28,94
s	0,08 < dn < 0,315	10,78
f	dn < 0,08	5,72

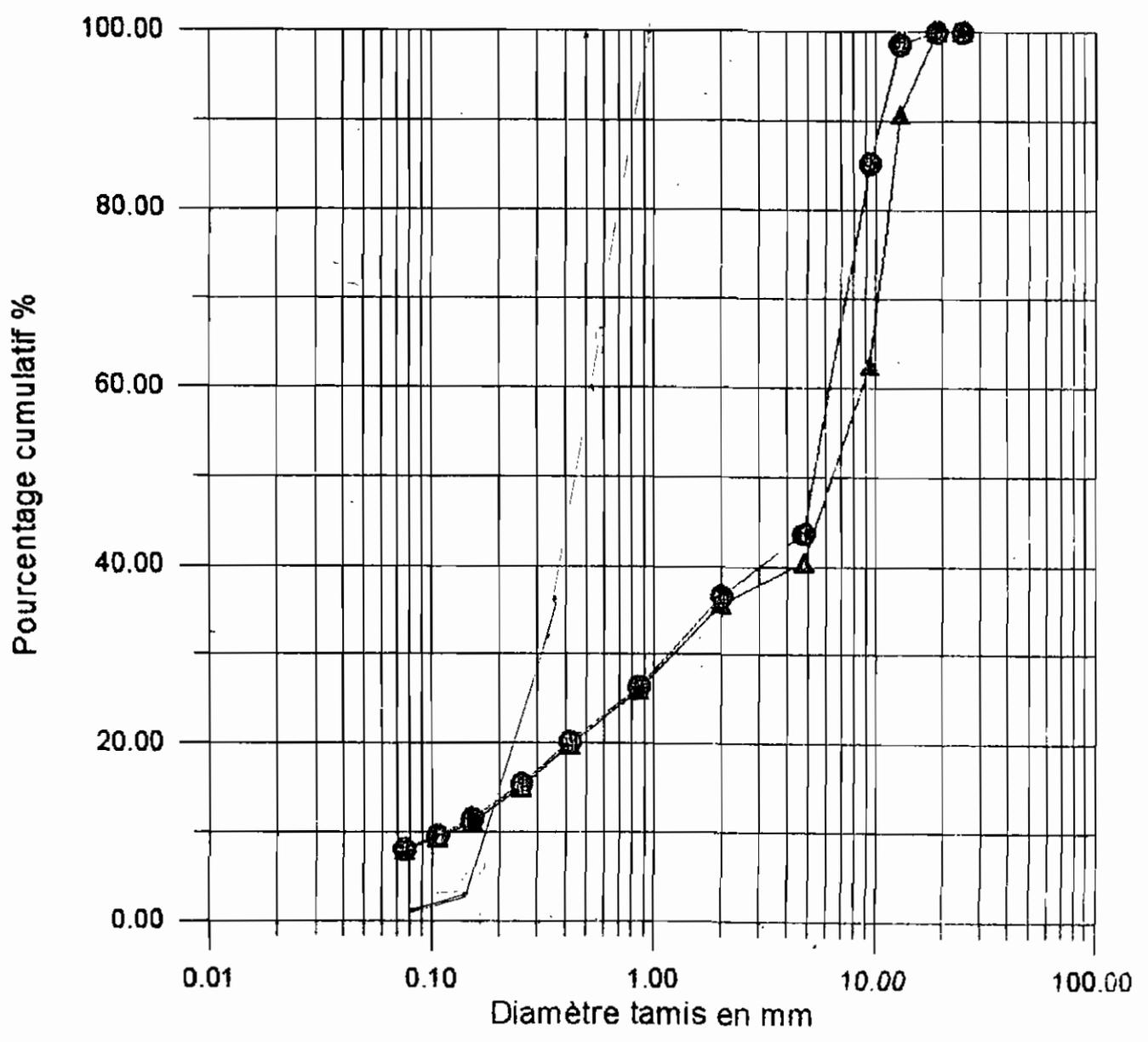
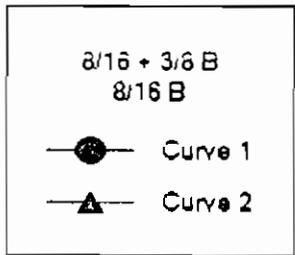
$$100 S = 0,17 \cdot G + 0,33 \cdot g + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f$$

$$p = (2,65 / P_{sa}) \times K \times (S^{(0,5)}) \text{ avec } K = 3,75$$

$$\begin{aligned} & 989,43 && 100 S \\ & 9,89 && S \\ & 1,58 && S^{(1/5)} \\ & 5,82 && p \end{aligned}$$

K est le module de richesse et p, le pourcentage de bitume
Psa est le poids spécifique des agrégats et S, la surface spécifique

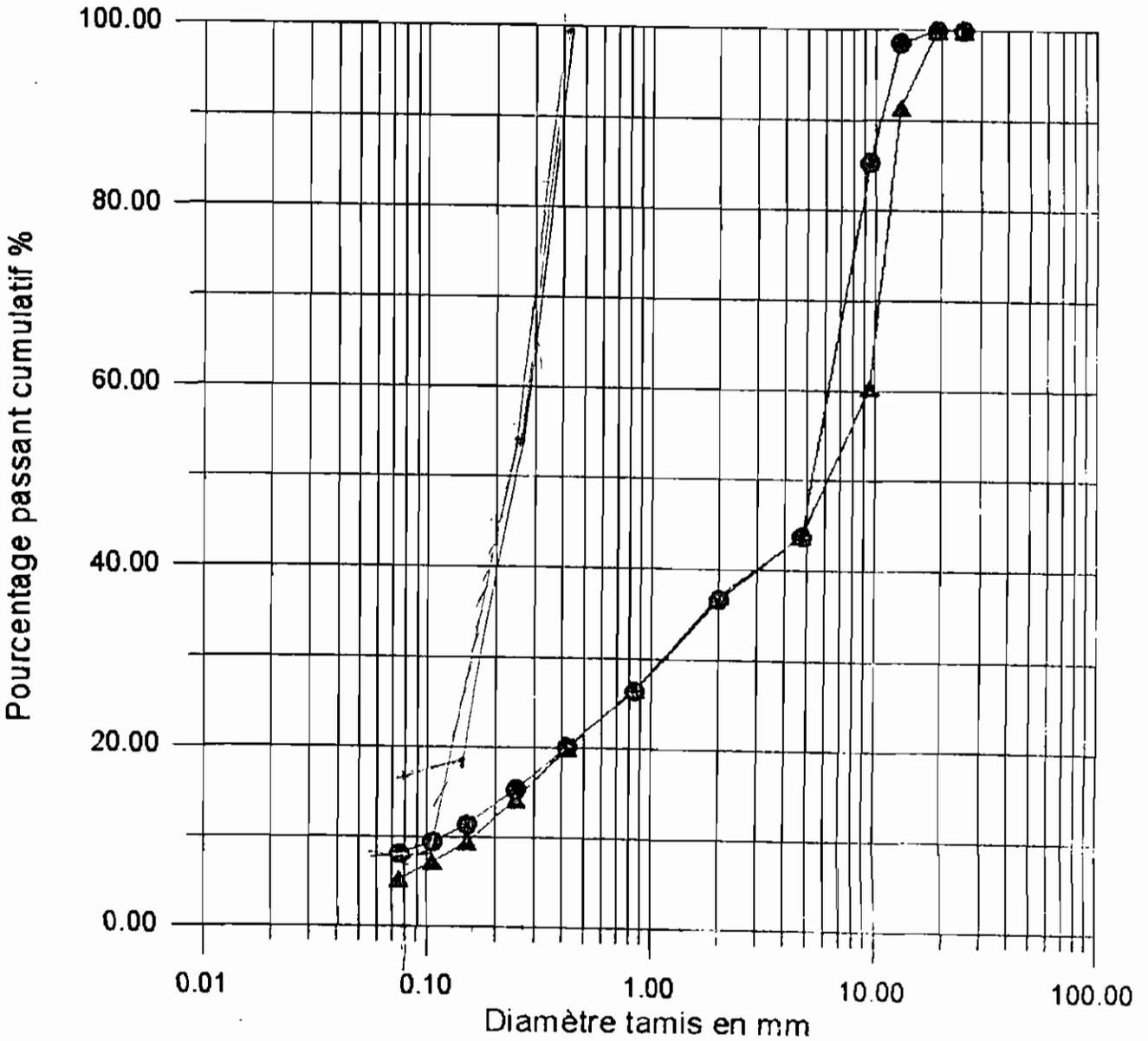
= A5 =



= A 6 =

3/12 + 3/8 B
 ● Curve 1

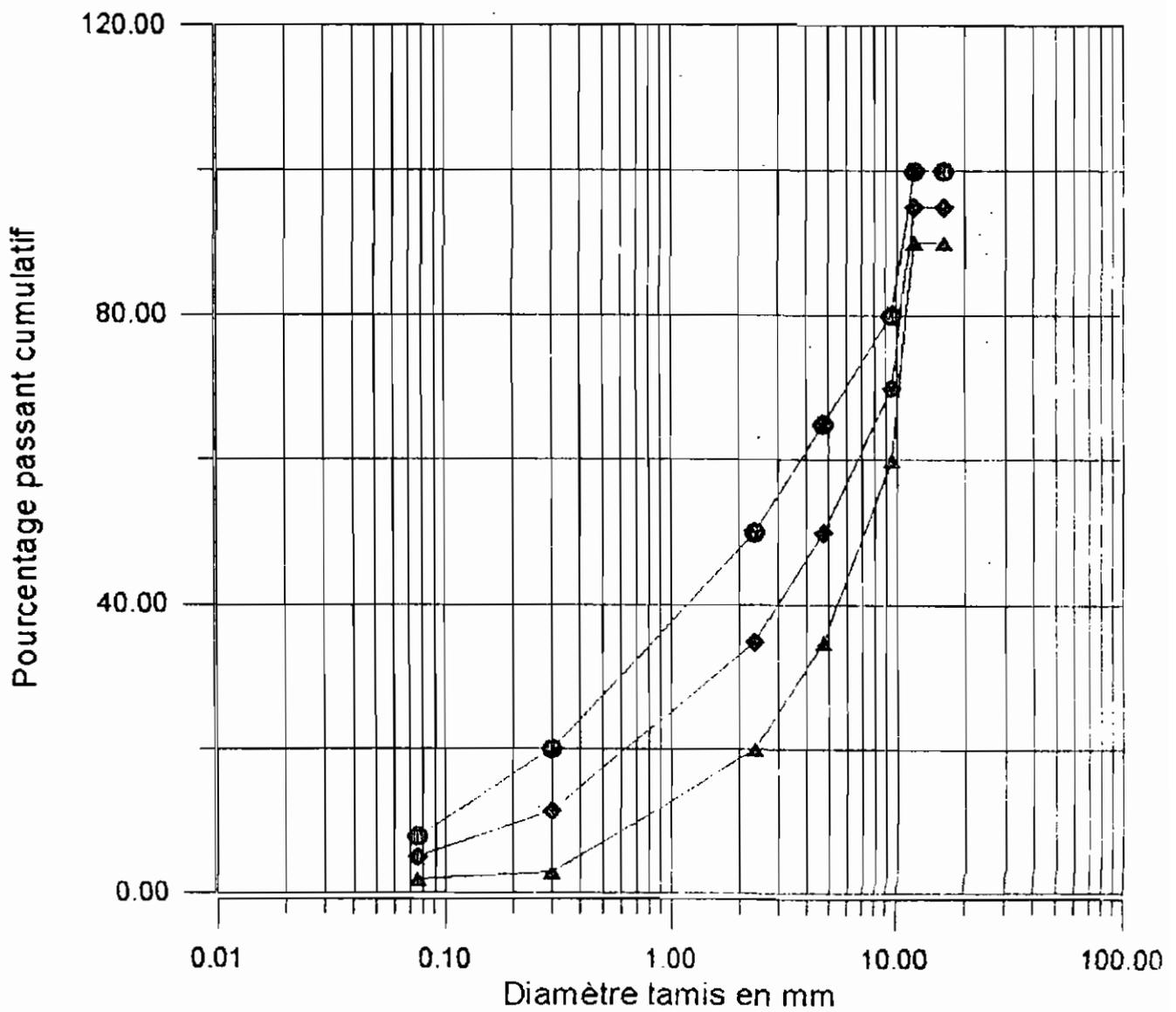
3/12 + 3/8 B sans filler calcaire
 ▲ Curve 2



= A6 =

Fuseaux granulométriques pour BB

- ▲— Curve 1
- Curve 2
- ◆— Curve 3



= A6 =

Tableaux A7 : Densité relative brute des éprouvettes saturées à surface sèche

Identification 8/16 + 0/3 basalte N éprouvette	1	2	3	4	5
1 A Masse dans l'air (g)	979,19	1030,42	1120,95	1155,15	1048,45
2 C Masse dans l'eau (g)	559,55	585,21	643,27	668,50	596,95
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1004,38	1043,54	1151,65	1176,57	1062,02
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,201	2,248	2,206	2,274	2,254
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,198	2,245	2,202	2,270	2,251
Densité relative brute moyenne à 25: Dm			2,233		
Volume mesuré en cm ³	438,51	461,45	501,99	517,31	469,53

Identification 3/8 +16/25 Basalte N éprouvette	1	2	3	4	5
1 A Masse dans l'air (g)	944,97	1141,63	1017,09	1078,08	1126,02
2 C Masse dans l'eau (g)	529,17	661,37	560,98	617,01	650,58
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	960,39	1169,34	1034,69	1104,47	1149,85
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,191	2,247	2,147	2,212	2,255
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,188	2,244	2,144	2,209	2,252
Densité relative brute moyenne à 25: Dm			2,207		
Volume mesuré en cm ³	428,17	517,28	460,85	488,48	510,20

Identification 8/16 basalte 1 N éprouvette	1	2	3
1 A Masse dans l'air (g)	903,25	921,02	908,41
2 C Masse dans l'eau (g)	501,20	511,36	508,62
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	922,14	936,40	928,78
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,146	2,167	2,162
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,143	2,164	2,159
Densité relative brute moyenne à 25: Dm		2,155	
Volume mesuré en cm ³	419,14	427,39	421,54

Identification 8/16 basalte 2 N éprouvette	1	2	3
1 A Masse dans l'air (g)	1005,45	1033,19	1025,35
2 C Masse dans l'eau (g)	568,46	569,89	566,54
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1019,00	1050,25	1048,75
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,232	2,151	2,126
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,229	2,148	2,123
Densité relative brute moyenne à 25: Dm		2,167	
Volume mesuré en cm ³	463,98	476,78	473,17

= A7 =

Identification 16/25 basalte				
N éprouvette	1	2	3	4
1 A Masse dans l'air (g)	1047,53	974,25	964,59	1033,67
2 C Masse dans l'eau (g)	584,58	555,96	544,90	565,64
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1066,54	985,74	980,64	1049,17
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,173	2,267	2,214	2,138
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,170	2,264	2,211	2,135
Densité relative brute moyenne à 25: Dm		2,195		
Volume mesuré en cm ³	477,23	443,85	439,45	470,92

Identification 3/8 basalte 1			
N éprouvette	1	2	3
1 A Masse dans l'air (g)	983,25	992,82	1052,14
2 C Masse dans l'eau (g)	541,58	550,70	584,76
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1002,26	1018,30	1077,34
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,134	2,123	2,136
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,131	2,120	2,133
Densité relative brute moyenne à 25: Dm		2,128	
Volume mesuré en cm ³	462,05	466,55	494,43

Identification 3/8 basalte 2			
N éprouvette	1	2	3
1 A Masse dans l'air (g)	1037,10	950,89	970,70
2 C Masse dans l'eau (g)	566,45	524,68	538,57
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1062,58	972,60	994,83
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,090	2,123	2,128
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,087	2,120	2,125
Densité relative brute moyenne à 25: Dm		2,111	
Volume mesuré en cm ³	491,28	450,45	459,83

Identification R 8/12 Silex + 3/8 basalte					
N éprouvette	1	2	3	4	5
1 A Masse dans l'air (g)	1081,28	1068,94	1192,87	977,12	967,86
2 C Masse dans l'eau (g)	624,60	608,18	682,95	561,98	559,84
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1086,87	1076,30	1198,96	983,34	972,68
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,339	2,283	2,312	2,319	2,344
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,336	2,280	2,308	2,316	2,341
Densité relative brute moyenne à 25: Dm			2,316		
Volume mesuré en cm ³	466,87	461,55	515,06	421,90	417,90

= A7 =

A7

Identification 15/25 Silax					
N éprouvette	1	2	3	4	5
1 A Masse dans l'air (g)	1004,58	974,03	1052,83	974,90	968,93
2 C Masse dans l'eau (g)	556,79	534,06	582,71	542,11	537,20
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1042,67	1004,55	1094,61	1008,45	1003,45
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,068	2,070	2,057	2,091	2,078
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,065	2,067	2,054	2,088	2,075
Densité relative brute moyenne à 25: Dm			2,070		
Volume mesuré en cm ³	485,07	470,32	508,37	470,74	467,86

Identification 10/20			
N éprouvette	1	2	3
1 A Masse dans l'air (g)	845,48	1011,00	1063,62
2 C Masse dans l'eau (g)	465,36	552,38	596,16
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	868,68	1041,98	1098,55
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,096	2,065	2,117
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,093	2,062	2,114
Densité relative brute moyenne à 25: Dm		2,090	
Volume mesuré en cm ³	404,54	483,73	508,91

= A7 =

Tableaux : Densité relative brute des éprouvettes saturées à surface sèche

Identification R 8/16 Silex Dope	5	6	7	8	9
Masse dans l'air	1087,16	1137,63	1104,61	1116,91	1096,99
Masse dans l'eau	621,3	654,57	637,72	633,76	635,64
Masse dans l'air hum	1113,77	1155,71	1117,84	1133,13	1111,55
	571,62	604,89	588,04	584,1	585,96
$Db=A/(B-C)$	2,01	2,07	2,08	2,03	2,09
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,00	2,06	2,08	2,03	2,08
Dm			2,05		
Volume en cm3	529,78	554,33	538,29	543,79	534,54

Identification R 8/16 Silex Dope	1	2	3	4
Masse dans l'air	1076,94	1048,99	1039,52	1275
Masse dans l'eau	616,7	609,44	605,66	723,99
Masse dans l'air hum	1097,92	1071,03	1052,49	1298
	567,02	559,76	555,98	674,31
$Db=A/(B-C)$	2,03	2,05	2,09	2,04
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,03	2,05	2,09	2,04
Dm			2,06	
Volume en cm3	525,04	511,42	506,31	621,60

Identification R 8/12 Silex Dope	5	6	7	8	9	12
Masse dans l'air	1023,64	1178,55	986,14	1025,22	1149,84	975,74
Masse dans l'eau	597,51	676,11	566,99	589,09	640	559,96
Masse dans l'air hum	1039,73	1189,99	1005,46	1042,87	1170,25	1007,94
	547,83	626,43	517,31	539,41	590,32	510,28
$Db=A/(B-C)$	2,08	2,09	2,02	2,04	1,98	1,96
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,08	2,08	2,02	2,03	1,98	1,96
Dm			2,03			
Volume en cm3	505,44	580,94	486,93	506,22	567,75	481,79

Identification 15/25 Dope	5	6	7	8	9
Masse dans l'air	1028,32	1208	1060,24	1210	1128,67
Masse dans l'eau	586,09	695,27	647,46	703,22	685,37
Masse dans l'air hum	1050,51	1238	1074,89	1240	1165
	536,41	645,59	597,78	653,54	635,63
$Db=A/(B-C)$	2,00	2,04	2,22	2,06	2,13
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,00	2,04	2,22	2,06	2,13
Dm			2,09		
Volume en cm3	492,38	578,41	507,66	579,37	540,43

Identification R 8/12 Silex					
N éprouvette	1	2	3	4	5
1 A Masse dans l'air (g)	900,98	916,30	1010,57	1013,90	912,44
2 C Masse dans l'eau (g)	491,91	502,82	548,95	554,23	489,88
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	910,88	922,66	1020,70	1024,20	926,04
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,150	2,182	2,142	2,157	2,092
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,147	2,179	2,139	2,154	2,089
Densité relative brute moyenne à 25: Dm			2,142		
Volume mesuré en cm ³	420,63	427,78	471,79	473,34	425,98

Identification R 8/16 Silex					
N éprouvette	1	2	3	4	5
1 A Masse dans l'air (g)	1109,39	866,37	951,55	1046,62	958,73
2 C Masse dans l'eau (g)	598,18	463,58	511,69	561,62	520,71
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1120,00	878,37	967,61	1062,31	975,91
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,126	2,089	2,087	2,090	2,106
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,123	2,086	2,084	2,087	2,103
Densité relative brute moyenne à 25: Dm			2,097		
	529,04	413,15	453,77	499,10	457,19

Identification R 8/16 Basalte					
N éprouvette	1	2	3	4	5
1 A Masse dans l'air (g)	1092,92	1103,69	1157,76	1063,15	1069,82
2 C Masse dans l'eau (g)	625,12	612,31	666,35	607,30	609,84
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	1100,93	1115,37	1165,09	1069,06	1077,77
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,297	2,194	2,321	2,302	2,286
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,294	2,191	2,318	2,299	2,283
Densité relative brute moyenne à 25: Dm			2,277		
Volume mesuré en cm ³	479,98	484,71	508,46	466,91	469,34

Identification R 3/8 basalte 8/16 silex					
N éprouvette	1	2	3	4	5
1 A Masse dans l'air (g)	981,48	1045,90	934,88	956,68	1125,24
2 C Masse dans l'eau (g)	558,89	596,93	529,46	546,65	639,04
3 B Masse dans l'air (éprouvette sa	988,71	1051,52	940,50	960,85	1130,93
Densité relative brute à TC $Db=A/(B-$	2,283	2,301	2,274	2,310	2,288
$k = Dw / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C = Db à TC	2,280	2,298	2,271	2,306	2,284
Densité relative brute moyenne à 25: Dm			2,288		
Volume mesuré en cm ³	428,97	457,12	408,60	418,13	491,80

= A7 =

Densité relative brute des éprouvettes saturées à surface sèche

Identification R 8/12 Silex Dope	1	2	3	4	10	11
Masse dans l'air	1098,27	1033,67	1020,74	1184,52	943,6	1020,76
Masse dans l'eau	643,74	610,48	599,82	673,97	540,99	578,24
Masse dans l'air hum	1112,37	1043,34	1033,24	1205	968,15	1045,21
	594,06	560,8	550,14	624,29	491,31	528,56
$Db=A/(B-C)$	2,12	2,14	2,11	2,04	1,98	1,98
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,12	2,14	2,11	2,04	1,98	1,97
Dm			2,06			
Volume en cm ³	533,53	502,15	495,87	575,43	458,39	495,68

Identification 15/25 Dope	1	2	3	4
Masse dans l'air	1118,26	1080,74	1130,68	1110,55
Masse dans l'eau	628,15	617,84	660,16	641,4
Masse dans l'air hum	1146,11	1111,64	1169,36	1143,69
	578,47	558,16	610,48	591,72
$Db=A/(B-C)$	1,97	1,99	2,02	2,01
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	1,97	1,99	2,02	2,01
Dm			2,00	
Volume en cm ³	560,36	541,56	566,59	566,50

Identification R 8/12 + 3/8 basalte Dope	5	6	7	8	9
Masse dans l'air	1236	977,08	1107,07	1242	1103,11
Masse dans l'eau	743,99	591,52	676,1	754,66	666,83
Masse dans l'air hum	1254	991,1	1121,44	1258	1111,05
	694,31	541,84	626,42	704,36	617,15
$Db=A/(B-C)$	2,21	2,17	2,24	2,25	2,23
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,21	2,17	2,23	2,24	2,23
Dm			2,22		
Volume en cm ³	557,60	440,79	499,43	560,30	497,55

Identification R 8/12 + 3/8 basalte Dope	1	2	3	4
Masse dans l'air	1088,94	1260	1165,2	1160,51
Masse dans l'eau	671,7	769,2	719,07	704,54
Masse dans l'air hum	1094,93	1267	1172,55	1178,59
	622,02	719,52	669,39	654,36
$Db=A/(B-C)$	2,30	2,30	2,32	2,22
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,30	2,30	2,31	2,21
Dm			2,28	
Volume en cm ³	477,46	552,46	510,89	508,84

= A7 =

Identification 8/16 basalte Dope	5	6	7	8	9
Masse dans l'air	1095,9	1138,6	1084,83	1115,54	1144,34
Masse dans l'eau	635,53	667,12	628,09	660,4	679,71
Masse dans l'air hum	1104,7	1157,09	1103,77	1146,34	1176,02
	585,85	617,44	578,41	610,72	630,03
$Db=A/(B-C)$	2,11	2,11	2,06	2,08	2,10
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,11	2,11	2,06	2,08	2,09
Dm			2,09		
Volume en cm ³	524,31	544,74	519,02	533,71	547,49

Identification 8/16 basalte Dope	1	2	3	4
Masse dans l'air	1118,52	1084,58	1115,57	1315
Masse dans l'eau	660,73	651,26	645,09	768,24
Masse dans l'air hum	1154	1113,31	1148,17	1352
	611,05	601,58	595,41	718,56
$Db=A/(B-C)$	2,06	2,12	2,02	2,08
$k=Dw/0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859	0,99859
$Db \times k$	2,06	2,12	2,02	2,07
Dm			2,07	
Volume en cm ³	541,53	525,09	540,10	638,65

15/25 Silix mouillé			
N éprouvette	5	6	7
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	61,5	63,9	63,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	61,5	64	61,4
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	60	62	62,4
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	61,00	63,30	62,43
Volume calculé en cm ³ Vc	494,55	513,19	506,17
Volume mesuré en cm ³ Vm	483,30	498,75	495,55
Vc - Vm	11,25	14,44	10,62
Facteur de correction A	1,09	1,02	1,04
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	23,00	20,00	30,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			24 0,61
Lecture du comparateur	100,00	126,00	137,00
Force en lbf	1050,00	1350,00	1480,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	4670,63	6005,10	6583,37
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	5090,99	6125,20	6846,70
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			6020,97

8/16 Basalte				
N éprouvette	1	2	3	4
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	73	67,4	64,2	83,2
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	70,8	63,8	70,2	78
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	65	63	71,6	81
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	69,93	65,40	69,67	82,07
Volume calculé en cm ³ Vc	566,97	530,22	564,81	665,34
Volume mesuré en cm ³ Vm	541,53	525,09	540,10	686,65
Vc - Vm	25,45	5,13	24,71	-21,31
Facteur de correction A	0,90	0,96	0,90	0,76
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	35,00	30,00	23,00	40,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			32,00 0,80	
Lecture du comparateur	150,00	189,00	155,00	164,00
Force en lbf	1650,00	2100,00	1700,00	1810,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	7339,57	9341,27	7561,98	8251,28
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	6566,91	8967,62	6805,78	6118,97
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				7115,32

3/8 Basalte mouillé			
N éprouvette	5	6	7
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	61	57,7	55,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	64,2	55	55,6
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	60,5	57,5	55,8
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	61,90	56,73	55,63
Volume calculé en cm ³ Vc	501,84	459,96	451,04
Volume mesuré en cm ³ Vm	498,13	418,86	447,46
Vc - Vm	3,72	41,10	3,58
Facteur de correction A	1,04	1,33	1,25
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	30,00	26,00	28,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			28,00 0,7
Lecture du comparateur	113,00	92,00	100,00
Force en lbf	1210,00	960,00	1050,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	5382,35	4270,29	4670,63
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	5597,64	5679,49	5838,29
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			5705,14

8/16 + 0/3 Basalte mouillé				
N éprouvette	5	6	7	8
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	72,5	69	62	56,1
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	71,5	67,2	63	59,4
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	71	69	60,6	59,8
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	71,67	68,40	61,87	59,10
Volume calculé en cm ³ Vc	581,03	554,54	501,57	479,14
Volume mesuré en cm ³ Vm	628,79	587,07	526,20	531,29
Vc - Vm	-47,76	-32,53	-24,63	-52,15
Facteur de correction A	0,80	0,66	1,00	1,11
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	25,00	60,00	28,00	30,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			36 0,89	
Lecture du comparateur	119,00	116,00	100,00	113,00
Force en lbf	1300,00	1250,00	1050,00	1212,50
Force en N (lbf x 4,448222) B	5782,69	5560,26	4670,63	5393,47
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	4597,24	4781,64	4670,63	5959,78
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			5002,37	

= A8 =

R 8/16 Basalte				
N éprouvette	5	6	7	8
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	69	57	59,5	59,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	70	57	58,5	61
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	73	57	58,5	61
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	70,67	57,00	58,83	60,50
Volume calculé en cm ³ Vc	572,92	462,12	476,98	490,49
Volume mesuré en cm ³ Vm	546,43	447,25	459,06	464,74
Vc - Vm	26,49	14,87	17,92	25,75
Facteur de correction A	0,90	1,22	1,17	1,14
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	20,00	22,00	22,00	25,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			22	
			0,56	
Lecture du comparateur	168,00	185,00	189,00	135,00
Force en lbf	1850,00	2050,00	2100,00	1460,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	8229,21	9118,86	9341,27	6494,40
Stabilité Marshall corrigée en N (E x A)	7365,14	11125,00	10882,58	7403,62
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			9194,09	

16/25 Basalte mouillé			
N éprouvette	5	6	7
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	66,2	62,8	54,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	65,1	63,5	55
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	66	63,5	56
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	65,77	63,27	55,17
Volume calculé en cm ³ Vc	533,19	512,92	447,25
Volume mesuré en cm ³ Vm	480,85	460,93	403,09
Vc - Vm	52,34	51,99	44,17
Facteur de correction A	1,05	1,10	1,25
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	53,00	50,00	50,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			51
			1,28
Lecture du comparateur	119,00	139,00	134,00
Force en lbf	1300,00	1500,00	1450,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	5782,69	6672,33	6449,92
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	6071,82	7306,20	8062,40
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			7146,81

16/25 + 3/8 Basalte mouillé					
N éprouvette	1	2	3	4	5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	61,5	64	63,8	60,75	59,3
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	61,2	66,5	63	60,7	58,7
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	62	65	64	60,55	59,5
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	61,57	65,17	63,60	60,67	59,17
Volume calculé en cm ³ Vc	499,14	526,33	515,63	491,85	479,68
Volume mesuré en cm ³ Vm	532,40	534,91	543,87	584,06	554,53
Vc - Vm	-33,26	-6,58	-28,24	-92,21	-74,85
Facteur de correction A	1,00	0,96	0,97	0,93	0,99
Indice de fluage en unités de 0,25 mm.	29,00	32,00	30,00	15,00	10,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm.				5	
				0,12	
Lecture du comparateur	112,00	92,00	128,00	147,00	143,00
Force en lbf	1200,00	960,00	1400,00	1600,00	1550,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	5337,87	4270,29	6227,51	7117,16	6894,74
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	5337,87	4099,48	6009,55	6583,37	6791,32
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			5764,32		

= A8 =

R 8/16 Silix + 3/8 Basalte				
N éprouvette	1	2	3	4
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 1	62	55	55	58
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 2	62	55	54,5	57
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 3	62	54,5	55	57,5
Epaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	62,00	54,83	54,83	57,50
Volume calculé en cm ³ Vc	502,65	444,55	444,55	466,17
Volume mesuré en cm ³ Vm	490,46	429,37	436,26	451,49
Vc - Vm	12,19	15,19	8,29	14,69
Facteur de correction A	1,07	1,29	1,29	1,22
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	22,00	16,00	22,00	20,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			20,00	
			0,50	
Lecture du comparateur	106,50	134,00	143,00	100,00
Force en lbf	1132,00	1450,00	1550,00	1050,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	5035,39	6449,92	6894,74	4670,63
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	5362,69	8288,15	8859,75	5698,17
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				7052,19

R 8/12 Silix				
N éprouvette	5	6	7	8
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 1	56	66	54,5	49,5
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 2	56	65,5	54,5	50
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 3	56,5	65,8	55,5	50
Epaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	56,17	65,77	54,83	49,83
Volume calculé en cm ³ Vc	455,36	533,19	444,55	404,02
Volume mesuré en cm ³ Vm	460,20	542,82	457,96	417,90
Vc - Vm	-4,83	-9,62	-13,40	-13,88
Facteur de correction A	1,17	0,95	1,17	1,52
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	20,00	23,00	21,00	35,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			25	
			0,62	
Lecture du comparateur	119,00	158,00	126,00	104,00
Force en lbf	1300,00	1750,00	1350,00	1100,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	5762,69	7784,39	6005,10	4893,04
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	6736,83	7356,25	6995,94	7412,96
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				7125,50

R 8/12 Silix + 3/8 Basalte				
N éprouvette	5	6	7	8
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 1	53	66,5	57	57,5
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 2	58,5	63	57	58
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 3	59,5	67,5	57,5	57,5
Epaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	57,00	65,67	57,17	57,67
Volume calculé en cm ³ Vc	462,12	532,38	463,47	467,52
Volume mesuré en cm ³ Vm	446,28	527,11	459,99	467,12
Vc - Vm	15,84	5,27	3,48	0,40
Facteur de correction A	1,22	0,96	1,19	1,19
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	20,00	22,00	25,00	45,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			28,00	
			0,7	
Lecture du comparateur	143,00	158,00	155,00	126,00
Force en lbf	1550,00	1750,00	1700,00	1350,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	6894,74	7784,39	7561,98	6005,10
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	8411,59	7473,01	8996,75	7146,07
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				8007,36

R 8/16 Silix				
N éprouvette	5	6	7	8
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 1	61	61	58,5	53
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 2	58	62	58,5	53,3
Epaisseur de l'éprouvette (mm) 3	57,5	61,5	59	53,2
Epaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	58,83	61,50	58,67	53,17
Volume calculé en cm ³ Vc	476,98	498,60	475,63	431,04
Volume mesuré en cm ³ Vm	451,27	485,34	482,05	434,24
Vc - Vm	25,71	9,26	-6,42	-3,20
Facteur de correction A	1,20	1,04	1,09	1,32
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	19,00	23,00	25,00	20,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			22	
			0,54	
Lecture du comparateur	114,00	158,00	155,00	100,00
Force en lbf	1225,00	1750,00	1700,00	1050,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	5449,07	7784,39	7561,98	4670,63
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	6511,64	8095,76	8242,56	6165,24
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				7253,60

Identification		R 8/16 Silix + 3/8 Basalte BB				
N éprouvette		1	2	3	4	5
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	1	53,6	57,2	50,9	51,5	61,3
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	2	54,0	56,5	51,1	51,3	62,2
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	3	54,2	57,0	50,5	51,9	61,1
Epaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)		53,9	56,9	50,8	51,6	61,5
Volume calculé (cm ³)		437,1	461,0	412,1	418,1	498,7
Volume mesuré (cm ³)		428,97	457,12	408,60	418,13	491,80
Facteur de correction	A	1,32	1,19	1,47	1,47	1,09
		8,15	3,92	3,52	-0,06	6,94
		1,86	0,85	0,85	-0,01	1,39
Indice de fluage en unités de 0,25 mm		68,0	65,0	32,0	50,0	60,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm				55		
				1,38		
Charge maximale observée (à la rupture)						
Lecture du compareur		185,0	124,5	105,0	148,0	124,0
Force en lbf		2050,0	1339,3	1112,5	1616,7	1335,7
Force en N (lbf x 4,448222)	B	9118,9	5957,5	4948,6	7191,4	5941,5
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)		12036,9	7099,4	7274,5	10571,4	6476,2
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				8690		

Identification		10/20 Silix GB		
N éprouvette		1	2	3
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	1	52,5	64,8	73,8
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	2	52,8	64,5	73,8
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	3	52,2	64,6	74,2
Epaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)		52,5	64,6	73,9
Volume calculé (cm ³)		425,6	524,0	599,4
Volume mesuré (cm ³)		404,54	483,73	508,91
Facteur de correction	A	1,47	1,04	0,89
		21,10	40,27	90,49
		4,96	7,69	15,10
Indice de fluage en unités de 0,25 mm		6,0	30,0	36,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			24	
			0,60	
Charge maximale observée (à la rupture)				
Lecture du compareur		60,0	78,0	85,0
Force en lbf		620,0	812,0	880,0
Force en N (lbf x 4,448222)	B	2757,9	3612,0	3914,4
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)		4054,1	3756,4	3483,5
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			3765	
Durée de l'essai en s				

Identification		3/8 + 15/25 Basalte GB				
N éprouvette		1	2	3	4	5
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	1	52,8	61,8	60,8	61,5	63,2
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	2	53,8	62,0	61,8	62,0	65,5
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	3	52,0	61,0	61,0	61,5	64,0
Epaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)		52,9	61,6	60,9	61,7	64,2
Volume calculé (cm ³)		428,6	499,4	493,5	500,0	520,8
Volume mesuré (cm ³)		428,17	517,26	460,85	488,48	510,20
Facteur de correction	A	1,39	1,04	1,14	1,04	1,00
		0,44	-17,87	32,62	11,47	10,56
		0,10	-3,58	6,61	2,29	2,03
Indice de fluage en unités de 0,25 mm		28,0	17,0	10,0	23,0	50,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm				0,64		
Charge maximale observée (à la rupture)						
Lecture du compareur		138,0	97,5	69,5	109,0	174,0
Force en lbf		1490,0	1025,0	725,0	1162,5	1925,0
Force en N (lbf x 4,448222)	B	6627,9	4559,4	3225,0	5171,1	8562,8
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)		9212,7	4741,6	3670,5	5377,8	8562,8
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				6314		

Identification		15/25 Silix GB				
N éprouvette		1	2	3	4	5
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	1	62,0	61,5	66,0	58,0	60,0
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	2	62,5	60,0	66,0	58,0	60,5
Epaisseur de l'éprouvette (mm)	3	62,8	60,8	66,0	58,0	60,8
Epaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)		62,4	60,8	66,0	58,0	60,4
Volume calculé (cm ³)		506,2	492,7	535,1	470,2	490,0
Volume mesuré (cm ³)		485,07	470,32	508,37	470,74	467,86
Facteur de correction	A	1,09	1,14	1,06	1,18	1,14
		21,10	22,34	26,77	-0,51	22,09
		4,17	4,53	4,99	-0,11	4,51
Indice de fluage en unités de 0,25 mm		28,0	35,0	35,0	31,0	31,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm				32		
				0,63		
Charge maximale observée (à la rupture)						
Lecture du compareur		187,5	135,0	115,0	155,0	105,0
Force en lbf		2081,3	1460,0	1237,5	1700,0	1112,5
Force en N (lbf x 4,448222)	B	9257,9	6494,4	5504,7	7562,0	4948,6
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)		10091,1	7403,6	5504,7	8923,1	5541,5
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				7513		

= A9,5

Tableau : Résultats des essais MARSHALL

Identification	8/16 + 0/3 Basalte GB				
	1	2	3	4	5
N éprouvette					
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	59,8	58,3	68,5	59,0	58,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	59,5	58,5	68,0	59,2	58,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	59,0	58,5	68,5	59,5	59,5
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	59,4	58,4	68,3	59,2	58,7
Volume calculé (cm ³)	481,8	473,7	554,0	480,2	475,6
Volume mesuré (cm ³)	438,51	461,45	501,99	517,31	469,53
Facteur de correction A	1,14	1,14	0,89	1,14	1,14
	43,34	12,29	52,01	-37,09	6,10
	8,99	2,59	9,39	-7,72	1,28
Indice de fluage (unités de 0,25 mm)	12,0	29,0	22,0	25,0	30,0
Fluage moyen (unités de 0,25 mm)			24		
			0,59		
Charge maximale observée (à la rupture)					
Lecture du comparateur	86,0	110,0	89,0	102,5	100,0
Force en lbf	900,0	1175,0	940,0	1081,3	1050,0
Force en N (lbf x 4,448222) B	4003,4	5226,7	4181,3	4809,6	4670,6
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	4563,9	5958,4	3721,4	5483,0	5324,5
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			5010		

Identification	16/25 Basalte GB			
	1	2	3	4
N éprouvette				
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	62,0	54,5	56,0	61,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	61,8	55,0	56,0	61,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	63,0	57,0	56,0	61,4
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	62,3	55,5	56,0	61,1
Volume calculé (cm ³)	504,8	450,0	454,0	495,6
Volume mesuré (cm ³)	477,23	443,85	439,45	470,92
Facteur de correction A	1,04	1,25	1,25	1,19
	27,59	6,11	14,56	24,71
	5,46	1,36	3,21	4,99
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	25,0	31,0	32,0	40,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			32	
			0,80	
Charge maximale observée (à la rupture)				
Lecture du comparateur	130,0	134,0	124,0	150,0
Force en lbf	1420,0	1450,0	1330,0	1650,0
Force en N (lbf x 4,448222) B	6316,5	6449,9	5916,1	7339,6
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	6569,1	8062,4	7395,2	8734,1
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			7690	

N éprouvette	8/16 Basalte GB				
	5	6	7	8	9
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	62,8	65,4	67,2	69	66,9
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	62,6	64	68	66,2	63,4
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	65,6	71,2	67,2	69,2	66,2
Épaisseur moy de l'éprouvette (mm)	65,33	68,87	69,80	70,80	68,50
Volume calculé en cm ³ Vc	529,68	558,33	565,89	574,00	555,35
Volume mesure en cm ³ Vm	524,31	544,74	547,49	533,71	519,02
Vc - Vm	5,37	13,59	18,41	40,29	36,34
Facteur de correction A	1,00	0,91	0,91	0,90	1,00
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	25,00	25,00	26,00	25,00	25,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			25		
			0,63		
Lecture du comparateur	159,00	189,00	168,00	163,00	155,00
Force en lbf	1760,00	2100,00	1850,00	1800,00	1700,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	7828,87	9341,27	8229,21	8006,80	7561,98
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	7828,87	8500,55	8229,21	7166,09	6861,40
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			7721,22		

Identification	3/8 Basalte GB				
	1	2	3	1	2
N éprouvette					
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	58,2	60,8	64,4	66,5	58,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	58,2	60,4	64,5	66,2	58,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	59,5	59,8	63,5	65,5	59,5
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	58,6	60,3	64,1	66,1	58,7
Volume calculé (cm ³)	475,4	489,1	520,0	535,6	475,6
Volume mesuré (cm ³)	462,05	466,55	494,43	491,28	450,4
Facteur de correction A	1,14	1,09	1,00	0,95	1,14
	13,31	22,59	25,52	44,34	25,18
	2,80	4,62	4,91	8,28	5,29
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	25,0	28,0	16,0	35,0	18,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm		23			26
		0,58			0,65
Charge maximale observée (à la rupture)					
Lecture du comparateur	127,0	115,0	133,0	114,0	100,0
Force en lbf	1375,0	1237,5	1441,7	1225,0	1050,0
Force en N (lbf x 4,448222) B	6116,3	5504,7	6413,0	5449,1	4670,6
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	6972,6	6000,1	6413,0	5149,4	5324,5
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			5815		

=A9=

Identification N éprouvette	Silix R 8/12 BB				
	1	2	3	4	5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	52,3	53,2	59,0	59,0	55,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	54,8	53,2	59,5	59,0	54,8
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	55,0	53,0	61,0	60,0	55,0
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	54,0	53,1	59,8	59,3	55,1
Volume calculé (cm ³)	438,1	430,8	485,1	481,0	446,7
Volume mesuré (cm ³)	420,63	427,78	471,79	473,34	425,98
Facteur de correction A	1,39	1,39	1,14	1,14	1,32
	17,44	2,99	13,30	7,70	20,73
	3,98	0,69	2,74	1,60	4,64
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	27,0	32,0	28,0	35,0	41,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			33		
			0,82		
Charge maximale observée (à la rupture)					
Lecture du comparateur	105,0	130,0	134,0	124,0	163,0
Force en lbf	1112,5	1416,7	1450,0	1335,7	1800,0
Force en N (lbf x 4,448222) B	4948,6	6301,8	6449,9	5941,5	8006,8
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	6978,6	8759,5	7352,9	6773,3	10569,0
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			8067		

Durée de l'essai en s

Identification N éprouvette	R 8/12 Silix + 3/8 Basalte BB				
	1	2	3	4	5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	58,5	61,0	65,0	54,0	52,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	58,5	59,0	65,5	52,8	53,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	58,0	60,0	64,5	53,0	52,3
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	58,3	60,0	65,0	53,3	52,6
Volume calculé (cm ³)	472,9	486,4	527,0	431,9	426,4
Volume mesuré (cm ³)	466,87	461,55	515,06	421,90	417,90
Facteur de correction A	1,19	1,14	1,00	1,39	1,39
	6,06	24,89	11,92	9,95	8,55
	1,28	5,12	2,26	2,30	2,00
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	42,0	31,0	60,0	24,0	28,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			37		
			0,93		
Charge maximale observée (à la rupture)					
Lecture du comparateur	195,0	162,0	250,0	152,0	156,0
Force en lbf	2166,7	1790,0	2800,0	1670,0	1716,7
Force en N (lbf x 4,448222) B	9638,0	7962,3	12455,0	7426,5	7636,3
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	11469,2	9077,0	12455,0	10325,7	10614,7
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			10788		

Identification N éprouvette	R 8/16 Silix BB				
	1	2	3	4	5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	65,5	52,0	57,0	62,0	56,8
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	64,8	52,0	57,8	63,0	57,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	66,0	52,0	56,5	62,0	57,0
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	65,4	52,0	57,1	62,3	56,5
Volume calculé (cm ³)	530,5	421,6	462,9	505,4	461,6
Volume mesuré (cm ³)	529,04	413,15	453,77	499,10	457,19
Facteur de correction A	0,96	1,47	1,19	1,04	1,19
	1,45	8,43	9,16	6,26	4,39
	0,27	2,00	1,98	1,24	0,95
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	62,0	18,0	29,0	30,0	22,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			32		
			0,81		
Charge maximale observée (à la rupture)					
Lecture du comparateur	226,0	109,0	124,0	166,0	108,0
Force en lbf	2525,0	1162,5	1335,7	1830,0	1150,0
Force en N (lbf x 4,448222) B	11231,8	5171,1	5941,5	8140,2	5115,5
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	10782,5	7601,5	7070,1	6465,9	6087,4
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			8002		

Identification N éprouvette	Basalte R 8/16 BB				
	1	2	3	4	5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	59,9	62,0	62,9	58,1	58,2
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	59,2	62,3	62,2	59,3	58,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	59,3	62,2	62,3	58,5	58,5
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	59,4	62,2	62,5	58,6	58,2
Volume calculé (cm ³)	481,7	504,0	506,4	475,2	472,9
Volume mesuré (cm ³)	479,98	464,71	508,46	466,91	469,84
Facteur de correction A	1,14	1,09	1,04	1,14	1,14
	1,73	19,30	-2,02	8,32	3,05
	0,36	3,83	-0,40	1,75	0,85
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	41,0	13,0	46,0	27,0	25,0
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			30		
			0,76		
Charge maximale observée (à la rupture)					
Lecture du comparateur	184,0	187,0	143,0	156,0	182,0
Force en lbf	2037,5	2075,0	1550,0	1716,7	2011,5
Force en N (lbf x 4,448222) B	9013,3	9230,1	6894,7	7636,3	8952,0
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	10332,1	10060,6	1170,5	8705,3	10265,1
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			9295		

R 8/12 Silix Dopé						
N éprouvette	5	6	7	8	9	12
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	62,6	71	57,4	61	74,4	62,1
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	61,4	70,8	65,2	63,2	70,8	59,2
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	62,6	71,8	62,4	63,4	69,4	66,4
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	63,93	73,20	64,00	65,20	74,53	66,57
Volume calculé en cm ³ Vc	518,33	593,46	518,87	528,60	604,27	539,68
Volume mesuré en cm ³ Vm	505,44	580,94	486,93	506,22	567,76	481,79
Vc - Vm	12,89	12,51	31,94	22,38	36,51	57,89
Facteur de correction A	1,00	0,81	1,05	1,00	0,83	1,04
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	20,00	37,00	35,00	40,00	25,00	40,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm				33		
				0,82		
Lecture du comparateur	194,00	176,00	185,00	189,00	178,00	240,00
Force en lbf	2183,33	1950,00	2050,00	2100,00	1970,00	2700,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	9711,94	8674,03	9118,86	9341,27	8763,00	12010,20
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	9711,94	7025,97	9529,20	9341,27	7273,29	12490,61
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				9228,71		

R 8/12 + 3/8 Basalte Dopé				
N éprouvette	5	6	7	8
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	72,8	55,6	58	71,4
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	68	55,4	66,2	69,6
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	74	57,2	60	65,6
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	73,27	58,07	63,73	71,53
Volume calculé en cm ³ Vc	594,00	470,77	516,71	579,94
Volume mesuré en cm ³ Vm	557,60	440,78	499,43	660,30
Vc - Vm	36,40	29,98	17,28	19,64
Facteur de correction A	0,90	1,28	1,04	0,90
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	33,00	15,00	37,00	40,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			33	
			0,82	
Lecture du comparateur	237,00	189,00	203,00	215,00
Force en lbf	2650,00	2100,00	2250,00	2400,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	11787,79	9341,27	10008,50	10675,73
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	10609,01	11956,82	10408,84	9608,16
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			10829,64	

8/16 Basalte						
N éprouvette	1	2	3	1	2	3
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	55,5	60,0	55,0	60,0	61,4	61,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	55,2	60,3	56,0	60,0	61,8	61,5
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	55,8	60,0	55,0	60,0	61,5	63,0
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	55,5	60,1	55,3	60,0	61,6	62,0
Volume calculé (cm ³)	450,0	467,3	448,6	486,4	499,1	502,7
Volume mesuré (cm ³)	419,14	427,39	421,54	463,98	476,78	473,17
Facteur de correctior. A	1,25	1,09	1,25	1,47	1,39	1,39
	30,82	59,86	27,07	22,46	22,36	29,48
	6,85	12,25	6,03	4,62	4,48	5,87
Indice de fluage (unités de 0,01 mm)	37,0	39,0	26,0	25,0	32,0	27,0
Fluage moyen (unités de 0,01 mm)		34			28	
		0,85		0,78	0,70	
Charge maximale observée (à la rupture)						
Lecture du comparateur	142,0	138,0	128,0	108,0	135,0	129,0
Force en lbf	1537,5	1487,5	1400,0	1150,0	1460,0	1406,3
Force en N (lbf x 4,448222) B	6839,1	6616,7	6227,5	5115,5	6494,4	6264,4
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	8548,9	7212,2	7784,4	7519,7	9027,2	8707,6
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N				8133		

15/25 Silix Dopé				
N éprouvette	5	6	7	8
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	65,6	73,8	69,8	64,8
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	62	74,8	71	68,4
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	68,8	74,2	70,6	68
Épaisseur moy. de l'éprouvette (mm)	67,13	76,27	72,80	69,73
Volume calculé en cm ³ Vc	544,27	618,32	590,21	565,35
Volume mesuré en cm ³ Vm	492,38	578,41	540,43	507,66
Vc - Vm	51,90	39,91	49,75	57,69
Facteur de correction A	0,99	0,80	0,87	0,95
Indice de fluage en unités de 0,25 mm	34,00	23,00	30,00	35,00
Fluage moyen en unités de 0,25 mm			31	
			0,79	
Lecture du comparateur	152,00	155,00	144,00	133,00
Force en lbf	1670,00	1700,00	1563,00	1440,00
Force en N (lbf x 4,448222) B	7428,53	7561,98	6952,57	6405,44
Stabilité Marshall corrigée en N (B x A)	7317,10	6011,77	6048,74	6085,17
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N			6337,35	

= A/D =

Tableaux : Densité relative brute des éprouvettes saturées à surface sèches

Identification 8/12 3/8 bas sans filler calc			
N'éprouvette	1	2	3
1 A Masse dans l'air (g)	1179,88	1040,00	1101,21
2 C Masse dans l'eau (g)	655,31	573,25	615,54
3 B Masse dans l'air (g)	1195,67	1056,00	1118,22
Densité relative brute à TC $D_b = A/(B-C)$	2,184	2,154	2,191
$k = D_w / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C $= D_b \text{ à TC} \times k$	2,180	2,151	2,188
Densité relative brute moyenne à 25 D_m		2,173	
Volume mesuré en cm ³	542,97	478,60	506,77

8/16 bas sans filler calcaire			
N'éprouvette	1	2	3
1 A Masse dans l'air (g)	1179,25	1137,10	1086,07
2 C Masse dans l'eau (g)	646,02	628,89	596,45
3 B Masse dans l'air (g)	1195,10	1161,06	1100,45
Densité relative brute à TC $D_b = A/(B-C)$	2,148	2,137	2,155
$k = D_w / 0,99704$	0,99859	0,99859	0,99859
Densité relative brute à 25C $= D_b \text{ à TC} \times k$	2,145	2,134	2,152
Densité relative brute moyenne à 25 D_m		2,143	
Volume mesuré en cm ³	604,43	582,83	556,67

Tableaux : Résultats des essais de stabilité MARSHALL et de fluage

R 8/12 • 3/8 bas sans filler calcaire BB			
N'éprouvette	1	2	3
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	66,6	58,5	64,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	67,2	64,2	62,0
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	67,4	61,0	61,8
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	67,1	61,2	62,6
Volume calculé (cm ³)	543,7	496,4	507,6
Volume mesuré (cm ³)	542,90	478,70	506,70
Facteur de correction A	0,93	1,14	1,04
	0,83	1,74	0,82
	0,13	3,57	0,16
Indice de fluage (unités de 0,25 mm)	35,0	40,0	48,0
Fluage moyen (unités de 0,25 mm)		41	
		1,03	
Charge maximale observée (à la rupture)			
Lecture du compresseur	135,0	109,0	97,0
Force en lbf	1460,0	1162,5	1020,0
Force en N (lbf x 4,44822) B	6494,4	5171,1	4537,2
Stabilité Marshall corrigée en N (E x A)	6039,6	5895,0	4718,7
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N		5551	
Durée de l'essai en :			

8/16 bas sans filler calcaire GB			
N'éprouvette	1	2	3
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 1	67,0	69,0	63,4
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 2	69,0	67,0	60,4
Épaisseur de l'éprouvette (mm) 3	67,2	62,6	61,2
Épaisseur moyenne de l'éprouvette (mm)	67,7	66,3	61,7
Volume calculé (cm ³)	549,1	537,2	500,0
Volume mesuré (cm ³)	550,17	530,53	506,70
Facteur de correction A	0,85	0,95	1,04
	-1,03	6,72	-6,75
	-0,19	1,25	-1,35
Indice de fluage (unités de 0,25 mm)	30,0	27,0	20,0
Fluage moyen (unités de 0,25 mm)		26	
		0,64	
Charge maximale observée (à la rupture)			
Lecture du compresseur	109,0	67,0	104,0
Force en lbf	1162,5	920,0	1100,0
Force en N (lbf x 4,44822) B	5171,1	4092,4	4892,0
Stabilité Marshall corrigée en N (E x A)	4602,2	3925,7	5088,6
Stabilité Marshall moyenne corrigée en N		4541	
Durée de l'essai en :			

= A11 =

85% - 15%

W%	Dh	Ds
7.8	2.095	1.945
10.1	2.205	2
12.3	2.205	1.965
14.5	2.175	1.9

Enfonçement en mm	Lecture au 1/100 mm		
	1	2	3
0.25	330	250	210
0.5	410	300	260
0.75	490	360	300
1	570	410	340
1.5	720	510	420
2	980	610	470
2.5	1240	720	520
3	1500	830	580
4	2140	1090	700
5	2680	1300	820

90% - 10%

W%	Dh	Ds
7.9	1.86	1.725
10.2	1.95	1.77
12.1	1.95	1.74
14.3	1.925	1.685

Enfonçement en mm	Lecture au 1/100 mm		
	1	2	3
0.25	650	330	170
0.5	800	410	230
0.75	930	460	290
1	1030	530	340
1.5	1220	650	420
2	1500	770	500
2.5	1720	860	560
3	1930	950	630
4	2400	1150	730
5	2830	1350	950

90% - 20%

W%	Dh	Ds
10	2.1	1.909
11.7	2.186	1.957
13.1	2.217	1.96
15.3	2.178	1.888

Enfonçement en mm	Lecture au 1/100 mm		
	1	2	3
0.25	400	330	250
0.5	500	400	340
0.75	590	480	390
1	660	540	420
1.5	850	660	460
2	1030	800	640
2.5	1250	900	620
3	1450	1060	700
4	1800	1300	800
5	2250	1550	950

= A12 =

70% - 30%

W%	Dh	Ds
8.4	2.045	1.886
10.4	2.13	1.93
12.6	2.16	1.92
14.5	2.13	1.86

Enfonçement en mm	Lecture au 1/100 mm		
	1	2	3
0.25	320	360	220
0.5	450	440	270
0.75	520	490	300
1	630	540	330
1.5	750	650	400
2	890	740	470
2.5	1050	830	520
3	1190	900	560
4	1490	1100	670
5	1830	1260	750

75% - 25%

W%	Dh	Ds
5.9	2	1.89
8	2.086	1.93
10.1	2.13	1.935
12.4	2.175	1.935
14.6	2.134	1.862

Enfonçement en mm	Lecture au 1/100 mm		
	1	2	3
0.25	370	270	200
0.5	460	350	260
0.75	550	430	300
1	630	510	340
1.5	840	550	430
2	1000	810	500
2.5	1220	960	620
3	1400	1120	770
4	1820	1400	900
5	2240	1750	1000

80% - 40%

W%	Dh	Ds
10	2.1	1.909
11.7	2.186	1.967
13.1	2.217	1.96
15.3	2.178	1.888

Enfonçement en mm	Lecture au 1/100 mm		
	1	2	3
0.25	420	360	250
0.5	610	450	310
0.75	590	480	370
1	670	550	420
1.5	800	660	510
2	960	770	600
2.5	1110	880	680
3	1250	980	760
4	1490	1200	890
5	1820	1420	1010

85% - 35%

W%	Dh	Ds
9.3	2.086	1.908
10.5	2.17	1.965
11.6	2.17	1.945
12.5	2.13	1.895

Enfonçement en mm	Lecture au 1/100 mm		
	1	2	3
0.25	230	260	210
0.5	360	320	250
0.75	450	380	270
1	510	450	300
1.5	660	580	350
2	840	710	420
2.5	1020	830	460
3	1180	960	520
4	1540	1030	620
5	1920	1480	730

= A12 =

A14 Résultats des essais Proctor et CBR après imbibition

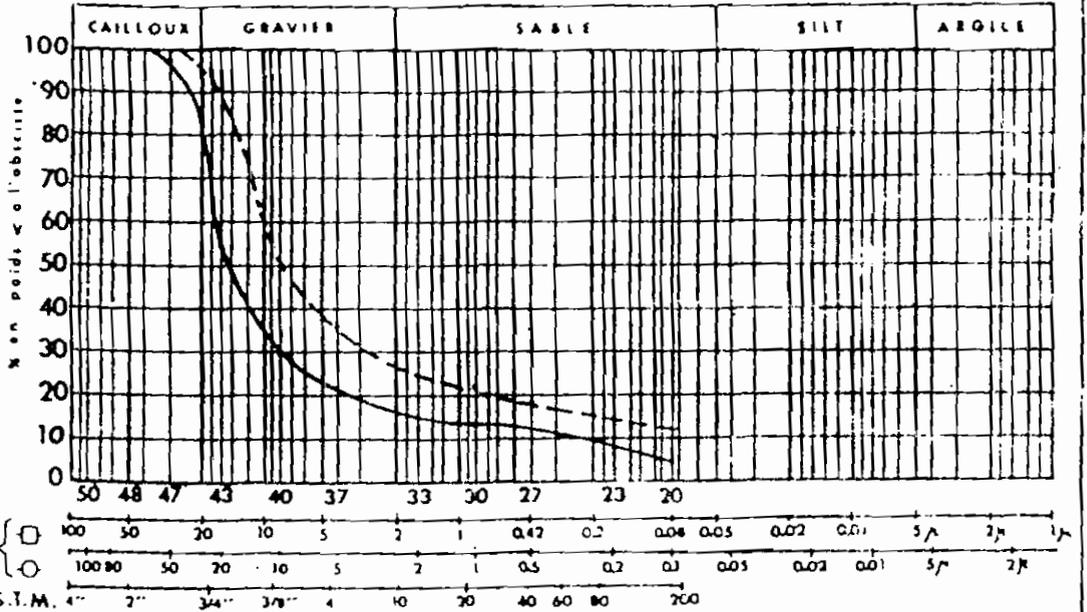
Silix 0/40 de Louga	W%	G'd	C%	CBR 2,5	CBR 95% OPM	CBR 5,0	CBR 95% OPM	W% f H	W% f M
Mélange 90% Silix + 10% Latérite	6,2	2,025	99,7	126	60	138	65	10,5	9,5
	6,2	1,935	95,3	63		66		10,5	9,8
	6,3	1,855	91,3	40		46		10,6	10,4
Mélange 80% Silix + 20% Latérite	9,6	2,06	99,5	92	62	110		12,3	11,4
	9,6	1,98	95,6	66		76		13	11,8
	9,4	1,905	92	46		46		12,2	11,7
Mélange 70% Silix + 30% Latérite	7,7	2,1	99,7	77	56	89		14,7	13,9
	7,6	2,015	95,7	61		62		14	12,8
	7,6	1,935	91,9	38		37		13,5	13,2
Mélange 60% Silix + 40% Latérite	8,3	2,14	100	82	58	89		13,4	12,8
	8,3	2,055	96	65		69		15,9	15,3
	8,1	1,98	92,5	50		49		13,7	13,2
Silix 0/40 de Taiba									
Mélange 85% Silix + 15% Latérite	6,6	2,155	100	91	48	131	54	11,7	11,6
	6,9	2,21	96	53		63		12,6	12,9
	6,5	1,995	92,5	38		40		10,6	11,3
Mélange 75% Silix + 25% Latérite	6,7	2,1	100	90	60	109		12,6	11
	6,9	2,015	95,9	70		85		13,5	13,4
	6,8	1,935	92,6	46		49		12,9	13,5
Mélange 65% Silix + 35% Latérite	9,4	2,03	100	75	60	94	66	13,3	12,6
	9,2	1,955	96,3	61		72		13,4	13,6
	9,4	1,87	92,1	34		36		13,6	14,9

= A12 =

ESSAIS D'IDENTIFICATION

Ech	Couche étudiée	Limites d'Atterberg			ES	Classification L.C.P.C
		WL	WP	IP		
1	Avant Compactage					
2	Après Compactage	38.5	17.0	21.5		

GRANULOMETRIE

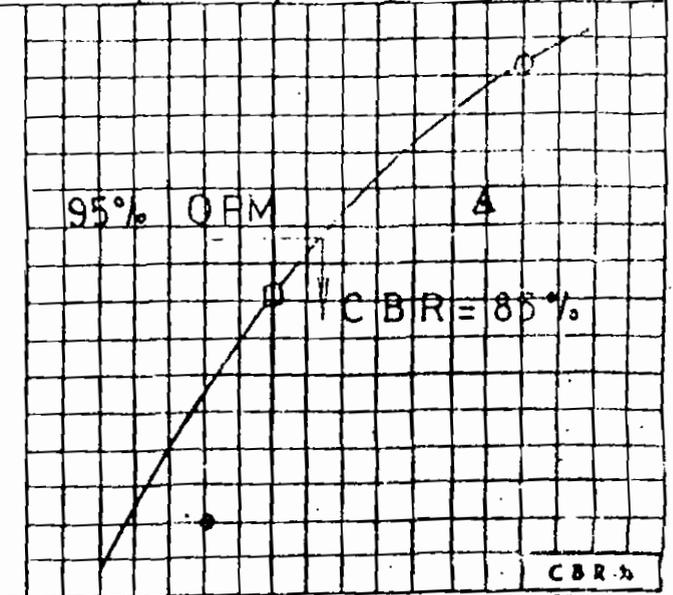
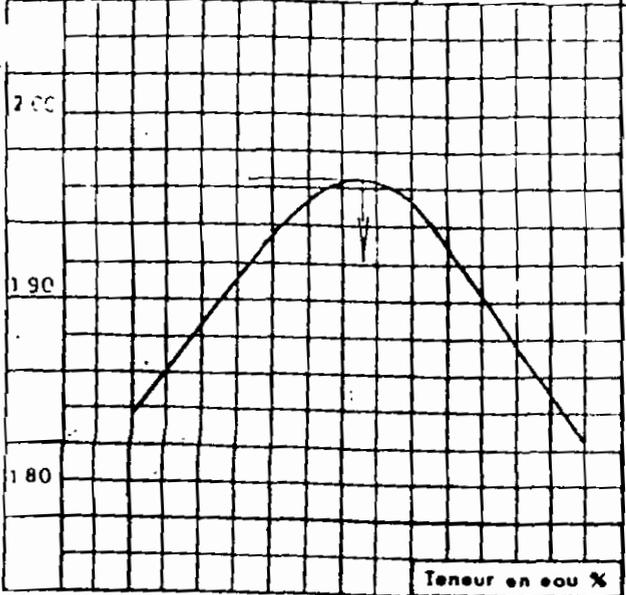


module A.F.N.O.R

dimensions en mm

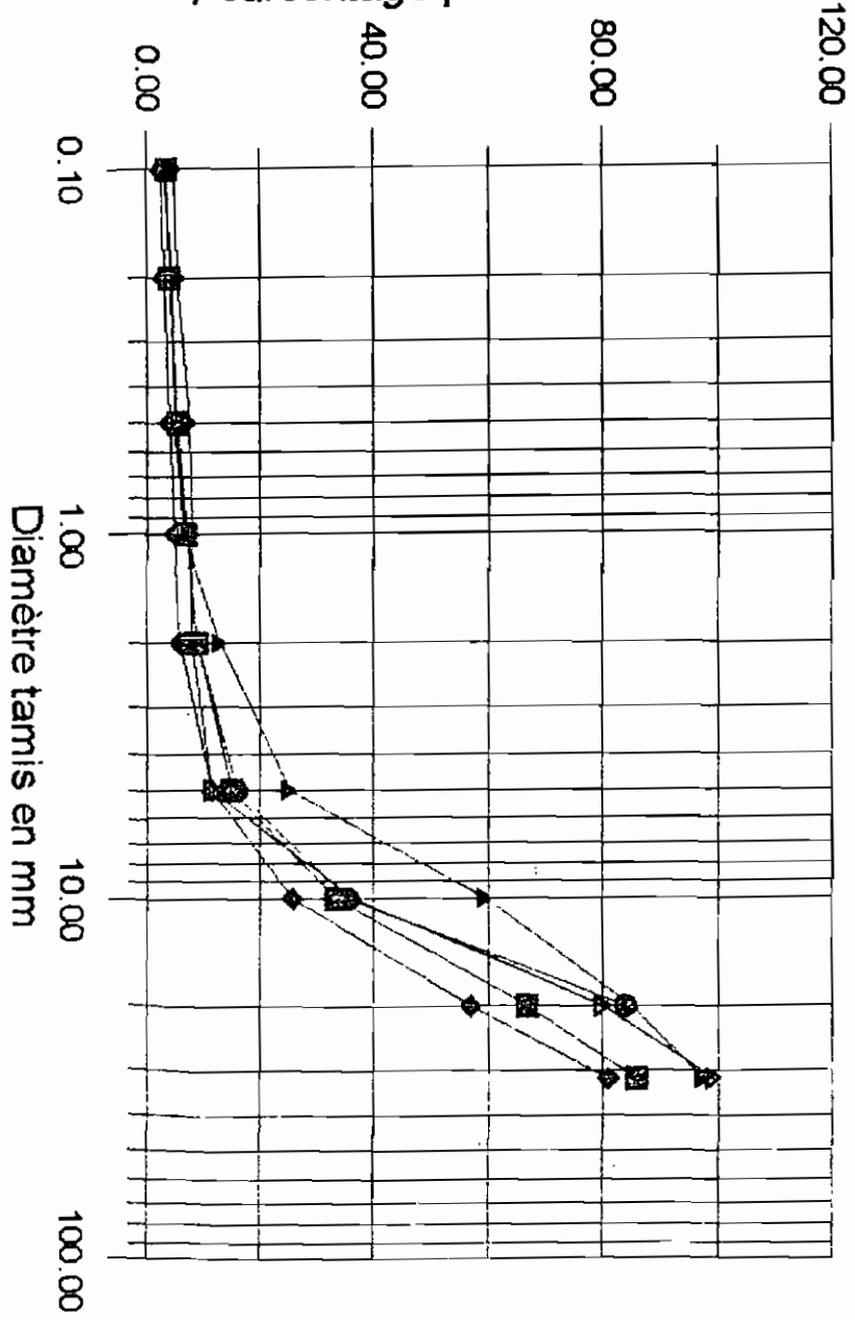
designation tamis A.S.T.M.

ESSAI PROCTOR			ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)				
Couche étudiée	Densité sèche maximum	Teneur en eau optimum %	Couche étudiée	N coups	δ _c	W % saturation	Gonflement %
C 40 Scalpz	1.005 2.075 (corrigé)	6.5 / 7.9	C 40 Scalpz	0 55	2.005	9.1	
				35	1.857	9.1	
				25	1.905	10.7	
				10	1.785	10.4	
				A 25			
			B 10				



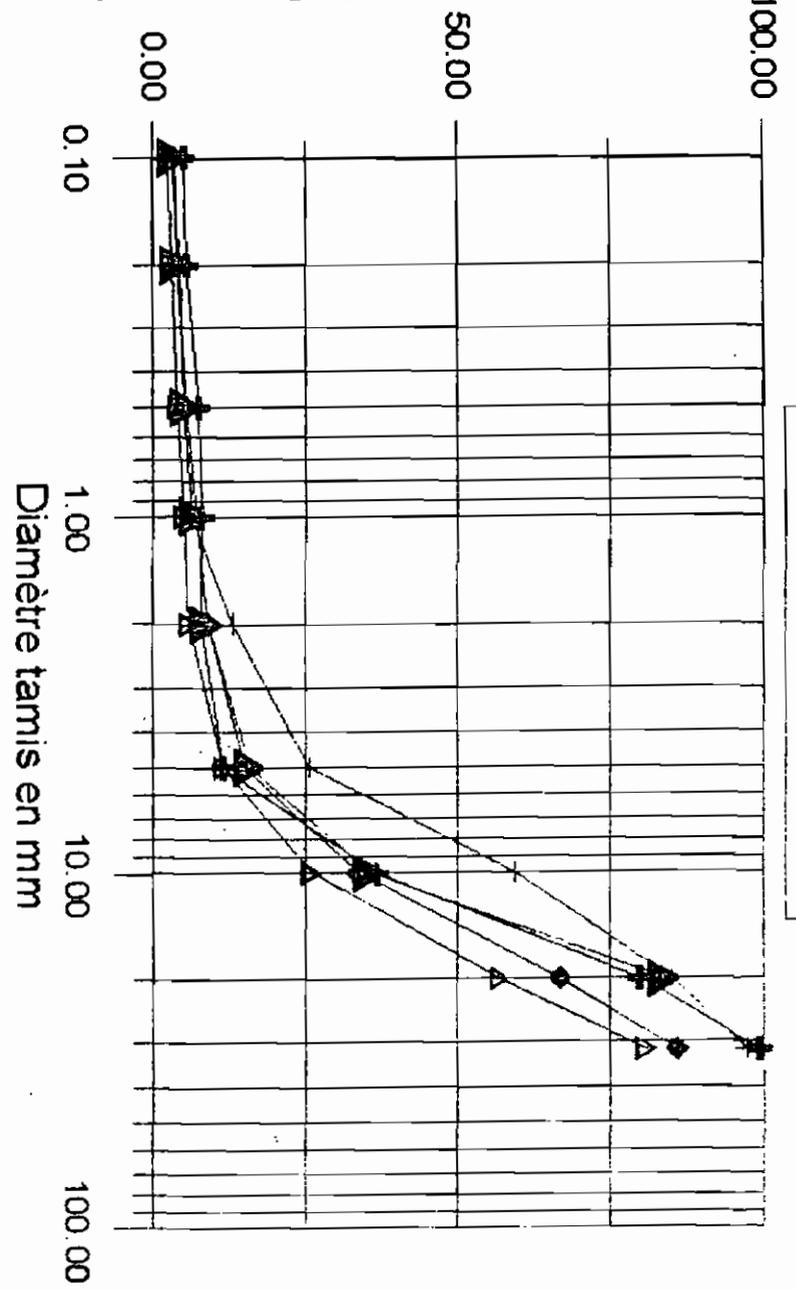
= A13 =

Pourcentage passant cumulatif



= A13 =

pourcentage passant cumulatif en mm

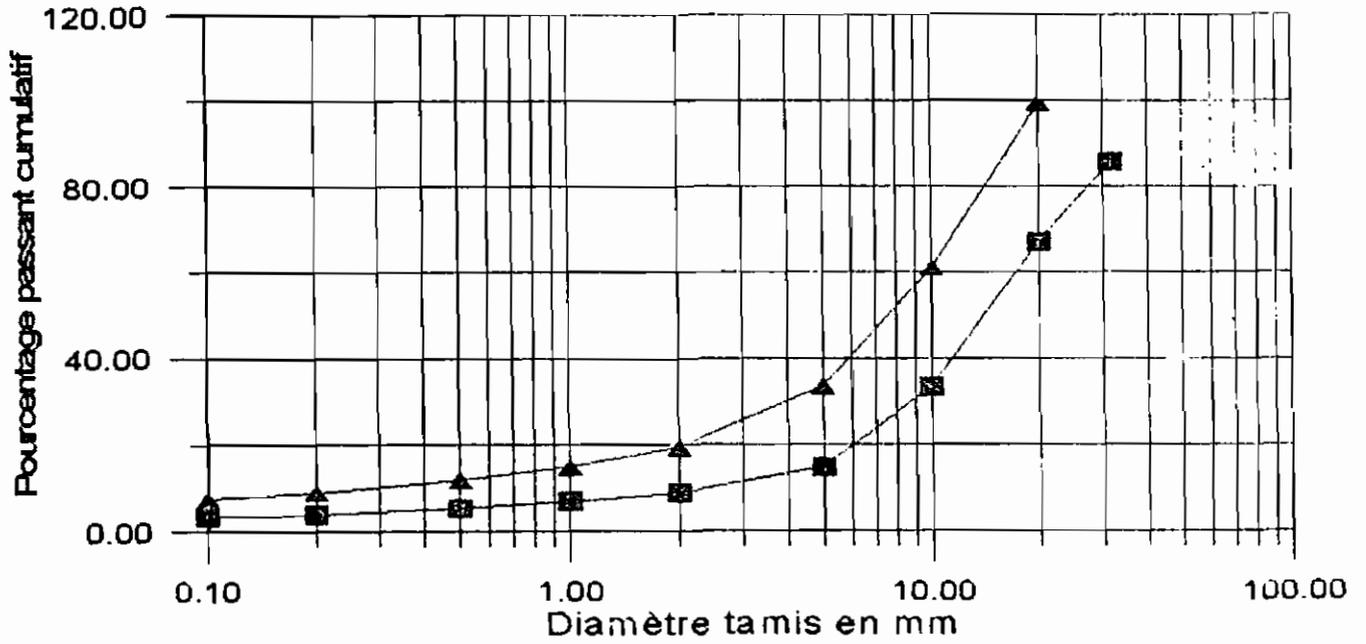


- | | |
|---------------|---------|
| Latérite 040 | 1 |
| Mélange 10/90 | 5 |
| Mélange 20/80 | 6 |
| Mélange 30/70 | 7 |
| Mélange 40/60 | 8 |
| Silic 0/40 | 9 |
| ▲ | Curve 1 |
| ◆ | Curve 5 |
| ◇ | Curve 6 |
| ■ | Curve 7 |
| ⊕ | Curve 8 |
| ▲ | Curve 4 |

- | | |
|---------------|---------|
| Mélange 25/75 | 2 |
| Mélange 35/65 | 1 |
| Mélange 15/85 | 3 |
| Latérite 040 | 4 |
| Silic 040 | 5 |
| ▲ | Curve 2 |
| ▲ | Curve 1 |
| ◆ | Curve 3 |
| ⊕ | Curve 4 |
| + | Curve 5 |

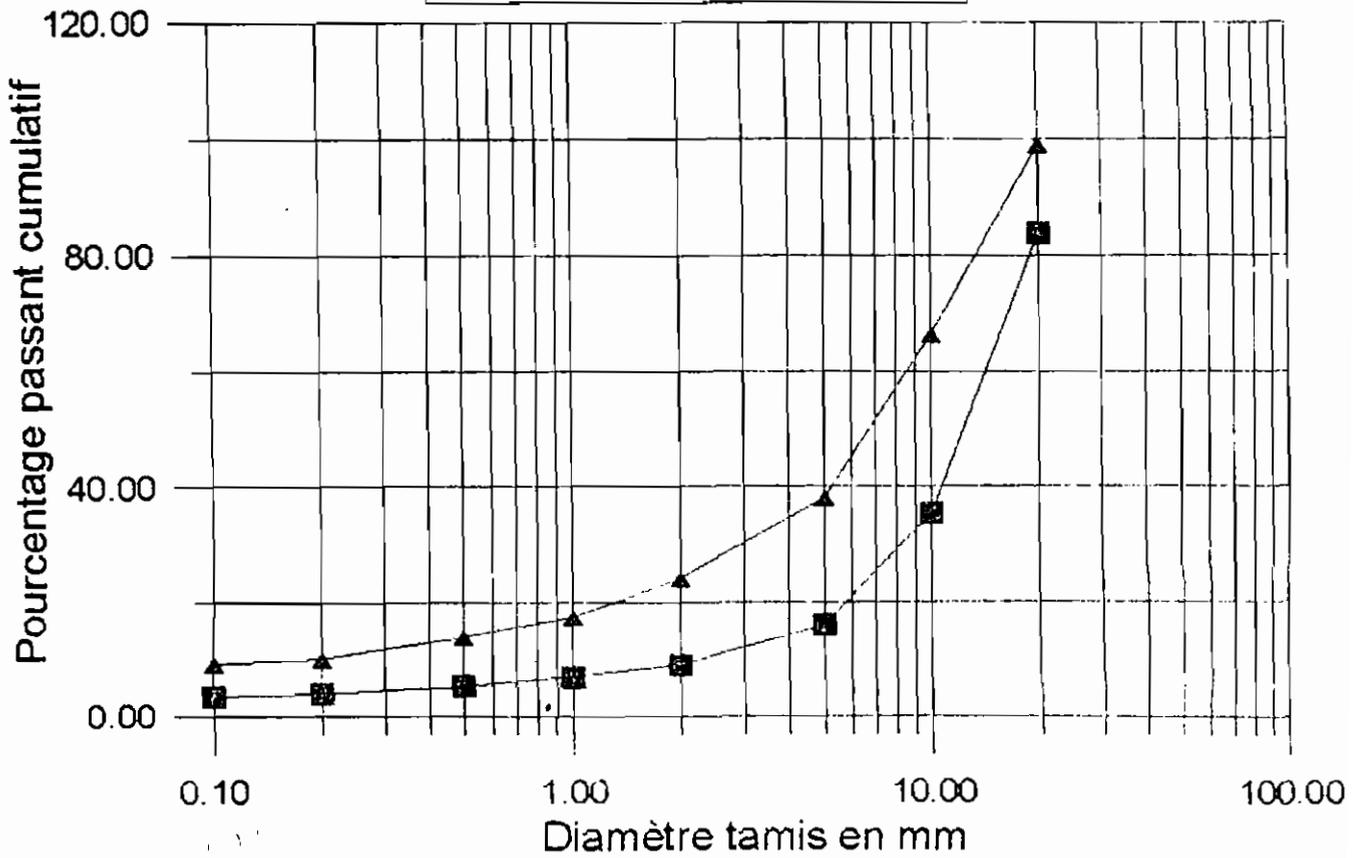
Mélange 30/70 après CBR
Mélange 30/70 avant CBR

▲ Curve 1
■ Curve 2



Mélange 40/60 après CBR
Mélange 40/60 avant CBR

▲ Curve 1
■ Curve 2



= A13 =

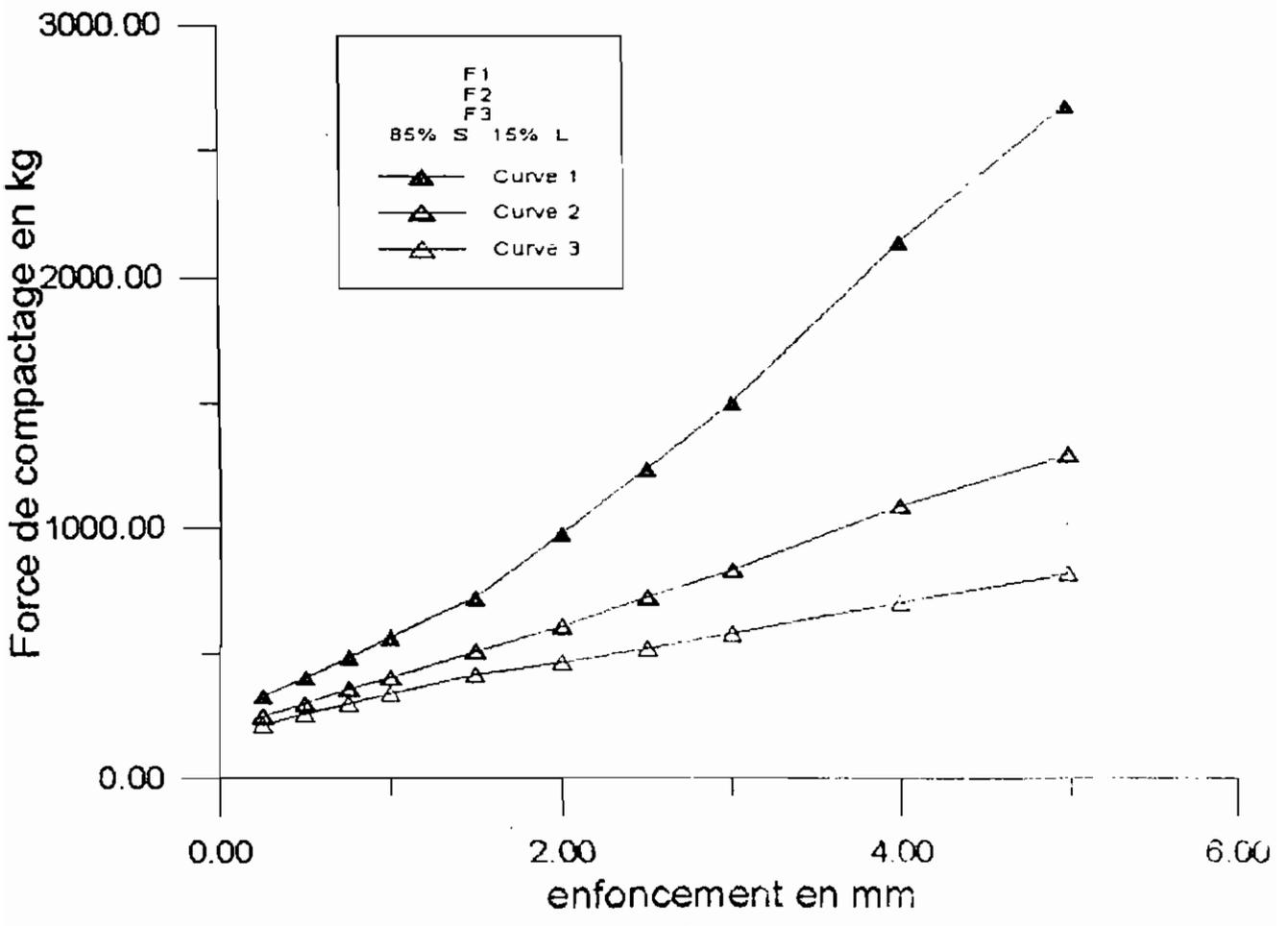
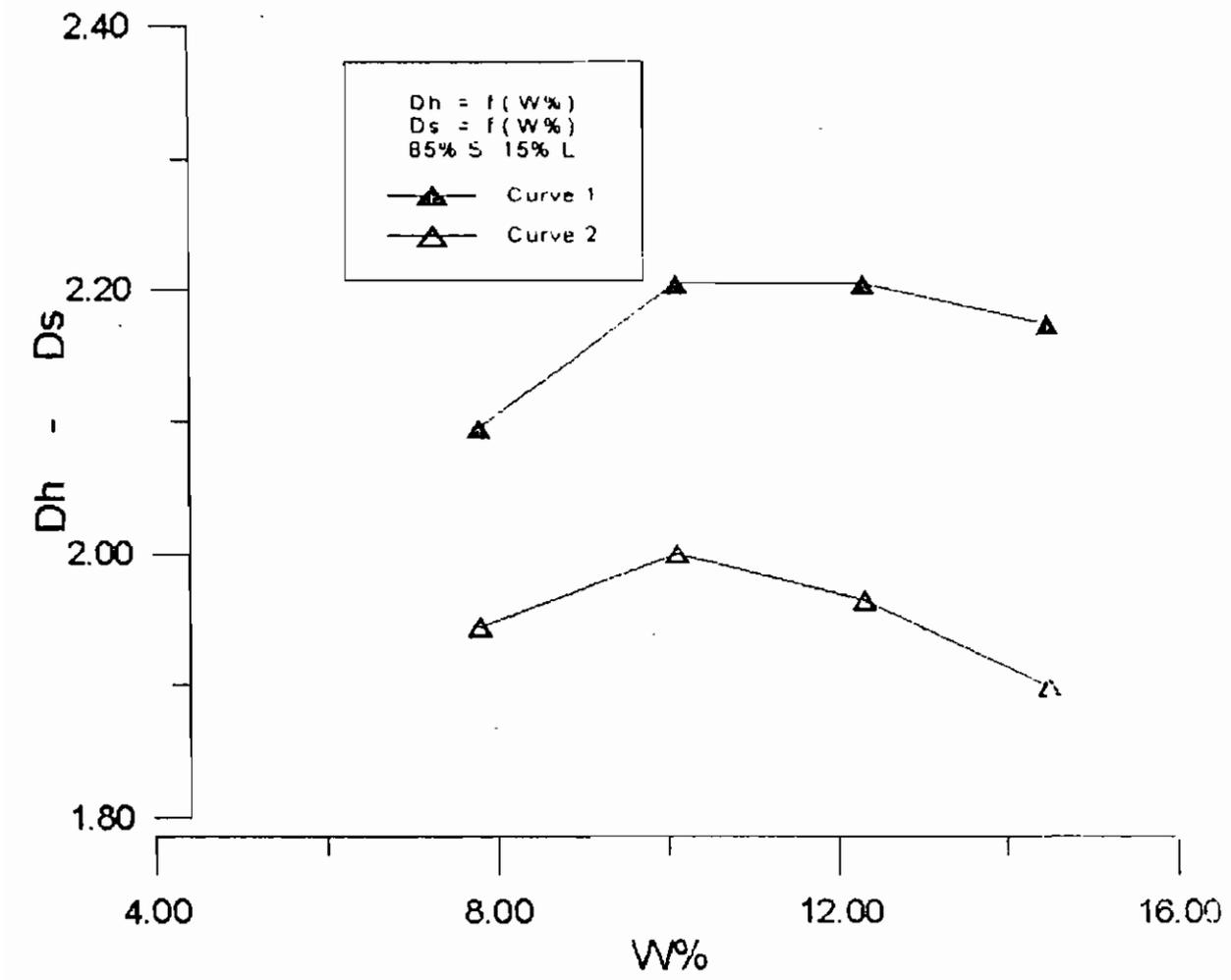
Granulométries des mélanges avant et après C.B.R.

Avant C.B.R. Silex de Louge		0/40 Lutélite		0/40 Silex		0/40 10%		0/40 90%		0/40 20%		0/40 80%		0/40 30%		0/40 70%		0/40 40%		0/40 60%		
Modules	Diamètres mm	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	Poids Cumulé	Pourcentage %	
46	31,5	25	99,5	160	97,5	125	98	1345	81					985	86	725						
43	20	1140	80	1005	85	3025	57			1115	84	2285	67	2475	84							
40	10	3645	36,5	2745	59,5	5195	26	4495	35,5	4610	33,5	4140	35,5									
37	5	5075	11,5	5025	25,5	6180	11,5	5830	16	5910	15	5590	16									
33	2	5270	8	5865	13	6580	6	6340	9	6335	9	6160	9									
30	1	5295	8	6295	6,5	6650	5	6470	7	6470	7	6330	7									
27	0,5	5300	7,5	6395	5	6710	4	6580	5,5	6565	5,5	6450	5,5									
23	0,2	5410	5,5	6450	4,5	6800	3	6695	4	6685	4	6620	4									
20	0,1	5445	5	6560	3	6820	2,5	6730	3,5	6720	3,5	6675	3,5									
	<0,1	5740	5	6745	3	6995	2,5	6950	3,5	6950	3,5	6960	3,5									

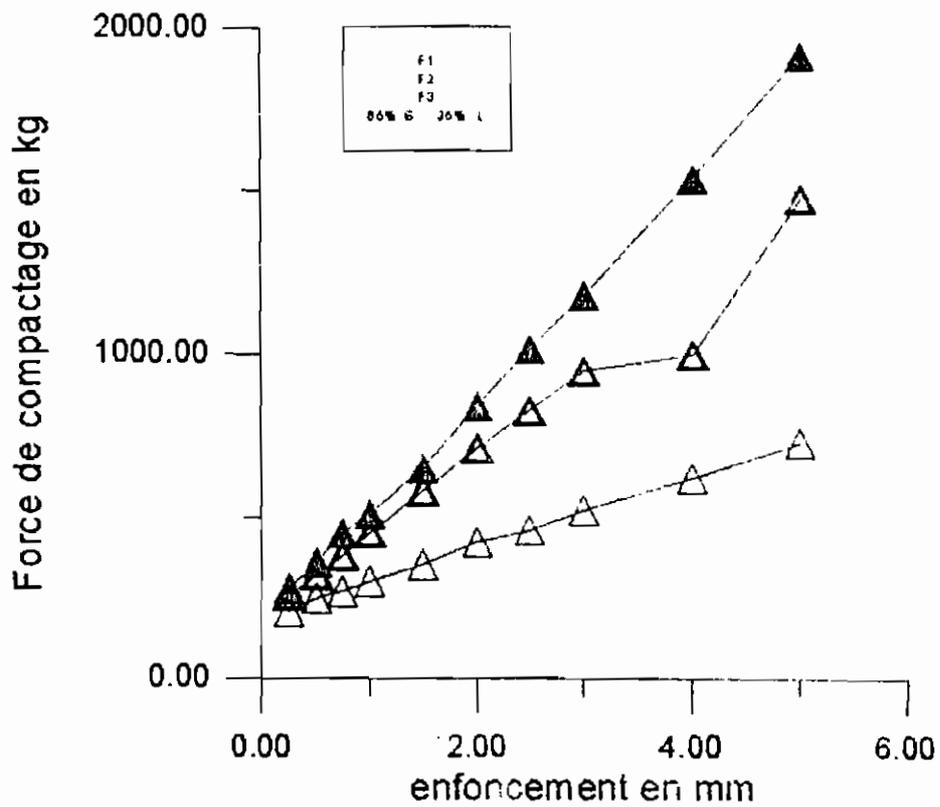
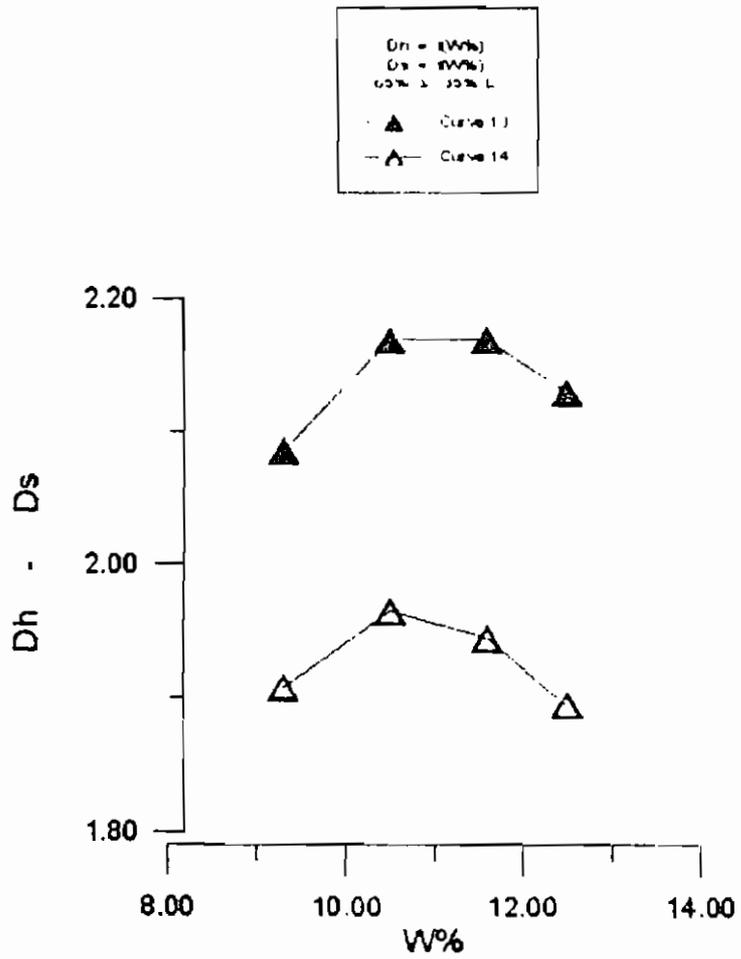
Avant C.B.R. Silex de Taiba		0/40 25%		0/40 75%		0/40 35%		0/40 65%		0/40 15%		0/40 85%	
Modules	Diamètres mm	Poids Cumulé	Pourcentage %										
46	31,5	125	98					985	86				
43	20	1345	81			1115	84	2285	67				
40	10	3025	57			4495	35,5	4610	33,5				
37	5	5195	26			5830	16	5910	15				
33	2	6180	11,5			6340	9	6335	9				
30	1	6580	6			6470	7	6470	7				
27	0,5	6650	5			6580	5,5	6565	5,5				
23	0,2	6710	4			6695	4	6685	4				
20	0,1	6800	3			6730	3,5	6720	3,5				
	<0,1	6820	2,5			6950	3,5	6950	3,5				

Après C.B.R. Silex de Louge		0/40 40%		0/40 60%		0/40 30%		0/40 70%		0/40 20%		0/40 80%	
Modules	Diamètres mm	Poids Cumulé	Pourcentage %										
46	31,5												
43	20	35	99			15	99,5	25	99,5				
40	10	1100	66,5			1245	61	1535	53,5				
37	5	2045	38			2135	33,5	2260	31,5				
33	2	2505	24			2570	19,5	2695	18,5				
30	1	2725	17,5			2715	15	2840	14				
27	0,5	2845	14			2810	12	2935	14				
23	0,2	2970	10			2920	9	3035	10				
20	0,1	3005	9			2955	7,5	3070	7				
	<0,1	3300	9			3200	7,5	3300	7				

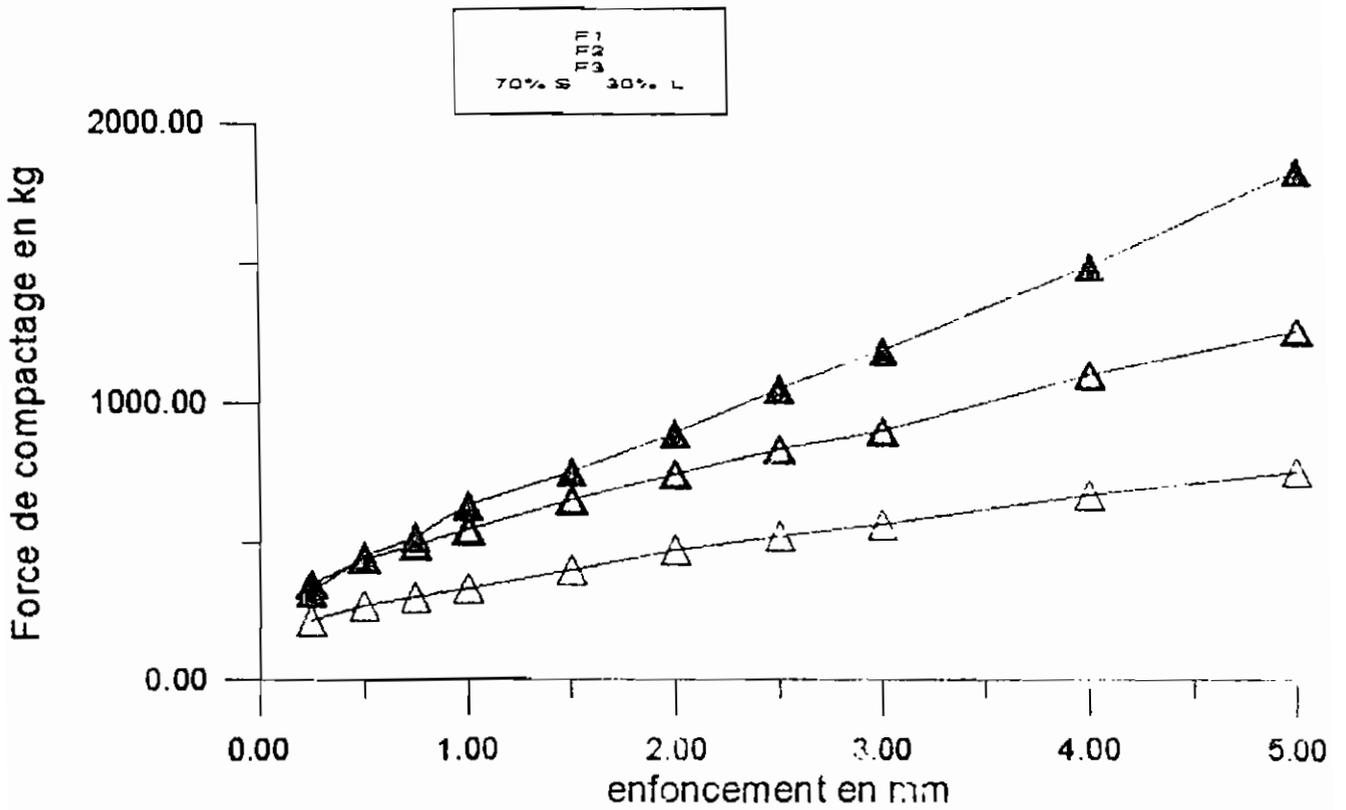
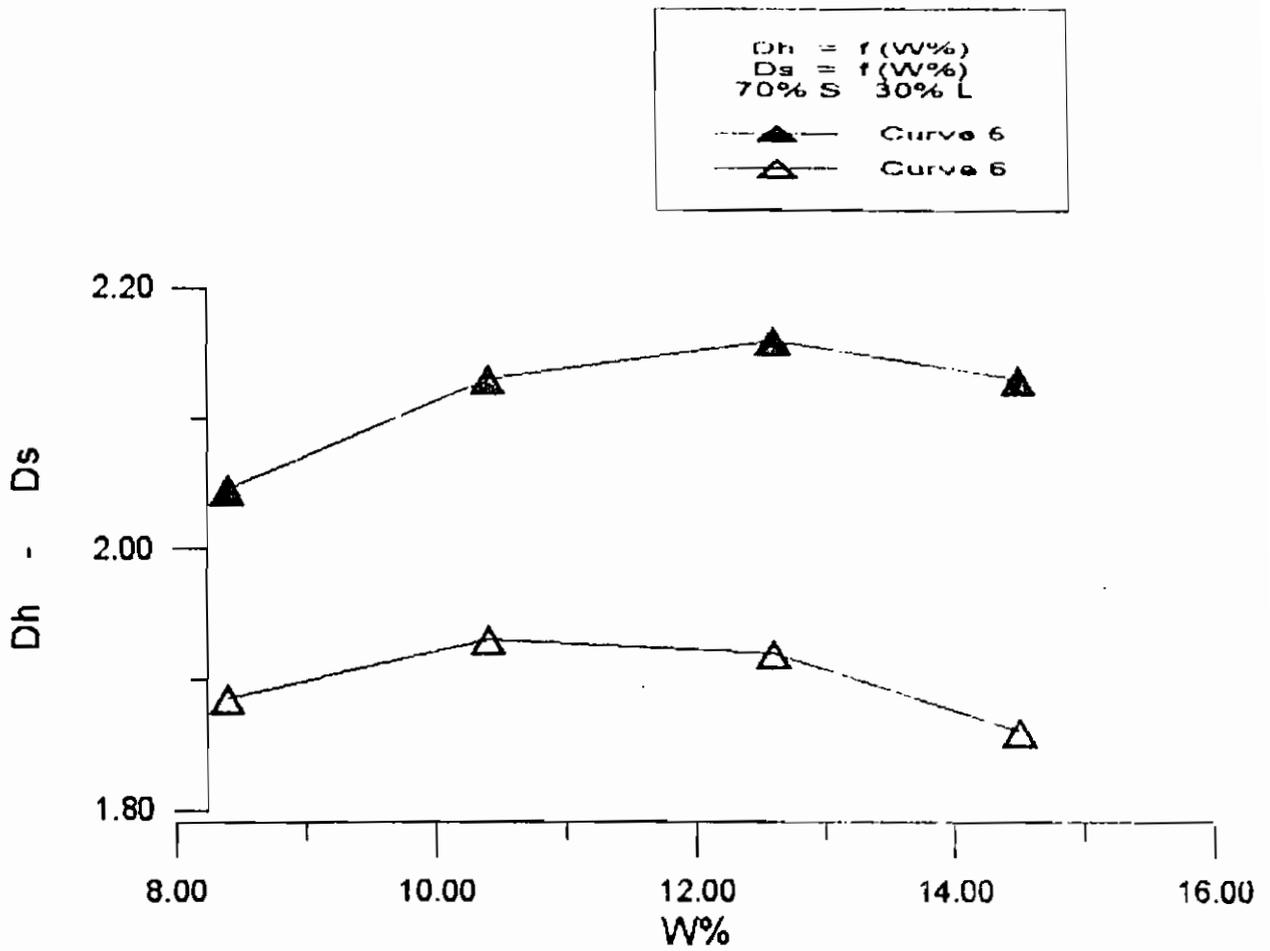
= A13 =



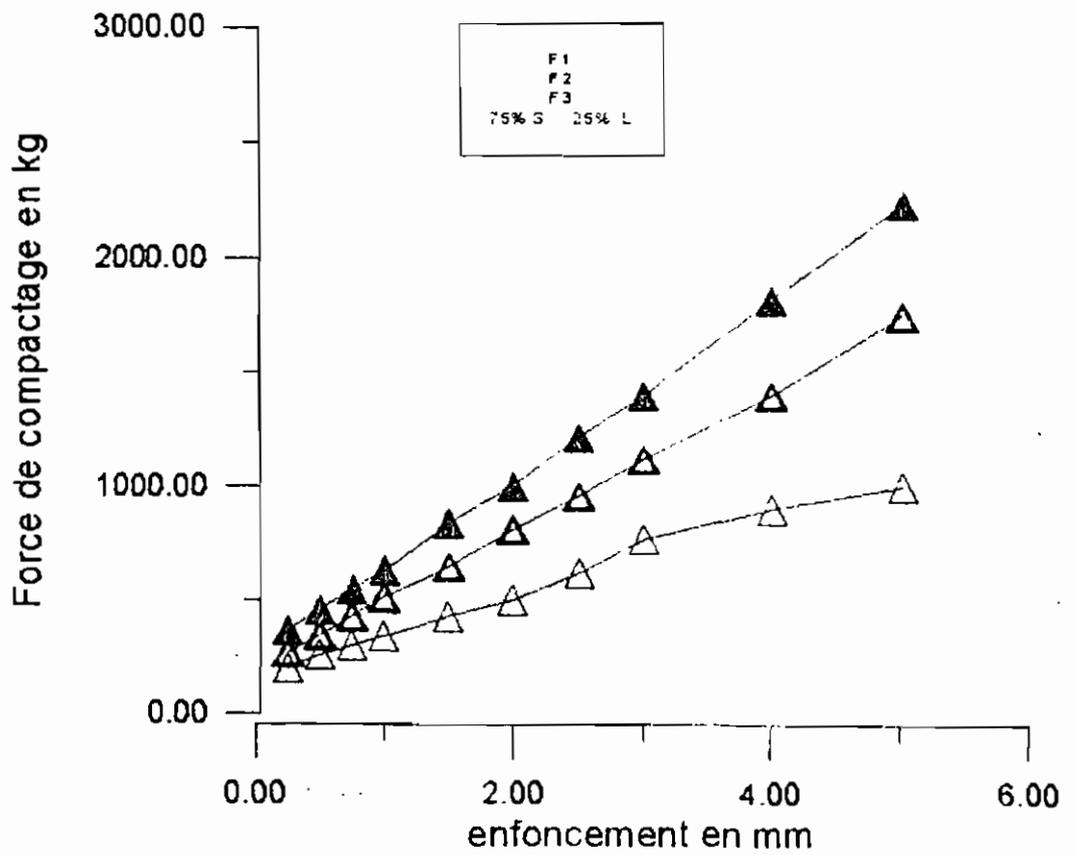
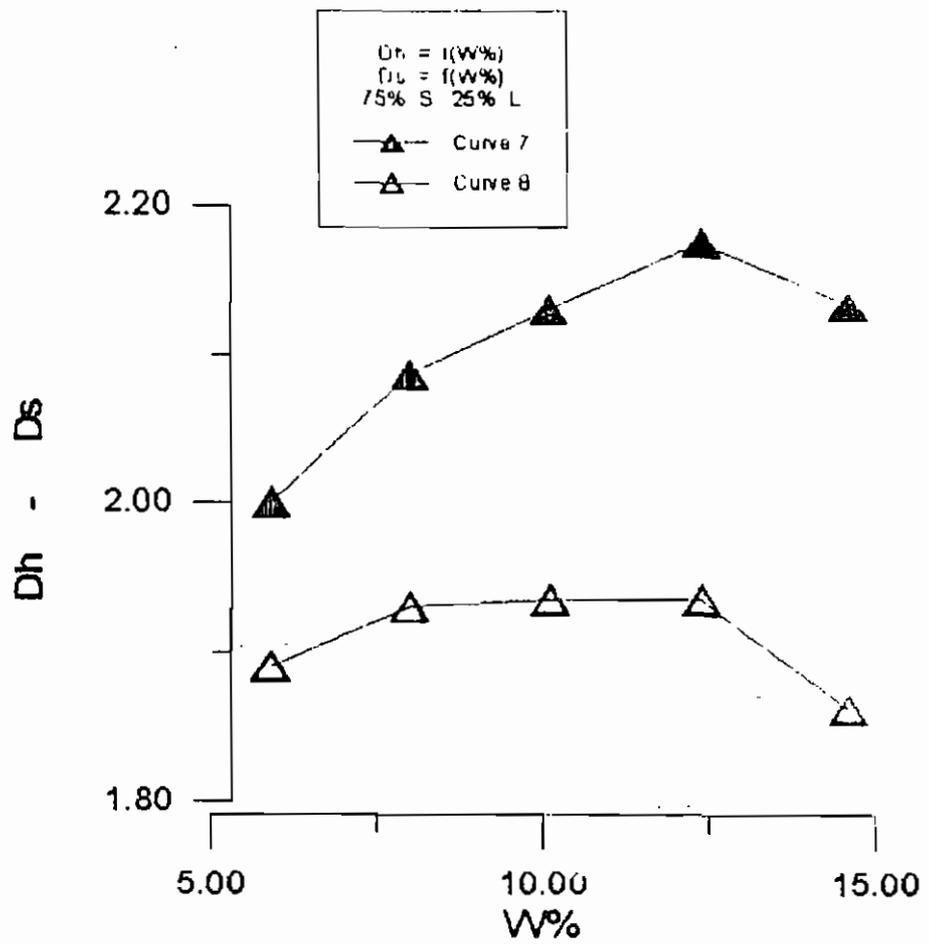
= A14 =



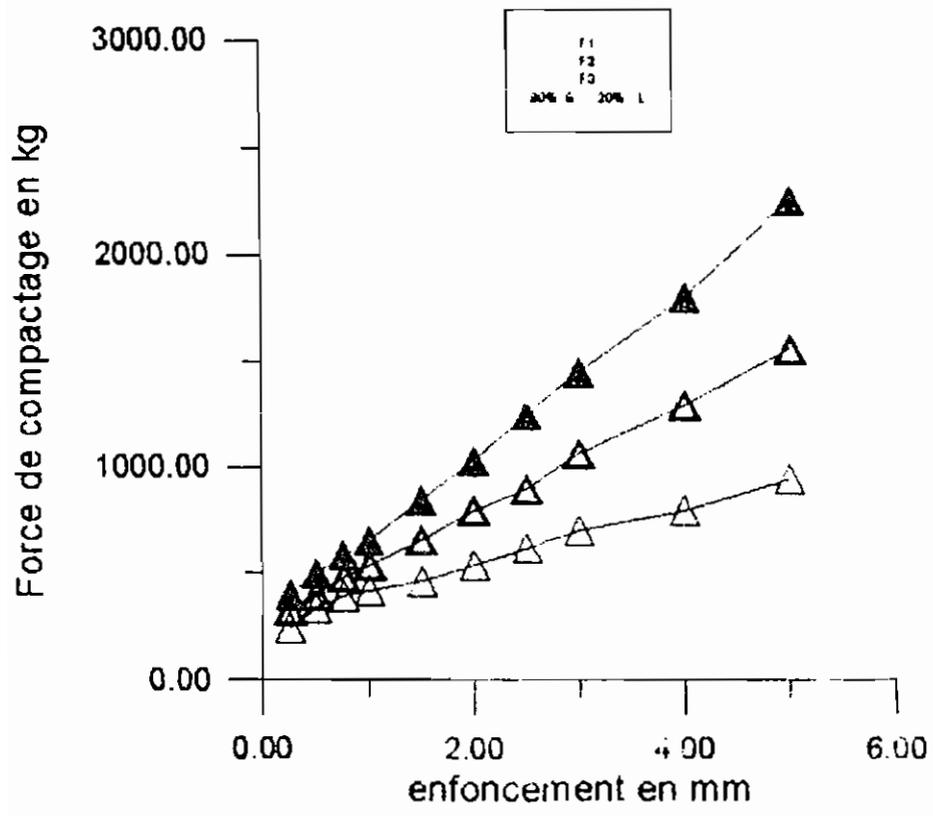
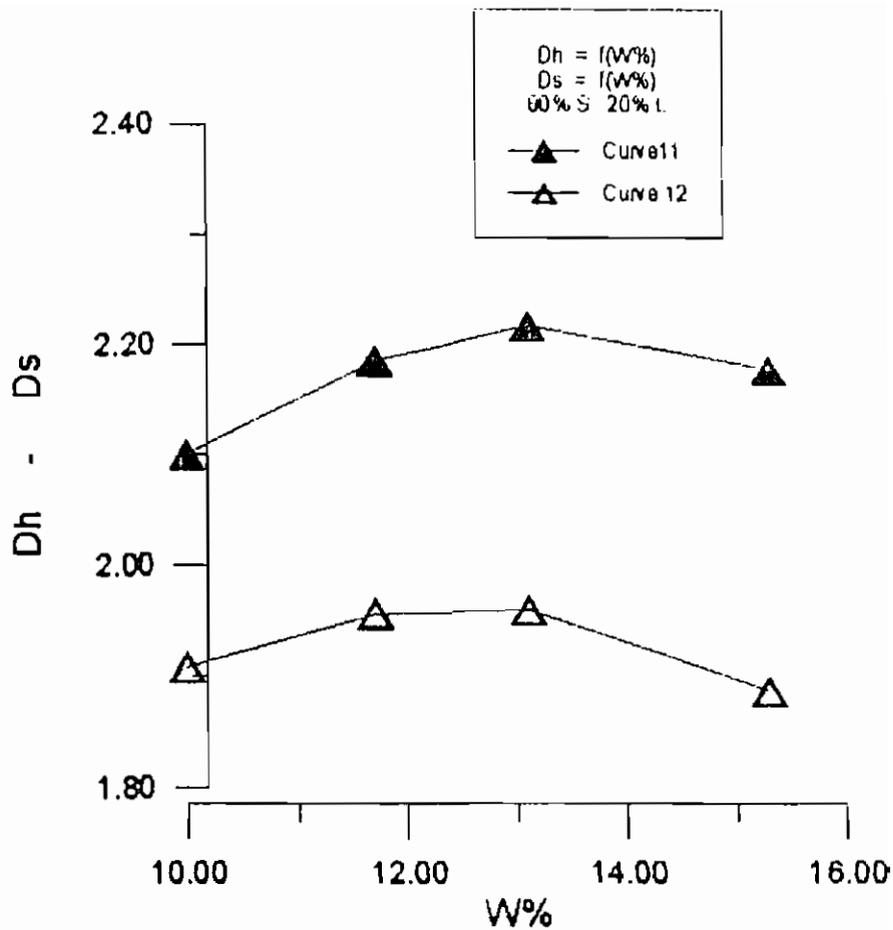
= A 14 =



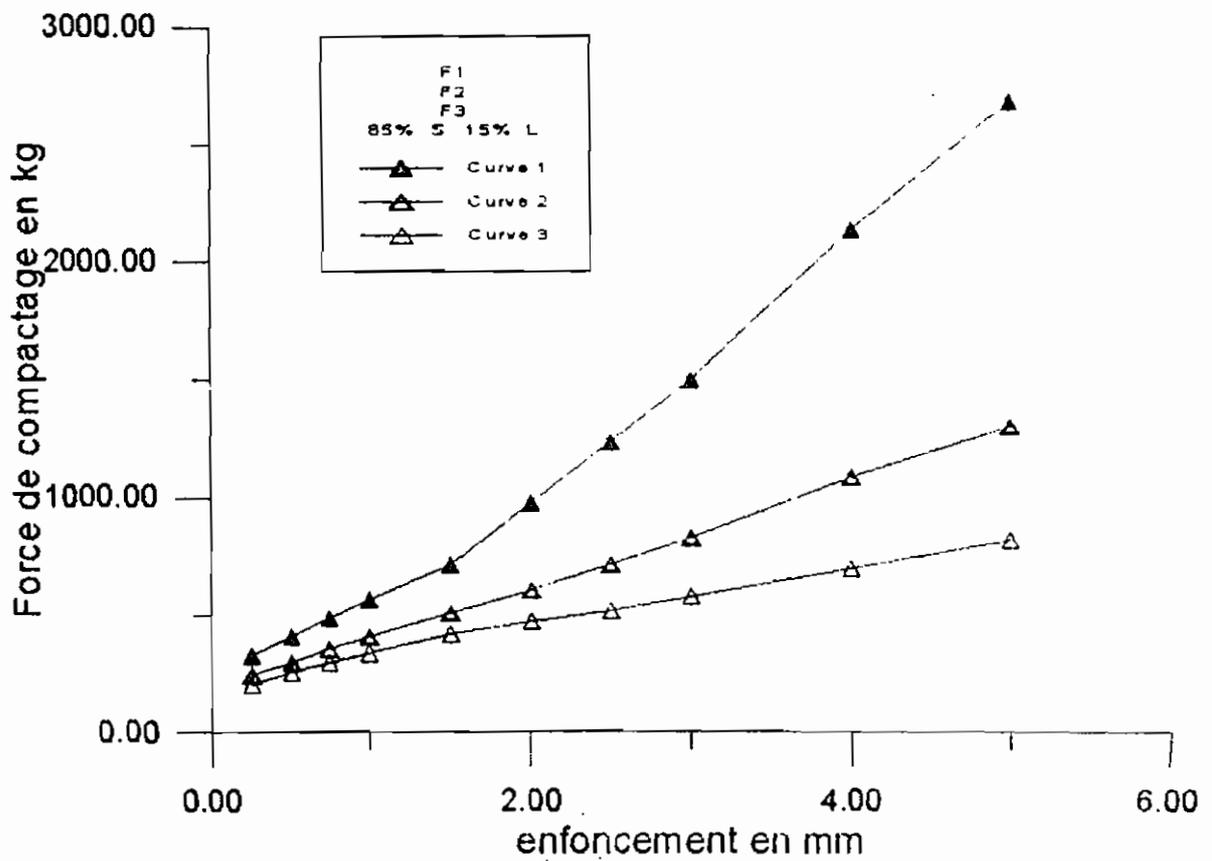
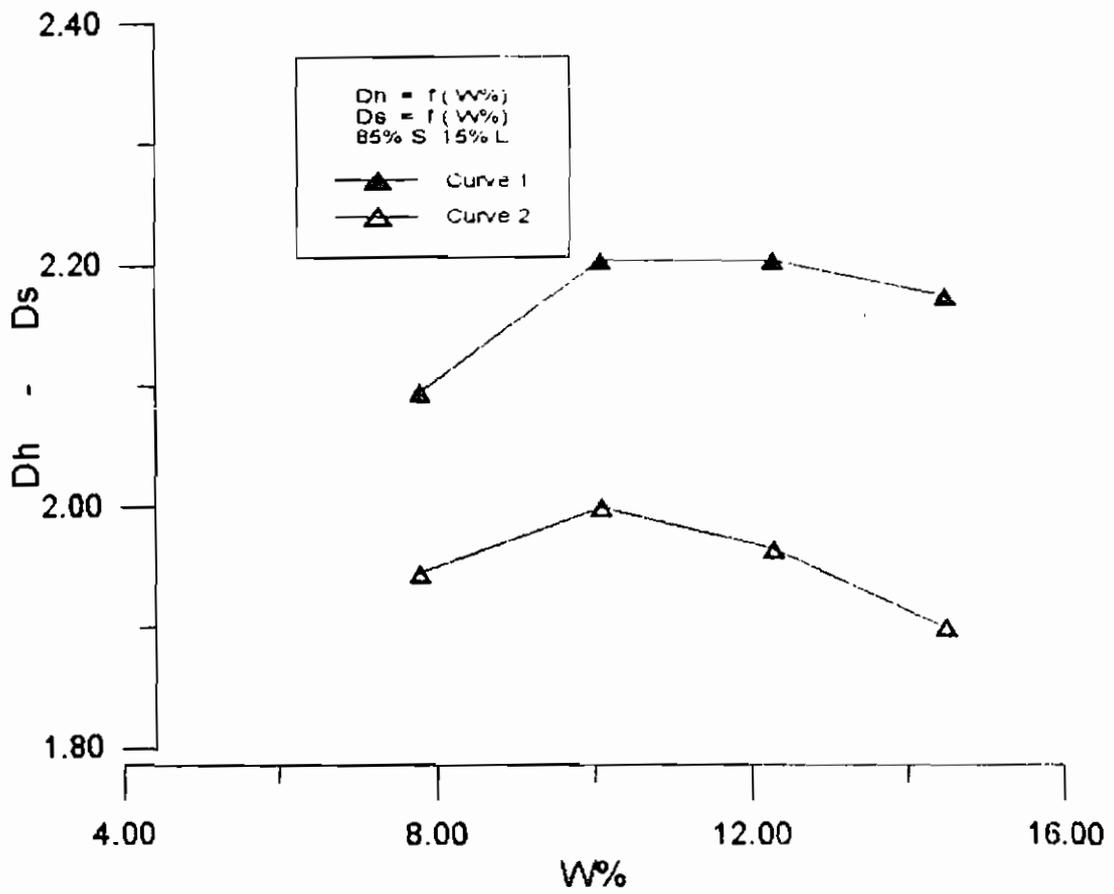
= A 14 =

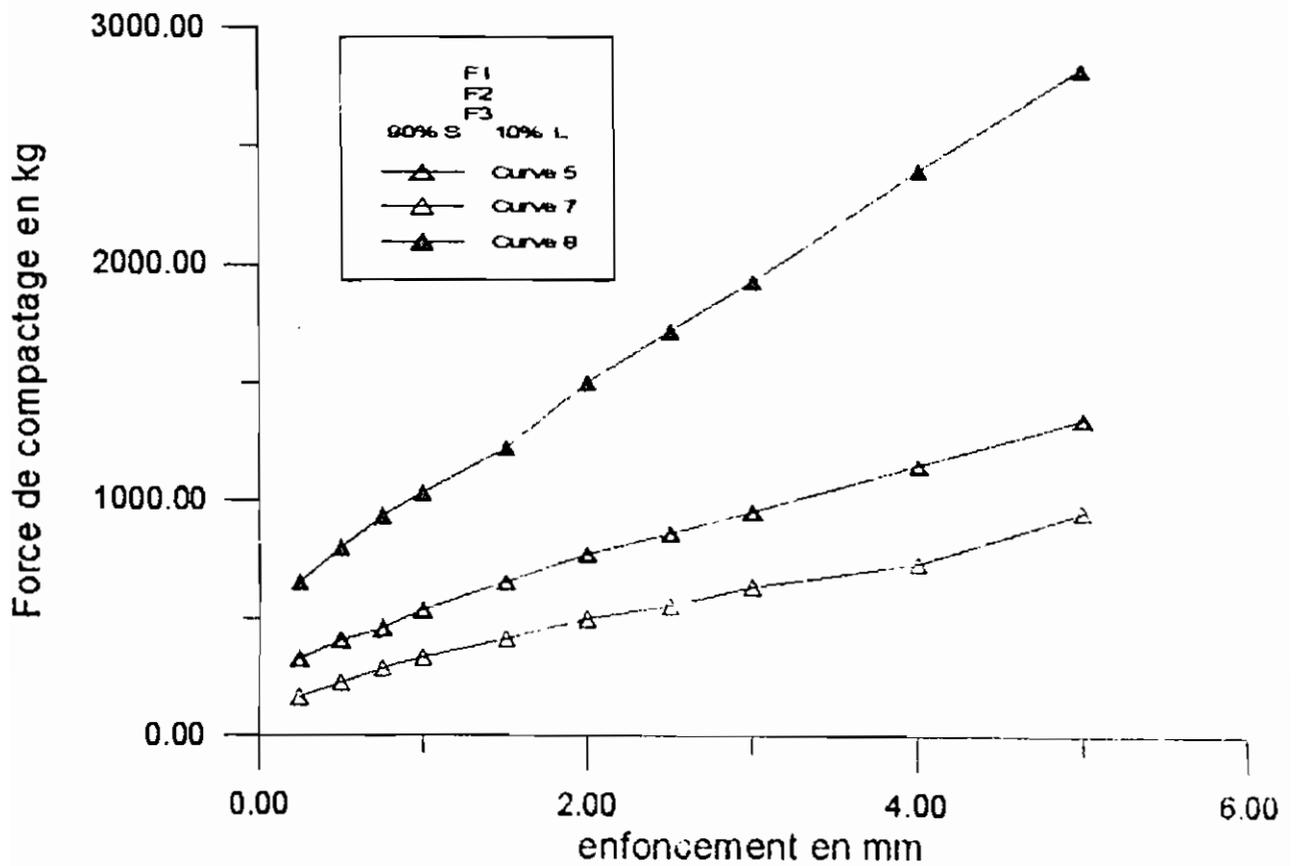
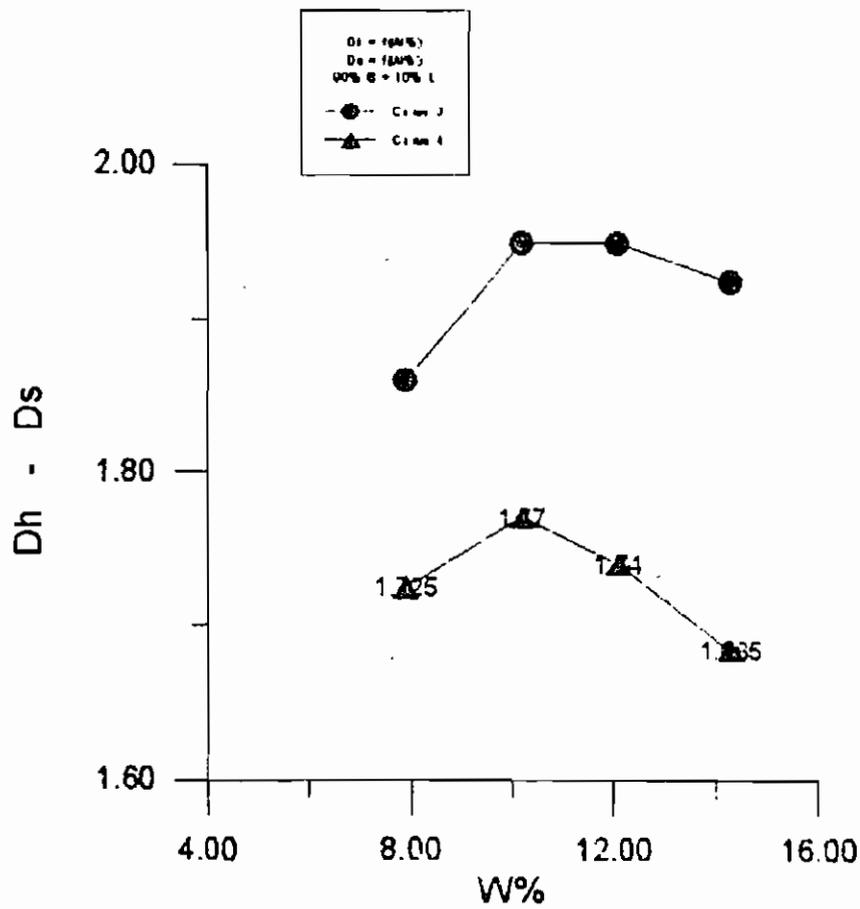


= A 14 =



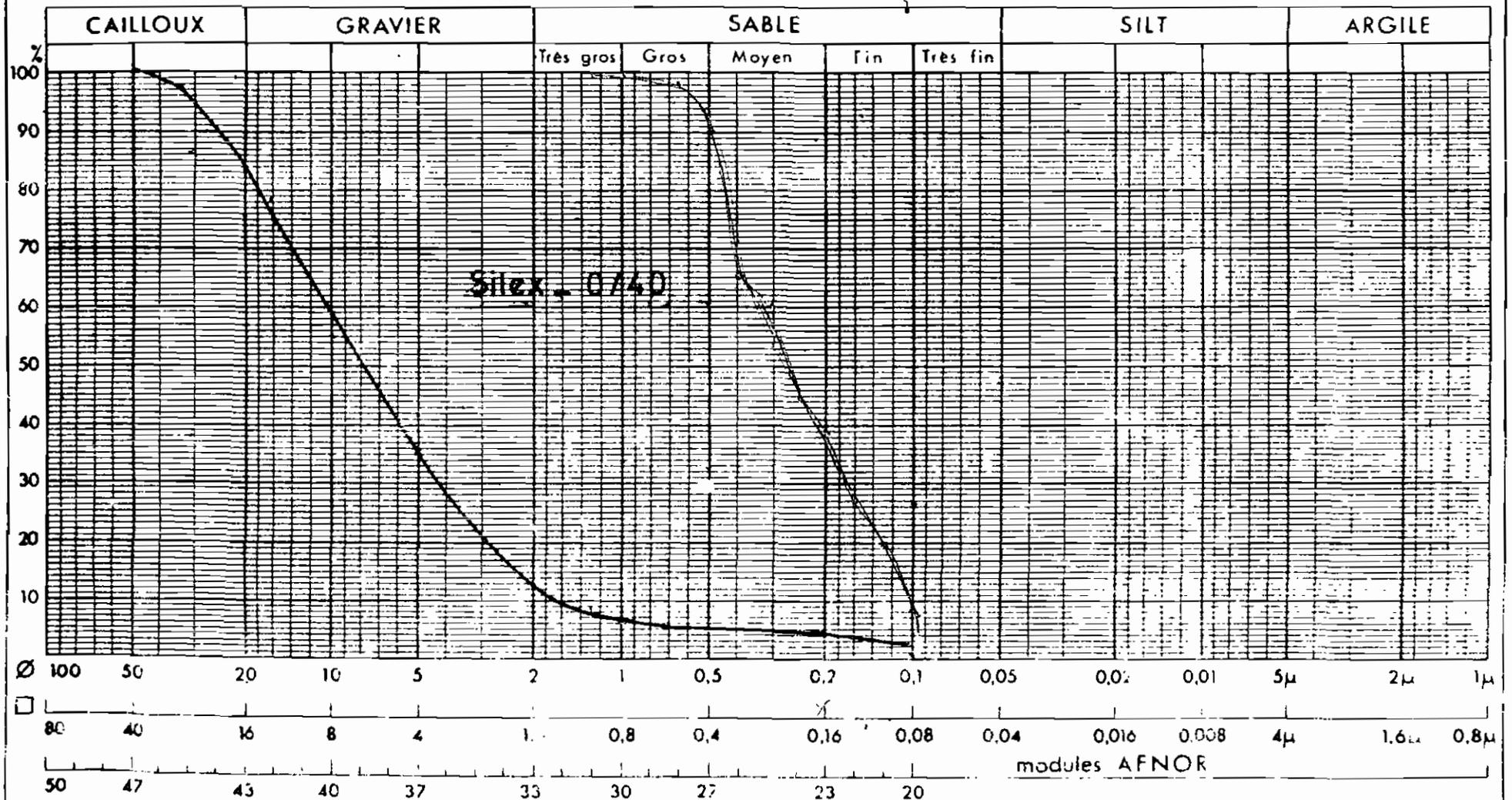
= A 14 =





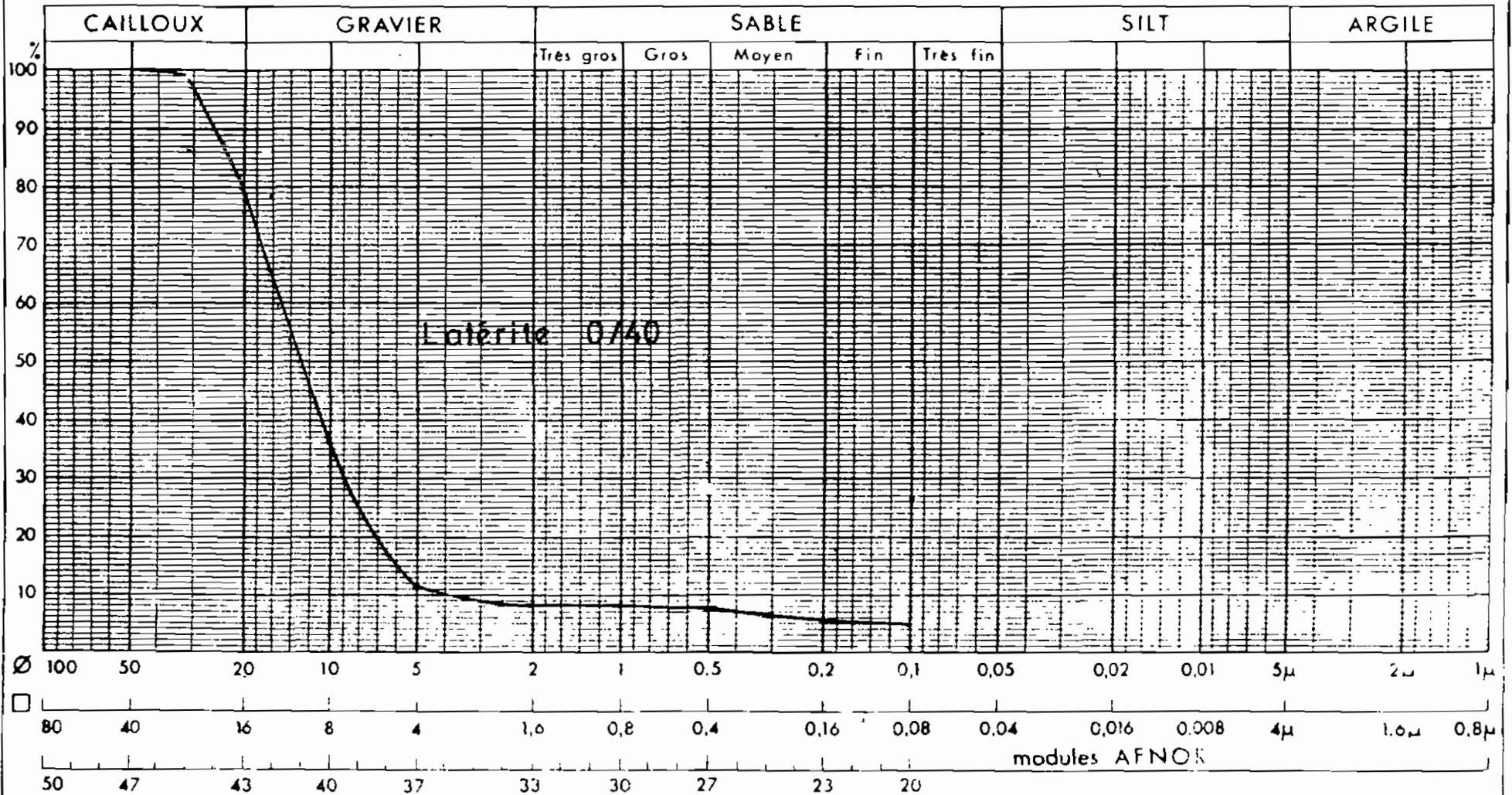
= A 14 =

ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES



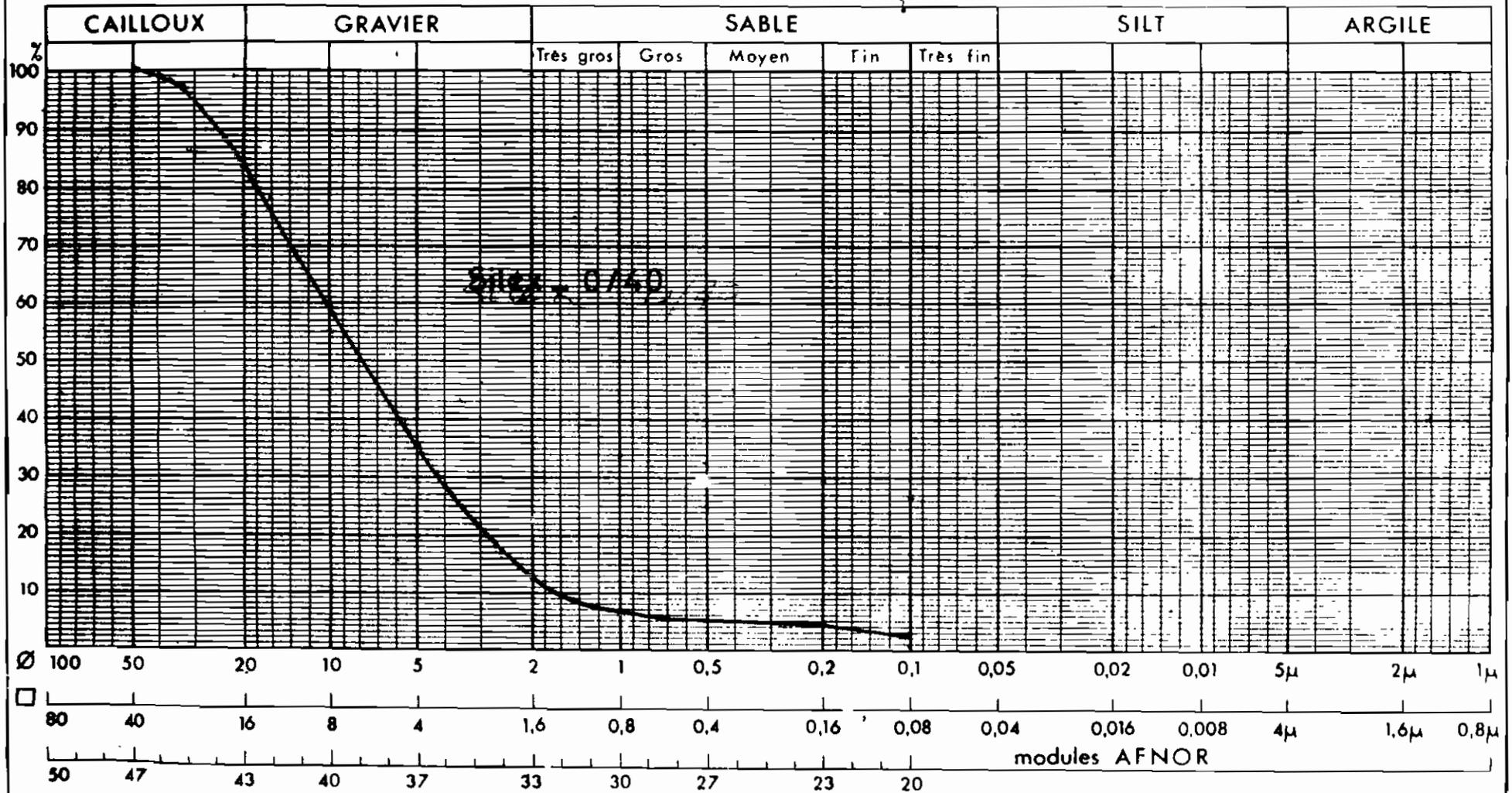
DTP / EPT

ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES



DTP / EPT

ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES



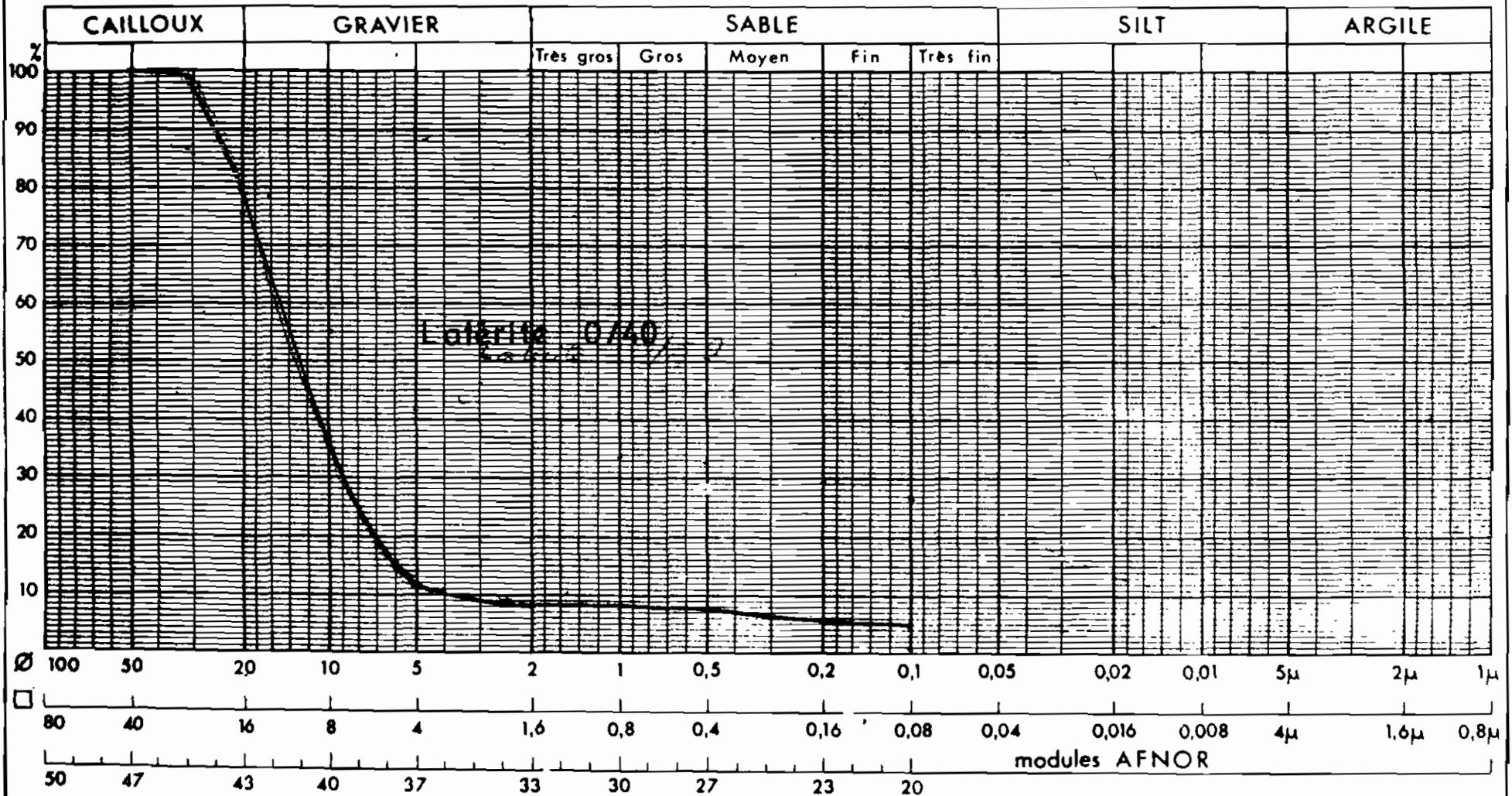
Silt - 0/40

DTP / EPT

Dossier N°

CEREEQ Dakar

ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES



DTP / EPT

Dossier N°

CEREEQ Dakar