

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

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

Titre : GC.0136

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU OPTIMALE
DANS L'OPTIQUE D'UN BETON DE SABLE
ROUTIER COMPACTE

Auteur : *Amadou GAYE*

Directeur interne : *Massamba DIENE*

Co-directeur : *Serigne Lèye THIOUNE*

Directeur externe : *Ibrahima CISSE*

DATE : Lundi 01 juillet 1996

DEDICACES

Par la grâce de Dieu le tout puissant
et de son illustre Prophète Mohamed (PSL),
A notre regretté promotionnaire, Khalifa A. DIOUF,
A ma très chère mère,
A mon cher père,
A mes frères et sœurs,
et à tous ceux qui me sont chers.

**"Vous êtes arrivés à cette conclusion par
voie scientifique ou par expérience ?"**
Tchekov

"Une grande vie, c'est une idée de jeunesse réalisée dans l'âge mur"
A. Vigny

REMERCIEMENTS

Je ne saurais écrire ce rapport sans remercier de vive voix Messieurs Massamba DIENE, Directeur interne, Ibrahima CISSE, Directeur externe, et Serigne Laya THIOUNE, Co-directeur du projet pour leur disponibilité, leurs conseils et leur franche collaboration.

Ces remerciements s'adressent aussi à certaines personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour contribuer à l'aboutissement de ce projet, parmi lesquelles je pourrais citer :

- Mr le Colonel Papa Mbareck DIOP, Conseiller du Président de la République en Génie Civil pour toute la documentation qu'il a bien voulu mettre à ma disposition et l'intérêt qu'il n'a cessé de manifester à ce projet de fin d'études.

- Mr Amadou COULIBALY, Maître de Conférences à Strasbourg pour sa riche documentation et sa disponibilité.

- Mr Ndiaye Diouf NDIAYE, Professeur à l'École Polytechnique de Thiès pour sa grande disponibilité et son assistance.

- Mr Ismaïla GUEYE, Professeur à l'École Polytechnique de Thiès pour ses conseils et tout l'intérêt qu'il n'a cessé de manifester à ce travail.

Je ne saurais oublier tous les professeurs de l'École pour la bonne formation qu'ils m'ont dispensée et tous les techniciens et élèves-ingénieurs, qui m'ont apporté leur aide et leur soutien.

Qu'ils trouvent à travers ces mots, l'expression de toute ma gratitude et de mes sentiments les plus déférents et dévoués.

SOMMAIRE

L'objectif de ce projet est d'étudier les possibilités d'utilisation en géotechnique routière des bétons de sable à ajout de "sables fillérisés" locaux (calcaire, gré, silixite, basalte) en vue d'en faire un matériau de substitution pour résoudre le problème de la raréfaction des matériaux routiers (cherté des ressources énergétiques, utilisation abusive de basalte et latérite).

C'est ainsi que dans cette présente étude, nous avons cherché à estimer les performances techniques des bétons de sable routiers compactés sans l'emploi d'adjuvants mais aussi en se basant sur un dosage minimal en ciment car en terme économique ces produits coûtent chers.

Nous avons fait des essais, établi des formulations conformes aux spécifications techniques en construction routière et les résultats obtenus satisfont en partie aux "prescriptions exposées par SABLOCRETE".

Ainsi, nous avons pu constater que les bétons de sable à ajout de basalte et silixite donnent de meilleurs résultats. L'estimation financière nous a permis de constater que les bétons de sable sont, en moyenne, doublement moins chers (tous trafics confondus) que les matériaux routiers habituels (enrobés denses). De plus, l'intérêt d'utilisation de ce matériau est d'autant plus grand vu les opportunités qu'il offre par rapport à l'entretien et à l'utilisation des matériaux locaux relativement inexploités.

Pour terminer cette étude, nous avons donné quelques suggestions pour résoudre le problème (presque systématique) des fissures parmi lesquelles une cure suffisante à l'eau, et souhaité une collaboration active des maîtres d'ouvrages sénégalais pour la vulgarisation de ce matériau.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES	XI
INTRODUCTION	1
<u>CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	
1.1 HISTORIQUE DES BÉTONS DE SABLE	3
1.1.1 Le béton aggloméré "Coignet"	3
1.1.2 Les expériences soviétiques	4
1.1.3 Le renouveau du béton de sable en France	5
1.1.4 Le béton de sable au Sénégal	6
1.2 COMPOSANTS DES BÉTONS DE SABLE	7
1.2.1 Définition	7
1.2.1.1 Les sables	8
1.2.1.2 Le Ciment	8
1.2.1.3 L'addition	8
1.2.1.4 L'eau	9
1.2.1.5 Les adjuvants	9
1.2.1.6 Les fibres	9
1.2.1.7 Les gravillons	10
1.2.2 Propriétés générales	10
1.2.2.1 Relation granulométrie et maniabilité	10
1.2.2.2 Relation granulométrie et résistance	10
1.2.3 Propriétés spécifiques	11
1.2.3.1 Maniabilité	11
1.2.3.2 Cohésion et absence de ségrégation	11
1.2.3.3 Petite granularité (0 à 6 mm)	11
1.2.3.4 Bel aspect de surface	11

1.2.4 Limites d'emploi	11
1.2.4.1 Limites inhérentes à la nouveauté	11
1.2.4.2 Contraintes de formulation	12
1.2.4.3 Performances mécaniques	12
1.2.4.4 Les bétons de sable routiers compactés	12
1.3 DESCRIPTION DE LA SITUATION ACTUELLE	13
1.3.1 Données générales sur les granulats	13
1.3.2 Matériau d'usage courant au Sénégal	13
1.4 ÉVALUATION QUANTITATIVE DES RÉSERVES	20
1.4.1 Les roches basaltiques	20
1.4.2 Le grès	20
1.4.3 Les calcaires	21
1.4.4 Les silexites	21
1.4.5 Les sables de dune	21
1.5 INTÉRÊT DES BÉTONS DE SABLE AU SÉNÉGAL	22
<u>CHAPITRE 2 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE</u>	
2.1 Choix des matériaux utilisés	24
2.1.1 Sables de dune	24
2.1.2 "Sables fillérisés" de grès	24
2.1.3 "Sables fillérisés" de calcaire	25
2.1.4 "Sables fillérisés" de basalte	25
2.1.5 "Sables fillérisés" de silexite	25
2.2 Présentation des résultats obtenus	26
2.2.1 Ciment	26
2.2.2 Analyse granulométrique des différents matériaux	27
2.2.3 Propriétés physiques des différents matériaux	29
2.2.4 Analyse chimique des "sables fillérisés"	30
2.2.5 Essai de compactage	30
2.2.5.1 Quantité des matériaux pesés pour le compactage	31
2.3 Analyse et interprétation des résultats obtenus	32

CHAPITRE 3 : MÉTHODE DE FORMULATION DES BÉTONS DE SABLE**3.1 MÉTHODE DE FORMULATION DES BÉTONS DE SABLE EXPOSÉE****PAR "SABLOCRETE" 36**

3.1.1 La compacité et les méthodes de formulation des bétons 36

3.1.2 Estimation du dosage en fines d'un béton de sable 37

3.1.3 Porosité et dosage en eau d'un béton de sable 37

3.1.4 Estimation du dosage en sable 38

3.1.5 Estimation de la résistance en compression 39

3.2 MÉTHODE DE FORMULATION PROPOSÉE 41

3.2.1 Calcaire de Bargny 42

3.2.2 Calcaire de Bandia 42

3.2.3 Gré de Toglou 43

3.2.4 Silexite de Taïba 43

3.2.5 Basalte de Diack 44

3.2.6 Conclusions 46

**CHAPITRE 4 : CARACTÉRISATION DES BÉTONS DE SABLE
COMPACTÉS****4.1 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES 47**4.1.1 Détermination de la résistance à la traction des bétons
de sable par écrasement latéral (essai brésilien) 47**4.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES 50****4.3 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS 51**

4.3.1 Caractéristiques mécaniques 51

4.3.2 Caractéristiques physiques 55

**CHAPITRE 5 : DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSÉE EN BÉTON
DE SABLE****5.1 CAS DE FAIBLES TRAFICS 56**

5.1.1 Calcaire de Bargny et de Bandia 57

5.1.2 Silexite de Taïba 58

5.1.3 Basalte de Diack 59

5.1.4 Gré de Toglou 59

5.2 CAS DE FORTS TRAFICS	60
5.2.1 Calcaire de Bargny et Bandia	60
5.2.2 Silexite de Taiba	61
5.2.3 Basalte de Diack	61
5.2.4 Gré de Toglou	62
5.3 CONCLUSIONS	64
5.4 ORGANISATION DU CHANTIER DE BÉTON DE SABLE COMPACTÉ	64
5.4.1 Approvisionnement-aire de stockage	65
5.4.2 Fabrication	65
5.4.3 Transport	65
5.4.4 Mise en oeuvre	65
5.4.4.1 Support	66
5.4.4.2 Répandage et réglage	66
5.4.4.3 Cure après compactage avant la pose de la protection bitumineuse	68
5.4.4.4 Compactage des bords	68
5.4.4.5 Joints et reprise de chantier	68
5.4.4.5.1 Joints longitudinaux	68
5.4.4.5.2 Joints transversaux	69
5.4.5 Protection de la couche d'assise en béton compacté et couche de roulement	69
5.4.5.1 Protection	69
5.4.6 Importance de la qualité de l'uni	70
5.4.7 Travaux en arrière saison	70
 CHAPITRE 6 : ANALYSE ÉCONOMIQUE	
6.1 CHAUSSÉE EN ENROBÉS DENSES	73
6.1.1 Couche de base en latérite améliorée au ciment (latérite - ciment)	73
6.1.2 Couche de roulement en enrobés denses	73
6.1.3 Coût global de la structure	73

6.2 CHAUSSÉES EN BÉTON DE SABLE	73
6.2.1 Cas de forts trafics	74
6.2.1.1 Étude des coûts	76
6.2.2 Cas de faibles trafics	78
6.2.2.1 Étude des coûts	78
6.3 COMPARAISON DES COÛTS	80
6.4 CONCLUSION	80
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	82
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Répartition de la production nationale de granulats (en m³) pour le quinquennat 1986- 1991

Tableau 1.2 Estimation de la demande nationale en granulats (en m³) pour le quinquennat 1992-1997

Tableau 1.3 Réserves des gisements de grès

Tableau 2.1 Résistances en compression et en flexion du ciment

Tableau 2.2 Surface spécifique de Blaine et masse volumique chimique du ciment

Tableau 2.3 Compositions chimiques des principaux constituants du ciment

Tableau 2.4 Récapitulatif des différents paramètres granulométriques

Tableau 2.5 Propriétés physiques des principaux matériaux utilisés

Tableau 2.6 Composition chimique des différents matériaux

Tableau 2.7 Essai de compactage

Tableau 3.1 Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours (calcaire de Bargny)

Tableau 3.2 Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours (calcaire de Bandia)

Tableau 3.3 Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours (Gré de Toglou)

Tableau 3.4 Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours (Silixite de Taïba)

Tableau 3.5 Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours (Basalte de Diack)

Tableau 4.1 Valeurs des résistances en traction par fendage R_{tf} en fonction de l'âge (mûrissement à l'air)

Tableau 4.2 Valeurs des résistances en traction par fendage R_{tf} en fonction de l'âge (mûrissement à l'eau)

Tableau 4.3 Valeurs des masses en fonction de l'âge (mûrissement à l'air)

Tableau 4.4 Valeurs des masses en fonction de l'âge (mûrissement à l'eau)

Tableau 4.5 Caractéristiques physiques des bétons de sable

Tableau 4.6 Résultats de l'essai de réactivité potentielle des granulats avec les alcalins.

Tableau 5.1 Différentes classes de trafic

Tableau 5.2 Résultats du modèle Alizé III (Calcaire de Bargny et de Bandia)

Tableau 5.3 Résultats du modèle Alizé III (Silexite de Taïba)

Tableau 5.4 Résultats du modèle Alizé III (Basalte de Diack)

Tableau 5.5 Résultats du modèle Alizé III (Gré de Toglou)

Tableau 5.6 Résultats du modèle Alizé III (Calcaire de Bargny et de Bandia)

Tableau 5.7 Résultats du modèle Alizé III (Silexite de Taïba)

Tableau 5.8 Résultats du modèle Alizé III (Basalte de Diack)

Tableau 5.9 Résultats du modèle Alizé III (Grès de Toglou)

Tableau 5.10 Protection d'un béton compacté

Tableau 6.1 Épaisseur de la couche de roulement (forts trafics)

Tableau 6.2 Épaisseur de la couche de roulement (faibles trafics)

Tableau 6.3 Quantités des composants du béton requis au km de chaussée

Tableau 6.4 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de calcaire (Bargny)

Tableau 6.5 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de calcaire (Bandia)

Tableau 6.6 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de gré (Toglou)

Tableau 6.7 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de silixite (Taïba)

Tableau 6.8 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de basalte (Diack)

Tableau 6.9 Quantités des composants du béton de sable requis au km de chaussée

Tableau 6.10 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de calcaire (Bargny)

Tableau 6.11 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de calcaire (Bandia)

Tableau 6.12 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de Gré (Toglou)

Tableau 6.13 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de Silixite (Taïba)

Tableau 6.14 Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de basalte (Diack)

Tableau 6.15 Étude comparative des coûts

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Évolution de la production en granulats quinquennat 1986-1991

Figure 1.2 Estimation de la demande en granulats pour quelques secteurs d'activités quinquennat 1992-1997

Figure 1.3 Régions de production des granulats concassés

Figure 1.4 Zones climatiques et zones d'éloignement

Figure 3.1. Evolution des résistances en fonction de E/C (Calcaire de Bargny)

Figure 3.2. Evolution des résistances en fonction de E/C (Calcaire de Bandia)

Figure 3.3. Evolution des résistances en fonction de E/C (Gré de Toglou)

Figure 3.4. Evolution des résistances en fonction de E/C (Silexite de Taïba)

Figure 3.5. Evolution des résistances en fonction de E/C (Basalte de Diack)

Figure 4.1 Évolution de la résistance en fonction de l'âge (mûrissement à l'air)

Figure 4.2 Évolution de la résistance en fonction de l'âge (mûrissement à l'eau)

Figure 5.1 Détermination du module d'élasticité E (MPa)

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Dans un contexte d'épuisement progressif des ressources en gros granulats, il est plus que jamais nécessaire et pressant de valoriser nos ressources par l'application de nouvelles technologies parmi lesquelles le béton de sable.

Certes, parfois peu ou mal exploité, le béton de sable est un matériau antérieur au béton classique. C'est un béton sans granulats, très maniable et esthétique, réalisable dans des domaines spécifiques comme la stabilisation de trottoirs, l'aménagement d'aires de loisirs, de dallage pour parkings, de construction de chaussées.

C'est ainsi que dans un souci de contribuer ensemble et sans clivage à faire progresser les connaissances sur ce matériau par des études, le projet de fin d'études va porter sur la détermination de la teneur en eau de compacité maximale dans les bétons de sable à ajouts de "sables fillérisés". Il s'agit pour un dosage en ciment fixé de déterminer la teneur en eau optimale dans l'optique d'un béton routier compacté.

On utilisera quatre (04) "sables fillérisés" usuels (calcaire, gré, basalte, silicite).

L'intérêt d'un tel travail est :

- 1- De connaître suivant l'ajout la teneur en eau optimale dans le cas des bétons de sable, celle-ci étant certainement un peu plus élevée que celles de bétons routiers classiques compactés et de proposer une méthode de formulation.
- 2 - De mesurer les résistances en traction des éprouvettes confectionnées et de proposer une méthode de dimensionnement des chaussées en béton de sable compacté.

Ce faisant, d'une étude expérimentale, rigoureuse et représentative pour son nombre d'essais réalisés devront ressortir des formulations adéquates du béton de sable.

Nous terminerons cette étude par une analyse économique et ferons des recommandations pour son utilisation future.

Chapitre 1 :

**ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE**

Chapitre 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 HISTORIQUE DES BÉTONS DE SABLE

Il y a à peine un siècle et demi, avant que n'apparaissent les moyens de transport motorisés et ne se développe le réseau de voies de communication, on construisait avec des matériaux trouvés sur place ou à proximité, principalement des pierres, du bois, des briques d'argile... Il était en effet inconcevable de transporter sur des charrettes à traction animale et sur des dizaines ou des centaines de kilomètres, des matériaux d'origine lointaine. Pour lier entre eux les éléments de construction, de briques ou pierres, on préparait des mélanges de sable, de chaux, et d'eau. Progressivement, pour en diversifier l'usage, on incorpora à ces mortiers de pose, de la brique, de la tuile cassée puis du gravier, enfin de la pierre cassée : les premiers bétons étaient nés.

1.1.1 Le Béton aggloméré "Coignet"

En 1853, dans la perspective de réaliser des constructions monolithiques, économiques et résistantes, l'ingénieur français Coignet mit au point "le béton aggloméré" destiné à être moulé et pilonné en place et qui n'est autre que l'ancêtre du béton de sable. Il s'agissait, en effet, d'un mélange sans caillou, de sable, de cendres, de scories, de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité. Il construisit ainsi en béton aggloméré banché une vaste maison, encore visible au Nord de Paris.

Cette composition fut par suite utilisée dans bon nombre de constructions et réseaux d'assainissement et, après adaptation, servit notamment - pour ne citer que quelques exemples - à réaliser le grand mur de soutènement de la place du Trocadéro à Paris et l'aqueduc des eaux de captation de la Vanne, dans la traversée de la forêt de

Fontainebleau. A l'étranger, le phare de Port-Saïd, en Égypte, fut réalisé en 1869 en béton aggloméré Coignet.

1.1.2 Les expériences Soviétiques

En 1918, une expérience très originale fut faite par Nicolas de Rochefort, à Saint-Petersbourg. Elle consistait à broyer ensemble sable et clinker à parts égales, puis à mélanger ce produit à du sable dans le rapport de 1 (produit broyé) à 3 (sable).

Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en ciment (1/3 de ciment pour 2/3 de sable).

Cette expérience fut reprise par le professeur académicien Rehbinder comme base de ses propres recherches sur le béton de sable et le mystérieux mécanisme d'activation par broyage du mélange sable/clinker.

Il conclut que ce broyage libérait des surfaces physico-chimiquement actives qui, fraîches, fixaient plus efficacement le liant. Ce que Nicolas de Rochefort découvrit probablement par hasard, fut ainsi expliqué par le Professeur Rehbinder.

L'ex URSS, riche en sable, mais pauvre en gravillons et roches massives sur de vastes étendues, ne cessa principalement depuis 1941, de faire du béton composé de sable et d'un ou deux liants (ciment et chaux) selon les opportunités.

Les réalisations sont nombreuses. Certains parmi bien d'autres :

- Routes et autoroutes (Serpukhov - Toula par exemple)
- Pistes d'aérodromes militaires de Pevec et Arkangelsk
- Bâtiments (toitures à plis, éléments divers préfabriqués dans la ville de Nadym en Sibérie par exemple).

1.1.3 Le renouveau du béton de sable en France

L'émergence de préoccupations nouvelles liées à l'exploitation des granulats et à leur utilisation rationnelle, en même temps qu'une prise en compte des problèmes d'environnement sont à l'origine de l'intérêt à nouveau porté au béton de sable, dans les années soixante dix, notamment dans le Sud-Ouest de la France.

A cette époque, on constate, en effet :

- que les sables tant alluvionnaires qui proviennent du concassage des roches massives sont excédentaires, et qu'il y a un déficit en gravillons (principalement 3/8 mm) ;
- que le secteur du bâtiment, principal consommateur de béton est aussi le principal consommateur de granulats de gros calibre dont l'utilisation n'est pas impérative si l'on tient compte du niveau modeste des résistances exigées dans la plupart des ouvrages du bâtiment.

Dans la même période, conscients que les extractions de granulats dans les lits de fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles, les pouvoirs publics mettent progressivement en place une politique de réduction des autorisations d'exploitation de ces sites.

C'est dans ce contexte que s'ouvre la réflexion sur la formulation de nouveaux bétons de sable qui utiliseraient une ressource abondante et peu exploitée, et présenteraient, en raison de l'expérience des laboratoires et des avancées techniques dans le domaine, des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels.

Les premières applications sont réalisées avec succès dans le début des années quatre vingt, à l'initiative du Laboratoire Régional des ponts et chaussées de Bordeaux : injections de ponts en sous oeuvre, poutres, chaussées de lotissement, dalles-planchers.

Ainsi, la pratique du béton de sable s'est étendue à tous les domaines du génie civil (bâtiments, dalles...) et est en constante progression depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Certes, il est difficile d'évaluer la production actuelle mais elle dépasse indubitablement le million de mètres cubes par an dans les emplois identifiés des différents secteurs pris en compte dans le projet national français SABLOCRETE.

1.1.4 Le béton de sable au Sénégal

Compte tenu de l'immense gisement de sable au Sénégal, d'une part et de la rareté des granulats d'autre part, il sera opportun de promouvoir le développement des bétons de sable avec l'utilisation des "sables fillerisés" qui sont des résidus de carrières. Les premières expérimentations ont eu lieu en 1991 et 1992 avec la réalisation de stabilisation de trottoirs notamment à la Médina (Rue 15 x Avenue Blaise DIAGNE), de sols sportifs et de dallages au niveau de la Commune de Dakar (Direction de l'Aménagement Urbain). Grâce au partenariat avec l'Association Française SABLOCRETE ainsi que l'appui de la Direction des Affaires Économiques Internationales (DAEI) et de la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) qui dépendent du Ministère Français de l'Équipement, du Logement et du Tourisme, une mission d'information et de sensibilisation puis une mission technique d'appui opérationnel d'experts du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) et du Centre d'Études Techniques pour l'Équipement (CETE) de Bordeaux qui ont eu lieu à Dakar respectivement en Octobre 1994 et en Mars 1995. Deux formulations de béton de sable de consistance "ferme" pour parpaings et dalles, et de béton de sable de consistance "plastique" destiné aux dallages et aux panneaux préfabriqués, mises au point par le CETE de Bordeaux en liaison avec le Centre Expérimental de Recherches et d'Études pour l'Équipement (CEREEQ) de Dakar, ont pu être fabriquées à l'usine de HAMO (Société des habitations Modérées)

spécialisée dans la préfabrication, et à la SENEMAC (Sénégalaise des Matériaux et de Construction) qui est une Petite et Moyenne Entreprise (PME) de BTP avec notamment la participation de l'usine de SOCOCIM, les carrières DESPLATS, la Direction de l'Aménagement Urbain (DAU), la Direction des Travaux Publics, la SOCOTEC, le CEREEQ et l'AGETIP.

Les premiers résultats sont très encourageants et ont permis d'atteindre des économies de 23 % à 31 % par rapport aux bétons classiques selon les dosages en ciment. En perspective, il est envisagé grâce à l'appui de la Caisse Française de Développement et de la Mission Française d'Aide et de Coopération, la réalisation de projets à base de bétons de sable à la suite d'une étude économique et environnementale. Des actions de sensibilisation des maîtres d'oeuvre, entreprises et maîtres d'ouvrage sur l'intérêt des bétons sont également envisagées.

Le développement des bétons de sable au Sénégal pourrait, assurément, apporter au secteur des BTP des solutions peu onéreuses avec une valorisation des matériaux locaux, notamment dans la voirie urbaine, les chaussées en ciment, les stabilisations de trottoirs, les dallages pour sols sportifs, les aires de parkings et de marchés, les revêtements de canaux (canal du Cayor, canaux d'assainissement avec en plus un meilleur coefficient de rugosité d'où une meilleure hydraulité) d'une part et favoriser la préservation de l'environnement en permettant l'utilisation massive des sables de dune plus abondants et moins coûteux en lieu et place des sables de plage qui font actuellement l'objet d'une extraction frauduleuse de façon quasi minière d'autre part.

1.2 COMPOSANTS DES BÉTONS DE SABLE

1.2.1. Définition

Le béton de sable est composé de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants.

1.2.1.1 Les sables : Par sable, on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NFP 18 - 101 et NFP 18 - 301.

Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. Aucun critère granulométrique n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable. On peut bien utiliser un sable fin (type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou un 0/D de concassage. D'ailleurs, des programmes nationaux de recherche (SABLOCRETE en France, par exemple) s'efforcent de promouvoir l'utilisation de tous les types de sable.

En effet la seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté. Il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sables propres, tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique.

1.2.1.2 Le Ciment : Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NFP 15 - 301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Notons que le dosage en ciment dans le béton de sable est du même ordre de grandeur que celui des bétons traditionnels : entre 200 et 400 kg/m³.

1.2.1.3 L'addition : Par définition, le béton de sable contient une (ou plusieurs) addition (s). Leur rôle est de combler en partie les vides du sable (filler : to fill = remplir). Elles augmentent donc sa compacité naturelle et créent une granulométrie aussi continue que possible. Mais les additions participent également à l'amélioration de l'enchevêtrement cristallin et de la cohésion du mélange. En outre, elles permettent

aussi d'augmenter les performances sans augmenter le dosage en ciment évitant ainsi les risques de retrait et d'excès de rigidité provoqués par un surdosage en ciment ; leur efficacité est, en ce domaine fonction de leur nature minéralogique, de leur finesse et de leur activité hydraulique ou pouzzolanique.

En effet, les associations de recherche visent à optimiser le rapport efficacité/coût. Or, en l'absence d'un marché constitué et bien structuré, on ne peut aujourd'hui se prononcer clairement sur les coûts futurs de cet "intrant".

1.2.1.4 L'eau : Les bétons de sable nécessitent une qualité d'eau de mouillage importante en raison de la proportion élevée en éléments fins qui génèrent une surface spécifique importante. Le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des traditionnels et pour le réduire on a recours à des adjuvants. En général, le rapport E/C est compris entre 0,6 et 0,7.

1.2.1.5 Les adjuvants : Ce sont des produits chimiques utilisés à faible dose, de la même façon et dans le même but que pour les bétons classiques (amélioration des performances mécaniques à court, moyen et long terme). Dans la technique du béton de sable, sont principalement utilisés des plastifiants permettant de réduire le dosage en eau et, par conséquent, d'augmenter la résistance et la compacité tout en amoindrissant les risques de retrait excessif. Cependant, les adjuvants améliorent ou facilitent aussi la mise en oeuvre du béton (la maniabilité).

1.2.1.6 Les fibres (polypropylène, acier, fonte amorphe...) : Elles peuvent constituer un renfort de structure, en particulier au jeune âge du béton. Leur rôle dépend de leur nature, leur dosage et leur longueur.

Elles influent sur la vitesse et l'importance du retrait libre mais elles confortent notamment la tenue du matériau.

1.2.1.7 Les gravillons : L'ajout de gravillons permet d'augmenter la compacité et à même dosage en ciment, la matrice de sable se trouve enrichie en ciment. En effet, il est possible de "raidir (augmenter le module d'élasticité) la formulation d'un béton de sable en y ajoutant des gravillons, dans un rapport gravillon/sable restant inférieur à 1 : il s'agit d'un béton de sable chargé, alors que ce rapport est compris entre 1,4 et 1,7 pour le béton classique.

1.2.2 PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES

1.2.2.1. Relation granulométrie et maniabilité

Une des particularités des bétons de sable est de nécessiter davantage d'eau que les bétons classiques ; ceci se traduit par des valeurs du rapport (E/C) (eau/ciment) systématiquement supérieures à 0,5 ; ce rapport se situant généralement entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange ; d'ailleurs si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le rapport $E/C + F$ (F = addition en fines), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels. La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau ; plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore.

1.2.2.2 Relation granulométrie et résistance

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres et en particulier, la finesse et la nature de l'addition. Plus l'addition est fine (et bien défloculée), plus elle est efficace au niveau du grain en compacité (et donc du grain en résistance) ; ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable. En effet, à dosage en ciment constant et d'un sable donné a priori ; une certaine quantité d'addition permettra d'obtenir compacité et résistance optimales : ce dosage dépendra de la nature et de la granularité respectives du sable et des fines d'ajout.

1.2.3 PROPRIÉTÉS SPÉCIFIQUES

Si la résistance est un critère de performance plus facilement assuré par le béton traditionnel, il existe certains critères pour lesquels le béton de sable se révèle plus performant :

1.2.3.1 Maniabilité : Mise en oeuvre facilitée, énergie de mise en oeuvre et de serrage réduite, pompabilité améliorée.

1.2.3.2 Cohésion et absence de ségrégation : Meilleure résistance aux chocs, bétonnage aisé en site aquatique, coulage en place des pieux et micro-pieux facilité...

1.2.3.3 Petite granularité (0 à 6 mm) : Elle facilite des travaux d'injection et le bétonnage de pièces à forte densité de ferrailage et/ou à coffrages complexes. Cette propriété est appréciée en travaux de rénovation, d'autant plus que le béton de sable est plus léger que le béton classique.

1.2.3.4 Bel aspect de surface : Le souci esthétique et la qualité du "fini" étant de plus en plus pris en compte dans les constructions, les effets architecturaux et la qualité des parements que le béton de sable permet d'obtenir tendent à devenir des critères déterminants .

1.2.4 LIMITES D'EMPLOI

1.2.4.1 Limites inhérentes à la nouveauté

La technologie du béton de sable étant récente, savoir faire et expérience sont nécessairement à acquérir, de manière progressive par les utilisateurs habituels du béton

1.2.4.2 Contraintes de formulation

Les performances d'un béton de sable sont extrêmement dépendantes :

- de la qualité de la formulation
- du respect de cette formulation

Certaines formulations sont sensibles aux moindres fluctuations de la teneur en eau (cas des bétons de sable routiers compactés) et nécessitent un minimum de précautions lors du stockage des constituants, de la fabrication et du transport.

1.2.4.3 Performances mécaniques

Les performances mécaniques ne constituent pas l'unique critère de jugement de la qualité d'un béton : on a vu notamment que bon nombre de propriétés spécifiques des bétons de sable les rendent préférentiels pour certains usages. De plus, il est relativement aisé d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques, même aux jeunes âges, d'une part : la vocation des bétons de sable n'est pas de substituer à des bétons mécaniquement performants, mais d'être une nouvelle source de bétons de qualité (qualité appréciée au sens large).

1.2.4.4 Les bétons de sable routiers compactés

Les bétons de sable routiers compactés sont peu utilisés en France et au Sénégal car les études sur les bétons de sable routiers compactés ne sont pas aussi poussées que celles portant sur les autres matériaux routiers. Cependant, les bétons de sable se prêtent bien à la technique de mise en place par compactage ou hypercompactage qui permettent de réduire notablement les dosages réels en ciment. Il faut lors de la fabrication, maîtriser parfaitement la teneur en eau sinon la mise en oeuvre deviendra très délicate voire impossible.

1.3 DESCRIPTION DE LA SITUATION ACTUELLE(D.E.M.G, 1991)

1.3.1 Données générales sur les granulats

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

Les granulats routiers proviennent en majeure partie du concassage des roches basaltiques des calcaires, des grès et de l'extraction des sables et des graveleux latéritiques (cf. tableau 1.1 Source : Direction de l'Énergie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G). Cependant, le Sénégal Occidental est très largement pourvu en matériaux granulaires. Cette situation est en grande partie favorisée par la géologie de la région. Les affleurements basaltiques dans la presqu'île de Dakar et dans la région de Thiès font suite à un ensemble sédimentaire couvrant la presque totalité de cette zone. Ces régions administratives de Dakar et de Thiès assurent l'essentiel de la production de granulats concassés du pays (cf. fig. 1.3 Source : Direction de l'Énergie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G)

1.3.2 Matériau d'usage courant au Sénégal

La latérite, matériau plus couramment utilisé en construction routière, pose aujourd'hui d'énormes problèmes. Certes, il y a beaucoup de gisements latéritiques sur l'étendue du territoire national mais l'exploitation coûte chère vu l'éloignement de ces sites par rapport aux régions concernées généralement par les projets routiers (cf. fig. 1.4 Source : Direction de l'Énergie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G). De plus, il se pose aussi, le plus souvent, un problème de disponibilité vu l'évolution de la demande par rapport à l'offre car les carrières actuelles tendent à s'épuiser (cf. fig.1.2 et 1.1 et tableau 1.1 et 1.2 Source : Direction de l'Énergie, des Mines et de la Géologie D.E.M.G).

Ainsi, il convient de remarquer que la production nationale de granulats exprimée en m^3 par habitant a été multipliée par 3, passant de $7,3 \cdot 10^{-3} m^3/habitant$ en 1986 à $22,1 \cdot 10^{-3} m^3/habitant$ en 1991. Cette production ne cesse d'augmenter avec la mise en oeuvre du Programme d'Ajustement Sectoriel des Transports (PAST) et la réalisation en cours de grands projets au niveau du pays (cf. tableau 1.2 et fig.1.2). Dès lors, les réserves disponibles ne suffiraient pas pour satisfaire la demande avec les granulats concassés. De plus, les granulats routiers sont des pondéreux et leur valeur pour l'usager est directement fonction des coûts de transport. On admet que le coût d'un parcours de 30 km est équivalent au prix des matériaux départ carrière. Le coût élevé des granulats concassés est lié au fait que les carrières de roches massives nécessitent des investissements importants. Seuls le basalte et la quasi totalité des graveleux latéritiques extraits sont d'usage courant en construction routière. Le gré, le calcaire crayeux ou gréseux, le silexite ne sont pas utilisés en route et constituent cependant, d'importantes réserves au niveau du pays.

Années	1986	1987	1988	1989	1990	1991	TOTAL	%
Granulats								
Grès	2034	4115	4182	5417	23792	10167	50507	8.9
Calcaires	15934	18502	21240	24834	34626	39276	154420	27.1
Bauxites	3270	8466	12219	12445	13659	15844	65903	11.6
Sables	19030	26890	31972	40510	61200	80753	260363	45.8
Graveleux latéritiques	4362	4733	3700	4000	7680	13209	37684	6.6
TOTAL	45430	62714	73321	87206	140957	159249	568877	100
%	8.0	11.0	12.9	15.3	24.0	24.0	100	

Tab. 1.1 Répartition de la production nationale de granulats (en m³) pour le quinquennat 1986-1991

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

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

Tab. 1.2 Estimation de la demande nationale en granulats (en m³) pour le quinquennat 1992-1997

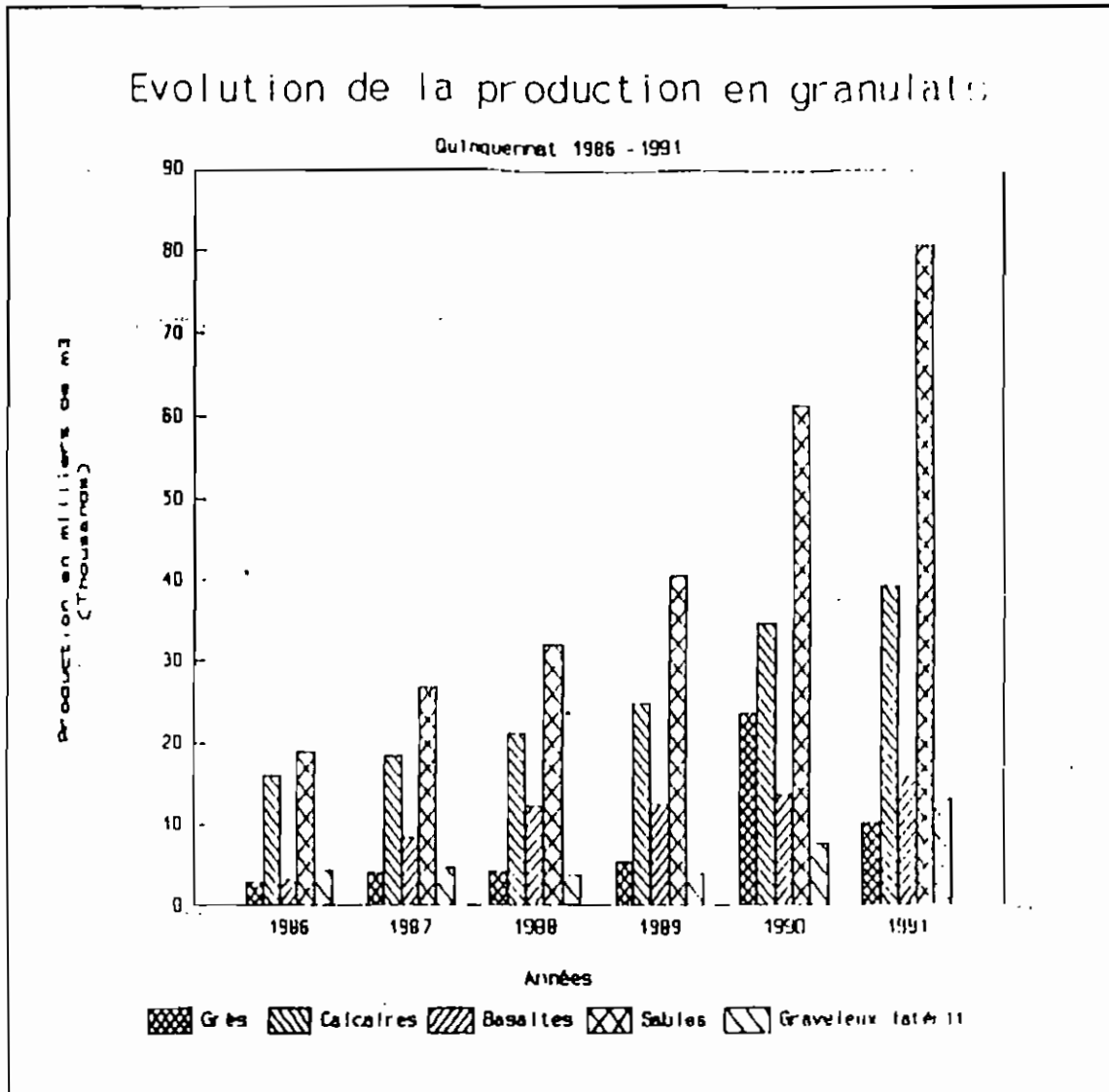


fig 1.1: Evolution de la production en granulats quinquennat 1986-1991

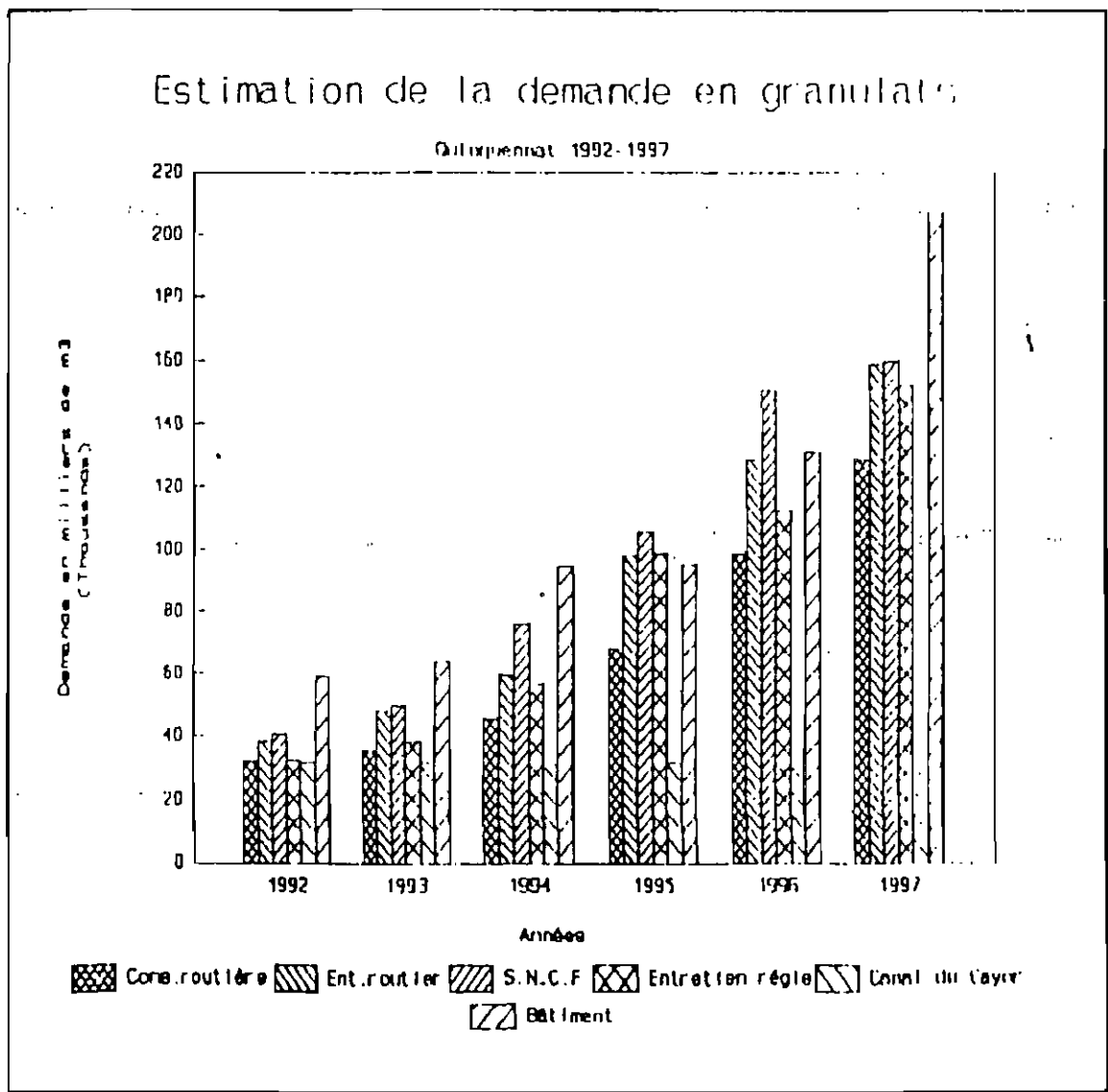


fig 1.2: Estimation de la demande en granulats pour quelques secteurs d'activités quinquennat 1992-1997.

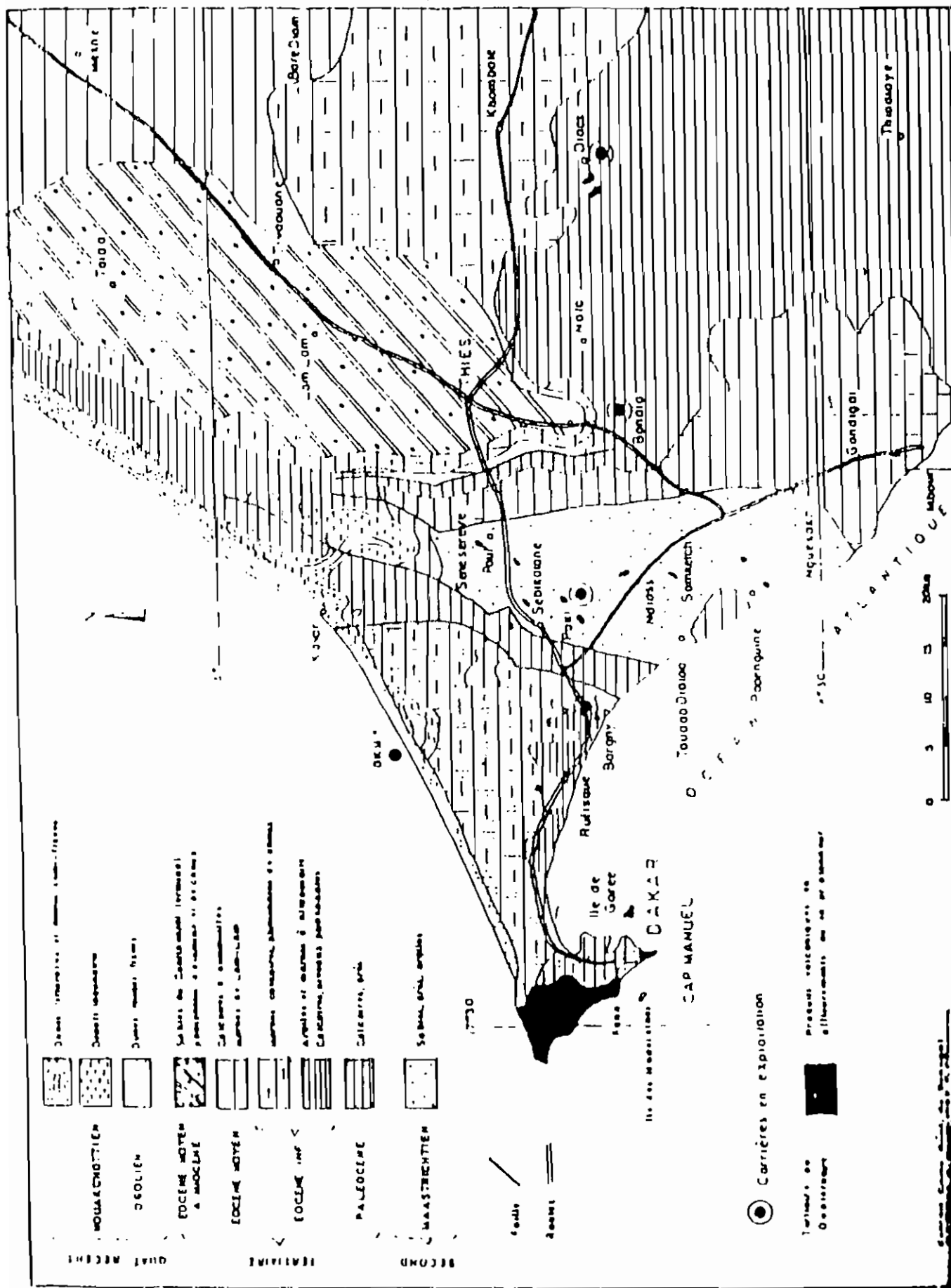
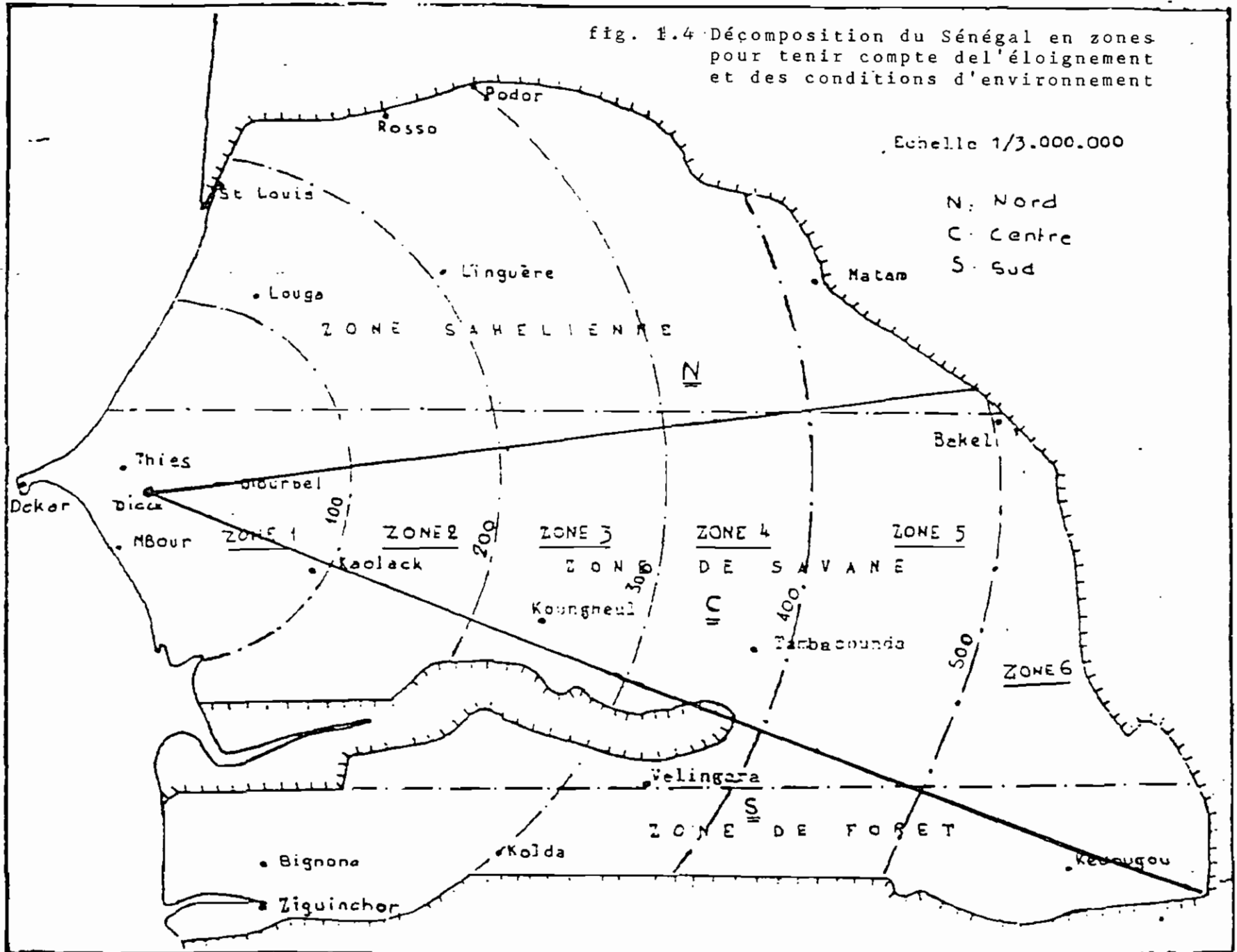


Fig. 1.3 Régions de production des granulats concassés

fig. 1.4 Décomposition du Sénégal en zones pour tenir compte de l'éloignement et des conditions d'environnement



1.4 ÉVALUATION QUANTITATIVE DES RÉSERVES

(Source : Diassé, Mémoire d'Ingénieur - Géologue I.S.T, 1995)

Cette évaluation quantitative des réserves a été réalisée par des études antérieures à l'aide de sondages (B.R.G.M. 1984)

1.4 .1 Les roches basaltiques

Le gisement de Dakar est interdit d'extraction par le décret 72-662. Le gisement de Diack est constitué par deux grands affleurements, appelés piton A et piton B dont la superficie totale dépasse 95000 m² (plus de la moitié de ces pitons a été exploitée). A partir de 1970, FRAUDET P (BRGM, 1984) estime les réserves dans le gisement à 10 millions de tonnes sur une puissance de 5 m.

A Sène Sérère, les réserves sont estimées à 1 million de m³. Toutefois, il existe d'autres affleurements dont les réserves ne sont pas connues.

1.4.2 Les grès

Au cours de son étude, Laleye J (BRGM, 1984) a réalisé plusieurs puits qui ont permis d'estimer très approximativement les réserves de grès dans la région de Paki (tableau 1.3)

Tableau 1.3 : Réserves des gisements de gré

Localité	Paki	Toglou	Mbang
Réserves (tonnes)	300 000	150 000	3 000 000
Total	3 450 000		

1.4.3 Les calcaires

En 1976, Michot A. et PEZERIL G. (BRGM, 1984) effectuent des travaux de recherche systématique détaillée sur les calcaires de Pout. Les réserves connues au-dessus de la nappe phréatique sont évaluées à 84 millions de tonnes. Les réserves de Bargny et de Bandia ne sont pas connues.

1.4.4 Les silexites

Les données concernant les silexites au niveau de la Compagnie Sénégalaise de Phosphates de Taïba (C.S.P.T) s'établissent comme suit :

(source inédite : Direction des exploitations de la C.S.P.T, 1994) :

- Production annuelle des silexites	1 150 000 T
- Production des dix dernières années	12 400 000 T

Stock actuel

- Terril de Keur Mor FALL	28 800 000 T
- Terril de Ndomor DIOP	16 800 000 T

Réserves disponibles

- Panneau TV	9 780 000 T
- Probable	84 000 000 T

1.4.5 Les sables de dune

Les réserves de sable de dune au Sénégal sont inépuisables. Il n'existe pas de chiffres disponibles concernant les réserves.

Par conséquent, les réserves inépuisables de sables de dune uniformément à travers les pays combinées aux coûts faibles des "sables fillérisés" constituent des raisons objectives pour la vulgarisation au Sénégal de cette technique innovante qu'est le béton de sable.

1.5 INTÉRÊT DES BÉTONS DE SABLE AU SÉNÉGAL

Les bétons de sable constituent un type de matériau à promouvoir dans le bâtiment, le génie urbain, les travaux routiers et les industries de la construction en raison d'une part des enjeux économiques qui le concernent dans de vastes régions à prédominance sableuse, d'autre part des multiples avantages qu'ils offrent et de la grande diversité des formes d'utilisation et d'applications que laissent pressentir les connaissances déjà acquises ainsi que les nouveaux moyens technologiques accessibles.

Ils représentent toute une gamme de matériaux résultant de l'utilisation optimale de produits sableux inexploités (sables naturels, sables de dune, produit de dessablage, résidus de carrières, sous produits industriels) associés à des liants et des fillers et, le cas échéant, à des adjuvants et matériaux auxiliaires spéciaux.

Ils doivent être élaborés et utilisés pour chacune des applications à partir de bases scientifiques de haut niveau et de technologies de mise en oeuvre appropriées, de telle sorte que l'on aboutisse, dans chaque cas, à une formulation spécifique, et à des performances bien adaptées aux usages.

Ils se différencient radicalement des mortiers ordinaires et peuvent se substituer dans de nombreux cas aux bétons de granulats grossiers en apportant des avantages spécifiques nouveaux. L'intérêt économique résulte alors suivant les cas, soit d'un abaissement des coûts, soit d'une notable valeur ajoutée aux produits visés comparativement aux produits classiques.

Les principaux avantages des bétons de sable sont liés à :

- sa grande facilité de mise en place ;
- une susceptibilité quasi nulle à la ségrégation, ne nécessitant aucune correction de formulation ;
- un excellent aspect de décoffrage ;
- un lissage très facile ;

- de larges possibilités d'adaptation des performances aux usages ;
- des possibilités intéressantes d'adaptation à des réseaux d'armatures à mailles fines ou à des inclusions fibreuses ;
- une grande souplesse et une diversité des moyens de mise en oeuvre notamment :
 - * le coulage,
 - * le compactage ou l'hypercompactage,
 - * le pompage,
 - * l'injection sous pression,
 - * l'extrusion,
- une variété d'applications telles que :
 - * éléments en béton armé ou précontraint,
 - * dalles de chaussées rigides,
 - * revêtement de canaux,
 - * voiles et coques minces,
 - * revêtements de renforcement,
 - * pavages, dallages pour extérieur ou intérieur, bordures de trottoirs.

Chapitre 2 :

ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre 2 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Le sable de dune et les "sables fillérisés" sont les constituants de base des bétons de sable dans le cadre de cette étude.

2.1 CHOIX DES MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1.1. Sables de dune

C'est le sable le plus abondant dans le pays, il constitue un immense gisement au Sénégal.

En effet, des études antérieures (AHOUANSOU S. G, 1993) ont révélé qu'ils développaient des performances mécaniques égales à celles des sables de plage qui, du reste sont interdits d'exploitation par le décret 79-880 du 25 Septembre 1979 (surtout à Dakar).

Dans le cadre de cette étude, les sables de dune utilisés sont prélevés à Thiès plus précisément à Ballabey (quartier de Thiès). Ils sont de couleur orange (situés entre les dunes rouges et les dunes jaunes) semi-fixée due à une mince gangue argileuse qui entoure les grains. Ils sont aussi constitués de matières organiques et végétales qui amoindrissent la propreté des sables étudiés Par conséquent, ils devraient être de moins bonne qualité que ceux du Nord Foire de Dakar.

2.1.2 "Sables fillérisés" de gré (B. Diassé, Mémoire d' Ingénieur- Géologue IST,1995)

Les grès du Maastrichtien sont subaffleurants sur l'ensemble du massif de Ndiass où ils sont recouverts par des formations latéritiques dont la puissance peut dépasser 10 m. Les gîtes de grès ayant fait l'objet d'une exploitation se situent à 50 km de Dakar, à Paki Toglou, Ndayane, Mbang. Dans cette étude, les "sables fillérisés" de gré utilisés proviennent du gisement de Paki Toglou à 50 km de Dakar. Ils sont à grains fins et de couleur rosâtre.

2.1.3 "Sables fillérisés" de calcaire (B. Diassé, Mémoire d' Ingénieur-Géologue IST,1995)

Les calcaires de la Presqu'île du Cap-vert vont du crétacé (Danien) à l'Éocène moyen (Lutétien). Ces calcaires paléocènes affleurent à Bandia, Popenguine, Mbour et Panthior. En dehors de ces affleurements de la Presqu'île du Cap-vert, il existe d'autres gisements dans la vallée du Ferlo, dans la vallée du Sénégal, dans les régions de Ourossogui, Ogo, Kanel et à l'ouest de Thilogne (BRGM, 1984).

Cette étude portera aussi bien sur les "sables fillérisés" de calcaire de la carrière de Bargny que sur ceux de Bandia. Ils sont tous deux à grains fins et de couleur blanche.

2.1.4 "Sables fillérisés" de basalte (B. Diassé, Mémoire d' Ingénieur Géologue IST,1995)

Ils sont localisés au niveau du site de Diack à 30 km de Thiès, seul site autorisé depuis le décret 72-662 interdisant l'extraction des roches basaltiques dans la région de Dakar. D'autres affleurements existent à Séné Sérère au niveau du Ravin des voleurs, à Keur Mamour etc...

L' étude portera sur les "sables fillérisés" de basalte qui proviennent de la carrière de Diack (à 100 km de Dakar) Ils sont à grains fins et de couleur gris noir.

2.1.5. "Sables fillérisés" de silexite (B. Diassé, Mémoire d' Ingénieur Géologue IST,1995)

Ils constituent les rejets industriels non recyclés de la Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba (C.S.P.T) qui se situe à 75 km environ à vol d'oiseau de Dakar .

Dans le cadre de cette étude, on utilisera les "sables fillérisés" de siléxite qui proviennent du minerai phosphaté de Taïba. Ce sont des résidus qui constituent un immense réservoir à la C.S.P.T-Taïba. Ils se présentent généralement sous la forme de blocs à coeur sombre et à cortex blanc.

2.2 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS OBTENUS

2.2.1 Ciment :

Dans le cadre de cette étude on utilisera le C.P.J CEM II 32,5. En effet, le ciment a fait l'objet des essais suivants : résistances mécaniques en compression et en flexion à 2 ; 7 et 28 jours ; détermination de la surface spécifique de Blaine, compositions chimiques des principaux constituants du ciment ; masse volumique. Ainsi, les résultats sur le ciment utilisé sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 2.1 : Résistances en compression et en flexion du ciment

Résistances en compression	2 jours	14,4 MPa
	7 jours	26,0 MPa
	28 jours	42,5 MPa
Résistances en flexion	2 jours	4,0 MPa
	7 jours	6,7 MPa
	28 jours	8,9 MPa

Tableau 2.2 : Surface spécifique de Blaine et Masse volumique chimique du ciment

Surface spécifique de Blaine	4060 cm ² /g
Masse volumique	3,27 g/cm ³

**Tableau 2.3 : Compositions chimiques des principaux constituants
du ciment**

SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃
17,80	3,48	2,83	59,25	3,59	3,10

2.2.2 : Analyse granulométrique des différents matériaux

L'analyse granulométrique des différents matériaux (par le procédé du tamisage) nous permet d'évaluer le module de finesse, les coefficients de courbure C_c et d'uniformité C_u et les pourcentage des fines ($< 75 \cdot 10^{-6}$ m) de chaque matériau. Ainsi, le module de finesse (M_f) est obtenu en faisant la somme des refus cumulés en pourcentage sur les tamis d'ouverture 4,75 ; 2,36 ; 1,18 ; 0,60 ; 0,30 et 0,15 mm, le tout divisé par 100.

Le coefficient d'uniformité de Hazen $C_u = D_{60}/D_{10}$

Le coefficient de courbure de Hazen $C_c = (D_{30})^2/(D_{60} \times D_{10})$

Les courbes granulométriques des différents matériaux étudiés sont représentées en annexe.

En effet, un récapitulatif des différents paramètres granulométriques sont consignés dans le tableau 2.4

Paramètres granulométriques Matériaux	Avant lavage (à sec)						Après lavage (à l'eau)		
	Tamis n°4	Tamis n°40	Tamis n° 200 % fines (< 75.10-6 m)	Cu	Ce	Mf	Tamis n°4	Tamis n°40	Tamis n° 200
Sable de dune (Thiès)	100	92,24	3,04	2,58	1,3	1,31	-	-	-
Calcaire 0/3 (Bargny)	97,62	31,51	2,16	5	0,94	2,67	100	47,06	29,44
Calcaire 0/3 (Bandia)	99,93	53,87	3,16	4,17	1,13	1,96	100	63,72	33,93
Grès 0/3 (Toglou)	99,56	55,41	2,28	4,67	0,6	2,03	100	57,78	18,89
Basalte 0/3 (Diack)	99,73	31,06	6,94	9,17	1,21	2,66	100	37,51	17,68
Silexite (Taïba)	99,9	37,81	2,83	7,69	0,79	2,49	100	45,23	18,49

Tableau 2.4 : Récapitulatif des différents paramètres granulométriques

2.2.3 : Propriétés physiques des différents matériaux

- L'absorptivité d'un matériau est obtenu :

$$\text{Abs (\%)} = \frac{(S - A) \times 100}{A}$$

où S : masse de l'échantillon à l'état saturé superficiellement sec (SSS).

A cet état, tous les pores des agrégats sont remplis d'eau et leur surface ne retient pas d'eau.

A = masse de l'échantillon séché à l'étuve, mesurée dans l'air

- Le poids spécifique des constituants solides des différents matériaux (γ_s) est

$$\text{donné par : } \gamma_s = \frac{P_s}{P_s + P_{pe} - P_{pes}} \times \alpha \quad (20^\circ\text{C})$$

où $P_s(\text{g})$ = poids du sol sec

$P_{pe}(\text{g})$ = poids du pycnomètre + poids de l'eau (à T°C)

$P_{pes}(\text{g})$ = poids du pycnomètre + poids de l'eau + poids du sol

α = facteur de correction à T°C (table)

Ainsi, les propriétés physiques des différents matériaux utilisés, sont indiqués dans le tableau ci-dessous

Tableau 2.5 Propriétés physiques des principaux matériaux utilisés

Propriétés physiques Matériaux	γ_s	Abs (%)	Surface spécifique (S.P)	Masse volumique réelle (Kg/m ³)	ES
Sable de dune (Thiès)	2650	0,84	4 365	-	52
Calcaire 0/3 (Bargny)	2690	3,56	4 628	2164	-
Calcaire 0/3 (Bandia)	2690	1,12	4 312	2167	-
Gré 0/3 (Toglou)	2670	1,43	4 789	2193	-
Basalte 0/3 (Diack)	2980	1,63	1 704	2294	-
Silexite 0/3 (Taïba)	2730	1,47	3 008	2216	-

2.2.4 Analyse chimique des "sables fillérisés"

La composition chimique des principaux matériaux utilisés sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.6 : Composition chimique des différents matériaux

Désignation	Calcaire de Bandia (0/3)	Calcaire de Bargny (0/3)	Basalte de Diack (0/3)	Gré de Toglou (0/3)	Silaxite de Taïba (0/3)
SiO ₂	4,04	6,74	49,33	89,30	69,05
Fe ₂ O ₃	0,90	1,16	12,04	2,43	3,43
Al ₂ O ₃	0,42	0,84	13,48	5,06	1,33
CaO	52,16	50,06	9,69	0,24	16,64
MgO	0,89	1,58	8,64	0,12	0,90
SO ₃	-	-	0,24	0,73	0,77

2.2.5 Essai de compactage

L'essai de compactage est réalisé avec les cinq "sables fillérisés" que sont : le calcaire de Bargny et de Bandia, le gré de Toglou, le silaxite de Taïba et le basalte de Diack. Il s'agit pour un dosage en ciment fixé de déterminer la teneur en eau optimale dans l'optique d'un béton routier compacté.

Le dosage en ciment étant fixé à 200 kg/m³. En effet, l'objet de cette étude expérimentale est de faire ressortir par son nombre d'essais réalisés des formulations adéquates du béton de sable à partir d'un dosage en ciment faible (200 kg/m³) habituellement utilisé pour les faibles trafics.

Ainsi pour un dosage en ciment $C = 200 \text{ kg/m}^3$;

une masse du marteau $M = 4,54 \text{ kg}$;

une hauteur de chute du marteau $h = 45,7 \text{ cm}$;

un nombre de couches $n = 5$;

un nombre de coups $N = 25$;

un volume du moule $V = \frac{\pi \times (10,16)^2}{4} \times 11,64 = 943,90 \text{ cm}^3$

On a une énergie de compactage

$$E = \frac{MhnN}{V} = \frac{4,54 \times 45,7 \times 25 \times 5}{943,90} = 27,50 \text{ kg / cm}^2$$

L'énergie de compactage applicable à ce moule d'une énergie $E = 27,50 \text{ kg/cm}^2$ doit être la même que celle appliquée à notre moule de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm

d'où $E = \frac{MhnN}{V}$

$$N = \frac{EV}{Mhn} = \frac{27,50 \times 3,14 \times (11 \times 11) \times 22}{4 \times 4,54 \times 45,7 \times 5} = 55,4 \approx 55 \text{ coups}$$

donc on aura $N = 55$ coups

2.2.5.1 Quantité des matériaux pesés pour le compactage

On fixe un dosage en ciment $C = 200 \text{ kg/m}^3$ et un rapport

C/S_t (ciment/(sable de dune + "sable fillérisé")) en masse tel que : $C/S_t = 0,25$ pour les chaussées et S_d/S_f (sable de dune/"sable fillérisé") en masse tel que $S_d/S_f = 2$ pour les chaussées.

On a le système suivant :

$$\begin{cases} C / S_t = C / (S_d + S_f) = 0,25 & (1) \\ S_d / S_f = 2 & (2) \end{cases}$$

$$(1) \implies S_t = S_d + S_f = \frac{C}{0,25} = \frac{200}{0,25} = 800 \text{ kg / m}^3$$

$$(2) \implies S_d = 2 S_f$$

$$(1) \text{ et } (2) \implies 3 S_f = 800$$

$$S_f = 266,67 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{d'où } S_d = 266,67 \times 2 = 533,33 \text{ kg/m}^3$$

Donc, nous avons les quantités suivantes :

- Sable de dune : $S_d = 533 \text{ kg/m}^3$
- "Sable fillérisé" : $S_f = 267 \text{ kg/m}^3$
- Ciment : $C = 200 \text{ kg/m}^3$

Pour trouver la teneur en eau optimale, on fera varier notre pourcentage approximatif d'eau ajoutée de 2% jusqu'à 12%.

Notons que notre essai commencera pour chaque matériau à 4% d'eau. Ainsi, le tableau suivant nous donne un récapitulatif des différents essais de compactage.

Tableau 2.7 : Essai de compactage

	Calcaire de Bargny (0/3)	Calcaire de Bandia (0/3)	Gré de Toglou (0/3)	Silexite de Taïba (0/3)	Basalte de Diack (0/3)
% approximatif d'eau ajoutée	8%	8%	10%	10%	10%
W % optimum	3,97	7,73	9,44	6	5,76
$\gamma_d \text{ max}$ (t/m^3)	1,88	1,9	1,87	1,94	1,98

2.3 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS OBTENUS

De toutes les caractéristiques des bétons de sable, la granulométrie est sûrement celle qui a le plus d'influence sur les propriétés. La granulométrie et la grosseur maximale des granulats influencent les quantités de ciment et d'eau nécessaires au mélange, la maniabilité (facilité de mise en oeuvre), le coût, la porosité (plus les grains sont fins plus le sol est poreux), le retrait et la durabilité du béton.

Ainsi, tous les échantillons ont été soumis à l'analyse granulométrique avant et après lavage. L'analyse des différentes courbes granulométriques montre en général une transformation appréciable du squelette des différents matériaux que sont : le silexite

de Taïba, le gré de Toglou et le sable de dune de Thiès, tandis que celles du basalte de Diack, du calcaire de Bandia et de Bargny montre en général une faible transformation du squelette, ce qui traduit une bonne dureté des grains. Cela est aussi constaté à travers les coefficients de courbure C_c et d'uniformité C_u des différentes courbes granulométriques avant lavage. Les "sables fillérisés" de basalte de Diack, du calcaire de Bandia et de Bargny sont très bien gradués car $1 \leq C_c < 3$ et $C_u \geq 4$ (le degré d'uniformité renseigne sur la forme de la courbe). Le sable de dune de Thiès et le "sable fillérisé" de gré de Toglou présentent une granulométrie continue car $C_u > 2$, de même que celui du silexite de Taïba ($C_u \geq 7$). De plus, les "sables fillérisés" présentent un module de finesse variant entre 2,03 et 2,67 (un béton de sable doit posséder un module de finesse compris entre 2,30 et 3,10) et un pourcentage de fines ($< 75 \cdot 10^{-6}$ m) variant entre 2,16 et 6,94 qui participent de manière très significative à la compacité du béton et de ce fait à la résistance. Par conséquent, à priori, les sables fillérisés de basalte de Diack, de calcaire de Bandia et de Bargny présentent de bonnes performances mécaniques car plus une granulométrie est étalée, plus les performances mécaniques seront élevées.

En effet, l'analyse granulométrique donne des pourcentages de fines variant de 2,16 à 6,94, ce qui n'est pas du tout négligeable pour des matériaux qui doivent être "propres", ne serait ce que pour ne pas créer certains phénomènes d'altération de la chaussée à long terme ou encore pour ne pas affecter l'adhérence entre la pâte et le grain qui peut diminuer la résistance. A cela, l'analyse granulométrique après lavage nous donne des pourcentages de fines variant entre 17,68 et 33,93 d'où la nécessité de procéder à un lavage des "sables fillérisés" (surtout des calcaires) pour éliminer certaines gangues avant toute utilisation afin d'éviter une quelconque altération dans le long terme.

De plus, l'analyse chimique des silexites et des grés montre qu'ils sont constitués en grande partie de SiO_2 .

La teneur en silice pour les silexites et la nature amorphe de celle-ci font que les silexites sont à l'origine des réactions de type alcali-granulat. L'alcali-granulat est un ensemble de réactions chimiques pouvant se produire entre certaines formes de silices, de silicates ou de carbonates appartenant aux granulats et aux éléments alcalins (sodium, potassium) en solution dans la pâte. Ces éléments alcalins peuvent provenir du ciment utilisé, de l'eau de gâchage, des adjuvants, des additions minérales et des granulats composants le béton ; ils peuvent aussi provenir des eaux salines ou sels fondants.

Lorsque ces réactions se produisent, elles aboutissent à la formation de composés expansifs qui peuvent conduire à la fissuration importante du béton. L'alcali-granulat est un phénomène d'autant plus pernicieux que les désordres ne se manifestent généralement qu'après un temps assez long, entre 1 et 10 ans.

Toutefois, pour éviter l'apparition de l'alcali-granulat, il faudrait simultanément la présence d'un granulat potentiellement réactif, une concentration élevée en éléments alcalins dans la solution interstitielle et une ambiance de conservation du béton présentant une humidité élevée ($\text{HR} > 80 \%$).

Quant au sable de dune de Thiès qui a un équivalent de sable égale à 52, ce qui n'est pas du tout conforme aux spécifications des bétons de sable (ES doit être supérieur au moins à 70).

Nous pouvons affirmer qu'il n'est pas de bonne qualité (pas propre) à cause de la présence de matières organiques et végétales avec un pourcentage de fines de 3,04.

Enfin, le compactage des différents matériaux utilisés nous donne des teneurs en eau optimales ($W\%$ optimum) et des densités sèches maximales. Cependant, les pourcentages approximatifs d'eau initiale sont différentes des teneurs en eau optimales.

Cette différence est surtout due à une partie de l'eau qui est absorbée par le ciment pour son hydratation (40% environ, elle n'est jamais complète, tout dépend du degré d'hydratation) et une autre partie par les sables (fillérisés et de dune).

Par exemple, pour le calcaire de Bargny où on trouve une teneur en eau après passage à l'étuve de 3,97, on a eu donc $8 - 3,97 = 4,03$ % consommé par l'hydratation et l'absorption des granulats (3,56 %). Néanmoins, parfois les pertes d'eau ne sont pas très importantes : c'est le cas du calcaire de Bandia et du gré de Toglou. Ceci est dû en grande partie à une faible absorptivité des granulats (1,12 % pour le calcaire de Bandia et 1,43 % pour le gré de Toglou).

Chapitre 3 :

**METHODE DE
FORMULATION DES
BETONS DE SABLE**

Chapitre 3 : MÉTHODE DE FORMULATION DES BÉTONS DE SABLE

Formuler un béton, c'est trouver les proportions des différents constituants permettant de satisfaire un cahier de charges, répondant à des critères techniques et économiques à partir de matériaux donnés.

Les performances d'un béton dépendent des principes de la méthode (de formulation) de dosage utilisé.

Si cela se vérifie pour les bétons ordinaires, il l'est encore beaucoup plus pour les bétons de sable, de surcroît compactés, qui sont très sensibles à la structure (forme, texture, granulométrie) de l'ajout et à la nature. A cet effet, nous exposerons d'abord l'approche théorique de la formulation des bétons de sable proposée par l'Association SABLOCRETE avant de proposer la méthode de formulation expérimentale que nous avons utilisée en conformité avec la spécificité de nos sables (fillérisés et de dune).

3.1 MÉTHODE DE FORMULATION DES BÉTONS DE SABLE EXPOSÉE

PAR "SABLOCRETE" (Source : Caractéristiques et pratiques d'utilisation du béton de sable, 1994)

3.1.1 La compacité et les méthodes de formulation des bétons.

Les granulats du béton jouent le rôle d'ossature, dans laquelle la pâte assure d'abord un rôle rhéologique (cohésion et écoulement) puis un rôle de colle permettant de développer les propriétés mécaniques et de durabilité du matériau durci.

Le problème de la formulation d'un béton se pose en terme d'optimisation de la compacité du squelette granulaire, par un choix judicieux de la proportion de sable et de gravillons puis par un comblement de la porosité de cet empilement avec la pâte afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée.

En effet, au début du siècle, Caquot a pu établir, à partir des résultats expérimentaux une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$v = v_0 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,2} \quad (1)$$

avec v_0 : constante expérimentale.

3.1.2 Estimation du dosage en fines d'un béton de sable

Considérant l'étendue granulaire du sable, il est alors admis qu'il présente une porosité (ps) définie par la formule de Caquot, soit :

$$ps = 0,75 \left(\frac{0,08}{D} \right)^{0,2} \quad (2) \quad (\% \text{ volumique})$$

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, en désignant par [*fines*] le volume de l'ensemble des particules inférieures à $75 \cdot 10^{-6}$ m et [v] le volume de vides associé à l'empilement de ces fines.

Caquot a obtenu le résultat suivant :

$$[fines] = [v] \quad (3)$$

En combinant (2) et (3), le dosage volumique optimal en fines s'écrit :

$$[fines] = \frac{0,75}{2} \left(\frac{0,08}{D} \right)^{0,2} \quad (\% \text{ volumique}) \quad (4)$$

3.1.3 Porosité et dosage en eau d'un béton de sable

Le squelette granulaire, y compris les fines, étant optimisé, il présente toujours une certaine porosité. Dans des conditions de mise en oeuvre données, la compacité maximale, conduisant à une porosité minimale, ne sera atteinte que si la consistance le permet.

En admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v), la porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation suivante, issue une nouvelle fois de travaux sur la compacité de Caquot :

$$(e + v)_{\min} = 0,8 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,2} \quad (5)$$

avec $\left(\frac{d}{D} \right)$ l'étendue granulaire y compris les fines.

Le calcul de la porosité minimale requiert la valeur de d , borne inférieure de l'étendue granulaire.

Dans le cas d'un mélange totalement défloculé, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la dimension des grains du constituant le plus fin. Connaissant alors la surface spécifique f (surface de Blaine par exemple en cm^2/g) de ce constituant et sa densité φ (exprimé en g/cm^3), le diamètre moyen des grains, assimilés à des sphères, est donné par la formule suivante :

$$d = \frac{60}{f \cdot \varphi} \text{ en } mm \quad (6)$$

Pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégé. Dans le cas de nos bétons de sable, cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[vides] = k[eau] \left(\frac{l}{m^3} \right) \quad (7)$$

avec k compris entre 0,2 et 0,25.

3.1.4 Estimation du dosage en sable

Il s'agit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides.

Nous avons alors tout simplement :

$$[sable] = 1000 - [fines] - [eau] - [vides] \quad \left(\frac{l}{m^3} \right) \quad (8)$$

3.1.5 Estimation de la résistance en compression

La recherche d'une compacité maximale a permis de fixer les dosages des différents constituants : fines (particules $< 75.10^{-6}m$), eau et sable. Il faut maintenant se pencher, sur l'évaluation de la résistance en compression d'un tel mélange.

Cette estimation se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas des bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de Ferret a été récemment proposée :

$$R_b = \frac{K_F R_C}{\left(1 + \frac{3,1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)} \right)^2} \quad (9)$$

avec K_F : coefficient granulaire (ordre de grandeur 4,5 à 5)

R_C : classe vraie du ciment (MPa)

e : dosage en eau totale (l/m^3)

v : air piégé (l/m^3)

c : dosage en ciment (kg/m^3)

R_b : résistance en compression du béton à 28 jours (MPa)

et avec
$$K_1 = K_{CV} \frac{CV}{C} + K_{fs} \frac{FS}{C} \quad (10)$$

$$0,2 < K_{CV} < 0,4 \quad 2 < K_{fs} < 3,3 \quad \text{et} \quad K_1 \leq 0,5 \quad (11)$$

$$K_2 = K_{fil} \frac{FIL}{C} \quad 0 < K_{fil} < 0,4 \quad K_2 < 0,2$$

avec K_1 : coefficient pouzzolanique

K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire

K_{CV} , K_{FS} , K_{FIL} : coefficient d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3)

Cependant, nous n'avons pas utilisé la méthode de formulation exposée par "SABLOCRETE" parce que :

1 - Les hypothèses de base avancées dans cette approche théorique nous paraissent trop simplificatrices, par exemple la ps (porosité sèche) représente 75% du volume du mélange ou dans l'équation (4) la constante 0,38 n'a pas de caractère absolu mais relatif même si une précision de $\pm 10\%$ est tout à fait raisonnable.

De plus, certaines formules empiriques ont été établies avec des matériaux (cendres volantes, fumée de silice ...) différents de ceux du projet de fin d'études.

2 - L'estimation de la valeur de l'équation (5) est délicate compte tenu des effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules ou l'équation (6) qui n'est valable que dans le cas de mélanges totalement défloculés, c'est-à-dire que chaque particule élémentaire agit indépendamment des autres (ce qui peut être obtenu, dans la pratique, que par le recours à des agents défloculants).

Par conséquent, les conditions d'expérimentation sont relativement différentes du contexte de ce projet de fin d'études.

3 - La quantité de fines d'apport occupe 50% de la porosité sèche.

4 - Dans l'équation (9), les coefficients K_F , K_1 et K_2 doivent prendre en compte, la texture, la forme la porosité, le caractère pouzzolanique et la minéralogie des matériaux. Ainsi, ces paramètres seront relativement très difficiles à déterminer avec exactitude car l'équation (2) déterminant la porosité n'est pas précise (trop

simplificatrice) mais aussi les diamètres des grains dont nous disposons sont plus ou moins faibles pour avoir une idée précise sur la forme. Ainsi, toutes ces raisons nous amènent à proposer une autre étude de formulation expérimentale basée sur l'évolution de la compacité et de la résistance en traction et en compression à 28 jours en se basant bien entendu sur les résultats obtenus lors des essais de compactage préliminaires.

3.2 MÉTHODE DE FORMULATION PROPOSÉE

Le dosage en ciment étant toujours fixé à 200 kg/m³. La formulation des bétons de sable sera trouvée sans emploi d'adjudants ou de plastifiants. En terme économique, ces produits coûtent chers dans des pays comme le Sénégal qui ne sont que des consommateurs avec un pouvoir d'achat faible. De plus, sur le plan scientifique, un adjuvant n'est pas un produit universel qui permet d'améliorer toutes les propriétés du béton, ou de confectionner un très bon béton de sable à partir d'un mauvais.

Sur ce, l'étude de formulation est basée sur les résultats des essais de compactage (rapport $\frac{\text{sable de dune}}{\text{sable fillérisé}} = 2$; % d'eau). Une fois, le dosage en ciment (C=200 kg/m³)

et le sable de dune fixés, la quantité d'eau est obtenue à partir du pourcentage d'eau à l'optimum (compactage) et celle du "sable fillérisé" à partir du rapport ($\frac{\text{sable de dune}}{\text{sable fillérisé}} = 2$). Ainsi, compte tenu de la consistance ferme du béton de sable

routier compacté, pour une meilleure formulation, nous avons choisi de suivre l'évolution de la compacité et de la résistance en compression et en traction à 28 jours. Car, cette date nous permettra de mieux appréhender le phénomène de mûrissement du béton et de comparer les résultats obtenus aux performances attendues. Les résultats des essais sont consignés dans les tableaux 3.1 à 3.5 et les courbes montrent l'évolution des résistances en fonction de E/C sur les figures 3.1 à 3.5.

3.2.1 Calcaire de Bargny

Tableau 3.1 : Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours

Ciment (kg)	200	200	200	200	200	200
Sable de dune	1100	1200	1300	1400	1500	1450
"Sable fillérisé"	550	600	650	700	750	725
Eau (l)	148	160	172	184	196	190
R_c 28 j (MPa)	3,4	3,4	3,5	3,9	3,8	3,9
R_t 28 j (MPa)	1,37	1,53	1,69	1,72	1,73	1,73
Compacité du béton	0,899	0,919	0,903	0,931	0,954	0,952
E/C	0,74	0,8	0,86	0,92	0,96	0,95

La formule retenue pour son meilleur niveau de résistance est :

Ciment : 200 kg Sable de dune : 1450 kg "Sable fillérisé" (Calcaire de Bargny) : 725 kg Eau : 190 l
--

3.2.2 Calcaire de Bandia.

Tableau 3.2 : Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours

Ciment (kg)	200	200	200	200	200	200	200
Sable de dune	1200	1300	1400	1500	1600	1550	1525
"Sable fillérisé"	600	650	700	750	800	775	762,5
Eau (l)	160	172	184	196	208	202	199
R_c 28 j (MPa)	2,7	2,7	3,2	3,7	3,2	4,1	5,2
R_t 28 j (MPa)	1,30	1,52	1,63	1,81	1,84	1,80	1,81
Compacité du béton	0,892	0,918	0,916	0,918	0,939	0,960	0,957
E/C	0,8	0,86	0,92	0,96	1,04	1,01	0,99

La formule retenue pour son meilleur niveau de résistance est :

Ciment : 200 kg Sable de dune : 1525 kg "Sable fillérisé" (Calcaire de Bandia) : 762,5 kg Eau : 199 l
--

3.2.3 Gré de Toglou

Tableau 3.3 : Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours.

Ciment (kg)	200	200	200	200	200	200	200
Sable de dune	1100	1200	1300	1400	1450	1500	1600
"Sable fillérisé"	550	600	650	700	725	750	800
Eau (l)	185	200	215	230	237,5	245	260
R_c 28 j (MPa)	3,70	3,89	3,92	4,07	5,32	6,11	5,98
R_t 28 j (MPa)	1,13	1,21	1,19	1,58	1,76	1,78	1,79
Compacité du béton	0,881	0,884	0,995	0,927	0,930	0,931	0,944
E/C	0,92	1	1,07	1,15	1,19	1,22	1,3

La formule retenue pour son meilleur niveau de résistance est :

Ciment : 200 kg
Sable de dune : 1500 kg
"Sable fillérisé" (Gré de Toglou) : 750 kg
Eau : 245 l

3.2.4 Silexite de Taïba

Tableau 3.4 : Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours.

Ciment (kg)	200	200	200	200	200	200	200
Sable de dune	1100	1300	1500	1600	1725	1700	1750
"Sable fillérisé"	550	650	750	800	862,5	850	875
Eau (l)	185	215	245	200	278,75	275	282,5
R_c 28 j (MPa)	3,72	3,72	4,21	4,44	7,04	6,38	6,16
R_t 28 j (MPa)	1,43	1,46	1,62	1,71	2,0	2,1	2,05
Compacité du béton	0,901	0,907	0,923	0,962	0,971	0,968	0,971
E/C	0,92	1,07	1,22	1	1,39	1,37	1,41

La formule retenue pour son meilleur niveau de résistance est :

Ciment : 200 kg
Sable de dune : 1725 kg
"Sable fillérisé" (Silexite de Taïba) : 862,5 kg
Eau : 278,75 l

3.2.5 Basalte de Diack

Tableau 3.4 : Évolution de la résistance en compression et en traction à 28 jours.

Ciment (kg)	200	200	200	200	200	200	200
Sable de dune	1200	1400	1600	1700	1800	1750	1725
"Sable fillérisé"	600	700	800	850	900	875	862,5
Eau (l)	200	230	260	275	290	282,5	278,75
R_c 28 j (MPa)	3,97	5,17	5,52	5,43	6,71	6,84	6,53
R_t 28 j (MPa)	1,92	2,07	1,98	2,07	2,12	2,13	2,02
Compacité du béton	0,943	0,945	0,945	0,953	0,961	0,956	0,953
E/C	1	1,15	1,3	1,37	1,45	1,42	1,39

La formule retenue pour son meilleur niveau de résistance est :

<p style="text-align: center;">Ciment : 200 kg Sable de dune : 1750 kg "Sable fillérisé" (Basalte de Diack) : 875 kg Eau : 282,5 l</p>

Calcaire de Bargny

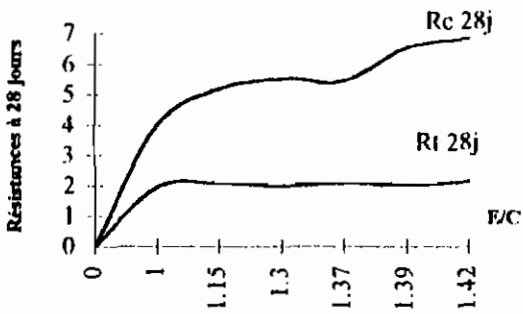


fig 3.1: Evolution des résistances en fonction de E/C

Calcaire de Bandia

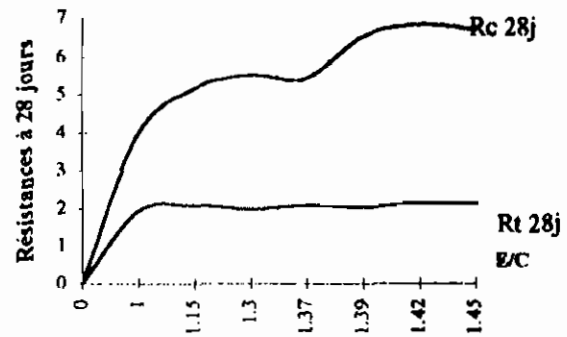


fig 3.2: Evolution des résistances en fonction de E/C

Gré de Toglou

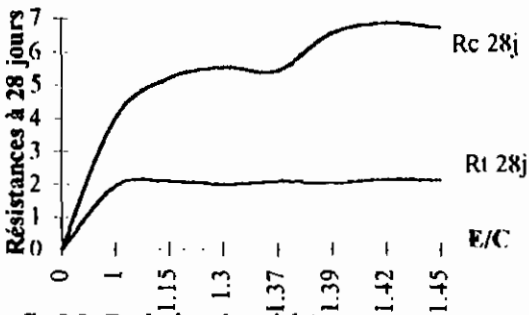


fig 3.3: Evolution des résistances en fonction de E/C

Silexite de Taïba

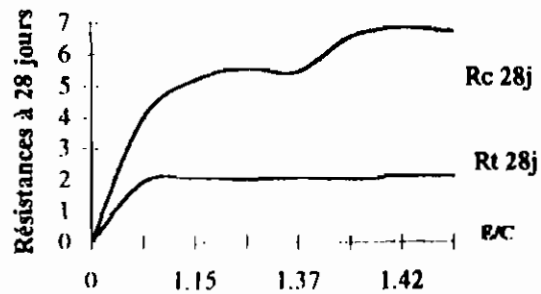


fig 3.4: Evolution des résistances en fonction de E/C

Basalte de Diack

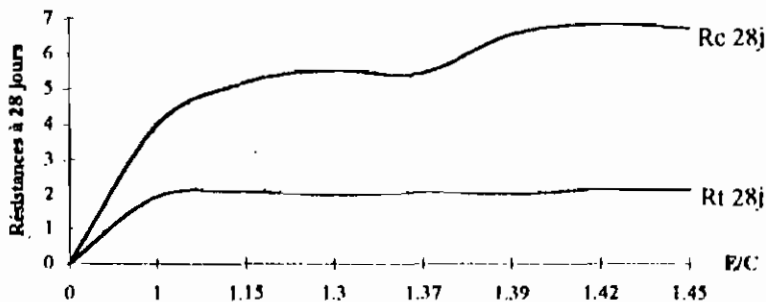


fig 3.5: Evolution des résistances en fonction de E/C

3.2.6 Conclusions

Les différentes formulations retenues des bétons de sable nous donnent des pourcentages de compacité relativement acceptables allant de 93,1% à 97,1%.

Néanmoins, les rapports $\frac{E}{C}$ sont élevés ($\frac{E}{C} > 0,7$), ceci s'explique par le dosage en ciment faible (qu'on s'est fixé à priori) qui augmente ce rapport mais cela n'empêche pas d'avoir des résistances en traction convenables (surtout pour le basalte et le silexite) et surtout de bonnes résistances en compression avoisinant parfois 7 MPa.

De plus, le pourcentage de fines global égal à 6,304% (obtenu par l'analyse granulométrique), le rapport $\frac{\text{ciment}}{\text{sable}}$ variant de 0,11 à 0,14 et celui du $\frac{\text{ciment}}{\text{fines}}$ variant de 0,22 à 0,26 nous permettra, entre autres, de compenser le rapport E/C (un peu élevé) qui nécessitera aussi une cure suffisante à l'eau pour empêcher ou compenser toute perte d'humidité.

Toutefois, dans cette formulation, il convient de remarquer que les résistances en traction et en compression ne sont pas toujours homogènes. C'est le cas par exemple du béton de sable à ajout de basalte (0/3) qui a une résistance en traction supérieure à celle du silexite mais une résistance en compression inférieure à ce dernier.

Chapitre 4 :

**CARACTERISATION DES
BETONS DE SABLE
COMPACTES**

Chapitre 4 : CARACTÉRISATION DES BÉTONS DE SABLE COMPACTÉS

Il s'agit à partir d'essais de laboratoire de déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des bétons de sable compactés.

4.1 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

La mesure des résistances mécaniques des bétons de sable compactés (étudiés) a été effectuée sur des éprouvettes cylindriques d'élanement 2 (11 cm de diamètre d et 22 cm de hauteur h) (voir éprouvettes en annexes).

Les différentes éprouvettes exposées à l'air ou immergées dans l'eau ont été rompues à 7, 14 et 28 jours d'âge.

4.1.1 Détermination de la résistance à la traction des bétons de sable par écrasement latéral (essai brésilien).

La détermination de cette valeur est un indice très intéressant du comportement mécanique du béton de sable. Toutefois, il est assez difficile d'effectuer un essai de traction directe sur le béton. On utilise plutôt un procédé indirect : il s'agit de l'essai d'écrasement latéral, plus communément appelé essai brésilien.

Nous avons effectué cet essai pour avoir les résistances en traction par fendage des bétons de sable à 7, 14 et 28 jours afin d'en avoir leur comportement en fonction de l'âge.

Ainsi, pour réaliser cet essai, nous avons :

- préparé les éprouvettes cylindriques d'élanement 2 que nous avons exposées à l'air ou immergées dans l'eau pendant 7, 14 ou 28 jours.
- procédé à l'écrasement des éprouvettes à l'aide d'une presse à vitesse de chargement constante.

La résistance à la traction du béton est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$T = \frac{2P}{\pi ld}$$

où T = résistance à la traction du béton (MPa)

P = charge maximale à la rupture (N)

l = largeur de l'éprouvette cylindrique (mm) = h

d = diamètre moyen de l'éprouvette (mm)

Notons que ces éprouvettes ont été préparées avec les mêmes dosages préétablis à l'essai de compactage tout en maintenant un pourcentage approximatif d'eau ajoutée obtenu à l'optimum.

Les résultats des essais sont consignés dans les tableaux 4.1 et 4.2 Les courbes qui en découlent sont représentés sur les figures 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1: Valeurs des résistances en traction par fendage R_{tf} en

fonction de l'âge (mûrissement à l'air)

Ajouts Résistances	Calcaire de Bandia (0/3)	Calcaire de Bargny (0/3)	Basalte de Diack (0/3)	Silexite de Taïba (0/3)	Gré de Toglou (0/3)
$R_{tf} 7j$ (MPa)	1,81	1,80	1,82	1,82	1,11
$R_{tf} 14j$ (MPa)	1,82	1,79	1,82	1,85	1,13
$R_{tf} 28j$ (MPa)	2,01	1,79	2,22	2,06	1,78
$R_{tf} 28j / R_{tf} 7j$	1,11	1	1,22	1,13	1,6

Tableau 4.2 : Valeurs de résistances en traction par fendage R_{tf} en fonction

de l'âge (mûrissement à l'eau)

Ajouts Résistances	Calcaire de Bandia (0/3)	Calcaire de Bargny (0/3)	Basalte de Diack (0/3)	Silexite de Taïba (0/3)	Gré de Toglou (0/3)
$R_{tf} 7j$ (MPa)	1,01	1,48	2,03	2,15	1,43
$R_{tf} 14j$ (MPa)	1,75	1,43	2,04	1,89	1,24
$R_{tf} 28j$ (MPa)	2,13	2,11	2,30	2,63	1,91
$R_{tf} 28j / R_{tf} 7j$	2,11	1,43	1,13	1,22	1,34

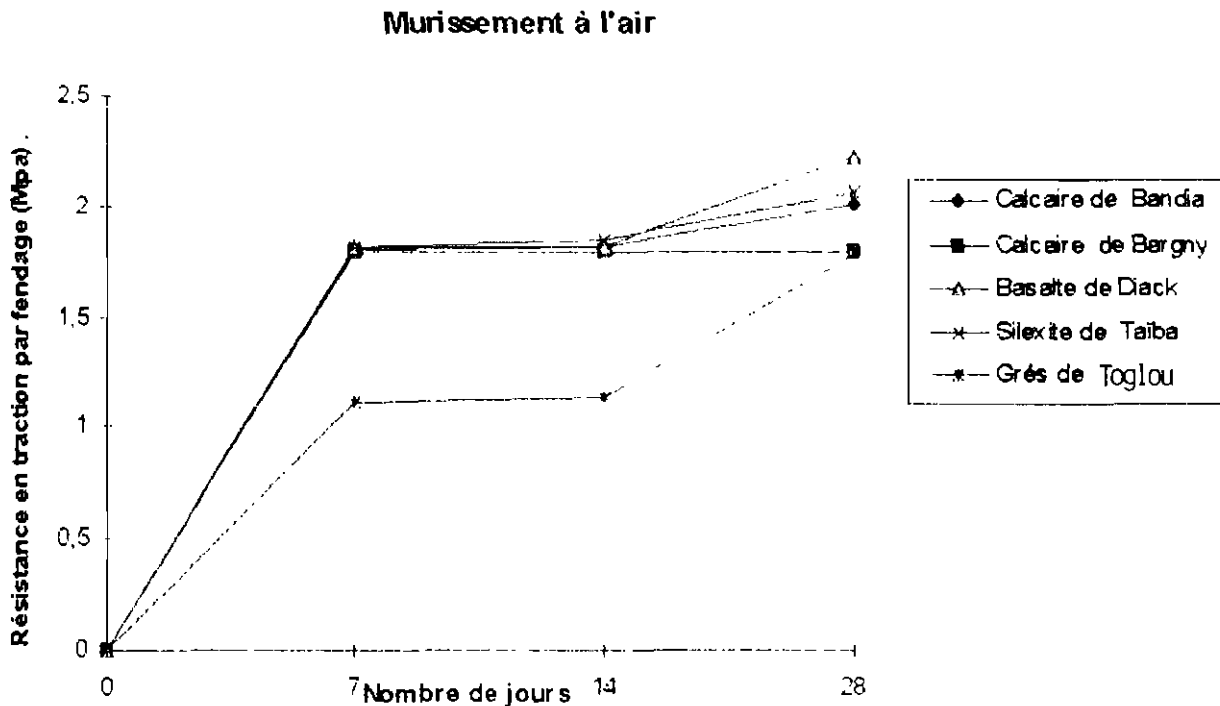


Fig 4.1 - Evolution de la résistance en fonction de l'âge.

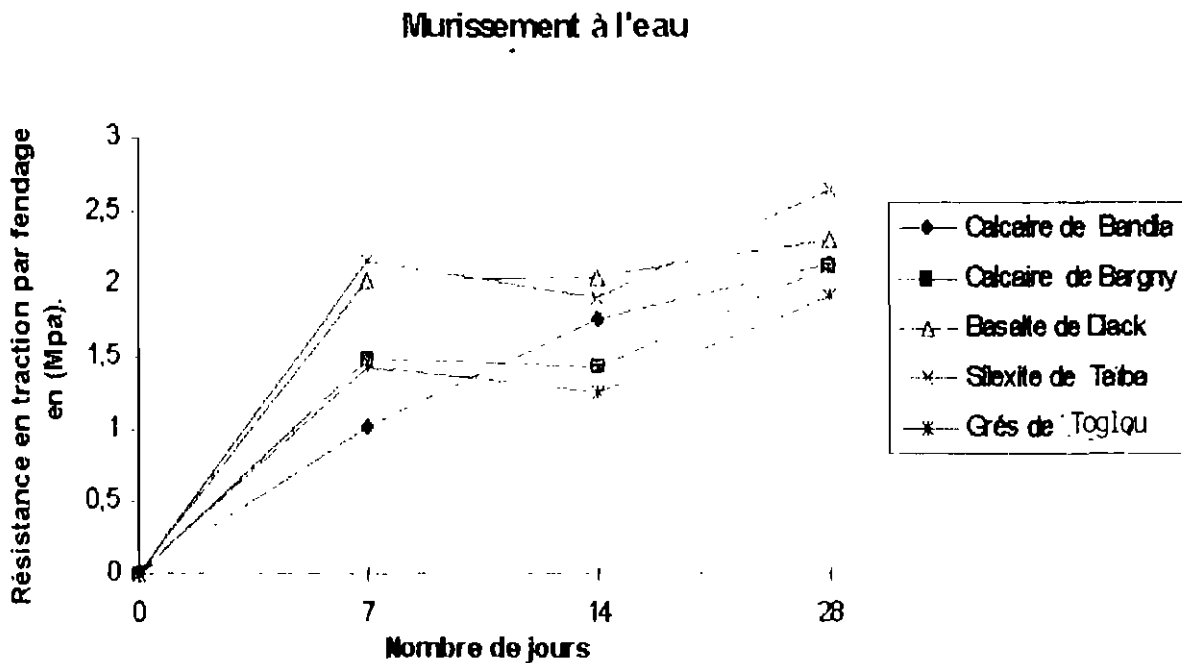


Fig 4.2 - Evolution de la résistance en fonction de l'âge.

De plus, nous avons pesé les éprouvettes des bétons de sable compactés à 7, 14 et 28 jours.

Les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux 4.3 et 4.4 :

Tableau 4.3: Valeurs des masses en fonction de l'âge (mûrissement à l'air)

Ajouts \ Masses	Calcaire de Bandia (0/3)	Calcaire de Bargny (0/3)	Basalte de Diack (0/3)	Silexite de Taïba (0/3)	Gré de Toglou (0/3)
m _{0j} (g)	4206,94	4273,36	4554,16	4245,99	4315,75
m _{7j} (g)	4097	4156	4392	4101	4170
m _{14j} (g)	4067,96	4120,96	4372,68	4072,16	4145,69
m _{28j} (g)	4066,67	4120,25	4353,23	4069,56	4128,32
m _{28j} / m _{7j}	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Tableau 4.4: Valeurs des masses en fonction de l'âge (mûrissement à l'eau)

Ajouts \ Masses	Calcaire de Bandia (0/3)	Calcaire de Bargny (0/3)	Basalte de Diack (0/3)	Silexite de Taïba (0/3)	Gré de Toglou (0/3)
m _{1j} (g)	4043	4242	4415	4224	4192
m _{7j} (g)	4272	4341	4461	4272	4250
m _{14j} (g)	4283	4423	4475	4283	4258
m _{28j} (g)	4301	4493	4573	4312	4279
m _{28j} / m _{7j}	1,01	1,04	1,03	1,01	1,01

4.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

Les paramètres suivants ont été mesurés :

- la consistance
 - le pourcentage d'air occlus.
 - la masse volumique réelle (voir tableau 2.5)
- La consistance du béton joue un rôle important lors des opérations de mise en oeuvre ; le choix de la consistance du mélange est fonction des conditions de mise en place et de l'équipement disponible. Il est donc essentiel de contrôler cette propriété du béton de sable. L'essai d'affaissement constitue la méthode la plus couramment employée pour évaluer la consistance du béton de sable. Pour cet essai, nous avons utilisé un moule tronconique et un bourroir pour le compactage.

- Le pourcentage d'air occlus est obtenu de la manière suivante :

$$\% \text{ d'air occlus} = \frac{V_0 - V_1}{V_1}$$

V_0 : volume d'une éprouvette.

V_1 : volume de matières solides

- La masse volumique réelle qui est la masse d'un volume unitaire de mélange de béton de sable est déjà consignée au tableau 2.4.

Ainsi, les résultats de ces différents paramètres sont les suivants :

Tableau 4.5 : Caractéristiques physiques des bétons de sable

	Calcaire de Bandia (0/3)	Calcaire de Bargny (0/3)	Basalte de Diack (0/3)	Silexite de Taïba (0/3)	Gré de Toglou (0/3)
Affaissement	1,7	1,4	2,1	2,1	1,2
% d'air occlus	3,9	3,8	5,4	4,8	4,4
Masse volumique (kg/m³)	2167	2164	2294	2216	2193
E/C	0,59	0,63	0,67	0,69	0,63

4.3 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.3.1 Caractéristiques mécaniques

Les éprouvettes (exposées à l'air) du calcaire de Bandia, du basalte de Diack et du silexite de Taïba présentent des résistances en traction par fendage à 28 jours relativement bonnes qui dépassent 2MPa. (Caractéristiques et pratiques d'utilisation des bétons de sable, 1994).

Par contre, le calcaire de Bargny et le gré de Toglou ont des résistances relativement faibles qui n'atteignent pas 2 MPa.

De plus, pour un échantillonnage représentatif d'éprouvettes, le coefficient de variation est égal à 28% (Rapport d'essais sur le silexite et le basalte, CEREEQ, 1994). D'où un intervalle compris entre 1,72 et 2,28 MPa ($2 \pm 28\%$) à l'intérieur duquel se trouve les R_{tf} 28j (à sec) des différents bétons de sable compris en 1,78 et 2,22.

Ce faisant, d'après les résultats expérimentaux, nous pouvons affirmer que les résistances des bétons de sable placées à l'air se classent par ordre décroissant comme suit : le basalte de Diack, le silexite de Taïba, le calcaire de Bandia, le calcaire de Bargny et le gré de Toglou.

Bien qu'intrinsèquement, le silexite soit plus dur que le basalte car plus un matériau est dur, plus son coefficient Los Angeles est faible (Los Angeles de basalte : 13,9 ; Los Angeles de silexite : 9 ; Djiba Y, 1993), la résistance des bétons de basalte (0/3) est supérieure à celle des bétons de silexite (0/3).

Ceci s'expliquerait par la tendance au décollement des fillers de silexite plus prononcé chez les éprouvettes de bétons de silexite. En effet, à la rupture des éprouvettes de béton par traction, le pourcentage de fillers de basalte cassés est supérieur à celui des fillers de silexite à cause de l'adhérence mortier-fillers moins bonne chez ces dernier. Sur ce, c'est l'état de surface des fillers qui en donne l'explication : le silexite a une surface lisse enveloppée de fines argileuses et phosphatées qui jouent le rôle de masque à l'interface mortier-fillers.

Par ailleurs, les éprouvettes (immergées dans l'eau) du calcaire de Bandia, du calcaire de Bargny, du basalte de Diack, du silexite de Taïba et du gré de Toglou ont des résistances en traction par fendage à 28 jours relativement bonnes dépassant 2MPa à l'exception du gré de Toglou (1,91 MPa).

Nous pouvons dire avec un même coefficient de variation (28%) que les résistances des bétons de sables immergées dans l'eau se classent, par ordre décroissant, comme suit : le silexite de Taïba, le basalte de Diack, le calcaire de Bandia, le calcaire de Bargny et le gré de Toglou.

Ce qui s'expliquerait par le fait, qu'immergés dans l'eau, l'effet cumulé des différents caractéristiques : texture, pouzzolanité, Los Angeles (LA) et la forte réaction d'hydratation se produisant dans ce cas ont une importante influence sur la résistance (Diémé, 1991).

Notons que dans une grande mesure, la résistance, la durabilité et la densité du béton dépendent du niveau d'hydratation.

En ce qui concerne les trois autres matériaux, qu'ils soient placés à l'air ou immergés dans l'eau, se classent toujours de la même manière, à savoir qu'on a respectivement le calcaire de Bandia, le calcaire de Bargny et le gré de Toglou.

Par ailleurs, le poids des éprouvettes exposées à l'air diminue en fonction de l'âge tandis que celui des éprouvettes placées à l'eau augmente en fonction de l'âge. Ceci s'expliquerait par le fait que les éprouvettes absorbent de l'eau lorsqu'elles sont immergées et perdent beaucoup d'eau après compactage, lorsqu'elles sont exposées à l'air. De plus, les bétons de sable sont susceptibles de par leur nature, d'avoir des porosités plus élevées que celles des bétons avec gravillons ; il en découle d'après la proportion de vides dans le béton et la perméabilité à l'eau que les bétons de sable absorbent beaucoup d'eau.

Outre les performances mécaniques, d'autres paramètres doivent être mieux étudiés et spécifiés avant l'utilisation définitive de ces bétons de sable comme matériau routier.

En effet, les "sables fillérisés" doivent satisfaire à certaines exigences notamment être composés de particules propres (ce qui n'est pas le cas dans notre analyse granulométrique) et inaltérables. De plus, ils doivent présenter une grande stabilité chimique vis à vis des alcalins afin de ne pas réagir de façon dangereuse avec les ciments.

Beaucoup de roches siliceuses sont alcalis réactives lorsqu'elles sont utilisées comme granulats dans les bétons. Les réactions alcalis-"granulats" dans les bétons de sable se traduisent par un fort gonflement de la masse du béton et une fissuration abondante et multidirectionnelle. Ces désordres peuvent à terme conduire à la destruction complète de la structure en béton.

Parmi ces réactions alcalis-"granulats", la réaction alcalis-silice est la plus fréquente. Les alcalins (Na et K) libérés pendant l'hydratation du ciment entrent dans la phase aqueuse interstitielle du béton qui devient alors capable d'attaquer certaines formes de silice des granulats siliceux (Diamond, 1975).

Les réactions alcalis-silice peuvent être caractérisées par un essai de réactivité potentielle aux alcalins du ciment effectué suivant la norme américaine ASTM C289-71. Cet essai permet de classer les granulats selon leur réactivité avec les alcalins.

Le silexite de Taïba a déjà fait l'objet d'études antérieures (Arnould, 1984 ; Diémé, 1991). En vue d'une étude comparative l'essai de réactivité potentielle avec les alcalins du ciment a été effectué au cours de cette étude sur les granulats de calcaire et de grès. Les résultats de l'essai sont consignés au tableau 4.5. Ces résultats montrent que le silexite peut être alcalis-réactif, tandis que le calcaire et le gré sont non alcalis-réactifs (Djiba, 1993).

Tableau 4.6 : Résultats de l'essai de réactivité potentielle des granulats avec les alcalins

Granulats	Silexite	Calcaire	Gré
Paramètres			
Réduction d'alcalinité (m. mole/l)	255	170	165
Silice dissoute (m. mole/l)	360	120	80

Par conséquent, la possibilité pour les silexites d'entrer en réaction avec les alcalins du ciment en font des granulats de qualité moindre par rapport à ceux de basalte. D'où la nécessité de mieux étudier le silexite pour son utilisation future même s'il dispose de bonnes performances mécaniques.

4.3.2 Caractéristiques physiques

Les affaissements qui varient de 1,2 à 2,1 sont acceptables car étant conformes aux valeurs exigées pour des bétons de sable routiers (entre 1 et 5 cm).

Néanmoins, il faut dire que ce paramètre n'est pas très indicatif dans le cas présent car nous avons affaire à des bétons de sable routiers compactés qui n'ont pas encore de plage spécifique pour les affaissements.

Les pourcentages d'air occlus trouvés théoriquement sont acceptables comparativement à la valeur préconisée par SABLOCRETE qui est de 6% au maximum. Les masses volumiques obtenues sont inférieures à celles des bétons classiques (2400 kg/m^3), ce qui veut dire que les bétons de sable sont relativement plus légers et plus maniables que les bétons ordinaires.

Les rapports E/C sont à l'intérieur des limites préconisées par SABLOCRETE pour les bétons de sable utilisant des sables de dune fins et sans adjuvant ($0,6 < E/C < 0,7$).

Chapitre 5 :

**DIMENSIONNEMENT DE
CHAUSSEE EN BETON DE
SABLE**

Chapitre 5 : DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSÉE EN BÉTON DE SABLE

Le dimensionnement des structures de chaussées en béton de sable sera réalisé avec le programme Alizé III qui n'est qu'une modélisation de la structure.

En effet, ce dimensionnement sera fait aussi bien pour les faibles trafics (T_4 , T_5 , T_6) que pour les forts trafics (T_3).

La classe de trafic étant désignée à partir du trafic moyen journalier annuel "MJA", estimé à la mise en service et exprimé en poids lourds de charge utile supérieure ou égale à cinq tonnes.

Les classes définies sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5.1 : Les différentes classes de trafic (CIM béton, 1995)

Classes	t_6	t_5	t_4	t_{3-}	t_{3+}	t_2	t_1	t_0
Nbre de PL/J	0	10	25	50	100	150	300	750
	à	à	à	à	à	à	à	à
	10PL/j	25 PL/j	50 PL/j	100 PL/j	150 PL/j	300 PL/j	750 PL/j	2000 PL/j

5.1 CAS DE FAIBLES TRAFICS (T_4 , T_5 , T_6)

Les données pour ce dimensionnement sont les suivantes :

- chaussée à deux voies, de largeur 6 m (m = 1,50)
- trafic de classe (T_4 par exemple) : MJA = 35 PL/j
- taux de croissance géométrique : $\tau = 4\%$ par an
- durée de service $p = 25$ ans
- plate-forme support de classe PF2 : $E = 50$ MPa et $\nu = 0,35$

(Source : Sablocrete, 1994)

- type de structure retenue : chaussée en béton de sable (BS) compacté
sur fondation en sable ciment (SC)
- caractéristiques mécaniques des matériaux :
 - BS : classe de matériau 3 car notre béton de sable est dosé à 200 kg/m³ de ciment
 - SC : classe de matériau 4 car nous supposons que le sable ciment compacté de la fondation sera dosé entre 250 et 300 kg/m³.
- caractéristiques du trafic :
 - essieux sur roues jumelées ; charge = 13 tonnes
 - rayon empreinte = 12,5 cm ; pression de contact = 6,62 bars
- fondation en sable ciment (SC) : E = 22000 MPa ; $\nu = 0,25$
(Sablocrete, 1994)
- l'interface BS/SC (1/2) et l'interface SC/support (2/3) sont prises collées, le jumelage est type.

5.1.1 Calcaire de Bargny et Bandia

Les caractéristiques obtenues par la presse et l'extensomètre pour la couche de béton de sable à ajout de calcaire (Bargny et Bandia) sont : E = 24000 MPa ; $\nu = 0,25$ (cf fig. 5.1).

Une analyse à l'aide d'un modèle mathématique de calcul (Programme Alizé III) a permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5. 2 : Résultats du modèle Alizé III

Interface	Z (cm)	σ_{tbs} (MPa)	σ_{tsc} (MPa)	ϵ_z (μm)
0	0	-	-	-
1	2	1,14	0,43	151
1	26	1,14	0,43	151
2	26	1,14	0,60	175
2	45	1,14	0,60	175

On vérifie que pour les différents couples de valeurs BS/SC, la déformation verticale maximale dans le support reste inférieure à la valeur admissible :

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,020 NE^{-0,222} \text{ avec } NE = MJA.365 \frac{(1 + \tau)^P - 1}{\tau} .CAM.m \quad (\text{Source :}$$

SABLOCRETE, 1994)

$$NE = 35 \times 365. \frac{(1 + 0,04)^{25} - 1}{0,04} \times 0,5 \times 1,5 \text{ car le coefficient d'agressivité moyen}$$

est fixé à CAM = 0,5

NE = 0,4 10⁶ essieux équivalents

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,02 \times (0,4.10^6)^{-0,222} = 1141 \mu m$$

Ainsi le couple de valeurs BS/SC du tableau 5.2 vérifie le dimensionnement vis à vis de l'endommagement par fatigue des différents matériaux (cause de fissuration) et du sol support.

5.1.2 Silexite de Taïba

Les caractéristiques obtenues par la presse et l'extensomètre pour la couche de béton de sable à ajout de silexite (Taïba) sont E =24000 MPa ; v = 0,25 (cf fig 5.1).

La modélisation réalisée avec le programme Alizé III a permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5. 3 : Résultats du modèle Alizé III

Interface	Z (cm)	σ_{tbs} (MPa)	σ_{tsc} (MPa)	ε_z (μm)
0	0	-	-	-
1	2	1,14	0,43	151
1	26	1,14	0,43	151
2	26	1,14	0,60	175
2	45	1,14	0,60	175

$\varepsilon_{z,adm} = 1141 \mu m$; la vérification est faite vis à vis de l'endommagement par fatigue de différents matériaux et du sol support.

5.1.3 Basalte de Diack

Les caractéristiques obtenues par la presse et l'extensomètre pour la couche de béton de sable à ajout de Basalte (Diack) sont $E = 25\ 000$ MPa ; $\nu = 0,25$ (cf fig. 5.1).

La modélisation réalisée avec le programme Alizé III a permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5. 4 : résultats du modèle Alizé III

Interface	Z (cm)	σ_{tbs} (MPa)	σ_{tsc} (MPa)	ϵ_z (μm)
0	0	-	-	-
1	2	1,14	0,40	147
1	27	1,14	0,40	147
2	27	1,14	0,64	181
2	45	1,14	0,64	181

$\epsilon_{z,adm} = 1141 \mu m$; ainsi, la vérification est faite vis à vis de l'endommagement par fatigue de différents matériaux et du sol support.

5.1.4 Gré de Toglou

Les caractéristiques obtenues par la presse et l'extensomètre pour la couche de béton de sable à ajout de gré (Toglou) sont $E = 23\ 000$ MPa ; $\nu = 0,25$ (cf fig 5.1)

La modélisation réalisée avec le programme Alizé III a permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5. 5 : résultats du modèle Alizé III

Interface	Z (cm)	σ_{tbs} (MPa)	σ_{tsc} (MPa)	ϵ_z (μm)
0	0	-	-	-
1	2	1,14	0,48	157
1	25	1,14	0,48	157
2	25	1,14	0,58	172
2	45	1,14	0,58	172

$\epsilon_{z,adm} = 1141 \mu m$; ainsi, la vérification est faite vis à vis de l'endommagement par fatigue de différents matériaux et du sol support.

5.2 CAS DES FORTS TRAFICS

Les données pour ce dimensionnement de calcul de chaussée sont les suivantes :

- chaussée à 2 x 2 voies, dimensionnement à effectuer pour la voie lente
($m = 0,90$) ; (SABLOCRETE, 1994)
- trafic de classe T₁ : MJA = 475 poids lourds
- taux de croissance géométrique : $\tau = 7\%$ par an
- durée de service $p = 20$ ans
- plate-forme support de classe PF2 : $E = 50$ MPa et $\nu = 0,35$
(SABLOCRETE, 1994)
- type de structure retenue : béton de sable (BS) compacté sur fondation
en béton maigre (Bm)
- caractéristiques du trafic ;
essieux sur roues jumelées ; charge = 13 tonnes
rayon empreinte = 12,5 cm ; pression de contact = 6,62 bars
- fondation en béton maigre : $E = 25\ 000$ MPa $\nu = 0,18$
(SABLOCRETE, 1994)
- l'interface BS/Bm (1/2) et l'interface Bm/support (2/3) sont prises collées, le jumelage est type.

Calcul du nombre d'essieux équivalents NE

Le coefficient d'agressivité moyen est fixé à $CAM = 1$ par le LCPC-SETRA

$$NE = MJA \cdot 365 \cdot \frac{(1 + 0,07)^{20}}{0,07} \times 1 \times 0,90 = 8,32 \cdot 10^6 \text{ essieux équivalents}$$

5.2.1 Calcaire de Bargny de Bandia

Les caractéristiques obtenues par la presse et l'extensomètre pour la couche de béton de sable à ajout de calcaire (Bargny et Bandia) sont $E = 25\ 000$ MPa ; $\nu = 0,25$ (cf fig 5.1).

La modélisation réalisée avec le programme Alizé III a permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5.6 : Résultats du modèle Alizé III

Interface	Z (cm)	$\bar{\sigma}_{tbs}$ (MPa)	ϵ_z (μm)
0	0	-	-
1	2	0,593	139
1	30	0,593	139
2	30	0,769	161
2	48	0,769	161

On vérifie que la déformation verticale maximale $\epsilon_z = 161 \mu m$ reste inférieure à la valeur admissible $\epsilon_{z,adm} = 0,012 \text{ NE } -0,222 = 349 \mu m$.

5.2.2 Silexite de Taïba

Les caractéristiques obtenues par la presse et l'extensomètre pour la couche de béton de sable à ajout de silexite (Taïba) sont $E = 26\ 000 \text{ MPa}$; $\nu = 0,25$ (cf fig. 5.1).

La modélisation réalisée avec le programme Alizé III a permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5.7: Résultats du modèle Alizé III

Interface	Z (cm)	$\bar{\sigma}_{tbs}$ (MPa)	ϵ_z (μm)
0	0	-	-
1	2	0,589	137
1	28	0,589	137
2	28	0,769	161
2	46	0,769	161

On vérifie que la déformation verticale maximale dans le support $\epsilon_z = 161 \mu m$ reste inférieure à la valeur admissible $\epsilon_{z,adm} = 0,012 \text{ NE } -0,222 = 349 \mu m$.

5.2.3 Basalte de Diack

Les caractéristiques obtenues par la presse et l'extensomètre pour la couche de béton de sable à ajout de Basalte de Diack sont $E = 26\ 000 \text{ MPa}$; $\nu = 0,25$ (cf fig. 5.1).

La modélisation réalisée avec le programme Alizé III a permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5.8 : Résultats du modèle Alizé III

Interface	Z (cm)	σ_{tbs} (MPa)	ϵ_z (μm)
0	0	-	-
1	2	0,589	137
1	28	0,589	137
2	28	0,769	161
2	46	0,769	161

On vérifie que la déformation verticale maximale dans le support $\epsilon_z = 161 \mu m$ reste inférieure à la valeur admissible $\epsilon_{z,adm} = 0,012 \text{ NE}^{-0,222} = 349 \mu m$.

5.2.4 Gré de Toglou

Les caractéristiques obtenues par la presse et l'extensomètre pour la couche de béton de sable à ajout de Gré (Toglou) sont $E = 25\ 000 \text{ MPa}$; $\nu = 0,25$ (cf fig. 5.1).

La modélisation réalisée avec le programme Alizé III a permis d'obtenir les résultats résumés dans le tableau ci-dessous :

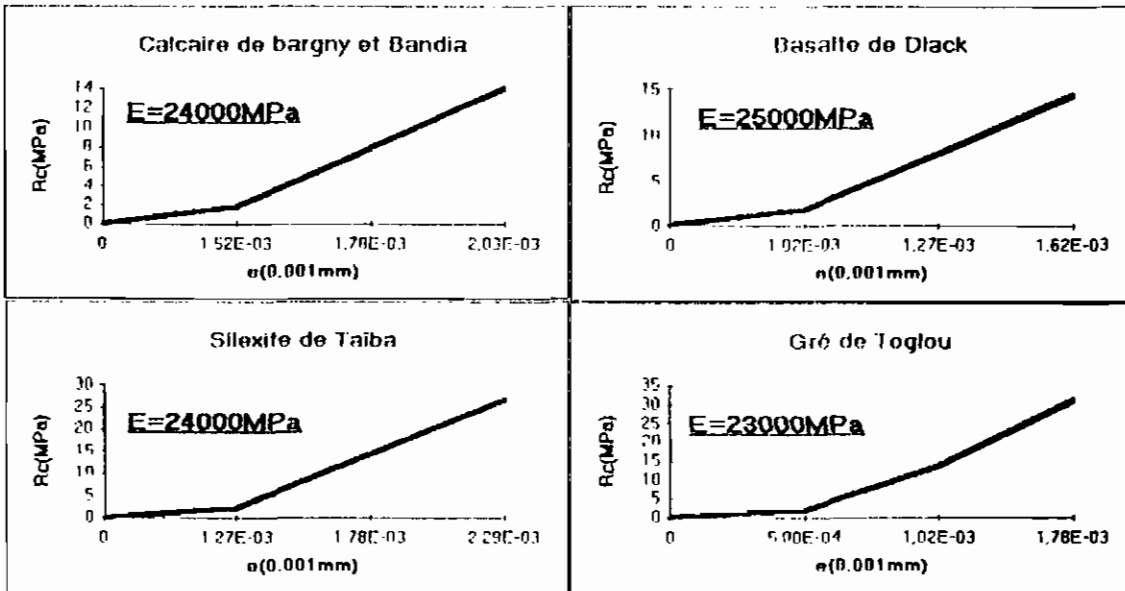
Tableau 5.9 : Résultats du modèle Alizé III

Interface	Z (cm)	σ_{tbs} (MPa)	ϵ_z (μm)
0	0	-	-
1	2	0,593	139
1	30	0,593	139
2	30	0,769	161
2	48	0,769	161

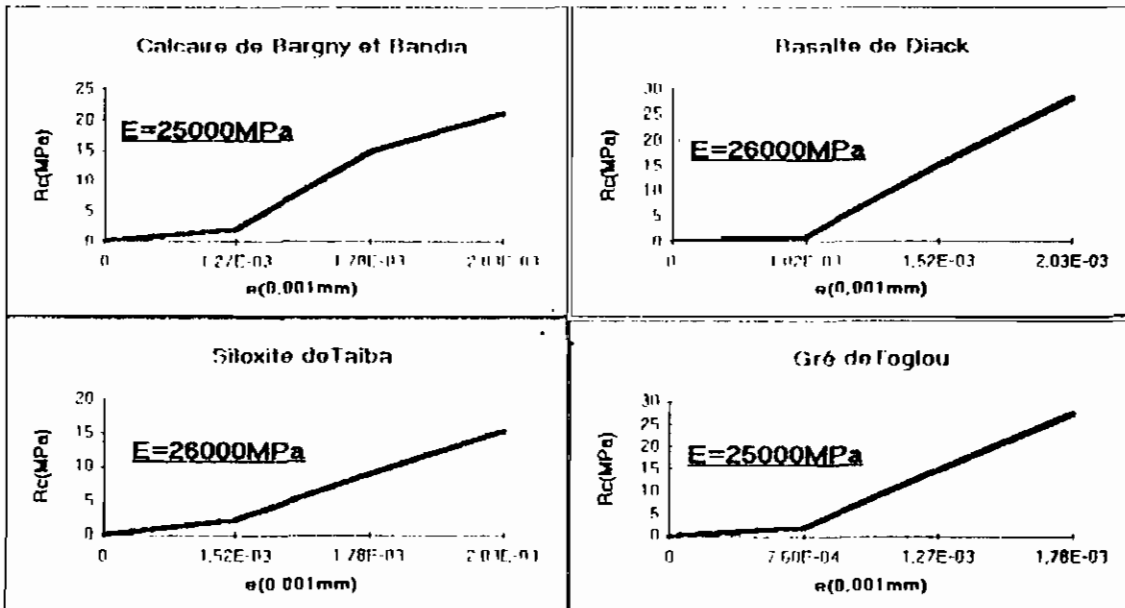
On vérifie que la déformation verticale maximale dans le support $\epsilon_z = 161 \mu m$ reste inférieure à la valeur admissible $\epsilon_{z,adm} = 0,012 \text{ NE}^{-0,222} = 349 \mu m$.

Fig. 5.1 Détermination du module d'élasticité (MPa)

Faibles trafics



Forts trafics



DETERMINATION DU COEFFICIENT DE POISSON (ν)

$$\epsilon_z = \frac{\epsilon_x}{\nu} = \frac{\epsilon_y}{\nu}$$

Basalte de Diack (faibles trafics)

$$\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} = \frac{0,36 \cdot 10^{-3}}{1,52 \cdot 10^{-3}} \approx 0,25$$

Calcaire de Bandia et Bargny (forts trafics)

$$\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} = \frac{0,51 \cdot 10^{-3}}{2,03 \cdot 10^{-3}} \approx 0,25$$

5.3 CONCLUSIONS

Les épaisseurs de béton de sable déterminées (variant entre 23 et 28 cm) viennent corroborer les spécifications de Sablocrete indiquant des épaisseurs maximales de 30 cm pour ne pas être confronté à des problèmes éventuels de mise en oeuvre.

Un ensemble des couples de valeurs BS/SC (faibles trafics) et BS/Bm (forts trafics) définit autant de solutions de dimensionnement techniquement possibles, vis à vis de l'endommagement par fatigue des différents matériaux de support. Mais le choix de notre structure repose sur des sujétions liés au contexte du projet (non dépassement d'une valeur maximale d'épaisseur de structure de 30 cm) et sur des comparaisons économiques.

Cependant, pour la réalisation des structures (mise en place des couches de béton de sable), on s'attèlera à avoir un excellent nivellement de la plate-forme, de la fondation en sable ciment (faibles trafics) et de celle en béton maigre (forts trafics).

L'étude de dimensionnement montre que le mode de rupture déterminant est la fatigue par flexion à la base de la couche BS.

Par conséquent, la vérification est faite uniquement vis à vis de l'endommagement par fatigue des différents matériaux (fissuration) et de la déformation verticale maximale. Le poinçonnement de la plate-forme support pouvant être négligé dans le cas des bétons de sable.

5.4 ORGANISATION DU CHANTIER DE BÉTON DE SABLE COMPACTÉ

Cette partie traite des problèmes relatifs aux chantiers :

- l'approvisionnement des constituants
- la fabrication des matériaux "béton compacté"
- la mise en oeuvre, le répandage, le compactage et le rabotage
- la protection de la couche d'assise en béton compacté.

5.4.1 Approvisionnement - aire de stockage

Dans la mesure du possible, on s'efforce d'approvisionner les "sables fillérisés" avant le démarrage du chantier pour maîtriser au mieux la teneur en eau initiale.

5.4.2 Fabrication

La fabrication des bétons compactés est exclusivement effectuée en centrales, habituellement des centrales à béton. La centrale de recomposition doit être conforme à la directive pour la réalisation des chaussées en béton de ciment. Le dosage du ciment et des "sables fillérisés" humides (en trémies) doit être particulièrement bien contrôlé.

5.4.3 Transport

Pour éviter le plus possible la floculation, le chargement des moyens de transport est effectué à partir de trémies tampon dotés de dispositif "anti-floculation" et en limitant le plus possible la hauteur de chute dans le camion.

Le mélange est transporté sur chantier en camion-benne ; par temps pluvieux et par temps chaud et sec, un bâchage est le plus souvent nécessaire pour maintenir la teneur en eau optimale.

Une durée maximale de 9 heures est le plus souvent préconisée entre la sortie centrale du mélange et la mise en oeuvre complète.

5.4.4 Mise en oeuvre

Les opérations de répandage et compactage devront être terminées avant la fin du délai de maniabilité spécifié ci-dessus.

Les bétons compactés ne recevront pas en principe de couche de roulement si ce n'est éventuellement un enduit, leur mise en oeuvre sera particulièrement soignée, notamment, du point de vue de la finition de surface (homogénéité et uni).

Les bétons compactés peuvent avoir en fonction du type de liant utilisé, des vitesses de durcissement différentes. Si ce durcissement n'est pas suffisamment avancé lorsque survient donc d'éviter généralement de réaliser la mise en oeuvre au moins deux mois avant la période des pluies.

Les bétons compactés sont sensibles à des variations de teneur en eau ; on évite donc de les mettre en oeuvre par temps de pluie ; par temps sec et chaud, un arrosage continu du matériau en place doit être assuré (par pulvérisation d'eau).

5.4.4.1 Support

Les bétons compactés doivent pouvoir être répandus en épaisseur constante et doivent pouvoir être compactés convenablement : le support qui les reçoit doit donc être de qualité, tant par ses caractéristiques géométriques que par sa portance.

D'autre part, pour éviter un assèchement de la couche de béton compacté, la couche support est, si nécessaire, arrosée avant le répandage, notamment si elle est constituée de matériaux drainantes ou par forte chaleur.

5.4.4.2 Répannage et réglage

La mise en oeuvre des bétons compactés se fait par couches dont l'épaisseur compactée peut varier de 15 à 30 cm (voir dimensionnement) dans la mesure du possible et pour éviter au plus les joints longitudinaux, l'exécution se fait en pleine largeur.

Les engins de répannage pouvant être utilisés sont :

- les machines à coffrage glissant (qui permettent également le rabotage de la couche)
- les niveleuses seules ou associées à un profileur de cordon,
- la niveleuse associée à un boteur léger,
- le finisseur (avec les finisseurs actuels une épaisseur de couche 30 cm après compactage parait cependant un maximum)

L'expérience acquise sur les chantiers conduit à conseiller la mise en oeuvre suivante qui a permis à ce jour d'obtenir les meilleurs qualités de surface (uni) :

* Le matériau est d'abord répandu et réglé en épaisseur surabondante de quelques centimètres à l'aide d'une niveleuse, d'un boteur, d'un finisseur...

* Un compactage partiel au compacteur vibrant est ensuite effectué : il limite le foisonnement du matériau.

* Un rabotage final à l'aide d'une niveleuse spécialement réservée à cet usage ramène la couche répandue à l'épaisseur finale ; le matériau en excédent est évacué ; il peut être utilisé en accotement ou à l'avancement si le délai de maniabilité le permet.

Si le chantier le justifie, un dispositif de guidage (fil ou laser) pourra être utilisé.

* Le matériau est humidifié si nécessaire

* Le compactage est ensuite poursuivi avec le vibrant puis le pneu.

- Le rabotage doit toujours être effectué avec précision
- Un compactage efficace doit toujours être réalisé après le rabotage,

avec un compacteur vibrant suivi d'un compacteur à pneus.

5.4.4.3 Cure après compactage avant la pose de la protection bitumineuse

La prise du liant ne pouvant se faire que dans des conditions d'humidité suffisante, il faut veiller à ce que la couche de béton compacté ne se dessèche pas en surface et prévoir un arrosage modéré, mais fréquent, si cela est nécessaire (la solution idéale serait une pulvérisation continue ne provoquant pas de ruissellement en surface).

Pour les mesures d'accompagnement, un épandage de sable pourrait éventuellement être fait après une bonne prise du liant.

5.4.4.4 Compactage des bords

Les bords des couches de béton compacté doivent avoir une compacité suffisante. Pour l'obtention, il y a intérêt à dresser le matériau d'accotement à l'avancement et à le compacter en même temps que la couche de chaussée ; celle-ci se trouve ainsi naturellement collée lors de sa réalisation : le passage du compacteur sur la couche de chaussée et l'accotement ainsi réalisé permet d'obtenir le meilleur compactage des bords de la chaussée sans risque de déformation par fluage.

5.4.4.5 Joints et reprise de chantier

5.4.4.5.1 Joints longitudinaux

La réalisation de la seconde demi-chaussée est faite de façon à permettre le compactage du joint, donc d'une partie de la première demi-chaussée avant sa prise : l'organisation du chantier doit être faite pour permettre la réalisation de l'ensemble de la chaussée avant la fin du délai de maniabilité du premier matériau mis en oeuvre ; la teneur en eau du bord est maintenue jusqu'à la réalisation de la bande suivante.

5.4.4.5.2 Joints transversaux

Pour éviter les apports en couche mince et les risques de flambement par forte chaleur, à chaque reprise de chantier, le béton compacté est découpé pour présenter une tranche verticale (la reprise du compactage le long du joint sera particulièrement suivie).

5.4.5 Protection de la couche d'assise en béton compacté et couche de roulement

Dans leur jeune âge, les bétons compactés insuffisamment protégés en surface sont sensibles à l'agression de la circulation, notamment de chantier, et aux intempéries. En cas de précipitations importantes, la circulation peut entraîner des arrachements et même conduire à la formation de dégradation du type "nids de poule" qui n'est cependant, pas trop fréquente contrairement aux chaussées à base latéritique.

5.4.5.1 Protection

Le béton compacté doit être protégé à court terme contre la dessiccation, puis à long terme contre l'agression du trafic. La protection de la couche de béton compacté peut être assurée de la façon suivante :

Tableau 5.10 : Protection d'un béton compacté

CHRONOLOGIE DES OPÉRATIONS	DÉSIGNATION DES OPÉRATIONS
Immédiatement après le compactage	Traitement de maintien de la teneur en eau par pulvérisation d'eau (ou directement).
Le jour du chantier (généralement en fin de journée) ou au plus tard le lendemain matin.	Enduit de cure à l'émulsion gravillonnée 0/3 environ 20 l/m ²
Après passage de la circulation pendant au moins quelques jours, après balayage.	Enduit monocouche double gravillonnage (ou enduit monocouche simple selon la qualité de l'enduit de cure)

5.4.6 Importance de la qualité de l'uni

La qualité de l'uni (avec celle de compactage) est le critère premier pour juger de la réussite d'un chantier en béton compacté.

Si un uni suffisant n'est pas obtenu (à la suite d'une mauvaise conduite de chantier), des travaux ultérieurs sont nécessaires à très court terme, par exemple fraisage de la surface avec pose d'un nouvel enduit ou mise en oeuvre de couche de béton bitumineux.

Ces travaux conduisent à des surcoûts importants et également des pertes de matériaux dans le cas du fraisage.

Il est donc nécessaire que les prescriptions pour obtenir une bonne qualité d'uni à la mise en oeuvre soient respectées.

La qualité d'uni dépendant pour une grande part de l'entreprise et notamment de l'expérience des équipes de mise en oeuvre, il est utile d'indiquer précisément les seuils d'uni minima requis qui permettront la réception des travaux.

5.4.7 Travaux en arrière saison

Il convient de rappeler qu'il est prudent d'éviter d'engager des travaux en arrière-saison pour les raisons suivantes :

- une forte pluie rendant difficile ou interdisant la mise en oeuvre et conduisant à de faibles niveaux de performances
- la réalisations d'enduit superficiel étant difficile pendant cette période

Chapitre 6 :

ANALYSE ECONOMIQUE

Chapitre 6 : ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'analyse économique porte uniquement sur l'évaluation du coût des cinq (5) bétons de sable et la comparaison de ces coûts à ceux spécifiques des couches correspondantes en matériaux classiques (enrobés denses). En effet, les dosages trouvés suivant les ajouts sont:

- Pour le béton de sable à ajout de calcaire (Bargny) : Ciment 200 kg/m³ ; Sable de dune 1450 kg/ m³ ; Sable fillérisé 725 kg/m³ ; Eau 190 l/ m³.
- Pour le béton de sable à ajout de calcaire (Bandia) : Ciment 200 kg/m³ ; Sable de dune 1525 kg/ m³ ; Sable fillérisé 762,5 kg/m³ ; Eau 199 l/ m³.
- Pour le béton de sable à ajout de Gré (Toglou) : Ciment 200 kg/m³ ; Sable de dune 1500 kg/ m³ ; Sable fillérisé 750 kg/m³ ; Eau 245 l/ m³.
- Pour le béton de sable à ajout de Silexite (Taïba) : Ciment 200 kg/m³ ; Sable de dune 1725 kg/ m³ ; Sable fillérisé 862,5 kg/m³ ; Eau 278,75 l/ m³.
- Pour le béton de sable à ajout de Basalte (Diack) : Ciment 200 kg/m³ ; Sable de dune 1750 kg/ m³ ; Sable fillérisé 875 kg/m³ ; Eau 282,5 l/ m³.

De plus, à l'aide de la modélisation avec Alizé III, les épaisseurs trouvées suivant les ajouts sont consignées dans le tableau ci-dessous:

Tableau 6.1: Épaisseur de la couche de roulement (forts trafics)

Ajouts	Calcaire (Bargny)	Calcaire (Bandia)	Gré (Toglou)	Silexite (Taïba)	Basalte (Diack)
Épaisseurs					
Béton de sable	28	28	28	26	26
Bitume gravillonné 0/3 (cm)	2	2	2	2	2

Tableau 6.2 : Épaisseur de la couche de roulement (faibles trafics)

Ajouts	Calcaire (Bargny)	Calcaire (Bandia)	Gré (Toglou)	Silexite (Taïba)	Basalte (Diack)
Épaisseurs					
Béton de sable	24	24	23	24	25
Bitume gravillonné 0/3 (cm)	2	2	2	2	2

Ce faisant, les hypothèses suivantes ont été établies :

- La largeur des chaussées est prise égale à 7 m pour les chaussées supportant de forts trafics et 6 m pour celles supportant de faibles trafics. Outre la largeur de 7 m de la surface de roulement, il est pris en compte une surlargeur de 40 cm pour la couche de base par rapport au revêtement.
- Pour toutes les chaussées en béton de sable, nous envisageons une mince pellicule d'enduit bitumineux gravillonné d'imperméabilisation de 2 cm
- La distance de transport des sables de dune est supposée égale à 30 km en moyenne.
- La distance de transport des "sables fillérisés" varie en fonction des lieux d'extraction des cinq matériaux. Notons que la chaussée en béton de sable sera dans la région de Thiès.
- La main d'oeuvre des chaussées en béton de sable est égale à 10% du total (valeur se situant généralement entre 8% et 12% du total).
- Nous allons évaluer le coût pour un kilomètre de route
- Nous considérons une couche de fondation identique pour les deux types de chaussée (cas des trafics forts).
- Pour la chaussée en enrobés denses, la couche de base aura une épaisseur de 20 cm et la couche de roulement une épaisseur de 4 cm.
- Les coûts calculés ne prennent pas en considération les frais éventuels d'entretien ultérieurs qui sont moindres pour les chaussées en béton de sable une fois le problème de la fissuration réglé et qui doivent être programmés et budgétisés pour les chaussées en enrobés denses (entretien courant, périodique)
- Les paramètres tels que le confort, la sécurité sont supposés identiques. Une étude plus approfondie permettrait de les estimer pour chacun d'eux.

- Nous allons utiliser les prix fixés par l'Entreprise Jean Lefebvre, les Carrières et le Ministère de l'Équipement et des Transports Terrestres.

6.1 CHAUSSÉE EN ENROBÉS DENSES

6.1.1 Couche de base en latérite améliorée au ciment (latérite-ciment)

- Épaisseur de la couche de latérite : 20 cm
- Volume de latérite = $0,2 \times 7,4 \times 1000 = 1480 \text{ m}^3$
- Prix unitaire : 12 000 F/m³
- Transport sur 15 km = $1480 \times 15 \times 47,63 \times 1,5 = 1\,586\,079 \text{ F}$
- Coût au km = $12\,000 \times 1480 + 1\,586\,079 = 19\,346\,079 \text{ F}$

6.1.2. Couche de roulement en enrobés denses

- Épaisseur de la couche = 4 cm
- Volume d'enrobés = $0,04 \times 7 \times 1000 = 280 \text{ m}^3$
- Masse d'enrobés = $2,4 \times 280 = 672 \text{ t}$
- Coût au km des enrobés main d'oeuvre comprise = $52\,000 \times 672 = 34\,944\,000 \text{ F}$

6.1.3 Coût global de la structure

Couche de base en latérite améliorée au ciment : 19 346 079 F

Couche de roulement en enrobés denses : 34 944 000 F

Total = 54 290 079 F CFA

6.2 CHAUSSÉES EN BÉTON DE SABLE

Soit V_{Bds} : Volume de béton de sable au km

V_e : Quantité d'eau

m_c : Quantité de ciment

V_f : Quantité de "sable fillérisé"

V_s : Quantité de sable

6.2.1 Cas de forts trafics

* Le béton de sable à ajout de calcaire (Bargny) nous donne au km de chaussée :

$$- V_{Bds} = 7 \times 1000 \times 0,28 = 1960 \text{ m}^3$$

$$- V_e = V_{Bds} \times 190 = 372,4 \text{ m}^3$$

$$- m_c = V_{Bds} \times 200 = 392 \text{ t}$$

$$- V_f = V_{Bds} \times 725 = 1421,0 \text{ t}$$

$$- V_s = V_{Bds} \times 1450 = 2842,0 \text{ t}$$

* Le béton de sable à ajout de calcaire (Bandia) nous donne au km de chaussée :

$$V_{Bds} = 7 \times 1000 \times 0,28 = 1960 \text{ m}^3$$

$$V_e = V_{Bds} \times 199 = 390 \text{ m}^3$$

$$m_c = V_{Bds} \times 200 = 392 \text{ t}$$

$$V_f = V_{Bds} \times 762,5 = 1494,5 \text{ t}$$

$$V_s = V_{Bds} \times 1525 = 2989 \text{ t}$$

* Le béton de sable à ajout de Gré (Toglou) nous donne au km de chaussée :

$$V_{Bds} = 7 \times 1000 \times 0,28 = 1960 \text{ m}^3$$

$$V_e = V_{Bds} \times 245 = 480,2 \text{ m}^3$$

$$m_c = V_{Bds} \times 200 = 392 \text{ t}$$

$$V_f = V_{Bds} \times 750 = 1470 \text{ t}$$

$$V_s = V_{Bds} \times 1500 = 2940 \text{ t}$$

* Le béton de sable à ajout de Silexite (Taïba) nous donne au km de chaussée :

$$V_{Bds} = 7 \times 1000 \times 0,26 = 1820 \text{ m}^3$$

$$V_e = V_{Bds} \times 278,75 = 507,3 \text{ m}^3$$

$$m_c = V_{Bds} \times 200 = 364 \text{ t}$$

$$V_f = V_{Bds} \times 862,5 = 1569,8 \text{ t}$$

$$V_s = V_{Bds} \times 1725 = 3139,5 \text{ t}$$

* Le béton de sable à ajout de Basalte (Diack) nous donne au km de chaussée :

$$V_{Bds} = 7 \times 1000 \times 0,26 = 1820 \text{ m}^3$$

$$V_e = V_{Bds} \times 282,5 = 514,2 \text{ m}^3$$

$$m_c = V_{Bds} \times 200 = 364 \text{ t}$$

$$V_f = V_{Bds} \times 875 = 1592,5 \text{ t}$$

$$V_s = V_{Bds} \times 1750 = 3185 \text{ t}$$

Ainsi les quantités de matériaux nécessaires pour un km de chaussée (large de 7 m) en béton de sable sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 6.3 : Quantités des composants du béton de sable requis
au km de chaussée

Ajouts	Calcaire (Bargny)	Calcaire (Bandia)	Gré (Toglou)	Silexite (Taïba)	Basalte (Diack)
V_{Bds} (m ³)	1960	1960	1960	1820	1820
V_e (m ³)	372,4	390	480,2	507,3	514,2
m_c (t)	392	392	392	364	364
V_f (t)	1421,0	1494,5	1470	1569,8	1592,5
V_s (t)	2842,0	2989	2940	3139,5	3185

6.2.1.1 Étude des coûts

Le prix des principales composantes sont :

Ciment : 48 500 F CFA la tonne

Bitume gravillonné 0/3 : 18 000 F CFA le m³

Eau : 597 F CFA le m³

Ainsi, les coûts d'investissement des chaussées suivant les différents ajouts sont :

Tableau 6.4 : Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de calcaire

(Bargny)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	372,4	597	222 322,8	
Ciment	392	48 500	19 012 000	
Sable de dune	2 842	662	1 881 404	Transport sur 30 km
Transport	85 260	47,63	4 060 933,8	
Sable fillérisé	1421	667	947 807	Transport sur 35 km
Transport	49 735	47,63	2 368 878,05	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			31 013 345,65	
Main d'oeuvre	10%		3 101 334,565	
Total 2			34 114 680,215	

Tableau 6.5: Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de calcaire

(Bandia)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	390	597	232 830	
Ciment	392	48 500	19 012 000	
Sable de dune	2 989	662	1 978 718	Transport sur 30 km
Transport	89 670	47,63	4 270 982,1	
Sable fillérisé	1494,5	667	996 831,5	Transport sur 45 km
Transport	67 252,5	47,63	3 203236,575	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			32 214 598,175	
Main d'oeuvre	10 %		3 221 459,8175	
Total 2			35 436 057,99	

Tableau 6.6: Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de Gré (Toglou)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	480,2	597	286 679,4	
Ciment	392	48 500	19 012 000	
Sable de dune	2 940	662	1 946 280	Transport sur 30 km
Transport	88 200	47,63	4 200 966	
Sable fillérisé	1470	-	-	Transport sur 35 km
Transport	51 450	47,63	2 450 563,5	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			30 416 488,9	
Main d'oeuvre	10 %		3 041 648,89	
Total 2			33 458 137,79	

Tableau 6.7: Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de Silexite (Taiba)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	507,3	597	302 858,1	
Ciment	364	48 500	17 654 000	
Sable de dune	3 139,5	622	1 952 769	Transport sur 30 km
Transport	94 185	47,63	4 486 031,55	
Sable fillérisé	1 569,8	-	-	Transport sur 35 km
Transport	54 943	47,63	2 616 935,09	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			29 532 593,74	
Main d'oeuvre	10 %		2 953 259,374	
Total 2			32 485 853,114	

Tableau 6.8: Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de Basalte (Diack)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	514,2	597	306 977,4	
Ciment	364	48 500	17 654 000	
Sable de dune	3 185	662	2 108 470	Transport sur 30 km
Transport	95 550	47,63	4 551 046,5	
Sable fillérisé	1 592,5	1 818	2 895 165	Transport sur 27 km
Transport	42 997,5	47,63	2 047 970,925	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			32 083 629,825	
Main d'oeuvre	10 %		3 208 362,9825	
Total 2			35 291 992,81	

6.2.2 Cas de faibles trafics

Les quantités de matériaux nécessaires pour un km de chaussée (large de 6 m) en béton de sable sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 6.9 : Quantités des composants du béton de sable requis

au km de chaussée

Ajouts	Calcaire (Bargny)	Calcaire (Bandia)	Gré (Toglou)	Silexite (Taïba)	Basalte (Diack)
V_{Bds} (m ³)	1440	1440	1380	1440	1500
V_e (m ³)	273,6	286,6	338,1	401,4	423,8
m_c (t)	288	288	276	288	300
V_f (t)	1044	1098	1035	1242	1312,5
V_s (t)	2 088	2196	2070	2484	2625

6.2.2.1 Étude des coûts

Dans le cas de faibles trafics, la chaussée en béton de sable comportera une couche de béton de sable compactée sur le sable ciment compacté et une mince couche de bitume gravillonné 0/3 dosée à 20 l/m² de chaussée.

Ainsi, les coûts d'investissement des chaussées suivant les différents ajouts sont consignés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 6.10 : Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de calcaire (Bargny)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	273,6	597	163 339,2	
Ciment	288	48 500	13 968 000	
Sable de dune	2 088	662	1 382 256	Transport sur 30 km
Transport	62 640	47,63	2 983 543,2	
Sable fillérisé	1 044	667	696 348	Transport sur 35 km
Transport	36 540	47,63	1 740 400,2	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			23 453 886,6	
Main d'oeuvre	10 %		2 345 388,66	
Total 2			25 799 275,26	

Tableau 6.11 : Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de calcaire (Bandia)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	286,6	597	171 100,2	
Ciment	288	48 500	13 968 000	
Sable de dune	2 196	662	1 453 752	Transport sur 30 km
Transport	65 880	47,63	3 137 864,4	
Sable fillérisé	1098	667	732 366	Transport sur 45 km
Transport	38 430	47,63	1 830 420,9	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			23 813 503,5	
Main d'oeuvre	10 %		2 381 350,35	
Total 2			26 194 853,85	

Tableau 6.12 : Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de Gré (Toglou)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	338,1	597	201 845,7	
Ciment	276	48 500	13 386 000	
Sable de dune	2 070	662	1 370 340	Transport sur 30 km
Transport	62 100	47,63	2 957 823	
Sable fillérisé	1035	-		Transport sur 35 km
Transport	36 225	47,63	1 725 396,75	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			22 161 405,45	
Main d'oeuvre	10 %		2 216 140,545	
Total 2			24 377 545,995	

Tableau 6.13 : Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de siléxite (Taïba)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	401,4	597	239 635,8	
Ciment	288	48 500	13 968 000	
Sable de dune	2 484	662	1 545 048	Transport sur 30 km
Transport	74 520	47,63	3 549 387,6	
Sable fillérisé	1242			Transport sur 35 km
Transport	43 470	47,63	2 070 476,1	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			23 892 547,5	
Main d'oeuvre	10 %		2 389 254,75	
Total 2			26 281 802,25	

Tableau 6.14 : Coût au km d'une chaussée de béton de sable à ajout de basalte (Diack)

Matériaux	Quantités	Prix unitaire	Coûts HTVA	Observations
Eau	423,8	597	253 008,6	
Ciment	300	48 500	14 550 000	
Sable de dune	2 625	662	1 737 750	Transport sur 30 km
Transport	78 750	47,63	375 086,5	
Sable fillérisé	1 312,5	1 818	2 386 125	Transport sur 27 km
Transport	35 437,5	47,63	1 687 888,125	
Bitume gravillonné 0/3	140	18 000	2 520 000	
Total 1			26 885 634,225	
Main d'oeuvre	10 %		2 688 563,4225	
Total 2			29 574 197,65	

6.3 COMPARAISON DES COÛTS

Tableau 6.15 : Étude comparative des coûts

Ajouts	Calcaire (Bargny)	Calcaire (Bandia)	Gré (Toglou)	Silexite (Taïba)	Basalte (Diack)
Rapport chaussées en enrobés denses/chaussée en béton de sable (forts trafics)	1,59	1,53	1,62	1,67	1,54
Rapport chaussées en enrobés denses/chaussée en béton de sable (faibles trafics)	2,1	2,07	2,23	2,06	1,83

6.4 CONCLUSION

Dans l'estimation financière, nous n'avons pas tenu compte de la couche de fondation.

Nous avons supposé qu'elle est la même pour les différents types de chaussée.

En effet, les coûts de réalisation des différents types de chaussée ont été comparés dans les mêmes conditions de mise en oeuvre et avons abouti à la conclusion qu'on peut effectuer en moyenne 1,59 fois plus de super-structure de chaussée en béton de sable que de structure en enrobés denses le cas de forts trafics et 2 fois de super-structure de chaussée en béton de sable que de structure en enrobés denses dans le cas de faibles trafics.

Il faut aussi signaler que, dans le cadre de cette étude, le ciment produit par la SOCOCIM représente 60 % environ du coût des chaussées en béton de sable

permettant un accroissement de la valeur ajoutée par rapport aux produits hydrocarbonés importés qui coûtent chers.

De plus, la réalisation des chaussées en béton de sable nécessite une main d'oeuvre moins qualifiée et des équipements moins sophistiqués tandis que celle en enrobés denses nécessite du personnel technique qualifié et des engins indispensables très chers.

Par ailleurs, lors de la réalisation des chaussées en béton de sable, on veillera à bien scarifier la couche intermédiaire entre l'assise et la fondation et à mettre en place un béton de propreté entre la couche de fondation et celle de béton de sable proprement dit.

De plus, dans le but d'améliorer l'adhérence de la chaussée avec les pneumatiques, une mince pellicule d'enduit bitumineux gravillonné 0/3 d'imperméabilisation de 2 cm sera mise sur la chaussée en béton de sable. Toutefois, pour éviter le glissement (sous l'effet des forces de cisaillement) de l'enduit bitumineux par rapport à la couche de béton de sable, il sera recommandé de mettre un dope plus particulièrement du chlorure d'ammonium entre ces deux couches pour résoudre le problème de l'adhésivité entre l'enduit bitumineux et la couche de béton de sable.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'utilisation des bétons de sable routiers compactés ont été étudiés avec un sable de dune (de Thiès) pas très performant (ES = 52) et des "sables fillérisés" nouveaux dans leur utilisation, leur formulation. Nous avons donc affaire à des bétons de sable particuliers différents de ceux conçus et étudiés par l'association française SABLOCRETE. Néanmoins, les performances mécaniques et physiques obtenues sont relativement bonnes.

Les résultats expérimentaux obtenus permettent d'envisager l'utilisation des bétons de sable comme matériau de substitution dans la construction des chaussées routières.

Exposés à l'air, les "sables fillérisés" de Basalte (Diack) sont les meilleurs ajouts puis viennent respectivement le silexite (Taïba), le calcaire (Bandia), le calcaire (Bargny) et le Gré (Toglou).

Par contre, immergés dans l'eau, les sables fillérisés de silexite (Taïba) sont les meilleurs ajouts puis viennent respectivement le basalte (Diack), le calcaire (Bandia), le calcaire (Bargny) et le gré (Toglou).

En effet, cette technique innovante qu'est le béton de sable routier compacté mérite d'être plébiscité d'autant plus que l'entretien est moindre si le problème de la fissuration est réglé, la longévité très appréciable (30 à 40 ans), le coût d'investissement réduit et les matières premières (sable, ajouts) largement disponibles.

En outre, dans toute cette étude, les formulations de bétons de sable ont été faites sans l'emploi d'adjuvants car en terme économique les adjuvants coûtent chers dans des pays comme le Sénégal qui ne sont que des consommateurs avec un pouvoir d'achat faible.

De plus, les études ont été faites avec un sable autre que celui de plage car notre projet devait également analyser les enjeux liés à l'environnement en particulier en évaluant la réduction de la consommation de sable de plage que le développement du béton de sable pourrait entraîner, atténuant ainsi les effets de l'érosion côtière.

Toutefois, pour l'expérimentation de ce matériau, quelques précautions s'imposent pour pallier le problème presque systématique des fissures :

- une cure suffisante à l'eau,
- un joint longitudinal dans l'axe et des joints transversaux tous les 3 à 3,5 m pour la chaussée. De plus, les joints transversaux pourraient être mis en quinconce.
- un système anti-propagation des fissures pourra être appliqué. Par exemple, après la pose d'enduit bitumineux gravillonné 0/3 (d'imperméabilisation de 2 cm), la mise en place de concassés doublés d'une autre couche d'enduit bitumineux peut être, entre autres, une solution pour résoudre le problème de la fissuration.

Pour terminer cette étude, nous suggérons l'exécution de planches d'essais en béton de sable compacté pour observer dans le temps le comportement du matériau (éventuellement des fissures), son incidence sur les coûts d'exploitations des véhicules et d'entretien. Par conséquent, la collaboration active de certains maîtres d'ouvrages (AGETIP, DAU, Ministère de l'Équipement et des Transports terrestres) serait vivement souhaitée pour la vulgarisation des bétons de sables routiers compactés au Sénégal à plus grande échelle.

Le contexte économique et social impose la recherche de techniques peu coûteuses, à bon marché et assurant la promotion des entreprises nationales. Là enfin, le projet "béton de sable" semble s'inscrire particulièrement bien dans ces principes que partagent également les maîtres d'ouvrages sénégalais.

**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- SIDIBÉ M. (1995) - Étude de l'utilisation des granulats de type silexite en géotechnique routière
- DIASSE B. (1995-1996) - Les bétons de sable routiers au Sénégal : Proposition de formulation-Characterisation-Dimensionnement
- BADIANE M. (1995) - Rapport du Maréchal des Logis-Chef
- SABLOCRETE (1994) - Bétons de sable : Caractéristiques et pratiques d'utilisation
- TREMBLAY D. (1983) - Béton de ciment
- CIM Béton (1995) - Conceptions et exécutions du béton désactivé
- Manuel de laboratoire-Voirie EPT
- AHOUANSON S.G (1993) - Étude comparative des bétons à base de granulats usuels en pays tropicaux (basalte-gré-calcaire-graveleux latéritiques) avec sable de plage et sable de dune
- DJIBA Y. (1993) - Importance économique des granulats au Sénégal et évaluation des performances d'un béton hydraulique à granulats de type silexite et à ciment Portland à ajout pouzzolanique-Mémoire d'Ingénieur Géologue I.S.T
- NDIAYE K. (1993) - Optimisation des formulations des bétons de sable. Projet de fin d'Etudes E.P.T.
- Adéwolé E. (1993) - Étude du revêtement des canaux à ciel ouvert par du béton de sable : Application au Canal du Cayor Sénégal. Projet de fin d'étude EPT
- GARRIGOU J.P (1995) - Rapport du LRPC de Bordeaux-Mission technique
- CEREEQ (1995) - Copie des résultats des essais à 28 jours sur les bétons de dallage
- CIM (1994) - Routes n°48

- SABLOCRETE (1990) - Rapport d'activité ; actions pilotes de développement, actions de recherche-développement actions de coopérations
- SETRA (1988) - Actualisation du catalogue des structures types de chaussées neuves et du guide de dimensionnement des renforcements de chaussées souples
- SETRA LCPC (1985) Recommandations pour la réalisation des chaussées en béton compacté.

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 Résultats de l'analyse granulométrique à sec du calcaire (Bandia)

Annexe 1 Résultats de l'analyse granulométrique à sec du calcaire (Bargny)

Annexe 2 Résultats de l'analyse granulométrique à sec du gré (Toglou)

Annexe 2 Résultats de l'analyse granulométrique à sec du silexite (Taïba)

Annexe 3 Résultats de l'analyse granulométrique à sec du sable de dune (Thiès)

Annexe 3 Résultats de l'analyse granulométrique à sec du basalte (Diack)

Annexe 4 Résultats de l'analyse granulométrique à l'eau du calcaire (Bargny)

Annexe 4 Résultats de l'analyse granulométrique à l'eau du calcaire (Bandia)

Annexe 5 Résultats de l'analyse granulométrique à l'eau du silexite (Taïba)

Annexe 5 Résultats de l'analyse granulométrique à l'eau du gré (Toglou)

Annexe 6 Résultats de l'analyse granulométrique à l'eau du Basalte (Diack)

Annexe 7 Courbes granulométriques du calcaire de Bandia (à l'eau et à sec)

Annexe 8 Courbes granulométriques du calcaire de Bargny (à l'eau et à sec)

Annexe 9 Courbes granulométriques du grès de Toglou (à l'eau et à sec)

Annexe 10 Courbes granulométriques du silexite de Taïba (à l'eau et à sec)

Annexe 11 Courbes granulométriques du sable de dune de Thiès (à l'eau et à sec)

Annexe 12 Courbes granulométriques du Basalte de Diack (à l'eau et à sec)

Annexe 13 Fuseau granulométrique des cinq sables fillérisés + sable du dune (à sec)

Annexe 14 Résultats de l'essai de compactage du béton de sable à ajout de calcaire
(Bandia)

Annexe 15 Résultats de l'essai de compactage du béton de sable à ajout de calcaire
(Bargny)

Annexe 16 Résultats de l'essai de compactage du béton de sable à ajout de gré
(Toglou)

Annexe 17 Résultats de l'essai de compactage du béton de sable à ajout de silixite
(Taïba)

Annexe 18 Résultats de l'essai de compactage du béton de sable à ajout de basalte
(Diack)

Annexe 19 Courbes de résultats des essais Proctor

Annexe 20 Courbes de résultats des essais Proctor

Annexe 21 Résultats des essais de poids spécifique des constituants solides

Annexe 22 Photos des éprouvettes de bétons de sable

Analyse granulométrique

Avant lavage (à sec)

1- Calcaire de Bandia

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulatif	Tamisats (%)
4	4,75	0,74	0,074	0,074	99,93
8	2,36	1,57	0,157	0,231	99,77
10	2,00	8,21	0,821	1,052	98,95
16	1,18	120,14	12,014	13,066	86,93
20	0,85	87,51	8,751	21,817	78,18
30	0,60	98,84	9,884	31,701	68,30
40	0,42	144,33	14,433	46,134	53,87
50	0,30	205,43	20,543	66,677	33,32
60	0,25	44,41	4,441	71,118	28,88
100	0,15	132,36	13,236	84,354	15,65
140	0,106	61,04	6,104	90,458	9,54
200	0,075	63,84	6,384	96,842	3,16

Résidu = 26,92 g

2 - Calcaire Bargny

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulatif	Tamisats (%)
4	4,75	23,82	2,382	2,382	97,62
8	2,36	55,37	5,537	7,919	92,08
10	2,00	62,2	6,22	14,139	85,86
16	1,18	194,14	19,414	33,553	66,45
20	0,85	97,81	9,781	43,334	56,67
30	0,60	112,25	11,225	54,559	45,44
40	0,42	139,31	13,931	68,49	31,51
50	0,30	59,82	5,982	74,472	25,53
60	0,25	39,75	3,975	78,447	21,55
100	0,15	159,63	15,963	94,41	5,59
140	0,106	17,49	1,749	96,159	3,84
200	0,075	16,79	1,679	97,838	2,16

Résidu = 14,23 g

Analyse granulométrique**Avant lavage (à sec)****3 - Gré de Toglou**

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulatif	Tamisats (%)
4	4,75	4,43	0,443	0,443	99,56
8	2,36	65,77	6,577	7,020	92,98
10	2,00	61,98	6,198	13,218	86,78
16	1,18	131,34	13,134	26,352	73,65
20	0,85	67,66	6,766	33,118	66,88
30	0,60	60,18	6,018	39,136	60,86
40	0,42	54,56	5,456	44,592	55,41
50	0,30	65,8	6,58	51,172	48,83
60	0,25	80,73	8,073	59,245	40,76
100	0,15	197,14	19,714	78,959	21,04
140	0,106	139,07	13,907	92,866	7,13
200	0,075	48,51	4,851	97,717	2,28

Résidu = 9,05 g

4 - Silexite de Taïba

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulatif	Tamisats (%)
4	4,75	0,97	0,097	0,097	99,90
8	2,36	59,17	5,917	6,014	93,99
10	2,00	65,03	6,503	12,517	87,48
16	1,18	194,36	19,436	31,953	68,05
20	0,85	114,16	11,416	43,369	56,63
30	0,60	103,99	10,399	53,768	46,23
40	0,42	84,18	8,418	62,186	37,81
50	0,30	92,96	9,296	71,482	28,51
60	0,25	32,76	3,276	74,758	25,24
100	0,15	110,57	11,057	85,815	14,19
140	0,106	56,04	5,604	91,419	8,58
200	0,075	57,56	5,756	97,175	2,83

Résidu = 23,05 g

Analyse granulométrique**Avant lavage (à sec)****5 - Sable de dune**

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulatif	Tamisats (%)
4	4,75	0	0	0	100
8	2,36	0	0	0	100
10	2,00	0	0	0	100
16	1,18	0	0	0	100
20	0,85	0,24	0,024	0,024	99,976
30	0,60	4,36	0,436	0,46	99,54
40	0,42	72,98	7,298	7,758	92,242
50	0,30	402,95	40,295	48,053	51,947
60	0,25	115,91	11,591	59,644	40,356
100	0,15	227,66	22,766	82,41	17,59
140	0,106	82,95	8,295	90,705	9,295
200	0,075	62,56	6,256	96,961	3,039

Résidu = 29,9 g

6 - Basalte de Diack

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulatif	Tamisats (%)
4	4,75	2,7	0,27	0,27	99,73
8	2,36	54,78	5,478	5,748	94,25
10	2,00	73,3	7,33	13,078	86,92
16	1,18	234,42	23,442	36,52	63,48
20	0,85	125,62	12,562	49,082	50,92
30	0,60	111,83	11,183	60,265	39,74
40	0,42	86,77	8,677	68,942	31,06
50	0,30	81,96	8,196	77,138	22,86
60	0,25	21,37	2,137	79,275	20,73
100	0,15	64,4	6,44	85,715	14,29
140	0,106	34,2	3,42	89,135	10,87
200	0,075	39,3	3,93	93,065	6,94

Résidu = 58,71 g

Analyse granulométrique**Après lavage (à l'eau)****1 - Calcaire de Bargny**

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulé	Tamisats (%)
4	4,75	0	0	0	100
8	2,36	49,7	9,94	9,94	90,06
10	2,00	27,88	5,576	15,516	84,484
16	1,18	75,42	15,084	30,6	69,4
20	0,85	38,77	7,754	38,354	61,646
30	0,60	41,44	8,288	46,642	53,358
40	0,42	31,48	6,296	52,938	47,062
50	0,30	26,69	5,338	58,276	41,724
60	0,25	11,09	2,218	60,494	39,506
100	0,15	21,74	4,348	64,842	35,158
140	0,106	16,66	3,332	68,174	31,826
200	0,075	11,93	2,386	70,156	29,44

2 - Calcaire de Bandia

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulé	Tamisats (%)
4	4,75	0	0	0	100
8	2,36	3,99	0,798	0,798	99,202
10	2,00	13,76	2,752	3,55	96,45
16	1,18	52,3	10,42	14,01	85,99
20	0,85	36,76	7,352	21,362	78,638
30	0,60	39,31	7,862	29,224	70,776
40	0,42	35,29	7,058	36,282	63,718
50	0,30	38,48	7,696	43,978	56,022
60	0,25	15,36	3,072	47,05	52,95
100	0,15	36,77	7,354	54,404	45,596
140	0,106	34,76	6,952	61,356	38,644
200	0,075	26,72	5,344	66,7	33,93

Analyse granulométrique**Après lavage (à l'eau)****3 - Silixite de Taïba**

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulé	Tamisats (%)
4	4,75	0	0	0	100
8	2,36	46,31	9,262	9,262	90,738
10	2,00	29,19	5,838	15,1	84,9
16	1,18	81,95	16,39	31,49	68,51
20	0,85	38,79	7,758	39,248	60,752
30	0,60	43,23	8,646	47,894	52,106
40	0,42	34,37	6,874	54,768	45,232
50	0,30	36,93	7,386	62,154	37,846
60	0,25	14,38	2,876	65,03	34,97
100	0,15	39,36	7,872	72,902	27,098
140	0,106	21,54	4,308	77,21	22,79
200	0,075	21,48	4,296	81,506	18,494

4 - Gré de Toglon

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulé	Tamisats (%)
4	4,75	0	0	0	100
8	2,36	52,06	10,412	10,412	89,588
10	2,00	33,95	6,79	17,202	82,798
16	1,18	54,73	10,946	28,148	71,852
20	0,85	25,52	5,104	33,252	66,748
30	0,60	24,78	4,956	38,208	61,792
40	0,42	20,06	4,012	42,22	57,78
50	0,30	19,44	3,888	46,108	53,892
60	0,25	8,91	1,782	47,89	52,11
100	0,15	45,71	9,149	57,032	42,968
140	0,106	67,47	13,494	70,526	29,474
200	0,075	52,92	10,584	81,11	18,89

Analyse granulométrique**Après lavage (à l'eau)****5 - Basalte de Diack**

Tamis N°	Diamètre (mm)	Retenu (g)	% retenu	% retenu cumulé	Tamisats (%)
4	4,75	0	0	0	100
8	2,36	65,22	13,044	13,044	86,956
10	2,00	43,97	8,794	21,838	78,162
16	1,18	88,02	17,604	39,442	60,558
20	0,85	44,08	8,816	48,258	51,742
30	0,60	41,03	8,206	56,464	43,536
40	0,42	30,12	6,024	62,488	37,512
50	0,30	28,5	5,7	68,188	31,812
60	0,25	8,98	1,796	69,984	30,016
100	0,15	28,24	5,648	75,632	24,368
140	0,106	17,15	3,43	79,062	20,938
200	0,075	16,27	3,254	82,316	17,684



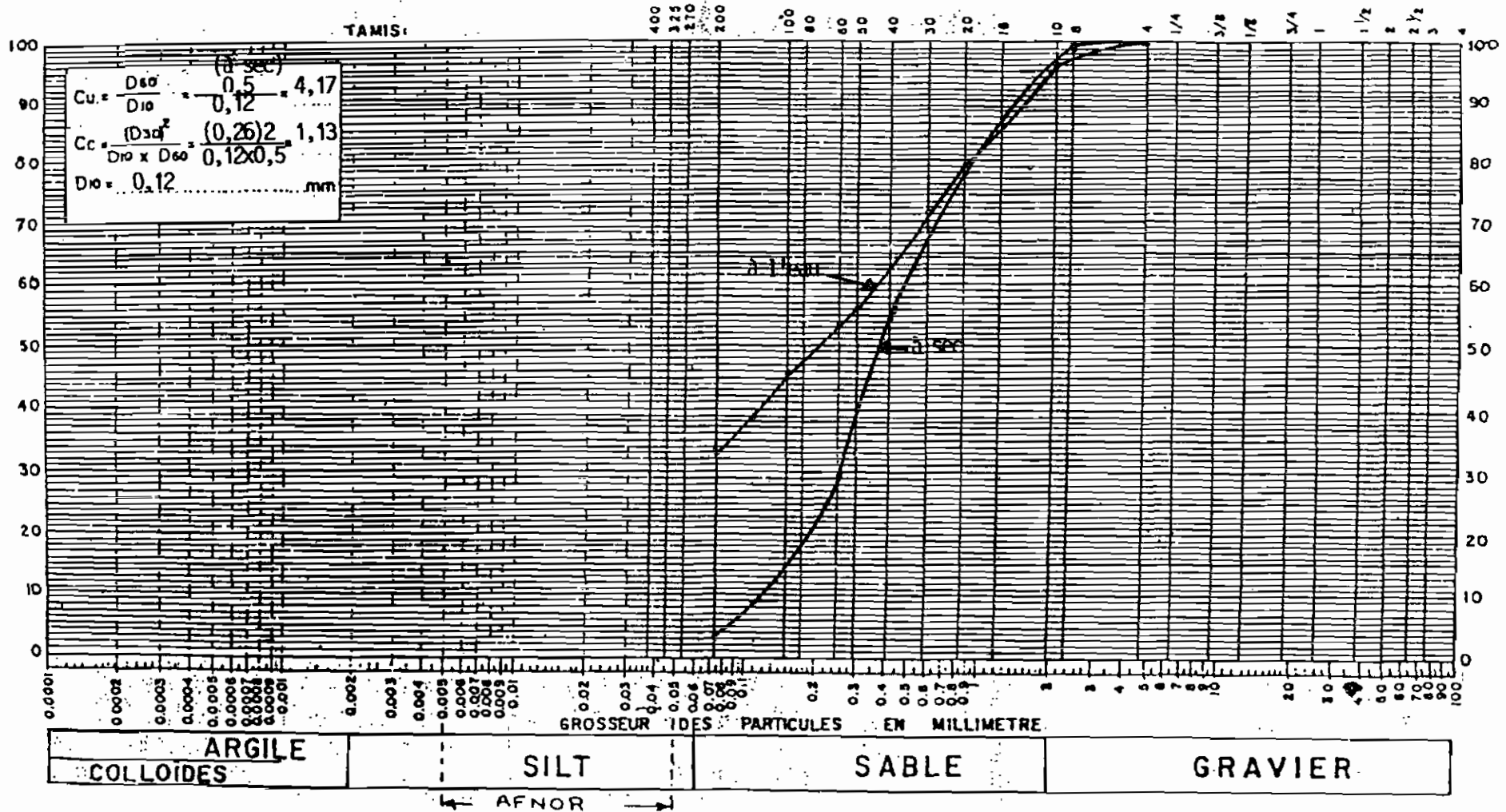
école polytechnique de thiès

Boîte Postale 10, Thiès, République du Sénégal

DATE _____

ECHANTILLON NO. _____

COURBE GRANULOMETRIQUE



Description : Calcaire de Bandia

Remarques :



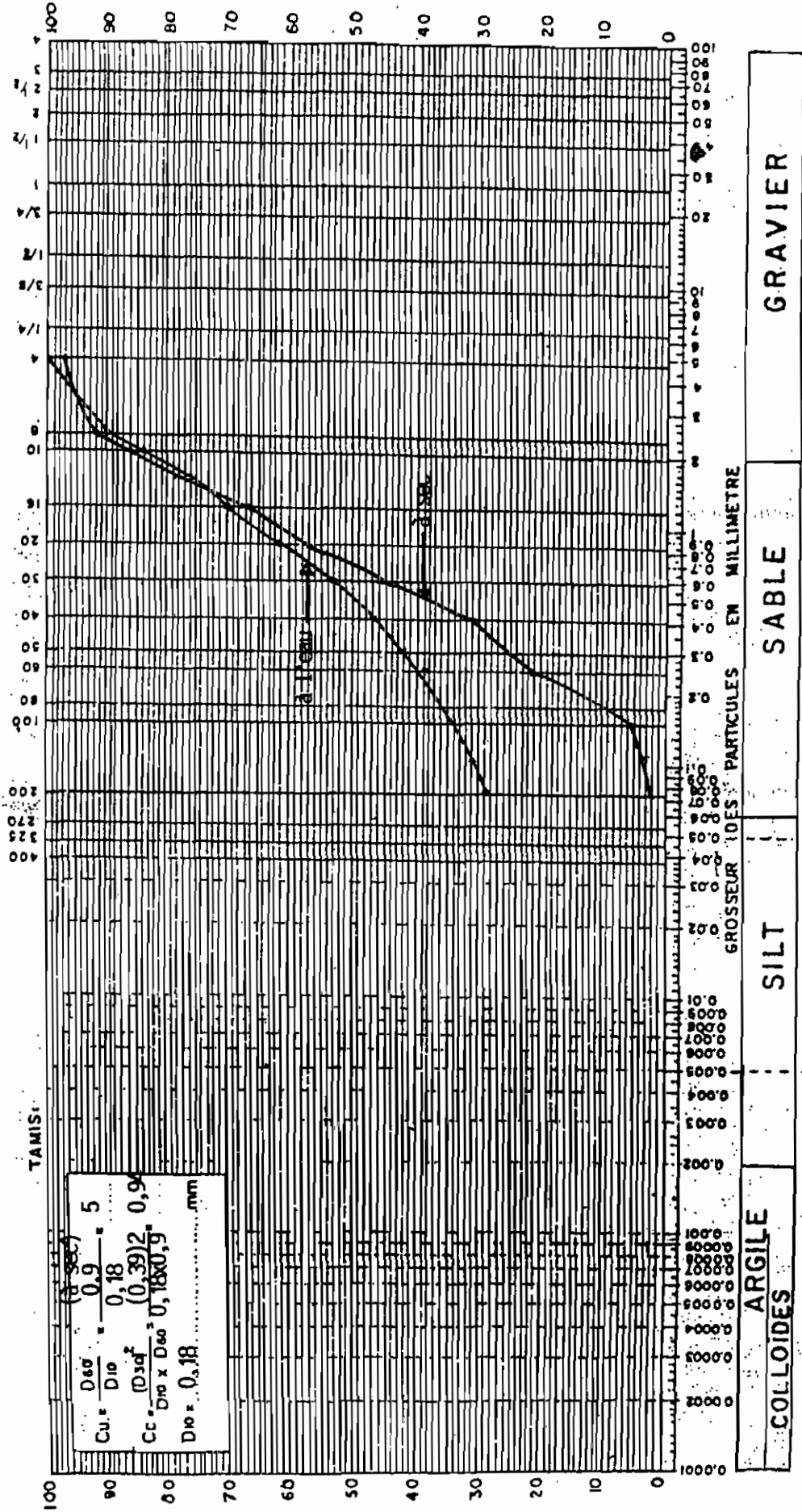
École polytechnique de Thiès

Boite Postale 10, Thiès, République du Sénégal

DATE _____

ECHANTILLON NO _____

COURBE GRANULOMETRIQUE



Description : Calcaire de Bangay

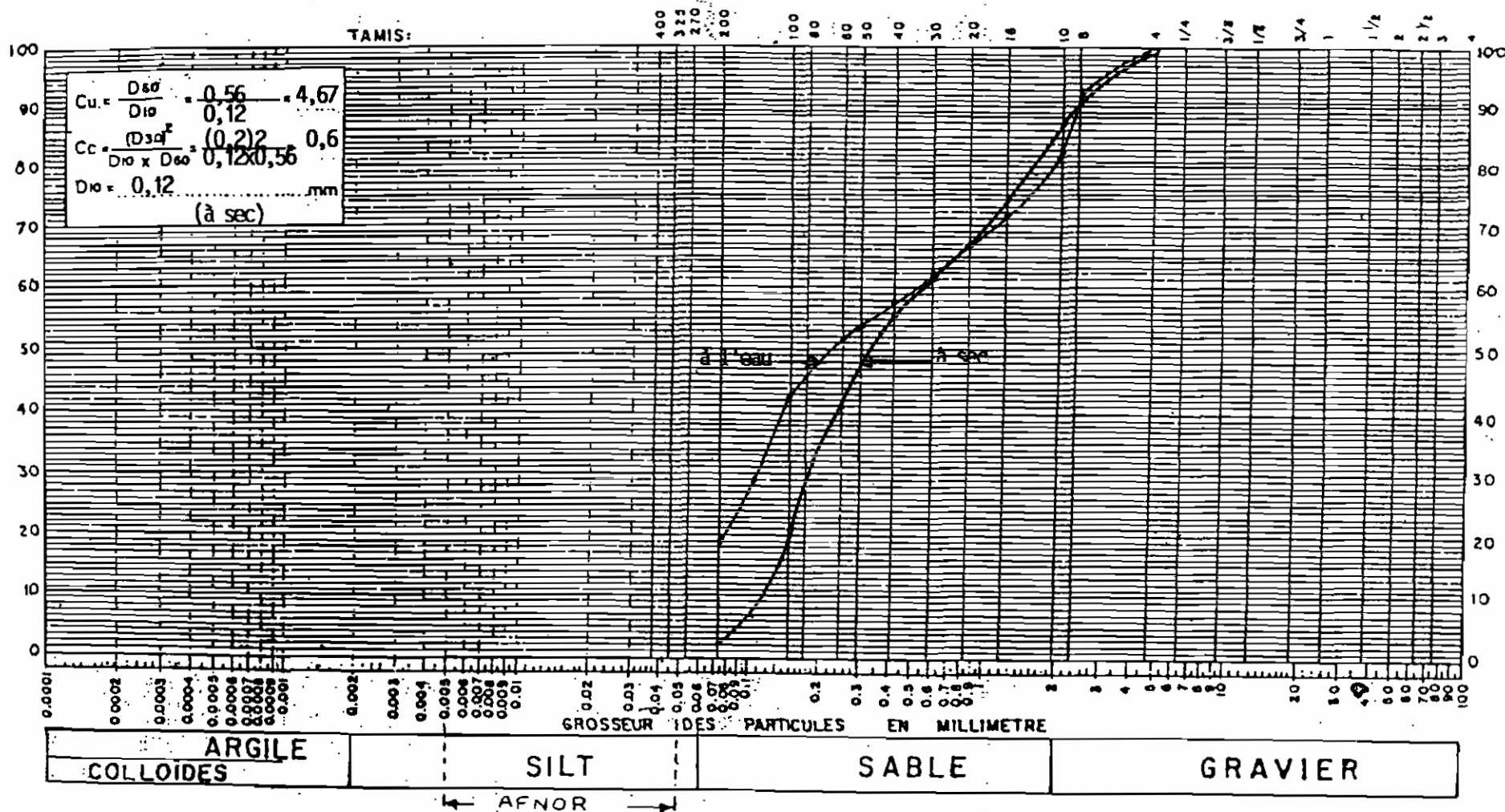
Remarques :



DATE _____

ECHANTILLON NO. _____

COURBE GRANULOMETRIQUE



Description : Gré de Toglou

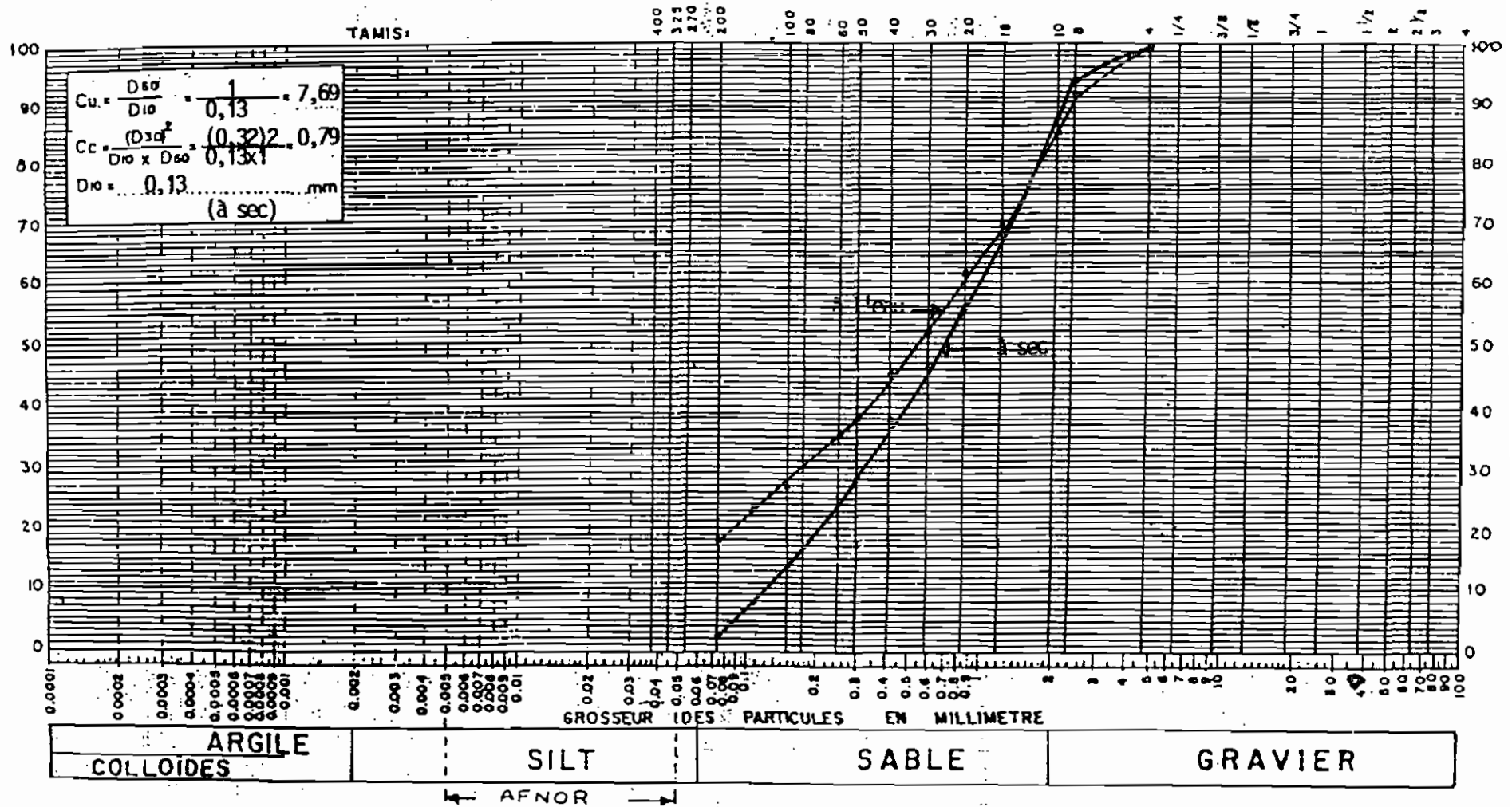
Remarques :



DATE _____

ECHANTILLON NO. _____

COURBE GRANULOMETRIQUE



Description : Silexite de Taïba

Remarques : _____



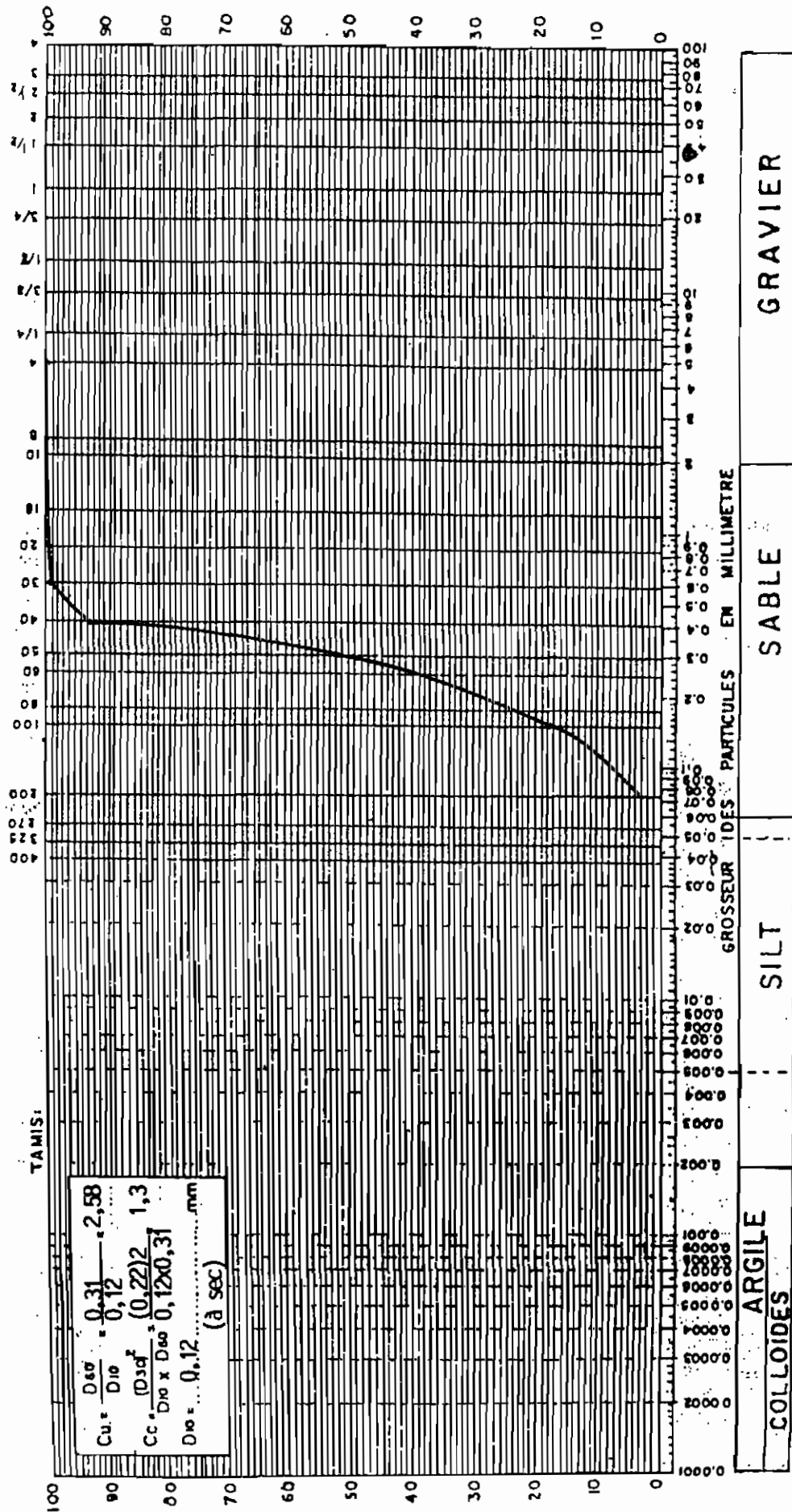
École polytechnique de Thiès

Boite Postale 10, Thiès, République du Sénégal

DATE _____

ECHANTILLON NO. _____

COURBE GRANULOMETRIQUE



Description : Sable du dure de Thiès (à sec)

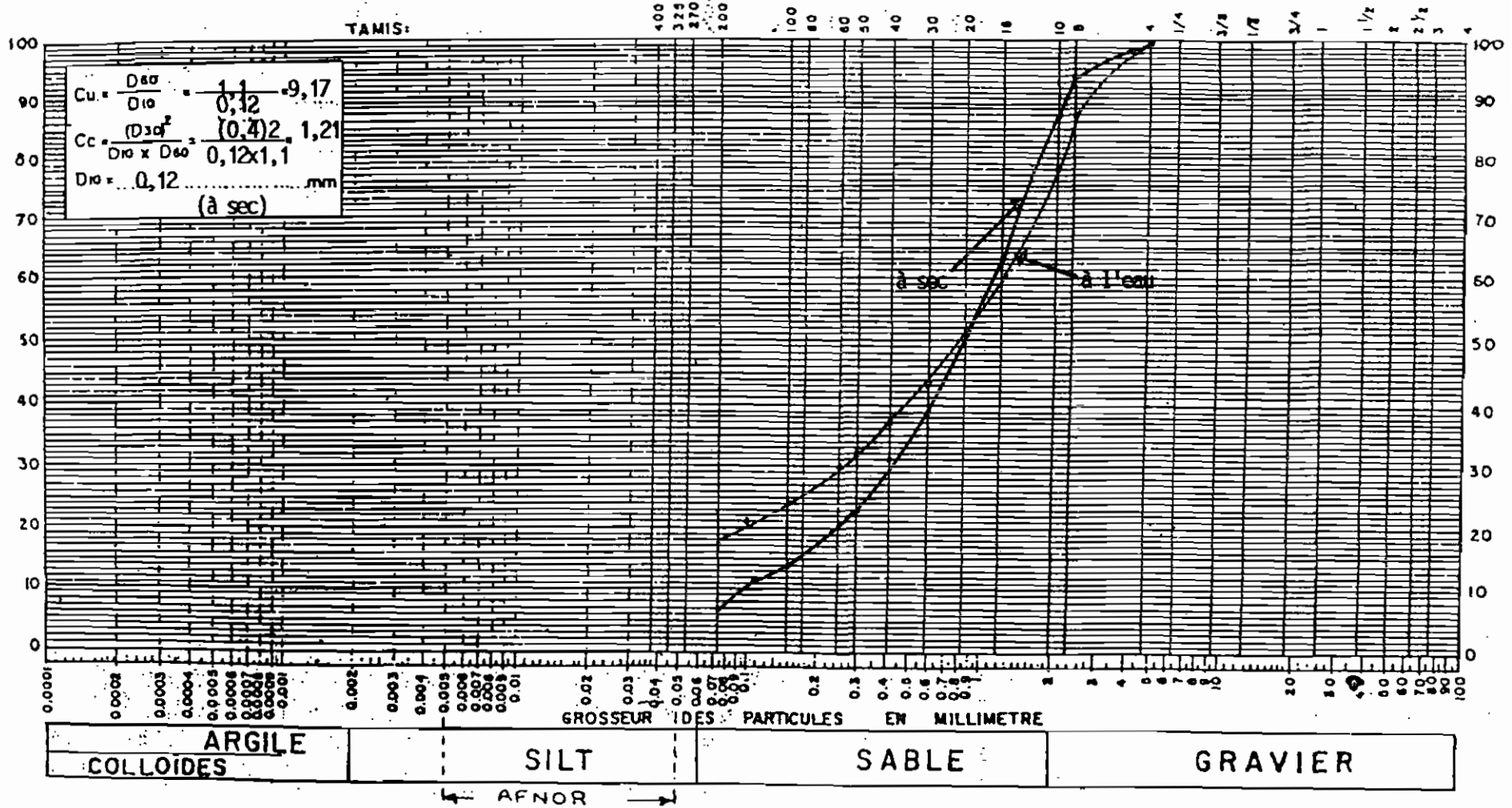
Remarques : _____



DATE _____

ECHANTILLON NO. _____

COURBE GRANULOMETRIQUE



Description : Basalte de Diack

Remarques :



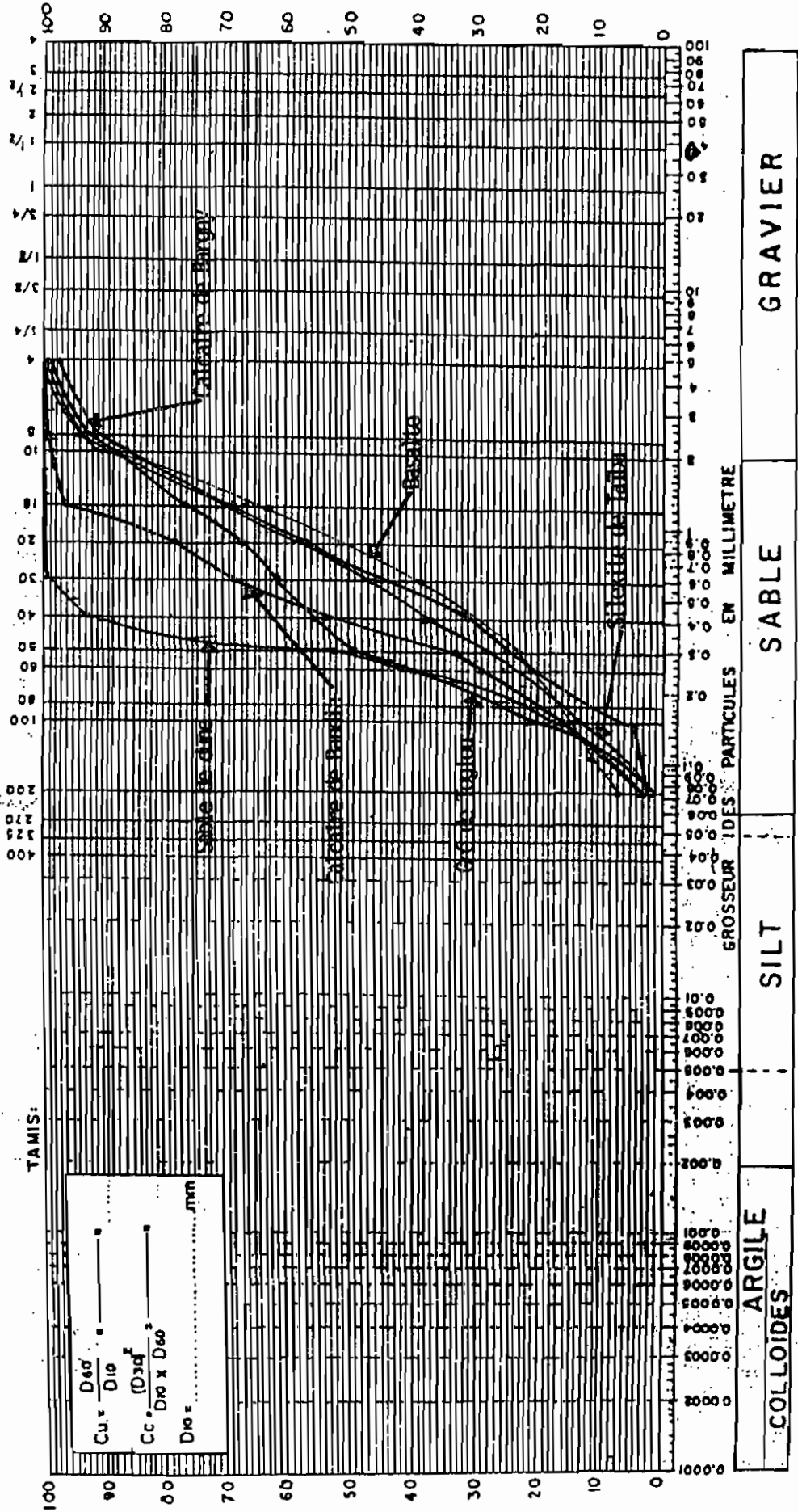
École polytechnique de thèses

Boite Postale 10, Thèses, République du Sénégal

DATE _____

ECHANTILLON NO. _____

COURBE GRANULOMETRIQUE



Description : Fuseau granulométrique des cinq sables fillérisés + Sable de dune (à sec)

Remarques :

ESSAI DE COMPACTAGE

CALCAIRE DE BANDIA

RÉSULTATS DE L'ESSAI

$\gamma_{d \max} = \mathbf{1.9} \text{ t/m}^3$ - $w \%$ optimum = $\mathbf{7.73}$

ESSAI N°	% approximatif d'eau ajoutée	1	4%	2	6%	3	8%	4	10%	5	12%
POIDS DU SOL HUMIDE + MOULE	W_1 (g)	4270		4339		4620		4603		4567	
POIDS DU MOULE	TARE (g)	332,81		332,81		332,81		332,81		332,81	
POIDS DU SOL HUMIDE	$W_1 - \text{TARE} = W_T$ (g)	3937,19		4006,19		4287,19		4270,19		4234,19	
POIDS UNITAIRE TOTAL	$W_T/V = \gamma_T$ (g/cm ³)	1,883		1,916		2,051		2,042		2,025	
POIDS UNITAIRE SEC	$\gamma_T / (1.0 + (w\%/100)) = \gamma_d$ (g/cm ³)	1,806		1,809		1,904		1,7		1,75	
RÉCIPIENT N°		T 1		AT 21		T 4		B 12		T 7	
POIDS DU RÉCIPIENT	TARE (g)	149,35		149,62		147,94		133,91		148,36	
POIDS DU SOL HUMIDE + RÉCIPIENT	W_1 (g)	341,45		346,16		425,67		417,71		401,41	
POIDS DU SOL SEC + RÉCIPIENT	W_2 (g)	333,65		335,18		405,75		370,20		367,25	
POIDS DE L'EAU	$W_1 - W_2 = W_w$ (g)	7,8		10,98		19,92		47,51		34,16	
POIDS DU SOL SEC	$W_2 - \text{TARE} = W_s$ (g)	184,3		185,56		257,81		236,29		218,89	
TENEUR EN EAU	$(W_w/W_s) \times 100 = w\%$	4,23		5,92		7,73		20,11		15,6	

ESSAI DE COMPACTAGE

CALCAIRE DE BARGNY

RÉSULTATS DE L'ESSAI

$\gamma_{d \max} = \mathbf{1,88} \text{ t/m}^3$ - $w \%$ optimum = $\mathbf{3,97}$

ESSAI N°	% approximatif d'eau ajoutée	1	4%	2	6%	3	8%	4	10%	5	12%
POIDS DU SOL HUMIDE + MOULE	W_1 (g)	4252		4260		4410		4612		4534	
POIDS DU MOULE	TARE (g)	334,60		334,60		329,42		329,42		329,42	
POIDS DU SOL HUMIDE	$W_1 - \text{TARE} = W_T$ (g)	3917,4		3925,4		4080,58		4282,58		4204,58	
POIDS UNITAIRE TOTAL	$W_T/V = \gamma_T$ (g/cm ³)	1,874		1,8775		1,952		2,048		2,011	
POIDS UNITAIRE SEC	$\gamma_T/(1.0 + (w\%/100)) = \gamma_d$ (g/cm ³)	1,807		1,869		1,877		1,8		1,833	
RÉCIPIENT N°		AT 10		AT 24		T 7		AT 21		AT 14	
POIDS DU RÉCIPIENT	TARE (g)	147,88		138,39		148,37		149,61		148,10	
POIDS DU SOL HUMIDE + RÉCIPIENT	W_1 (g)	345,11		373,67		473,10		516,24		434,22	
POIDS DU SOL SEC + RÉCIPIENT	W_2 (g)	338,05		372,55		460,69		471,85		408,84	
POIDS DE L'EAU	$W_1 - W_2 = W_w$ (g)	7,06		1,12		12,41		44,39		25,38	
POIDS DU SOL SEC	$W_2 - \text{TARE} = W_s$ (g)	190,17		234,16		312,32		322,24		260,74	
TENEUR EN EAU	$(W_w/W_s) \times 100 = w\%$	3,71		0,48		3,97		13,775		9,73	

ESSAI DE COMPACTAGE

GRE DE TOGLOU

RÉSULTATS DE L'ESSAI

$\gamma_{d \max} = 1.865 \text{ t/m}^3$ - w % optimum = **9.44**

ESSAI N°	% approximatif d'eau ajoutée	1 4%	2 6%	3 8%	4 10%	5 12%
POIDS DU SOL HUMIDE + MOULE	W_1 (g)	4202	4359	4500	4600	4510
POIDS DU MOULE	TARE (g)	331,70	331,70	331,70	331,70	331,70
POIDS DU SOL HUMIDE	$W_1 - \text{TARE} = W_T$ (g)	3870,3	4027,3	4168,3	4268,3	4178,3
POIDS UNITAIRE TOTAL	$W_T/V = \gamma_T$ (g/cm ³)	1,851	1,926	1,994	2,041	1,998
POIDS UNITAIRE SEC	$\gamma_T / (1.0 + (w\%/100)) = \gamma_d$ (g/cm ³)	1,7796	1,820	1,851	1,865	1,792
RÉCIPIENT N°		A	AT 13	AT 7	AT 10	AT 18
POIDS DU RÉCIPIENT	TARE (g)	154,82	146,5	147,01	147,98	152,40
POIDS DU SOL HUMIDE + RÉCIPIENT	W_1 (g)	287,33	327,55	313,95	415,36	472,19
POIDS DU SOL SEC + RÉCIPIENT	W_2 (g)	282,22	317,61	301,99	392,29	439,16
POIDS DE L'EAU	$W_1 - W_2 = W_w$ (g)	5,11	9,94	11,96	23,07	33,03
POIDS DU SOL SEC	$W_2 - \text{TARE} = W_s$ (g)	187,4	171,11	154,98	244,31	286,76
TENEUR EN EAU	$(W_w/W_s) \times 100 = w\%$	4,01	5,81	7,72	9,44	11,52

ESSAI DE COMPACTAGE

SILEXITE DE TAIBA

RÉSULTATS DE L'ESSAI

$\gamma_{d \max} = \mathbf{1,94} \text{ t/m}^3 - w \% \text{ optimum} = \mathbf{6}$

ESSAI N°	% approximatif d'eau ajoutée	1 4%	2 6%	3 8%	4 10%	5 12%
POIDS DU SOL HUMIDE + MOULE	W_1 (g)	4140	4226	4405	4624	4573
POIDS DU MOULE	TARE (g)	330	330	330	331,75	331,75
POIDS DU SOL HUMIDE	$W_1 - \text{TARE} = W_T$ (g)	3810	3896	4075	4292,25	4241,25
POIDS UNITAIRE TOTAL	$W_T/V = \gamma_T$ (g/cm ³)	1,822	1,863	1,949	2,053	2,028
POIDS UNITAIRE SEC	$\gamma_T / (1.0 + (w\%/100)) = \gamma_d$ (g/cm ³)	1,764	1,84	1,81	1,937	1,7488
RÉCIPIENT N°		AT 26	AT 19	AT 13	AT16	AT7
POIDS DU RÉCIPIENT	TARE (g)	144,10	151,15	146,40	152,96	146,96
POIDS DU SOL HUMIDE + RÉCIPIENT	W_1 (g)	371,11	373,17	365,34	470,89	524,89
POIDS DU SOL SEC + RÉCIPIENT	W_2 (g)	363,89	370,44	349,74	452,91	472,86
POIDS DE L'EAU	$W_1 - W_2 = W_w$ (g)	7,22	2,73	15,6	17,98	52,03
POIDS DU SOL SEC	$W_2 - \text{TARE} = W_s$ (g)	219,79	219,29	203,34	299,95	325,96
TENEUR EN EAU	$(W_w/W_s) \times 100 = w\%$	3,285	1,245	7,672	5,994	15,962

ESSAI DE COMPACTAGE

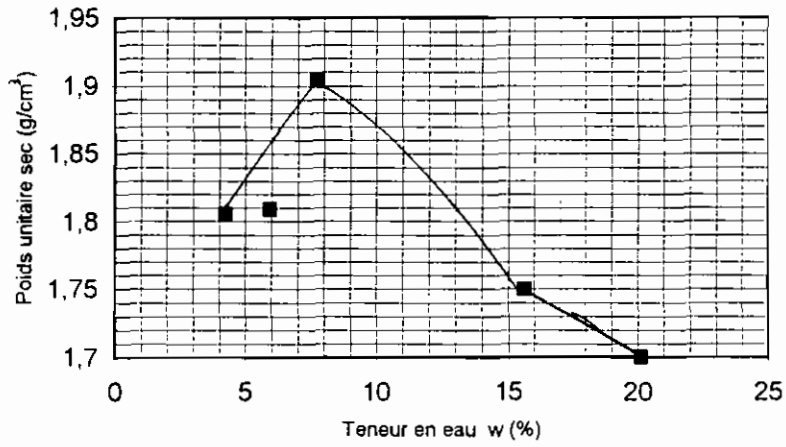
BASALTE DE DIACK

RÉSULTATS DE L'ESSAI

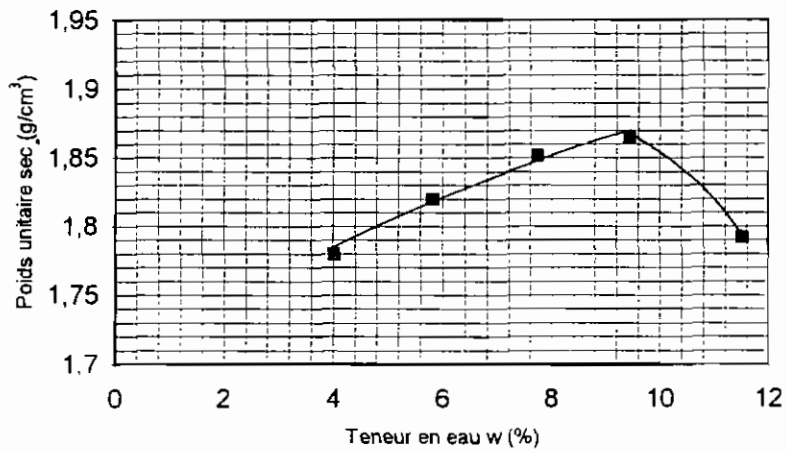
$\gamma_{d \max} = \mathbf{1,98} \text{ t/m}^3$ - w % optimum = **5,76**

ESSAI N°	% approximatif d'eau ajoutée	1 4%	2 6%	3 8%	4 10%	5 12%
POIDS DU SOL HUMIDE + MOULE	W_1 (g)	4390	4514	4726	4716	4737
POIDS DU MOULE	TARE (g)	333	333	333	333	333
POIDS DU SOL HUMIDE	$W_1 - \text{TARE} = W_T$ (g)	4057	4181	4393	4383	4404
POIDS UNITAIRE TOTAL	$W_T/V = \gamma_T$ (g/cm ³)	1,94	1,9998	2,101	2,096	2,106
POIDS UNITAIRE SEC	$\gamma_T / (1.0 + (w\%/100)) = \gamma_d$ (g/cm ³)	1,924	1,873	1,943	1,982	1,846
RÉCIPIENT N°		A	AT 18	10	AT 15	AT 15
POIDS DU RÉCIPIENT	TARE (g)	154,74	145,18	149,85	156,01	152,21
POIDS DU SOL HUMIDE + RÉCIPIENT	W_1 (g)	371,32	416,14	436,25	470,57	516,02
POIDS DU SOL SEC + RÉCIPIENT	W_2 (g)	369,54	400,19	414,74	453,43	471,16
POIDS DE L'EAU	$W_1 - W_2 = W_w$ (g)	1,78	15,95	21,51	17,14	44,86
POIDS DU SOL SEC	$W_2 - \text{TARE} = W_s$ (g)	214,8	255,01	264,89	297,42	318,95
TENEUR EN EAU	$(W_w/W_s) \times 100 = w\%$	0,829	6,2546	8,12	5,76	14,06

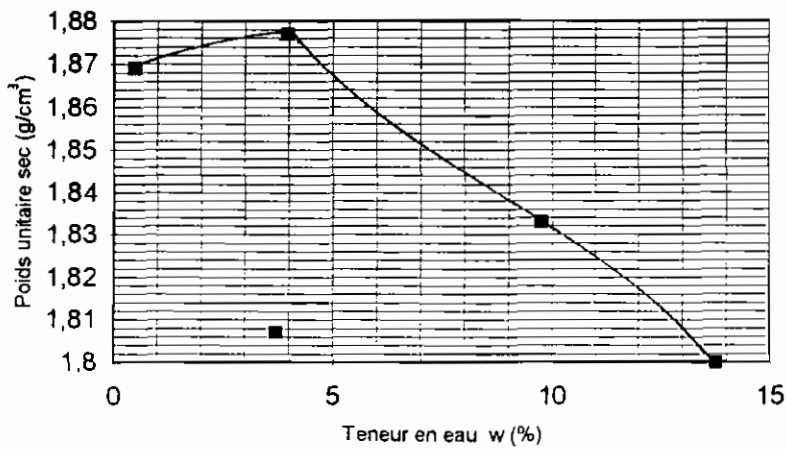
CALCAIRE DE BANDIA



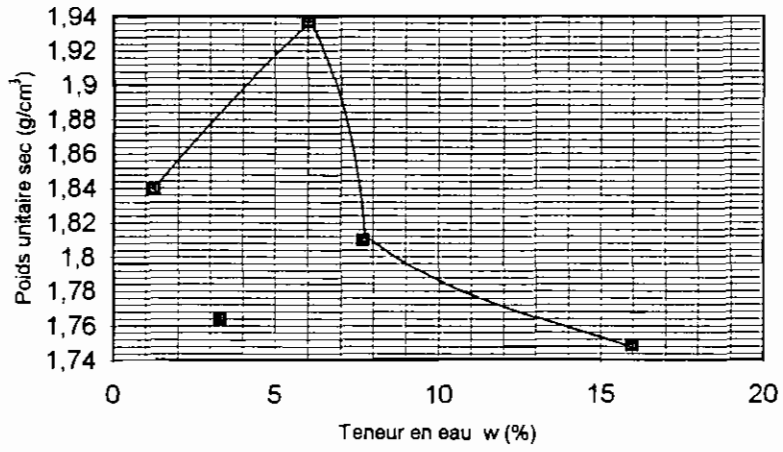
GRE DE TOGLOU



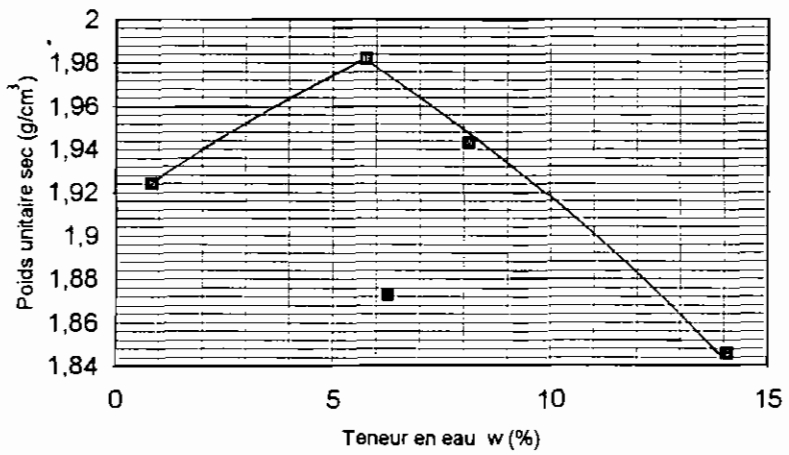
CALCAIRE DE BARGNY



SILEXITE DE TAIBA



BASALTE DE DIACK



Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Calcaire de Bandia		
Essai n°	1	2	3
Pycnomètre	A3	4B	3R
volume du pycnomètre(ml)	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	384,24	386,39	366,55
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	352,48	354,24	334,79
Réceptier d'évaporation n°	V0618	V0617	V061
Précipier + sol sec (g)	278,46	275,27	288,6
Précipier Tare (g)	227,8	224,6	238,09
Psol sec Ps (g)	50,66	50,67	50,51
V = Ps + Ppe -Ppes	18,9	18,52	18,75
Gs à T (°C) = Ps/V	2,68	2,73	2,69
Facteur de correction à T (°C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20°C = Gs à T (°C) x a	2,67	2,72	2,68
Moyenne d'au moins 3 essais		2,69	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Calcaire de Bargny		
Essai n°	1	2	3
Pycnomètre	A4	A2	3R
volume du pycnomètre(ml)	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	383,81	381,87	366,5
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	351,9	350,04	334,79
Réceptier d'évaporation n°	V0614	V0611	V02
Précipier + sol sec (g)	277,65	273,02	191,77
Précipier Tare (g)	227,21	222,4	141,24
Psol sec Ps (g)	50,44	50,62	50,53
V = Ps + Ppe -Ppes	18,53	18,79	18,82
Gs à T (°C) = Ps/V	2,72	2,69	2,68
Facteur de correction à T (°C) table	0,99681	0,99681	0,99681
Gs à 20°C = Gs à T (°C) x a	2,71	2,68	2,67
Moyenne d'au moins 3 essais		2,69	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Gré de Toglou		
Essai n°	1	2	3
Pycnomètre	A5	6B	4B
volume du pycnomètre(ml)	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	378,42	367,14	385,67
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	347,5	335,46	354,24
Réceptier d'évaporation n°	V0613	V02	V010
Précipier + sol sec (g)	278,49	191,2	189,79
Précipier Tare (g)	228,51	141,24	139,92
Psol sec Ps (g)	49,98	49,96	49,87
V = Ps + Ppe -Ppes	19,06	18,28	18,44
Gs à T (°C) = Ps/V	2,62	2,73	2,7
Facteur de correction à T (°C) table	0,99861	0,99861	0,99861
Gs à 20°C = Gs à T (°C) x a	2,61	2,71	2,69
Moyenne d'au moins 3 essais		2,67	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Silexite de Taïba		
Essai n°	1	2	3
Pycnomètre	4B	A3	2R
volume du pycnomètre(ml)	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	386,23	384,36	383,34
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	354,24	352,48	351,28
Réceptier d'évaporation n°	V010	V01	A6
Précipier + sol sec (g)	190,24	191,53	200,42
Précipier Tare (g)	139,92	141,27	150,15
Psol sec Ps (g)	50,32	50,26	50,27
V = Ps + Ppe -Ppes	18,33	18,38	18,21
Gs à T (°C) = Ps/V	2,74	2,73	2,76
Facteur de correction à T (°C) table	0,99861	0,99861	0,99861
Gs à 20°C = Gs à T (°C) x a	2,73	2,72	2,75
Moyenne d'au moins 3 essais		2,73	

Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Sable de dune		
Essai n°	1	2	3
Pycnomètre	3R	2R	A4
volume du pycnomètre(ml)	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	366,03	382,64	384,85
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	334,79	351,28	351,9
Récipient d'évaporation n°	V01	V0614	V0611
Précipient + sol sec (g)	191,1	277,05	272,36
Précipient Tare (g)	141,27	227,21	222,4
Psol sec Ps (g)	49,83	49,84	49,96
V = Ps + Ppe -Ppes	18,59	18,48	19,01
Gs à T (°C) = Ps/V	2,68	2,69	2,62
Facteur de correction à T (°C) table	0,99861	0,99861	0,99861
Gs à 20°C = Gs à T (°C) x a	2,67	2,68	2,61
Moyenne d'au moins 3 essais		2,65	

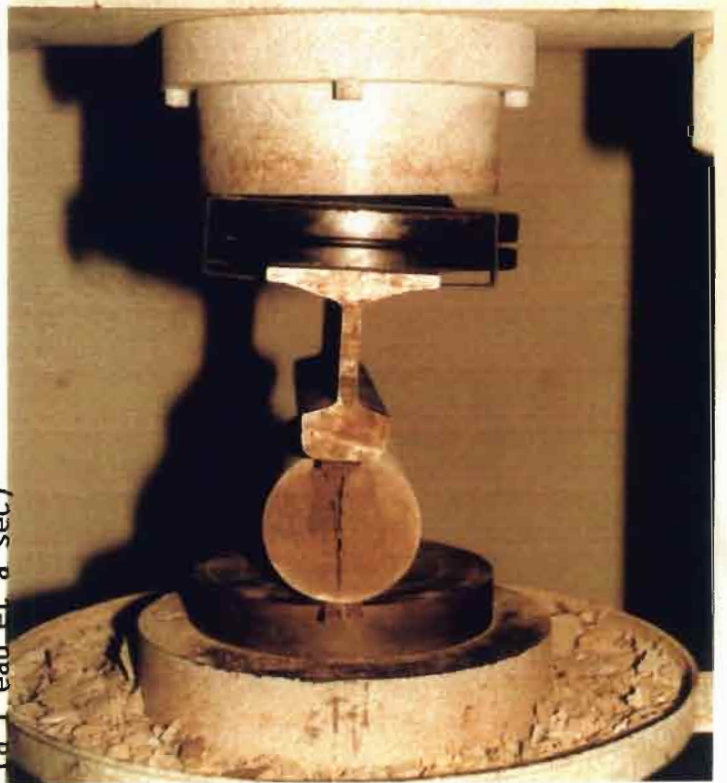
Poids spécifique des Constituants solides			
Description	Basalte de Diack		
Essai n°	1	2	3
Pycnomètre	A5	A4	6B
volume du pycnomètre(ml)	500	500	500
Méthode de désaération	vide	vide	vide
Ppic + Peau + Psol Ppes (g)	380,13	384,61	368,59
Température (C)	31	31	31
Ppic + Peau Ppe (g)	347,5	351,9	335,46
Récipient d'évaporation n°	C5	C2	N° 200
Précipient + sol sec (g)	289,39	296,46	290,76
Précipient Tare (g)	240,28	247,3	241,24
Psol sec Ps (g)	49,11	49,16	49,52
V = Ps + Ppe -Ppes	16,48	16,45	16,39
Gs à T (°C) = Ps/V	2,97	2,98	3,02
Facteur de correction à T (°C) table	0,99861	0,99861	0,99861
Gs à 20°C = Gs à T (°C) x a	2,96	2,97	3,01
Moyenne d'au moins 3 essais		2,98	



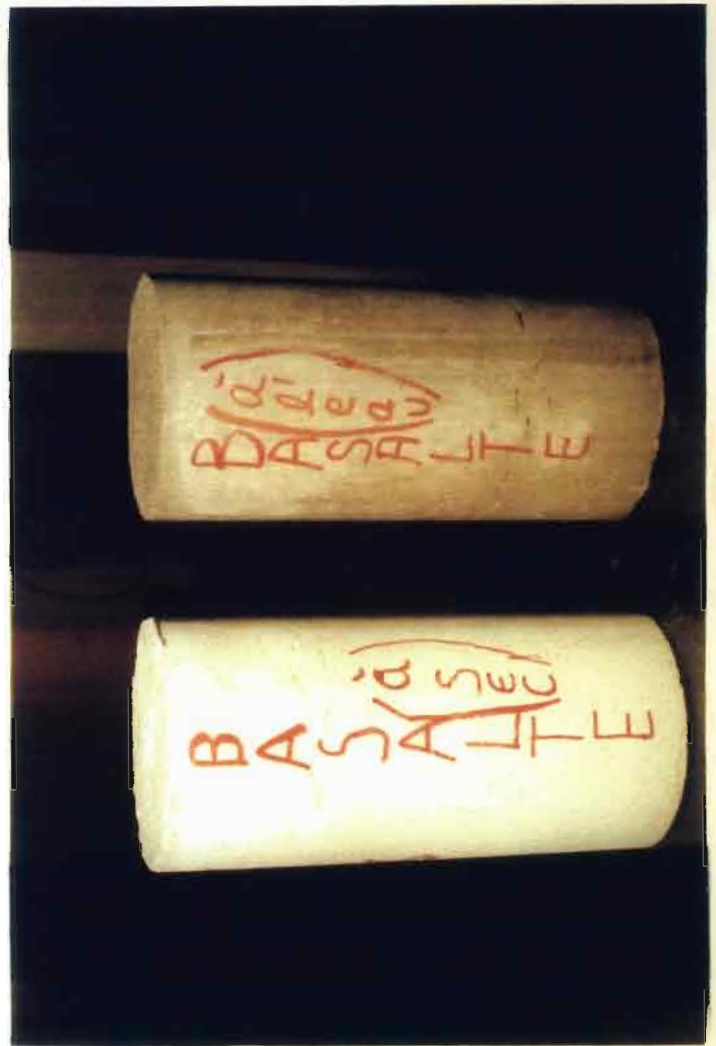
Eprouviettes des bétons de sable à ajouts de silixite (à l'eau et à sec)



Eprouviettes des bétons de sable à ajouts de gré (à l'eau et à sec)



Rupture d'une épreuve



Eprouviettes des bétons de sable à ajout de basalte (à l'eau et à sec)