

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP
ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES
DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE
CONCEPTION OPTION GENIE CIVIL



SUJET : UTILISATION DU CONCASSE DE CALCAIRE DE
BANDIA EN COUCHE DE BASE

Auteur : Amadou Lamine DIACK

Jury : Messieurs Massamba DIENE,
 NDiaye Diouf NDIAYE
 Youssouf SAKHO

Directeur Interne
Co-Directeur Interne
Directeur Externe

Juin 1996

DEDICACES

*o*o*o*o*o*o*o*o*o*o*

Par la grâce de Dieu le tout puissant
et de son illustre prophète Mohamed (P.S.L).

- _/-) Feue ma grand-mère Fatou Malick
- _/-) Feue ma mère Astou Diop Malamine
 - _/-) mon père Ousmane
 - _/-) mon oncle Aziz
 - _/-) mes frères et soeurs
 - _/-) tous ceux qui me sont chers.

“ J'ai lu dans le ciel de nos villes
Que l'avenir sera beau
Sur nos routes difficiles.”

Richard Dogbey - “Cap Liberté”.

REMERCIEMENTS

Nous ne pouvons commencer ce rapport sans remercier au préalable des personnes qui, par leur dévouement, ont participé à sa réalisation.

Ces remerciements vont à Messieurs :

- ☛ Massamba DIENE, notre Directeur interne, pour son encadrement et surtout pour ses conseils qu'il n'a jamais cessé de nous donner durant tout le projet ;
- ☛ Ndiaye Diouf NDIAYE, notre co-directeur interne, pour son encadrement, ses conseils, sa disponibilité et surtout pour tous les moyens logistiques et documentaires qu'il a bien voulu mettre à notre disposition ;
- ☛ Youssouf SAKHO, notre Directeur externe, pour son encadrement, son soutien et surtout pour nous avoir proposé ce sujet ;
- ☛ MAKEROUN de la SODEVIT pour nous avoir autorisé à faire des prélèvements à la carrière de Bandia ;
- ☛ Joseph KOUSSA pour le transport des échantillons de Bandia à Thiès ;
- ☛ Yatma SOUMARE et Abdoulaye BADJI pour leur assistance lors des séances de laboratoire, qui furent nombreuses et nécessitèrent beaucoup d'énergie ;
- ☛ Au personnel du laboratoire de la CSE (Projet d'élargissement de l'autoroute) pour leur assistance lors de l'exécution des essais CBR ;
- ☛ Monsieur Serigne Bassirou LEYE, Ingénieur à SOECO - CORORASA et au personnel du laboratoire de ladite entreprise ;
- ☛ Madame Astou CISSE née SECK, Secrétaire au Département de Génie Civil pour son soutien et surtout sa disponibilité lors de la saisie de ce document ;
- ☛ Tous les élèves-ingénieurs et plus particulièrement à ceux de la 22^e promotion qui ont participé à la confection des figures et tableaux ;
- ☛ Nous témoignons enfin notre reconnaissance à toutes les personnes que nous n'avons pu citer, et qui, d'une manière ou d'une autre ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études.

SOMMAIRE

La construction routière constitue aujourd'hui l'une des priorités de la politique d'ajustement structurel du Sénégal.

La rareté et la mauvaise répartition géographique des matériaux routiers usuels (latérites) conduisent à la recherche de matériaux de substitution disponibles directement sur les sites des chantiers.

C'est ainsi qu'il s'est avéré intéressant d'étudier les possibilités d'utilisation du concassé de calcaire de Bandia en couche de base.

Pour ce faire, une étude complète a été menée sur le matériau 0/40 TV. Avec un CBR inférieur à 80 donc ne satisfaisant pas les spécifications prescrites par le CEBTP, le matériau a été soumis à une stabilisation mécanique consistant à faire un apport de matériau pour corriger ses défauts du point de vue granulométrique que stabilité et portance. Cette stabilisation s'est faite suivant deux angles :

- Trouver par reconstitution un matériau (mélange 0/40 + autres fractions de calcaire) qui respecterait les exigences du fuseau de Talbot recommandé par le CEBTP. La meilleure formulation qui a pu être trouvée est : 70 % (0/40) + 10 % (3/8) + 20 % (0/2). Ce matériau donne à 95 % de l'OPM un CBR allant de 100 à 114 %.
- Essayer en supposant un réglage des appareils de concassage d'étudier le comportement des différentes propriétés du 0/40, par rapport à un apport de 0/2 calcaire. La formulation retenue est : 80 % de 0/40 + 20 % de 0/2. Soumis à l'essai CBR, il donne une valeur de CBR égale à 126 à 95 % de l'OPM.

Une étude du matériau 0/31,5 est aussi faite. Le matériau obtenu après écrêtement du 0/40 présente beaucoup de fines entraînant le non respect du 0/31,5 par rapport au fuseau de Talbot. Un étude de reconstitution a permis de trouver la formulation 70 % de 0/31,5 + 30 % de 15/25 qui répond aux exigences granulométriques. Ce matériau donne à 95 % de l'OPM un CBR allant de 115 à 158.

Une étude de lithostabilisation visant à traiter les latérites de mauvaise qualité a été menée. Ainsi, la latérite de Sindia a été traité avec le 0/31,5 calcaire de Bandia. En faisant des ajouts de 10, 20, 30 % de 0/31,5 les résultats suivants ont été obtenus :

- 70 % latérite + 30 % de 0/31,5 calcaire avec un CBR de 113 à 120 % pour une compacité de 95 % ;
- 80 % latérite + 20 % de 0/31,5 calcaire qui donne un CBR allant de 108 à 119 à 95 % de l'OPM ;
- 90 % latérite + 10 % de 0/31,5 calcaire de CBR 106 à 95 % de l'OPM.

Avec la lithostabilisation le CBR de la latérite passe de 57 à 95 % de 0/31,5 à 120 à 30 % de calcaire.

Des catalogues d'utilisation sont proposés pour les meilleures formulations. Et des recommandations pour une bonne mise en oeuvre des différents matériaux sont formulés.

Pour terminer cette étude, une évaluation économique appliquée au futur projet Diamniado-Kaolack est faite pour mieux défendre l'utilisation du concassé de calcaire en couche de base.

TABLES DES MATIERES

MATIERE	PAGE
Remerciement.....	I
Sommaire.....	II
Table des matières.....	III
Liste de figures.....	IX
liste des tableaux.....	X
Introduction.....	1
CHAPITRE I : STRUCTURE DES CHAUSSEES AU SENEGAL	
1.1 : Généralités sur la conception des chaussées.....	3
1.2 : Caractéristiques géométriques des routes.....	3
1.3 : Ressources en matériaux.....	4
1.3.1 : Roche en place.....	5
1.3.2 : Formations latéritiques.....	5
1.3.3 : Sables.....	6
1.4 : Rétropectives des différents matériaux utilisés en couche de base au Sénégal.....	6
1.4.1 : Utilisation de graveleux latéritique cru.....	7
1.4.2 : Graveleux latéritiques améliorés au ciment.....	7
1.4.3 : Empierrement ou Macadam.....	8
1.4.4 : Sable stabilisé au ciment.....	8
1.4.5 : Sable stabilisé au liants hydrocarbonés.....	9
1.4.6 : Banco-coquillage cru.....	9
1.4.7 : Banco-coquillage amélioré au ciment.....	10
1.4.8 : Matériaux divers.....	10
1.4.9 : Conclusion.....	10
1.5 : Propositions de stratégies de résolution aux problèmes des matériaux.	11

CHAPITRE II : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

2.1 : Généralités sur les matériaux utilisés en couche de base.....	13
2.2 : Rôle des différentes caractéristiques d'un matériau utilisé en couche de base.....	15
2.2.1 : La granulométrie.....	15
2.2.2 : Propreté des matériaux : les fines dangereuses.....	17
2.2.3 : Comportement aux agents météoriques.....	18
2.2.4 : Comportement au compactage et à la circulation.....	19
2.3 : Généralités sur les matériaux de carrière.....	20
2.4 : Prescriptions techniques des concassés utilisés en couche de base.....	21

CHAPITRE III : ETUDES TECHNIQUES

3.1 : Composition chimique du calcaire de Bandia.....	25
3.2 : Identification des matériaux.....	26
3.2.1 : Caractéristiques physiques.....	26
3.2.2 : Caractéristiques mécaniques.....	27
3.2.3 : Analyse et interprétation des résultats obtenus.....	27
3.3 : Etude du matériau 0/40 tout venant de concassage.....	28
3.3.1 : Utilisation 0/40 TV seul.....	28
3.3.1.1. : Présentation des résultats d'essais.....	28
3.3.1.1.1 : Analyses granulométriques et sédimentométriques..	29
3.3.1.1.2 : Indice de plasticité.....	29
3.3.1.1.2.1 : limite de liquidité WL.....	29
3.3.1.1.2.2 : limite de plasticité.....	29
3.3.1.1.2.3 : Indice de plasticité.....	29
3.3.1.1.3 : Equivalent de sable.....	29
3.3.1.1.4 : Proctor.....	29
3.3.1.1.4 : Essai CBR.....	30
3.3.1.2 : Analyse et Interprétation des résultats.....	31
3.4. : Etude de la stabilisation du 0/40.....	33

3.4.1 : Analyse granulométrique des différentes fractions de calcaire disponibles.....	33
3.4.2 : Etude de la formulation respectant le fuseau de Talbot.	34
3.4.2.1 : Essais réalisés sur le matériau obtenu.....	35
3.4.2.2 : Analyse et interprétation des résultats.....	35
3.4.3 : Etudes des mélanges 0/40 + 0/2.....	36
3.5 : Etude du matériau 0/31,5.....	38
3.6 : Etude de la lithostabilisation latérite-calcaire.....	39
3.6.1 : Objectifs de l'étude.....	39
3.6.2 : Etude des matériaux utilisés.....	40
3.6.2.1 : Latérite de Sindia.....	40
3.6.2.2 : Concassé de calcaire 0/31,5 de Bandia.....	41
3.6.3 : Etude des différents mélanges.....	41
3.6.4 : Analyse et Interprétation des résultats.....	42
3.7 : Conclusion.....	43
3.8 : Essai de catalogage de superstructures des différents matériaux retenus.....	44
3.8.1 : Hypothèses et paramètres pour le calcul des contraintes.....	45
3.8.1.1 : Classes de trafics.....	45
3.8.1.2 : Classes de sols d'assises.....	45
3.8.1.3 : Corps de chaussées.....	46
3.8.1.3.1 : Revêtement.....	46
3.8.1.3.2 : Couche de base.....	47
3.8.1.3.3: Couche de fondation.....	48
3.8.1.3.4 : Sol d'assise.....	48
3.8.1.3.5 : les charges sur les corps de chaussée.....	48
3.8.2 : Vérification du nombre de cycles de charges admissibles.....	49
3.8.2.1 : Résultats donnés par le programme Alizé III.....	49
3.8.2.2 : Rupture par poinçonnement du sol d'assise.....	49
3.8.2.3 : Rupture par fissuration de l'enrobé.....	49
3.8.2.4 : Orniérage limite.....	50

3.8.2.4.1 : Calcul du temps de mise en charge.....	51
3.8.2.4.2 : Répartition du trafic selon les saisons.....	52
3.8.2.5 : Calcul de la durée de vie de la superstructure constitué par les différents matériaux.....	53
CHAPITRE IV : RECOMMANDATION POUR LA MISE EN OEUVRE DES MATERIAUX	
4.1 : Exploitation des matériaux (concassés) en carrière.....	55
4.2 : Mise en réserve des granulats au niveau du chantier.....	56
4.3 : Procédés de mélanges des différents granulats.....	57
4.4 : Répandage des matériaux.....	57
4.4.1 : Opérations préliminaires.....	57
4.4.2 : Répandage des matériaux.....	58
4.5 : Compactage à la teneur en eau.....	59
4.5.1 : Ajustement à la teneur en eau.....	59
4.5.1.1 : Teneur en eau naturelle inférieure à la teneur en eau optimale.....	60
4.5.1.1.1 : Mélange en place.....	60
4.5.1.1.2 : Mélange en centrale.....	60
4.5.1.1.2 : Teneur en eau naturelle supérieure à la teneur en eau optimale.....	60
4.5.2 : Compactage.....	61
CHAPITRE V : ANALYSE ECONOMIQUE	
5.1 : Hypothèses de calcul.....	62
5.2 : Devis estimatif des différents matériaux.....	64
5.3 : Application au projet Diamniadio-Kaolack.....	69
5.4 : Analyse et Interprétation des résultats.....	71
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	73

ANNEXES

- Annexe A* : Etude du 0/40 cru calcaire
- Annexe B* : Formulation 701020 calcaire
- Annexe C* : Etude des mélanges 0/40 + 0/2
- Annexe D* : Etude du 0/31,5 calcaire
- Annexe E* : Etude de la lithostabilisation

LISTE DES FIGURES

N°	TITRE
3.1	Courbes granulométriques du 0/40 calcaire
3.2	0/40 moyenne avec fuseau de Talbot
3.3	Courbes granulométriques des différentes fractions de calcaire
3.4	Formulation 701020 C avec fuseau de Talbot
3.5	Courbes granulométriques des mélanges 0/40 + 0/2 calcaire
3.6	Evolution des différentes propriétés du matériau 0/40 avec l'ajout de 0/2
3.7	0/31,5 ; 7030C avec fuseau de Talbot
3.8	Courbes granulométriques des mélanges latérites + 0/31,5 calcaire
3.9	Evolution des différentes propriétés de la latérite avec l'ajout du calcaire
3.10	Variation du déviateur de contraintes dans le revêtement pour les températures 50 °C et 20 °C

LISTE DES TABLEAUX

N°	TITRE
2.1	Recommandation d'utilisation des matériaux de la couche de base par le CEBTP
2.2	Fuseaux recommandé par le CEBTP
3.1	Résultats essais chimiques
3.2	Caractéristiques physiques du calcaire
3.3	Coefficient de forme des fractions de calcaire disponibles
3.4	Caractéristiques mécaniques du calcaire
3.5	Résultats statistiques de l'équivalent de sable
3.6	Résultats de l'essai proctor
3.7	Résultats de l'essai CBR
3.8	Résultats d'essais effectués sur le matériau (0/40 + 3/8 + 0/2)
3.9	Résultats d'essais effectués sur les différents mélanges 0/40 et 0/2
3.10	Résultats d'essais effectués sur le matériau (0/31,5 + 15/25)
3.11	Résultats d'essais des différents mélanges latérite - calcaire
3.12	Catalogue pour la formulation 8020 C
3.13	Catalogue pour la formulation 7030 C
3.14	Catalogue pour la formulation 7030 LC
3.15	Catalogue pour la formulation 8020 LC

INTRODUCTION

Le Gouvernement Sénégalais a entamé depuis ces dernières années un vaste programme de construction et de renforcement des infrastructures de transport dénommé Programme d'Ajustement Structurel des Transports (PAST). Beaucoup de fonds sont aujourd'hui mobilisés afin d'accroître et de renforcer le réseau existant. L'importance de ces investissements est principalement liée aux quantités de matériaux à utiliser dans le cadre de ce programme. Les coûts de transport augmentent considérablement et les carrières de matériaux de bonne qualité se font de plus en plus rares. Au Sénégal, la latérite est le matériau de référence en construction routière. Elle a l'avantage d'une part d'être en gisement d'extension importante affleurant dans toute la zone tropicale et d'autre part d'être d'une exploitabilité facile.

Aujourd'hui, face à la demande de plus en plus accrue de matériau de construction, aux coûts de transport de plus en plus élevés, à la raréfaction des matériaux latéritiques de bonnes qualités, l'état Sénégalais par l'intermédiaire de la Direction des Travaux Publics a initié de nouveaux thèmes de recherches axés sur la découverte de matériaux de substitution et de recyclage industriel.

Ainsi, à l'instar des études faites sur le basalte et sur le silex, il sera question de voir à travers cette étude les possibilités d'utilisation du concassé de calcaire de Bandia en couche de base.

Pour bien mener cette étude, il sera tout d'abord question de :

- faire l'état de la structure des chaussées en faisant une rétrospective sur les différents matériaux utilisés en couche de base et proposer des solutions quant aux problèmes de raréfaction des matériaux routiers ;

- une étude bibliographique pour voir les différentes prescriptions techniques relatives à l'utilisation des concassés ;
- une étude technique pour étudier les différentes possibilités d'utilisation du concassé de calcaire en couche de base ;
- des recommandations pour une bonne mise en oeuvre des différents matériaux seront formulées ;
- une évaluation économique des différents matériaux trouvés, étude dans laquelle des propositions concrètes et des recommandations en vue d'une éventuelle utilisation du concassé de calcaire de Bandia en couche de base seront dégagées.

CHAPITRE I

STRUCTURE DES CHAUSSEES AU SENEGAL

CHAPITRE I : STRUCTURE DES CHAUSSÉES AU SÉNÉGAL

1.1- Généralités sur la conception des chaussées

D'une manière générale les chaussées au Sénégal n'ont pas fait l'objet d'un calcul de dimensionnement précis. La méthode CBR, l'une des méthodes empiriques, donc fondée sur une observation expérimentale des chaussées et de leur comportement sous trafic a été utilisée. En effet, l'intensité de la circulation a toujours été faible au point de ne pas permettre l'application d'une méthode rigoureuse de dimensionnement à partir du trafic, ce qui aurait donné des résultats sans précision aucune. Les sols de fondation étant généralement sableux et présentant un CBR supérieur à 20 % à une compacité égale à 95 % de l'OPM, la solution économique a consisté à exécuter une couche de base de 15 à 20 cm d'épaisseur en matériaux graveleux ayant un CBR supérieur à 80 à 95 % de l'OPM. Cette couche de base est revêtue d'un tapis bicouche ou en enrobé bitumineux.

De nos jours, si la méthode CBR reste encore valable pour certains axes secondaires, caractérisés par la faiblesse de leur circulation, une ère nouvelle vient de naître par les axes principaux et qui voit l'application des méthodes modernes de dimensionnement, dans le cadre du renforcement des chaussées.

1.2- Caractéristiques géométriques des routes

Le Sénégal présente un relief peu accidenté. Le profil en long des routes épouse la forme du terrain naturel, ce qui permet d'éviter les gros travaux de terrassement . Les déclivités dépassent rarement 5 %. Les courbes en rayon oscillants sont supérieurs à 150 m en profil en long et à 500 m en plan.

Ces caractéristiques avec une route en bon état, permettent d'atteindre des vitesses élevées.

En profil en travers, les axes à grande circulation comprennent une plateforme de 10 m de largeur ainsi composée :

- une chaussée à deux voies de 7 m de largeur ;
- deux accotements de 1,50 m de large ;
- un profil de chaussée à deux versants ayant une pente de 2,5 à 3 %.

1.3- Ressources en matériaux

Au Sénégal, il existe plusieurs ressources en matériaux routiers de diverses qualités. Cependant, le choix de tel ou tel matériau se fera toujours suivant deux critères en général contradictoires :

- d'un côté, répondre aux nécessités techniques ;
- de l'autre, se plier aux contraintes économiques.

Ainsi, l'ingénieur routier est souvent amené à utiliser des matériaux qui, s'ils ne présentent pas des qualités respectant les normes requises seront alors caractérisés par une certaine particularité.

De ce fait, les contraintes que constituent le choix du matériau, sa préparation, son traitement et sa mise en oeuvre sont fortement tributaires des conditions telles que le climat, le trafic, etc...

Dans le contexte géologique du Sénégal, on rencontre quatre grandes catégories de ressources de matériaux :

- les roches en place ;
- les formations latéritiques
- les sols sédimentaires ou d'origine éolienne, de nature essentiellement sableuse ;
- puis les ressources particulières en quantité plus limitée telles que les coquillages et les scories volcaniques.

1.3.1- Roche en place

Elles sont constituées soit de granites, de gneiss et de schistes, soit de roches plus résistantes telles que les basaltes, les calcaires ou les quartzites dont l'emploi débute actuellement à assez grande échelle. Dans la région de Dakar et Thiès, se trouvent en général les basaltes et les calcaires.

1.3.2- Formations latéritiques

Les formations latéritiques représentent les plus abondantes ressources de matériaux "économiques" disponibles au Sénégal en particulier et en Afrique tropicale et Equatoriale en général.

Ce sont des formations argilo-graveleuses dont les éléments grossiers sont constitués soit de concrétions latéritiques de dureté variable soit de grains de quartz latéritisés à divers degrés, mais néanmoins résistants.

Dans le cadre de leur utilisation en construction routière, on peut signaler brièvement les problèmes particuliers suivants :

- la minceur et les variations d'épaisseur des bancs exploitables peuvent rendre l'extraction au bull ou au scraper extrêmement délicate, car il y a risque de mordre dans les argiles d'altération sous-jacente ;
- les divers degrés que peut atteindre l'évolution du processus de latérisation des concrétions latéritiques entraînent des variations souvent importantes dans la dureté ou la susceptibilité à l'attrition des agrégats.

1.3.3- Sables

On trouve dans les régions du littoral, des sables plus ou moins argileux d'origine sédimentaire, ou alors des sables fins et peu plastiques d'origine éolienne ; tel est le cas, dans la zone Nord du Sénégal.

Les gisements couvrent généralement des étendues relativement grandes et leur puissance peut dépasser plusieurs mètres.

Les sables sont utilisables en couche de base après avoir été soumis à une amélioration soit aux liants hydrauliques (sol-ciment), soit aux liants hydrocarbonés (sable-bitume).

Au niveau des ressources particulières, il existe les coquillages qu'on trouve principalement dans le Sud (en Basse-Casamance), dans le Nord (le long du fleuve Sénégal) au centre-ouest dans la région de Thiès (à Joal-Fadiouth) et dans les îles du Saloum ; les scories volcaniques, les pouzzolanes et les laves qui se trouvent principalement dans la région du Cap-Vert et dans la partie ouest de la région de Thiès.

1.4- Retrospective des différents matériaux utilisés en couche de base au Sénégal

L'importance des efforts qui sollicitent la couche de base exige des caractéristiques beaucoup plus sévères des matériaux qui la constituent que de ceux utilisés pour la fondation. Dans les régions pauvres en matériau, il a été ainsi procédé à une stabilisation des sols naturels pour éviter les longues distances de transport, source de dépenses considérables.

1.4.1- Utilisation de graveleux latéritique cru.

Le graveleux latéritique est de loin, le matériau le plus utilisé pour la constitution des couches de base des chaussées au Sénégal. Il n'est pas surprenant de constater que, dès les premières phases d'étude d'un projet routier, la technique à priori retenue pour la constitution d'une couche de base prévoit l'utilisation de graveleux latéritique ; cela s'explique par le fait qu'en matière de travaux routiers, c'est le matériau le plus répandu dans le pays. Seulement, la question qui se pose toujours, est de savoir si dans la localité considérée, le graveleux latéritique présente des caractéristiques incluses dans les fourchettes définissant les normes traditionnelles. Les critères habituellement retenus au Sénégal pour l'utilisation d'un graveleux latéritique cru en couche de base sont les suivants :

- IP inférieur à 15 ;
- % d'éléments inférieurs à 80μ , inférieur à 20 ;
- CBR supérieur ou égal à 80 % à 95 % de l'OPM après 96 heures d'imbibition.

1.4.2- Graveleux latéritique amélioré au ciment

Lorsque les caractéristiques du graveleux latéritique sont insuffisantes pour qu'il soit utilisé cru, la technique du traitement au ciment est couramment employée.

Il existe deux types très différents de traitement : l'amélioration d'une part et la stabilisation d'autre part. En fait, la différence entre les deux types de traitement ne repose que sur la différence des pourcentages de liants utilisés.

Aux problèmes d'exploitation du matériau s'ajoutent des problèmes de mise en oeuvre très délicate :

- le répandage
- le mélange

- le temps de prise du ciment utilisé est souvent court.

Cependant, dans l'ensemble, les couches de base en graveleux latéritiques amélioré au ciment, mises en oeuvre sur une plateforme soigneusement compactée ayant un CBR acceptable (supérieur à 20 %) ont eu un comportement adéquat.

1.4.3- Empierrement ou Macadam

Cette technique abandonnée à présent a été très peu utilisée et s'est limitée aux régions de Dakar et de Thiès.

1.4.4- Sable stabilisé au ciment

La première expérience a eu lieu en 1960 sur le tronçon Géoul-Louga-Baralé de la route Nationale n° 2, dans une région remarquablement pauvre en matériaux routiers.

Le sable a été stabilisé avec 8 % de ciment. Dans ces conditions, la résistance à la compression prend une valeur minimale de 25 bars à 28 jours. Il y a lieu de ne pas perdre de vue une éventuelle rupture en flexion qui peut se produire à la partie inférieure de la couche stabilisée.

En effet, le tronçon Géoul-Baralé a fait l'objet de rupture généralisé en flexion (effet de dalle), bien que les études et contrôles aient mis en évidence des résistances à la compression tout à fait satisfaisantes.

Ainsi, du fait de la pauvreté en matériaux routiers, une stabilisation de sable au ciment est à priori séduisante, mais malheureusement peu adaptée à la réalisation de la couche de base ; de nos jours, cette technique est abandonnée.

1.4.5- Sable stabilisé aux liants hydrocarbonés

Cette technique qui a été utilisée sur les tronçons Thiadiaye-Kaolack et au niveau de la RN3 sur 24 km (PK 6,5 - Sagatta) a donné satisfaction.

Dans le cadre du PAST, un tronçon expérimental a été réalisé sur le tronçon Géoul-Baralé ; du fait de considérations économiques, cette technique ne peut être retenue de nos jours, quoique séduisante pour les zones pauvres en graveleux.

1.4.6- Banco-coquillage cru

On les localise en bordure de mer ou plus généralement de lagune ; leur puissance est très variable. On en trouve aussi dans les régions de Casamance surtout dans la partie sud du Fleuve Sénégal et du Sine-Saloum (Iles du Saloum).

La réalisation de la couche de base en banco-coquillage est une technique originale au Sénégal et également en Mauritanie.

Les critères d'utilisation du banco-coquillage sont les suivants :

- IP inférieur à 20
- % d'éléments inférieurs à 80 μ , inférieur à 20 ;
- CBR supérieur ou égal à 80 à 95 % de l'OPM après 96 heures d'imbibition.

La mise en oeuvre est identique à celle du graveleux latéritique. Les couches de base en banco-coquillage ayant des caractéristiques acceptables et correctement mises en oeuvre, ont un comportement satisfaisant pour les routes économiques supportant un trafic faible.

1.4.5- Sable stabilisé aux liants hydrocarbonés

Cette technique qui a été utilisée sur les tronçons Thiadiaye-Kaolack et au niveau de la RN3 sur 24 km (PK 6,5 - Sagatta) a donné satisfaction.

Dans le cadre du PAST, un tronçon expérimental a été réalisé sur le tronçon Géoul-Baralé ; du fait de considérations économiques, cette technique ne peut être retenue de nos jours, quoique séduisante pour les zones pauvres en graveleux.

1.4.6- Banco-coquillage cru

On les localise en bordure de mer ou plus généralement de lagune ; leur puissance est très variable. On en trouve aussi dans les régions de Casamance surtout dans la partie sud du Fleuve Sénégal et du Sine-Saloum (Iles du Saloum).

La réalisation de la couche de base en banco-coquillage est une technique originale au Sénégal et également en Mauritanie.

Les critères d'utilisation du banco-coquillage sont les suivants :

- IP inférieur à 20
- % d'éléments inférieurs à 80 μ , inférieur à 20 ;
- CBR supérieur ou égal à 80 à 95 % de l'OPM après 96 heures d'imbibition.

La mise en oeuvre est identique à celle du graveleux latéritique. Les couches de base en banco-coquillage ayant des caractéristiques acceptables et correctement mises en oeuvre, ont un comportement satisfaisant pour les routes économiques supportant un trafic faible.

1.4.7- Banco-coquillage amélioré au ciment

Cette technique a été retenue lorsque le banco coquillage ne répondait pas aux spécifications exigées en couche de base. La portance, de l'ordre de 60 % était alors insuffisante.

Il y a lieu de dégager la similitude qui, dans ce cas, lie autant les caractéristiques acceptables des matériaux que sont le graveleux latéritique amélioré au ciment et le banco coquillage amélioré au ciment, que les problèmes et précautions liés à leur mise en oeuvre.

Le comportement des couches de base en banco-coquillage amélioré au ciment est satisfaisant, quoique dans certains cas une certaine tendance à la fissuration se manifeste.

1.4.8- Matériaux divers

Il s'agit essentiellement du sable calco-marneux stabilisé au colsol. Cette technique a été utilisée sur les quatre centimètres supérieurs des tronçons Diokoul-Mer sur 27 km et Géoul-NGourane sur 7 km dans la région de Louga pour la réalisation de leur couche de base.

Quoique peu circulées, les routes dont les couches de base ont été réalisées avec cette technique ont eu une durée de vie relativement courte.

1.4.9- Conclusion

Cette étude rétrospective montre que le choix d'un matériau a toujours posé problème aux ingénieurs routiers. De tous ces matériaux expérimentés seule la latérite est encore d'un usage généralisé. Malheureusement aujourd'hui, les latérites de bonne qualité deviennent de plus en plus rares et les carrières sont souvent éloignées des chantiers. Ceci est dû à leur répartition géographique inégale. Par exemple, les régions de Tambacounda, Bakel et Kédougou sont

riches en gisements latéritiques contrairement à celle de Louga qui en est presque dépourvue.

Aujourd'hui, il s'impose comme défi aux ingénieurs routiers de promouvoir de nouveaux matériaux dont l'utilisation pourrait permettre d'optimiser les investissements lourds que l'Etat sénégalais ne cesse de consentir pour renforcer et accroître le réseau routier.

1.5- Proposition de stratégies de résolution des problèmes de matériaux

Les sables et les ressources particulières composées des coquillages, des scories volcaniques, des pouzzolanes et les laves n'ont pas donné des résultats satisfaisants. Les formations latéritiques les plus abondantes au Sénégal, de par leur mauvaise qualité ne peuvent être utilisées aujourd'hui sans au préalable être soumis à une amélioration au ciment. Ces mélanges posent de sérieux problèmes de mise en oeuvre.

Face à cette situation, le seul remède est le recours à l'utilisation des roches en place. Ainsi, beaucoup d'études sont en train d'être menées pour voir les possibilités d'utilisation de ces dernières.

- ☛ le concassé de silex étudié à l'Ecole Polytechnique de Thiès peut donner, du point de vue portance, un résultat satisfaisant pour être utilisé en couche de base. Et ce pourvu que les problèmes de forme soient résolus ;
- ☛ Avec le projet d'élargissement de la branche Est de l'Autoroute le concassé de basalte est en expérimentation. Ainsi, le procédé consistant à réduire la contamination du 0/40 tout venant par vannage et à corriger sa granulométrie avec du 0/3 a permis d'obtenir des CBR de l'ordre de 200 % à 98 % de l'OPM ;

☛ C'est dans ce sens que le concassé de calcaire va être l'objet de notre étude. Il sera question de voir ses possibilités d'utilisation en couche de base. la lithostabilisation sera également étudiée.

Nous recommandons, dans la même politique de recherche de nouveaux matériaux, que des études soient faites sur le marno-calcaire de Louga, la dolérite de Tambacounda et le banco-coquillage du Sud de la Casamance.

CHAPITRE II

ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE II : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

2.1- Généralités sur les matériaux utilisés en couche de base

Les efforts, largement diffusés par les revêtements modernes, sont supportés et transmis au sol grâce soit au frottement entre grains, soit à la cohésion, soit parfois grâce aux deux facteurs.

Ces efforts, dépendamment de l'importance et de la qualité des couches supérieures, seront plus ou moins dangereux. Ainsi, il convient de séparer nettement les chaussées dont la couche de base est simplement recouverte d'un enduit superficiel et celle dont la couche de base est surmontée de couches de surface épaisses. La stabilité pour le premier peut être mis en danger par le poinçonnement sous des pneus de camions.

Les matériaux mal gradués constituent des couches de base correctes pour des chaussées importantes, mais ne conviennent pas sous de simples enduits superficiels. Ainsi, il y a lieu d'être au moins aussi strict, sinon plus par rapport aux critères de qualité des matériaux destinés à constituer une couche de base. En effet, ces matériaux peuvent présenter, entre autres, les critères suivants :

- Granulométrie convenable permettant d'éviter lors des manipulations la ségrégation des matériaux qui doivent en plus constituer une couche facile à régler tout en présentant, par frottement interne, une bonne résistance aux efforts ;
- constitué d'agrégats d'autant plus durs et résistants que les efforts dans la couche considérée sont élevées et que leur répétition est importante. il faudra éviter la fragmentation continue des agrégats qui produisent des

fines risquant de transformer petit à petit un gravier en sable beaucoup moins stable ;

- comportant le moins de fines argileuses possibles. Ces dernières sont dangereuses. Elles peuvent faire chuter le frottement interne. Dès lors, la couche incriminée se déformera comme un liquide visqueux et sera le siège d'ornières ;
- la stabilité mécanique doit être aussi indépendante que possible des conditions climatiques et notamment de la teneur en eau ;
- Présentant une compactibilité acceptable, c'est-à-dire se mettant facilement en place et n'ayant pas de courbe de Proctor trop pointue.

Lorsqu'on trouve en gisement ou en carrière un matériau répondant à toutes ces exigences, il n'est nul besoin de chercher mieux. Si malheureusement tel n'est pas le cas, on peut être tenté de "stabiliser" le matériau dont on dispose. On distingue alors :

- la stabilisation mécanique qui consiste à modifier la granulométrie, soit par apport d'un autre matériau inerte, soit par criblage, soit par élimination de tranches excédentaires et reconstitutions ;
- la stabilisation chimique, qui consiste, selon le cas, à :
 - * conférer la cohésion à un matériau dont le frottement interne est insuffisant (graves maigres traitées au ciment et au bitume) ;
 - * rendre hydrophobe des matériaux sensibles à l'eau (traitement au bitume ou à des agents plus complexes) ;

- * neutraliser par échange ionique des fines argileuses nocives (chaux, ciment) ;
- * augmenter la compactibilité des fines par des agents dispersants.

Il faut noter que bien souvent, certaines techniques se rattachent à plusieurs des catégories précédentes. Un traitement au bitume, par exemple est hydrophobant et cohésifère.

2.2- Rôle des différentes caractéristiques d'un matériau utilisé en couche de base

2.2.1- La granulométrie

La granulométrie intervient suivant trois facteurs : le pourcentage de fines, le calibre des gros éléments et la forme de la courbe granulométrique. Sa permanence aussi intervient également dans le temps et dans l'espace, c'est-à-dire la régularité du gisement et la dureté de la roche.

* La forme de la courbe granulométrique conditionne l'aptitude au compactage, l'absence de ségrégation et la compacité du matériau compacté. Plus les contacts entre grains seront nombreux, plus la couche sera stable. Plus le matériau sera compact, moins on risquera de voir se produire des déplacements des grains et par suite des tassements. Les courbes présentant de véritables discontinuités sont l'indice de matériaux reconstitués, soit artificiellement en carrière, soit par le travail d'érosion et de transport naturels. Ces matériaux peuvent présenter une bonne compacité et être stables. Mais, si la ou les discontinuités sont trop importantes ils ségrégeront et si elles ne sont pas régulières, le matériau présentera des variations de compacité et d'aspect après compactage, donc de résistance au poinçonnement.

* Le calibre supérieur joue un rôle important, car il conditionne à la fois la ségrégation et l'épaisseur de couche répandue. La ségrégation est le phénomène de séparation des grains de tailles, sorte de criblage naturel, qui conduit à des hétérogénéités granulométriques préjudiciables à la tenue de la chaussée. L'aspect le plus connu de ce phénomène est l'accumulation des gros grains au pied des tas constitués par déversement de bennes de camions ou de tout autre engin.

Un autre aspect fréquent est la formation d'un cordon de gros grains laissé par la lame d'une niveleuse, lorsque les gros grains sont trop gros pour passer sous la lame. Les gros grains sont généralement soumis à deux sortes de forces lors de manipulations : la pesanteur et les chocs et frottement des grains voisins. Les efforts de la deuxième sorte sont relativement d'autant plus importants que la surface offerte aux divers contacts est grande. C'est pourquoi les matériaux ségrègent en général par classement gravitaire, les plus gros grains ont tendance à se séparer davantage de l'ensemble et cela d'autant plus qu'ils sont plus gros.

Il est donc d'un grand intérêt de limiter le calibre supérieur à une valeur faible. Comme ceci conduit à une augmentation du prix de matériaux concassés et que, d'autre part, il serait dangereux de descendre jusqu'aux gros sables, on s'arrête en général à 50 mm pour les couches de base ;

* Le pourcentage de fines, ou filler, c'est-à-dire d'éléments passant 80 μm joue un rôle important. Si ce pourcentage est nul ou simplement insuffisant, le matériau est peu compact, difficile à serrer s'il n'est pas concassé. S'il est excessif il y a formation de boue au compactage ; les fines peuvent nécessiter un arrosage important et parfois manifester une tendance à se déformer à volume

constant sous les cylindres, c'est-à-dire à former un coussin de caoutchouc en cas d'excès d'eau.

La granulométrie de ces fines, et surtout leur nature minéralogique, jouent un rôle. Il est admis en général que le pourcentage des fines doit rester compris entre 5 et 15 %.

* Un facteur du deuxième ordre, mais qui n'est pas toujours négligeable, est la forme des grains et la dureté de la roche. Des matériaux entièrement concassés, très argileux et de roche très dure, ne se mettent pas toujours facilement en place. La compacité après compactage peut ne pas être élevée, à moins que la granulométrie ne soit reconstituée, par exemple.

A cet égard, les graves concassés ou semi-concassés, qui comportent une fraction importante de sable rond, sont plus maniables et plus aisément compactable.

Il est également possible de corriger un matériau concassé par adjonction d'un sable roulé (sable de rivière par exemple) qui facilite le compactage.

2.2.2- Propreté des matériaux : Les fines dangereuses

La connaissance du pourcentage d'éléments passant au tamis de 80 μm ne suffit pas pour caractériser un matériau pour couche de base. Il faut encore savoir si ces particules fines sont inertes, c'est-à-dire constituent un simple filler minéral provenant du broyage de la roche par concassage ou érosion, ou s'il s'agit de particules actives. D'autre part, avant d'édicter des critères sur ce point, il faut également savoir si le risque de contact avec l'eau existe réellement, ou si on peut considérer qu'il est négligeable. La plasticité des fines

peut être caractérisée par la mesure de l'indice de plasticité et celle de l'équivalent de sable.

L'équivalent de sable (ES) est pour une argile donnée, un excellent moyen d'apprécier le pourcentage d'argile d'un matériau. Lorsque plusieurs gisements d'une même région ont une même origine géologique et que les équivalents de sable varient d'un gisement à l'autre, on peut alors séparer des gisements d'apparence identique. Toutefois, avant de fixer une valeur limite inférieure de l'ES, il est préférable de s'assurer, par des expériences limitées, des résultats bons ou mauvais de chacun d'eux.

L'essai qui peut être utilisé avec bénéfice pour caractériser à la fois la stabilité mécanique et la tenue à l'eau des matériaux pour corps de chaussée est l'essai CBR. C'est ainsi que le Génie américain l'ont adopté de préférence et n'utilise pas l'équivalent de sable. Mais l'essai d'ES est sinon très rapide, du moins beaucoup plus simple et nécessite moins de matériel de laboratoire. C'est un essai de chantier commode.

En adoptant l'essai, CBR comme moyen d'appréciation des qualités routières d'un matériau, il est possible d'essayer de mettre en évidence, à partir de matériaux reconstitués et d'origine variée, le rôle de la granulométrie, de l'équivalent de sable et des conditions de compactage.

2.2.3- Comportement aux agents météoriques

Sous l'effet des agents météoriques, c'est-à-dire essentiellement de l'eau et de la température, certains matériaux évoluent. Cette évolution est accélérée par les effets mécaniques de la circulation. Mais, indépendamment du morcellement mécanique, certains matériaux peuvent, en gisement, présenter des qualités apparemment satisfaisantes et, une fois mis en oeuvre, perdre ces qualités au

bout d'un temps qu'il est d'ailleurs toujours difficile de prévoir. D'autres au contraire peuvent voir leur stabilité accrue et sont le siège d'une véritable cimentation qu'il n'est pas toujours facile de prédire de façon certaine.

Il importe donc de bien séparer les matériaux qu'on peut appeler francs, c'est-à-dire qui ne réservent aucune surprise, de ceux qui risquent d'évoluer.

* L'eau intervient de trois façons principales : dissolution, gonflement, réaction chimique.

La dissolution intervient avec certains matériaux gypseux mais ne peut avoir de conséquences graves qu'en cas de contact prolongé entre le matériau et une nappe. Sinon le phénomène est très lent et ne présente guère de danger.

Le gonflement et la perte de cohésion consécutive, se manifeste avec certaines roches telles que les schistes et les marnes argileuses. A cet égard, les schistes sont des matériaux très dangereux. Ils se présentent parfois en bancs apparemment sains et durs. Ils nécessitent des explosifs pour être extraits et semblent pouvoir constituer des granulats routiers convenables. Mais fragmentés et mis en présence d'eau, ils peuvent lentement retourner à leur état original, c'est-à-dire à l'état de dépôt argileux, et ils perdent alors leur consistance.

L'eau peut aussi intervenir, comme agent d'érosion et d'entraînement des fines d'un matériau.

2.2.4- Comportement au compactage et à la circulation

Les matériaux pour corps de chaussées sont répandus sur la plate-forme, régalez et compactés. Le but du compactage est double.

D'une part, on cherche à serrer les grains entre eux pour augmenter la stabilité de la couche considérée ; d'autre part, on cherche à prévenir des tassements ultérieurs sous l'effet de la circulation par une diminution de la déformabilité du squelette minéral.

Ce serrage est obtenu par divers moyens (pétrissage, chocs, compression et ou vibration) mais son efficacité est fonction de la teneur en eau du matériau. L'eau joue le rôle de lubrifiant mais elle ne doit pas être en quantité excessive. La teneur en eau est évidemment fonction de la granulométrie, car la surface spécifique des granulats conditionne les besoins de lubrification. Plus cette surface est importante (granulométrie continue) plus il faut d'eau de mouillage.

Sous l'effet du compactage et surtout de la circulation, il est indispensable que les matériaux ne se fragmentent pas. Deux essais sont utilisés pour apprécier la résistance des granulats tant à l'attrition qu'aux chocs : l'essai Los Angeles et l'essai Deval.

2.3- Généralités sur les matériaux de carrière

Il s'agit des matériaux rocheux issus de l'exploitation des carrières classiques. Ils se classent de la façon suivante :

- **Matériaux tout venant de concassage** : ces matériaux s'apparentent à ceux provenant de ballastières. Ils sont obtenus également en alimentant un groupe de concassage, criblage à partir des matériaux d'abattage de la carrière. Comme eux ils contiennent tout ou partie des fines existant avant concassage. Ils constituent aussi une fraction importante des fondations et des couches de base modernes.

- Matériaux concassé à granulométrie continue : lorsqu'on sépare par criblage les éléments fins provenant de l'abattage et d'un concassage primaire (ces éléments fins pouvant en fait atteindre 20 voire 40 mm de diamètre) et qu'on concasse le refus au crible, on obtient un agrégat en général beaucoup plus propre et dont on peut davantage contrôler la granulométrie. Il est possible d'utiliser le résidu du criblage primaire en fondation et le matériau 0/D du concassage secondaire en couche de base.
- Matériaux concassés à granulométrie serrée. Si, à l'issue de l'opération précédente, on sépare le matériau 0/D en diverses fractions par tamisages successifs, on obtient toute une gamme de matériaux de concassage (sables, petits graviers, graviers, pierre cassée). La pierre cassée de calibre d/D constitue fréquemment une couche de base convenable.

2.4- Prescriptions techniques des concassés utilisés 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 portant
- leur stabilité
- la dureté de leur squelette
- la résistance à la traction des couches liées ou rigidifiées.

L'indice portant 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 T_1 .

La déformabilité de la couche de base sera vérifiée à partir de mesures de déflexions ou d'essais de plaque.

Les matériaux de la couche de base peuvent subir une forte attrition sous le trafic, spécialement lorsque celle-ci n'a pas été rigidifiée, car la résistance au cisaillement est alors entièrement reprise par le frottement des grains entre eux.

La résistance à la fragmentation et à l'attrition sera définie par l'essai Los Angeles (LA), l'essai micro Deval (MDE) ou l'essai anglais Aggregate Crushing Value (ACV). On retiendra les valeurs admissibles suivantes.

Tableau 1.1 : Recommandation d'utilisation des matériaux de la couche de base par le CEBTP.

	T ₁ - T ₃	T ₄ - T ₅
LA	< 45	< 30
MDE	< 15	< 12
DEV	< 32	< 25

N.B: T₁ - T₃ : l'essieu considéré est de 8 à 10 tonnes

T₄ - T₅ : l'essieu considéré est de 13 tonnes

Les spécifications pour T₄ T₅ seront adoptés pour les trafics T₁

- T₃ dont l'essieu considéré est de 13 tonnes.

Le diamètre maximum de grains doit être limité à 40 mm ; les fuseaux de spécification peuvent être les suivants, étant entendu que les courbes granulométriques doivent rester parallèles aux enveloppes du fuseau.

Tableau 2.2 : Fuseaux recommandés par le CEBTP

	% Passant	
	0/31,5	0/40
50 mm		100
40 mm	100	95 - 100
31,5 mm	95 - 100	85 - 97
20 mm	64 - 90	65 - 90
10 mm	40 - 70	40 - 75
6,3 mm	30 - 60	30 - 63
2 mm	20 - 42	20 - 45
0,5 mm	10 - 26	12 - 30
80 mm	2 (4) - 10	4 - 12

La plupart des recherches entreprises dans le domaine d'établissement des fuseaux ont adopté comme point de départ une forme analytique simple pour

la granulométrie :
$$\frac{P}{100} = \left(\frac{d}{D} \right)^{1/2}$$

D est le calibre maximum du granulat et P le pourcentage d'éléments passant au tamis de maille d.

Ces courbes appelées courbes de filler permettent d'avoir la compacité maximale.

L'indice de plasticité de ces matériaux est souvent nul. On admettra si tel n'est pas le cas :

$IP \leq 6$: pour les trafics T₁ et T₂

$IP = 0$: pour les trafics plus élevés

Le pourcentage de fines devra rester inférieur à 10 % (0/31,5) ou à 12 % (0/40), mais devra être 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 %.

L'équivalent de sable (ES) sera :

$ES \geq 30$: pour $T_1 - T_2$

$ES \geq 40$: pour $T_3 - T_4$

Pour la mise en oeuvre, le granulat sera mis en oeuvre au buteur, à la niveleuse ou au finisseur (pour les trafics T_3 et T_4 en couches d'épaisseur unitaire maximale de 25 cm qui seront compactées au rouleau vibrant lourd ($M/L > 30$ kg/cm) et au rouleau à pneus (charge par roue > 3 tonnes).

La surface de la couche de base sera fermée par une imprégnation au moyen d'un bitume fluidifié (cut-back 0/1 ou 10/15) suivi d'un sablage.

On devra obtenir au moins 98 % de la densité OPM. La teneur en eau sera comprise entre $W_{OPM} \pm 1$. Le pourcentage de vide total $n = 100 \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \right)$ devra rester inférieur à 13 %.

Les valeurs indicatives de la déflexion admissible sur ces matériaux sous essieu de 13 tonnes sont comprises entre 50/10 et 20/100 selon le trafic attendu (T_1 à T_4).

Les accotements devront être réalisés avec les matériaux identiques ou ayant une perméabilité au moins égale à celle du concassé afin d'assurer le drainage de la couche de base. La structure dite chaussée en baignoire doit être évitée.

CHAPITRE III

ETUDES TECHNIQUES

CHAPITRE III : ETUDES TECHNIQUES

3.1- Composition chimique du calcaire de Bandia

Des études faites par G Pezerel et M. DIAGNE en 1980 ont montré qu'à Bandia, les calcaires se présentent à l'affleurement sous la forme de gros blocs et de rognons profondément karstifiés et lapiazés.

Très durs, riche en débris coquilliers, ces calcaires sont actuellement exploités pour la production de granulats et pour la fabrication de chaux. Il existe des fronts de taille naturels le plus souvent à la faveur des ravins..

L'étude stratigraphique du gîte révèle l'existence de deux horizons distincts.

- L'horizon supérieur, représenté par des calcaires francs coquilliers et cristallins qui présentent toute une gamme de faciès intermédiaires allant jusqu'à des calcaires crayeux à grain fin faiblement fossilifères,
- l'horizon inférieur, caractérisé par l'apparition de niveaux siliceux riches en éléments détritiques

L'examen des différents profils géochimiques permet de constater qu'au niveau de l'horizon supérieur, la teneur en CaCO_3 varie très peu, autour d'une moyenne supérieure à 98,6 % tandis que la teneur moyenne en SiO_2 reste faible autour de 0,72 %. A l'inverse, l'horizon inférieur se caractérise par des teneurs faibles en CaCO_3 (64,26 % à 85,14 %) et des teneurs élevés en SiO_2 , pouvant atteindre 34,92 %. (source plan minéral volume 1 p 190).

Une analyse chimique réalisée sur les échantillons prélevés a donné les résultats suivants :

Tableau 2.1 : Résultats essais chimiques

Désignation	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PFeu
%	4,04	0,90	0,42	52,16	0,89	-	41,04

3.2- Identification des matériaux

3.2.1- Caractéristiques physiques

L'utilisation des matériaux pierreux s'appuie sur des critères de qualités relatifs aux propriétés physiques suivantes : Poids spécifique, masse volumique réelle, masse volumique apparente, propreté et le coefficient de forme.

Les essais pour la détermination de ces différents éléments ont permis d'obtenir les résultats suivants :

Tableau 3.2 : Caractéristiques physiques du calcaire

Désignation	Poids spécifique	Masse volumique réelle 10 kg/m ³	Masse volumique apparente 10 kg/m ³	Propreté
Valeur trouvée	2,70	2,12	2,50	1 %

Tableau 3.3 : Coefficient de forme des fractions de calcaires disponibles

Fractions	(L + l) / e	L/e
15/25	12,50	7,45
5/15	13,14	7,96
3/8	9,76	6,03

3.2.2- Caractéristiques mécaniques

La qualité mécanique des roches est souvent appréciée à partir de la résistance à la fragmentation et à l'attrition. Elles sont obtenues respectivement avec l'essai Los Angeles et l'essai Deval.

Des études effectuées par le CEREEQ, ont donné les résultats suivants :

Tableau 3.4 : Caractéristiques mécaniques du calcaire

Désignation	Los Angles	Deval Standard	Deval Modifié
Valeur	25	8,33	4,5

3.2.3- Analyse et Interprétation des résultats obtenus

- Un bon granulats ne doit pas contenir plus de 5 % d'impuretés. Les impuretés à la surface des grains peuvent compromettre l'adhérence liant-granulats et provoquer la chute de résistance mécanique. Avec une propreté de 1% le calcaire pourrait être considéré comme un granulats propre. Il se situe entre le silex (3%) et le basalte (0,62 %).
- Le coefficient de forme C_f , défini par les relations suivantes, donne le pourcentage d'éléments plats par rapport à l'ensemble du granulats $\frac{L + l}{E} > 6$ et $\frac{L}{E} > 0,40$ pour un bon granulats. Les valeurs trouvées pour les différents fractions montrent que les granulats de calcaire épousent des formes sphériques ou cubiques qui permettent une meilleure imbrication des différents éléments contribuant ainsi à l'augmentation des performance mécaniques du matériau.

- Selon les prescriptions techniques du CEBTP, le calcaire avec un Los angeles de 25 et un deval de 8,33 est un matériau apte à être utilisé en couche de base. En effet, ces valeurs sont inférieures aux maxima prescrits par le CEBTP.

Avec ces caractéristiques, le calcaire se présente sous une forme tendre. Cette classe de roche présente des limites car ne supportant pas des efforts répétés et s'use par attrition c'est-à-dire par frottement de grain à grain et par fragmentation. Cette usure diminue la rigidité de la couche de chaussée et sa résistance au poinçonnement en faisant chuter le frottement interne au niveau de la couche incriminée qui va se déformer comme un liquide visqueux et sera le siège d'ornière.

Pour parer ce phénomène, qui à long terme, entraîne une dégradation avancée de la chaussée, il serait prudent de fixer une limite inférieure au calibre supérieur de la fraction à utiliser. En général en couche de base, on s'arrête à 20 et 31,5 mm. La stabilisation au ciment pourrait être aussi une solution à ce problème car permettant de conférer de la cohésion et d'augmenter le frottement interne du matériau traité.

3.3- Etude du matériau 0/40 tout venant de concassage

3.3.1- Utilisation 0/40 TV seul

3.3.1.1- Présentation des résultats d'essais.

3.3.1.1.1- Analyses granulométriques et sédimentométriques.

Les analyses granulométriques et sédimentométriques ont été effectués suivant la norme ASTM D 422 - 63.

Elles ont été faites sur cinq (5) échantillons. Les courbes obtenues sont présentées à la figure 3.1. La courbe moyenne est présentée avec le fuseau de Talboot recommandé par le CEBTP à la figure 3.2

3.3.1.1.2- Indice de plasticité

Les limites d'Atterberg sont obtenues avec la norme ASTM D 2216-66.

3.3.1.1.2.1- Limite de liquidité W_L

Les détails des essais sont donnés en annexe.

La courbe $W = f(n)$ est tracée. Ainsi avec $N = 25$, il a été obtenue une valeur de W_L égale à : $W_L = 20,3 \%$

3.3.1.1.2.2- Limite de plasticité

Les résultats donnent en moyenne une limite de plasticité égale à $W_p = 15,8 \%$.

3.3.1.1.2.3- Indice de plasticité

Avec les essais des limites d'Atterberg, une valeur de $4,5 \%$ a été trouvée pour l'indice de plasticité.

N.B : *Les résultats détaillés des différents essais sont présentés à l'annexe A.*

3.3.1.1.3- L'équivalent de sable

L'essai de l'équivalent de sable a été réalisé suivant la norme ASTM D 2419.

Il a été effectué sur 10 échantillons qui ont donné les résultats suivants :

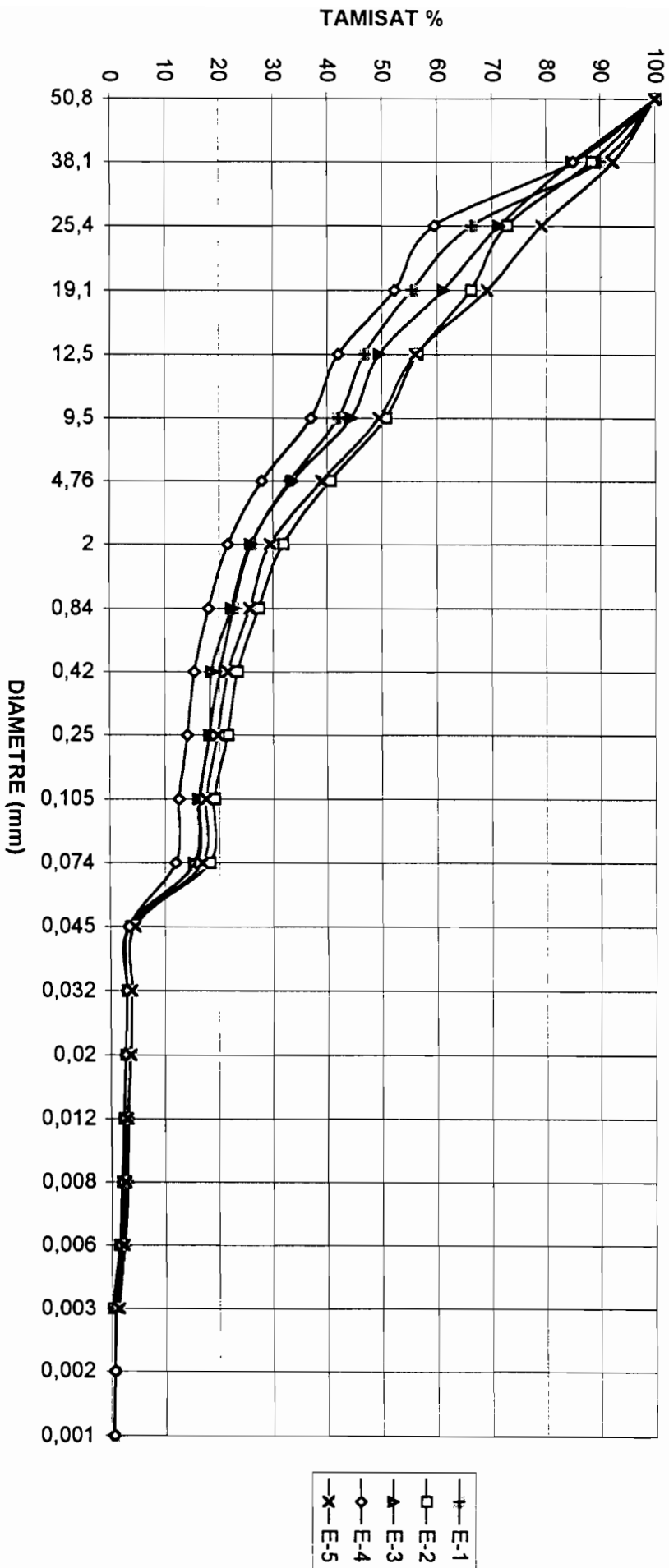
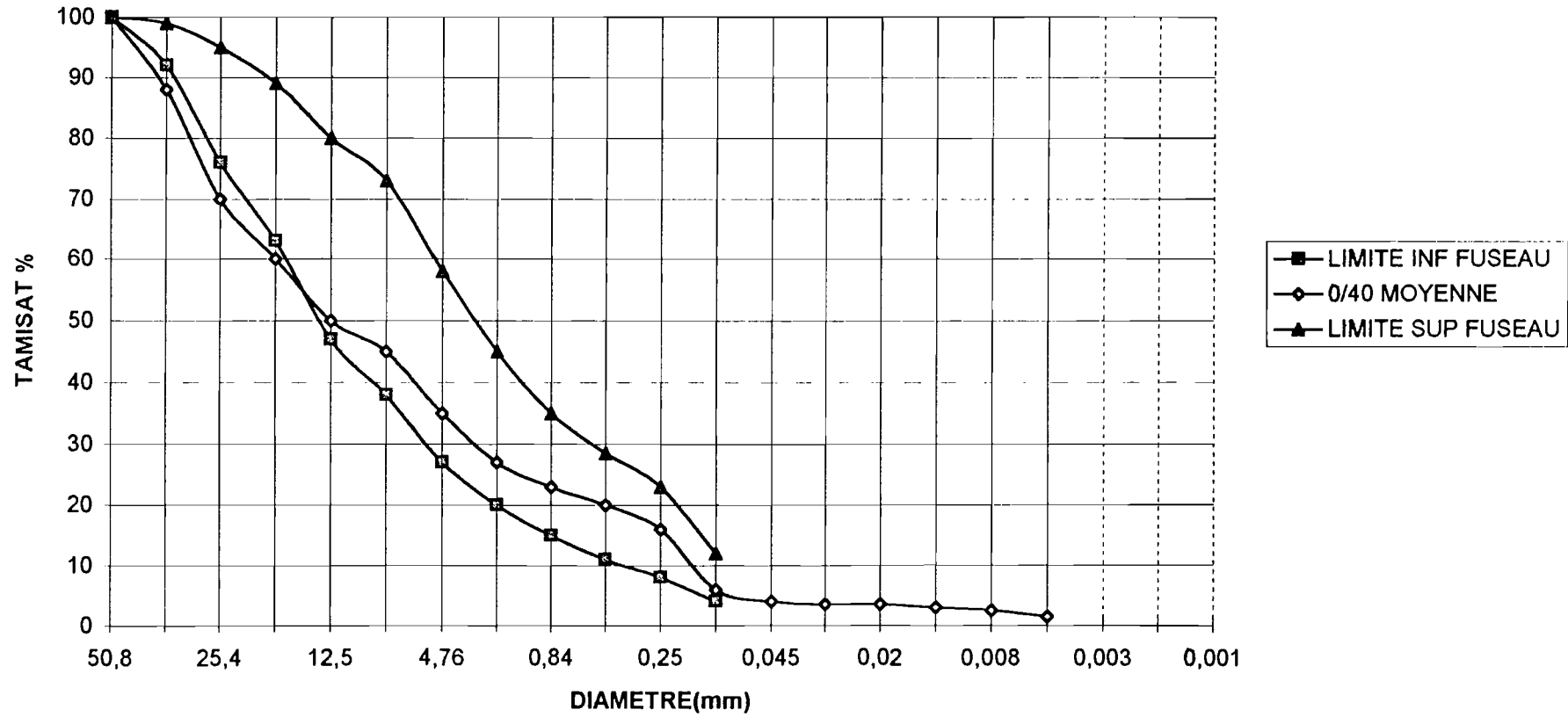


FIG n°1: COURBES GRANULOMETRIQUES DU O/40 CALCAIRE

FIG n°2: 0/40 moyenne avec fuseau de talbot



- 28452 -

Tableau 3.5 : Résultats statistiques de l'équivalent de sable

Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation trouvée Cv %	Coefficient de variation admissible
30,37	4,82	16	

3.3.1.1.4- Proctor Modifié

L'essai Proctor modifié a été effectué sur deux échantillons et les résultats suivants ont été obtenus :

Tableau 3.6 : Résultats de l'essai Proctor

E	Wopt	γd
E-1	9,40	2,063
E-2	8,80	2,01
Moyenne	9,10	2,04

Les courbes Proctor modifié sont présentées à l'annexe A. Avec ces valeurs, on trouve un pourcentage des vides :

$$n = 100 \times \left(1 - \frac{\gamma d}{\gamma s} \right) = 25 \%$$

3.3.1.1.5- Essai CBR

Avec la teneur en eau moyenne de 9,10 %, il a été effectué 2 essais CBR, qui ont donné les résultats suivants :

Tableau 2.10 : Résultats de l'essai CBR

E	Immédiat	96 h d'imbibition	dessication (après 3 jours)
E-1	76	71	240
E-2	-	69	-
Moyenne	-	70	-

Les détails de ces essais sont présentés à l'annexe A.

3.3.1.2- Analyse et Interprétation des résultats

L'analyse des différentes courbes a permis de trouver d'une part :

- un coefficient de courbure compris entre 0,5 et 4,2
- un coefficient d'uniformité allant de 78 à 116 ;

et d'autre part, la composition suivante :

* Gravier	(> 10 mm)	49	à	60 %
* Gravillon	(5-10 m)	7	à	21 %
* Sable	(5 - 0,315 m)	10	à	23 %
* Sable fin	(0,315 - 0,080)	5	à	11 %
* Filler	(< 0,080)	4	à	12 %

Avec ces résultats, le calcaire se présente comme un sol de type GW avec une granulométrie régulière continue et étalée. Cet étalement de la courbe va beaucoup contribuer à l'augmentation des performances mécaniques.

En effet, "plus une granulométrie est étalée, plus les performances mécaniques seront élevées". Les grains ayant un calibre inférieur à 20 mm représentant en moyenne, près de 63 % du matériau seront en quantité assez suffisante pour

Les courbes obtenues sont représentées par la figure 3.3. Ces courbes correspondent aux valeurs moyennes de 3 échantillons.

Une analyse des différentes courbes montre une prédominance nette des éléments inférieurs à 20 mm (98 à 100 %). Le 15/25 correspond réellement à un 15/20. Ces courbes présentent des discontinuités dues à la reconstitution en carrière. Ces granulométries discontinues pourraient présenter une bonne compacité et être stables. Le pourcentage d'éléments inférieurs à 2 μm est faible. Il est de l'ordre 0 à 2,5 %.

3.4.2- Etude de la formulation respectant le fuseau de Talbot

L'étude de la formulation est faite suivant la méthode de reconstitution itérative. Elle a été axée principalement sur deux aspects :

- le respect aux exigences du fuseau de Talbot, c'est-à-dire trouver un matériau dont la courbe granulométrique correspondante entre dans le fuseau recommandé par le CEBTP ;
- L'obtention d'un matériau économique avec une formulation dont le pourcentage de 0/20 sera assez représentatif. Le 0/2 est considéré actuellement comme déchets de concassage et coûte par conséquent moins cher.

Ainsi, prenant en compte ces deux aspects, la meilleure formulation qui a pu être obtenue est la suivante :

- * 70 % de 0/40 Tout venant de concassage
- * 10 % de 3/8
- * 20 % de 0/2

La courbe granulométrique est présentée avec le fuseau à la figure n°3.4.

3.4.2.1- Essais réalisés sur le matériau obtenu

Ce matériau obtenu avec la formulation a été soumis aux essais d'identification suivants :

- * Poids spécifique
- * Equivalent de sable
- * Proctor
- * CBR

Les résultats de ces différents essais sont présentés au Tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Résultats d'essais effectués sur le matériau (0/40 + 3/8 + 0/2)

Poids spécifique	Equivalent de sable	Proctor		Pourcentage de vide	CBR (96h)	
		Wopt	γ dopt		E ₁	E ₂
2,67	37,37	8,8	2,349	12,02	100	114

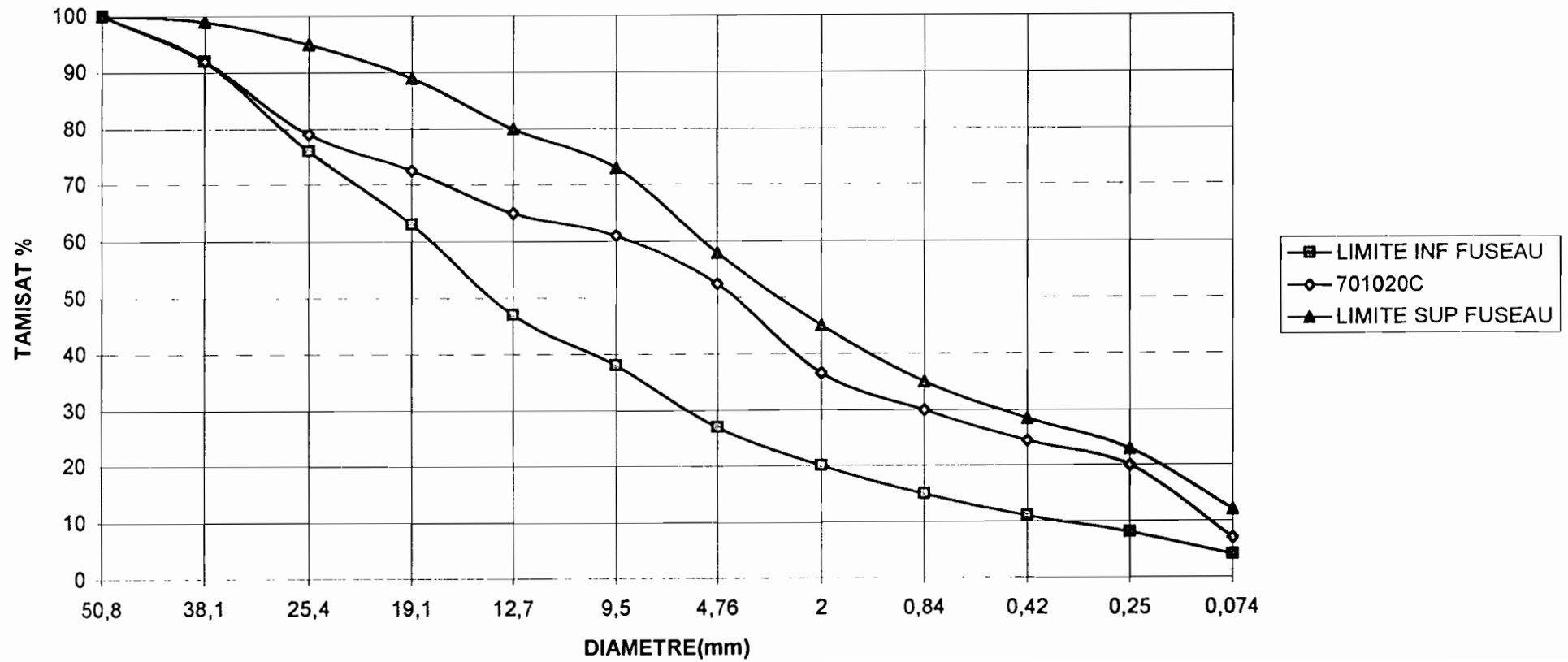
N.B : Courbe proctor annexe B
 Courbe CBR annexe B

3.4.2.2- Analyse et Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent une amélioration des différentes propriétés. L'Equivalent de sable passe de 30,37 à 37,37 et le pourcentage de vide de 25 à 12,02 %. Les éléments 0/8 ont permis un meilleur resserrage des grains en augmentant la compacité du matériau, le rendant ainsi plus stable. Ils ont aussi modifié la proportion d'argile présente dans le matériau de base.

Avec un CBR variant de 100 à 1114, le matériau respecte les exigences du CEBTP pour être utilisé seul en couche de base. Cependant l'analyse des différentes courbes de CBR en fonction de la compacité montrent les limites du

FIG n°4: FORMULATION 701020C AVEC FUSEAU DE TALBOT



-3540-

matériau. Le changement de comportement des différentes courbes laisse présager des problèmes liés à la stabilité. Son utilisation va nécessiter des précautions strictes surtout lors de sa mise en oeuvre.

3.4.3- Etude des mélanges 0/40 + 0/2

Les mélanges suivants ont été étudiés :

- * 70 % de 0/40 + 30 % de 0/2 (7030)
- * 80 % de 0/40 + 20 % de 0/2 (8020)
- * 90 % de 0/40 + 10 % de 0/2 (9010)

Ces différents matériaux ont été soumis aux essais d'identification suivants :

- * Analyses granulométrique et sédimentométrique
- * Poids spécifique
- * Limite d'Atterberg
- * Equivalent de sable
- * Proctor

Les différentes courbes granulométriques sont présentées à la figure 3.5. Les courbes proctor sont présentées à l'annexe C.

Tableau 3.9 : Résultats d'essais effectués sur les différents mélanges 0/40 et 0/2

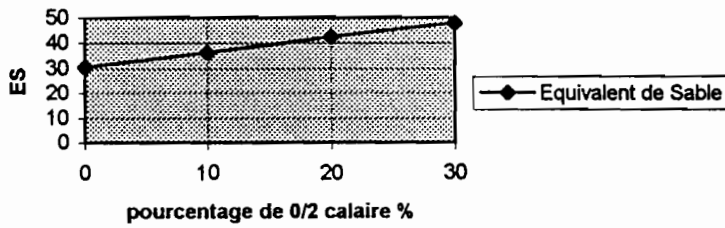
% de 0/2	Poids spécifique	Equivalent de sable	Proctor		Pourcentage de vide %
			W _{opt}	γ _d	
0	2,70	30,37	9,10	2,04	25
10	2,663	36,15	7,80	2,399	10
20	2,633	42,40	9,20	2,328	11,58
30	2,647	48	9,80	2,331	12

N. B : Les γ_d sont corrigés pour tenir en compte les éléments > 20 mm
 Les courbes γ_d, % vide, ES en fonction du % 0/2 sont données à la fig. 3.6
 Courbe Proctor voir Annexe C.

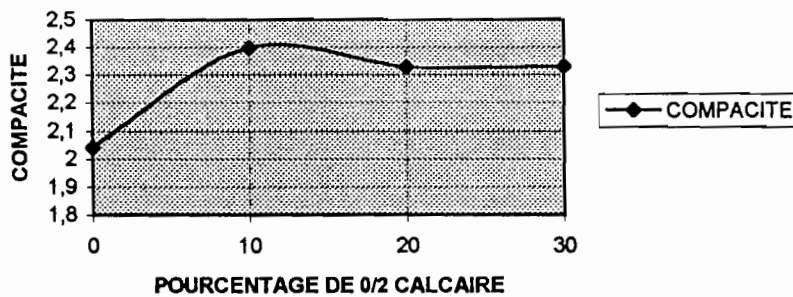
Fig 3.6

Equivalent de Sable		COMPACITE		Pourcentage de Vide	
0	30,37	0	2,04	0	25
10	36,15	10	2,399	10	10
20	42,4	20	2,328	20	11,58
30	48	30	2,331	30	12

ES EN FONCTION DE 0/2 CALCAIRE



COMPACITE EN FONCTION DE 0/2 CALCAIRE



POURCENTAGE DE VIDE EN FONCTION DE 0/2

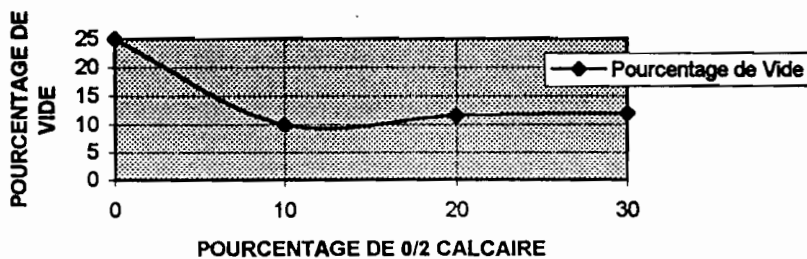
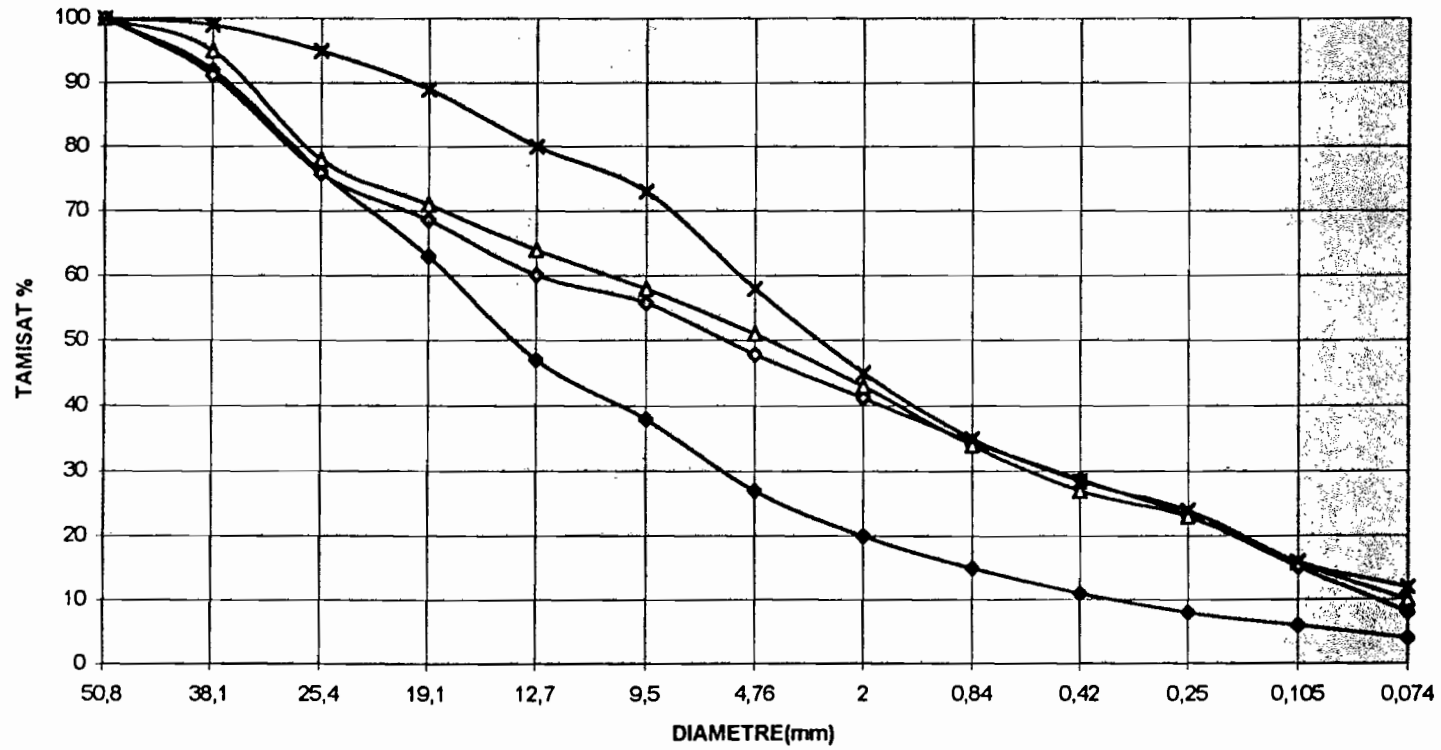


FIG n° : 8020C AVANT ET APRES COMPACTAGE



● LIMITE INF FUSEAU
 ● AVANT COMPACTAGE
 ▲ APRES COMPACTAGE
 × LIMITE SUP FUSEAU

- 36 tous 2-

L'ajout de 0/2 modifie le comportement des différentes propriétés du matériau 0/40 TV.

- Avec un équivalent de sable de 30,37 à 0 % de 0/2, le 0/40 est à 48 à 30 % de 0/2. la variation de l'Equivalent de sable est quasi-linéaire avec l'augmentation du 0/2. Les fines ont ainsi dopé l'argile présente dans le matériau en diminuant son activité. Ce qui va réduire les risques de gonflement en présence d'eau.
- Les densités sèches maximales OPM décroissent lorsque la proportion de 0/2 augmente. Ce phénomène résulte des différences de poids spécifique entre les deux composants. Cependant la variation est faible, les deux matériaux étant de même nature.

Les éléments fins ont permis d'avoir des compacités plus élevés que le 0/40 TV rendant ainsi le matériau plus stable. Un matériau routier est d'autant plus stable que sa compacité est élevée.

- Le pourcentage de vide passe de 25 à une valeur de 12. Les résultats montrent qu'à partir de 20 %, il commence à remonter. Le 0/2 occupe une partie des vides augmentant la cohésion et le frottement interne du matériau.
- Avec les courbes Proctor, celle avec 20 % de 0/2 de forme plus ou moins aplatie par rapport aux autres, présage un meilleur comportement du point de vue de stabilité et mise en oeuvre.

Le 9010 a une compacité plus élevée donc théoriquement plus stable mais sa courbe Proctor relativement pointue présente quelques inquiétudes. Ces courbes correspondent à des matériaux très susceptibles à la variation de la

teneur en eau autour de l'optimum et nécessite par conséquent des précautions particulières lors de leur mise en oeuvre. Ce sont des matériaux à proscrire car, il est à la fois inutile et dangereux de chercher à obtenir des compacités élevées qui ne se maintiendront pas.

Il est bon de rappeler que si la compacité prémunit contre le tassement, elle ne sera pas toujours un garant de haute stabilité permanente.

Ainsi, la formulation 80 % de 0/40 + 20 % de 0/2 a été retenue et soumise à l'essai CBR.

Le matériau 8020 se présente bien du point de vue de sa compacité. Il donne une valeur de CBR de 126 à 95 % de l'OPM. Cette formulation est donc selon les spécifications du CEBTP directement utilisable en couche de base. La courbe de CBR en fonction de la compacité est présentée à l'annexe n° C.

3.5- Etude du matériau 0/31,5

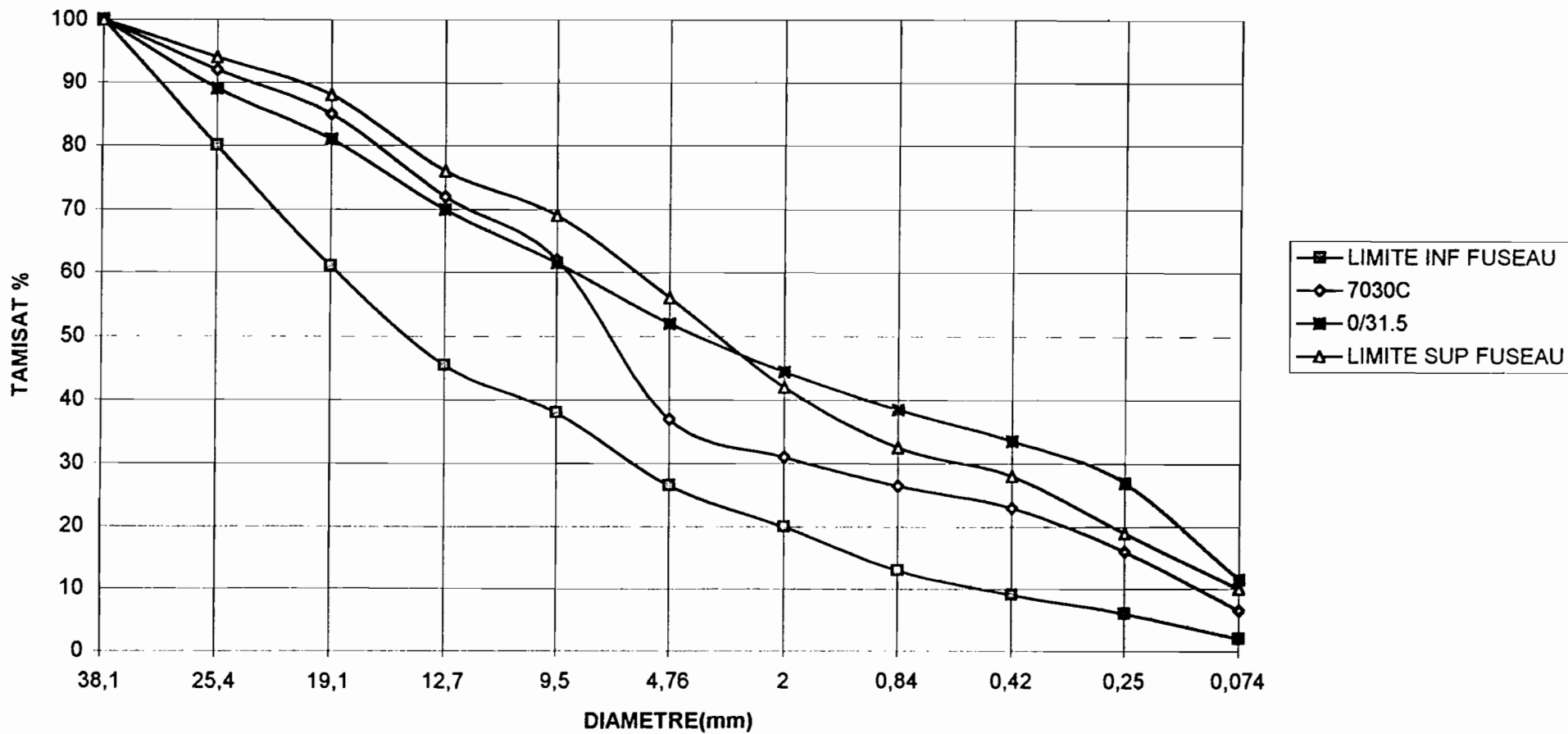
Le matériau 0/31,5 obtenu après écrêtement du 0/40 a été soumis à une analyse granulométrique. La courbe correspondante est présentée avec le fuseau 0/31,5 recommandé par le CEBTP à la figure 3.7. L'analyse de cette figure montre un non respect du 0/31,5 de calcaire par rapport aux exigences granulométriques. Les fines sont largement prédominantes.

Il convenait dès lors de trouver un matériau d'apport permettant de corriger ce défaut granulométrique. En appliquant la méthode de reconstitution itérative, il a été trouvé qu'avec 30 % de 15/25 calcaire; l'exigence granulométrique serait satisfaite. la courbe granulométrique est représentée à la figure n° 2.11.

Ainsi, la formulation 70 % de 0/31,5 + 30 % de 15/25 a été soumis aux essais d'identification suivants :

* Poids spécifique

FIG n° 31: 0/31.5+7030 avec fuseau de talbot



- 38601 -

* Proctor Modifié

* CBR

Les résultats sont présentés au tableau 3.10

Tableau 3.10 : Résultats d'essais effectués sur le matériau (0/31,5 + 15/25)

Poids spécifique	Proctor		Pourcentage de vide	CBR (96 H)	
	W _{opt}	γ _{dopt}		E ₁	E ₂
2,646	9,10	2,258	14,66	158	115

γ_d est corrigé pour tenir en compte les éléments supérieurs à 20 mm.

N.B : *Les détails des essais sont présentés à l'annexe D.*

Le matériau avec sa courbe aplatie prédit un bon comportement du point de vue stabilité et mise en oeuvre. La courbe de CBR en fonction de la compacité le confirme. Le CBR est de 158 à 95 % de l'OPM et atteint même 100 % à 98 % de l'OPM.

3.6- Etude de la lithostabilisation latérite-calcaire

3.6.1- Objectif de l'étude

La qualité des latérites au Sénégal devient de plus en plus mauvaise. Pour les utiliser, les ingénieurs font appel à la stabilisation chimique. Ces mélanges posent de sérieux problèmes du point de vue mise en oeuvre. Ainsi, il a été jugé nécessaire de proposer à travers cette étude un matériau latérite-calcaire à la place des mélanges sol-ciment. La lithostabilisation a des objectifs multiples :

- améliorer les latérites dont les caractéristiques géotechniques ne permettent plus l'utilisation directe en couche de base ;
- remplacer le concassé de calcaire par la latérite "lithostabilisée" lorsque cette dernière deviendrait économiquement compétitive en raison de l'éloignement de la carrière produisant le calcaire ;
- diminuer la quantité de calcaire ;
- rechercher des matériaux de caractéristiques moyennes plutôt que des matériaux très performants voisinant avec des matériaux médiocres. L'étude est faite avec la latérite de Sindia et le concassé calcaire (0/31,5) de Bandia sur les mélanges suivants :

* 90 % de latérite + 10 % de 0/31,5 calcaire	(9010 LC)
* 80 % de latérite + 20 % de 0/31,5 calcaire	(8020 LC)
* 70 % de latérite + 30 % de 0/31,5 calcaire	(7030 LC)

3.6.2- Etude des matériaux utilisés

3.6.2.1- Latérite de Sindia

La latérite de Sindia a été soumise aux essais d'identifications suivants :

- + Analyse granulométrique
- + Limites d'Atterberg
- + Proctor Modifié
- + Essai CBR

Les résultats sont présentés à l'annexe E.

L'analyse de ces résultats montre que la latérite de Sindia présente des insuffisances au niveau de la plasticité et de la portance. Selon le CEBTP, l'IP doit rester inférieur à 15 et le CBR supérieur à 80 à 95 % de l'OPM. A Sindia, il sont respectivement à 16,3 et à 57.

L'étude sera donc orientée au niveau de ces deux propriétés tout en contrôlant aussi l'évolution granulométrique face à l'ajout du 0/31,5 calcaire.

3.6.2.2- Concassé de calcaire 0/31,5 de Bandia

Pour le calcaire, l'étude a été présentée dans la partie 5.

3.6.3- Etude des différents mélanges

Ces différents mélanges ont été soumis aux essais d'identification suivants :

- * Analyse Granulométrique et sédimentométrique
- * Poids spécifique
- * Indice de plasticité
- * Proctor Modifié
- * Essai CBR

Les courbes granulométriques sont présentées à la figure : 3.8

Tableau 3.11 : Résultats d'essais des différents mélanges

% de 0/31,5 calcaire	Poids spécifique	Indice de Plasticité			Proctor		CBR (96 H)	
		W _L	W _p	I _p	W _{opt}	γ _{dopt}	E-1	E-2
0		30,7	14,4	16,30	12,50	2,110 NC	57	
10	2,80	38,10	22,50	15,60	13,20	2,164	106	
20	2,80	35,40	20,70	14,70	11,60	2,181	107,5	118,75
30	2,78	33,80	19,90	13,90	11,10	2,246	120	113

Les γ_d hormis la latérite crue sont corrigés.

N.B : *Courbes Proctor* voir *annexe E*
 Courbes CBR voir *annexe E*

3.6.4- Analyse et Interprétation des résultats

Les courbes IP, γ_d et CBR en fonction du pourcentage de 0/31,5 sont présentées à la figure n° 3.9.

Les mélanges latérite-calcaire présentent des courbes granulométriques de forme étalée correspondant à des matériaux de bonnes performances. Le pourcentage de fine ($< 80 \mu\text{m}$) est une fonction décroissante de la proportion de calcaire. De 13,7 % à 0 % il passe à 3 % à 30 % de 0/31,5 calcaire. Ce qui va contribuer à obtenir la compacité optimale. En effet les éléments fins, dans le cas où ils n'augmentent pas dangereusement la plasticité, nuisent à l'obtention d'une compacité optimale en formant des nids affligés d'une grande capacité de gonflement.

Le calcaire influe sur les différentes propriétés du matériau latérite ;

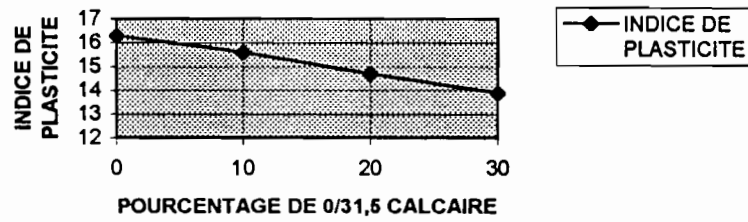
* L'indice de plasticité est une fonction décroissante du pourcentage de calcaire. De 16,30 à 0 %, elle passe à 13,9 % à 30 %. L'ajout du 0/31,5 calcaire permet donc de doper la latérite et de diminuer sa plasticité pour donner des valeurs respectant les recommandations.

* Les densités sèches maximales OPM croissent lorsque la proportion de calcaire augmente. Ce phénomène résulte des différences de poids spécifique entre les deux composants ; la compacité devient de plus en plus importante avec l'ajout du calcaire. Ceci peut être dû à la cimentation provenant de la chaux présente dans le calcaire. Cet effet de cimentation va augmenter le frottement interne et conférer de la cohésion entre les grains du matériau latéritique le rendant ainsi plus compacte.

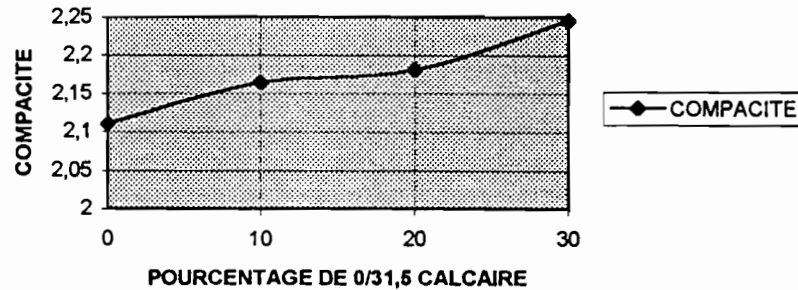
Fig 3.9

	INDICE DE PLASTICITE		COMPACITE		CBR%
0	16,3	0	2,11	0	57
10	15,6	10	2,164	10	106
20	14,7	20	2,181	20	113
30	13,9	30	2,246	30	117

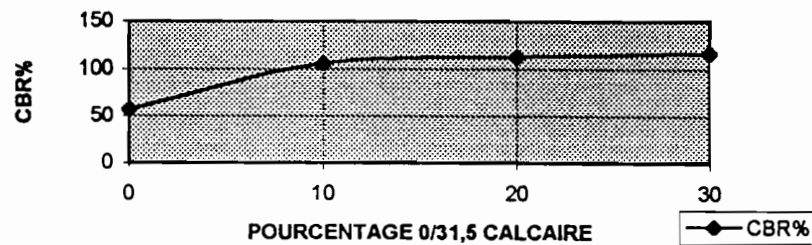
INDICE DE PLASTICITE EN FONCTION DU % DE 0/31,5 CALCAIRE



COMPACITE EN FONCTION DE 0/31,5 CALCAIRE



CBR EN FONCTION DU POURCENTAGE DE 0/31,5 CALCAIRE



En effet, la chaux réagit sur les fines par échanges ioniques. Les cations alcalins Na^+ et K^+ sont remplacés par des cations alcalins-terreux (Ca^{++}). La silice et l'alumine sont ensuite dissoutes. Le processus aboutit à la précipitation de silicates et d'aluminates de calcium qui, en cristallisant cimentent les différentes particules du sol.

* Les indices portants CBR (après 4 jours d'immersion) sont une fonction croissante de la proportion de calcaire concassé 0/31,5. La plage de variation (57 à 0 % à 117 à 30 %) est relativement importante. Tous les 3 mélanges répondent aux spécifications du CEBTP (CBR > 80) pour être utilisé en couche de base.

Les mélanges ont des valeurs proches des meilleures latérites (CBR > 100).

* L'analyse des différentes courbes de CBR en fonction de la compacité montre que le mélange 7030 a un meilleur comportement par rapport aux autres car à 98 % de l'OPM il atteint une valeur supérieure à 190 donc proposable même pour des trafics élevés.

3.7- Conclusion

Pour le reste de l'étude, il sera retenue les formulations présentant les meilleurs résultats à savoir :

- | | |
|--|-----------|
| * 80 % (0/40) + 20 % (0/2) calcaire | (8020 C) |
| * 70 % (0/31,5) + 30 % (15/25) calcaire | (7030 C) |
| * 80 % latérite + 20 % (0/31,5) calcaire | (8020 LC) |
| * 70 % de latérite + 30 % de 0/31,5 calcaire | (7030 LC) |

3.8- Essai de catalogage de superstructure des différents matériaux retenus

Les matériaux locaux devraient être utilisés dans les meilleures conditions pour minimiser les coûts de construction. Il est conseillé aujourd'hui de réaliser pour chaque pays un catalogue de structure de chaussée, adapté à son propre environnement, économique, climatique et géotechnique. C'est dans cet esprit qu'il a été proposé de faire pour les formulations retenues à l'issue de l'étude technique, un essai de catalogage de superstructure type où les couches de base seront réalisés avec les différents matériaux retenus et la couche de fondation si elle existe avec de la latérite crue. Ainsi, il sera procédé par vérification de contraintes dans des corps de chaussée définis au départ. A partir de ces contraintes, il sera évalué le nombre de cycles admissibles avant que n'ait lieu dans la superstructure l'une des formes de rupture suivantes :

- a) Poinçonnement
- b) fissuration de l'enrobé
- c) Orniérage excessif.

Le corps de chaussée est considéré acceptable si le nombre de cycle trouvé entre dans la fourchette de valeurs de la catégorie de trafic supposée au départ.

Des programmes d'ordinateurs ont été développés pour ce genre de calcul dans les centres d'études routières un peu partout dans le monde. Il sera utilisé dans le cadre de ce travail le programme ALIZE III qui permet de calculer sous une ou plusieurs charges les déplacements, contraintes et déformations en différents points d'un massif semi-infini. Cependant, son utilisation suppose l'émission de certaines hypothèses et l'introduction de données caractéristiques des superstructures étudiées.

3.8.1- Hypothèses et paramètres pour le calcul des contraintes

3.8.1.1- Classes de Trafic

Il existe selon le CEBTP cinq (5) classes de trafic notées T₁, T₂, T₃, T₄ et T₅. En essieux équivalents à 13 tonnes, elles sont délimitées par :

$$\begin{aligned} T_1 &< 5 \cdot 10^5 \\ 5 \cdot 10^5 &< T_2 < 1,5 \cdot 10^6 \\ 1,5 \cdot 10^6 &< T_3 < 4 \cdot 10^6 \\ 4 \cdot 10^6 &< T_4 < 10^7 \\ 10^7 &< T_5 < 2 \cdot 10^7 \end{aligned}$$

Ces valeurs correspondent aux cumulées pour la durée de vie de 15 ans recommandées dans les règles de design proposées par le CEBTP.

T₁ correspondrait à des routes à trafic très faible et T₅ aux chaussées de type autoroute.

3.8.1.2- Classes de sols d'assise

Cinq classes de sols ont été retenues qui correspondraient à une répartition assez constante des divers types de sols rencontrés en pays tropicaux :

$$\begin{aligned} S_1 : & \quad \text{CBR} < 5 \\ S_2 : & \quad 5 < \text{CBR} < 10 \\ S_3 : & \quad 10 < \text{CBR} < 15 \\ S_4 : & \quad 15 < \text{CBR} < 30 \\ S_5 : & \quad \text{CBR} > 30 \end{aligned}$$

On recommande toutefois pour des dispositions de construction qu'il soit assuré aux plates formes un CBR de 5 au minimum et même 10 quand le trafic

de chantier est particulièrement lourd. Dès lors les bornes supérieures des classes S_1 à S_4 seront considérées pour les calculs.

Pour la classe S_5 , une valeur de 60 % sera considérée correspondant à celle déjà employée d'autres laboratoires. Ce qui donne comme données de plateforme :

S_1 :	CBR =	5 %
S_2 :	CBR =	10 %
S_3 :	CBR =	15 %
S_4 :	CBR =	30 %
S_5 :	CBR =	60 %

3.8.1.3- Corps de chaussées

Selon leur performance, il sera essayé dans les calculs des chaussées quadricouches (revêtement - base - fondation - assise) ou tricouches (revêtement - base - assise). Pour chaque couche, les caractéristiques retenues sont données :

3.8.1.3.1- Revêtement

Pour optimiser les coûts que va engendrer le revêtement, des épaisseurs suivantes sont suggérées.

T_1 :	3 cm d'enrobés denses, de sand-asphalt
T_2 :	4 cm d'enrobés denses, de sand-asphalte
T_3 :	5 cm de béton bitumineux
T_4 :	7 cm de béton bitumineux
T_5 :	10 cm de béton bitumineux

Le revêtement traduit également par la valeur de son module élastique les températures extrêmes auxquelles on calcule les contraintes. Les températures

de 20° C et 50° C sont retenues. Pour les modules des revêtements bitumineux, les valeurs suivantes sont recommandées par le CEBTP :

20° C	:	$E_1 = 50\ 000$ bars
50° C	:	$E_1 = 10\ 000$ bars

Quant au coefficient de Poisson, il est estimé à $\mu_1 = 0,35$.

3.8.1.3.2- Couche de base

La couche de base sera étudiée pour chaque formulation retenue.

La valeur du module élastique varie en fonction de la formulation. Le tableau ci-dessous donnent les modules qui ont été calculés en fonction du CBR pour les différentes formulations et pour un temps d'imbibition de 4 jours et une compacité de 98 % de l'OPM, pour le calcaire et 97 % pour la lithostabilisation. La corrélation utilisée est :

$$E_{dynamique} = 100 \times CBR$$

Les différentes formulations sont notées de la façon suivante :

. 80 % (0/40) + 20 % (0/2)	8020 C
. 70 % (0/31,5) + 30 % (15/25)	7030 C
. 70 % latérite + 30 % calcaire	7030 LC
. 80 % latérite + 20 % calcaire	8020 LC

Formulation	8020 C	7030 C	7030 LC	8020 LC
CBR %	167	169	192	132
Module E bars	16700	16900	19200	13200

Le coefficient de poisson est ici fixé à : $\mu_2 = 0,35$

3.8.1.3.3- Couche de fondation

Il est supposé de faire la couche de fondation avec de la latérite crue. Donc son module élastique sera $E_3 = 8000$ bars.

Le coefficient de poisson μ_3 sera égal à 0,35.

3.8.1.3.4- Sol d'assise

Les cinq classes d'assise ont pour modules élastiques les valeur suivantes :

Classe de sol	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
CBR %	5	10	15	30	60
E bars	500	1000	1500	3000	6000

Le coefficient de poisson μ_3 est supposée égale à 0,5.

L'hypothèse de parfaite adhérence des couches entre elles est retenue, là où il est plus à craindre, il sera prescrit la réalisation d'une couche d'imprégnation.

3.8.1.3.5- Les charges sur les corps de chaussée

Les calculs sont faits avec un essieu à roues jumelées de 13 tonnes correspondant à une charge de 3,25 tonnes par roue. Il sera admis que la surface de contact des roues jumelées avec le revêtement est constitué de 2 couches de rayon a et dont la distance centre à centre est de $l = 3a$

avec $a = 12,5$ cm et $l = 37,5$ cm ; ce qui donne une charge uniforme de 6,62 kg/cm².

Tous les paramètres sont définis, s'il est possible donc d'agencer les données relatives à un corps de chaussée à l'essai dans un fichier de données (Dalize) conformément aux directives du manuel d'utilisation du programme d'ordinateur pour procéder aux calculs des contraintes et par suite avec un

programme écrit en Pascal aux vérifications du nombre de cycle de charge admissible.

3.8.2- Vérification du nombre de cycles de charges admissible.

3.8.2.1- Résultats données par le programme Alizé III

Ce programme permet d'obtenir les contraintes déplacement et déformation aux différents interfaces.

3.8.2.2- Rupture par poinçonnement du sol d'assise.

D'après le CEBTP, le nombre de cycles admissibles avant poinçonnement de la plate-forme est donné par la formule semi-empirique de Kerkhoven et Dormon :

$$\sigma_{Zadm} = \frac{0,3 \text{ CBR}}{1 + 0,7 \log N}$$

où σ_{Zadm} est donné en kg/cm^2

soit pour le nombre de N_{sol}

$$N_{sol} = 10^{\left(\frac{0,3 \text{ CBR}}{\sigma_z} - 1\right)/0,7}$$

3.8.2.3- Rupture par fissuration de l'enrobé

Il est adopté ici la relation entre la déformation et le nombre de cycles :

$$\log \varepsilon_N = \log (1,6 \cdot 10^{-3}) - 0,21 \log N$$

d'où le nombre de cycles de charge avant fissuration de l'enrobé est donné par:

$$N_E = \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{\varepsilon_N} - 1 \right)^{\frac{1}{0,21}}$$

3.8.2.4- Ornièrage limite (= 1,5 cm)

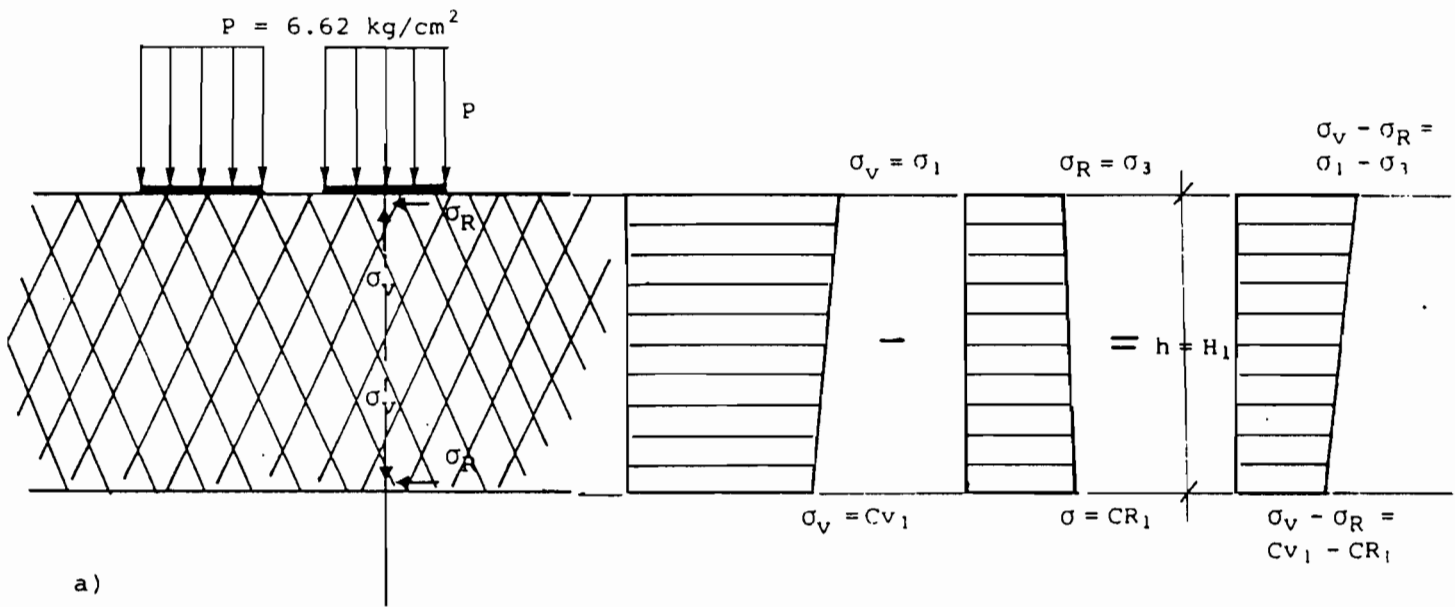
Pour une profondeur donnée du revêtement hydrocarboné, la déformation en compression répétée peut être évaluée par la formule :

$$\varepsilon = \frac{115(\sigma_v - \sigma_R)}{E} \left(\frac{t}{10} \right)^{0,25}$$

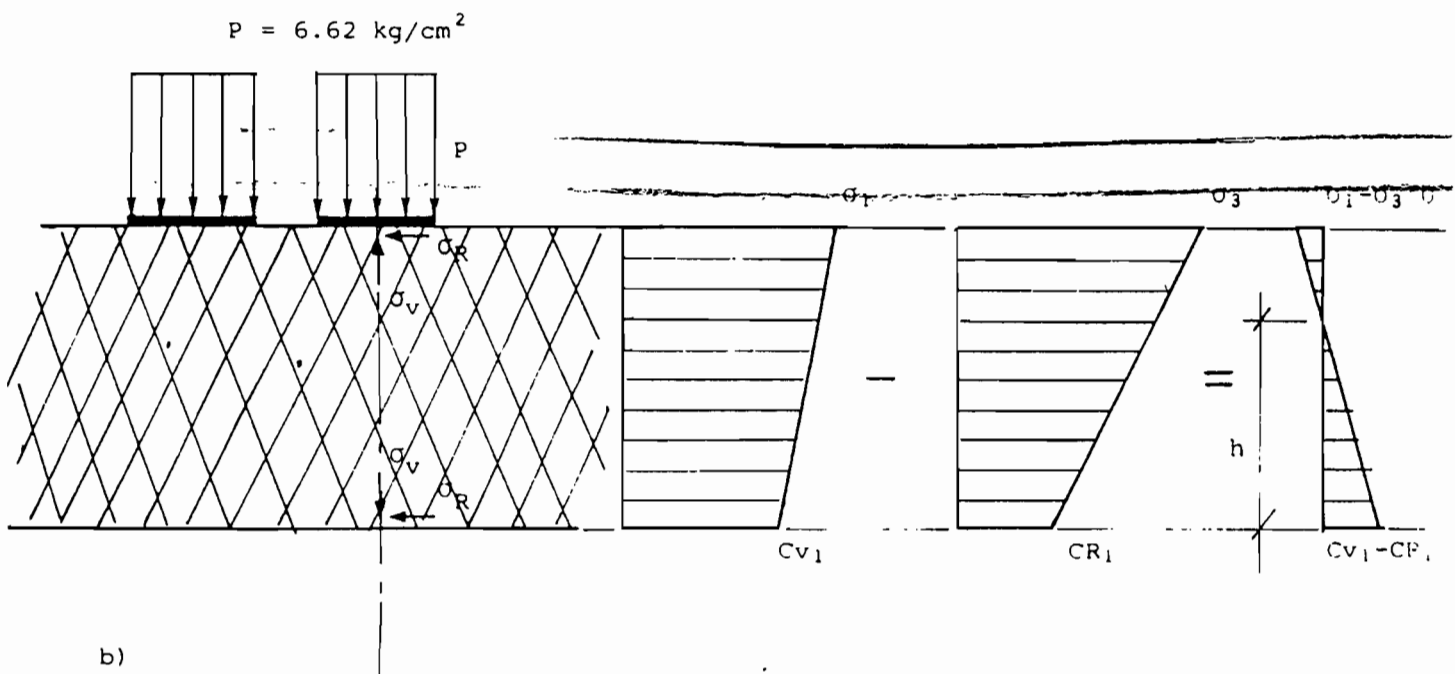
- où $\sigma_v - \sigma_R$ est le déviateur des contraintes verticales et radiales en ce point
 E = module de l'enrobé (même unité que $\sigma_v - \sigma_R$)
 t = temps de mise en charge (secondes)

Il faudra étudier la variation du déviateur de contrainte en fonction de la profondeur pour calculer l'ornièrage. La déformation qui, elle, est directement proportionnelle (hypothèse d'un module et d'un temps de chargement constants) varie de la même, du moins quand le déviateur est positif. En admettant une variation linéaire des contraintes on a, dans notre cas, les deux situations illustrées par la figure n° 10.

Les déformations sont considérées nulles dans la zone où le déviateur prend des valeurs négatives. l'épaisseur h intervient dans le calcul de l'ornièrage quand le déviateur est positif. En considérant une température extrême de 20°C, on obtient une répartition triangulaire ; il suffira donc de calculer la déformation à la base du revêtement soit :



Variation du déviateur de contraintes dans le revêtement pour une température de 50°C



Variation du déviateur de contraintes dans le revêtement pour une température de 20°C

Figure 10

$$\varepsilon_0 = \frac{115(\sigma_z^1 - \sigma_r^1)}{E_1} \left(\frac{t}{10^3}\right)^{0,25}$$

L'ornièrage d est alors donné par :

$$d_{2\sigma} = \frac{h}{2} \frac{115(\sigma_z^1 - \sigma_r^1)}{E_1} \left(\frac{t}{10^3}\right)^{0,25}$$

Par contre, pour le cas extrême de 50 °c, le déviateur est positif sur toute l'épaisseur. la répartition sera donc trapézoïdale. Le calcul de l'ornièrage sera fait sur toute l'épaisseur. la déformation moyenne est :

$$\varepsilon_m = 115 \frac{\left[(\sigma_z^0 - \sigma_r^0) + (\sigma_z^1 - \sigma_r^1) \right]}{E_1} \left(\frac{t}{10^3}\right)^{0,25}$$

d'où l'ornièrage :

$$d = H_1 \varepsilon_m$$

$$d_{5\sigma} = \frac{h}{2} 115 \frac{\left[(\sigma_z^0 - \sigma_r^0) \right] (\sigma_z^1 - \sigma_r^1)}{E_1} \left(\frac{t}{10^3}\right)^{0,25}$$

3.8.2.4.1- Calcul du temps de mise en charge

En considérant une vitesse moyenne de 70 km/h = 19,44 m/s et une roue de diamètre $D = 25$ cm on obtient un temps de passage d'un essieu :

$$\frac{0,25}{19,44} = 1,29 \cdot 10^{-2}$$

sec et le temps de mise en charge total avant rupture est

$$t = 1,29 \cdot 10^{-2} \text{ N.}$$

3.8.2.4.2- Répartition du trafic selon les saisons

Au Sénégal, il existe deux saisons : une saison froide qui dure en général 3 mois, période pendant laquelle la température tourne autour de 20°C et cela correspondrait à un module des enrobés de l'ordre de $E_1 = 50000$ bars ; une saison chaude incluant la saison des pluies et une partie de la saison sèche dure 9 mois. la température varie sur l'ensemble du territoire et nous allons prendre, pour plus de sécurité, la température extrême de 50°C et cela donnerait un module des enrobés $E_1 = 10000$ bars.

En supposant une répartition uniforme dans l'année on va avoir 1/4 du trafic qui passe pendant la période froide et les 3/4 restant durant la période chaude.

L'ornièrage total qui est égal à la somme des ornièrages de chacune des périodes soit :

$$d_{tot} = d_{(20^\circ C)} + d_{(50^\circ C)}$$

$$d_{tot} = 2,43669 N^{0,25} \left[2 \cdot 10^{-5} \left(h \left(\sigma_z^1 - \sigma_r^1 \right) \right) \right] + 2,632148 \cdot 10^{-4} H_1 \left[\left(\sigma_z^0 - \sigma_r^0 \right) + \left(\sigma_z^1 - \sigma_r^1 \right) \right]$$

le nombre de cycles admissibles avant que l'ornièrage ne dépasse 1,5 cm est :

$$N_{orn} = \left[1,62446 \left[2 \cdot 10^{-5} \left(h \left(\sigma_z^1 - \sigma_r^1 \right) \right) \right] \right] + 1,316074 \cdot 10^{-4} \times H_1 \left[\left(\sigma_z^0 - \sigma_r^0 \right) + \left(\sigma_z^1 - \sigma_r^1 \right) \right]^{-4}$$

3.8.2.5- Calcul de la durée de vie de la superstructure constituée par les différents matériaux

Pour chaque mode de rupture, on calcule le nombre de cycles admissibles à la température 20 °C et 50 °C, puis on pondère ces deux résultats avec la loi de Miner.

$$N = \frac{N_{20} N_{50}}{0,25 N_{50} + 0,75 N_{20}}$$

En appliquant la loi de Miner, respectivement aux cas de rupture par poinçonnement de la plateforme, par fissuration de l'enrobé, on obtient (en nombre de cycles de chargement) les durées de vie relatives à ces modes de rupture. Après, on devra choisir le plus petit de ces nombres comme durée de vie déterminante, soit :

$$N_{det} = \min (N_{orn}, N_E, N_{sol})$$

et c'est ce nombre qui est confronté au trafic supposé au départ.

Les résultats des calculs de catalogue sont présentes dans les tableaux n°3.12 ; 3.13 ; 3.14 ; 3.15.

Pour le cas particulier des trafics T4 et T5, les calculs de superstructures n'ont pas été faits pour la classe d'assise S1. Il est recommandé pour ces types de routes , que toutes les assises de faible portance soient traitées de manière à assurer un CBR d'au moins 10 % qui permette de supporter le trafic de chantier qui est relativement important.

Il a été retenu des structures tricouches pour les sols de bonne portance et des quadricouches pour les sols de faible portance.

Dans l'ensemble les superstructures trouvées sont très épaisses. Au niveau des sols 4 et 5, il faut aller dans certains cas en deça de la limite minimale d'épaisseur ($E \geq 2,5 D = 10 \text{ cm}$) pour obtenir exactement le trafic supposé au départ.

Ainsi, il a été utilisé pour ces cas des épaisseurs de 10 cm en couche de base qui donnent des trafics légèrement supérieurs. Cette contrainte présente plutôt un avantage en ce qu'elle donne des superstructures sécuritaires et économiques.

Les cas proscrits sont dus à l'impossibilité d'avoir des épaisseurs économiques pouvant supporter le trafic T5. Il faudra aller à des épaisseurs élevées supérieures à 30 cm ; il sera proposé pour ces cas, l'utilisation d'autres matériaux.

TABLEAU n°2: FORMULATION 8020C

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
S 1				ASSISE A TRAITER	ASSISE A TRAITER
S 2					A PROSCRIRE
S 3					A PROSCRIRE
S 4					A PROSCRIRE
S 5					A PROSCRIRE

LEGENDE :

E:Enrobé dense

C :CALCAIRE

L: LATERITE CRUE

BB :Béton bitumineux

(+1): le trafic trouvé dépasse légèrement celui supposé au départ

- 57/100 -

TABLEAU n° 3.7 FORMULATION 7030C

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
S 1				ASSISE A TRAITER	ASSISE A TRAITER
S 2					
S 3					
S 4					A PROSCRIRE
S 5					A PROSCRIRE

LEGENDE :

E : Enrobé dense

C : CALCAIRE

L : LATERITE CRUE

BB : Béton bitumineux

(+1) : le trafic trouvé dépasse légèrement le trafic supposé au départ

- 2009/5 -

TABLEAU n°4: FORMULATION 8020LC

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
S 1				<p>ASSISE A</p> <p>TRAITER</p>	A PROSCRIRE
S 2					A PROSCRIRE
S 3					A PROSCRIRE
S 4					A PROSCRIRE
S 5				A PROSCRIRE	A PROSCRIRE

LEGENDE :

- E: Enrobé dense
- LC :LATERITE-CALCAIRE
- L: LATERITE CRUE
- BB :Béton bitumineux

(+1) : le trafic trouvé dépasse légèrement celui supposé au départ

-51-15-

TABLEAU n°5: FORMULATION 7030 LC

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
S 1				ASSISE A TRAITER	ASSISE A TRAITER
S 2					
S 3					
S 4				A PROSCRIRE	
S 5					

LEGENDE :

E : Enrobe dense
LC : LATERITE-CALCAIRE
L : LATERITE CRUE

BB : Béton bitumineux

- 4.08.15 -

(+1) : le trafic trouvé dépasse légèrement le trafic supposé au départ

CHAPITRE IV

RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN OEUVRE DES MATÉRIAUX

CHAPITRE IV : RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN OEUVRE DES MATÉRIAUX

4.1- Exploitation des matériaux (concassés) en carrière

Une usine de production de granulats concassés est une installation industrielle simple qui remplit deux fonctions : le concassage et le criblage des produits d'abattage de la carrière. Pour réaliser ces deux fonctions, il est important de bien choisir les composantes qui constituent cette installation à savoir : les concasseurs, le système de criblage, les convoyeurs et les tremies.

Pour la production de concassé de calcaire, il sera recommandé :

- de choisir comme équipements, des moulins 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 ;
- de prendre un système de criblages constitué par un empilement de cribles inclinés à maille carré ou rectangulaire que l'on fait vibrer, ce qui permet de séparer les particules selon leur grosseur. Le système de tamisage peut fonctionner en circuit ouvert, c'est-à-dire qu'aucune des particules qui a été classée n'est retournée vers le concassage pour y voir sa taille réduite. Il peut fonctionner en circuit fermé, c'est-à-dire que le refus du tamis supérieur est sans cesse retourné vers le concasseur ;
- d'utiliser des appareils à bandes transporteuses (convoyeurs à courroie) pour la manutention des granulats. Les bandes transporteuses peuvent être installées sur des supports fixes lorsqu'elles assurent le transport des granulats d'un point de traitement à l'autre ; elles peuvent être installées en sautерelle fixes ou mobiles lors de la constitution des piles de réserves.

4.2- Mise en réserve des granulats au niveau du chantier

La mise en réserve des granulats est une opération qui, malheureusement ne reçoit pas toujours le soin et l'attention voulus au niveau des chantiers.

Après avoir dépensé beaucoup d'énergie, d'argent et de soin à fabriquer et classer un granulat répondant à des exigences particulières, on lui fait perdre certaines de ses caractéristiques en négligeant sa mise en réserve. Les deux phénomènes à combattre lors de la mise en réserve des granulats sont la ségrégation et la contamination.

Ainsi pour lutter contre ces phénomènes, il convient de faire les recommandations suivantes :

- déposer les matériaux en tas dont les hauteurs n'excèdent pas 2 m. Ces tas sont nivelés pour former une couche n'ayant pas plus de 1,20 m de hauteur. Il faudra prévoir des redans de 1 m de large au niveau de chaque couche ;
- corriger toute couche non conforme aux exigences granulométriques avant le dépôt de la couche suivante ;
- déposer les matériaux de calibre différents de façon à éviter tout risque de contamination ;
- la circulation de boteurs mécaniques ou de chargeurs sur les piles de réserve est à déconseiller, car cela peut modifier la granulométrie, par usure due au roulement et polluer le granulat, par apport de matériaux étrangers restés collés sur les chenilles des boteurs ou les pneus des chargeurs ;
- éviter le séchage superficiel qui peut se produire sur les pentes des piles ;
- éviter le chevauchement de deux piles voisines en prévoyant des espaces suffisants entre les piles de réserve où, lorsqu'on manque de place d'ériger des parois de séparation solides, étanches et suffisamment grandes.

- l'arrosage préalable du matériau, l'étanchéité des bennes peuvent limiter les pertes de fines voir la ségrégation du matériau ;
- veiller à la propreté des aires de stockage, à la bonne disposition et à la reprise des stocks eux-mêmes ;
- éviter les ruptures de stock. Cela suppose, conformément au planning d'ordonnancement des travaux, une préparation et un stockage des matériaux suffisamment à l'avance pour permettre outre un contrôle de qualité à l'amont, un contrôle des quantités disponibles.

L'approvisionnement de la carrière au chantier et le stockage des matériaux étant bien effectués conformément aux recommandations ci-dessus, le mélange peut être fait.

4.3- Procédés de mélanges des différents granulats

Dépendamment de l'ampleur du chantier le mélange peut se faire soit :

- en centrale, c'est-à-dire dans un appareil fixe durant le chantier ;
- en place, c'est-à-dire sur la chaussée même.

Si le chantier est important (dépassant par exemple un mois de travaux) il sera recommandé de faire les mélanges en centrale.

4.4- Répandage des matériaux

4.4.1- Opérations préliminaires

Avant le répandage, il est nécessaire de préparer la couche de support ainsi, il est recommandé entre autres :

- d'enlever la couche arable, capable de contaminer les matériaux, par un engin du type grader sur une largeur supérieure à l'aire de la couche de base ;

- d'enlever les pierres de gros calibres risquant d'une part, d'endommager les engins et d'autre part, de créer des points faibles dans la couche. Elles doivent être extraites du sol par hersage par exemple et évacuées ;
- de drainer l'assiette de la chaussée en assurant l'évacuation des eaux. Les fossés latéraux doivent être construits avant le commencement des travaux. En cas de fossés existants, ceux-ci doivent être curés et remis sous profil ;
- de récupérer et améliorer les zones où le sous-sol est de mauvaise qualité. Le compactage d'une couche de base ne peut être effectué dans de bonnes conditions que lorsque le sous-sol fournit une base de compactage suffisante et uniforme.

4.4.2- Répandage des matériaux

Le répandage a pour but de réaliser des couches d'épaisseur uniforme, aussi proche que possible après compactage de l'épaisseur fixée par le projet et présentant une surface régulière. Ainsi, il sera recommandé :

- de tenir compte du tassement du matériau au compactage nécessitera de connaître de façon précise le coefficient de tassement (rapport du volume d'un certain poids de matériau normalement mis en place et compacté au volume qu'occupe ce même poids de matériau lorsqu'il est foisonné ;
- de veiller tout particulièrement à ce que les opérations de répandage ne provoquent de ségrégations ;

Le répandage peut se faire suivant différentes techniques, mais il est proposé de le faire en faisant déverser par des camions-bennes le matériau en tas, dont la répartition correspond en gros à l'épaisseur requise. les tas sont ensuite étalés en une couche régulière. Pour un meilleur répandage des matériaux, il est conseillé :

- * d'uniformiser les charges des camions en les pesant si possible ;
- * d'équiper les camions d'un profileur de cordon qu'il faudra ensuite étaler à la niveleuse ou au finisseur ;

- * d'utiliser si possible des engins qui, outre le répandage régulier, permet un précompactage avec une lame vibrante (une niveleuse pour le mélange en place et un finisseur pour le mélange en centrale) ;
- * d'affecter du personnel compétent et expérimenté à la niveleuse ou au finisseur dépendamment du type de mélange à effectuer ; Ces engins jouent un rôle essentiel qu'est la régularité de la couche de base lors du répandage ;
- * de prévoir aussi une légère surépaisseur de la couche répandue pour pouvoir procéder après compactage, au réglage de la surface.

4.5- Compactage à la teneur en eau

Le compactage des matériaux de chaussée a pour but d'augmenter leurs caractéristiques mécaniques et de réduire leurs tassements ultérieurs sous trafic. Etant appelés à supporter des contraintes importantes, les matériaux de couche de base doivent faire, l'objet d'un compactage soigné et répondre, de ce fait, à des normes plus sévères que pour les matériaux de fondation.

4.5.1- Ajustement de la teneur en eau

L'eau joue un rôle important dans le compactage de tous les matériaux. Il existe pour chaque matériau et chaque type d'engin une teneur en eau optimale pour le compactage. Du fait des tolérances de compacité, il vaut mieux parler d'une fourchette à l'intérieur de laquelle il convient d'amener la teneur en eau au moment du compactage.

L'ajustement de la teneur en eau est donc une opération primordiale ; si l'on veut une mise en œuvre correcte, elle doit faire l'objet d'un contrôle permanent sur le chantier avant toute opération de compactage.

4.5.1.1- Teneur en eau naturelle inférieure à la teneur en eau optimale

4.5.1.1.1- Mélange en place

Pour le mélange en place, il est conseillé d'utiliser un camion arroseur muni d'une rampe de distribution diffusant l'eau d'une manière régulière sur 2 à 3 m en pluie fine. Il est préférable que cette rampe soit alimentée par une pompe (débit constant) et non par gravité.

4.5.1.1.2- Mélange en centrale

L'eau est incorporée au matériau. L'humidification doit être réalisée d'une manière relativement précise pour obtenir un mélange à teneur en eau homogène. Il faudra tenir compte des pertes d'eau par évaporation si les distances de transport entre la centrale et le chantier de mise en oeuvre sont importantes et prendre les dispositions appropriées pour les réduire (camions banchés par exemple).

4.5.1.2- Teneur en eau supérieure à la teneur en eau optimale

Le cas se présente lorsque les travaux devant s'exécuter en saison des pluies. Il faudra alors prendre des dispositions pour assécher le matériau. Il est conseillé d'utiliser la méthode d'aération qui se fait à l'ordre d'une niveleuse munie d'une herse ou engin de malaxage. Ce cas concerne seulement la lithostabilisation. Pour le concassé pur, il est déconseillé de travailler sous la pluie.

4.5.2- Compactage

Le compactage sera fait avec les engins vibrants qui sont plus adaptés aux concassés. Ils combinent un serrage par pression verticale et la diminution de frottement entre grain par la vibration. Il sera recommandé :

- de contrôler le nombre de passes qui, par excès, peut être entraîné une décompaction de surface ;
- d'essayer d'obtenir une compacité allant de 95 à 98 % de l'OPM.

CHAPITRE V

ANALYSE ECONOMIQUE

CHAPITRE V :

ANALYSE ECONOMIQUE

5.1- Hypothèse de calcul

Pour l'évaluation économique, il sera considéré une route de :

- * longueur : 1 km
- * largeur 10 m comprenant 2 voies de 3, 5 m et deux accotements de 1,5 m
- * épaisseur moyenne de 20 cm

Un coefficient de foisonnement de 30 % sera considéré pour le calcul du volume de matériau.

En plus de l'étude économique des formulations 8020C, 7030C, 7030LC, 8020LC, le basalte et la latérite ciment seront étudiés pour servir de bases de comparaison entre les produits proposés et ceux utilisés déjà dans la filière.

L'évaluation sera faite autour des points suivants :

- Main d'oeuvre ;
- Matériel comprenant le grader, le compacteur à pneu, le vibrant, la citerne, le bull, le chargeur et la centrale ;
- Matériau composé du calcaire, du basalte ou de la latérite et de l'eau ;
- Le transport qui sera évalué au m³. km.

Le site du chantier sera d'abord supposé être à un kilomètre de la carrière d'approvisionnement. Et puis, une application sera faite sur le projet Diamniadio-kaolack pour mieux apprécier l'effet de la distance de transport sur l'estimation des coûts des projets routiers.

Le projet étant en milieu rural, le coût du transport au m³. km est fixé à 80F. Les autres prix unitaires correspondent aux prix appliqués avec le projet de l'élargissement de la branche Est de l'autoroute.

Le 0/40 et le 0/31,5 calcaire n'étant pas produit encore au niveau de la carrière, il était difficile de connaître leur prix. Ainsi pour disposer des éléments de calcul indispensables à l'évaluation économique, il a été tenté d'estimer les prix de ces différents matériaux par la méthode suivante :

- les matériaux sont reconstitués en fractions 0/3, 3/8, 8/15, 15/25 et 25/40. Avec la courbe granulométrique, le pourcentage de chaque élément est connu.

- les prix des fractions calcaire en vente (3/8, 8/15, 15/25) sont connus. Pour le 0/3 et le 25/40 leur estimation a été faite à partir du silex. Les prix des différentes fractions de silex sont connus par ricochet les rapports de prix entre les fractions de calcaire en vente et leur correspondant en silex. Ainsi, pour obtenir le prix du 0/3 et du 25/40 calcaire les prix du silex sont multipliés par le plus grand rapport. Il faut signaler que le prix du 25/40 silex a été obtenu en faisant défalquer du prix du 0/40 silex connus la part de prix des fractions 0/3, 3/8, 8/15, 15/25.

Fraction	Silex FCFA	Calcaire FCFA	Rapport	Calcul du prix du 0/3 et 25/40
0/3	3500			3500 x 1,5 = 5250
3/8	4800	6000	1,25	
8/15	4500	6500	1,44	
15/25	4330	6500	1,5	
25/40	2450			2450 x 1,5 = 3675

N.B. : Les prix du silex sont obtenus avec l'entreprise Mapathé Diouck.

- Enfin les prix des différentes fractions seront pondérées par leur part en pourcentage du matériau pour obtenir le prix du m³ du 0/40 ou du 0/31,5. Ainsi, il a été trouvé une valeur de 5387 FCFA le m³ pour le 0/40 et 5543 FCFA le m³ pour le 0/31,5.

5.2- Devis estimatif des différents matériaux pour un chantier se trouvant à 1 km de la carrière d'approvisionnement.

5.2.1- 80 % (0/40 + 20 % (0/2) calcaire 8020 C.

Numéro des prix	Désignation des prix	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Main d'oeuvre	m ³	2600	251	652.600
2	Matériel	m ³	2600	2671	6.944.600
3	Matériau				
3,1	Calcaire	m ³	2600	5360	13.936.600
3,2	Eau	m ³	230	77	17.710
	Sous total 1				21.550.910
4	Transport	m ³ km	2600	80	208.000
	Sous total 2				21.550.910
	Coefficient d'entreprise				x 1,18
	TOTAL (FCFA)				25.675.514

5.2.2- 70 % (0/31,5) + 30 % (15/25) calcaire 7030 C

Numéro des prix	Désignation des prix	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Main d'oeuvre	m ³	2600	251	652.600
2	Matériel	m ³	2600	2671	6.944.600
3	Matériau				
3,1	Calcaire	m ³	2600	5830	15.158.000
3,2	Eau	m ³	237	77	18.249.
	Sous total 1				22.773.449
4	Transport	m ³ km	2600	80	208.000
	Sous total 2				22.981.449
	Coefficient d'entreprise				x 1,18
	TOTAL (FCFA)				27.118.110

5.2.3- 70 % latérite + 30 % (0/31,5) calcaire 7030 LC

Numéro des prix	Désignation des prix	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Main d'oeuvre (part du calcaire)	m ³	780	251	195.780
2	Matériel	m ³	780	2671	2.083.380
3	Matériau				
3,1	Calcaire	m ³	780	5830	4.547.400
3,2	latérite (y compris Main d'oeuvre, matériel, eau)	m ³	1.820	7.946	14.461.720
3,3	Eau (Part du calcaire)	m ³	87	77	6.699
	Sous total 1				21.294.979
4	Transport	m ³ km	2600	80	208.000
	Sous total 2				21.502.979
	Coefficient d'entreprise				x 1,18
	TOTAL (FCFA)				25.373.515

5.2.4- 80 % latérite + 20 % (0/31,5) calcaire 8020 LC

Numéro des prix	Désignation des prix	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Main d'oeuvre (Part du calcaire seulement)	m ³	520	251	130.520
2	Matériel (Part du calcaire)	m ³	520	2671	1.388.920
3	Matériau				
3,1	Calcaire	m ³	520	5830	3.031.600
3,2	latérite (y compris Main d'oeuvre, matériel, eau)	m ³	2080	7946	16.527.680
3,3	Eau (Part du calcaire)	m ³	58	77	4466
	Sous total 1				21.083.186
4	Transport	m ³ km	2600	80	208.000
	Sous total 2				21.291.106
	Coefficient d'entreprise				x 1,18
	TOTAL (FCFA)				25.123.599

5.2.5- Basalte 80 % (0/40) + 20 % (0/2))

Numéro des prix	Désignation des prix	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Main d'oeuvre	m ³	2600	251	652.600
2	Matériel	m ³	2600	2671	6.944.600
3	Matériau				
3,1	Basalte	m ³	2600	7200	18.720.000
3,2	Eau	m ³	208	77	16.016
	Sous total 1				26.333.216
4	Transport	m ³ k m	2600	80	208.000
	Sous total 2				26.541.211
	Coefficient d'entreprise				x 1,18
	TOTAL (FCFA)				31.318.635

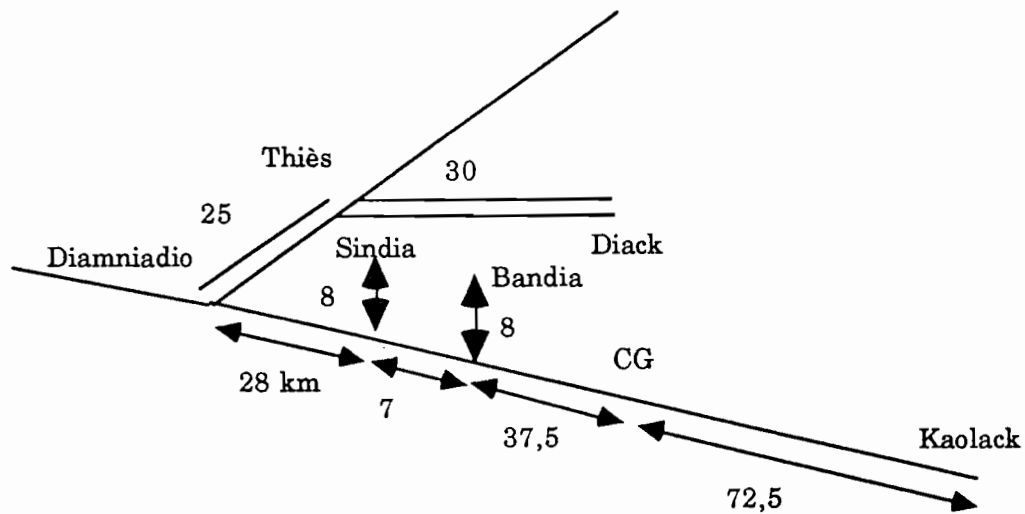
5.2.6- Latérite - ciment

Numéro des prix	Désignation des prix	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Main d'oeuvre	m ³	2600	334,28	869.128
2	Matériel	m ³	2600	8957,99	23.290.774
3	Matériau				
3,1	Ciment	m ³	78	3345,5	260.949
3,2	Eau	m ³	328	133,22	43.696,16
	Sous total 1				24.464.547,16
4	Transport	m ³ k m	2600	80	208.000
	Sous total 2				24.672.547,16
	Coefficient d'entreprise				x 1,18
	TOTAL (FCFA)				29.113.606

5.3- Etude économique appliquée au futur projet Diamniadio-Kaolack

Pour mieux apprécier l'influence du transport sur les projets routiers, l'étude économique a été appliquée sur le projet Diamniadio- Kaolack qui s'étale sur 145 km.

Les distances de transport à considérer vont de la carrière d'approvisionnement au centre de gravité du projet.



Ainsi, il a été obtenu :

- + Calcaire : Bandia - CG = 46 km
- + Basalte : Diack - CG = 128 km (il n'existe pas de piste qui permet d'aller de Diack à la RN1 sans passer par Thiès).
- + latérite : Sindia - CG = 53 km.

Tableau n°5.3 : Evaluation économique du projet Diamniadio - Kaolack

Variante	PROJET DIAMNIADIO - KAOLACK			
	Linéaire (km)	Distance de transport (km)	Coût par km de route et par km de transport	Coût total
8020C	145	46	25.675.514	4.512.241.950
7030C	145	46	27.118.110	4.689.510.105
Basalte	145	128	31.318.635	7.678.796.320
7030LC	145	53 + 46	25.373.515	4.622.915.955
8020LC	145	53 + 46	25.123.599	4.613.317.970
Latérite - Ciment	145	53	29.113.6.6	5.145.939.338

5.4- Analyse et interprétation des différents résultats

Les différents éléments de coûts obtenus permettent de faire les analyses suivantes :

- Les coûts des matériaux calcaires varient suivant la formulation utilisée. Sur un km de route, l'utilisation de la formulation 8020C à la place de 7030C permet de réaliser une économie de 1.442.596 FCFA. Avec le projet Diamniadio-Kaolack, elle passe à 177.268.155 FCFA. Une corrélation avec les résultats techniques montre que pour des niveaux de trafic $T_1 - T_3$, il serait plus recommandé d'utiliser la formulation 8020C. La cherté du 7030C par rapport au 8020C est due à la part importante du 15/25 dans le 7030C. Pour les trafics T_4 et T_5 , si toutefois le calcaire devrait être utilisé, il serait plus indiqué de prendre le 7030C. Il ne faudrait pas léser les critères techniques par rapport aux critères économiques. Par ricochet, la meilleure solution serait celle analysée sous ces deux aspects.

- L'utilisation du basalte de Diack pour le projet Diamniadio - Kaolack serait utopique. Cette solution coûterait excessivement cher par rapport au calcaire et à la lithostabilisation. Ceci s'explique par la longue distance de transport. Pour arriver au centre de gravité du projet, le transporteur qui quitte Diack passe obligatoirement par Thiès ce qui donne une distance cumulée de 128 km. Ainsi pour toute la région de Dakar et pour une bonne partie de Thiès, le calcaire serait beaucoup plus rentable que le basalte de Diack. Et par conséquent au moins pour les trafics $T_1 - T_4$, le choix calcaire devrait être évident devant le basalte de Diack si toutefois les résultats techniques trouvés se confirmeraient.

- Sur Diamniadio-Kaolack, l'utilisation de la lithostabilisation (7030 LC) à la place de la solution courante latérite - ciment créerait une baisse des coûts de

522.923.383 FCFA. Ce résultat permet de pouvoir proposer l'alternative lithostabilisation à la place de la latérite - ciment.

Techniquement le mélange latérite - calcaire (7030 LC) donne satisfaction car pouvant supporter tous les trafics, et il faut souligner l'aspect rustique du matériau qui pourrait être donc utilisé sans que l'on ne se soucie des conditions climatiques du milieu ; contrairement à la latérite - ciment dont la mise en oeuvre requiert des précautions particulières. En 3 heures de temps, le matériau doit être malaxé, répandu et compacté et si toutefois la compacité n'est pas atteinte, il devrait être décapé ; ce qui montre qu'au delà des éléments tangibles, l'utilisation de la latérite - ciment présente des risques qui pourraient augmenter considérablement les coûts d'un projet.

Aujourd'hui pour nos pays en voie de développement, il serait plus rentable dans le but d'optimiser les investissements d'utiliser des matériaux moyens techniquement et coûtant moins chers.

L'utilisation des matériaux coûteux même s'ils donnent de hautes performances techniques devrait être diminuée au moins pour les trafics T1 - T4 dont les matériaux naturels tels le calcaire, la latérite - calcaire etc.. pourraient supporter.

Ceci permettrait une meilleure optimisation des matériaux dont leur épuisement posent aujourd'hui de véritables inquiétudes aux gestionnaires de projets routiers.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a permis de voir beaucoup de possibilités d'utilisation du concassé de calcaire de Bandia en couche de base.

Celle-ci s'est faite sous deux angles : l'utilisation du calcaire pur a été étudiée puis une étude de lithostabilisation consistant à traiter les latérites de mauvaise qualité par le calcaire a été effectuée.

En se basant sur les prescriptions techniques les propositions suivantes pourraient être faites :

Tableau n° : *Propositions de solutions*

Trafic	Calcaire Pur		Lithostabilisation	
	80 % (0/40) + 20 % (0/2)	70 % (0/31,5) + 30 % (15/25)	70 % latérite + 30 % (0/31,5 calcaire)	80 % latérite + 20 % calcaire
T1	XX	X	X	XX
T2	XX	X	X	XX
T3	XX	X	X	XX
T4		X	X	
T5		X	X	

N.B. : X : techniquement acceptable

XX : techniquement acceptable et plus économique que l'autre solution.

Pour le calcaire avec des précautions strictes de mise en oeuvre, la formulation 70 % ((0/40) + 10 % (3/8) + 20 % (0/2)) pourrait aussi être proposée. Ainsi, il serait recommandé de réétudier ce matériau de même que la formulation 90 % de latérite + 10 % de calcaire.

Avant de dégager des recommandations, il serait bon de parler des limites que pourraient présenter les résultats trouvés, limites liées à la non reproductibilité des essais.

Pour des raisons de non disponibilité d'appareil CBR à l'école, les essais CBR n'ont pu être multipliés. Seuls deux essais CBR par formulation ont pu être faits.

Le CBR ayant un coefficient de variation pouvant atteindre 100 % ces résultats ne pourraient être pris comme argent comptant.

Pour mieux se prononcer par rapport à l'utilisation du calcaire en couche de base, il serait recommandé que des planches d'essai soient exécutées ; ce qui permettrait d'expérimenter tous les matériaux proposés dans les véritables conditions d'exploitation des routes (climat, trafic etc..).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DOCUMENTS D'ORDRE GÉNÉRAL

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1. C.E.B.T.P | Guide Pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, Ministère Français de la Coopération, 1984. |
| 2. C.E.B.T.P-L.C.P.C | Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux. |
| 3. B.C.E.O.M-C.E.BT.P | Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques, tome 2, Etude et Construction, 1975 |
| 4. JEUFFROY, G | Conception et Construction des chaussées Tome I, Eyrolles, 1967. |
| 5. Roberts Holts et Williams Kovacs | Introduction à la géotechnique, édition de l'Ecole Polytechnique de Montréal. |

RAPPORTS

- | | |
|--------------------|---|
| 6. Maïmouna Sidibé | Etude de l'utilisation des granulats de type silexite en Géotechnique routière, Ecole Polytechnique de Thiès, 1995. |
| 7. Mor Guèye Gaye | Caractérisation et performances d'un granulat : type nouveau en corps de chaussée : les silexites (produits secondaires dans la chaîne de production de la CSPT-Taïba) Institut des Sciences de la Terre, 1995. |

8. Direction des Travaux Publics	Rapport sur le projet Géoul-Baralé, PAST, 1995.
9. LISTE D	Rapport d'études sur la route de Tahoun-Arliht, les matériaux de chaussées, BCEOM - LPC, 1983
10. LISTE D	Rapport d'études sur la route de Tahoun-Arliht, comportement des matériaux de chaussées après 4 ans de service, LCPC, 1985.
11. Khoult NDIAYE	Etude de l'utilisation du sable bitume en couche de base, Ecole Polytechnique de Thiès, 1993
12. Massamba DIENE	Latérites et stabilisation en construction routière. Application à deux graveleux latéritiques du Sénégal, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Juin 1984.
13. Plan minéral	Direction de la Géologie Volume 1..
COURS	
14. Youssef SAKHO	Cours de Route II, Ecole Polytechnique de Thiès, 1994.
15. Massamba DIENE	Cours de Route II, Ecole Polytechnique de Thiès, 1996

ANNEXES

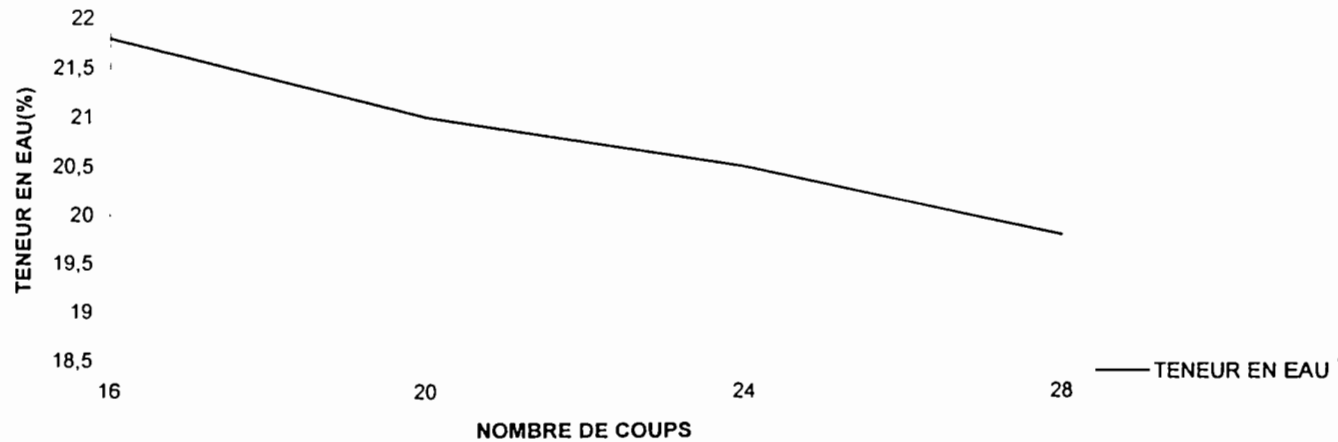
ANNEXE A

Résultats d'essais effectués sur le 0/40 TV de calcaire

Limite d'ATTERBERG Formulation 0/40 calcaire tout venant

	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE	
	16	20	24	28	1er essai	2ème essai
Nombre de coups	16	20	24	28	1er essai	2ème essai
N° de la tare	5	400	30	A	D	32
Poids humide+tare	47,9	57,9	52,1	74,7	44,9	53,5
Poids sec+tare(g)	42,8	51,6	46,8	66,6	41,5	48,9
Poids de l'eau(g)	5,1	6,3	5,3	8,1	3,4	4,6
Poids de la tare (g)	19,4	21,7	21	25,8	20,1	19,8
Poids sol sec (g)	23,4	29,9	25,8	40,8	21,4	29,1
teneurs en eau	21,8	21	20,5	19,8	15,8	15,8
Moyenne					15,8	

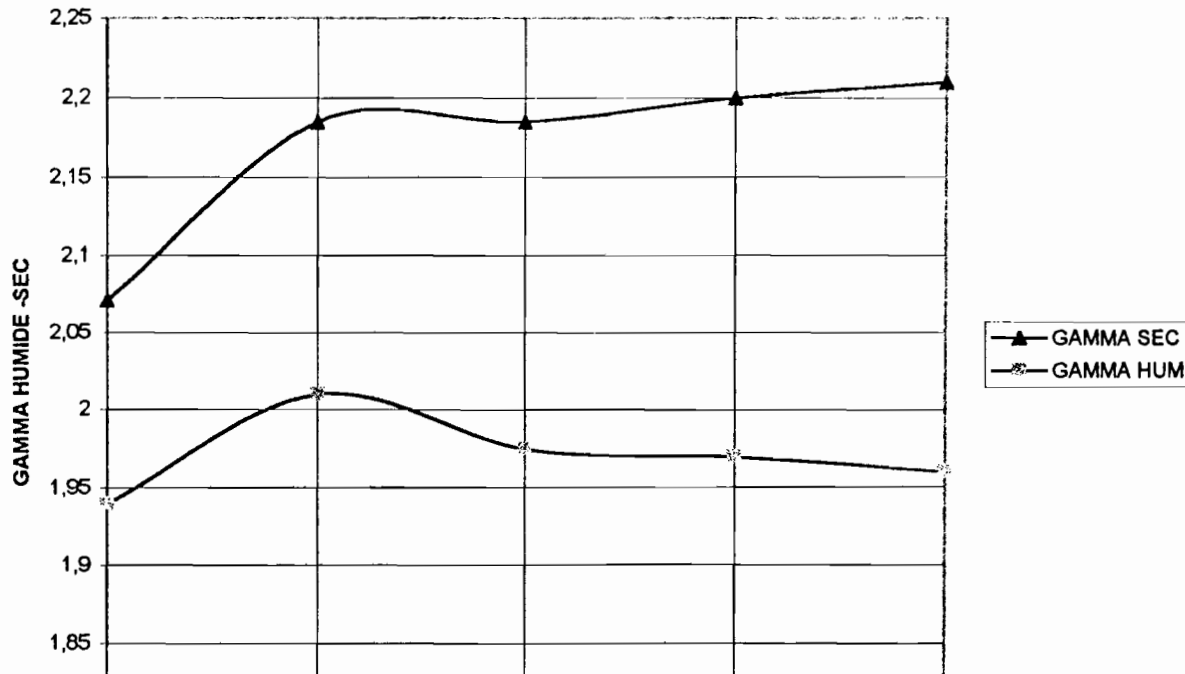
TENEUR EN EAU EN FONCTION DU NOMBRE DE COUPS



- 41 -

	GAMMA SEC	GAMMA HUM			
6,6	2,071	1,94			
8,7	2,185	2,01			
10,8	2,185	1,975			
11,7	2,2	1,97			
12,8	2,21	1,96			

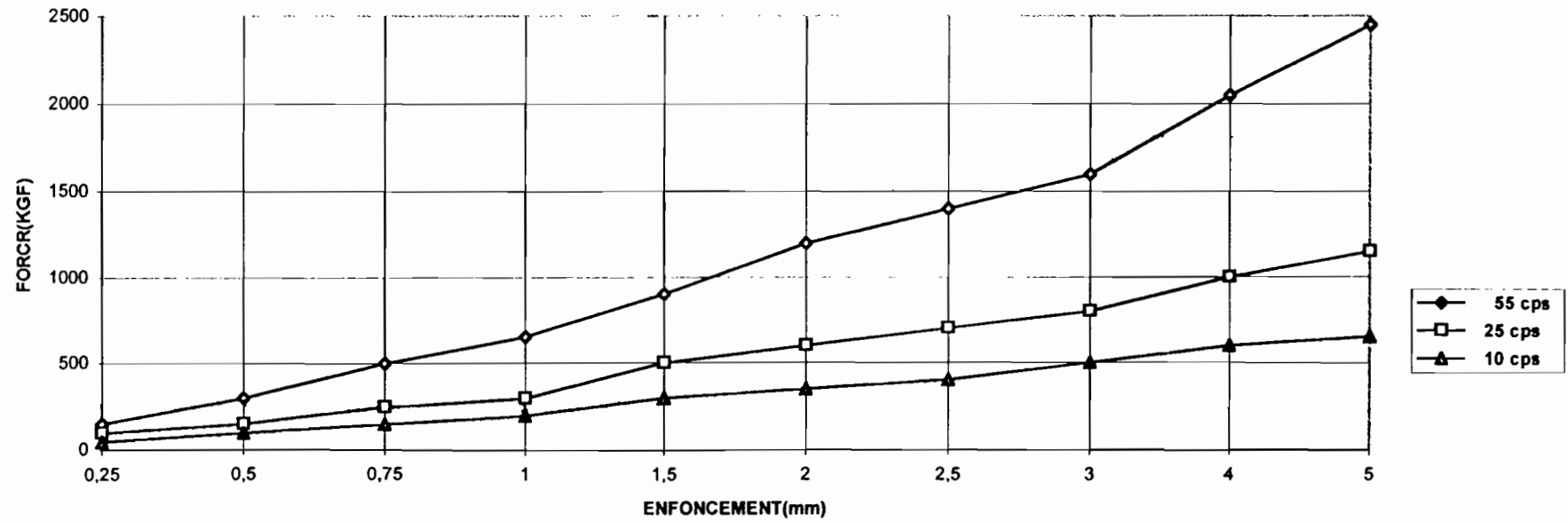
FORMULATION 0/40 C



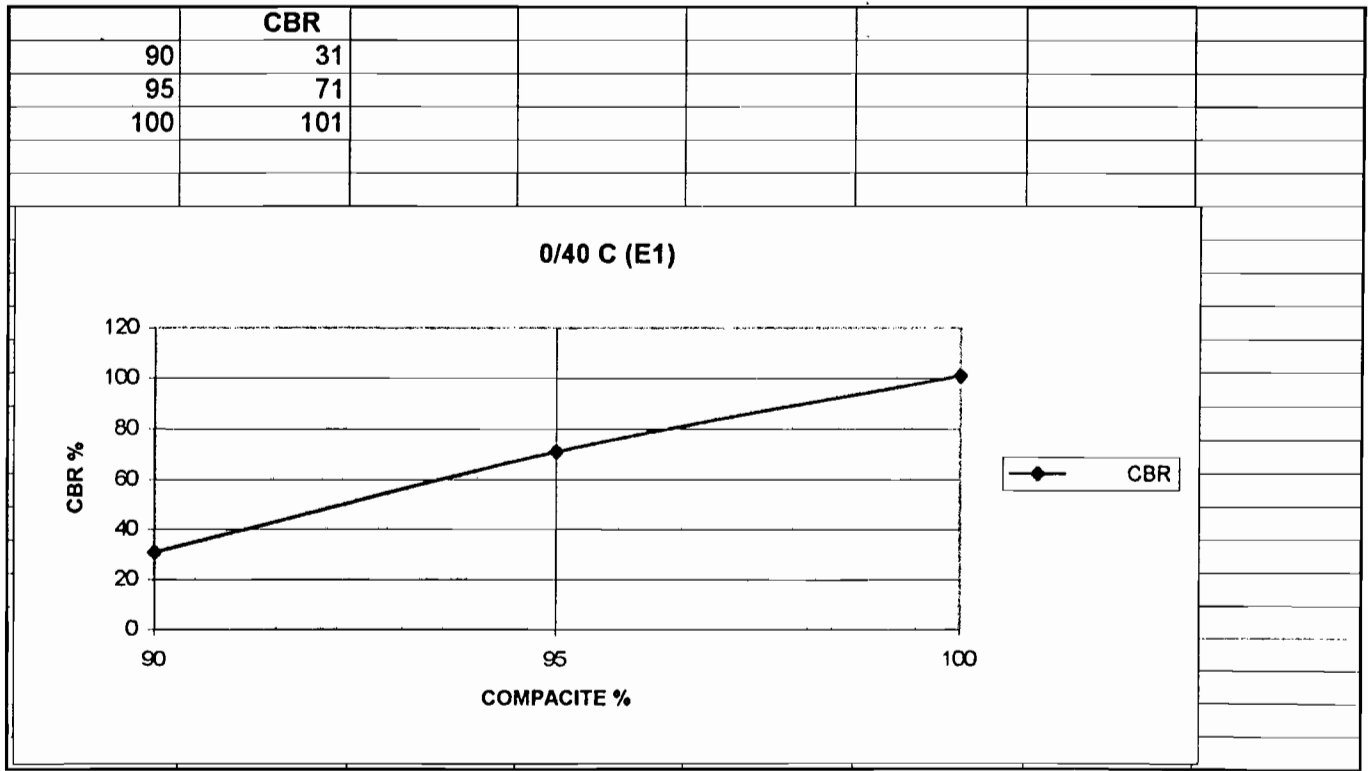
F-2

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	150	100	50
0,5	300	150	100
0,75	500	250	150
1	650	300	200
1,5	900	500	300
2	1200	600	350
2,5	1400	700	400
3	1600	800	500
4	2050	1000	600
5	2450	1150	650

FORMULATION 0/40C(E1)



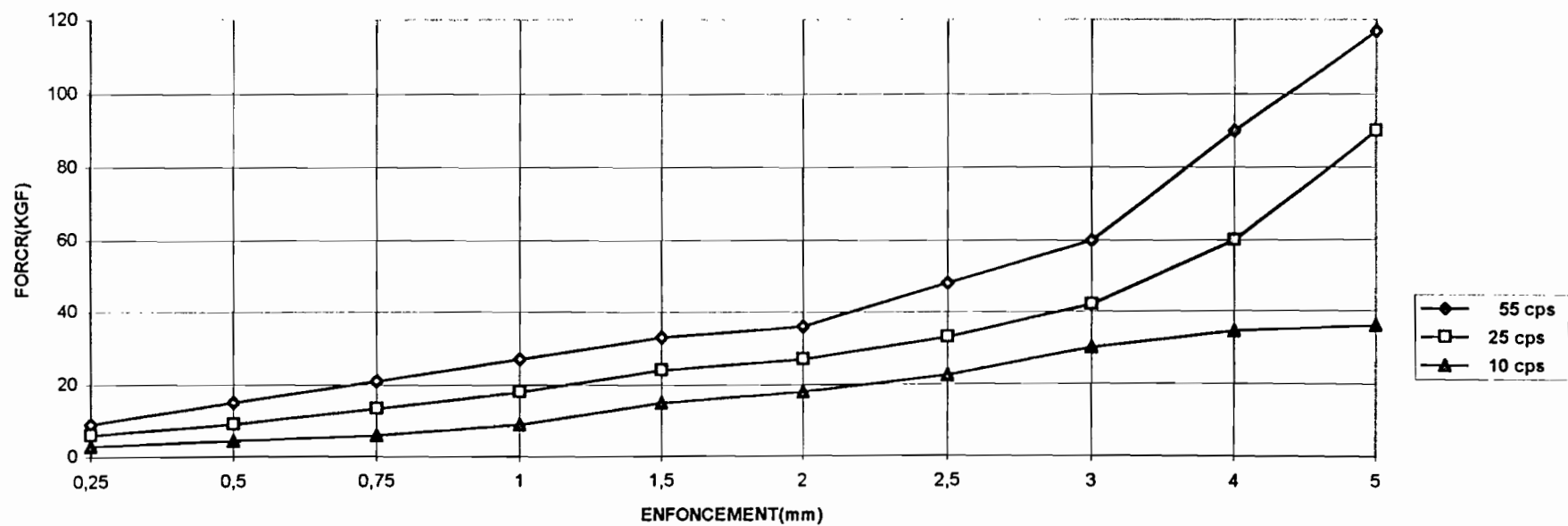
A-3



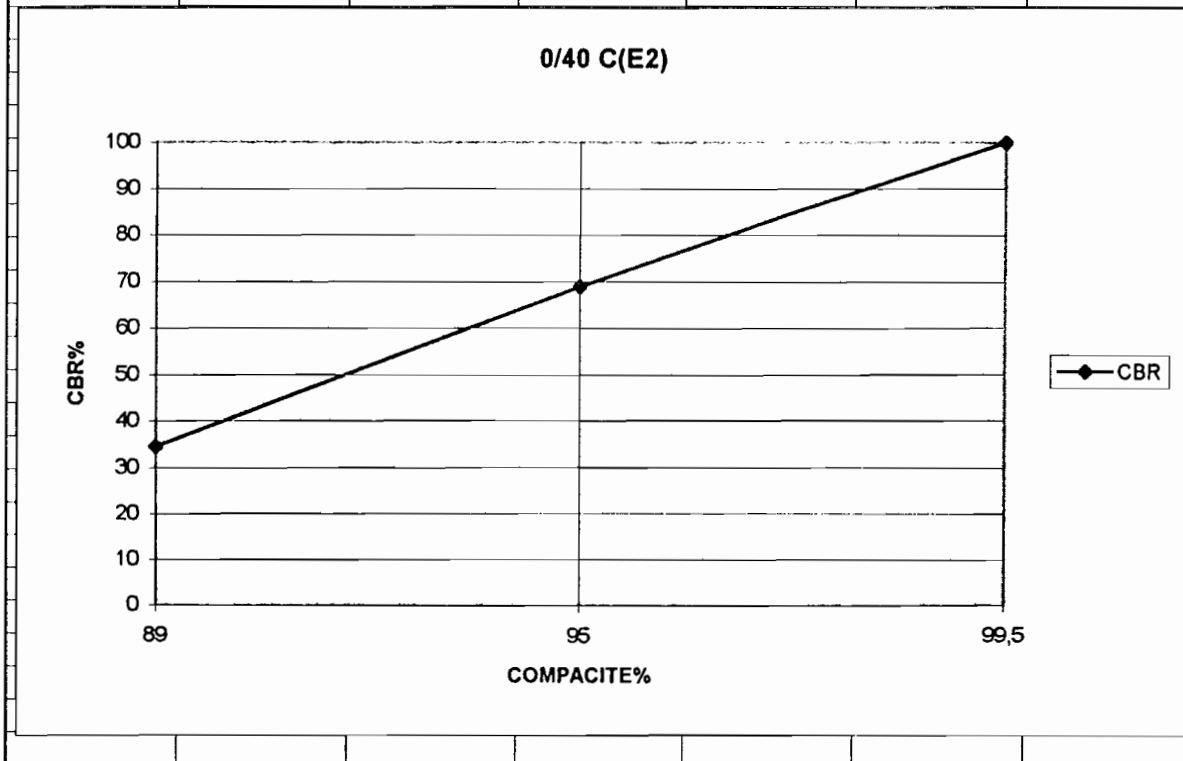
A-24

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	9	6	3
0,5	15	9	4,5
0,75	21	13,5	6
1	27	18	9
1,5	33	24	15
2	36	27	18
2,5	48	33	22,5
3	60	42	30
4	90	60	34,5
5	117	90	36

FORMULATION 0/40C(E2)



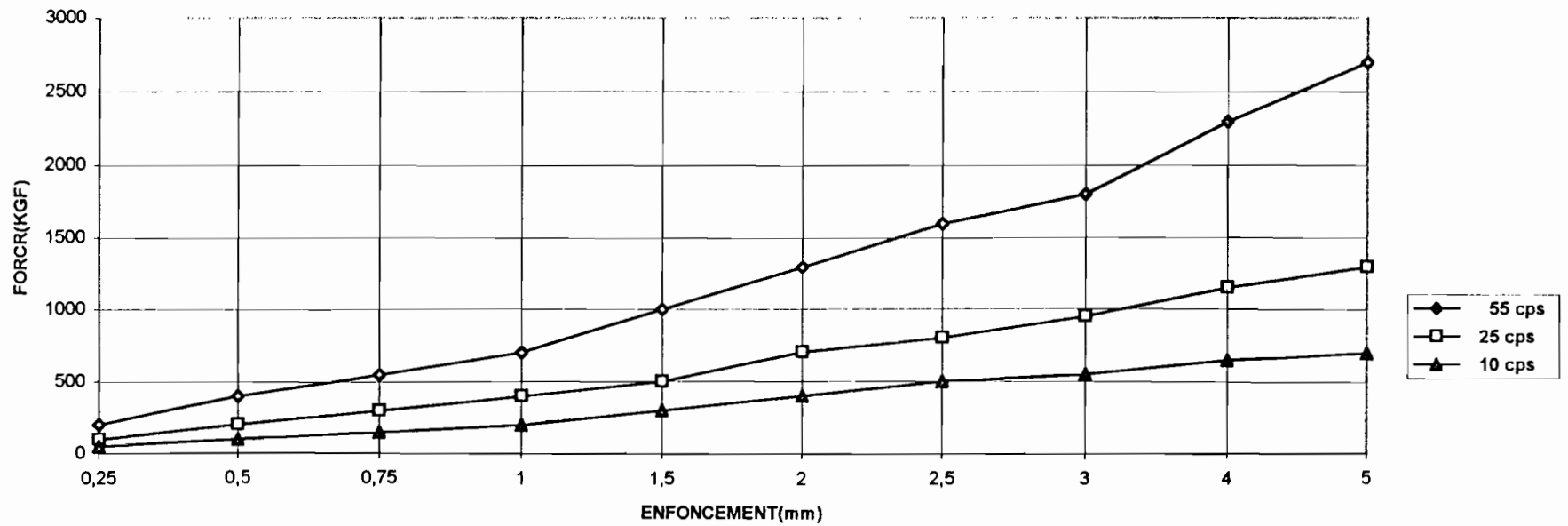
	CBR					
89	34,5					
95	69					
99,5	100					



A-6

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps							
0,25	200	100	50							
0,5	400	200	100							
0,75	550	300	150							
1	700	400	200							
1,5	1000	500	300							
2	1300	700	400							
2,5	1600	800	500							
3	1800	950	550							
4	2300	1150	650							
5	2700	1300	700							

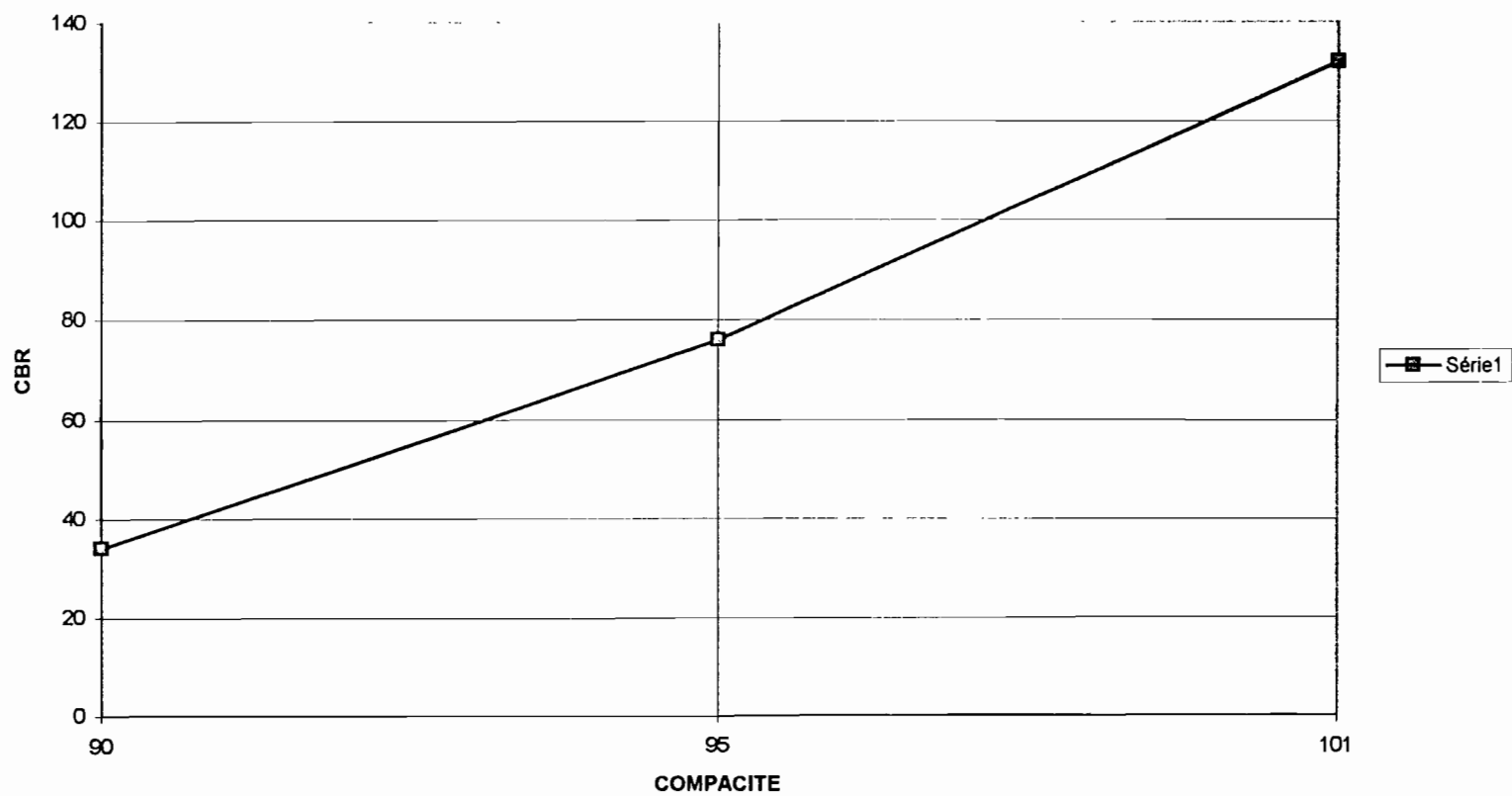
FORMULATION 0/40C IMMEDIAT



4-7

COMPACITE	CBR								
90	34								
95	76								
101	132								

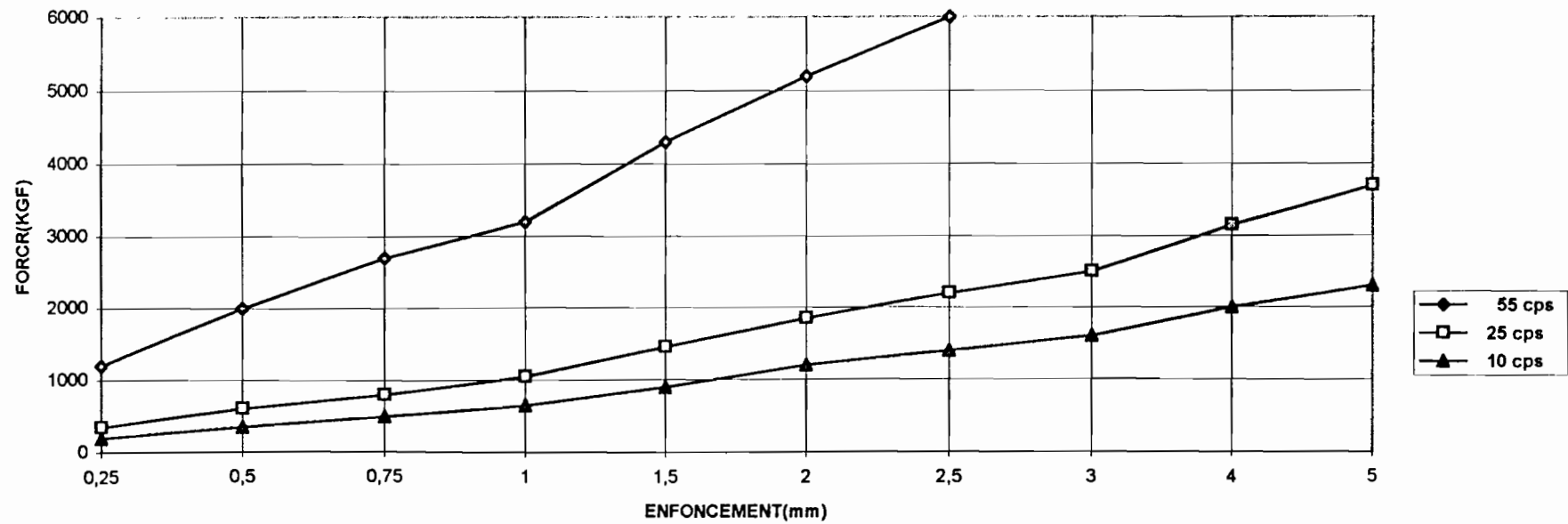
FORMULATION 0/40C IMMEDIAT



A-8

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	1200	350	200
0,5	2000	600	350
0,75	2700	800	500
1	3200	1050	650
1,5	4300	1450	900
2	5200	1850	1200
2,5	6000	2200	1400
3		2500	1600
4		3150	2000
5		3700	2300

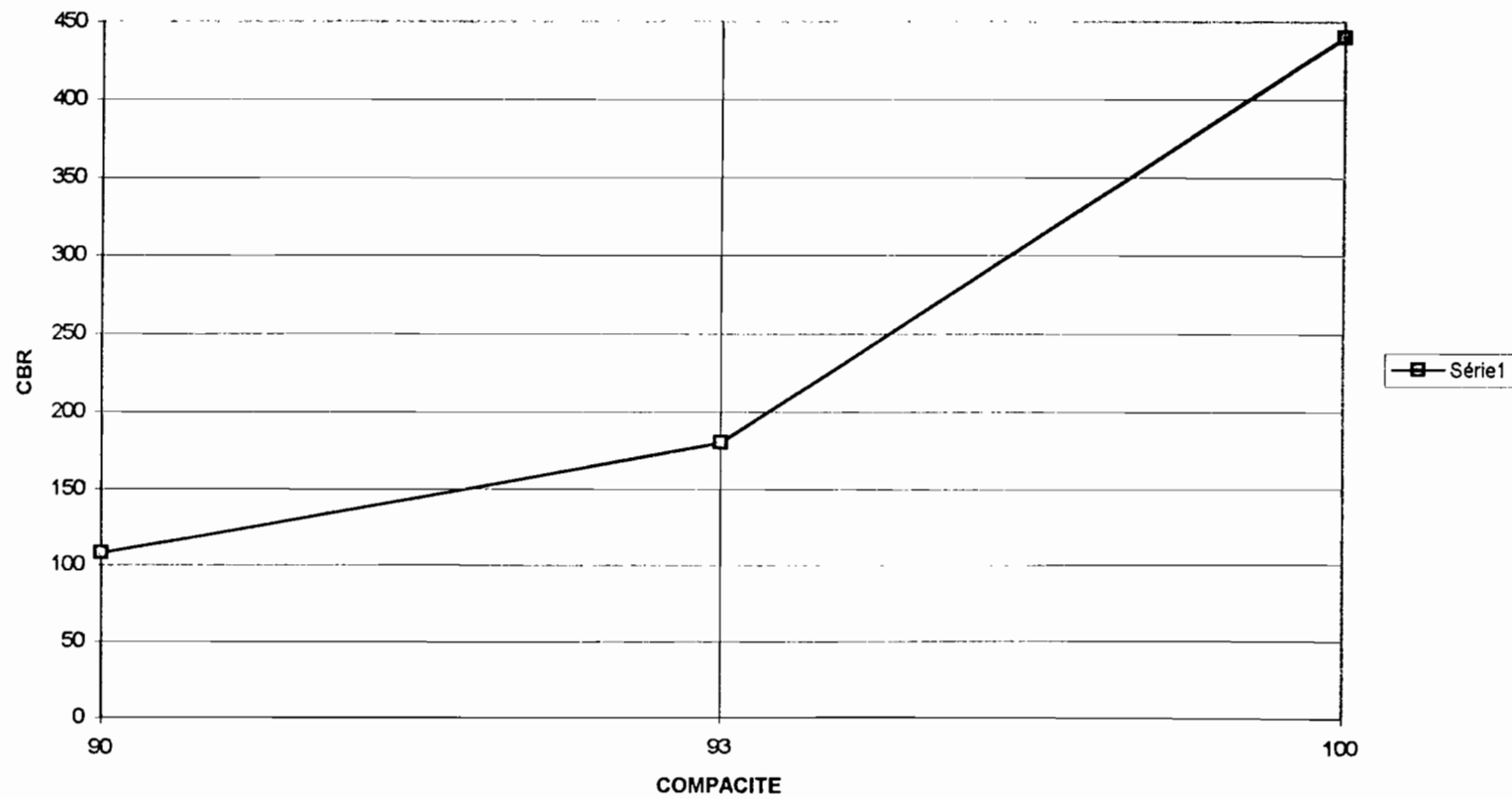
FORMULATION 0/40 DESSICATION



A-50

COMPACITE	CBR								
90	108								
93	180								
100	440								

FORMULATION 0/40C DESSICATION



ANNEXE B

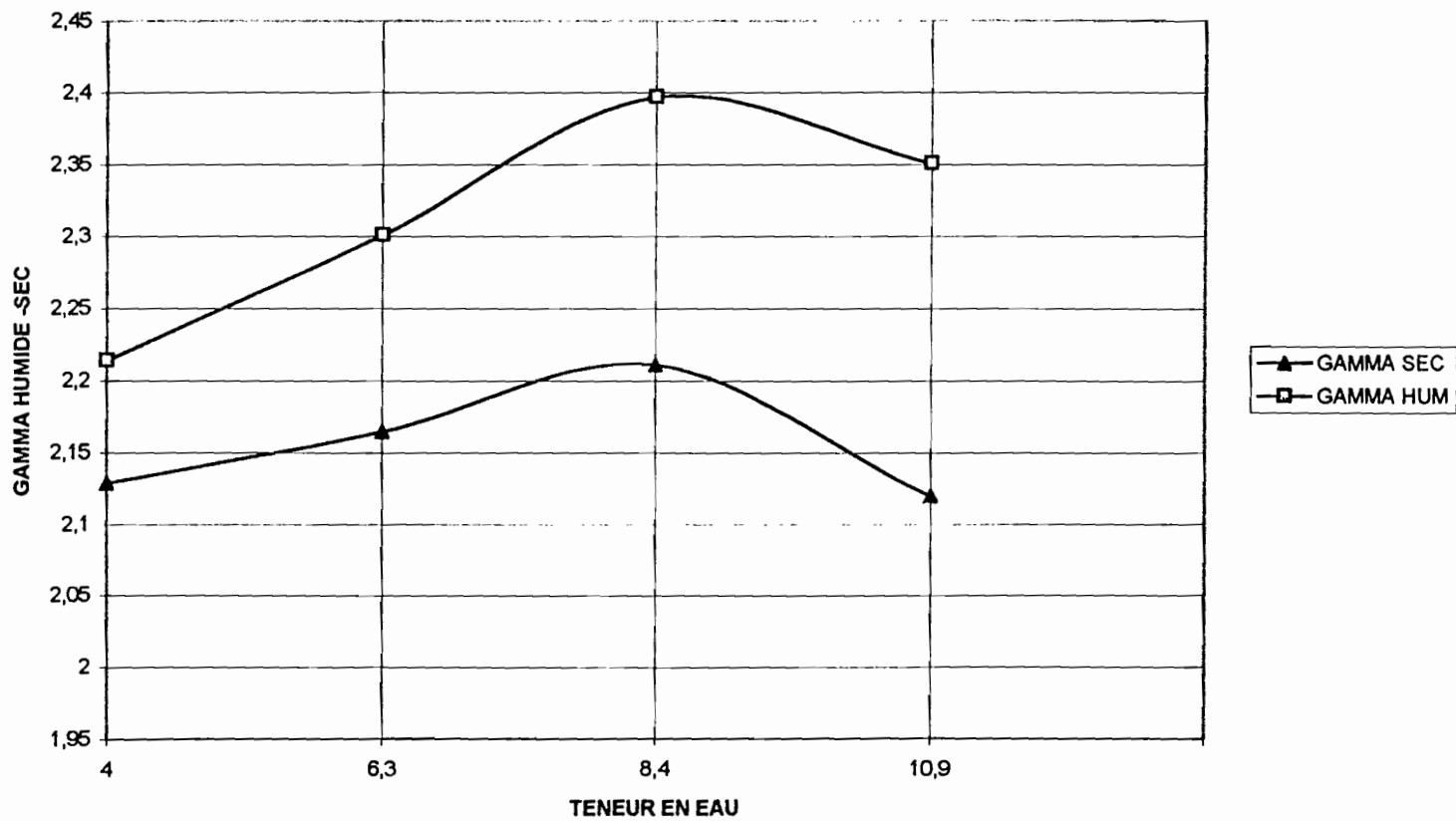
Résultats d'essais sur la formulation 70 % (0/40) + 10 % (3/8) + 20 % (0/2)

Mesure du poids spécifique
Formulation 70 10 20 CALCAIRE

Essai n°	1	2
Poids du picnomètre plein d'eau A(g)	773,1	773,6
Poids du sol sec B(g)	350	350
Poids du pic+sol sec+eau C(g)	990,1	990,1
Poids spécifique	2,631	2,621
Température de l'eau	25°	25°
poids spécifique corrigé moyen	2,634	

	GAMMA SEC	GAMMA HUM
4	2,129	2,214
6,3	2,165	2,301
8,4	2,211	2,397
10,9	2,12	2,351

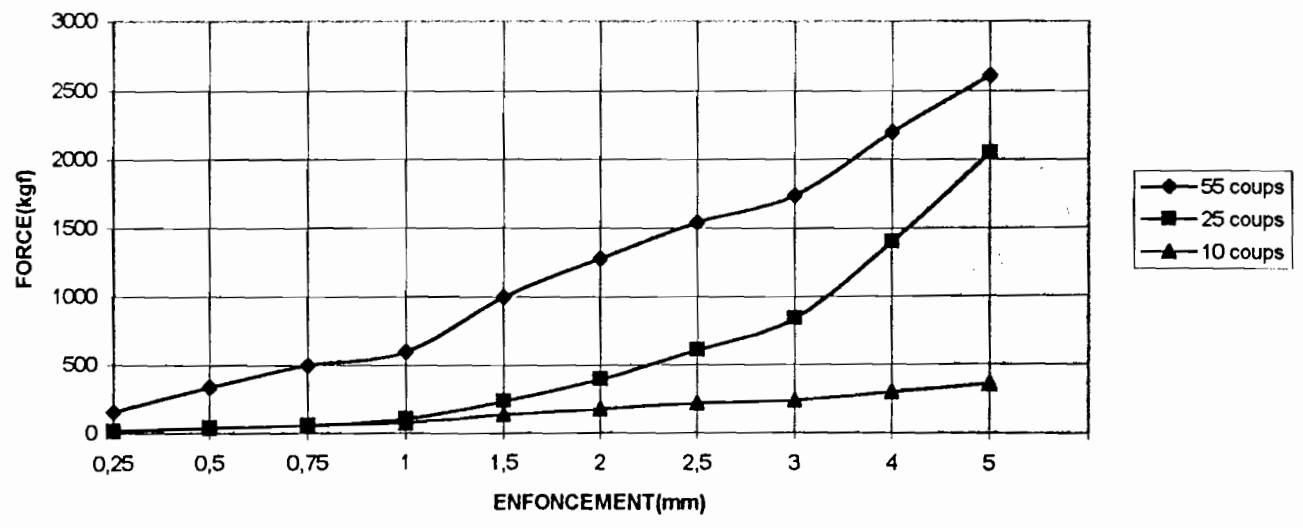
FORMULATION 701020 CALCAIRE



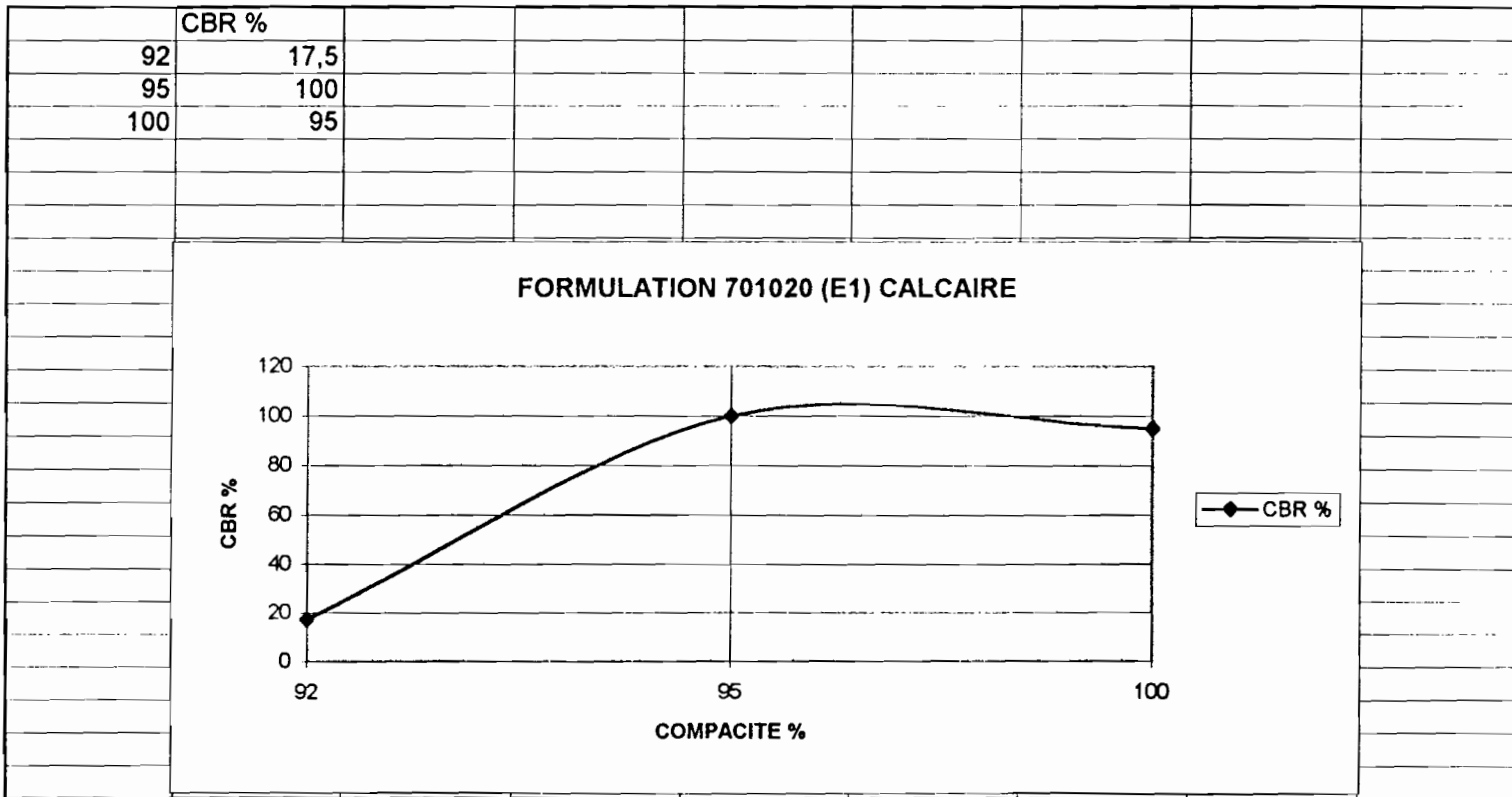
A-12

	55 coups	25 coups	10 coups				
0,25	160	20	20				
0,5	340	40	40				
0,75	500	60	60				
1	600	110	80				
1,5	1000	240	140				
2	1280	400	180				
2,5	1540	610	220				
3	1740	840	240				
4	2200	1400	300				
5	2610	2050	360				

FORMULATION 701020 (E1) CALCAIRE



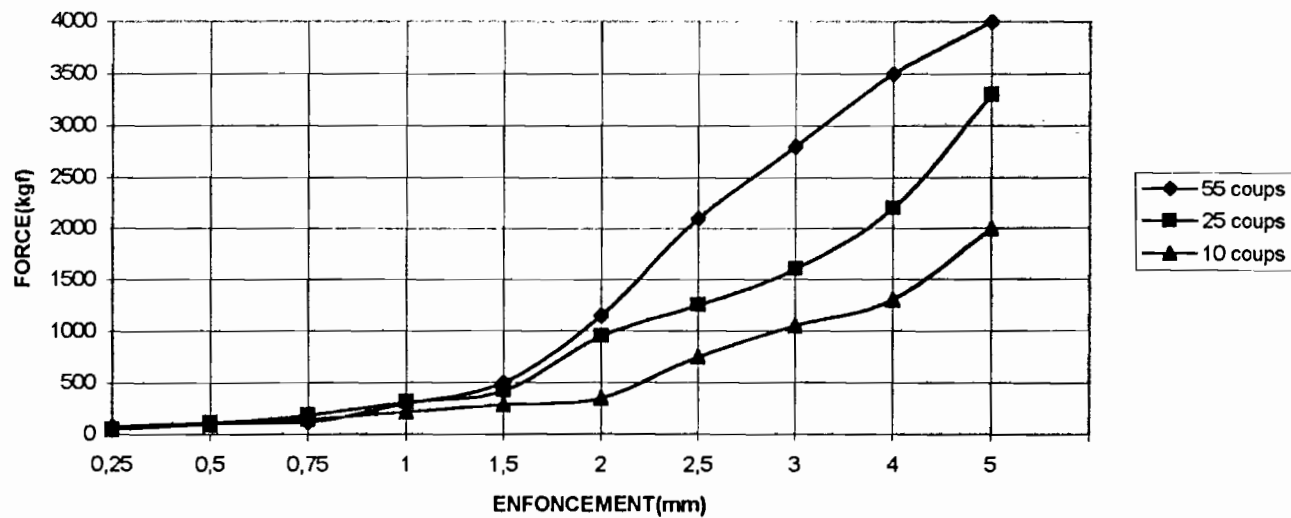
A-12 h10 1 -

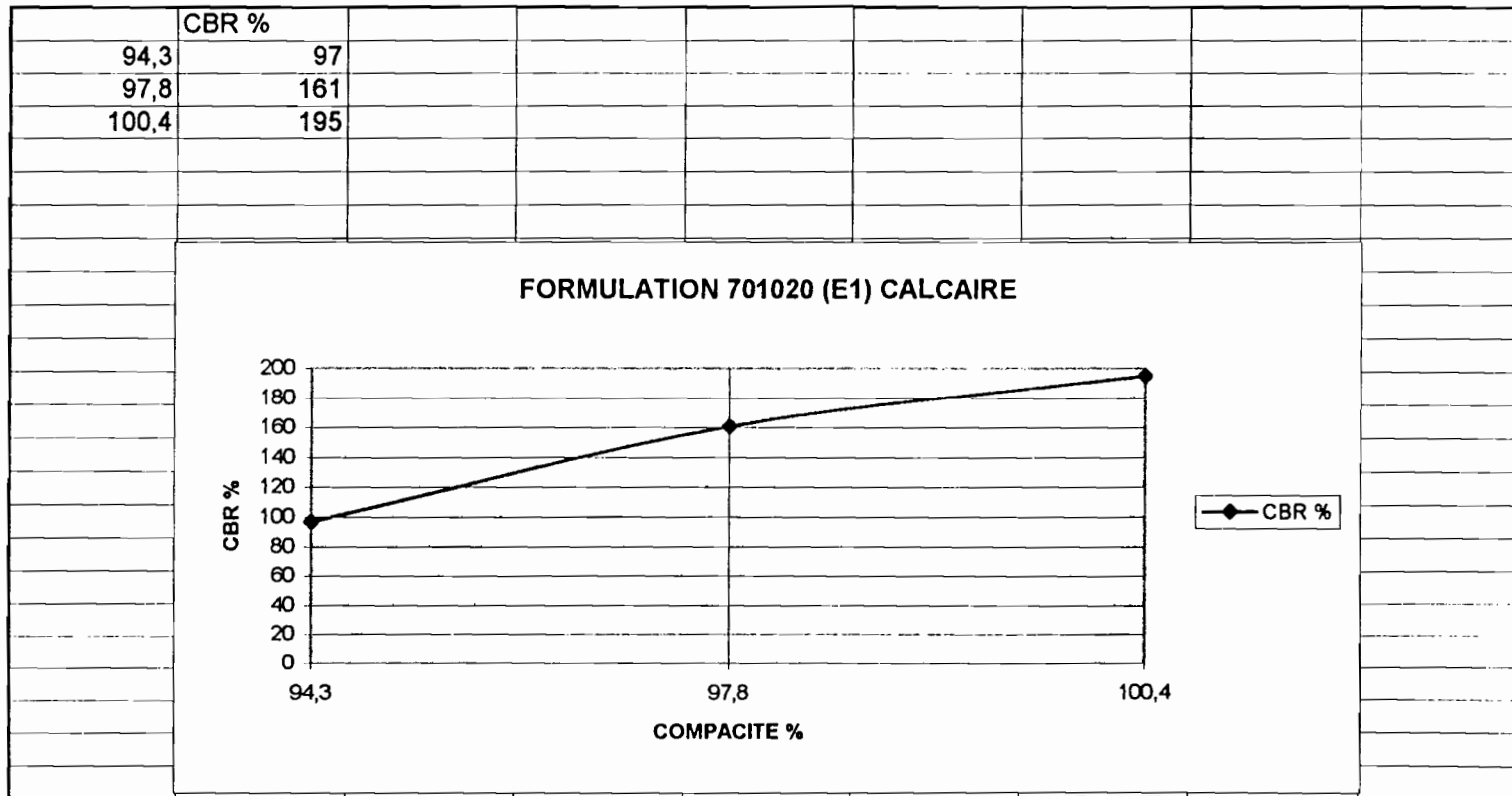


- A-12 b/w 2 -

	55 coups	25 coups	10 coups					
0,25	80	50	50					
0,5	110	110	100					
0,75	120	190	150					
1	300	310	220					
1,5	500	420	290					
2	1150	950	350					
2,5	2100	1250	750					
3	2800	1600	1050					
4	3500	2200	1300					
5	4000	3300	2000					

FORMULATION 701020 (E2) CALCAIRE





A-12 5004

ANNEXE C

Résultats d'essais sur les différents mélanges 0/40 + 0/2

Mesure du poids spécifique
Formulation 90 10 calcaire

Essai n°	1	2
Poids du picnomètre plein d'eau A(g)	774,6	774,6
Poids du sol sec B(g)	330	330
Poids du pic+sol sec+eau C(g)	980,1	980,6
Poids spécifique	2,65	2,661
Température de l'eau	25°	25°
poids spécifique corrigé moyen	2,663	

- A-13 -

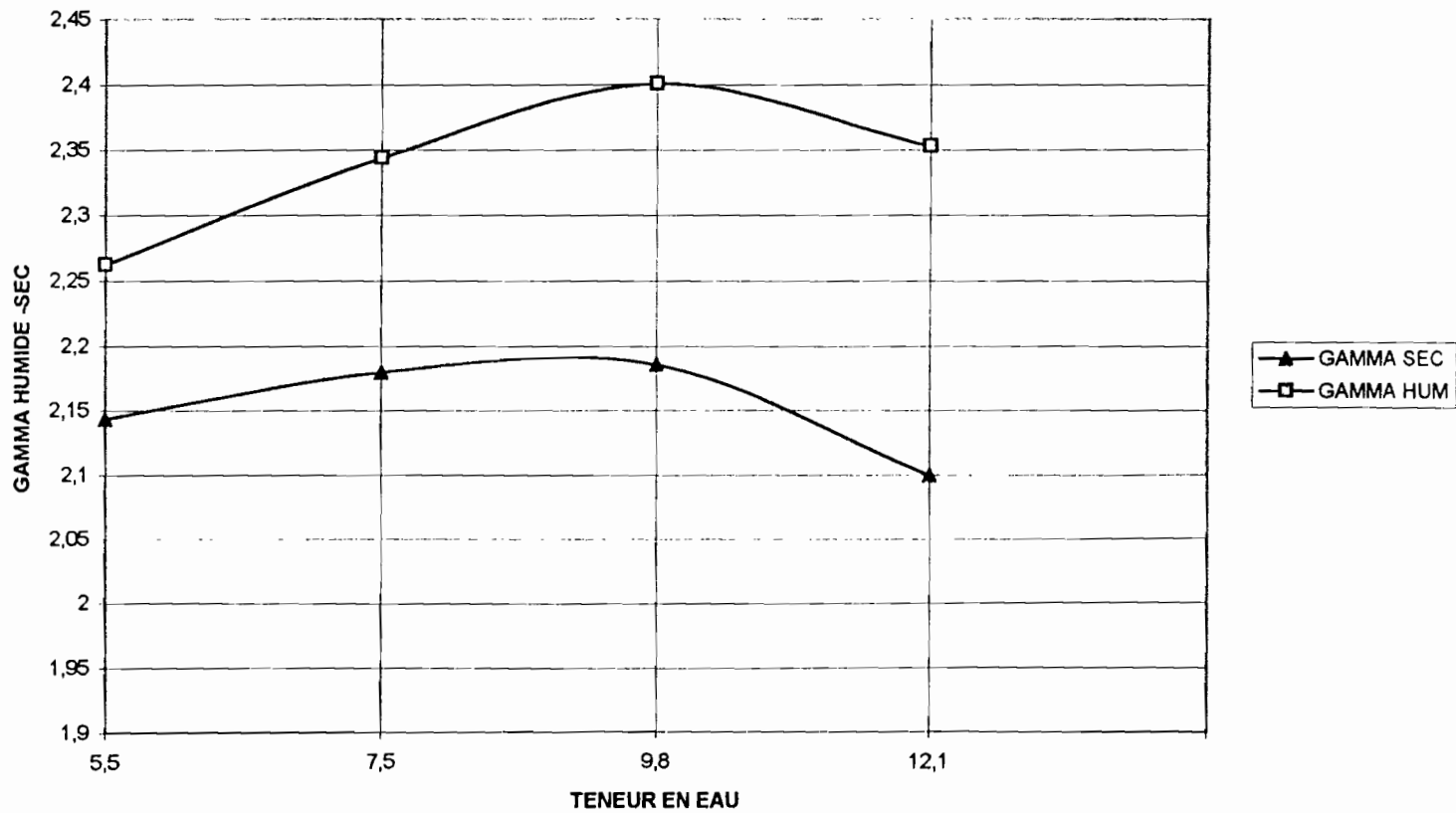
Mesure du poids spécifique
Formulation 80 20 calcaire

Essai n°	1	2
Poids du picnomètre plein d'eau A(g)	773,9	773,9
Poids du sol sec B(g)	360	360
Poids du pic+sol sec+eau C(g)	996,5	997,3
Poids spécifique	2,62	2,635
Température de l'eau	25°	25°
poids spécifique corrigé moyen	2,633	

A-15

	GAMMA SEC	GAMMA HUM
5,5	2,144	2,262
7,5	2,18	2,344
9,8	2,186	2,401
12,1	2,1	2,353

FORMULATION 8020 CALCAIRE



At-116

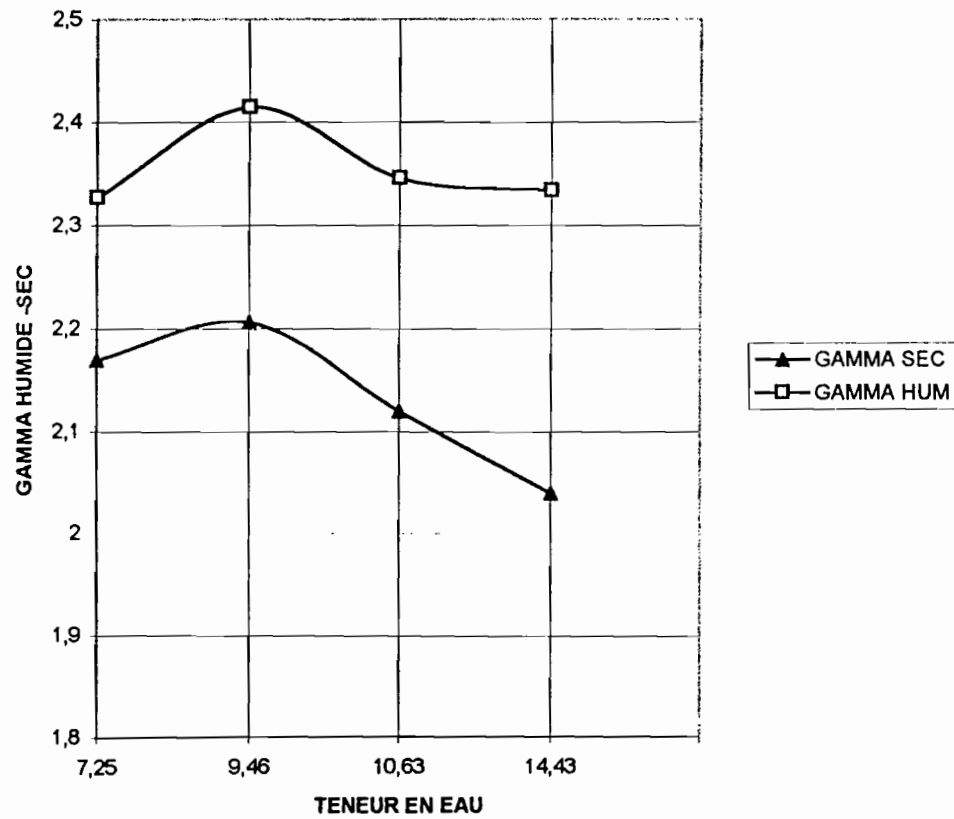
Mesure du poids spécifique
Formulation 70 30 calcaire

Essai n°	1	2
Poids du picnomètre plein d'eau A(g)	773,9	773,9
Poids du sol sec B(g)	340	340
Poids du pic+sol sec+eau C(g)	985,5	984,9
Poids spécifique	2,643	2,635
Température de l'eau	25°	25°
poids spécifique corrigé moyen	2,647	

- A-17 -

	GAMMA SEC	GAMMA HUM
7,25	2,17	2,327
9,46	2,206	2,415
10,63	2,12	2,346
14,43	2,04	2,334

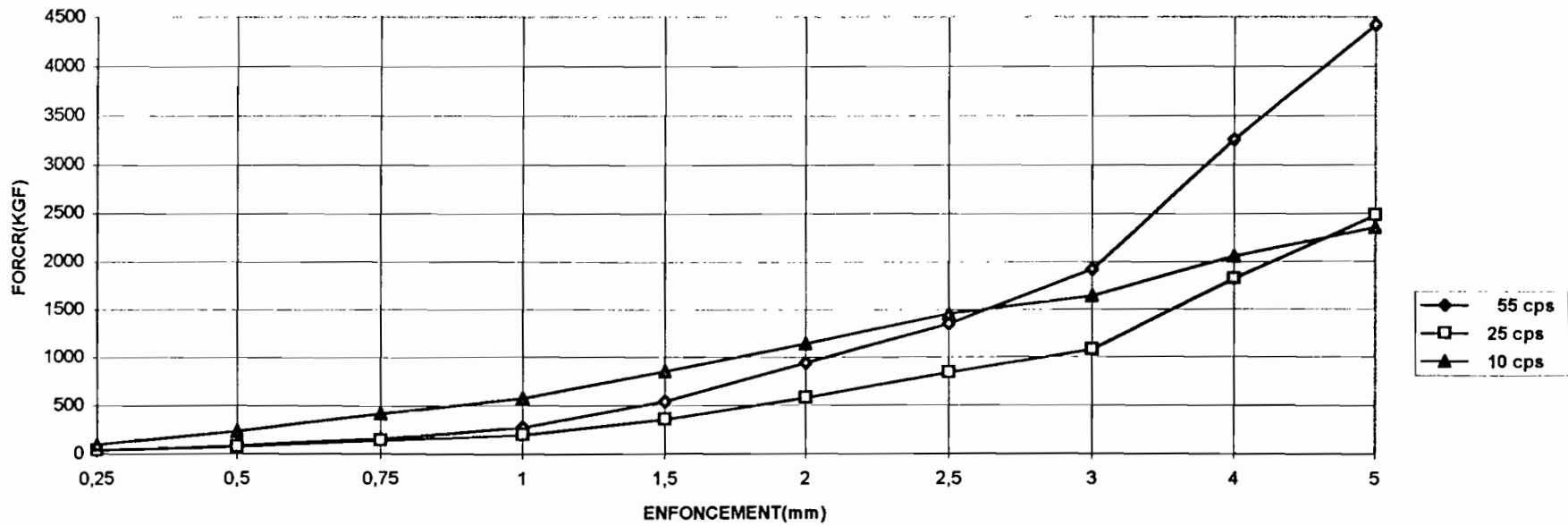
FORMULATION 7030 CALCAIRE



A-18

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	40	40	100
0,5	90	80	240
0,75	160	140	420
1	280	200	580
1,5	540	360	850
2	940	580	1140
2,5	1350	840	1460
3	1920	1080	1640
4	3260	1820	2060
5	4420	2480	2360

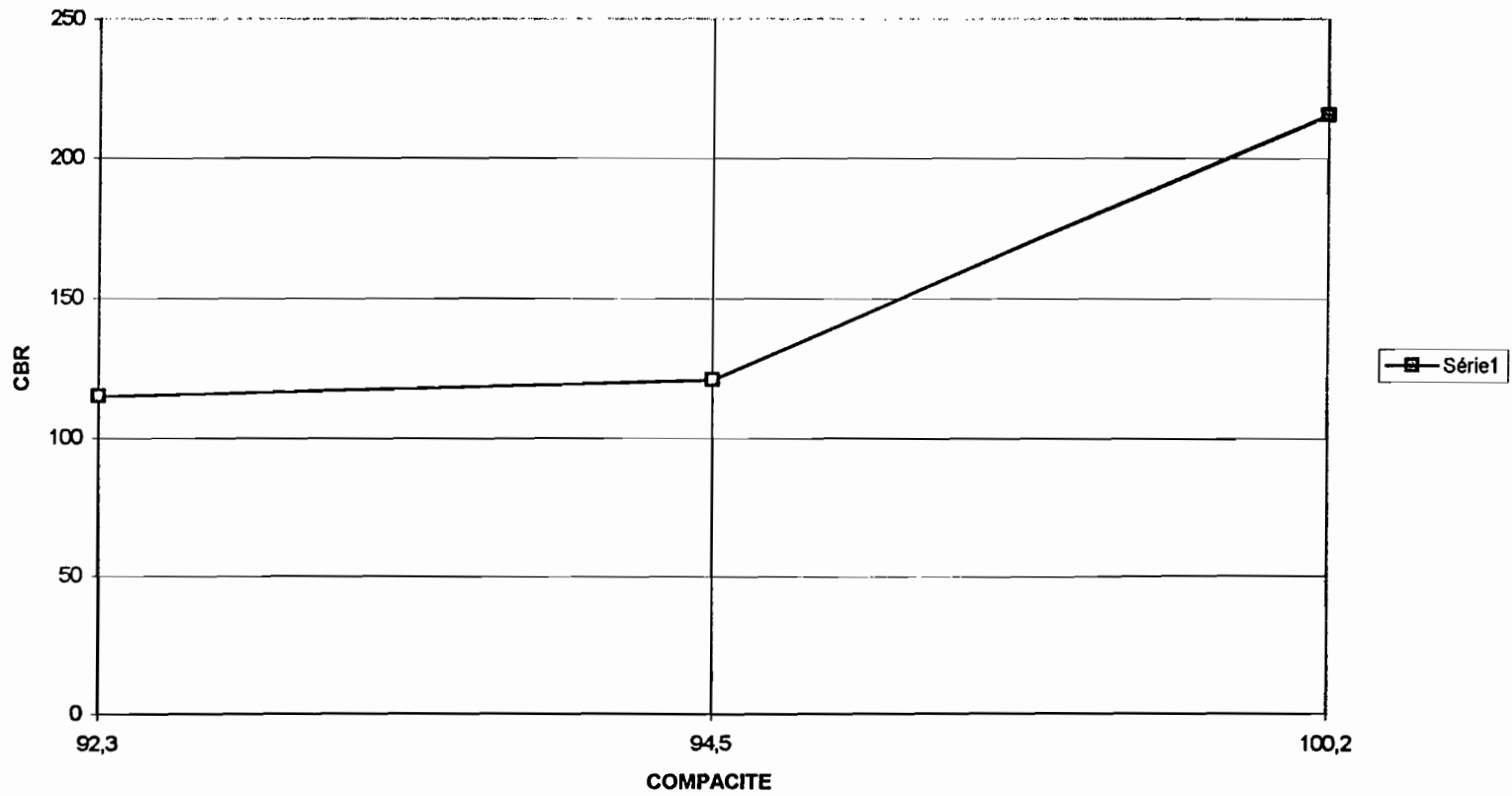
FORMULATION 8020C(E1)



A-75

COMPACITE	CBR								
92,3	115								
94,5	120,97								
100,2	215,61								

FORMULATION 8020C(E1)



A-20

ANNEXE D

Résultats d'essais sur la formulation 70 % (0/31,5) + 30 % (15/25)

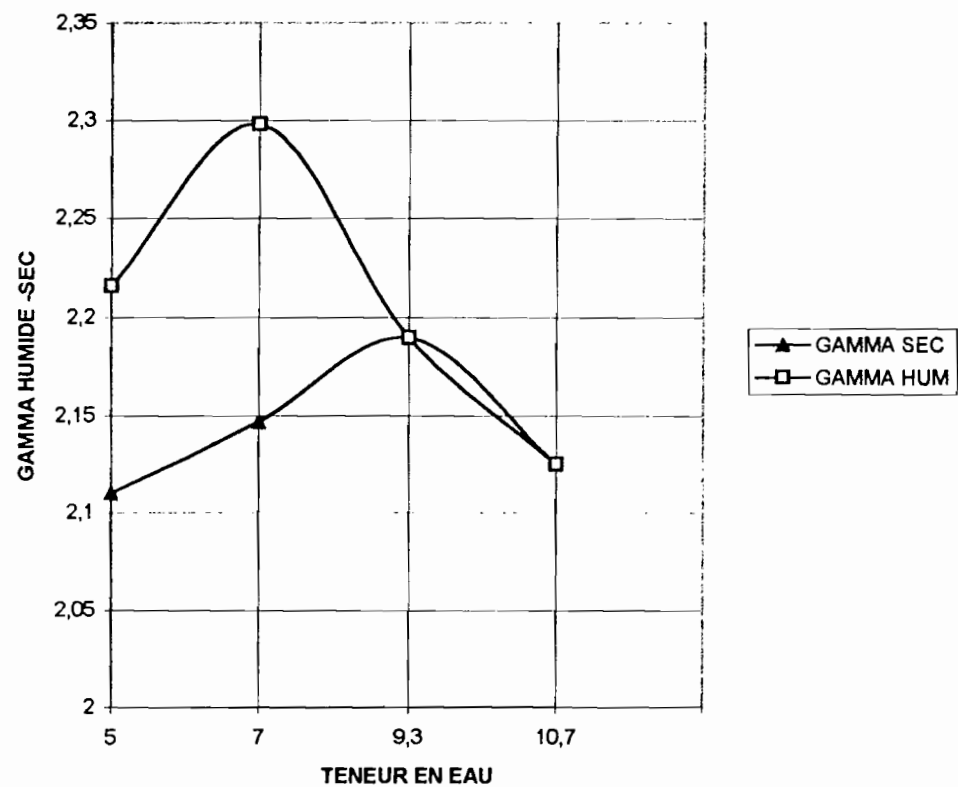
Mesure du poids spécifique
Formulation 70 30 calcaire (0/31.5)

Essai n°	1	2
Poids du picnomètre plein d'eau A(g)	774,3	774,3
Poids du sol sec B(g)	370	370
Poids du pic+sol sec+eau C(g)	1003,3	1004,8
Poids spécifique	2,624	2,652
Température de l'eau	25°	25°
poids spécifique corrigé moyen	2,646	

- A-2 -

	GAMMA SEC	GAMMA HUM		
5	2,11	2,216		
7	2,147	2,298		
9,3	2,19	2,19		
10,7	2,125	2,125		

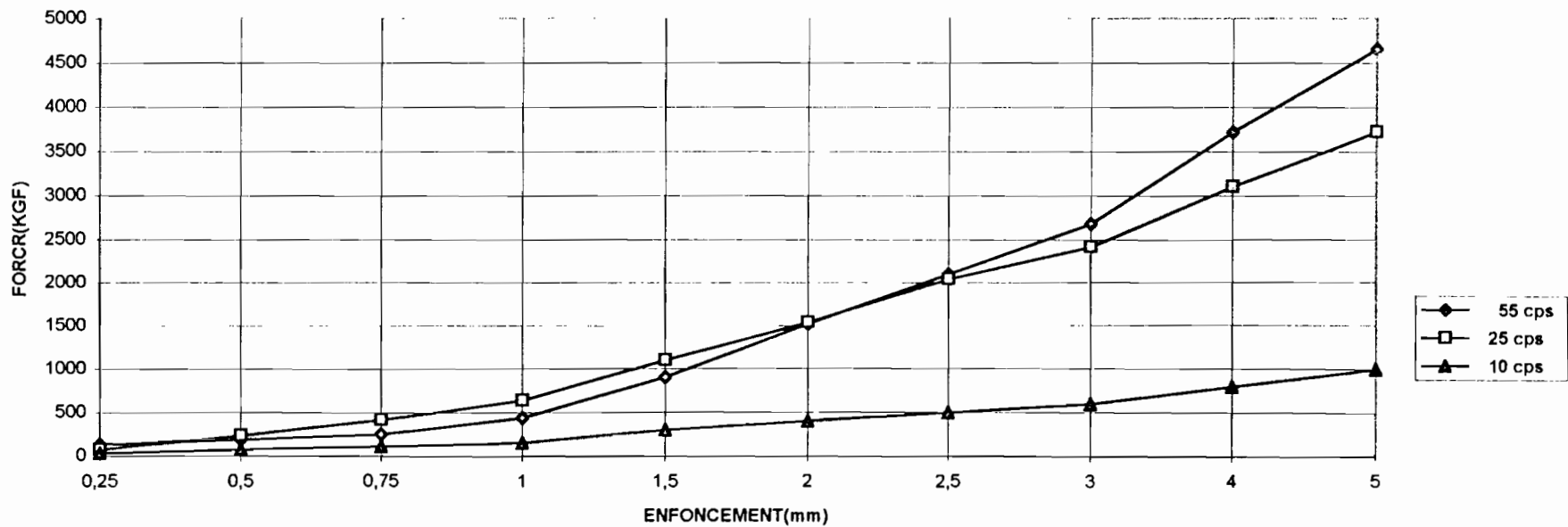
**FORMULATION 70%(0/31,5)+30%(15/25)
CALCAIRE**



A-28

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	140	80	40
0,5	190	240	80
0,75	260	420	120
1	440	640	160
1,5	900	1100	300
2	1520	1540	400
2,5	2100	2040	500
3	2680	2420	600
4	3720	3100	800
5	4660	3720	1000

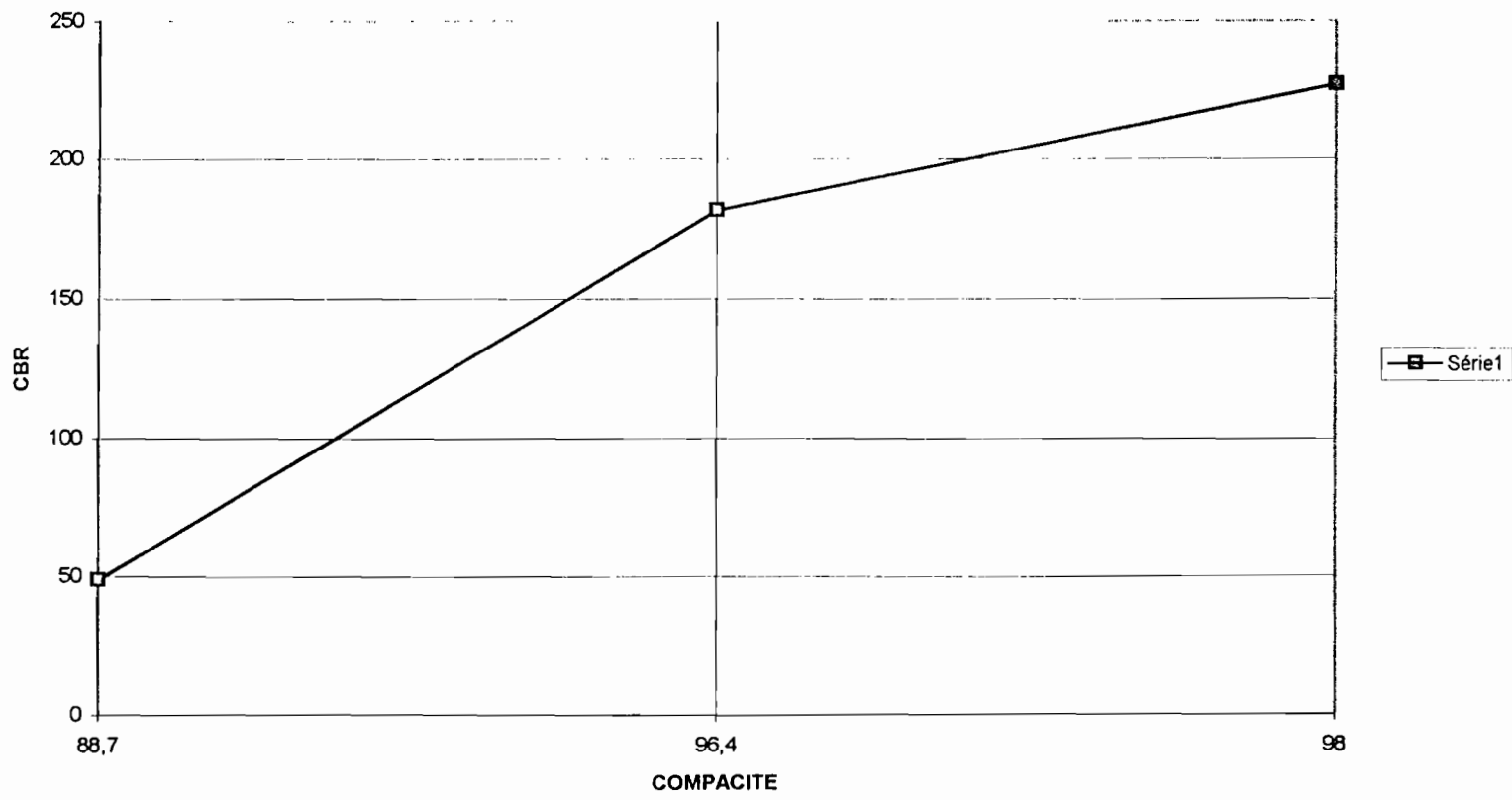
FORMULATION 7030C(E1)



A-23

COMPACITE	CBR								
88,7	48,78								
96,4	181,46								
98	227								

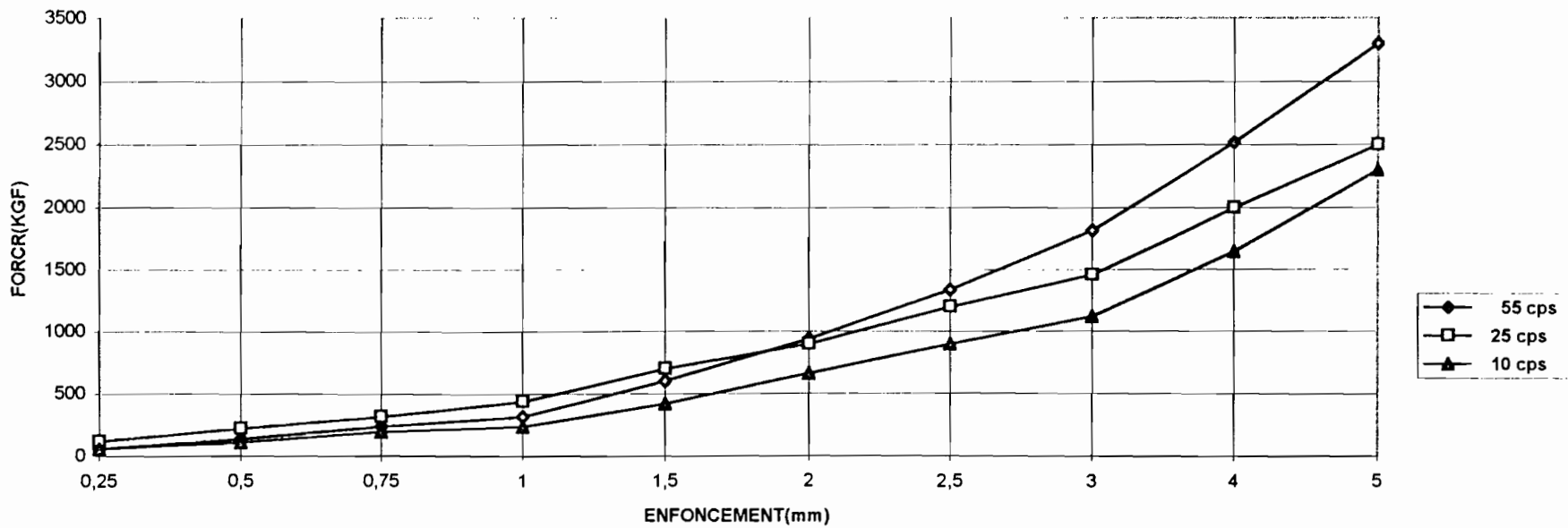
FORMULATION 7030C(E1)



A-04

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	60	120	60
0,5	140	220	110
0,75	240	320	200
1	320	440	240
1,5	600	700	420
2	940	900	660
2,5	1340	1200	900
3	1820	1460	1120
4	2520	2000	1650
5	3300	2500	2300

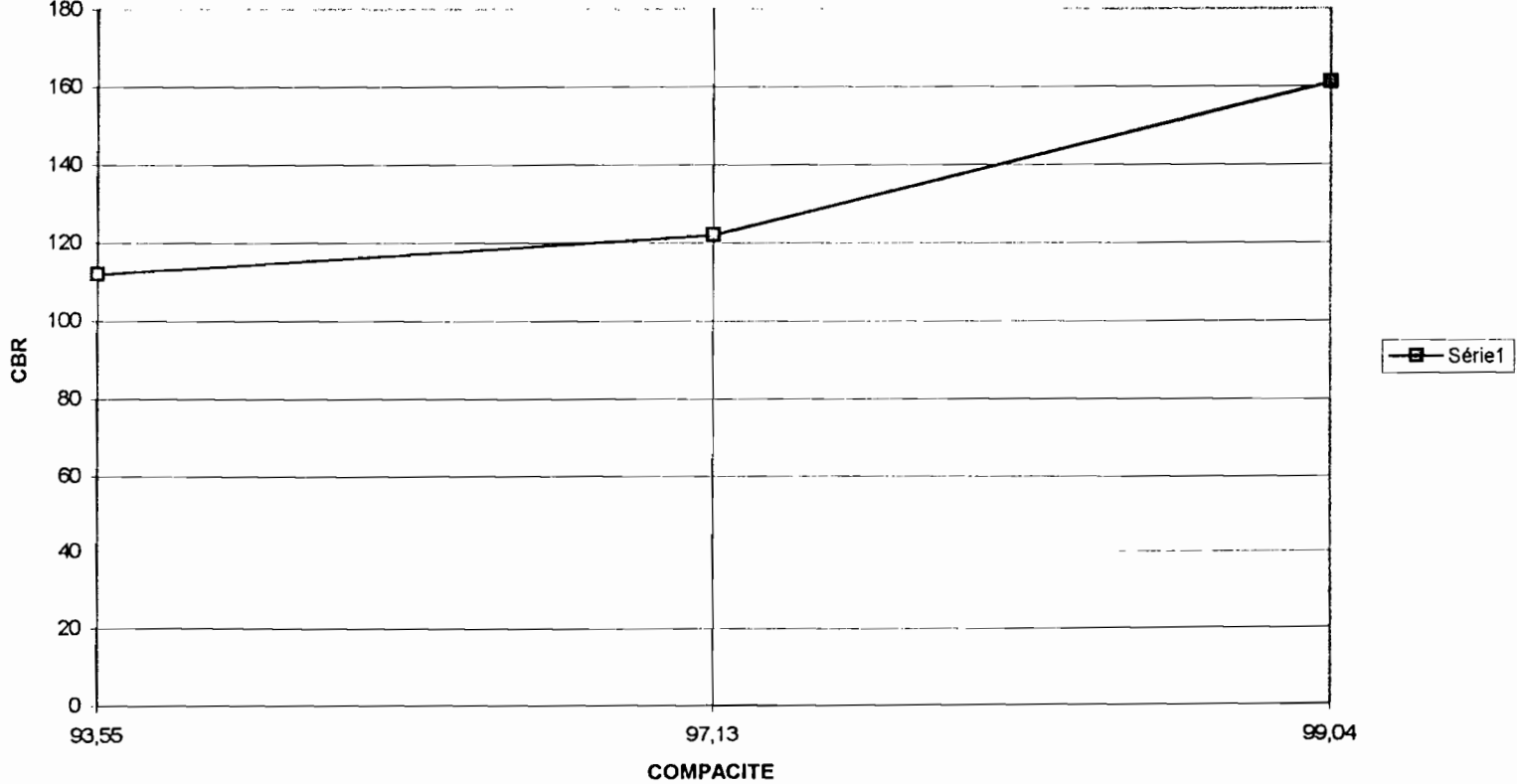
FORMULATION 7030C(E2)



A-25

COMPACITE	CBR								
93,55	112								
97,13	122								
99,04	161								

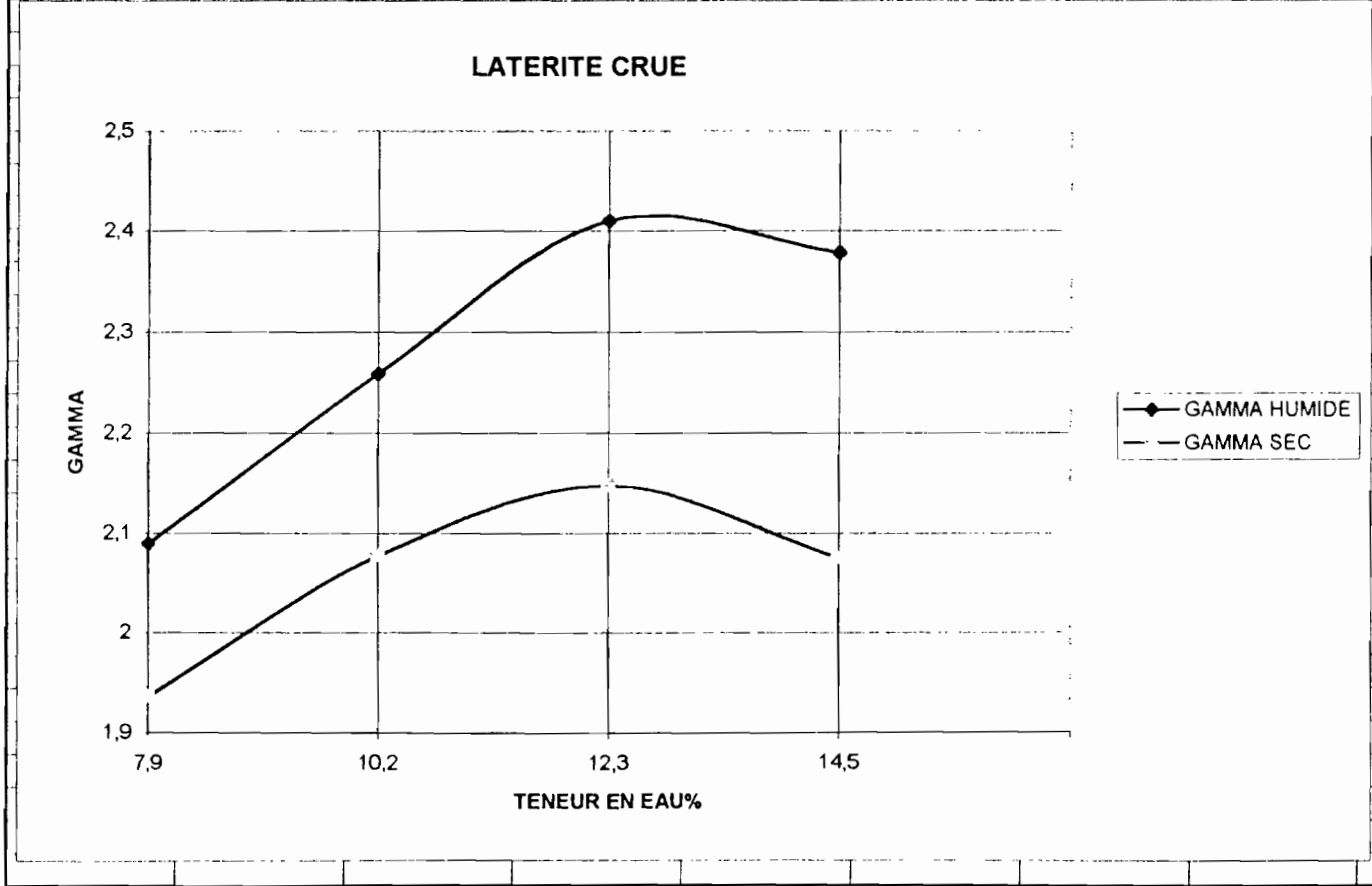
FORMULATION 7030C (E2)



ANNEXE E

Résultats d'essais sur la lithostabilisation latérite-calcaire

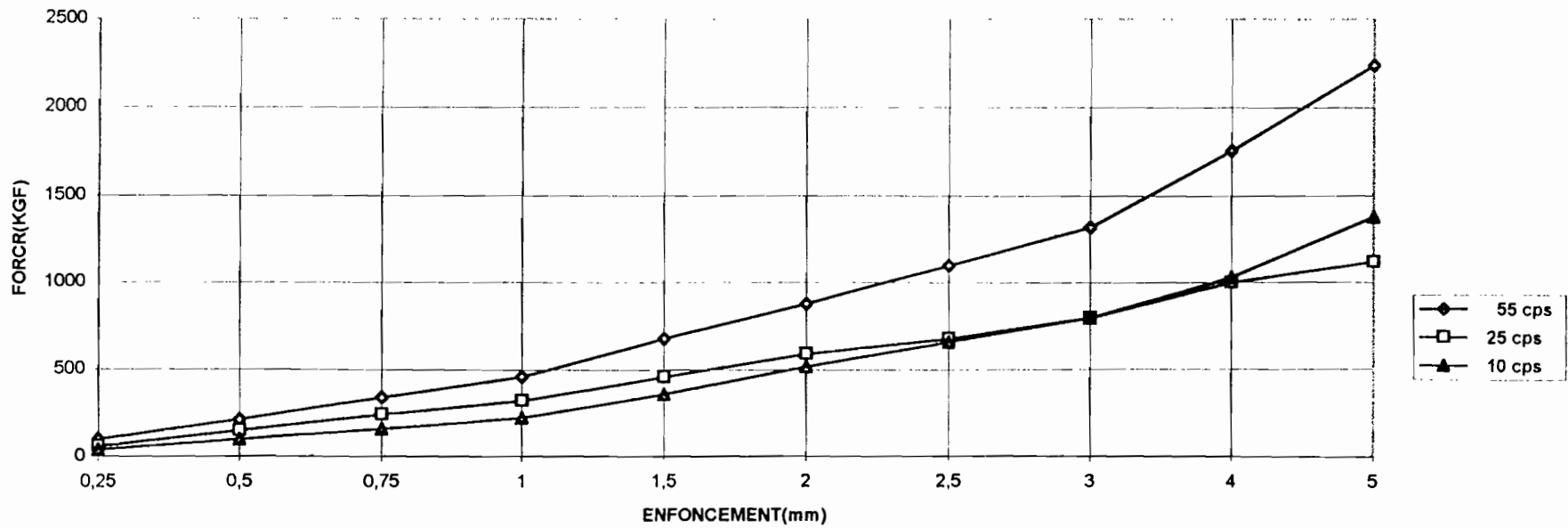
	GAMMA HUM	GAMMA SEC					
7,9	2,09	1,936					
10,2	2,259	2,078					
12,3	2,41	2,148					
14,5	2,378	2,076					



A-27

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	100	60	40
0,5	210	150	100
0,75	340	240	160
1	460	320	220
1,5	680	460	360
2	880	590	520
2,5	1100	680	660
3	1320	800	800
4	1760	1000	1030
5	2240	1120	1380

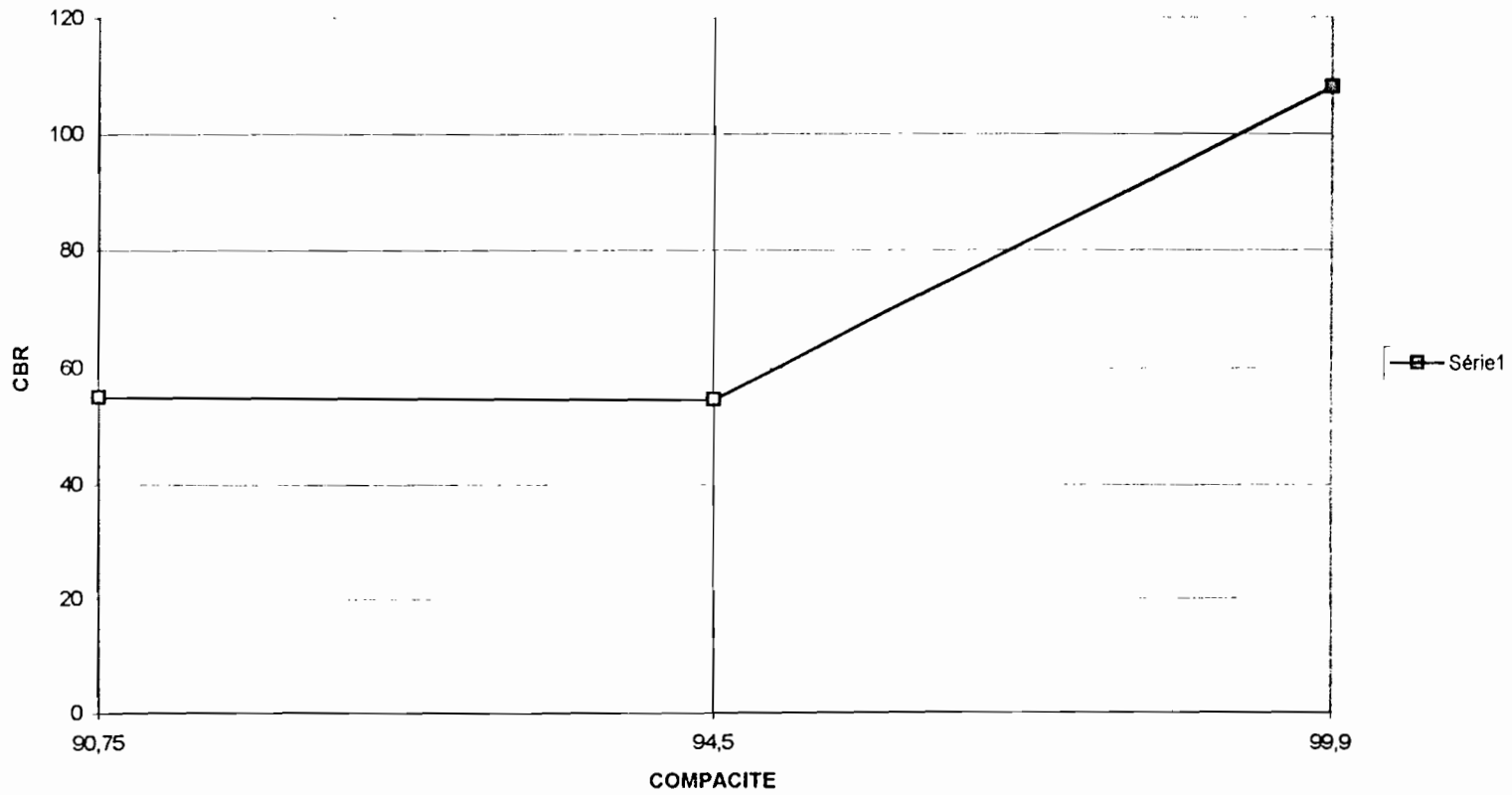
FORMULATION LATERITE CRUE



A-2B

COMPACITE	CBR								
90,75	55,1								
94,5	54,6								
99,9	108								

FORMULATION LATERITE CRUE

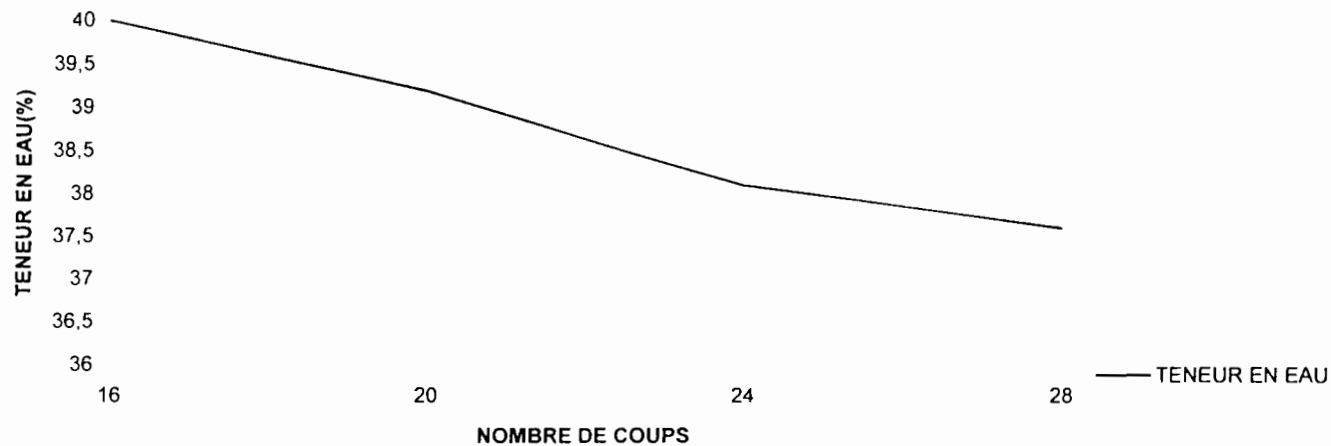


A-28

Limite d'ATTERBERG
Formulation 90% latérite+ 10% calcaire 0/31.5

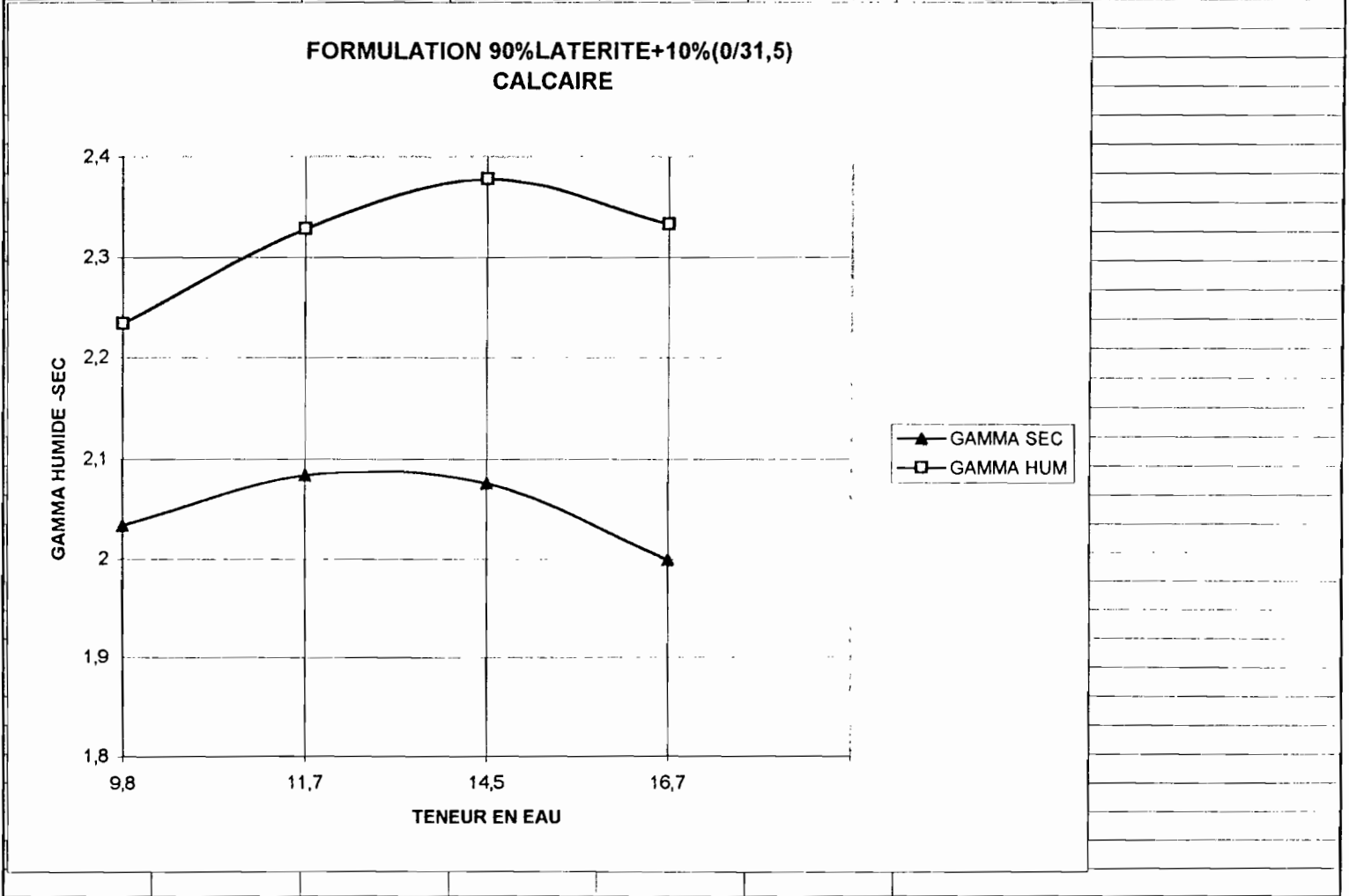
Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE	
	16	20	24	28	1er essai	2ème essai
N° de la tare	7	13	16	297	266	239
Poids humide+tare	81,8	80,5	77,7	81,8	60,3	58,2
Poids sec+tare(g)	73,8	73	70,3	73	58,3	55,9
Poids de l'eau(g)	8	7,5	7,4	8,8	2	2,3
Poids de la tare (g)	53,8	53,9	50,9	49,6	49,8	45,3
Poids sol sec (g)	20	19,1	19,4	23,4	8	10,6
teneurs en eau	40	39,2	38,1	37,6	23,5	21,6
Moyenne					22,5	

TENEUR EN EAU EN FONCTION DU NOMBRE DE COUPS



. A-30.

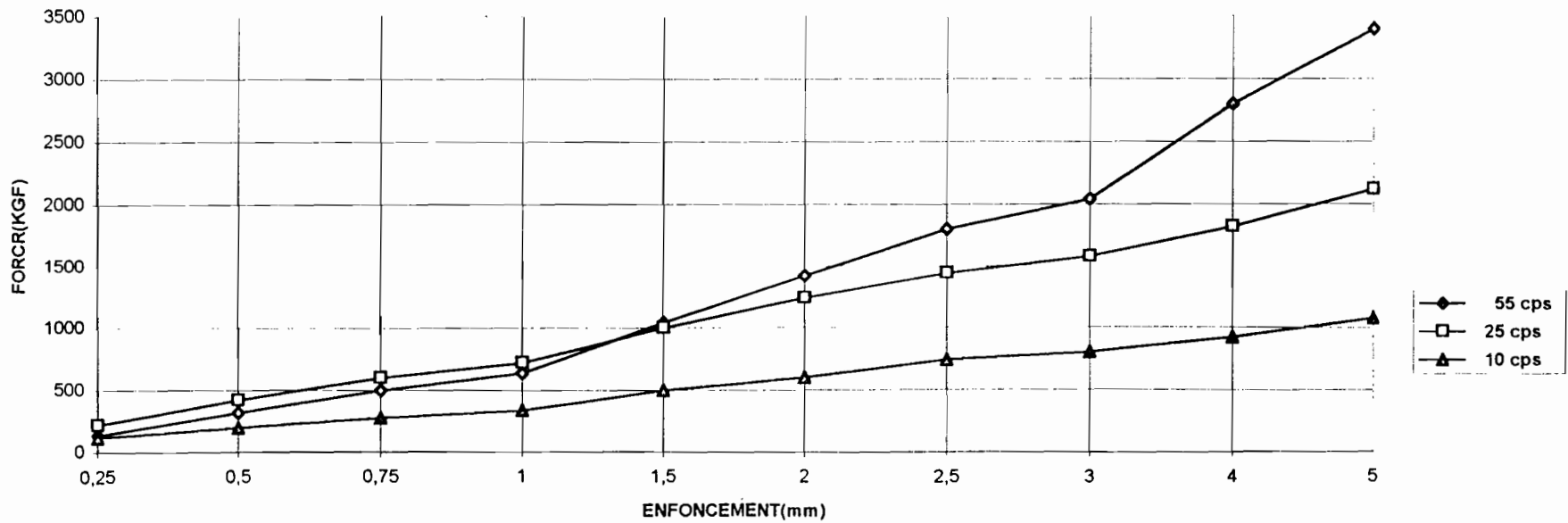
	GAMMA SEC	GAMMA HUM			
9,8	2,034	2,234			
11,7	2,084	2,328			
14,5	2,076	2,378			
16,7	1,999	2,333			



A-34

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	140	220	120
0,5	320	420	200
0,75	500	600	280
1	640	720	340
1,5	1040	1000	500
2	1420	1240	600
2,5	1800	1440	740
3	2040	1580	800
4	2800	1820	920
5	3400	2120	1080

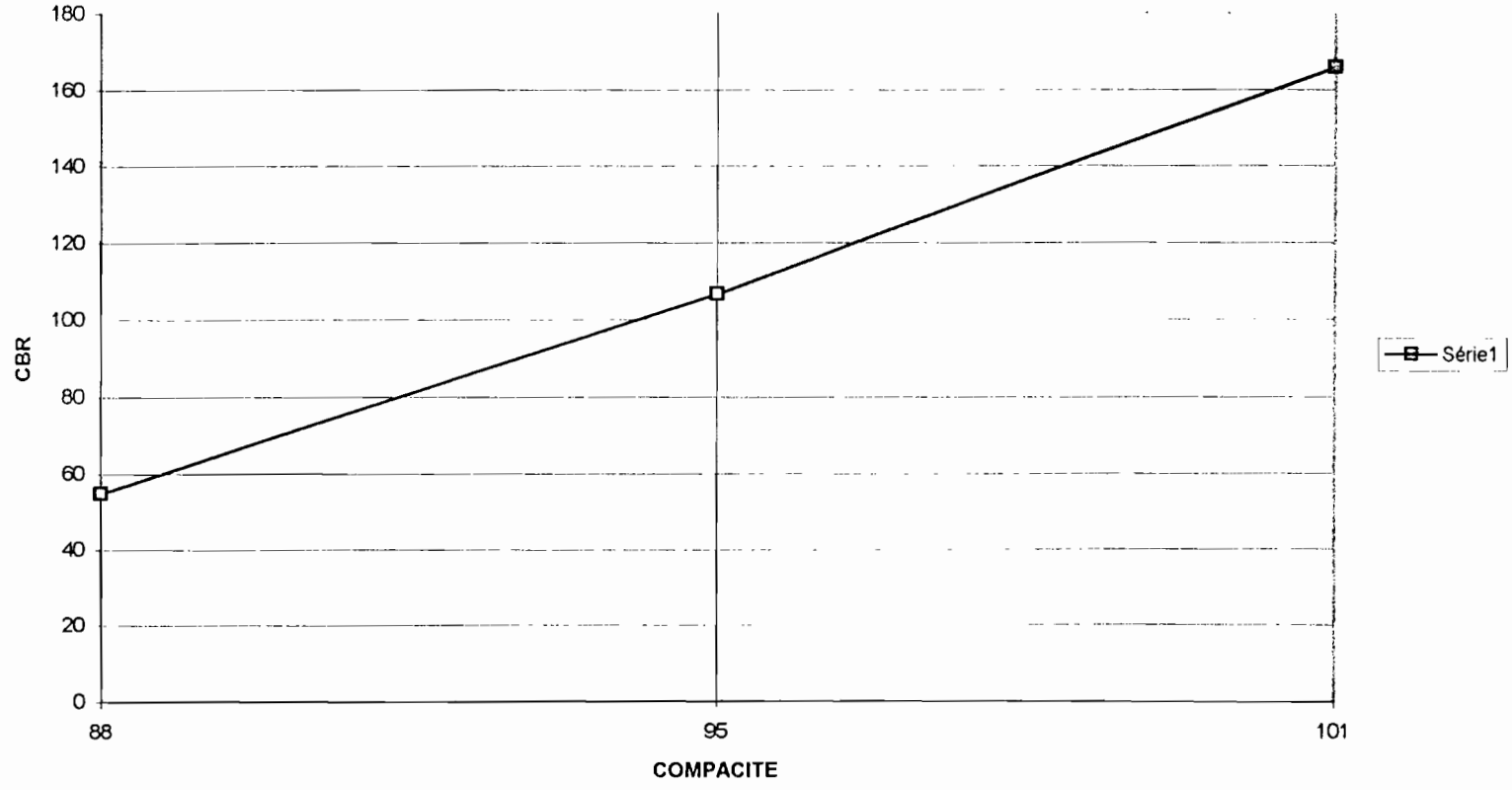
FORMULATION 9010LC(E1)



A-38

COMPACITE	CBR								
88	54,81								
95	106,77								
101	165,85								

FORMULATION 9010LC(E1)



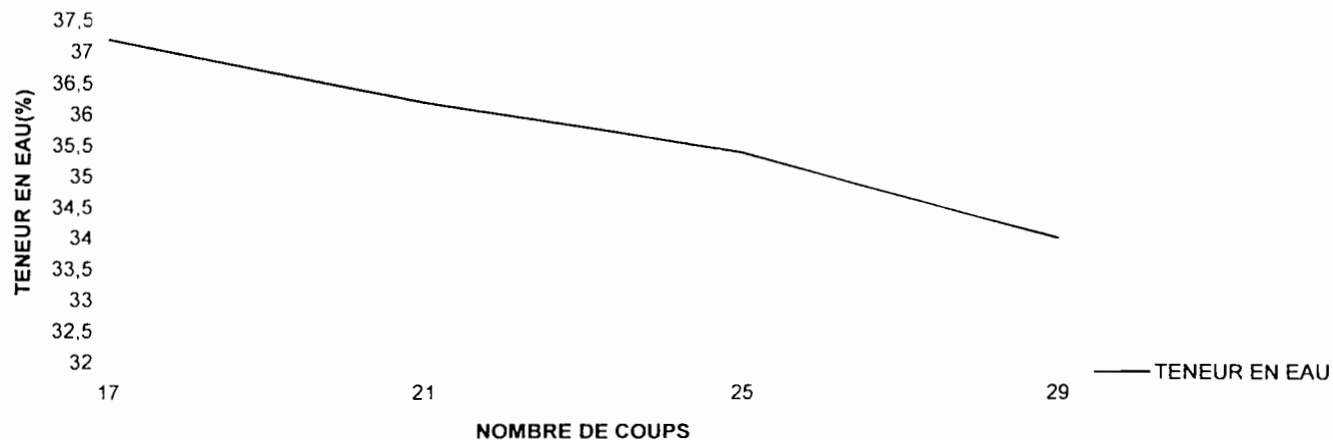
A-35

Limite d'ATTERBERG

Formulation 80% latérite+ 20% calcaire 0/31.5

	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE	
	17	21	25	29	1er essai	2ème essai
Nombre de coups	17	21	25	29		
N° de la tare	10	13	14	2	297	266
Poids humide+tare	84,2	86,5	85,2	85,4	56,5	58
Poids sec+tare(g)	75,9	77,5	77	77,2	55,3	55,6
Poids de l'eau(g)	8,3	9,1	8,2	8,2	1,2	1,4
Poids de la tare (g)	53,6	52,4	53,9	53,1	49,6	49,8
Poids sol sec (g)	22,3	25,1	23,1	24,1	5,7	6,8
teneurs en eau	37,2	36,2	35,4	34	21	20,5
Moyenne					20,7	

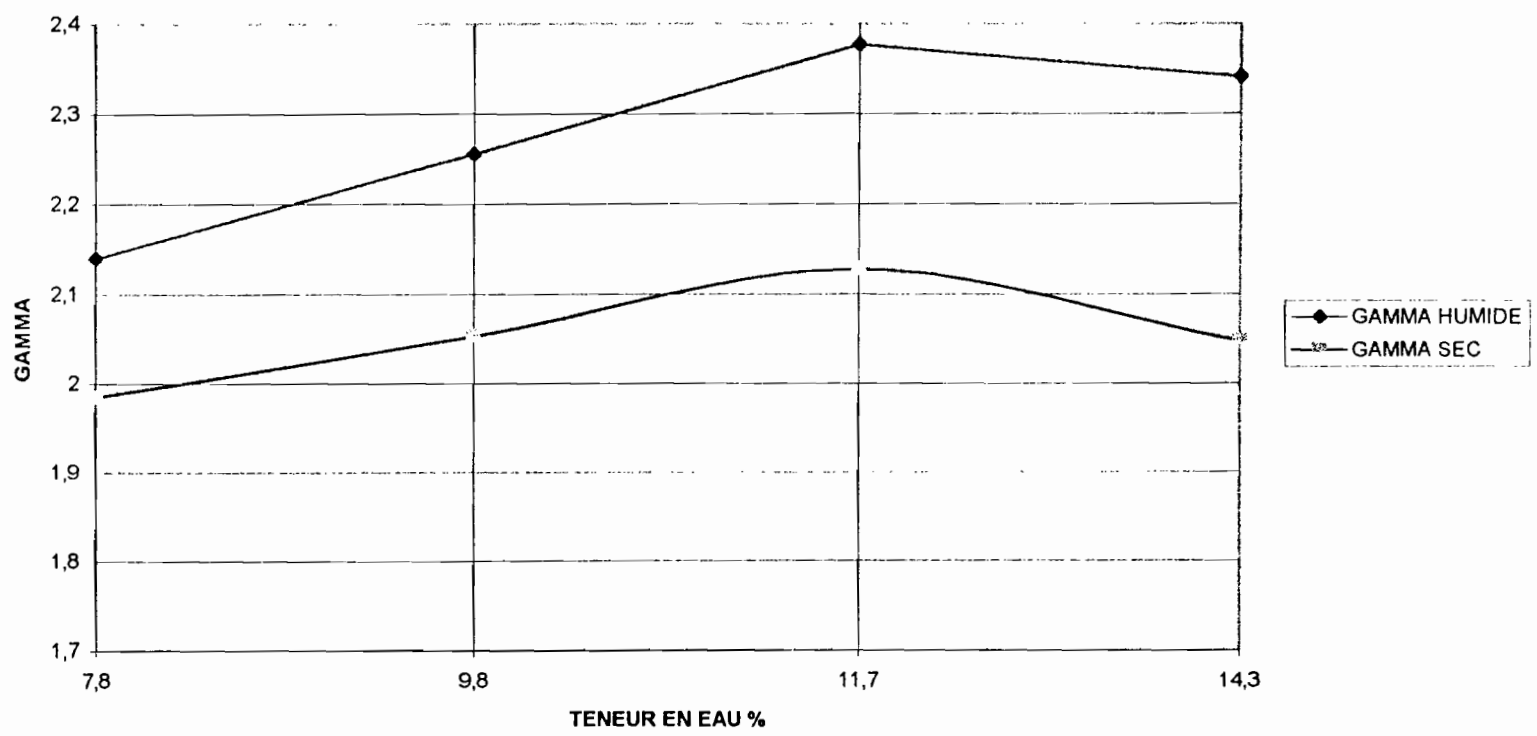
TENEUR EN EAU EN FONCTION DU NOMBRE DE COUPS



- A-84 -

	GAMMA HUM	GAMMA SEC					
7,8	2,14	1,985					
9,8	2,255	2,053					
11,7	2,378	2,128					
14,3	2,342	2,048					

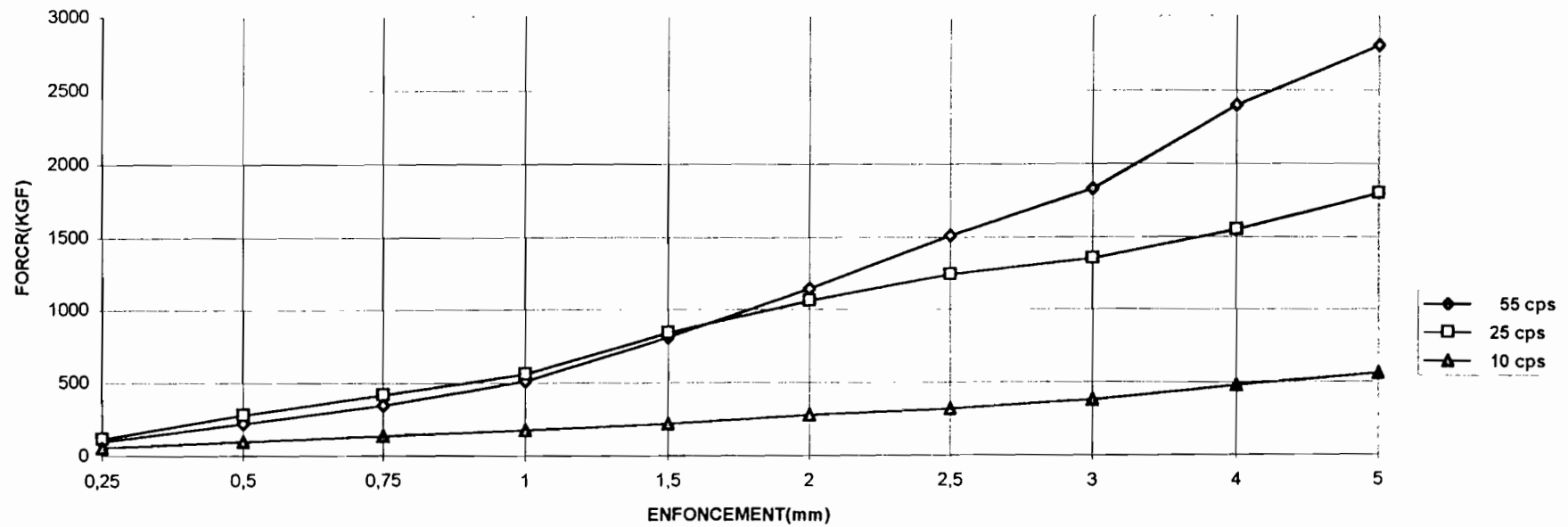
FORMULATION 80%LATERITE+20%(0/31.5) CALCAIRE



A-35

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	100	120	60
0,5	220	280	100
0,75	350	420	140
1	510	560	180
1,5	810	840	220
2	1140	1060	280
2,5	1510	1240	320
3	1830	1350	380
4	2400	1550	480
5	2800	1800	560

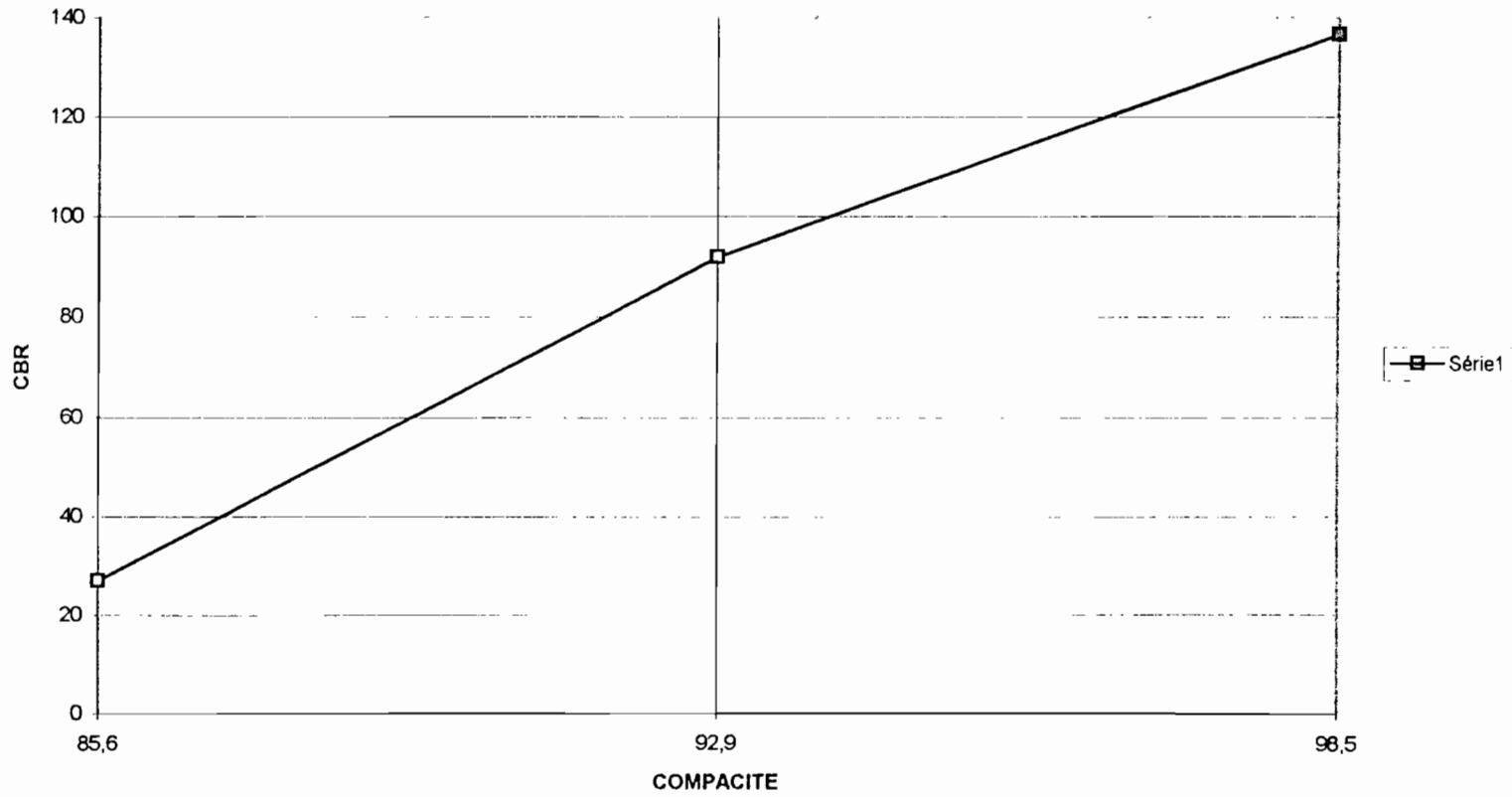
FORMULATION 8020LC(E1)



A-326

COMPACITE	CBR							
85,6	27							
92,9	91,85							
98,5	136,58							

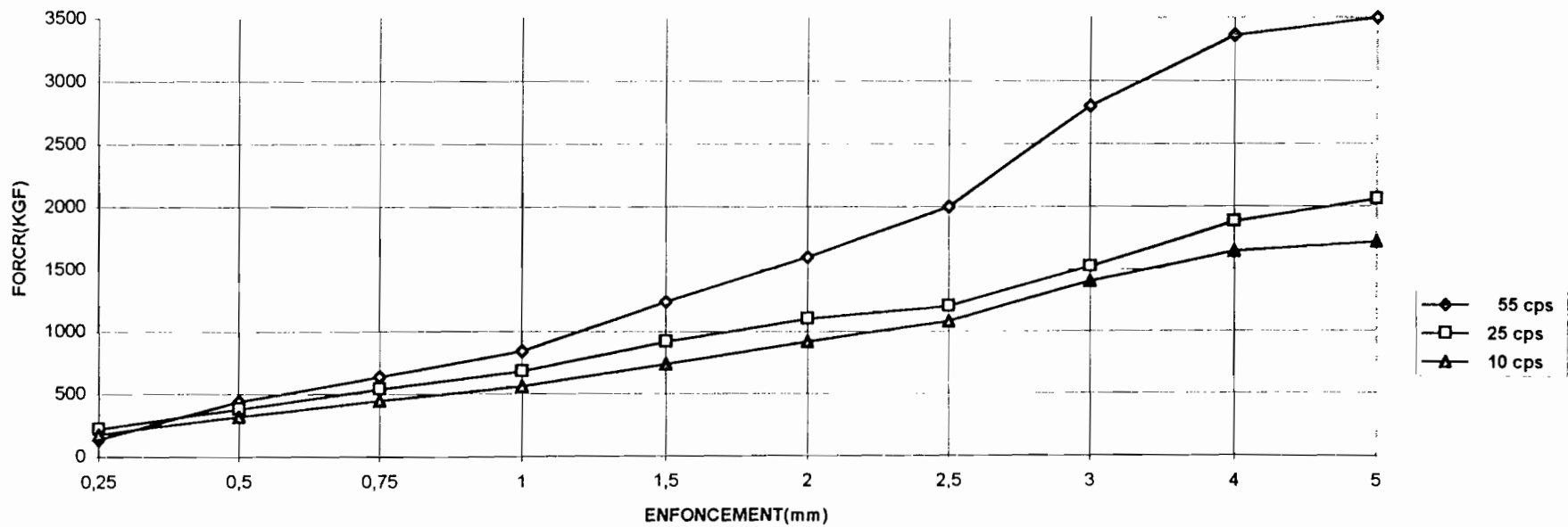
FORMULATION 8020LC(E1)



A-3-B

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	140	220	180
0,5	440	380	320
0,75	640	540	450
1	840	680	560
1,5	1240	920	740
2	1600	1100	920
2,5	2000	1200	1080
3	2800	1520	1400
4	3360	1882	1640
5	3500	2060	1720

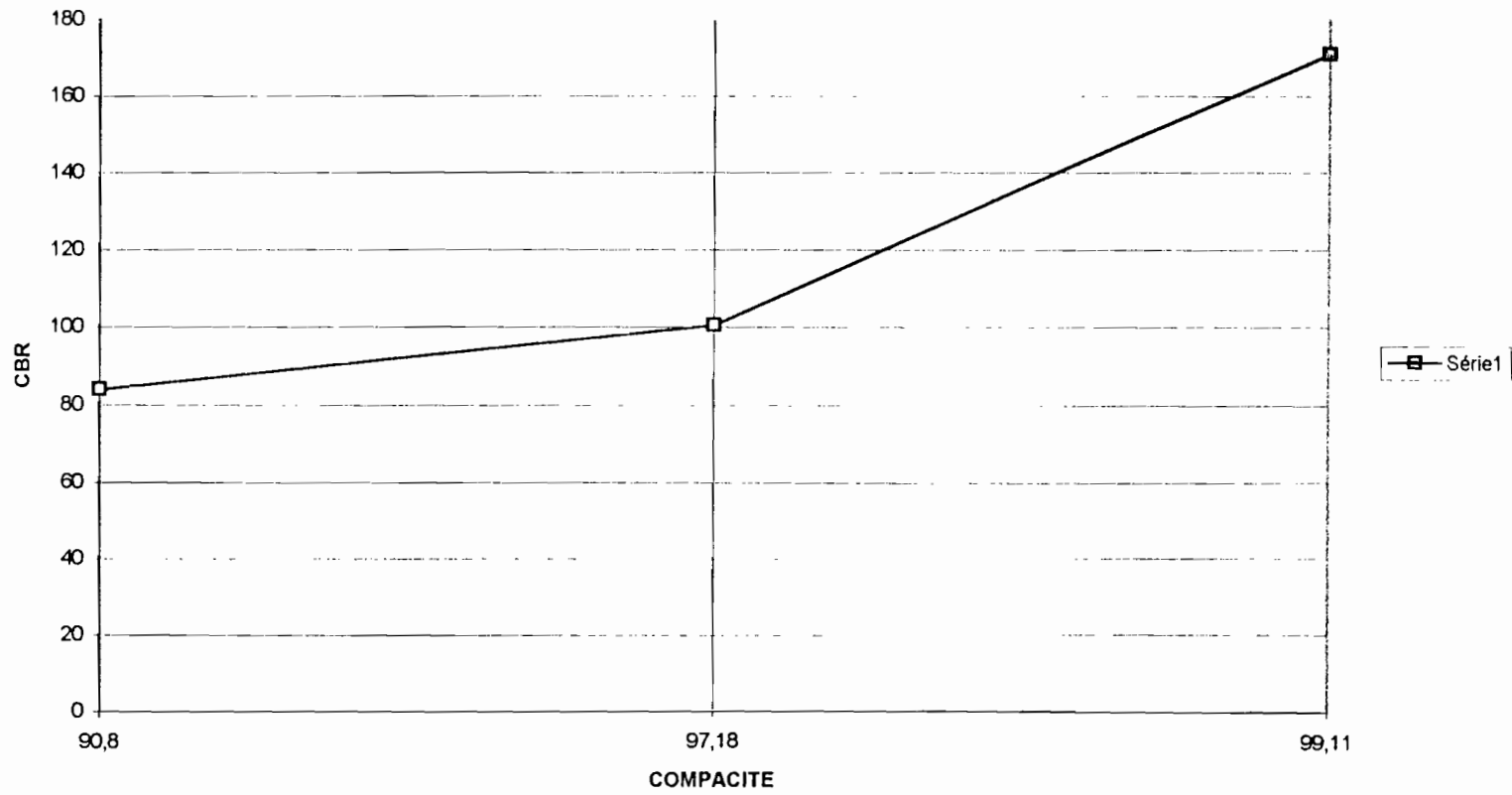
FORMULATION 8020LC(E2)



A-38

COMPACITE	CBR								
90,8	84								
97,18	100,5								
99,11	171								

FORMULATION 8020LC(E2)

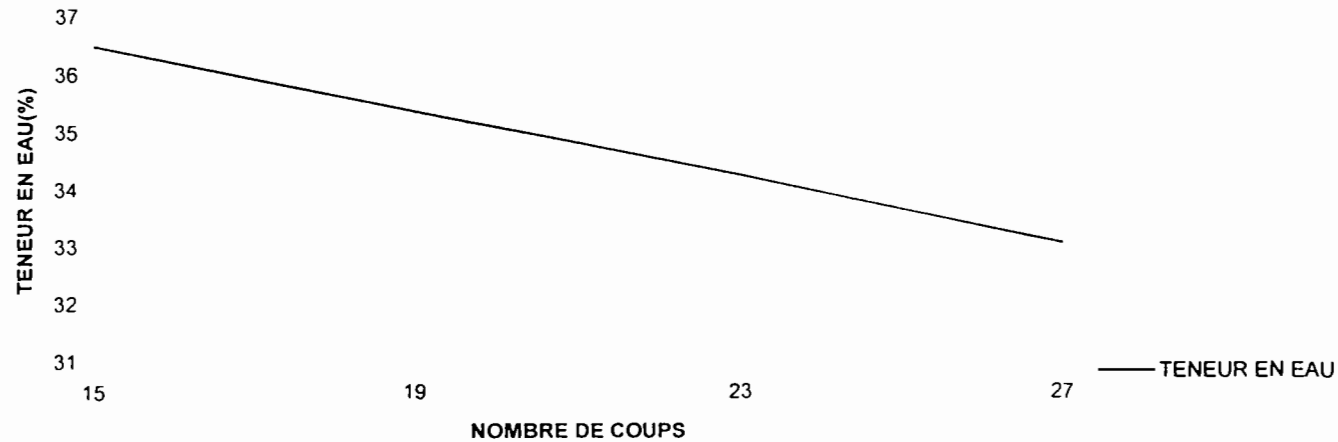


- A-35 -

Limite d'ATTERBERG
Formulation 70% latérite+ 30% calcaire 0/31.5

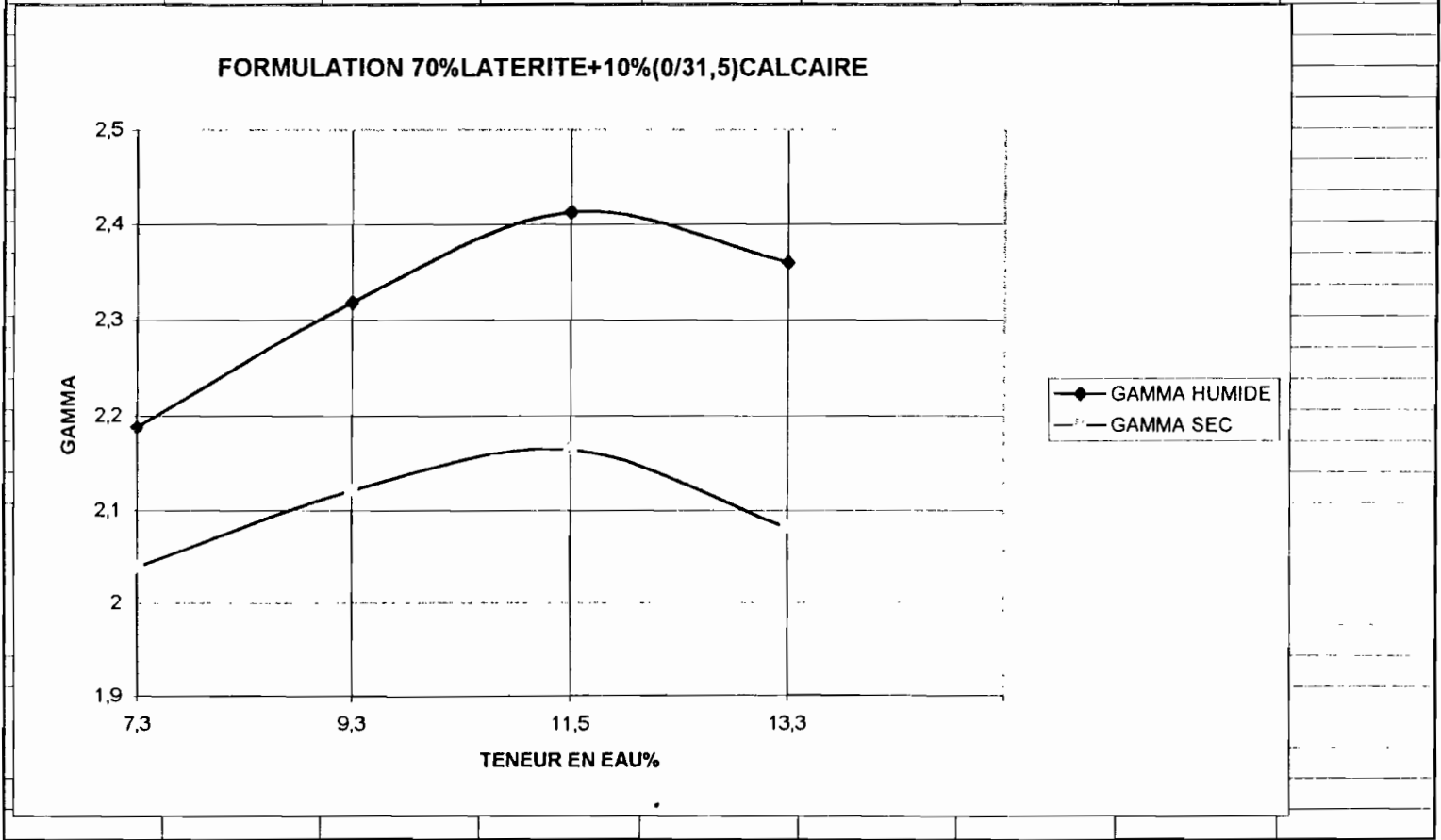
	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE	
	15	19	23	27	1er essai	2ème essai
Nombre de coups	15	19	23	27		
N° de la tare	12	16	309	5	239	236
Poids humide+tare	78,7	80,3	85,5	76,3	52,6	56,6
Poids sec+tare(g)	71,3	72,9	77,4	70,3	51,4	55,1
Poids de l'eau(g)	7,6	7,4	8,1	5,8	1,2	1,5
Poids de la tare (g)	50,5	52	52,8	53	45,3	47,7
Poids sol sec (g)	20,8	20,9	23,6	17,5	6,1	7,4
teneurs en eau	36,5	35,4	34,3	33,1	19,6	20,2
Moyenne					19,9	

TENEUR EN EAU EN FONCTION DU NOMBRE DE COUPS



- A-60 -

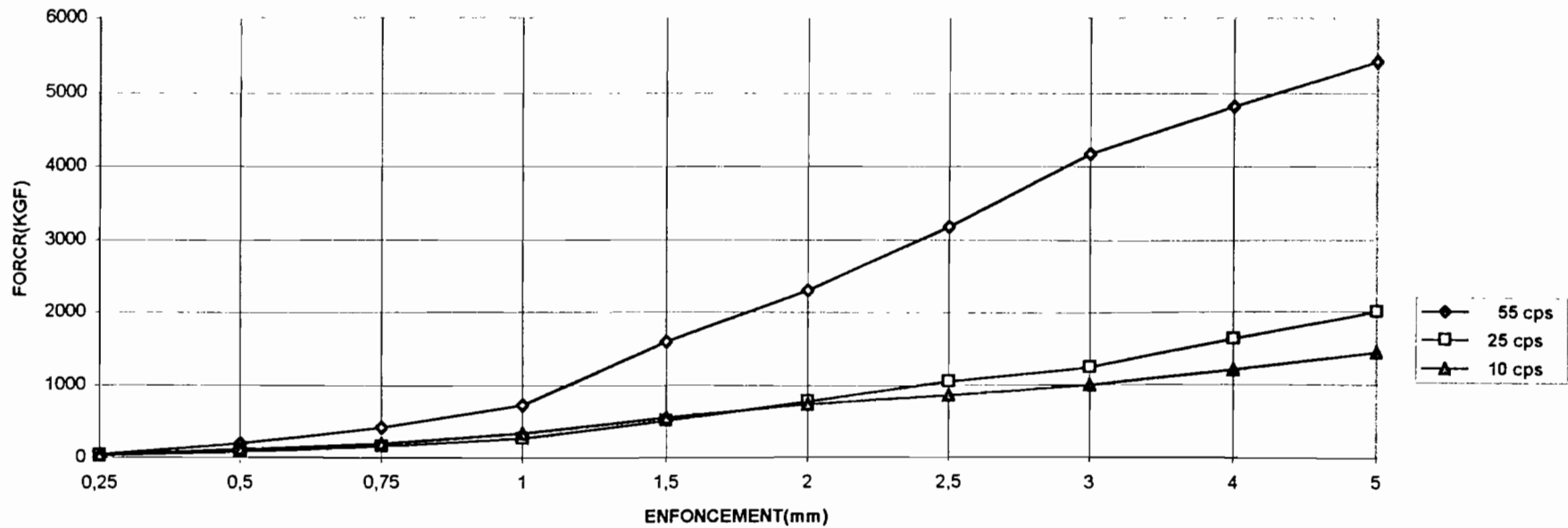
	GAMMA HUM	GAMMA SEC					
7,3	2,188	2,039					
9,3	2,319	2,121					
11,5	2,413	2,164					
13,3	2,36	2,082					



A-41

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	50	40	40
0,5	200	80	120
0,75	420	160	200
1	730	270	340
1,5	1600	510	560
2	2300	780	740
2,5	3175	1050	860
3	4175	1240	1000
4	4825	1630	1200
5	5420	2000	1440

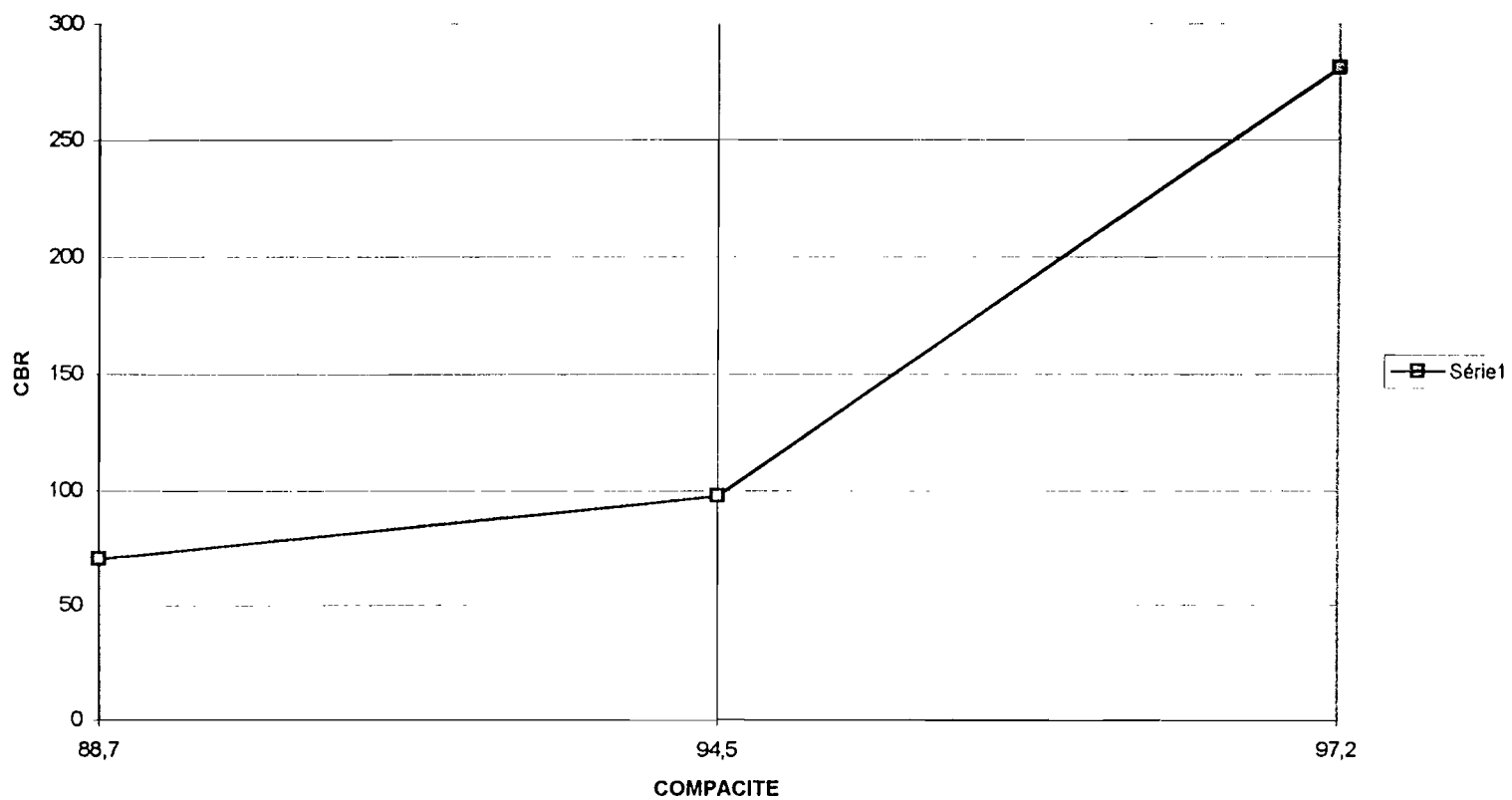
FORMULATION 7030LC(E1)



- A-42.-

COMPACITE	CBR								
88,7	70,24								
94,5	97,56								
97,2	281								

FORMULATION 7030LC(E1)

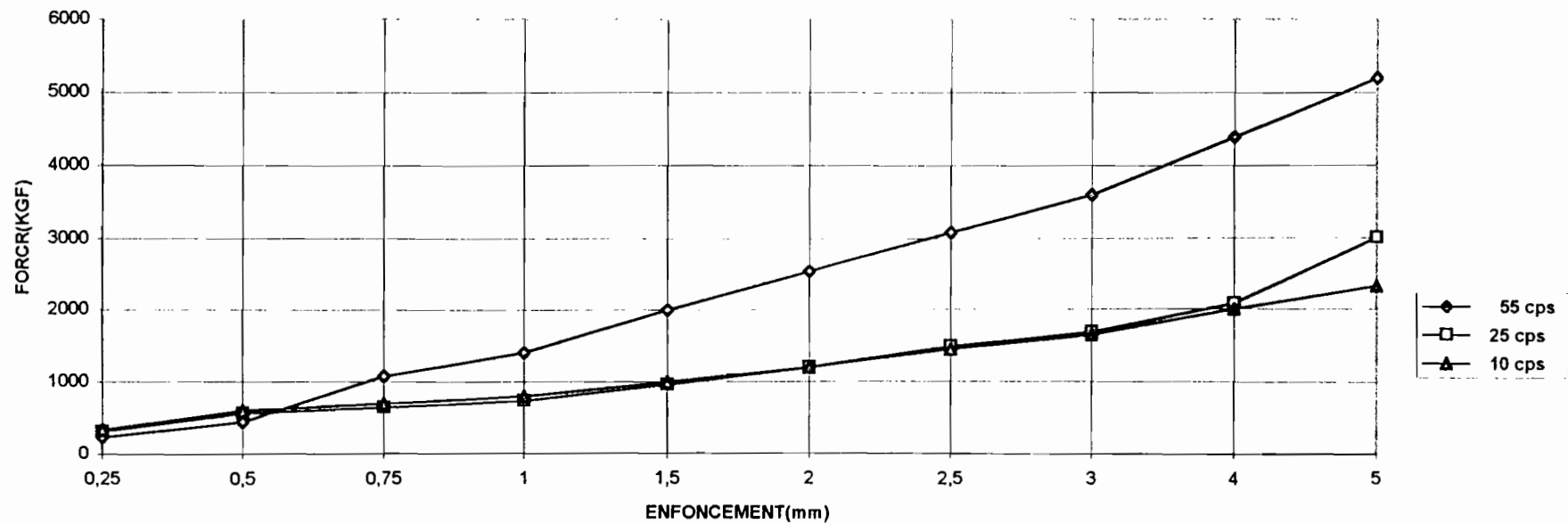


A-44

- A-43 -

Enf(mm)	55 cps	25 cps	10 cps
0,25	240	320	340
0,5	440	560	600
0,75	1080	640	700
1	1400	740	800
1,5	2000	960	1000
2	2540	1200	1200
2,5	3080	1480	1440
3	3600	1680	1640
4	4400	2080	2000
5	5200	3000	2320

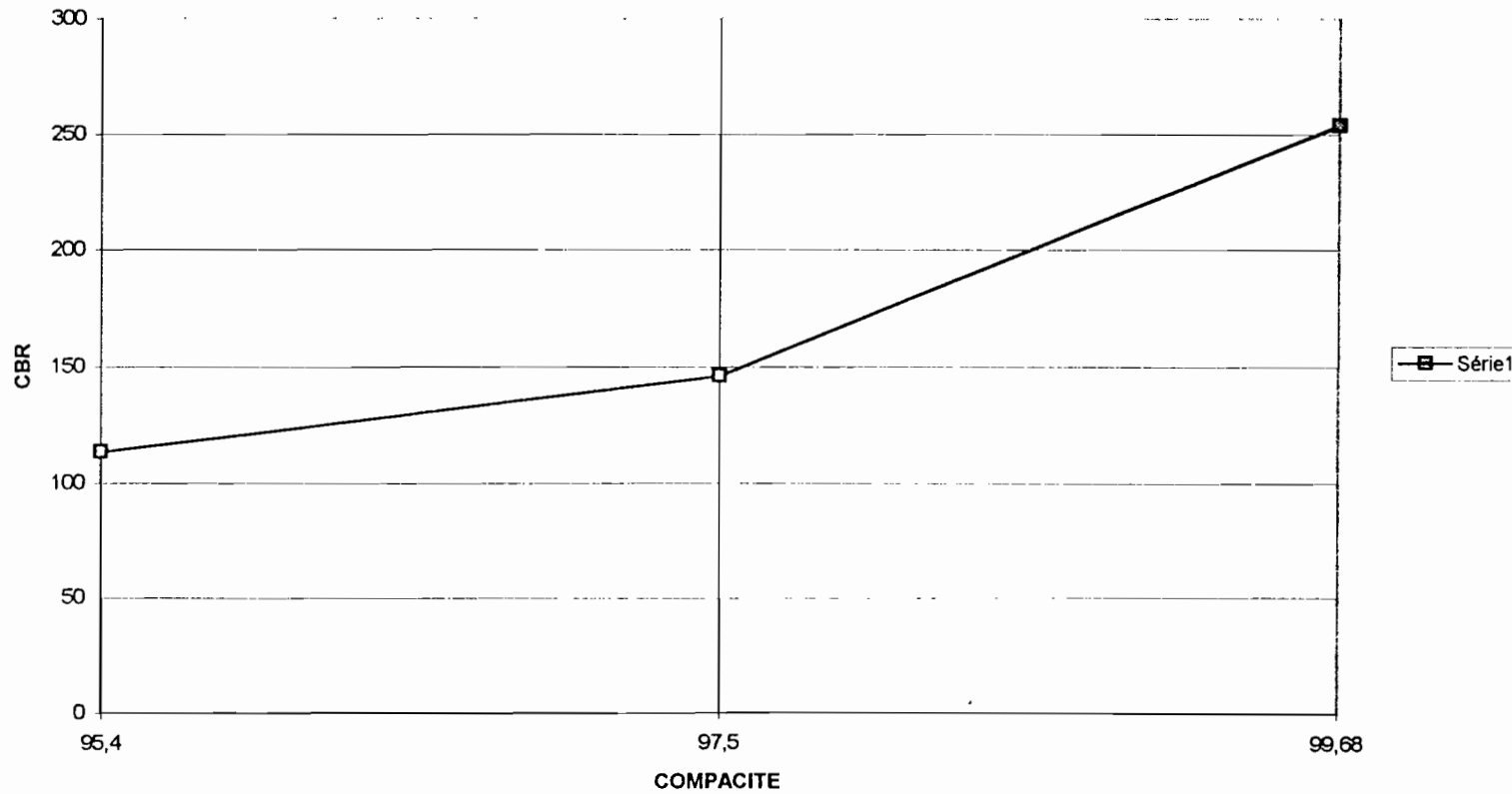
FORMULATION 7030LC(E2)



A-46

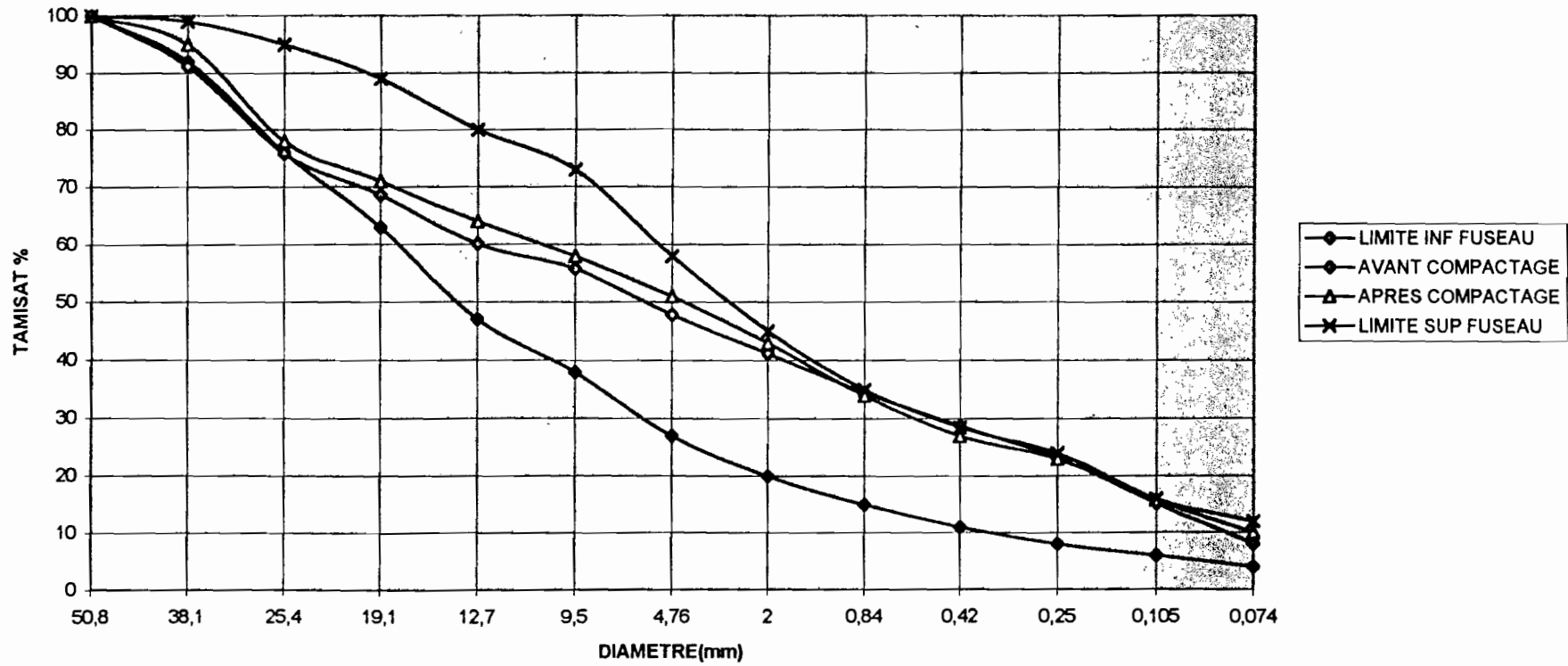
COMPACITE	CBR								
95,4	113,17								
97,5	146								
99,68	254								

FORMULATION 7030LC(E2)



A-65

FIG n° : 8020C AVANT ET APRES COMPACTAGE



- 36 hors 2 -