

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL
UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



GC.0663

**RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ÉTUDE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION**

**Titre : MISE EN ÉVIDENCE D'UN OPTIMUM DE
FINES DANS LES SABLES FILLÉRISÉS
POUR BÉTON DE SABLE : APPLICATION À
DES GRANULATS DU SÉNÉGAL**

Auteur : Mohamadou Bamba DIAGNE
Directeur : Ismaïla GUEYE
Codirecteur : Serigne L. THIOUNE Massamba DIENE
Directeur externe : Ibrahima CISSÉ

Juillet 1996

SOMMAIRE

L'objectif de ce rapport final est de présenter une étude sur la mise en évidence d'un optimum de fines dans les sables fillérisés pour béton de sable avec application aux chaussées et aux parpaings de remplissage. Ceci est une des réponses possibles devant la situation de raréfaction progressive des ressources et des consommations accrues d'énergie qui ont actuellement rendues la construction routière et d'habitations onéreuses.

Dans ce rapport, après une présentation du béton de sable en guise d'introduction, une présentation sommaire sur les granulats sera faite par rapport à la situation actuelle et ce qu'il pourrait en être dans un futur proche.

Mais il sera surtout question de donner les spécifications de nos fillers et de poser de manière générale les problèmes posés par les vides en matière de construction. Cela sera suivi par les propositions de solution, ce sera l'étude bibliographique.

La troisième partie traitera des travaux expérimentaux qui constituent le noeud de ce travail. Il s'agit là d'essais physico-mécaniques classiques largement connus en travaux de génie civil qui doivent nous permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- la prévision des performances d'un certain béton de sable à partir de la teneur en fines naturelle du sable fillérisé

- de savoir si c'est nécessaire, la quantité de fines à ajouter au sable fillérisé pour lui conférer une résistance maximale ;

- de savoir aussi, à dosage en ciment équivalent lequel des sables fillerisés usuels (basalte, grès, silixite, calcaire) donnera la plus grande résistance ou les meilleures caractéristiques physiques ;

- et enfin proposer un classement des sables fillérisés en fonction des propriétés recherchées.

- montrer les résultats obtenus et les performances du matériau.

DÉDICACE

Je dédie ce travail

A Dieu tout puissant (Allah) et à son prophète Mohamed (PSL)

A mon guide éclairé Cheikh Ahmadou Bamba Khadimou Rassoul

A feu mon père Mamadou DIAGNE qui a fait de moi un partisan des causes de
raison

A ma chère mère qui a su conserver l'héritage de mon père

A mes frères et soeurs qui m'ont toujours soutenus

A ma futur femme que je chérie déjà même l'ignorant

<< Il faut toujours affronter la réalité de face. C'est dans
les moments difficiles qu'on connaît les grands hommes >> **Montesquieu**

REMERCIEMENTS

A travers ce mémoire, je voudrais rendre hommage à certaines personnes qui ont contribué de près ou de loin à son élaboration.

Tout d'abord **Mr Ismaïla GUEYE**, Professeur à l'École Polytechnique de Thiès pour son soutien pédagogique tout au long de ce travail.

Mr Massamba DIENE, Professeur à l'École Polytechnique de Thiès pour sa disponibilité et son apport pédagogique constant.

Mr Serigne Lèye THIOUNE, Directeur de l'Aménagement Urbain à la Communauté Urbaine de Dakar pour sa collaboration franche et sincère.

Mr Ibrahima CISSÉ, Professeur à l'ex ENSUT pour nous avoir choisi ce sujet et de nous avoir apporté son savoir faire à tout moment.

Le Colonel Pape Mbareck DIOP qui nous a été d'un apport considérable pour notre documentation.

Le laboratoire d'essai de la SOCOCIM à travers **Mr Malick AMAR** pour nous avoir aidé à réaliser certains essais.

Le Département de Génie-Civil de l'École Polytechnique de Thiès tout entier.

A **Mr Lamine LO**, Technicien en mécanique des sols au laboratoire de géotechnique de l'École Polytechnique de Thiès

A **Mlle Mame Coumba DIAGNE** qui nous a assuré la saisie entière de ce travail.

LISTE DES FIGURES

- Fig.1.1** Compacité en fonction de la taille des grains
- Fig.1.2** Effet de l'addition sur la résistance du béton
en fonction de E/C
- Fig.1.3.a** Effet de la résistance sur la granulométrie :
variation de E/C
- Fig.1.3.b** Effet de la résistance sur la granulométrie :
variation du dosage en ciment
- Fig.2.1** Remplissage théorique d'un récipient par le
mélange de deux granulats
- Fig.2.2** Effet de paroi
- Fig.2.3** Effet d'interférence
- Fig.2.4** Les deux interactions entre granulats : les effets
de paroi et d'interférence
- Fig.2.5** Mélange de deux granulats dont un est très fin
- Fig.2.6** Porosité et étendu granulaire
- Fig.2.7** Consistance en fonction des dosages en eau et en
ciment

Fig.3.1 Variation de la résistance en traction en fonction de la teneur en fines (pour chaussées)

Fig.3.2 Variation de la résistance en traction en fonction de la teneur en fines (pour parpaings)

Fig.3.3 Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en fines (pour chaussées)

Fig.3.4 Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en fines (pour parpaings)

Fig.3.5 Variation de la résistance en compression en fonction du temps (mûrissement à l'air)

Fig.3.6 Variation de la résistance en compression en fonction du temps (mûrissement à l'eau)

Fig.3.7 Résistance en fonction de la densité (application aux chaussées)

Fig.3.8 Résistance en fonction de la densité (application aux parpaings)

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1.1** Répartition de la production nationale de granulats
- Tableau 1.2** Estimation de la demande nationale en granulats
- Tableau 1.3** Dosage minimum en ciment suivant la granularité
- Tableau 3.1** Résultats de l'analyse granulométrique à sec
- Tableau 3.2** Résultats de l'analyse granulométrique après lavage
- Tableau 3.3** Résultat de l'analyse chimique des ajouts
- Tableau 3.4** Densité sèche et poids spécifique des ajouts
- Tableau 3.5** Surface spécifique des ajouts
- Tableau 3.6** Absorptivité des ajouts
- Tableau 3.7** Formulation résumée pour les chaussées
- Tableau 3.8** Formulation résumée pour les parpaings de remplissage

- Tableau 3.9** Résistance à la traction par fendage pour
béton de chaussée en fonction du temps
(mûrissement à l'air)
- Tableau 3.10** Résistance à la traction par fendage pour
béton de chaussée en fonction du temps
(mûrissement à l'eau)
- Tableau 3.11** Résistance en traction par fendage pour
béton de chaussée en fonction du temps
(mûrissement à l'eau)
- Tableau 3.12** Résistance en traction par fendage pour
béton de chaussée en fonction du temps
(mûrissement à l'eau)
- Tableau 3.13** Résistance en compression en fonction du
temps pour béton de chaussée (mûrissement à
l'air)
- Tableau 3.14** Résistance en compression en fonction du
temps pour béton de chaussée (mûrissement à
l'eau)
- Tableau 3.15** Résistance en compression en fonction du
temps pour béton de parpaings (mûrissement à
l'air)
- Tableau 3.16** Résistance en compression en fonction du

temps pour béton de parpaings (mûrissement à l'eau)

Tableau 3.17 Classification des matériaux d'ajouts

Tableau 3.18 Caractéristiques physiques des bétons de sable pour chaussées

Tableau 3.19 Caractéristiques physiques des bétons de sable pour parpaings

Tableau 3.20 Espacement des joints en fonction de l'épaisseur de la dalle

Tableau 3.21 Différentes classes de trafic

Tableau 3.22 Différentes classes de portance de la plateforme

Tableau 3.23 Classes de résistance pour différents niveaux de trafic

Tableau 4.1 Epaisseur des couches de roulement et de revêtement

Tableau 4.2 Dosage des différents constituants

Tableau 4.3 Quantité de matériaux pour 1 km de béton de sable

Tableau 4.4 Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de basalte

Tableau 4.5 Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de silicite

Tableau 4.6 Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de calcaire de Bandia

Tableau 4.7 Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de calcaire de Bargny

Tableau 4.8 Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de grès

LISTE DES SYMBOLES

- g = volume absolu de gros granulat
- S = volume absolu de granulat fin
- u = indice des vides pour un mélange sec
- A = indice des vides du granulat fin
- G = indice des vides du granulat grossier
- V = volume des vides du mélange
- d_s = dimension moyenne des grains du granulat fin
- d_g = dimension moyenne des grains du granulat grossier
- N = nombre de grains
- Sg = surface des grains grossiers
- E.S = équivalent de sable
- M_f = module de finesse
- C_u = coefficient d'uniformité
- C_c = coefficient de courbure
- Ps = porosité
- G/S = rapport gravier sur sable
- E/C = rapport eau sur ciment
- L.R.P.C. : Laboratoire Régional des ponts et chaussées
(Paris)
- L.C.P.C. : Laboratoire central des ponts et chaussées
(Bordeaux)
- D_{max} = diamètre maximal
- d = densité sèche
- s = poids spécifique
- CEBTP : Centre Expérimental de Recherche et d'Étude du
Bâtiment et des Travaux Publics
- DEMG : Direction de l'Énergie des Mines et de la Géologie

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--------------------|-----|
| SOMMAIRE | I |
| DÉDICACE | III |
| REMERCIEMENTS | IV |
| LISTE DES FIGURES | V |
| LISTE DES TABLEAUX | VII |
| LISTE DES SYMBOLES | XI |

| | |
|---------------------|----------|
| INTRODUCTION | 1 |
|---------------------|----------|

CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DE LA SITUATION ACTUELLE SUR LES FILLERS ET LES BÉTONS DE SABLE

| | |
|---|-----------|
| 1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES FILLERS UTILISÉS EN BÉTON DE SABLE | 3 |
| 1.2 PRODUCTION DES FILLERS AU SÉNÉGAL | 5 |
| 1.2.1 Les roches basaltiques | 5 |
| 1.2.2 Estimation quantitative | 6 |
| 1.3 GÉNÈSE DE L'UTILISATION DES BÉTONS DE SABLE | 7 |
| 1.3.1 Les expériences française | 8 |
| 1.3.2 Les expériences soviétiques | 8 |
| 1.3.3 L'état des travaux au Sénégal | 10 |
| 1.4 GÉNÉRALITÉ SUR LES BÉTONS DE SABLE | 11 |
| 1.4.1 Définitions générales | 11 |
| 1.4.2 Définition des différentes composantes | 14 |
| 1.5 PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES | 16 |
| 1.5.1 Granularité et maniabilité | 16 |
| 1.5.2 Granulométrie et résistance | 16 |
| 1.6 AUTRES PROPRIÉTÉS | 19 |
| 1.6.1 Retrait et fluage | 19 |

| | |
|---|-----------|
| 1.7 Durabilité des bétons de sable | 20 |
| 1.8 INFLUENCE DE L'AJOUT DE GRAVILLONS | 21 |
| 1.8.1 La résistance aux chocs | 21 |
| 1.8.2 La résistance à l'attrition | 22 |
| 1.8.3 La résistance à la compression | 22 |
| 1.8.4 Le module d'élasticité | 22 |

CHAPITRE 2 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE **25**

2.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES VIDES **26**

| | |
|---|-----------|
| 2.1.1 Les mélanges de deux granulats secs (grossiers et fins) : les effets de paroi et d'interférence | 26 |
| 2.1.2 La théorie de la granularité optimale selon CAQUOT (1937) | 43 |
| 2.1.3 Remarques critiques sur la théorie de CAQUOT | 49 |

2.2 LES MÉLANGES DE GRANULAT D'EAU ET DE FINES (CIMENT + AJOUTS) **52**

| | |
|---|-----------|
| 2.2.1 Les trois catégories de mélange | 53 |
| 2.2.1.1 Mélanges riches en ciment (pauvres en ajout) | 53 |
| 2.2.1.2 Mélanges pauvres en ciment (riches en ajout) | 53 |
| 2.2.1.3 Mélanges intermédiaires en ciment (riches en ajout) | 54 |
| 2.2.2 Les méthodes de compositions et leurs hypothèses | |
| 2.2.2.1 Les conditions de mise en oeuvre | 56 |
| 2.2.2.2 Le dosage en ciment et en fines | 57 |
| 2.2.2.3 Le dosage en eau | 58 |
| 2.2.2.4 Les proportions des granulats inertes | 60 |

2.3 CONCLUSION **61**

| | |
|--|-----------|
| CHAPITRE 3 : ETUDES EXPERIMENTALES | 63 |
| 3.1 CHOIX DES MATERIAUX | 63 |
| 3.1.1 Le sable de dune | 63 |
| 3.1.2 Les sables fillérisés | 64 |
| 3.1.2.1 Le Basalte | 64 |
| 3.1.2.2 Le Grès | 64 |
| 3.1.2.3 Le Calcaire | 64 |
| 3.1.2.4 Le siléxite | 64 |
| 3.2 IDENTIFICATION DES MATERIAUX | 64 |
| 3.2.1 Analyse granulométrique | 65 |
| 3.2.2 Analyse chimique et minéralogique | 67 |
| 3.2.3 Détermination du poids spécifique ρ_s et de la densité sèche ρ_d | 68 |
| 3.2.4 Surface spécifique des ajouts | 69 |
| 3.2.5 Absorptivité des granulats | 70 |
| 3.3 CHOIX DE LA METHODE DE FORMULATION | 71 |
| 3.3.1 La méthode "SABLOCRETE" | 72 |
| 3.3.1.1 Compacité et méthode de formulation | 72 |
| 3.3.1.2 Dosage en fines d'un béton de sable | 72 |
| 3.3.1.3 Porosité et dosage en eau d'un béton de sable | 73 |
| 3.3.1.4 Estimation du dosage en sable | 74 |
| 3.3.1.5 Estimation de la résistance en compression | 74 |
| 3.3.2 Méthode de formulation proposée | 76 |
| 3.4 RESULTATS DES ESSAIS MECANIQUES | 83 |
| 3.4.1 Résistance en traction par fendage | 83 |
| 3.4.2 Résistance en compression | 84 |
| 3.4.3 Caractéristiques physique et densité du béton | 91 |

| | |
|--|----------------|
| 3.5 RÈGLES DE CONCEPTION DE DIMENSIONNEMENT ET DE RÉALISATION | 95 |
| 3.5.1 Conception et dimensionnement de chaussées | 95 |
| 3.5.1.1 Conception | 95 |
| 3.5.1.2 Dimensionnement | 100 |
| 3.5.1.2.1 Choix de la classe de trafic | 101 |
| 3.5.1.2.2 Evaluation de la portance de la plateforme | 101 |
| 3.5.1.2.3 Définition de la classe de résistance du béton | 101 |
| 3.5.1.2.4 Dimensionnement proprement dit | 102 |
| CHAPITRE 4 : ETUDE ECONOMIQUE | 108 |
| 4.1 HYPOTHÈSES DE CALCUL DES COÛTS | 108 |
| 4.2 CAS DES FAIBLES TRAFICS | 109 |
| 4.2.1 Composition des différents bétons et quantité des composants pour 1 km de chaussée | 110 |
| 4.2.2 Etude des coûts | 111 |
| 4.2.3 Cas des chaussées en béton de sable | 111 |
| 4.2.4 Cas des chaussées enrobées denses | 114 |
| 4.3 ETUDE DES COÛTS DES PARPAINGS | 115 |
| CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS | 116 |
| ANNEXES | |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | |

INTRODUCTION

La construction de manière générale constitue aujourd'hui un casse tête aussi bien pour les ménages que pour la puissance publique. Pour les premiers on notera la quête sans cesse d'une habitation descente tandis que pour le second à savoir l'État, les nécessités de développement lui impose la construction et l'aménagement d'ouvrages capables de promouvoir ses programmes de développement. L'un de ces ouvrages est la route.

Avec le contexte de raréfaction croissante des ressources et le coût élevé de l'énergie, la route est aujourd'hui l'un des investissements les plus coûteux, pour nos pays en voie de

développement. Cette raréfaction est surtout accrue par l'utilisation massive de matériaux classiques : basalte, latérite comme granulats et sable de plage. Tous font l'objet actuellement d'interdiction d'exploitation partielle pour les premiers et formelle pour le dernier par le décret 79-860 du 25 Septembre 1979. C'est dans ce sens qu'une nouvelle orientation vers le béton de sable s'est opérée. Cela est d'autant plus justifiée que cette technique - loin d'être nouvelle comme on le pense - favorise l'utilisation des matériaux locaux, l'assainissement de l'environnement par l'utilisation de matériaux résiduels (fillers 0/3), ce qui a pour aboutissement une augmentation de la valeur ajoutée et une plus grande accessibilité à l'habitat en particulier et à

la construction de manière générale. Les caractéristiques du béton de sable par rapport à notre domaine d'étude - réduction des vides et augmentation de la compacité - seront mis en évidence au niveau de la recherche bibliographique tandis que les caractéristiques physico-mécaniques seront établis par une étude technique et des essais de laboratoire.

CHAPITRE I :

DESCRIPTION DE LA SITUATION ACTUELLE SUR LES FILLERS ET LES BÉTONS DE SABLE

- 1- GÉNÉRALITÉS SUR LES FILLERS UTILISÉS EN BÉTON DE SABLE**
- 2- PRODUCTION DES FILLERS AU SÉNÉGAL**
- 3- GENÈSE DE L'UTILISATION DES BÉTONS DE SABLE**
- 4- GÉNÉRALITÉ SUR LES BÉTONS DE SABLE**
- 5- PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES**
- 6- AUTRES PROPRIÉTÉS**

CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DE LA SITUATION ACTUELLE

1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES FILLERS UTILISÉS EN BÉTON DE SABLE

L'étude des fillers utilisés dans les bétons de sable se fera à partir des granulats jusqu'à la roche mère. Ces granulats sont issus de roches éruptives métamorphiques ou sédimentaires ou tout simplement de matériaux naturels (alluvions), pour des besoins d'utilisation font l'objet de concassage. Le produit résiduel de ce concassage donne le filler. Les propriétés des granulats et des fillers sont liés à celles de la roche d'origine : caractéristiques physiques, mécaniques, chimiques, minéralogiques qui renseignent sur l'altérabilité, la résistance mécanique, la granularité etc... Les fillers en quantité énorme mais inconnus sont presque tous concentrés dans la partie ouest du pays ce qui s'explique par le simple fait que cette zone est la plus riche en granulats du pays. Cependant pour ce faire une idée de la quantité inestimable de filler immobilisée nous nous baserons sur les données de la Direction de l'Énergie des Mines et de la Géologie (D.E.M.G) cf. : tableau 1.1 et 1.2

| Années | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | TOTAL | |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| Granulats | | | | | | | | |
| Grés | 2 834 | 4 115 | 4 182 | 5 417 | 23 792 | 10 167 | 50 507 | 8,9 |
| Calcaires | 15 934 | 18 502 | 21 248 | 24 834 | 34 626 | 39 276 | 154 420 | 27,1 |
| Basaltes | 3 270 | 8 466 | 12 219 | 12 445 | 13 659 | 15 844 | 65 903 | 11,6 |
| sables | 19 030 | 26 898 | 31 972 | 40 510 | 61 200 | 80 753 | 260 363 | 45,8 |
| Graveleux Latéritiques | 4 362 | 4 733 | 3 700 | 4 000 | 7 680 | 13 209 | 37 684 | 6,6 |
| Total | 45 430 | 62 714 | 73 321 | 87 206 | 140 957 | 159 249 | 568 877 | 100 |
| | 8 | 11 | 12,9 | 15,3 | 24,8 | 28 | 100 | |

**Tableau 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)

| Années | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Nature de la demande | | | | | | |
| Construction routière | 32 200 | 35 500 | 46 000 | 68 100 | 98 800 | 128 950 |
| Entretien routier | 37 400 | 48 200 | 59 350 | 98 200 | 128 800 | 158 910 |
| Régie des Chemins de fer | 40 500 | 49 700 | 76 000 | 105 900 | 150 900 | 160 000 |
| Entretien Régie | 32 600 | 38 600 | 56 600 | 99 200 | 112 600 | 152 400 |
| Canal du Cayor | 32 000 | 32 000 | 32 000 | 32 000 | 32 000 | 32 000 |
| Bâtiment | 59 175 | 63 900 | 94 450 | 95 450 | 130 950 | 207 100 |
| Total | 233 875 | 267 900 | 364 400 | 498 850 | 654 050 | 839 360 |

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

Si tous nos granulats d'étude ne sont pas utilisés en technologie routière ou en bâtiment comme matériaux de base, ils peuvent tous l'être l'un ou l'autre dans un béton de sable, suivant les caractéristiques recherchées.

1.2 PRODUCTION DES FILLERS AU SÉNÉGAL

Le Sénégal est un petit pays de 197 000 Km² qui a la quasi totalité de ses réserves en matériaux granulaires concentrées dans sa partie occidentale dans les régions de Thiès et Dakar. Cette présence de grandes quantités de granulats est matérialisée par les affleurements basaltiques de Dakar et Thiès, issus d'un ensemble sédimentaire essentiellement composé de formation calcaire, marneuse, marno-calcaire et gréseuse. Nos matériaux d'étude, sont des sables fillérisés, résidus de concassage de matériaux basaltiques, gréseux, calcaires de résidu industriels. Comme le silexite et le sable de dune rouge présent dans la quasi totalité de la superficie du pays.

1.2.1 Les Roches Basaltiques

Depuis l'interdiction d'exploitation par le décret 72-662 dans la région de Dakar seul le site de Diack, situé à 30 km de Thiès fait l'objet d'extraction de basalte. Néanmoins d'autres gisements existent notamment à Sène-Sérère, au niveau du Ravin des voleurs, à Keur Mamour etc. Étendues sur une superficie de 95 000 m², les réserves de Diack actuellement à moitié exploitées, étaient estimées à DIX MILLIONS de tonnes sur une puissance de 5 m.

Quand au gré, son exploitation se fait aux sites de Toglou,

Ndayane et Mbang. Ils sont en moyenne partie recouverts d'une formation latéritique donc occasionnant une puissance qui peut dépasser 10 m.

Pour les calcaires ils proviennent des affleurements de Bandia, Popenguine, Mbour et Panthior. En dehors de ces sites de la presqu'île du Cap-Vert on peut en trouver dans la vallée du Ferlo, dans la vallée du Fleuve Sénégal, dans les régions de Oourossogui, Ogo, Kanet et à l'Ouest de Thilogne (BRGM 1984).

Pour le silexite, il s'agit de rejets industriels non recyclés de la Compagnie des Phosphates de Taïba.

1.2.2 Estimation Quantitative

Comme mentionné précédemment, la majeure partie des fillers utilisés sont des rejets industriels ou des résidus de concassage non quantifiés. Néanmoins une estimation de la roche d'origine peut donner une idée approximative des quantités de fillers disponibles.

Pour le gré les réserves, d'après une estimation de 1984 (BRGM) sont évaluées à 3 450 000 tonnes dont 150 000 à Toglou, 300 000 à Mbang et 300 000 tonnes à Paki.

Pour le calcaire les travaux ont révélé des réserves estimées à 84 millions de tonnes au-dessus de la nappe phréatique.

Mais c'est pour le silexite qu'on enregistre les quantités les plus importantes avec une production annuelle de 1 150 000 tonnes et un stock de 28 800 000 tonnes à Terril de

Keur Momar FALL et 76 800 000 tonnes à Ndomor DIOP.

Le sable de dune quand à lui existe en des quantités inépuisables, dans la quasi totalité du littoral.

A l'exception du basalte et du calcaire qui se vendent respectivement à 3 000 F et 1 000 F le m³ tous les autres fillers sont des résidus. C'est pour ces raisons à savoir la quantité inestimable de sable de dune et de résidus non recyclés mais aussi du coût relativement bas ou nul qui justifient les études sur le béton de sable.

1.3 GÉNÈSE DE L'UTILISATION DES BÉTONS DE SABLE

Contrairement à l'idée que se font pas mal de personne sur ce matériau, l'utilisation des bétons de sable date de plus d'un siècle. En effet c'est vers 1853 période à laquelle les moyens de locomotion motorisés faisaient défaut, que l'idée d'utiliser des matériaux trouvés sur place germa. Cela était une solution à un double problème à savoir : éliminer la contrainte liée au transport de matériaux sur de longues distances mais aussi éviter les recherches de matériaux rares.

Partant des mélanges de sable de chaux et d'eau pour lier les briques ou pierres, on en arriva à diversifier l'usage en ajoutant à ces mortiers de la brique, de la tuile cassée puis du gravier et enfin de la pierre cassée ; ce fut la naissance des premiers bétons de sable. Depuis lors, les français et les soviétiques se sont formidablement fait remarqués par des techniques de mise en oeuvre et d'utilisation de ce matériau.

1.3.1 Les Expériences Françaises

L'Ingénieur français COIGNET (1853), dans l'optique de proposer des constructions économiques monolithes et résistantes à mis au point le "**béton aggloméré**" ou "**coignet**" du nom de l'inventeur. Il s'agit d'un mélange sans cailloux, 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.

La première construction en béton aggloméré banché fut une vaste maison encore visible au nord de Paris (à la rue Charles-Micheles à St-Denis). Elle servit d'expérience pour de nombreuses constructions et réseaux d'assainissement du grand mur de soutènement de la place de Trocadéro à Paris, de l'Aqueduc des eaux de captation de la Vanne dans la traversée de la forêt de Fontainebleau. D'autres exemples peuvent être ciblés aux États-Unis et plus précisément à Brooklin et en Égypte.

1.3.2 Les Expériences Soviétiques

Elles sont marquées par une formulation originale de Nicolas de Rochefort à St-Petersbourg obtenue en broyant ensemble sable et clinker à parts égales puis mélangés à ce produit du sable avec un volume de sable trois fois supérieur à celui du produit broyé. Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable-ciment composé au tiers par du ciment et le reste par du sable. Le broyage du mélange sable/clinker d'après les recherches du Professeur **Rehbinder** des surfaces physico-chimiques actives qui, fraîches, fixaient plus efficacement

le liant ; ce que NICOLAS de Rochefort trouva peut être par hasard vient d'être confirmé scientifiquement. Ces études permirent de nombreuses réalisations parmi lesquelles on peut citer entre autres :

- les pistes d'aérodromes militaires de Pevec d'Arkangelsk,
- les bâtiments (toitures à plis, éléments divers préfabriqués dans la ville de Nadym en Sibérie),
- les voiles édifiées par coffrages grillants sur de grandes surfaces (à Verroney-Moscou),
- le tamponnage de puits de pétrole, tunnels et métros, travaux de rénovation d'ouvrages d'art etc.

Contrairement à l'ex-Union Soviétique, la France est un pays riche en granulats ce qui ne favorise pas les recherches pour la promotion du béton de sable. Et cela s'est traduit par une décélération des activités de recherche. Et ce n'est que vers les années soixante dix avec l'émergence des mouvements écologiques que sont apparues des interdictions d'exploitation que les activités de recherches se sont accélérées à nouveau avec des techniques d'utilisation plus avancées et des formulations couvrant une plus large gamme. Et les premières applications qui datent des années quatre vingts furent réalisées avec succès à l'initiative du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux : injections de

ponts sous-oeuvre, poutres, chaussées de lotissement, dalles planchers.

Mais promouvoir un produit dans n'importe quel secteur des sciences est facilité par une mise en commun des potentiels technique, scientifique, humain et administratif. C'est ce qu'a compris le Ministère Français chargé de l'Équipement et de la Recherche en mettant sur pied le projet **SABLOCRETE** (1994) qui est un projet de "recherche-développement" qui regroupe en son sein les plus grands laboratoires français de génie-civil (publics ou privés) dans une mise en commun des connaissances théoriques, en principe d'utilisation, de formulation et de mise en oeuvre.

1.3.3 L'État des Travaux au Sénégal

Le Sénégal a tout intérêt à travailler dans la promotion de ce matériau au vu des quantités inépuisables de sable et du contexte de rareté des granulats. Ceci pas dans le but de remplacer les routes en béton de ciment ou bitumineuses ou de béton classique mais tout simplement dans l'objectif d'en faire un matériau de substitution partout où les exigences mécaniques sont inférieures à celles requises pour les routes classiques citées ci-dessus. C'est dans cette optique que plusieurs thèses ont été soutenues à l'École Polytechnique de Thiès dans le souci d'adapter des travaux faits ailleurs à nos réalités locales. A l'instar de la France et de l'ex-Union soviétique des expériences pratiques ont été tentées avec succès dans le pays. Entre autre on peut citer :

- les aménagements piétonniers dans le quartier de Médina à Dakar ;

- les aires de stockages et de manutention au niveau de la Société HAMO (habitation Moderne) dans le quartier de Mbaou dans la banlieue de Dakar ;

- et actuellement le projet de construction d'une route à St-Louis, situé à 270 km de Dakar, longue de 6 km et large de 6,5 m ;

- dallage au niveau de la Direction de l'Aménagement Urbain (D.A.U) de la Communauté Urbaine de Dakar...

1.4 GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS DE SABLE

1.4.1 Définition

Les bétons de sable sont des mélanges de sable, de ciment, d'eau et de fines d'ajouts. Pour une meilleure compréhension, il n'est toutefois pas inutile de les situer par rapport aux bétons classiques. Ces derniers sont généralement constitués d'un granulat 0/16 à 0/25 et comportent selon l'utilisation envisagée, entre 250 et 400 kg de ciment par mètre cube.

Compte tenu du diamètre maximale (D_{max}) des grains, le dosage en fines (ciment) est suffisant pour assurer au béton une compacité maximale. Si l'on veut diminuer la valeur de (D_{max}) au-dessous de 16 mm, les différentes lois de répartition granulaires s'accordent pour dire qu'une

conservation de la compacité maximale, nécessite une augmentation de la teneur en fines, donc en ciment. Cette loi est bien connue et est traduite par l'équation suivante

$$C = k \sqrt[3]{D}$$

C = teneur en ciment en kg

k = 550 ou 700 suivant la compacité souhaitée

D = diamètre maximal des grains (mm)

Le tableau 1.3 ci-après donne le dosage minimum en ciment suivant la granularité.

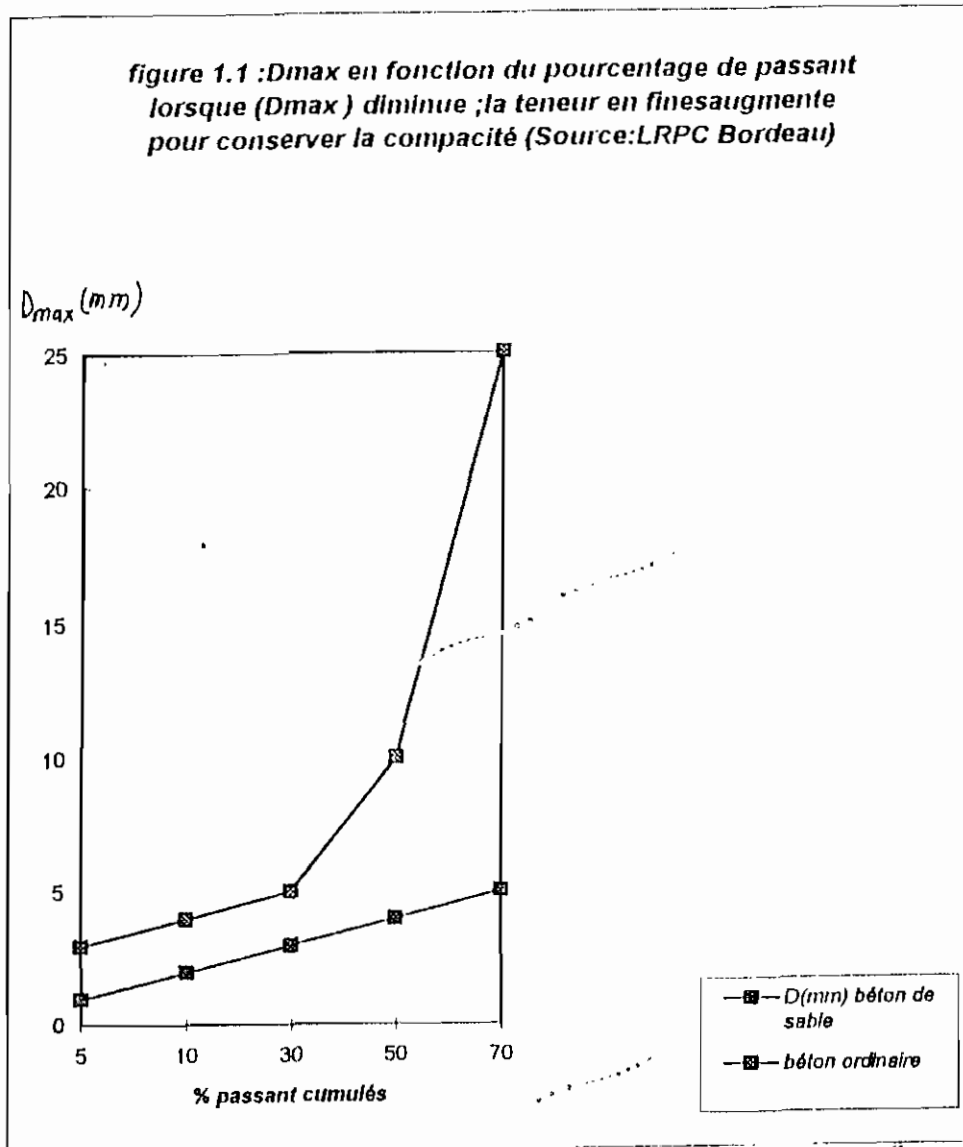
| Granularité | $\sqrt[3]{D}$ | 550 $\sqrt[3]{D}$ | 700 $\sqrt[3]{D}$ | |
|-------------|---------------|-------------------|-------------------|---------|
| 0/25 | 1.904 | 290 | 370 | BETON |
| 0/20 | 1.821 | 300 | 385 | |
| 0/16 | 1.741 | 315 | 400 | |
| 0/8 | 1.516 | 360 | 460 | |
| 0/6,3 | 1.445 | 380 | 480 | MORTIER |
| 0/2 | 1.149 | 480 | 610 | |
| 0/1 | 1.000 | 550 | 700 | |

TABEAU 1.1 : Dosage minimum en ciment suivant la granularité

Dans la gamme des sables ($D_{\max} \leq 6$ mm) on est donc amené à envisager des dosages en ciment compris entre 450 et 700 kg/m³ : ce sont les mortiers. Les bétons de sable relèvent d'une autre approche : elle consiste à faire la distinction entre les fines nécessaires à l'obtention d'une bonne compacité, et le ciment nécessaire pour une résistance suffisante pour l'usage envisagé.

Les bétons de sable ont donc les mêmes dosages en ciment que les bétons classiques (250 à 400 kg/m³) et la compacité

est atteinte par un ajout complémentaire de fines comme le calcaire, le grès, le silexite etc... La figure 1.1 montre la variation de la compacité en fonction de la taille des grains.



1.4.2 Définitions des différentes composantes

Comme pour tout mélange, chaque constituant a un rôle bien défini pour l'obtention des performances souhaitées.

Les Sables : il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire, de basaltière, d'un sable de carrière issu de concassage d'une roche massive ou détritique ou tout simplement d'un sable de dune comme pour notre cas. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté.

Les fines d'ajout : une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont : la granulométrie du mélange et sa teneur en eau, l'énergie de mise en place.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles. Le principe est simple. Les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros.

Du fait de la valeur de D_{max} relativement faible ($D_{max} \leq 5\text{mm}$) en appliquant la relation classique en $\sqrt[3]{D}$ la quantité de ciment à utiliser devient importante. Le rôle des fines sera de compléter la quantité de ciment obtenue à partir de l'équation de la page 12.

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 220 kg/m^3 et même au delà. Par voie de conséquence leur caractère (nature géologique, chimique, forme, etc) vont influencer grandement sur les caractéristiques de la formule employée.

On distingue principalement les fines actives (laitier moulu, cendres volantes, pouzzolanes broyées...) et les fines inertes comme celles que nous utilisons dans le cas de notre étude (grès, silexite, basalte, calcaire,...).

Les ciments : comme pour les bétons classiques le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et de l'usage auquel on le destine. Pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique des fines d'addition, on privilégie souvent les CPA par rapport aux CPJ.

L'eau : l'eau utilisée est la même que celle requise pour les bétons traditionnels. La quantité efficace comprend en dehors de l'eau de gâchage une quantité non négligeable apportée par les additions et surtout par les sables.

En dehors de ces principaux composants d'autres éléments peuvent être ajoutés au béton. Ce sont :

- **les adjuvants** : qui sont utilisés pour améliorer certaines caractéristiques comme la maniabilité, la diminution de la teneur en eau etc. Les adjuvants sont des plastifiants, super plastifiants, défloculants etc...

- **les ajouts** : ce sont souvent des fibres pour réduire le retrait au premier âge ou des gravillons dispersés dans la masse pour améliorer certaines caractéristiques (fluage, retrait, maniabilité, résistance...).

- **les colorants** : ce sont les mêmes que ceux utilisés pour les bétons classiques, seulement avec les bétons de sable un soin particulier doit être apporté à l'homogénéisation et à une formulation adéquate pour garder une stabilité de la teinte dans le temps.

1.5 PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES

1.5.1 Granulométrie et Maniabilité

Contrairement au béton classique, les bétons de sable présentent un rapport Eau/Ciment systématiquement supérieur à 0,5. Ce rapport E/C doit se situer entre 0,6 et 0,7. Ceci s'explique par une valeur de la surface spécifique plus importante du fait de la présence des fines et d'une quantité de sable plus importante. La maniabilité s'améliore inversement par rapport au module de finesse M_f .

1.5.2 Granulométrie et Résistance

La résistance pour un dosage en ciment constant peut varier suivant certains paramètres tels que la finesse de l'addition, sa nature et la dimension D_{max} (O/D).

* **La finesse de l'addition** : que ce soit avec un sable alluvionnaire ou un sable de dune, la finesse de l'addition se traduit par une amélioration de la compacité et donc de la résistance.

* **La nature de l'addition** : (à dosage égale) la figure 1.2 permet de constater la différence de niveau de

performance atteint selon la nature du filler. Si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable. Par exemple avec E/C de 0,82 pour un témoin (sans fines) à 32 MPa on varie avec addition de 34 à 53 MPa selon la nature des fines ajoutées. La différence est encore plus considérable si l'on se place à maniabilité constante. Les fillers les plus efficaces sont ceux qui, hydrauliquement actifs, entraînent également une réduction d'eau.

FIGURE 1.2 : Résistance en compression (R_c) en MPa à 28 jours (Ref : LRPC de Bordeaux)

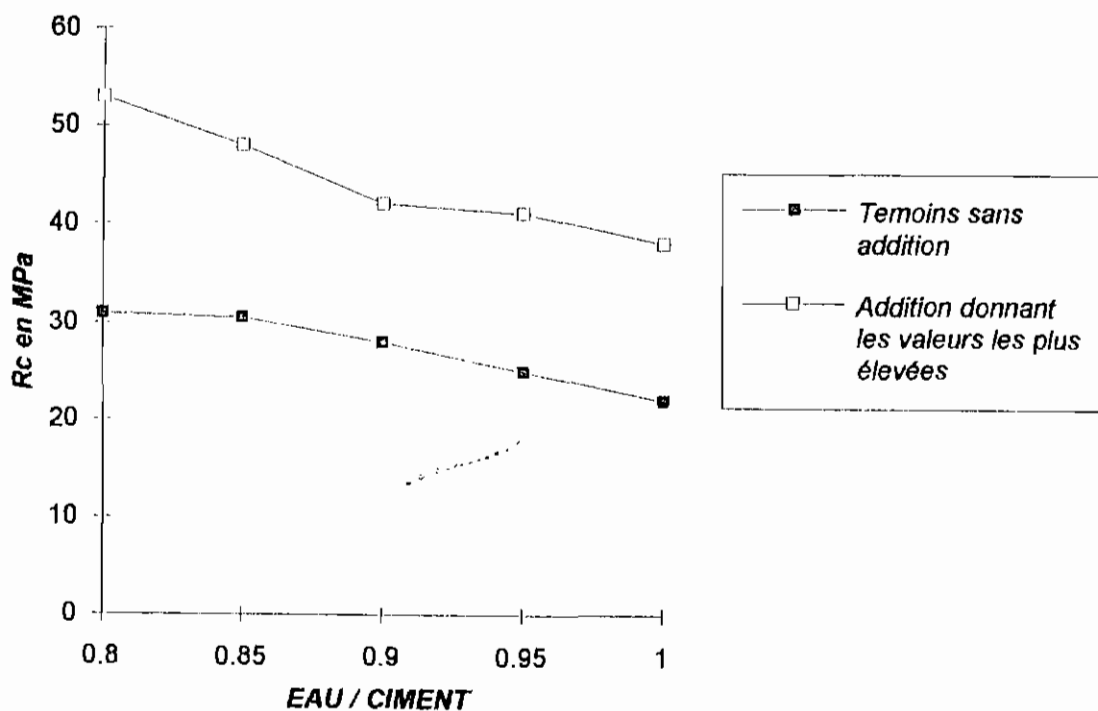
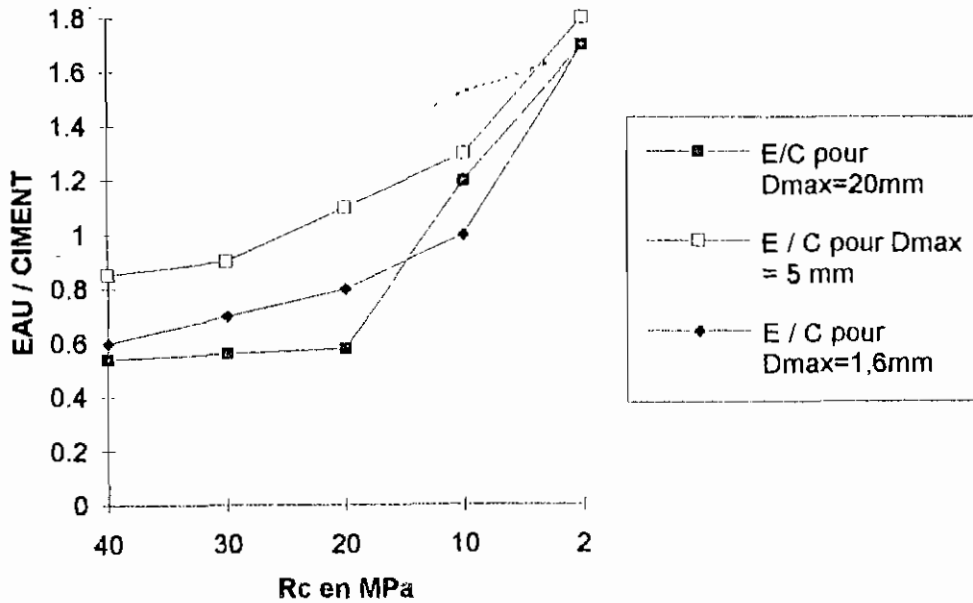
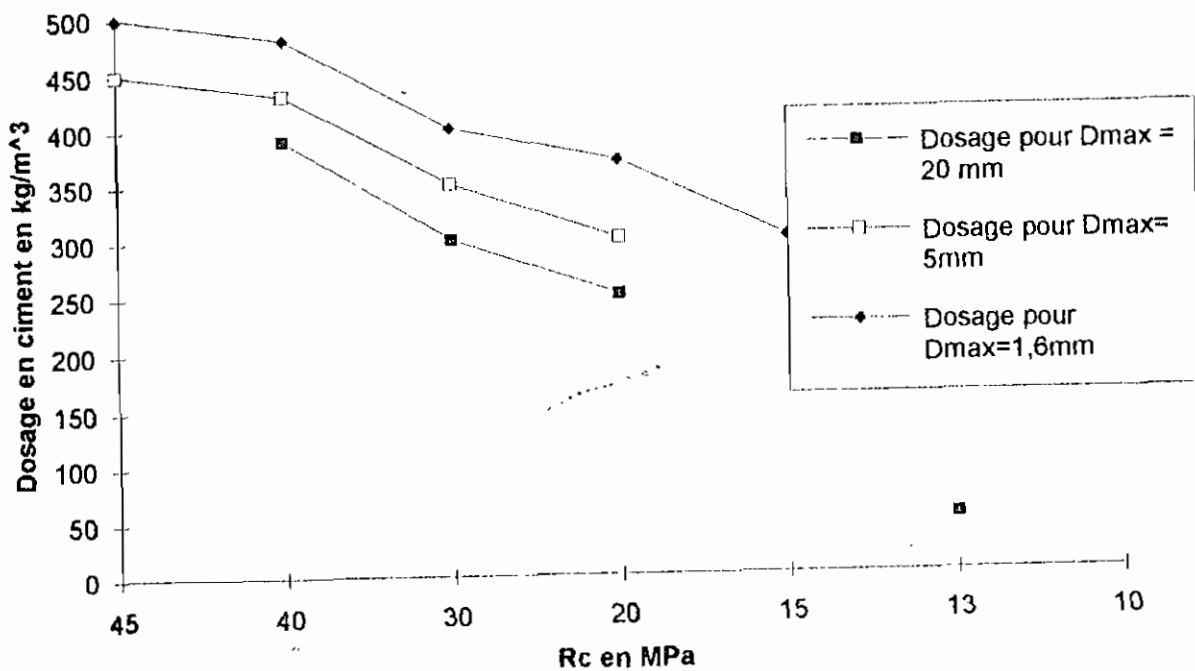


Figure 3.a : Effet de la granularité sur la résistance en compression



Suivant la valeur de Dmax, la résistance en compression varie de manière non négligeable avec le rapport EAU/CIMENT qui influe sensiblement sur la résistance du béton

Figure 3.b : Effet de la granularité sur la résistance en compression



Le dosage en ciment du béton donne des valeurs de résistance différentes suivant la valeur de Dmax.

* **La dimension du D_{max} (O/D)** : l'influence de la dimension maximale des grains D_{max} se fera d'une part par rapport à la valeur de E/C puis d'autre part à celle du dosage en ciment.

On constate d'après la figure 3a que la valeur de D_{max} varie faiblement pour une valeur de E/C constante et en tout état de cause pas défavorable aux sables. La seule différence tient à la maniabilité très différente selon les bétons. Si le béton est maniable dans le cas d'un 0/20, on aura une maniabilité de type préfabrication dans le cas du sable.

Par rapport au dosage en ciment à E/C différent avec un dosage fixé les différences sont beaucoup plus importantes. La maniabilité étant différente, on aura beaucoup plus d'eau dans le cas du sable, ce qui a pour conséquence une chute de résistance.

1.6 AUTRES PROPRIÉTÉS

1.6.1 Retrait et fluage

* **Le retrait** : des essais ont permis de constater qu'en milieu étanche (isolé) le béton de sable présente des valeurs de retrait d'auto dessiccation voisines de celle du béton traditionnel. Par contre s'il est séché à l'air libre le béton classique présente des valeurs inférieures de moitié par rapport à celles du béton de sable. Le phénomène est vraisemblablement dû à une distribution et à une taille des vides différentes entre les deux matériaux.

* **Le fluage** : en matière de fluage un phénomène analogue à celui d'un béton ordinaire est remarqué lié vraisemblablement à la structure du matériau. Cela est confirmé par ailleurs par les valeurs de module d'élasticité très différenciées entre béton de sable et béton classique.

1.7 Durabilité des bétons de sable

Parler de durabilité est plus aisée si le milieu d'utilisation du matériau est connu d'avance (milieu urbain, région montagneuse, milieu marin, ambiances agressives) pour la prise en compte des considérations telles que :

- perméabilité à l'air et à l'eau,
- carbonation,
- pénétration des ions chlorures.

Mais aussi parler de durabilité revient d'une part à l'étude des paramètres physiques tels que porosité, organisation géométrique des pores, perméabilité et d'autre part des phénomènes internes que sont : l'accélération et l'attaque sulfatique différée, qui sont des processus d'altération accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur.

D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels s'ils ont davantage de vides, la taille et le nombre de ces vides se distinguent de ceux du béton traditionnel : ils sont plus nombreux, plus petits

et d'avantage mono-dimensionnels. Leur nombre plus élevé entraîne une probabilité de colmatage plus fréquente et plus aisée compte tenu de leur faible taille. Cette distribution poreuse particulière, observée sur beaucoup de béton de sable optimisés dans le cadre du projet national **SABLOCRETE** contribue pour une bonne part à leur bon comportement vis-à-vis des essais de durabilité cités précédemment.

1.8 INFLUENCE DE L'AJOUT DE GRAVILLONS

L'idée d'incorporer des gravillons dans une composition de béton de sable peut surprendre ou paraître contradictoire avec la volonté d'utilisation de ce type de béton. On a vu cependant (cf. paragraphe 1.5.1) qu'un tel ajout ne modifie pas les propriétés spécifiques du béton de sable pour peu que le dosage en gravillon soit faible. Un tel ajout a par contre un effet bénéfique sur certaines caractéristiques, notamment le fluage. Il a paru intéressant de vérifier cet effet sur d'autres caractéristiques des bétons de sable.

1.8.1 La résistance aux chocs

La particularité des bétons de sable à mieux résister aux chocs, constatée expérimentalement a été attribuée à leur structure plus fine et plus homogène permettant de mieux répartir les impacts et, d'éviter les éclatements que l'on observe sur les bétons classiques.

Cette propriété a été mise en évidence par l'essai Los Angeles.

1.8.2 La résistance à l'attrition

Quantifiée par l'essai Deval on peut constater comme il était possible que l'ajout de gravillons quelle que soit sa nature améliore sensiblement (jusqu'à 50 %) cette caractéristique. Au delà de $G/S = 0,5$ il n'y a plus d'amélioration.

1.8.3 La résistance à la compression

Un ajout de gravillons avec $G/S = 0,25$ se révèle très valorisant, au delà l'influence sur la résistance à la compression est beaucoup moins significative.

1.8.4 Le module d'élasticité

De manière générale les matériaux granulaires O/D ont des modules d'élasticité plus faibles que celui du béton classique. Ce module diminue lorsque D_{max} diminue. Un béton de sable ayant une résistance en compression de 24 à 30 MPa a généralement un module d'élasticité de l'ordre de 22 000 MPa (Source : Béton de sable Pratiques d'utilisation -LRPC Bordeaux)

A travers les pages précédentes nous pouvons conclure que les raisons d'utilisation des bétons de sable existent et se confirment d'avantage. Entre autres raisons, on peut citer quelques caractéristiques spécifiques de ce matériau bétons :

- la maniabilité qui augmente les possibilités de pompage sur de longues distances et diminue l'énergie de mise en place ;

- la cohésion et l'absence de ségrégation qui permettent les travaux en milieu aquatique, le coulage en place des pieux etc ;

- la petite granularité, utile dans les travaux d'injection ou le bétonnage de milieu à forte densité de ferrailage ;

- le bel aspect de surface : facteur de plus en plus pris en compte dans tous les travaux, les bétons de sable permettent la réalisation d'effets architectoniques tant sur la forme que sur l'aspect. Cette énumération à titre d'exemple, loin d'être exhaustive ne devrait pas cacher les limites de ce matériau ;

Dans l'état actuel des connaissances, les bétons de sable ne peuvent pas prétendre remplacer systématiquement les bétons classiques, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques.

Économiquement les limites se trouvent dans le fait que les bétons de sable les plus résistants sont ceux qui ont un fort dosage en ciment (supérieure ou égale à 450 kg/m^3) avec une série d'ajout plus ou moins rare (fumée de silice, adjuvant plastifiant coûteux) ce qui rend leurs coûts voisins de ceux des bétons traditionnels.

Techniquement des "zones d'ombres" existent sur la connaissance des caractéristiques et du comportement des bétons de sable :

- s'ils ont le même niveau de retrait que les bétons

CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DE LA SITUATION ACTUELLE

classiques leur module d'élasticité est par contre inférieur de 20 à 30 % à celui du béton ordinaire ; (Source : BÉTON DE SABLE - Pratique d'utilisation - LRPC de Bordeaux) ;

- leur comportement en fluage peu connu les exclut dans l'immédiat des éléments de structure fortement sollicités ou précontraints ;

- enfin les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes, on cite des réalisations en béton de sable plus que centenaires (voir paragraphe 1.3.1).

Les bétons de sable, bien que très anciens, sont tenus en sommeil du fait de la facilité d'obtenir des résistances élevées avec des granulats de plus gros diamètre. La raréfaction de ces derniers associée au coût des transports posent, à l'heure actuelle le problème d'un nouvel essor de la technique des bétons de sable.

CHAPITRE II :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1- GÉNÉRALITÉS SUR LES VIDES

**2- RAPPELS SUR LA THÉORIE DES MÉLANGES DE GRANULAT D'EAU ET DE FINES
(CIMENT + AJOUT)**

l'effet de paroi. A cet égard une théorie complète de la granulation optimale reste à trouver.

2.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES VIDES

On souhaite minimiser la porosité d'un béton au terme de sa mise en place pour qu'il soit mécaniquement plus résistant et qu'il dure plus longtemps. Nous ne discuterons pas de la relation entre les porosités du béton de sable suivant qu'il soit mis en oeuvre en laboratoire ou sur chantier - Nous considérons que ces conditions comme étant celles du laboratoire. On suppose en outre que les provenances des constituants sont arrêtées et qu'il ne reste plus qu'à choisir leurs compositions ; ce sont ces proportions - paramètres mesurables - qui définissent l'ensemble des proportions tel que, la porosité mesurée sur éprouvette soit minimale. Pour ce faire nous nous proposons de faire un bref rappel sur les études de compacité.

2.1.1 Le mélange de deux granulats secs (grossiers et fins) : les effets de paroi et d'interférence

En supposant que les deux granulats ne diffèrent que par la dimension moyenne de leurs grains, et par commodité nous appellerons l'un, le granulats grossier et l'autre le granulats fin. Nous désignerons par :

g : le volume absolu du gros granulats, c'est-à-dire la somme des volumes occupés par ses grains.

s : le volume absolu du granulats fin.

Le mélange sera caractérisé par la proportion de l'un des granulats, par exemple, le rapport du volume du gros granulat sur le volume absolu du mélange :

$$n = g / (g+s)$$

Si l'on cherche à remplir un récipient avec un granulat, une partie seulement du volume disponible est prise par les grains ("les pleins"), le reste est le volume des interstices entre les grains ("les vides"). Le rapport entre le volume des "vides (V) et le volume des "pleines" est l'indice des vide :

$$u = V / (g+s)$$

Cet indice caractérise globalement la structure du granulat.

Le volume du récipient est le volume apparent du granulat. Nous désignerons par :

A : l'indice des vides du granulat fin

G : l'indice des vides du granulat grossier

On souhaite connaître la variation de u, indice des vides du mélange en fonction de n, proportion de granulat grossier.

Par définition,

pour $n = 0$ (granulat fin, seul), $u = A$

pour $n = 1$ (granulat grossier, seul) $u = C$

En un premier temps, nous calculerons la variation de l'indice des vides du mélange en supposant que l'indice de l'un des granulats dans le mélange n'est pas modifié par la présence de l'autre. Afin de simplifier l'écriture, nous conviendrons de régler les quantités s et g de telle sorte que le volume absolu du mélange soit toujours égal à l'unité : $s + g = 1$

donc $g = n$ et $s = (1 - n)$: de plus le volume des vides du mélange est égal à u . Cette convention simplifie l'écriture. Partons d'abord du granulat fin et ajoutons quelques grains grossiers.

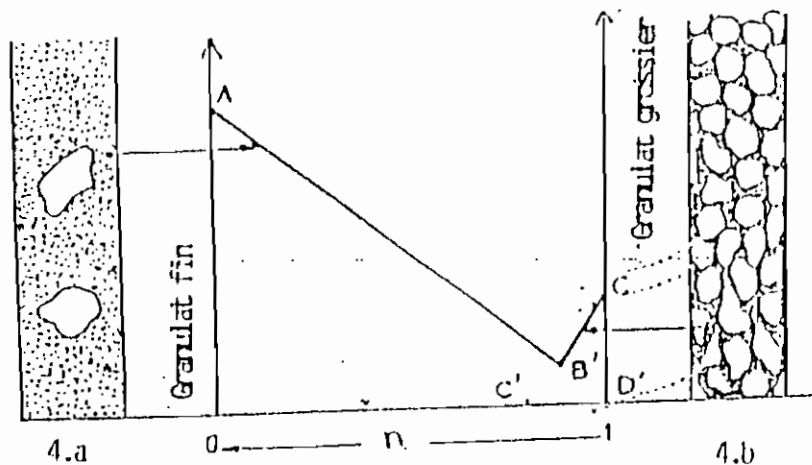


Figure 2.1 : Remplissage théorique d'un récipient par le mélange de deux granulats

Cela revient à diminuer le volume apparent occupé par le granulat fin (fig.2.2a). Dans ce volume apparent réduit, ce dernier conserve, par hypothèse, la même structure, donc le même indice des vides A . Les vides du mélange ne sont que les interstices entre les grains fins :

$$u = A.S = A(1-n) \quad [\text{éq.2.1}]$$

A l'inverse partons maintenant du granulat grossier en ajoutant quelques grains du granulat fin. Par hypothèse, la structure du granulat grossier donc son indice des vides reste inchangée (fig. 2.1). Les grains fins se logent dans les interstices laissés par les grains grossiers. Le volume des vides du mélange est égal au volume des vides du granulat grossier diminué du volume absolu du granulat fin.

$$u = C.g-s = Cn - (1-n) = (c+1)n-1 \quad [\text{éq. 2.2}]$$

On trouve donc deux lois différentes de variation de l'indice des vides suivant qu'on ajoute le granulat fin au grossier ou inversement (fig.2.1). Cela prouve que les hypothèses choisies ne peuvent être vérifiées simultanément par un même mélange : on ne peut conserver à la fois la structure du granulat grossier et celle du granulat fin. En fait, de manière générale ni l'une ni l'autre n'est conservée. Les deux structures interfèrent dans le mélange, et, c'est cette interférence qu'il convient d'étudier expérimentalement.

Les études (en France) ont fait apparaître deux types

d'interaction :

- L'effet de paroi
- l'effet d'interférence

Pour comprendre ces deux effets, nous allons essayer de reprendre l'explication donnée par BARON (1976) sous une forme plus accessible dans les lignes suivantes :

*** Effet de paroi :**

Lorsqu'on mélange réellement quelques grains du granulat grossier ou granulat fin et qu'on détermine expérimentalement l'indice des vides, on constate que cet indice est supérieur à ce qui donnerai l'équation 2.1. On trouve à partir de la figure 2.2 a:

$$u = A(1-n) + Dn \quad [\text{éq. 2.3}]$$

Pour comprendre l'origine physique de cet accroissement, il est plus commode de multiplier par (s+g) chaque membre de cette équation ce qui donne :

$$V = As + dg \quad [\text{éq. 2.4}]$$

V : volume des vides du mélange (m³)

s : volume du granulat fin (m³)

g : volume du granulat grossier (m³)

Expérimentalement on montre que le coefficient "d" dépend

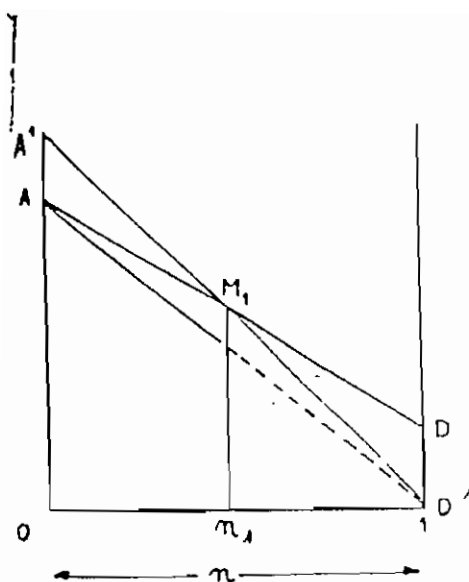


Figure 2.2.a

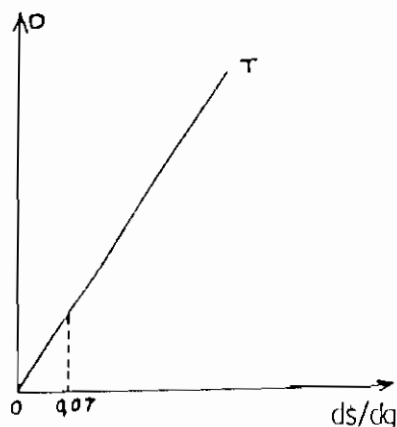


Figure 2.2.b

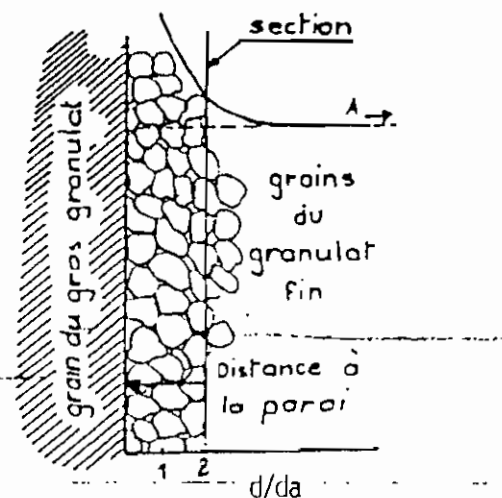


Figure 2.2.c

Figure 2.2 Effet de paroi (Source "Principe de Composition des bétons à porosité minimal" : BARON J.)

La droite AD représente la variation de l'indice des vides mesurée u , en fonction de la proportion de grains grossiers n (granulat fin dominant). Cette droite est située au-dessus de la droite AD' correspondant à l'hypothèse de non interaction (fig. 2.2.a). Pour une proportion n_1 de granulat grossier, l'indice des vides du mélange est représenté par l'ordonnée du point M1 ; tout se passe comme si l'indice des vides du sable dans ce mélange était A1 (le point A1 est situé à l'intersection de la droite D'M1 et de l'axe $n = 0$). A1 est supérieur à A (indice des vides du granulat fin seul). L'ordonnée de D, caractérisant l'interaction augmente avec le rapport des dimensions ds/dg des grains fins aux grains grossiers. Lorsque ce rapport n'est pas trop grand, la courbe représentative peut être confondue avec sa tangente T à l'origine (fig. 2.2.b).

L'interaction peut être interprétée comme l'effet des parois des grains du granulat grossier sur l'arrangement des grains du granulat fin. Dans toute section parallèle à la paroi (fig. 2.2.c), on peut définir un indice des vides local $u' = A$, au voisinage de la paroi n augmente et tend vers l'infini quand on s'approche de la paroi.

La présence de toute paroi, et notamment de celle des grains du granulat grossier décompacte le granulat fin ; on comprend alors pourquoi la droite AD se situe au-dessus de la droite AD'.

C'est restreindre singulièrement la portée du raisonnement de CAQUOT qui prend soin de préciser que : "**l'effet de paroi joue de la même façon entre les grains du chapelet théorique**" [CAQUOT-1937].

Certes il faut compter avec les parois des coffrages, des grains et des armatures car toutes influent sur l'arrangement des grains. Mais pour les grains de sable, par exemple, la somme des aires reste petite par rapport à celle de tous les gravillons. L'effet de paroi est tout d'abord une interaction entre les grains. Le modèle de la paroi rectiligne indéfinie n'est correcte que si l'un des granulats est fin par rapport à l'autre (ce que nous avons exprimé en posant $d_s/d_g \ll 1$). Quand ce n'est plus le cas, le modèle comme l'équation 2.4 perd sa valeur, mais l'effet de paroi évidemment demeure, et l'équation 2.3 reste valable.

*** Effet d'interférence**

Lorsqu'on augmente la proportion de granulat grossier dans le mélange, on finit par atteindre une proportion n_1 correspondant à un seuil de concentration en granulat grossier telle que :

$$\text{pour } n \leq n_1 \quad u = A(1 - n) + D_n$$

$$\text{pour } n > n_1 \quad u > A(1 - n) + D_n$$

Autrement dit :

- en deçà de ce seuil de concentration en granulat

grossier, les grains grossiers nombreux ne perturbent l'arrangement du granulat fin que par l'effet de leur paroi,

- au delà, il se produit une interaction supplémentaire : "l'effet d'interférence" décrit par Weymouth en 1933.

Remarquons d'abord que l'effet de paroi ne dépend pas de la distribution des grains grossiers au sein du granulat fin. Ceux-ci peuvent être uniformément répartis ou, au contraire, rassemblés dans un coin, peu importe, pourvu que l'aire totale des parois, en contact avec les grains fins soit toujours la même.

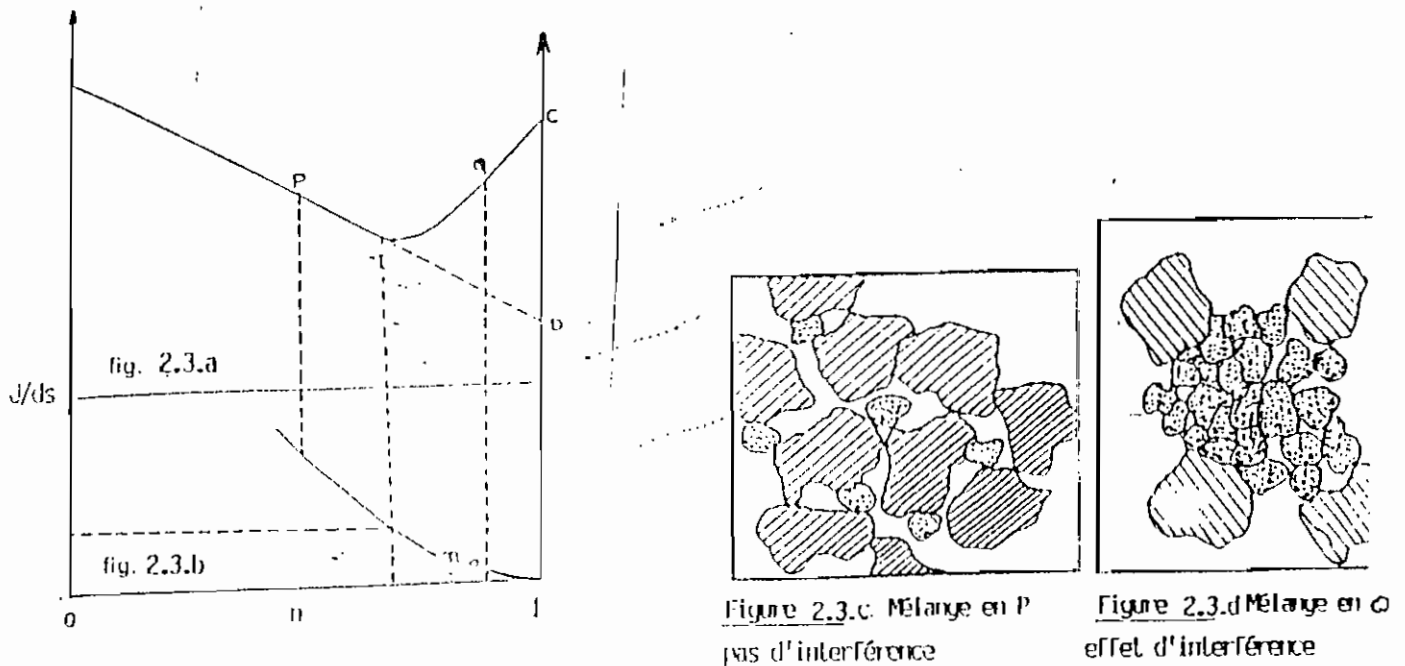


Figure 2.3 : Effet d'interférence Source "Principe de composition du béton à porosité minimale" : BAYON J.)

La courbe de variation de l'indice des vides du mélange v en fonction de la proportion de granulat grossier n est confondue avec la droite AD jusqu'au point I d'abscisse $n=1$. À droite de I , courbe située au-dessus de AD (Fig. 2.3.a)

Le rapport $J/ds > 1$, il n'y a pas d'effet d'interférence (Fig. 2.3.c) en Q , $J/ds < 1$, il y a effet d'interférence, les grains fins sont emprisonnés dans les interstices de granulat grossier (Fig. 2.3.d)

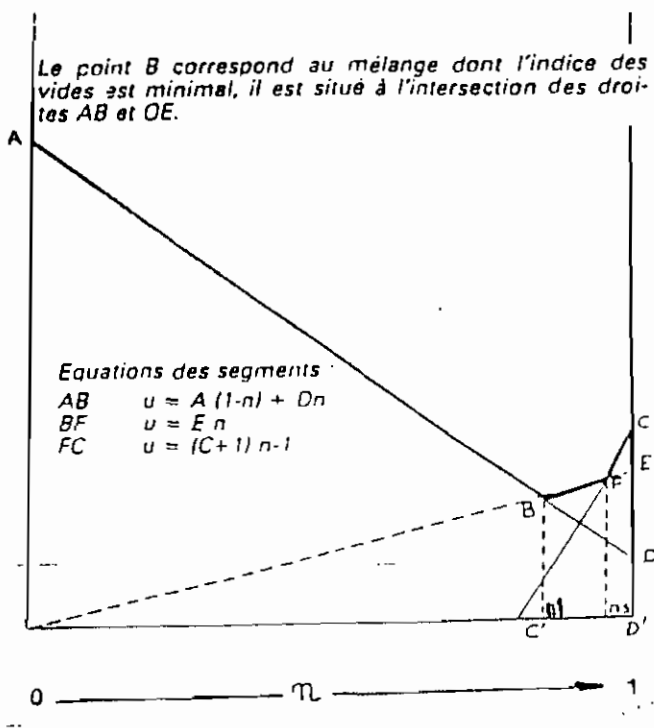


Figure 2.4 Mélange de deux granulats dont un est très fin

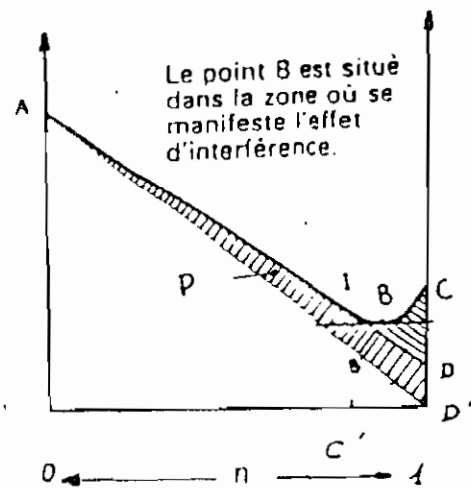


Figure 2.5 Les deux interactions entre granulats : les effets de paroi et d'interférence

La courbe AIC représente la variation de l'indice des vides lorsqu'on mélange un granulat fin et un granulat grossier. Elle fait apparaître deux interactions : l'effet de paroi et l'effet d'interférence.

La courbe donnant la variation de l'indice des vides est un cas particulier de celle représentée précédemment (fig.2.4) Elle peut être assimilée à trois segments de droite :

- le segment AB ($0 < n < n_1$) par la droite AD (fig.2.2 et 2.4)
- le segment FC ($n_s < n < 1$) porté par la droite CC' (fig.2.4)
L'existence de ce schéma tient au fait qu'une certaine proportion de grains fins peut se loger dans les interstices du granulat grossier.
- le segment BF porté par une droite passant par l'origine et correspondant simplement à une approximation empirique [POWERS 1968].

CHAPITRE 2 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Si aujourd'hui les bétons de sable présentent un certain intérêt pour les chercheurs, et qu'il n'en soit pas ainsi pour les utilisateurs, la raison principale se trouve sur les caractéristiques mécaniques de ce matériau et particulièrement sa résistance. Cette caractéristique est liée à plusieurs facteurs externes au matériau tels que la quantité d'eau, la quantité de liant mais aussi des facteurs internes comme la nature chimique de l'ajout utilisé ou le pourcentage de vide existant dans le matériau.

Pour les besoins de nos travaux, nous nous pencherons particulièrement sur le pourcentage de vide communément appelé porosité ou compacité du matériau.

Pour ce faire nous dégagerons les règles permettant de minimiser la porosité pour un mode de mise en place donné et un mélange humide (il peut être sec).

L'étude des mélanges binaires de granulats secs montrent l'existence de deux formes d'interaction entre les granulats : l'une additive - **effet de paroi** - l'autre non additive - **effet d'interférence** - .

La théorie de la granulation optimale due à CAQUOT permet de généraliser les résultats trouvés sur les mélanges binaires. Elle montre l'importance d'un dosage optimal en éléments fins (ciment + fines inertes). Cette théorie est probablement la seule à tirer, d'une façon cohérente, les conséquences d'une interaction entre les grains. Cependant elle ne retient que la forme additive de cette interaction,

Imaginons de dilater les grains grossiers jusqu'à ce qu'ils soient en contact les uns avec les autres. A un kilomètre près, on trouvera la structure du granulat grossier seul, donc, même indice des vides C et même volume absolu des gros grains pour un volume apparent unité: $1/(1+c)$. La dimension moyenne de ces granulats imaginaires sera (d_g+j) , j étant par définition le jeu du granulat dans le mélange. Le nombre de grains N est toujours le même et le volume absolu de grains dilatés par unité de volume apparent est :

$$1/(1 + C) = N \cdot \frac{\pi}{\sigma} \cdot (d_g + j)^3$$

En approchant cette équation de la précédente, on peut calculer $j(n)$:

$$j = \left(\frac{1}{d_g} \right) \left[(1 + u) / n \cdot (1 + c)^{1/3} - 1 \right] \quad [\text{éq. 2.5}]$$

j est une fonction décroissante de n lorsque la proportion de grains grossiers n augmente, le jeu entre les grains grossiers diminue. Il est nul lorsque $u = (c + 1)n - 1$

On retrouve ainsi l'équation qui correspond au cas où les grains fins se logent dans les interstices des grossiers vont perturber la structure du granulat grossier :

$$j(n) = ds \quad [\text{éq. 2.5}']$$

ds étant la dimension moyenne des grains fins (la dimension des grains fins étant définie comme celle des grains

(Source : "Principe de composition du béton de porosité minimale : BARRON J). On conçoit que l'effet des grains grossiers ne puisse se réduire à celui de leurs parois que s'ils restent rares et disséminés dans le granulat fin. Lorsque leur proportion augmente, la manière dont ils sont disposés les uns par rapport aux autres finira par compter. Il arrivera un moment par exemple, où une certaine quantité de granulat fin sera emprisonnée dans les interstices aménagés entre les grains grossiers. Il y aura interférence entre les effets de parois voisines des grains grossiers, décompactant le même volume de granulat fin. Alors l'arrangement du granulat fin dans le mélange caractérisé par son indice des vides, dépendra non seulement des aires de parois mais aussi de la disposition relative des parois voisines, c'est-à-dire de la forme de ces interstices. Il y aura en quelque sorte interférence entre la structure du granulat grossier et celle du granulat fin. C'est ce qu'il nous faut maintenant préciser.

Il nous faut donc caractériser la distribution des grains grossiers dans le mélange. Pour cela, nous allons définir une grandeur que nous appellerons "jeu du granulat" : il faut entendre ici par le mot "jeu" au sens du jeu d'un assemblage. Nous supposerons que tous les grains ont la même forme. Celle-ci pouvant être quelconque. La mesure de la dimension moyenne des grains grossiers est d_g . On considère un mélange de volume apparent unité et contenant N gros grains. Le volume absolu du gros granulat est égal à :

$$g = n/n(n+1) = \frac{\pi}{\sigma} N. d^3 g$$

surtout du rapport des dimensions entre les grains fins et grossiers. Lorsque ce rapport est petit, inférieur à 0,1 par exemple on peut écrire à partir de la figure (fig.2.2b) :

$$D = K' * d_s / d_g$$

d_s : dimension moyenne des grains du granulat fin

d_g : dimension moyenne des grains du granulat grossier.

Pour des grains de forme donnée, le rapport g/d_g est proportionnel à la surface S_g de l'ensemble des grains du granulat grossier. En effet, pour N grains, le volume g est proportionnel à $N.d_g^3$ et à la surface $N.d_g^2$, donc à g/d_g :

$$S_g / g = K'' * N d_g^2 / N d_g^3 = K'' / d_g$$

S_g est la surface des grains grossier dans le mélange. Finalement l'accroissement devient :

$$D_g = K'.d_s.g / d_g = K' / K''.d_s.S_g = K.d_s.d_g$$

On trouve ainsi à partir des résultats expérimentaux [ENPC (1976)], la formule établie théoriquement par CAQUOT (1937).

L'explication proposée justifie cette interaction soit appelée "effet de paroi". Cependant on doit se garder d'une confusion très courante qu'un schéma comme celui de la figure 2.2 peut entretenir. Le paroi rectiligne indéfinie évoque presque infailliblement un coffrage et, du coup, on ne pense plus qu'à l'effet de paroi des coffrages.

grossiers précédemment). Les équations 2.5 et 2.5' permettant de calculer n connaissant les dimensions moyennes des grains grossiers et fins et l'indice des vides C du granulat grossier. Malheureusement, elle n'est bien vérifiée que dans le cas étudié ici qui est bien particulier :

- les grains fins et grossiers ont tous même forme ;
- les dimensions des grains appartenant à l'un ou à l'autre granulat sont bien différents.

Dans ce cas simple ci :

$n \leq n_1$ alors $j \geq d_s$ et il n'y a pas d'interférence

$n > n_1$ alors $j < d_s$ et il y a interférence

Plusieurs auteurs se sont efforcés d'étendre la validité de l'équation 2.5' à une granulométrie continue distinguant par exemple le ciment comme "granulat fin" et regroupant tous les granulats inertes comme "granulat grossier". Il reste difficile de donner à j et à d_s une signification qui ne soit pas un tant soit peu arbitraire et l'équation 2.5' même modifiée, n'est pas toujours accordée aux faits.

L'effet d'interférence ne s'en manifeste pas moins cependant, dès que la concentration des grains grossiers est suffisamment forte.

Soulignons une différence importante entre les deux interactions qu'on vient de décrire. Tant que les grains fins sont suffisamment petits devant les grossiers, l'effet

de paroi est linéaire et satisfait au principe de superposition : l'effet de deux parois est la somme des effets de chacune d'elle. Au contraire l'effet d'interférence qui apparaît à partir d'une proportion seuil n'est jamais linéaire. Il ne peut satisfaire, même approximativement, au principe de superposition : il dépend de la structure du granulat grossier considérée comme un tout.

Du fait des effets de paroi et d'interférence, l'indice des vides ne peut être inférieure à une valeur minimale correspondant à une proportion optimale de granulat grossier (fig.2.4). Cette valeur optimale se situe nécessairement au-dessus de la droite AD ou exceptionnellement sur cette droite même. Pour cette raison, lorsque **les proportions du mélange sont optimales, il y a, en général un effet d'interférence** du granulat grossier sur le granulat fin. L'effet d'interférence ne se prête pas commodément à simplification. Cependant lorsqu'un granulat est très fin par rapport à l'autre, il est possible de schématiser la variation de l'indice des vides du mélange par trois droites (fig.2.8). Ce cas est intéressant en pratique car il correspond au mélange d'un ciment anhydre (granulat fin), d'un squelette granulaire inerte composé d'un sable, et d'un gravillon (l'ensemble formant le granulat grossier). Une partie des grains fins du ciment peut se loger dans les interstices du squelette inerte.

Pour mettre ce fait particulier en valeur, nous définirons une nouvelle proportion limite n_s telle que pour $n > n_s$

tout le ciment se loge dans les interstices du granulat grossier sans modifier la structure de ce dernier (on vérifie alors expérimentalement que l'équation de la droite cc' représente bien l'évolution de la porosité du mélange. Quand il en est ainsi, l'effet de paroi n'est plus la seule interaction entre les granulats et, par conséquent $n_s > n_l$. On est donc conduit à distinguer trois cas :

- pour $n > n_s > n_l$:

$$u = (c+1)n-1 \quad [\text{éq.2.6}]$$

Il s'agit de l'équation de la droite cc' de la figure 2.1, mais cette fois-ci, vérifiée expérimentalement. Dans ce cas il y a bien effet d'interférence puisque les grains fins sont dans les interstices des grains grossiers, mais le jeu du granulat est nul et c'est ce qui permet la simplification. Si on ajoute des grains fins, (disons du ciment) de sorte que

$n > n_s > n_l$, il y a toujours effet d'interférence mais le jeu du granulat n'est pas nul. On trouve alors le cas le plus général. Cependant, si l'un des granulats est suffisamment fin par rapport à l'autre, l'intervalle comprise entre n_s et n_l sera petit devant l'unité. La courbe $U(n)$ dans cet intervalle, pourra être assimilée à une droite de pente positive. Empiriquement, il semble même possible de faire passer cette droite par l'origine [POWERS 1968]. Par conséquent :

- pour $n_s > n > n_1$:

$$u = E.n \quad [\text{éq. 2.7}]$$

Il s'agit d'une équation empirique approximative. E est un coefficient qui n'a pas une signification physique simple. Bien entendu, comme dans le cas général :

pour $n < n_1$:

$$u = A(1-n) + D_n$$

puisque'il n'y a plus d'effet d'interférence, mais seulement effet de paroi.

Par conséquent lorsqu'un des granulats est très fin par rapport à l'autre, la variation de l'indice des vides du mélange en fonction des proportions peut être interprétée selon trois lois bien différentes suivant que le mélange soit riche en granulat fin, pauvre, ou intermédiaire. Nous résumons la situation en soulignant au passage dans chacun des cas le rôle du granulat grossier.

1- Mélange riche en granulat fin

$n < n_1$

$$u = A(1-n) + D_n$$

le granulat grossier intervient par sa surface spécifique.

2- Mélange pauvre en granulat fin

$n > n_s$

$$u = (c+1)n-1$$

Le granulat grossier intervient par son indice des vides.

3- Mélanges intermédiaires

$$n_1 < n < n_s$$

$$u = E_n$$

Le granulat grossier intervient par la granularité de ses interstices, donc à la fois par sa surface spécifique et son indice des vides.

2.1.2 La théorie de la granulation optimale selon CAQUOT (1937)

Cette théorie est la plus complète dont nous disposons actuellement. C'est sur elle que se fondent les méthodes de composition de FAURY et de JOISEL. Même si elle n'est pas entièrement satisfaisante, elle demeure pleine d'enseignements. Nous nous proposons de rappeler la ligne générale qui a conduit au résultat final. - La granulométrie optimale - sans refaire l'historique de la théorie qu'on peut voir dans la bibliographie. La théorie a été établie par la démarche suivante constituée de trois étapes :

1- Établissement de la granulométrie optimale d'un mélange indéfini (mélange contenant des grains grossiers et aussi petits que l'on veut)

2- Recherche de la correction à appliquer aux proportions d'un mélange dont la dimension des grains est bornée supérieurement.

3- Recherche de la correction à appliquer aux propositions d'un mélange dont la dimension des grains est donnée inférieurement.

Pour ces corrections on aboutit à un mélange fini dont les proportions sont voisines de l'optimum.

La première étape est basée sur un résultat expérimental bien connu quand on cherche à minimiser le volume des vides d'un mélange de plusieurs granulats, on constate que le volume minimal trouvé :

- est peu influencé par l'échelonnement des dimensions intermédiaires des granulats,

- dépend surtout du rapport entre la dimension du plus gros granulat (D) et celle du plus fin (d) on trouve (fig. 2.6)

$$V = V_0(d/D)^{1/5} \quad [\text{éq. 2.8}]$$

V : volume des vides du mélange (d/D)

V₀ : constante déterminée expérimentalement.

Procédons par une analyse basée sur la dimension des granulats du mélange (chaque granulat composé de grains de même grosseur). Les granulats étant numérotés du plus gros au plus fin, la dimension du grain le plus fin prise comme unité.

N° 1 2 3P, P+1.....q

d 1 k k².....k, P-1, K(p).....K(q-1)

Soit une progression des dimensions des grains en suite géométrique de raison $k(k>1)$ pour les "q" grains de chaque mélange.

Pour cette première étape, le résultat - équation de la granularité optimale - du mélange indéfini est :

$$V_{p+1} / V_p = k^{1/5} = (d_{p+1} / d_p)^{1/5} = g_{p+1} / g_p \quad (\text{équation 9})$$

$P = 1 \dots \dots \dots q$ rang du granulat dans le mélange

k^P = taille du granulat de rang p

V_p = volume apparent du granulat de rang p (m³)

g_p = volume absolu du granulat de rang p (m³)

d_p = dimension des grains de rang p (mm)

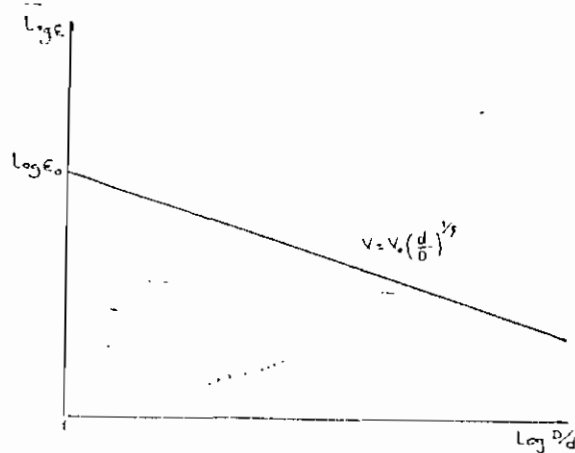


Figure 2.6 : Porosité et étendue granulaire

On caractérise l'étendue granulaire d'un granulat par le rapport D/d .

D est la dimension du tamis retenant 10 % de granulat, d est la dimension du tamis retenant 90 % du granulat.

Pour chaque rapport D/d la granularité est choisie de manière à minimiser la porosité. On représente ici la variation de cette porosité minimale en fonction du rapport D/d . Dans un graphique log-log, la courbe représentative de

cette variation est une droite de pente 1/5.

et la granularité optimale du mélange indéfini peut aussi s'écrire :

$$g_i/g_j = v_i/v_j = (d_i/d_j)^{1/5} \quad [\text{éq. 2.10}]$$

V_i : volume apparent de tous les granulats jusqu'au rang i (m^3)

g_i : volume absolu du granulat de rang i (m^3)

d_i : dimension des grains du granulat i (m^3)

Pour la deuxième étape - correction à appliquer aux proportions d'un mélange dont la dimension des grains est bornée supérieurement - CAQUOT s'est donné les trois règles simplificatrices suivantes :

1- on ne corrigera la proportion que d'un seul granulat, le plus gros évidemment ;

2- la correction sera faite de telle sorte que tous les granulats de dimensions inférieures soient approximativement dans la situation qui serait la leur au sein d'un mélange indéfini de granulométrie optimale ;

3- des deux types d'interaction possibles entre grains on ne retiendra que celui qui obéit au principe de superposition : l'effet de paroi.

Le résultat final obtenu est l'équation 2.11 ci-après :

$$G_g/V_p = (X - d_g/D) / (1 + d_g/d) \quad [\text{éq.2.11}]$$

avec

$$X = \left[k^{1/5} - 1 \right] / \left[1 - k^{-4/5} \right]$$

D = rayon du coffrage (m)

g_g = volume absolu du granulat grossier (m³)

d_g = dimension du granulat grossier (mm)

Pour la troisième et dernière étape - correction à apporter aux proportions d'un mélange dont la dimension des grains est bornée inférieurement - les règles simplificatrices sont les mêmes que pour la deuxième étape. Et les résultats expérimentaux trouvés montrent alors que l'addition d'un grain fin réduit le volume optimal du granulat le plus grossier dans une proportion f qui ne dépend que du rapport des dimensions des deux granulats :

$$g_j = g'_j \cdot f(d_j/d_i) \quad \text{avec } d_j > d_i$$

g'_j = volume optimal du granulat j avant l'addition du granulat i

(m³)

g_j = volume optimal du granulat j après l'addition du granulat i

(m³)

Les valeurs de la fonction f données par l'expérience sont les suivantes :

| | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| d_j/d_i | 2 | 4 | 8 | 16 | 64 | 256 | 512 |
| f | 0,59 | 0,68 | 0,77 | 0,87 | 0,97 | 1 | 1 |

On remarque que la fonction f tend rapidement vers 1 quand le rapport des dimensions augmente [$f = 1$ pour $d_j/d_i = 2(E + 8)$].

Appliquons le principe de superposition pour relier g_1 à c (petit $c \neq$ de C précédent) ($c =$ volume du ciment dans le mélange fini). Pour calculer le volume optimal g_1 de la granularité indéfinie, on peut en effet partir du volume optimal c (supposé connu) du granulat homologue dans le mélange fini, puis tenir compte de l'interaction avec :

- le granulat de dimension $1/k$ en multipliant c par f_1 ;
 - le granulat de dimension $1/k_2$ en multipliant c par f_2 ;
- et c ,

le granulat de dimension $1/k$ en multipliant c par f_p ; etc,
 finalement :

$$g_1 = c \cdot f_1 \cdot f_2 \dots \dots \dots f_p \dots \dots$$

ou encore $g_1 = c \cdot f^*$

en désignant par f^* le produit infini $f_1 f_2 f_3 \dots \dots \dots f_p$

On vérifie numériquement que f^* a une valeur finie :

pour $k = 16$, $f^* = 0,8711 \dots\dots = 0,87$

pour $k = 64$, $f^* = 0,9711 \dots\dots = 0,97$

2.1.3 Remarques critiques sur la théorie de CAQUOT

En suivant les trois étapes du raisonnement on note plusieurs difficultés de la théorie de CAQUOT.

1- Première étape : Granulométrie indéfini optimale

L'équation 2.10 de cette granulométrie est obtenue en étendant la validité d'un résultat expérimental (celui de la figure 2.6) à une situation fictive où p granulats sont isolés "par la pensée" d'un mélange qui en contient q . Rien ne prouve que cette extension soit légitime. On doit convenir que, telle qu'elle se présente, l'équation 2.10 n'est ni démontrée ni expérimentalement prouvée.

2- Deuxième et troisième étapes : Les corrections nécessaires pour les mélanges finis

Le calcul de ces corrections suppose l'additivité des interactions entre granulats. Mais nous l'avons vu, seul l'effet de paroi est additif : l'effet d'interférence ne l'est pas. Or c'est l'apparition de cet effet qui détermine la proportion optimale. Et CAQUOT vérifie bien à posteriori que le volume des vides de ces mélanges augmente avec la surface des grains les plus grossiers. De ce point de vue l'effet de paroi est prépondérant ; toute autre interaction est

négligeable. Mais cela ne prouve pas qu'on puisse négliger l'effet d'interférence pour déterminer les proportions optimales. On s'en convaincra en examinant la figure 2.4. Le point B correspondant au mélange optimal, est voisin de AD, droite des mélanges où l'effet de paroi s'exerce seul (l'effet d'interférence y est nul) ; l'ordonnée de B, le volume des vides du mélange optimal dépend presque uniquement de l'effet de paroi seul (comme le vérifie CAQUOT). En revanche, l'abscisse de B, proportion du mélange optimal, est déterminée par celle de I, correspondant à l'apparition de l'effet d'interférence.

3 Deuxième et troisième étape : Quelles proportions corriger ?

CAQUOT limite les corrections à la proportion du plus grossier granulat et à celle du plus fin, il souhaite ainsi placer les granulats intermédiaires dans une situation voisine de celle qu'ils avaient dans une granulométrie indéfinie optimale. Ce faisant, il ne prétend pas aboutir à une granulométrie finie optimale mais seulement à une granulométrie proche de cet optimum. La difficulté provient ici de ce qu'on ne saurait dire dans quelle mesure elle en est proche. N'aurait-il pas fallu corriger les proportions des deux ou trois plus gros granulats (et non d'un seul) et des deux ou trois granulats plus fins (et non d'un seul) ? A la limite on peut même se demander si toutes les proportions ne devraient pas être corrigées ; ou encore - cela revient au même - s'il existe une granulométrie optimale ?

Ces réserves faites, on ne saurait affirmer que la courbe granulométrique donnée par la théorie puisse être considérée, en pratique, comme suffisamment voisine de l'optimum ; mais on ne saurait non plus, affirmer le contraire. Le mieux semble être alors de se livrer à une vérification expérimentale, c'est ce qu'à fait JOISEL avec une grande minutie [JOISEL - 1952] Le résultat est là : six points expérimentaux presque parfaitement alignés sur la droite prévue par la théorie (fig. 2.6). On peut penser que cela suffit à balayer toutes les réserves. Eh bien, ce n'est pas si sûr.. Expérimentalement on ne peut optimiser en faisant varier six paramètres à la fois mais sur deux ou trois pas plus ; il faut fixer quelques valeurs, c'est-à-dire, optimiser sur des coupes.. Mais le choix de ces coupes peut influencer le résultat final ; il en est ainsi de celles opérées par JOISEL : elles se caractérisent par une parfaite symétrie qui n'est pas étrangère à l'alignement final des points expérimentaux. Bref, l'expérience ne contredit pas le résultat théorique mais elle ne l'affranchit pas non plus des réserves faites.

Mais cette théorie comme nous le disions au début, malgré ses difficultés en suspens, reste pleine d'enseignements :

- elle met l'accent sur l'interaction entre les granulats - même si elle ne prend pas en compte toutes les formes de cette interaction,
- elle explique qualitativement et partiellement sans doute pourquoi la proportion du plus gros granulats doit être majorée,

- elle montre l'importance d'un dosage en éléments fins optimaux (ciment et fine inertes),

- elle s'accorde enfin avec deux résultats expérimentaux importants : car non seulement les vides, mais le dosage optimal en ciment et fines inertes varient en effet comme (d/D) .

Après ces quelques lignes sur l'optimisation de la porosité des mélanges secs nous allons essayer d'en faire autant pour les mélanges humides (eau + fines + granulats).

2.2 LES MÉLANGES DE GRANULAT D'EAU ET DE FINES (CIMENT AJOUT)

L'eau, milieu électrique, modifie les forces intergranulaires, cette influence est sensible pour les grains les plus fins (ciment + fines) : elle devient négligeable pour les grains plus grossiers (sable + gravillon). Partant de la granulométrie optimale d'un mélange sec, l'addition d'eau modifie le dosage optimal en ciment et fines inertes ; on admet que les autres proportions restent inchangées, cela permet de se limiter maintenant à l'étude du dosage optimal en ciment et en eau. Les principales méthodes utilisées en France, celles de FAURY et VALETTE, notamment, ne donnent pas les mêmes règles pour trouver ces dosages ; or chacune se réfère à ces résultats expérimentaux. On souhaite montrer ici comment les règles empiriques peuvent dépendre de la

catégorie du mélange étudié.

2.2.1 Les trois catégories de mélange

Tous les bétons de sable destinés à être mis en place dans les mêmes conditions doivent avoir une même consistance. Il est intéressant de comparer ces bétons entre eux. Pour cela, il suffit de couper le faisceau des droites de la figure 2.8 par une droite horizontale, de côté égale à la consistance choisie. Les abscisses des points d'intersection sont directement proportionnelles aux pentes des droites du faisceau : elles permettent de calculer la variation du dosage en eau [$e/(c + g)$], nécessaire pour avoir une consistance donnée, en fonction de la composition du squelette granulaire [$s/(c + g)$]. Cette variation est semblable à celle de la porosité des mélanges binaires de granulats secs (fig.2.4) ; en particulier, on observe que le dosage en eau nécessaire est minimale pour un dosage en ciment optimal.

2.2.1.1 Mélanges riches en ciment (Pauvres en ajout)

Le dosage en eau nécessaire apparaît comme la somme de ce qu'il faut pour mouiller le granulats inerte et le ciment. A dosage en ciment constant, le dosage en eau nécessaire est d'autant plus faible que le granulats inerte est plus grossier.

2.2.1.2 Mélanges pauvres en ciment (riches en ajout)

Tout se passe comme si le ciment et l'eau servaient indifféremment à remplir des vides du granulats inerte. Si

l'on ôte un volume donné de ciment, il faut pour maintenir une même consistance, ajouter un volume égal d'eau.

A dosage en ciment constant, le dosage en eau nécessaire est d'autant plus faible que le granulat inerte est moins poreux à l'état sec.

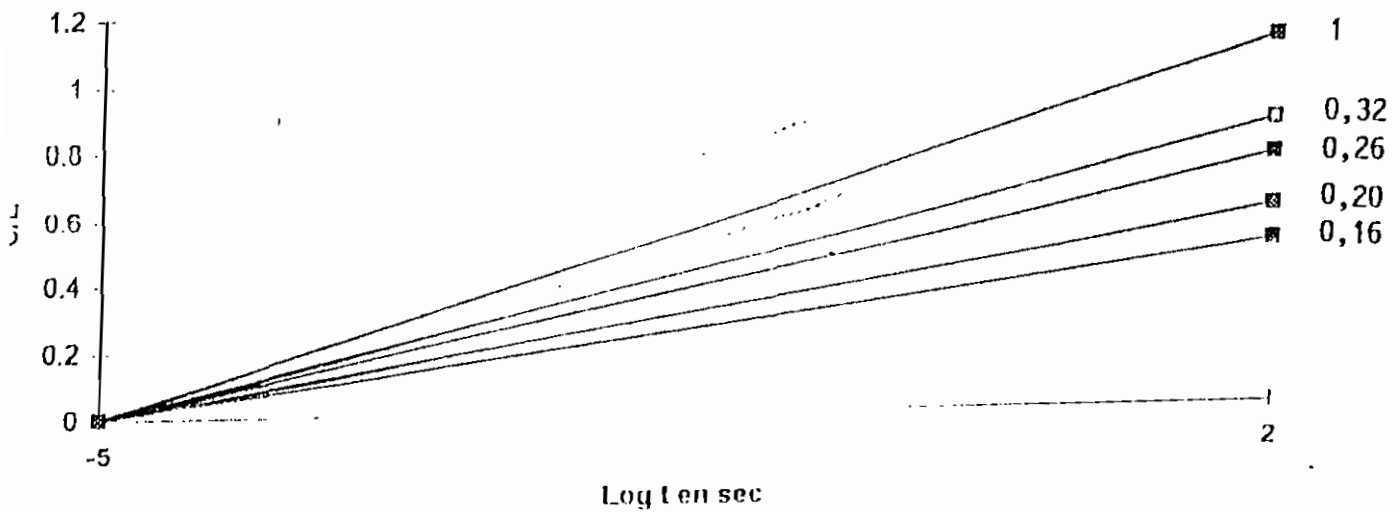
2.2.1.3 Mélanges Intermédiaires

A dosage en ciment constant, le dosage en eau nécessaire dépend à la fois de la surface spécifique et de la porosité du granulat inerte : l'optimisation ne peut alors être qu'expérimentale.

2.2.2 Les méthodes de composition et leurs hypothèses

Il existe en France plusieurs méthodes de composition [FAURY, 1958 ; JOISEL, 1952 ; VALETTE, 1963 ; DREUX, 1970 ; LCPC (Laboratoire Centre des Ponts et Chaussées) ; BARON LESAGE, 1976]. Toutes se réfèrent aux travaux de FERET (1892 et 1896) et sous des formulations différentes. Le but visé paraît être le même : **"chercher des compositions de matériaux inertes telles que, pour un dosage donné en ciment, la quantité des vides soit minimum"** [CAQUOT - 1956]. Chacun s'accorde aussi pour préciser que les vides à minimiser sont ceux du béton de sable dans l'ouvrage et non dans l'éprouvette, cela implique que le béton de sable ait une

Figure 2.7 Consistance en fonction du dosage en eau et en ciment



On caractérise la consistance par le logarithme de la durée d'écoulement au maniabilimètre L.C.L. soit $\log t$ (t exprimé en secondes)

Chacune des droites représente la variation de la consistance en fonction du rapport C/E (volume de ciment rapporté au volume d'eau) pour une valeur donnée du dosage en ciment. Les valeurs inscrites à l'extrémité supérieure de chacune des droites sont celles des rapports $g/(c + g)$ correspondants (g = volume des granulats, c = volume de ciment).

Toutes les droites concurent au point A. (C/E = 0, $\log t = -5$)

consistance convenable pour être mis en place dans les conditions propres au chantier. Il s'agit donc de rechercher un optimum, on conçoit bien qu'il y ait pour cela plusieurs méthodes comme plusieurs chemins possibles pour atteindre un sommet. Du moins, toutes ces méthodes devraient-elles conduire au même résultat ? Or, il n'est pas toujours ainsi en pratique, ni même lorsqu'une comparaison est faite en laboratoire avec tout le soin désirable [JOISEL - 1952]. La raison en est sans doute que chacune de ces méthodes doit pour simplifier, s'appuyer sur quelques hypothèses et que celles-ci ne sont pas les mêmes d'une méthode à l'autre. Ce sont ces hypothèses principales que nous allons passer en revue et discuter : nous examinons successivement celles concernant :

- les conditions de mise en oeuvre ;
- le dosage en ciment et en fines ;
- le dosage en eau ;
- les proportions des granulats inertes.

2.2.2.1 Les conditions de mise en oeuvre

Toutes les méthodes souhaitent en tenir compte mais différent quand à la façon de les caractériser.

La majorité admet que, pour des conditions données; il existe une consistance recommandable [DREUX, méthode LCPC], cela conduit à optimiser le béton de sable pour une consistance donnée ; ou, ce qui revient au même, pour des conditions données de mise en place [JOISEL, FAURY]. Ces conditions incluent la dimension et l'encombrement des

coffrages, le nombre, la dimension et la puissance des pervibrateurs (par exemple) mais aussi le débit (volume mise en place par unité de temps) auquel correspond, en laboratoire, une durée de vibration.

L'hypothèse simplificatrice consiste ici à caractériser ces conditions extrêmement complexes par une seule valeur ; celle de la consistance recommandable c'est-à-dire celle de la maniabilité critique. Elle n'est admissible qu'à l'intérieur du domaine de validité de la maniabilité c'est-à-dire :

- lorsque les appareils de mesure de la consistance imitent assez bien les conditions de mise en oeuvre du chantier (il n'est pas nécessaire que l'imitation soit parfaite) ;

- lorsque les mélanges comparés ont un dosage en ciment et fines voisin de l'optimum.

2.2.2.2. Le dosage en ciment et en fines

Toutes les méthodes ne distinguent pas clairement les deux rôles du ciment : fines de remplissage et liant hydraulique. En tant que liant hydraulique, son dosage dépend de sa classe et de sa résistance mécanique recherchée ; en tant que fines de remplissage, il existe un dosage optimal pour lequel la porosité du béton est minimale (voir paragraphe 2.1)

Cette distinction est possible en pratique ; il suffit de jouer sur la classe du liant hydraulique et sur l'apport de fines inertes. CAQUOT, et à sa suite FAURY et JOISEL

accordent beaucoup d'importance à ce dosage optimal en éléments fins. DREUX s'appuyant d'ailleurs sur les résultats des auteurs précédents, remarque cependant que : **"le dosage en ciment optimal pour le remplissage est, dans la plupart des cas, beaucoup plus faible que celui nécessaire pour la résistance désirée ou imposée par le contrat"**.

S'il en était ainsi, le dosage optimal en ciment et fines perdait bien en effet toute importance pratique. Mais les résultats expérimentaux résumés par l'équation :

$$C_{opt} = \frac{k}{\sqrt[3]{D}}$$

définie précédemment montrent que le dosage optimal est, en fait, du même ordre que celui nécessaire pour obtenir la résistance désirée. On doit même s'attendre à ce que, dans certains cas, il faille ajouter des fines inertes, (c'est bien ce qui se passe dans plusieurs chantiers). La distinction entre les deux rôles de ciment garde alors toute sa valeur ; elle prend plus d'importance encore avec l'accroissement du coût de l'énergie et l'utilisation presque généralisée de ciments à constituant secondaires.

2.2.2.3 Dosage en eau

Toutes les méthodes recommandent un ajustement de ce dosage lors des épreuves de convenue sur chantier. Mais elles ne peuvent pas, pour autant, se passer d'hypothèses et celles-ci influent sur les proportions des granulats inertes.

Là encore, on doit distinguer :

- d'une part les méthodes fondées sur une comparaison des mélanges d'égale consistance ou -ce qui revient au même- des mélanges tous mis en place de la même façon ;

- d'autre part la méthode de Valette : avec cette dernière on souhaite également comparer les bétons de sable d'égale consistance mais cette caractéristique n'est pas mesurée systématiquement. On admet :

- que la quantité d'eau totale est la somme de l'eau nécessaire pour mouiller chacun des constituants :

$$E = e_c \cdot C + e_s \cdot S + e_g \cdot G$$

- que lorsque les proportions C, S ou G varient, la consistance des bétons de sable reste la même pourvu que les constituants soient mouillés de la même façon : e_c , e_s , e_g constants.

La méthode LCPC fait une hypothèse différente. Tous les bétons de sable sont comparés à égale consistance : on admet que les proportions optimales des constituants solides sont indépendantes à celles qui consistent à représenter par un faisceau de droites les courbes de la figure 2.7. Elle est donc, en général, bien en accord avec les résultats expérimentaux.

Comme il est indiqué plus haut, elle peut cependant être mis en défaut exceptionnellement, lorsque les sables contiennent des minéraux nocifs comme les feldspaths ou les micas. Une autre formulation de la même hypothèse consiste

à dire que les proportions optimales des constituants solides sont indépendantes du dosage en eau. C'est d'autant mieux admissible que ce dosage en eau varie finalement assez peu.

2.2.2.4 Les proportions des granulats inertes

Rappelons que pour CAQUOT, la loi granulométrique simple est celle du mélange indéfini. Pour l'instant, il faut placer les granulats intermédiaires dans la situation qu'ils auraient au sein du mélange indéfini, il faut donc en particulier, que le dosage en fines soit optimal. En suivant la ligne de ce raisonnement on doit conclure que le domaine de validité des courbes de référence (de FAURY et JOISEL) n'est limité qu'au voisinage du point B (fig.2.4). C'est une raison supplémentaire - s'il en faut - pour optimiser le dosage en ciment et en fines. On remarque que ce domaine de validité est aussi celui trouvé pour la maniabilité et, partant, celui de la méthode LCPC [BARON-LESAGE, 1976]. On peut donc résumer ainsi cette revue des principales hypothèses sous-jacentes aux méthodes de composition :

1- On ne peut en général, se passer d'hypothèses simplificatrices (sauf peut-être pour les petites pièces fabriquées industriellement comme blocs, bordures de trottoirs, tuiles etc.) ;

2- la validité (toujours approximative) de chacune de ces hypothèses doit faire l'objet d'un examen attentif, dans le

meilleur des cas elle dépend de la composition du béton et, notamment, du dosage en éléments fins ;

3- les méthodes graphiques (JOISEL, FAURY, DREUX), la méthode expérimentale LCPC, sont plus sûrs lorsque le dosage en éléments fins (ciments + fines inertes) est voisin de l'optimum. Ce dernier peut être déterminé expérimentalement et sinon estimé par la formule empirique approchée :

$$C(\text{kg} / \text{m}^3) = k / D^{1/5} \quad (k = 550 \text{ ou } 700)$$

4- l'optimisation recherchée par la méthode de VALETTE n'est pas celle recherchée par les méthodes précédentes. Pour faciliter une comparaison objective entre les bétons proposés il convient de mesurer :

- la durée nécessaire pour obtenir le resuage du mortier en surface en reliant cette durée au débit de bétonnage prévu ou souhaité
- la consistance des mélanges étudiés.

2.3 CONCLUSION

Ce chapitre n'apporte aucune règle permettant d'atteindre à coup sûr l'optimum : le béton de sable en place de porosité minimale. Mais son but était plus modeste : comprendre pourquoi il existe plusieurs méthodes de composition, certaines aboutissant à des résultats sensiblement

différents. A ce titre nous montreront dans le chapitre qui suit, que notre méthode de composition, bien qu'ayant le même objectif avec celles précitées gardera une certaine spécificité qui lui est propre.

La porosité des mélanges secs présente deux composantes. L'une additive (effet de paroi) l'autre non additive (effet d'interférence). Il en est de même de la quantité d'eau nécessaire pour qu'un béton ait une consistance donnée ; l'eau de mouillage des granulats est la composante additive mais, en deçà d'un certain dosage en éléments fins, il faut davantage d'eau ; apparaît alors une composante non additive liée à la répartition des vides dans le mélange granulaire.

CHAPITRE III :

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

1- CHOIX ET IDENTIFICATION

2- CHOIX DE LA MÉTHODE DE FORMULATION

3- RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES

4- RÈGLES DE CONCEPTION DE DIMENSIONNEMENT ET DE RÉALISATION

CHAPITRE 3 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Après une présentation générale du sujet d'étude dans les deux premiers chapitres, nous allons ici dégager le noyau de ce travail ; cela passera d'abord par une présentation des matériaux, suivie des essais réalisés et de l'interprétation des résultats et pour terminer par le dimensionnement des parpaings et des chaussées.

3.1 CHOIX DES MATÉRIAUX

L'illustration des caractéristiques mécaniques des matériaux nous paraît indispensable pour ce travail. Notons que les choix sont guidés principalement par la disponibilité des matériaux (lieu d'exploitation et coût). Et, comme nous pouvons le constater nos matériaux s'obtiennent tous des régions de Thiès ou Dakar.

3.1.1 Le Sable de dune

Avec l'interdiction d'exploitation par le décret 79.880 du 25 Septembre 1979, des sables de plage, le sable de dune - le plus abondant dans le pays - fut celle qui s'utilise le plus dans la construction. Cependant les études ont montré qu'il offrait des résistances voisines sinon égale à celles du sable de plage. Les sables utilisés pour ce travail sont ceux de Thiès ,de couleur brune.

3.1.2 Les sables fillérisés

Il s'agit de cinq sables fillérisés 0/3, résidus de concassage, de granulats, de basalte, de grés, de silex et de calcaire.

3.1.2.1 Le sable fillérisé de basalte

Il est obtenu à partir du site de Diack (région de Thiès) situé à 100 km de Dakar. Il est de couleur grise à noire, très dur, à grains fins.

3.1.2.2 Le sable fillérisé de grés

Les gisements de Toglou sont nos sources d'approvisionnement. Le grés est un matériau de couleur rose à orange à grains fins.

3.1.2.3 Le sable fillérisé de calcaire

Contrairement aux autres fillers, nous disposons ici de deux types de calcaire provenant des carrières de Bargny (à Dakar) et de Bandia (Département de Mbour). Ce sont des matériaux de couleur blanche et à grains fins.

3.1.2.4 Le sable fillérisé de silex

Il est obtenu à partir du site de Taïba. Le granulats se présente souvent suivant des blocs à cœur sombre et à cortex blanc.

3.2 IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

Cette identification se fera d'abord par la détermination

des compositions massiques des différents ajouts : l'étude granulométrique.

3.2.1 Analyse granulométrique

Les courbes granulométriques des différents matériaux étudiés sont représentées en annexe. D'une part, pour chaque matériau, une superposition des courbes à sec et avec lavage a été faite pour faire ressortir les différences existantes et, d'autre part, un regroupement des courbes pour les cinq matériaux (à sec et avec lavage). Pour les deux types de granulométrie, les résultats sont mentionnés dans les deux tableaux ci-après :

| Matériaux | Paramètres granulométriques | | | | |
|---------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|---------|
| | % de fines ($<80\mu\text{m}$) | C_u | C_c | M_f | $0/D$ |
| Sable de dune | 4 | 3 | 1 | 1 | 0/0,6 |
| Calcaire 0/3 de Bargny | 16 | 22 | 1 | 2 | 0/4 |
| Calcaire 0/3 de Bandia | 12 | 6 | 1 | 2 | 0/4 |
| Basalte 0/3 Diack | 14 | 20 | 2 | 2 | 0,075/4 |
| Gré 0/3 de Toglou | 9 | 8 | 0,92 | 1,83 | 0/3,35 |
| Silexte 0/3 de Taïba | 8 | 11,25 | 1,1 | 2,28 | 0/4,5 |

Tableau 3.1 : Résultats de l'analyse granulométrique à sec

| Matériaux | Paramètres granulométriques | | | | |
|---------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| | % de fines (< 80µm) | C _u | C _c | M _f | O / D |
| Sable de dune | 4 | 2,95 | 1,08 | 1,3 | 0/0,03 |
| Calcaire 0/3 de Bargny | 30 | 100 | 1,56 | 1,99 | 0/3 |
| Calcaire 0/3 de Bandia | 33 | 25 | 1,734 | 1,86 | 0/3,5 |
| Basalte 0/3 de Diack | 29 | 80 | 1,012 | 1,99 | 0/4 |
| Gré 0/3 de Toglou | 19 | 7,5 | 0,3 | 1,77 | 0/3,5 |
| Silixte 0/3 de Taïba | 18,5 | 17,5 | 1,11 | 2,11 | 0/2,4 |

Tableau 3.2 : Résultats de l'analyse granulométrique après lavage

M_f : module de finesse

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

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

Le sable de dune utilisé est un sable très fin (M_f = 1,3) avec un pourcentage de fines relativement égal à 3 % et une valeur d'Équivalent sable E.S égale à 54. Notons que cette valeur de E.S est nettement en deçà du minimum requis (E.S_{min} = 65), mais nous sommes obligés de nous y contenter parce qu'étant les seuls sables disponibles en exploitation dans la ville de Thiès. Cependant les matériaux d'ajouts présentent des valeurs de M_f suffisantes pour être utilisées dans la composition des bétons de sable : ils sont sujets au compactage et bien gradués (C_u ≥ 4 et C_c < 3).

Comparativement avec le lavage, on note une sensible augmentation du pourcentage de fines qui peut être justifiée par la provenance du matériau (lié dans le sol à des argiles) et la longue exposition à l'air, ce qui favorise l'altération du matériau par l'érosion éolienne. Cette comparaison nous fait noter aussi une diminution du module de finesse M_f et une augmentation des valeurs de C_u et C_c . Mais toutes ces valeurs concourent à la confirmation de l'utilisation de ces ajouts dans les bétons de sable. Pour les essais que nous feront dans ce chapitre, ce sont les valeurs de la granulométrie après lavage qui seront utilisées. Cette utilisation est justifiée par les courbes C1 à C6 à l'annexe.

3.2.2 Analyse chimique

Les résultats sont consignés dans le tableau ci-après :

| Echantillons | SiO_2 | Fe_2O_3 | Al_2O_3 | CaO | MgO | SO_3 | P.Feu | M.V | Total |
|--------------------|---------|-----------|-----------|-------|------|--------|-------|------|-------|
| Calcaire de Bandia | 4,04 | 0,9 | 0,42 | 52,16 | 0,89 | | 41,04 | 2,7 | 99,45 |
| Calcaire de Bargny | 6,74 | 1,16 | 0,84 | 50,06 | 1,68 | | 39,29 | 2,69 | 99,67 |
| Basalte de Diack | 49,33 | 12,04 | 13,48 | 9,69 | 8,64 | 0,24 | 3,78 | 2,96 | 97,2 |
| Gré de Toglou | 89,30 | 2,43 | 5,06 | 0,24 | 0,12 | 0,73 | 2,04 | 3,68 | 99,97 |
| Silexite de Taïba | 69,05 | 3,43 | 1,33 | 16,64 | 0,90 | 0,77 | 5,55 | 2,71 | 97,67 |

Tableau 3.3 : Résultats de l'analyse chimique des ajouts

Cette analyse chimique nous a été faite par le laboratoire de la SOCOCIM et nous y retiendrons deux faits qui nous paraissent les plus importants : la présence relativement élevée de silice (SiO_2) dans le basalte, le grès et le silexite et de l'oxyde de calcium (CaO) dans le calcaire. Cette présence de silice et des éléments alcalins comme le sodium et le potassium qui peuvent provenir de l'eau de gâchage ou des granulats composants le béton, donnent des composés expansifs qui peuvent conduire à la fissuration du béton. Certaines conditions sont nécessaires pour l'apparition de l'alcali-granat elles sont :

- la présence d'un granulats potentiellement réactif ;
- une concentration élevée en éléments alcalins dans la solution interstitielle ;
- une ambiance de conservation du béton présentant une humidité relative élevée : $\text{HR} > 80 \%$. L'absence d'une de ces conditions élimine tout risque d'apparition de l'alcali-granat.

3.2.3 Détermination du poids spécifique γ_s et de la densité γ_d

Elles ont été obtenus à travers plusieurs essais. Les valeurs finales de γ_s et γ_d sont des valeurs moyennes d'au moins trois échantillons. Les résultats sont mentionnés dans le tableau ci-après :

| Matériaux | Poids spécifique γ_s (t/m ³) | Densité sèche γ_s (t/m ³) |
|--------------------|--|---|
| Calcaire de Bargny | 2,68 | 1,88 |
| Calcaire de Bandia | 2,69 | 1,9 |
| Basalte de Diack | 2,97 | 1,98 |
| Gré de Toglou | 2,68 | 1,865 |
| Silexite de Taïba | 2,73 | 1,94 |

Tableau 3.4. : Densité sèche et poids spécifique des ajouts

3.2.4 Surface spécifique des ajouts

Elle est calculée pour chaque matériau par la relation suivante :

$$100 \Sigma = 0,17G + 0,33g + 2,39S + 12s + 125f$$

Σ = surface spécifique

G = grains de diamètres supérieurs à 10 mm

g = grains de diamètres compris entre 5 et 10 mm

S = sable grossiers de diamètre compris entre 5 et 0,315 mm

s = diamètre des sables fins compris entre 0,315 et 0,08 mm

f = grains de diamètres inférieurs à 0,080 mm

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 3.5 ci-dessous :

Cette abréviation est différente de celle utiliser au chapitre 2. Elle est spécifique à cette formule.

| Composition | Matériaux | | | | |
|--|-----------|-----|---------|--------------------|--------------------|
| | Silexite | Gré | Basalte | Calcaire de Bargny | Calcaire de Bandia |
| G | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| g | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S | 9,3 | 8 | 10 | 10 | 2 |
| s | 72,2 | 73 | 61 | 60 | 65 |
| f | 18,5 | 19 | 29 | 30 | 33 |
| surface spécifique m ² /kg | 119,8 | 121 | 128 | 129,8 | 132 |

Tableau 3.5 : Surface spécifique des ajouts

Les valeurs de surface spécifique (Σ) trouvées conviennent pour du béton de sable routier, d'autant plus que pour les routes en noire la valeur recommandée est de 135 m²/kg. (Source : Lavoc École Polytechnique Fédéral de Lausanne).

3.2.5 Absorptivité des granulats

L'essai réalisé nous a permis de déterminer le pouvoir absorptif des différents fillers. L'absorptivité se calcule de la manière suivante :

Absorptivité = $\frac{(B-A)}{A} \times 100$ (en pourcentage) avec :

A

A = Masse de l'échantillon séché à l'étuve mesuré à l'air (g)

B = Masse de l'échantillon à l'état saturé superficiellement sec (g) (s.s.s)

C = Masse de l'échantillon saturé mesuré à l'eau (g) 70

Les résultats de l'essai sont mentionnés dans le tableau 3.6 ci-après :

| Matériaux | A = Masse échantillon séché (g) | C = Masse échantillon saturé dans l'eau (g) | B = Masse échantillon à l'état SSS | Abs (%) |
|--------------------|---------------------------------|---|------------------------------------|---------|
| Sable de dune | 497,80 | 801,85 | 500 | 0,44 |
| Silexite | 490,39 | 778 | 500 | 1,96 |
| Basalte | 488,65 | 811,60 | 500 | 2,32 |
| Calcaire de Bandia | 467,16 | 780,19 | 500 | 4,89 |
| Calcaire de Bargny | 469,98 | 777,24 | 500 | 4,7 |
| Gré | 494,16 | 800,4 | 500 | 1,18 |

Tableau 3.6 : Absorptivité des ajouts

Nous voyons à travers ce tableau que nos ajouts ont des valeurs d'absorptivité toutes inférieures à 5 % et, comparativement au tableau 3.3 (Analyse chimique), on constate que les matériaux qui ont plus de silice (SiO_2) sont ceux qui ont des valeurs d'absorptivité les plus proches de celles du sable de dune.

3.3 CHOIX DE LA MÉTHODE DE FORMULATION

La formulation est l'un des caractéristiques les plus importants pour la performance d'un béton (qu'il s'agisse d'un béton de sable ou d'un béton ordinaire), car c'est

d'elle qu'on assure le compromis entre les objectifs recherchés et la nature des matériaux (granulométrie, texture, forme).

Avant d'en arriver à la formulation utilisée dans ce présent travail, rappelons celle de la méthode "SABLOCRETE" : l'une des plus complète et des plus récente, élaborée à l'ENPC de Paris.

3.3.1 La méthode de "SABLOCRETE"

3.3.1.1 Compacité et méthode de formulation

L'optimisation de la compacité du squelette granulaire est essentiellement basée sur les résultats expérimentaux établis par Caquot et s'énonce en suivant la relation mathématique ci-après pour un mélange d'étendu granulaire $[d/D]$

$$v = v_0 (d/D)^{0,2} \quad [\text{éq. 3.1}]$$

avec v_0 : une constante expérimentale

v : le volume des vides d'un mélange

3.3.1.2 Dosage en fines d'un béton de sable

Les fines sont constituées du ciment, de la fine de l'ajout et des grains de sable de diamètre inférieur à $80\mu\text{m}$. Donc l'étendue granulaire $[80\mu\text{m}, D]$ présente une porosité (P_s) définie par la formule de Caquot comme suit :

$$P_s = 0,75 \frac{(0,08)^{1/5}}{D} \quad 72$$

(on admet que $V_0 = 0,75$) [éq. 3.2]

Par simplification et désignant par [fines] le volume des particules inférieures à $80\mu\text{m}$ et par [v] le volume des vides occupés par ces fines, Caquot a obtenu le résultat suivant :

$$[fines] = [v] \quad [\text{éq.3.3}]$$

La combinaison des équations (3.2) et (3.3) donne :

$$[fines] = 0,75 \times \frac{(0,08)^{1/5}}{2 \times D} = 0,38 \times \frac{(0,08)^{1/5}}{D} \quad [\text{éq.3.4}]$$

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

Une certaine porosité existera toujours bien que le squelette granulaire y compris les fines soit optimisé.

En décomposant (par hypothèse) cette porosité 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 encore des travaux de Caquot :

$$[e+v] = 0,8 (d/D)^{0,2} \quad [\text{éq. 3.5}]$$

En pratique il n'est pas toujours recommandé de faire des bétons avec une stricte quantité d'eau correspondant à la porosité minimale pour des raisons d'ouvrabilité.

Pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piégera une forte quantité d'air, quels que soient les moyens de serrage utilisés, et présentera finalement une porosité $[e+v]$ supérieure à $[e+v]_{\min}$

Le volume d'air piégé et estimé égale à :

$$[\text{vides}] = k[\text{eau}] \quad (1/\text{m}^3) \quad [\text{éq.3.6}]$$

avec k compris entre 0,2 et 0,25

3.3.1.4 Estimation du dosage en sable

C'est le complément du mètre cube des différents constituants du béton. Il est obtenu par le calcul arithmétique ci-après :

$$[\text{sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] \quad (1/\text{m}^3) \\ [\text{éq. 3.7}]$$

Rappelons que dans le cadre de cette formulation le sable est considéré saturé superficiellement sec.

3.3.1.5 Estimation de la résistance en compression

Après la recherche de la compacité optimale qui a permis de fixer les différents constituants : les fines (particules <80um), l'eau et le sable, nous allons passer à l'évaluation de la résistance en compression. Cette évaluation se base sur une généralisation de la formule de FERET :

$$R_b = \frac{K_f R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e + v)}{C(1 K_1 + K_2)}\right)^2} \quad [\text{éq. 3.8}]$$

avec :

K_f : coefficient granulaire compris entre 4,5 et 5

R_c : classe vraie du ciment (MPa)

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

v : l'air piégé (l/m^3)

C : Dosage en ciment (kg/m^3)

R_b : Résistance du béton à 28 jours (MPa)

et avec :

$$K_1 = K_{cv} CV/C + K_{fs} FS/C \quad [\text{éq.3.9}]$$

$$0,2 < K_{cv} < 0,4$$

$$2 < K_{fs} < 3,3$$

$$\text{et } K_1 \leq 0,5$$

$$K_2 = K_{fil}(Fil/C)$$

$$0 < K_{fil} < 0,4$$

$$\text{et } K_2 < 0,2 \quad [\text{éq.}$$

3.10]

avec :

K_1 : coefficient pouzzolanique

K_2 : coefficient d'activité du filler utilisé

Kcv, Ffs, Kfil : coefficient d'équivalence en ciment
des différentes additions en fines

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice
et filler (kg/m³)

Cependant malgré son caractère élaboré la formulation "SABLOCRETE" mérite d'être commentée :

- les hypothèses sont trop simplificatrices à savoir que la porosité sèche (P_S) représente 75 % du volume du mélange ;
- la quantité de fines occupe 50 % de la porosité sèche
- les coefficients Kf, K1, et K2 ne prennent pas en compte simultanément la forme, la texture, le caractère pouzzolanique et la minéralogie des matériaux ;
- l'application de cette méthode à des ajouts renfermant des teneurs en filler relativement faibles (< 20 %) conduirait à des quantités excessives de ces derniers.

Fort de ces remarques, nous nous sommes proposés une autre méthode de formulation qui s'inspire toujours des travaux expérimentaux de CAQUOT.

3.3.2 Méthode de formulation proposée

La formulation sera faite pour les parpaings de remplissage (porteurs ou non) et les chaussées.

Il s'agira d'abord par la relation de CAQUOT de déterminer la quantité de ciment minéral

$$C' = C_{\min} = \frac{F_{cj} + 250}{\sqrt[3]{D}}$$

- pour le parpaings : $f_{cj} = 80$ bars

$$C_{\min} = \frac{80 + 250}{\sqrt[3]{3}} = 280 \text{ kg/m}^3$$

- pour les chaussées : $f_{cj} = 200$ bars

$$C_{\min} = \frac{220 + 250}{\sqrt[3]{3}} = 440 \text{ kg/m}^3$$

Les valeurs de C' représentent les quantités de fines (liant dans le cas de béton ordinaire et liant + fines dans le cas du béton de sable) qui procure le maximum de résistance. Dans le cas du béton ordinaire, cette quantité minimale qui provient de la porosité minimale, correspond à celle qui procure le maximum de rigidité, donc de résistance. Mais dans les bétons de sable du fait que D est petit ($\leq 3\text{mm}$), cette formule de CAQUOT conduirai à des quantités excessives de ciment. Donc l'approche sera de mettre une quantité de ciment qui procure une bonne résistance et de compléter le reste par des fillers pour combler les pores et renforcer la compacité et par suite la résistance. Si nous désignons par (a) la teneur en fines, nous pouvons écrire que :

$$a = \frac{c'}{c' + \sum Sg} \quad \text{soit, } \sum Sg = Sg_1 + Sg_2 = \frac{(1 - a)(c')}{a}$$

avec : a qui variera de 0,2 à 0,4 par pas de 0,05

Sg_1 : masse de la partie grossière de sable de dune (particules > 80 μ m)

Sg_2 : masse de la partie grossière du filler utilisé

Dans les deux cas (chaussées et parpaings), on détermine les dosages de la manière suivante :

Exemple : cas des parpaings $C' = 280 \text{ kg/m}^3$

Prenant la quantité de ciment à mélanger égale à 200 kg/m^3 , la quantité de filler à compléter sera égale à 80 kg/m^3 . on conserve la quantité totale de sable grossier constant et on augmente la quantité de fines progressivement par pas de 10 kg. Ce qui nous mène au système d'équation suivant :

$$\begin{cases} Sg_1 + Sg_2 = (1-a) C' / a & \text{éq. 3.11} \\ F_1 + F_2 = 10, 20, 30, \dots, 80 \end{cases}$$

avec F_1 = masse de fines dans le sable de dune

F_2 = masse de fines dans le filler

Si nous appelons par f_1 et f_2 les pourcentages naturels de fines (< 80 μ m) dans le sable de dune et le matériau

utilisé (basalte, calcaire, silicite ou grès) respectivement : on peut écrire que :

$$\begin{cases} F_1 = \frac{f_1}{(1-f_1)} \cdot S_{g1} \\ F_2 = \frac{f_2}{(1-f_2)} \cdot S_{g2} \end{cases}$$

Le système (3.11) devient :

$$\begin{cases} S_{g1} + S_{g2} = \left(\frac{1-a}{a}\right) C' \\ \frac{f_1}{(1-f_1)} \cdot S_{g1} + \frac{f_2}{(1-f_2)} \cdot S_{g2} = 10, 20, \dots, 80 \end{cases}$$

C' étant connu, a étant fixé et $f_i (i = 1, 2)$ déterminés par

l'analyse granulométrique on trouve un ensemble de combinaison pour chaque matériau.

A chaque fois donc on calculera $S_{gi} (i = 1, 2)$ et on en déduira les valeurs de S_1 et S_2 égales à :

$$S_1 = \frac{S_{g1}}{(1-f_1)} = \text{Masse totale de sable de dune (fines + partie grossière)}$$

$$S_2 = \frac{S_{g2}}{(1-f_2)} = \text{Masse totale de filler (fines + partie grossière)}$$

Les valeurs trouvées sont mentionnées dans les tableaux al à al0 en annexe. Mais toutes ces valeurs pour chaque matériau ne pouvant faire l'objet d'essais mécaniques - résistance en compression, résistance en traction - C'est pour chaque valeur de a (a = 0,2 ; 0,25 ; 0,3 ; 0,35 ; 0,4) que nous feront ces essais mécaniques suivant un choix. Le choix sera telle que nous puissions couvrir toutes les gammes réalistes du pourcentage de fines

$$\frac{F_1 + F_2}{S_1 + S_2} \cdot 100$$

mais aussi éliminer toutes les valeurs négatives. Ce qui nous donne les tableaux 3.7 et 3.8 ci-après :

La propriété recherchée étant l'effet complémentaire des fillers sur la résistance du béton, la quantité du béton sera maintenue comme pour celle du ciment pour toutes les formulations et pour tous les matériaux avec une valeur de $E/C = 0,65$.

| MATÉRIAUX | Q | C' | C | (1-a)c/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | % |
|-----------------------|------|-----|-----|----------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|----|
| Basalte | 0,2 | 440 | 350 | 1760 | 120 | 1632,3 | 127,69 | 1700,3 | 140,31 | 68,01 | 12,63 | 5 |
| | 0,25 | 440 | 350 | 1320 | 90 | 1224,2 | 97,76 | 1275,2 | 105,24 | 51,01 | 9,47 | 5 |
| | 0,3 | 440 | 350 | 1026,67 | 50 | 1006,8 | 19,898 | 1048,7 | 21,87 | 41,9 | 1,96 | 4 |
| | 0,35 | 440 | 350 | 817,14 | 90 | 664,29 | 152,86 | 699,96 | 167,97 | 27,67 | 15,12 | 6 |
| | 0,4 | 440 | 350 | 660 | 120 | 407,42 | 252,58 | 424,4 | 277,56 | 16,97 | 24,98 | 10 |
| Calcaire de Bandia | 0,2 | 440 | 350 | 1760 | 120 | 1656,1 | 103,87 | 1725,1 | 114,15 | 69 | 10,27 | 4 |
| | 0,25 | 440 | 350 | 1320 | 120 | 1175,5 | 144,5 | 1224,5 | 158,8 | 48,97 | 14,29 | 5 |
| | 0,3 | 440 | 350 | 1026,67 | 120 | 855,06 | 171,6 | 890,69 | 188,58 | 35,63 | 16,97 | 5 |
| | 0,35 | 440 | 350 | 817,14 | 80 | 715 | 102,15 | 744,79 | 112,25 | 29,79 | 10,1 | 5 |
| | 0,4 | 440 | 350 | 660 | 90 | 521,14 | 138,86 | 542,85 | 152,6 | 21,71 | 13,73 | 7 |
| Calcaire de Bargny | 0,2 | 440 | 350 | 1760 | 90 | 1716,6 | 43,44 | 1788,1 | 47,73 | 71,52 | 4,29 | 4 |
| | 0,25 | 440 | 350 | 1320 | 80 | 1255,1 | 64,93 | 1307,4 | 71,35 | 52,29 | 6,42 | 5 |
| | 0,3 | 440 | 350 | 1026,67 | 90 | 904,28 | 122,39 | 941,96 | 134,49 | 37,68 | 12,1 | 5 |
| | 0,35 | 440 | 350 | 817,14 | 90 | 672,2 | 144,95 | 700,21 | 159,28 | 28,01 | 14,33 | 6 |
| | 0,4 | 440 | 350 | 660 | 120 | 420,5 | 239,5 | 438,02 | 263,19 | 17,52 | 23,69 | 9 |
| Grès de Toglou | 0,2 | 440 | 350 | 1760 | 100 | 1620,8 | 139,21 | 1688,3 | 152,98 | 67,53 | 13,67 | 5 |
| | 0,25 | 440 | 350 | 1320 | 80 | 1189,6 | 130,4 | 1239,2 | 143,29 | 49,56 | 12,89 | 5 |
| | 0,3 | 440 | 350 | 1026,67 | 70 | 884,82 | 141,84 | 921,69 | 155,87 | 36,87 | 14,33 | 4 |
| | 0,35 | 440 | 350 | 817,14 | 100 | 474,07 | 343,07 | 493,82 | 377 | 19,75 | 33,93 | 8 |
| | 0,4 | 440 | 350 | 660 | 120 | 179 | 481 | 186,46 | 528,57 | 7,45 | 47,57 | 30 |
| Silexite de Taïba | 0,2 | 440 | 350 | 1760 | 110 | 1561,6 | 98,4 | 1626,7 | 218,03 | 65,07 | 19,62 | 5 |
| | 0,25 | 440 | 350 | 1320 | 80 | 1184,7 | 135,32 | 1234 | 148,7 | 49,36 | 13,38 | 5 |
| | 0,3 | 440 | 350 | 1026,67 | 90 | 771,59 | 255,07 | 803,74 | 280,3 | 32,15 | 25,23 | 6 |
| | 0,35 | 440 | 350 | 817,14 | 120 | 353,24 | 463,9 | 367,96 | 509,78 | 14,72 | 45,88 | 9 |
| | 0,4 | 440 | 350 | 660 | 80 | 376,59 | 283,41 | 392,28 | 311,44 | 15,69 | 28,03 | 11 |

Tableau 3.7 : Formulation résumée pour les chaussées

| MATÉRIAUX | Q | C' | C | (1-a)c/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | % |
|-----------------------|------|-----|-----|----------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|----|
| Basalte | 0,2 | 280 | 220 | 1120 | 80 | 1028,8 | 91,18 | 1071,7 | 100,2 | 42,87 | 9,02 | 5 |
| | 0,25 | 280 | 220 | 840 | 80 | 717,03 | 122,97 | 746,99 | 135,13 | 29,87 | 12,16 | 5 |
| | 0,3 | 280 | 220 | 653,33 | 90 | 48,88 | 171,46 | 501,96 | 188,41 | 20,08 | 16,96 | 6 |
| | 0,35 | 280 | 220 | 520 | 90 | 333,41 | 186,59 | 347,3 | 205,05 | 13,89 | 18,45 | 7 |
| | 0,4 | 280 | 220 | 420 | 100 | 194,76 | 225,24 | 202,87 | 247,52 | 8,11 | 22,27 | 17 |
| Calcaire de Bandia | 0,2 | 280 | 220 | 1120 | 80 | 1045,8 | 74,17 | 1089,4 | 84,51 | 43,37 | 7,33 | 5 |
| | 0,25 | 280 | 220 | 840 | 70 | 762,17 | 77,83 | 793,92 | 85,53 | 31,76 | 7,69 | 4 |
| | 0,3 | 280 | 220 | 653,33 | 80 | 536,05 | 117,28 | 558,39 | 128,88 | 22,34 | 11,59 | 6 |
| | 0,35 | 280 | 220 | 520 | 90 | 368,21 | 151,79 | 383,55 | 166,81 | 15,34 | 15,01 | 7 |
| | 0,4 | 280 | 220 | 420 | 120 | 192,36 | 227,64 | 200,37 | 250,15 | 8,01 | 22,51 | 15 |
| Calcaire de Bargny | 0,2 | 280 | 220 | 1120 | 70 | 1059,4 | 60,58 | 1103,6 | 66,57 | 44,14 | 5,99 | 4 |
| | 0,25 | 280 | 220 | 840 | 80 | 723,4 | 116,6 | 753,54 | 128,14 | 30,14 | 11,53 | 5 |
| | 0,3 | 280 | 220 | 653,33 | 110 | 438,99 | 214,34 | 457,28 | 235,54 | 18,29 | 21,19 | 7 |
| | 0,35 | 280 | 220 | 520 | 110 | 291,3 | 228,7 | 303,44 | 251,31 | 12,14 | 22,62 | 8 |
| | 0,4 | 280 | 220 | 420 | 110 | 180,54 | 239,46 | 188,06 | 263,14 | 7,52 | 23,68 | 17 |
| Grès de Toglou | 0,2 | 280 | 220 | 1120 | 50 | 1102,3 | 17,71 | 1148,2 | 19,46 | 45,93 | 1,75 | 3 |
| | 0,25 | 280 | 220 | 840 | 70 | 657,8 | 182,2 | 685,2 | 200,2 | 27,41 | 18,02 | 4 |
| | 0,3 | 280 | 220 | 653,33 | 80 | 378,79 | 274,54 | 394,58 | 300,69 | 15,78 | 27,15 | 9 |
| | 0,35 | 280 | 220 | 520 | 90 | 164,66 | 354,34 | 171,52 | 390,49 | 6,86 | 35,14 | 12 |
| | 0,4 | 280 | 220 | 420 | 80 | 96,01 | 324,99 | 98,97 | 357,13 | 3,96 | 32,14 | 36 |
| Silexite de Taïba | 0,2 | 280 | 220 | 1120 | 60 | 1047,7 | 72,32 | 1091,3 | 79,47 | 43,65 | 7,15 | 3 |
| | 0,25 | 280 | 220 | 840 | 60 | 704,85 | 135,15 | 734,22 | 148,51 | 29,37 | 13,37 | 4 |
| | 0,3 | 280 | 220 | 653,33 | 80 | 368,43 | 284,9 | 383,78 | 313,08 | 15,35 | 28,17 | 9 |
| | 0,35 | 280 | 220 | 520 | 90 | 151,24 | 368,76 | 157,54 | 405,23 | 6,3 | 36,47 | 12 |
| | 0,4 | 280 | 220 | 420 | 80 | 82,74 | 337,26 | 86,19 | 370,62 | 3,45 | 33,35 | 43 |

Tableau 3.8 : Formulation résumée pour les parpaings de remplissage

3.4 RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES

Il s'agit d'essais de résistance mécanique en traction par fendage et de résistance en compression. Les éprouvettes sont des cylindres d'élanement égale à 2 (hauteur/diamètre) x 2.

L'idéal était de confectionner des éprouvettes parallélépipédiques 4 x 4 x 16 à partir desquelles l'optimum sera trouvé pour chaque matériau.

A partir de cette optimum, confectionner des éprouvettes cylindriques pour la mesure de la résistance en traction par fendage et de la résistance à la compression.

Cependant il se trouve que les éprouvettes 4 x 4 x 16 sont très faibles pour notre machine de résistance en flexion par traction ce qui nous oblige à confectionner autant d'éprouvette pour le fendage que pour la compression. Les éprouvettes seront muries aussi bien à l'eau qu'à l'air.

3.4.1 Résistance en traction par fendage (R_{tf})

La résistance en traction par fendage (R_{tf}) se calcule de la manière suivante :

$$R_{tf} = \frac{2.F}{\pi.d.h} = \frac{0.637.F}{d.h}$$

avec : F = charge de rupture de l'éprouvette (daN)

d = diamètre de l'éprouvette (Cm)

h = hauteur de l'éprouvette (Cm)

R_{tf} = résistance à la traction par fendage
(daN/cm²)

Les résultats des essais sont mentionnés ci-après dans les tableaux 3.9 et 3.10 pour une application aux chaussées et dans les tableaux 3.11 et 3.12 pour une application aux parpaings.

3.4.2 Résistance en compression (R_c)

La résistance en compression est calculée comme suit :

$$R_c = \frac{4.P}{\pi.d^2}$$

avec : P = charge de compression en (daN)

d = diamètre de l'éprouvette (Cm)

R_c = résistance en compression (daN/cm²)

Les résultats des essais sont mentionnées ci-après dans les tableaux 3.13 et 3.14 pour une application aux chaussées et dans les tableaux 3.15 et 3.16 pour une application aux parpaings.

Au vu des tableaux 3.9 à 3.16, nous pouvons faire les commentaires suivants :

- le basalte offre les plus grandes résistances suivi du silixe, du calcaire de Bandia puis de Bargny et en fin du grès d'où le tableau de classification ci-après :

| Matériau | R _c 28 | R _t f28 | Classement par ordre décroissant |
|--------------------|-------------------|--------------------|----------------------------------|
| Basalte | 30,20 | 3,50 | 1 |
| Silexite | 27,12 | 2,85 | 2 |
| Calcaire de Bandia | 24,90 | 2,77 | 3 |
| Calcaire de Bargny | 24,71 | 2,77 | 4 |
| Grès de Toglou | 23,50 | 2,75 | 5 |

Tableau 3.17 : Classification des matériaux par ordre de résistance décroissant

La valeur de la résistance maximum en traction ou en compression est obtenue pour une valeur optimale du pourcentage de fines compris entre 9 % et 12 %. Comme le montre les figures 3.1 et 3.2 obtenues à partir des essais de fendage et de compression.

- Pour les conditions de mûrissement, nous recommandons celle qui se fait à l'eau parce que donnant les plus grandes valeurs de résistance.

L'influence des conditions de mûrissement a été étudiée par A. HUMMEL (Ahouansou 1993). Plus la température est élevée plus la vitesse d'hydratation est grande. La chaleur accélère la prise et le durcissement alors que le froid ralentit la prise et peut même l'arrêter. Il existe une température idéale de

| Ajouts | Basalte 0/3 de Diack | | | | | Calcaire 0/3 de Bandia | | | | | Calcaire 0/3 de Bargny | | | | | Grès 0/3 de Toglou | | | | | Silixite 0/3 de Taiba | | | | |
|---------------|----------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|------|-----------------------|------|------|------|-----|
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| Résistances | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rtf 7j (MPa) | 1,65 | 1,77 | 1,5 | 1,89 | 1,98 | 1,44 | 1,46 | 1,46 | 1,62 | 1,7 | 1,31 | 1,57 | 1,6 | 1,6 | 1,67 | 1,39 | 1,43 | 1,3 | 1,65 | 1,52 | 1,59 | 1,64 | 1,78 | 1,81 | 1,9 |
| Rtf 14j (MPa) | 2,08 | 2,22 | 1,98 | 2,34 | 2,42 | 1,88 | 1,95 | 1,97 | 1,97 | 2,27 | 1,86 | 1,95 | 1,95 | 1,97 | 2,25 | 1,81 | 1,84 | 1,86 | 2,2 | 1,8 | 1,98 | 1,98 | 2,11 | 2,38 | 2,4 |
| Rtf 28j (MPa) | 2,54 | 2,6 | 2,16 | 2,66 | 2,78 | 2,01 | 2,5 | 2,5 | 2,52 | 2,61 | 2 | 2,47 | 2,47 | 2,48 | 2,59 | 2,38 | 2,4 | 2 | 2,46 | 1,86 | 2,42 | 2,45 | 2,54 | 2,68 | 2,7 |
| % de fines | 5 | 5 | 4 | 6 | 10 | 4 | 5 | 5 | 5 | 7 | 4 | 5 | 5 | 6 | 9 | 5 | 5 | 4 | 8 | 30 | 5 | 5 | 6 | 9 | 11 |

Tableau 3.9: Résistance à la traction par fondage (Rtf) en fonction du temps application au béton de sable pour chaussées (mûrissement à l'air > 26° C)

| Ajouts | Basalte 0/3 de Diack | | | | | Calcaire 0/3 de Bandia | | | | | Calcaire 0/3 de Bargny | | | | | Grès 0/3 de Toglou | | | | | Silixite 0/3 de Taiba | | | | |
|---------------|----------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| Résistances | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rtf 7j (MPa) | 1,65 | 1,65 | 1,55 | 1,68 | 1,71 | 1,39 | 1,55 | 1,55 | 1,59 | 1,63 | 1,37 | 1,5 | 1,57 | 1,57 | 1,6 | 1,54 | 1,54 | 1,32 | 1,59 | 1,57 | 1,57 | 1,6 | 1,6 | 1,65 | 1,67 |
| Rtf 14j (MPa) | 1,82 | 1,85 | 1,78 | 1,88 | 2 | 1,7 | 1,76 | 1,77 | 1,7 | 1,9 | 1,54 | 1,75 | 1,8 | 1,82 | 1,9 | 1,67 | 1,7 | 1,44 | 1,8 | 1,8 | 1,79 | 1,84 | 1,86 | 1,92 | 1,97 |
| Rtf 28j (MPa) | 3,37 | 3,41 | 3,27 | 3,42 | 3,5 | 2,62 | 2,67 | 2,7 | 2,7 | 2,77 | 2,6 | 2,61 | 2,67 | 2,71 | 2,77 | 2,54 | 2,57 | 2,49 | 2,75 | 1,89 | 2,73 | 2,75 | 2,77 | 2,82 | 2,85 |
| % de fines | 5 | 5 | 4 | 6 | 10 | 4 | 5 | 5 | 5 | 7 | 4 | 5 | 5 | 6 | 9 | 5 | 5 | 4 | 8 | 30 | 5 | 5 | 6 | 9 | 11 |

Tableau 3.10: Résistance à la traction par fondage (Rtf) en fonction du temps application au béton de sable pour chaussées (mûrissement à l'eau)

| Ajouts | Basalte 0/3 de Diack | | | | | Calcaire 0/3 de Bandia | | | | | Calcaire 0/3 de Bargny | | | | | Grès 0/3 de Toglou | | | | | Silexite 0/3 de Taïba | | | | |
|---------------|----------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| Résistances | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rtf 7j (MPa) | 1,63 | 1,65 | 1,67 | 1,7 | 1,57 | 1,58 | 1,65 | 1,65 | 1,7 | 1,32 | 1,56 | 1,6 | 1,68 | 1,7 | 1,3 | 1,49 | 1,5 | 1,64 | 1,65 | 1,25 | 1,59 | 1,6 | 1,68 | 1,7 | 1,3 |
| Rtf 14j (MPa) | 1,68 | 1,7 | 1,77 | 1,79 | 1,6 | 1,69 | 1,7 | 1,7 | 1,77 | 1,38 | 1,65 | 1,68 | 1,76 | 1,77 | 1,4 | 1,53 | 1,54 | 1,72 | 1,71 | 1,3 | 1,65 | 1,66 | 1,77 | 1,78 | 1,35 |
| Rtf 28j (MPa) | 1,78 | 1,78 | 1,86 | 1,89 | 1,65 | 1,78 | 1,77 | 1,8 | 1,85 | 1,5 | 1,72 | 1,73 | 1,83 | 1,85 | 1,45 | 1,6 | 1,6 | 1,79 | 1,77 | 1,38 | 1,73 | 1,75 | 1,88 | 1,88 | 1,4 |
| % de fines | 5 | 5 | 6 | 7 | 15 | 5 | 4 | 6 | 7 | 15 | 4 | 5 | 7 | 8 | 17 | 3 | 4 | 9 | 12 | 36 | 3 | 4 | 9 | 12 | 43 |

Tableau 3.11 Résistance en traction par fondage (Rtf) en fonction du temps application au béton de sable pour perpains (mûrissement à l'air > 26° C)

| Ajouts | Basalte 0/3 de Diack | | | | | Calcaire 0/3 de Bandia | | | | | Calcaire 0/3 de Bargny | | | | | Grès 0/3 de Toglou | | | | | Silexite 0/3 de Taïba | | | | |
|---------------|----------------------|------|------|------|-----|------------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| Rtf 7j (MPa) | 1,6 | 1,6 | 1,65 | 1,67 | 1,5 | 1,54 | 1,6 | 1,62 | 1,68 | 1,3 | 1,52 | 1,57 | 1,64 | 1,67 | 1,31 | 1,41 | 1,48 | 1,61 | 1,59 | 1,21 | 1,57 | 1,57 | 1,66 | 1,65 | 1,26 |
| Rtf 14j (MPa) | 1,67 | 1,7 | 1,78 | 1,8 | 1,6 | 1,68 | 1,7 | 1,72 | 1,76 | 1,4 | 1,63 | 1,65 | 1,74 | 1,76 | 1,37 | 1,6 | 1,61 | 1,7 | 1,69 | 1,28 | 1,68 | 1,68 | 1,8 | 1,8 | 1,37 |
| Rtf 28j (MPa) | 1,8 | 1,8 | 1,86 | 1,96 | 1,7 | 1,81 | 1,8 | 1,85 | 1,88 | 1,52 | 1,76 | 1,76 | 1,85 | 1,88 | 1,5 | 1,69 | 1,69 | 1,85 | 1,8 | 1,4 | 1,76 | 1,77 | 1,91 | 1,89 | 1,45 |
| % de fines | 5 | 5 | 6 | 7 | 15 | 5 | 4 | 6 | 7 | 15 | 4 | 5 | 7 | 8 | 17 | 3 | 4 | 9 | 12 | 36 | 3 | 4 | 9 | 12 | 43 |

Tableau 3.12 : Résistance en traction par fondage (Rtf) en fonction du temps application au béton de sable pour perpains (mûrissement à l'eau)

| Ajouts | Basalte 0/3 de Diack | | | | | Calcaire 0/3 de Bandia | | | | | Calcaire 0/3 de Bargny | | | | | Grès 0/3 de Toglou | | | | | Silexite 0/3 de Taïba | | | | |
|--------------|----------------------|------|------|------|-------|------------------------|-------|-------|------|-------|------------------------|-------|-------|------|------|--------------------|------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| Résistances | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rc 7j (MPa) | 10,4 | 10,2 | 8,7 | 15,6 | 15 | 9,7 | 10,2 | 12,5 | 12,1 | 13 | 9,55 | 11,42 | 11,65 | 12,5 | 13,2 | 8,5 | 8,9 | 9,75 | 11,7 | 7,9 | 9,25 | 10,31 | 12,36 | 16,51 | 13,7 |
| Rc 14j (MPa) | 13,8 | 13,6 | 10,6 | 17 | 17,8 | 11,9 | 13,41 | 14,3 | 14,1 | 15,78 | 9,8 | 12,3 | 12,7 | 13,4 | 15,1 | 12,4 | 12,6 | 13,8 | 15,95 | 11,7 | 11,3 | 12,6 | 15,82 | 18,63 | 16,42 |
| Rc 28j (MPa) | 23,4 | 22 | 16,8 | 26 | 27,28 | 15,21 | 18,77 | 19,14 | 19,4 | 21,6 | 15,1 | 18,2 | 18,6 | 19,7 | 20,9 | 17,25 | 17,6 | 18,75 | 20,8 | 16,82 | 18,4 | 19 | 21,71 | 25,41 | 22,4 |
| % de fines | 5 | 5 | 4 | 6 | 10 | 4 | 5 | 5 | 5 | 7 | 4 | 5 | 5 | 6 | 9 | 5 | 5 | 4 | 8 | 30 | 5 | 5 | 6 | 9 | 11 |

Tableau 3.13 : Résistances en compression (Rc) en fonction du temps application au béton de sable pour chaussées (mûrissement à l'air > 26° C)

| Ajouts | Basalte 0/3 de Diack | | | | | Calcaire 0/3 de Bandia | | | | | Calcaire 0/3 de Bargny | | | | | Grès 0/3 de Toglou | | | | | Silexite 0/3 de Taïba | | | | |
|--------------|----------------------|-------|-------|------|------|------------------------|------|-------|------|------|------------------------|------|------|------|-------|--------------------|-----|-------|------|------|-----------------------|-------|------|------|------|
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| Résistances | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rc 7j (MPa) | 9,7 | 9,4 | 8 | 13,6 | 14,5 | 8,9 | 9,8 | 10,4 | 10,6 | 12 | 8,7 | 9,7 | 10,4 | 11,8 | 12,8 | 6,95 | 8 | 7,48 | 9,8 | 6,55 | 9,1 | 9,6 | 10,4 | 13,7 | 12,5 |
| Rc 14j (MPa) | 15,6 | 14,2 | 11,4 | 17,5 | 18,2 | 13,9 | 15,7 | 16,5 | 16,7 | 18,8 | 11 | 14,1 | 14,5 | 15,3 | 17,8 | 16,3 | 16 | 15,4 | 18,4 | 14,3 | 14 | 14,61 | 17,8 | 21,8 | 19,7 |
| Rc 28j (MPa) | 27,2 | 25,31 | 21,91 | 29 | 30,2 | 17,5 | 21,8 | 22,13 | 22,4 | 24,9 | 17 | 21,2 | 21,4 | 22,5 | 24,71 | 21 | 21 | 21,35 | 23,5 | 19,2 | 21 | 21,32 | 24,5 | 28,4 | 27,1 |
| % de fines | 5 | 5 | 4 | 6 | 10 | 4 | 5 | 5 | 5 | 7 | 4 | 5 | 5 | 6 | 9 | 5 | 5 | 4 | 8 | 30 | 5 | 5 | 6 | 9 | 11 |

Tableau 3.14 : Résistances en compression (Rc) en fonction du temps application au béton de sable pour chaussées (mûrissement à l'air)

| Ajouts | Basalte 0/3 de Diack | | | | | Calcaire 0/3 de Bandia | | | | | Calcaire 0/3 de Bargny | | | | | Grès 0/3 de Toglou | | | | | Silexite 0/3 de Taïba | | | | |
|--------------|----------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|------------------------|------|-----|------|------|--------------------|------|-----|------|------|-----------------------|------|-----|------|------|
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| Résistances | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rc 7j (MPa) | 0,85 | 0,95 | 1 | 1,5 | 0,99 | 0,95 | 0,8 | 0,95 | 1 | 0,85 | 0,75 | 0,9 | 0,9 | 1 | 0,55 | | 0,7 | 1,2 | 0,8 | 0,5 | 0,7 | 0,75 | 1 | 0,95 | 0,8 |
| Rc 14j (MPa) | 1,3 | 1,55 | 1,8 | 2,75 | 1,3 | 1,2 | 1 | 1,2 | 1,75 | 1,25 | 1,35 | 1,65 | 1,6 | 1,7 | 1 | | 0,85 | 1,8 | 1,3 | 0,95 | 1 | 1,5 | 2 | 1,75 | 0,95 |
| Rc 28j (MPa) | 2,2 | 2,7 | 3,15 | 4,1 | 2 | 1,75 | 1,6 | 1,8 | 2 | 1,75 | 1,6 | 1,75 | 1,9 | 2 | 1,45 | 1,55 | 1,6 | 2,1 | 1,95 | 1,65 | 1,75 | 2,3 | 2,7 | 2,45 | 1,5 |
| % de fines | 5 | 5 | 6 | 7 | 15 | 5 | 4 | 6 | 7 | 15 | 4 | 5 | 7 | 8 | 17 | 3 | 4 | 9 | 12 | 36 | 3 | 4 | 9 | 12 | 43 |

Tableau 3.15 : Résistance en compression (Rc) en fonction du temps application au béton de sable pour perpaings (mûrissement à l'air > 26° C)

| Ajouts | Basalte 0/3 de Diack | | | | | Calcaire 0/3 de Bandia | | | | | Calcaire 0/3 de Bargny | | | | | Grès 0/3 de Toglou | | | | | Silexite 0/3 de Taïba | | | | |
|--------------|----------------------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|-----|------------------------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |
| Résistances | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rc 7j (MPa) | 0,75 | 0,9 | 0,95 | 1,25 | 0,75 | 0,65 | 0,6 | 0,75 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 0,85 | 1 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 1 | 0,7 | 0,45 | 0,65 | 0,95 | 1,3 | 1,1 | 0,55 |
| Rc 14j (MPa) | 2 | 2,3 | 3,1 | 4,9 | 2,3 | 1,75 | 1,5 | 2,3 | 2,9 | 1,5 | 1,5 | 1,95 | 2 | 2,5 | 1,3 | 1,1 | 1,2 | 2,25 | 1,35 | 1 | 2 | 2,6 | 2,75 | 2,65 | 1,9 |
| Rc 28j (MPa) | 3,25 | 3,41 | 4 | 7 | 4,25 | 2,5 | 2 | 2,9 | 3,3 | 2,5 | 2,55 | 2,7 | 3 | 3,2 | 2,25 | 2 | 2,3 | 3,2 | 2,25 | 1,95 | 2,95 | 3,75 | 3,9 | 3,8 | 2,25 |
| % de fines | 5 | 5 | 6 | 7 | 15 | 5 | 4 | 6 | 7 | 15 | 4 | 5 | 7 | 8 | 17 | 3 | 4 | 9 | 12 | 36 | 3 | 4 | 9 | 12 | 43 |

Tableau 3.16 : Résistance en compression (Rc) en fonction du temps application au béton de sable pour perpaings (mûrissement à l'eau)

mûrissement. Elle est de 13° C. Cette température doit être constante pendant le mûrissement du béton. Une illustration de l'évolution du mûrissement en fonction du temps et des conditions (l'air ambiant ou à l'eau) est donnée par les figures 3.5 et 3.6 ci-après :

3.4.3 Caractéristiques physiques et densité du béton

Les paramètres physiques qui ont été retenus dans cette analyse sont :

- le pourcentage d'air occlus ;
- la compacité.

Dans une autre étude l'ouvrabilité ou consistance ne saurait être occultée, nous n'en faisons pas état ici du fait de la constance du rapport EAU/CIMENT (E/C = 0,65) pour tous les matériaux et pour tous les échantillons.

La densité réelle est mesurée avant écrasement des éprouvettes. Le pourcentage d'air occlus est calculé par la relation suivante :

$$\% \text{ air occlus} = \frac{V_0 - V}{V} \cdot 100$$

V_0 = volume d'une éprouvette de diamètre 11 mm

V = volume des matières solides

De même que le pourcentage d'air occlus la compacité

(compacité obtenue à l'état naturel sans apport d'énergie)
est elle aussi calculée par la relation suivante :

$$\text{compacité} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{dref}}}$$

γ = (voir tableau 3.4)

γ_{dref} = densité de référence = densité avant écrasement de
l'éprouvette

Les résultats sont reportés dans les tableaux ci-après :

| Matériaux | Basalte | Silexite | Calcaire Bandia | Calcaire Bargny | Grès |
|----------------|---------|----------|--------------------|--------------------|-------|
| Densité réelle | 2,25 | 2,20 | 2,15 | 2,14 | 2,18 |
| % air occlus | 6,60 | 4,1 | 5,0 | 4,90 | 3,79 |
| Compacité | 0,76 | 0,755 | 0,754 | 0,761 | 0,750 |

Tableau 3.18 : Caractéristiques physiques des bétons de sable pour chaussées

| Matériaux | Basalte | Silexite | Calcaire Bandia | Calcaire Bargny | Grès |
|----------------|---------|----------|--------------------|--------------------|-------|
| Densité réelle | 2,05 | 1,98 | 1,88 | 1,86 | 1,90 |
| % air occlus | 7,70 | 3,40 | 3,0 | 3,18 | 4,5 |
| Compacité | 0,88 | 0,881 | 0,884 | 0,878 | 0,855 |

Tableau 3.19 : Caractéristiques physiques des bétons de sable pour parpaings

Cependant une réflexion plus poussée peut être faite entre
la

Fig 3.1 Courbe de variation de la résistance en traction en fonction du pourcentage de fines (chaussées)

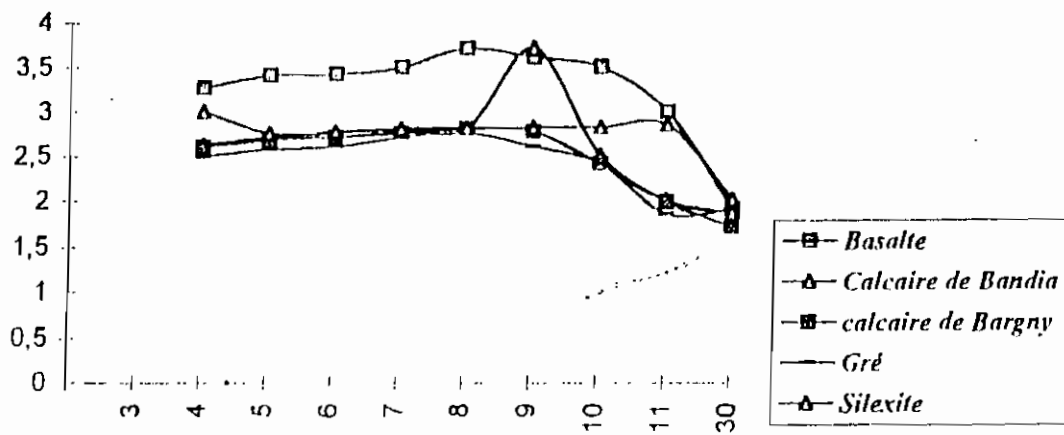
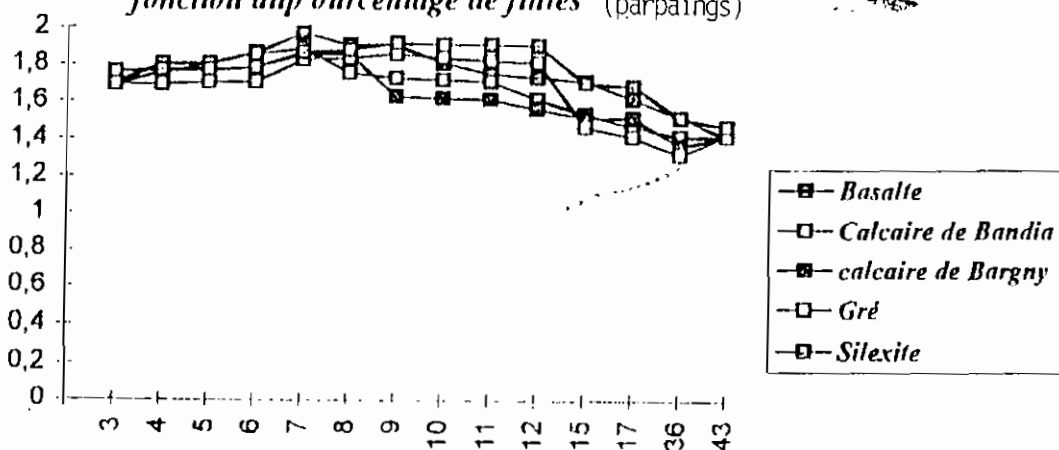


Figure 3.2 variation de la résistance en traction par fendage en fonction du pourcentage de fines (parpaings)



densité du béton avant écrasement de l'échantillon et sa résistance. Et nous constatons à l'aide des figures 3.7 et 3.8 qu'il existe une densité qui procure une résistance maximale. Et qu'au delà de cette valeur une augmentation de la densité fait chuter la résistance.

3.5 RÈGLES DE CONCEPTION DE DIMENSIONNEMENT ET DE RÉALISATION

3.5.1 Conception et dimensionnement de chaussées

Dans le cadre de ce travail nous nous sommes inspirés de la méthode française de conception et de dimensionnement de chaussées largement utilisée dans nos pays tropicaux.

3.5.1.1 Conception

De manière générale une conception élaborée respectant les règles fondamentales de conception liées à l'infrastructure, l'assainissement et aux matériaux constituant la chaussée, facilite sa réalisation et son utilisation.

Des simplifications substantielles peuvent être apportées au niveau de la conception de la structure. Ceci en fonction des caractéristiques mécaniques du béton (grande rigidité, fortes résistances vis-à-vis des sollicitations). Et elles auront comme conséquence une réduction notable de l'investissement.

1- L'infrastructure :

Les qualités essentielles d'un revêtement en béton sont leur tenue à la fatigue qui garantit leur durabilité, et leur grande rigidité qui permet d'assurer une bonne répartition des charges sur le support. Celui-ci n'est de ce fait que peu sollicité. Dans ce cas donc - des structures rigides - on se passe de fondations complexes et l'économie ainsi engendrée les rend très compétitive notamment pour les routes à faibles trafics, où la dalle est, en règle générale, coulée directement sur le sol sans couche de fondation.

2- L'assainissement :

La collecte et l'évacuation des eaux pluviales permet de protéger les ouvrages de génie civil contre les dégâts qu'elles peuvent provoquer.

L'ensemble des travaux correspondant à ce volet porte le nom d'assainissement.

L'assainissement des routes vise à évacuer toutes les eaux (souterraines et superficielles) qui sont susceptibles d'affaiblir et d'endommager le corps de chaussée ou de favoriser l'insécurité du trafic. C'est pourquoi, il s'appuie sur un ensemble de dispositifs fonctionnant selon des principes spécifiques aux différentes catégories d'eaux. Ce sont entre autres les dispositifs d'assèchement de la surface de roulement, les dispositifs de drainage, les canalisations etc...

3- Les joints :

La fissuration d'un béton est un phénomène inévitable, aussi est-il important de les localiser d'avance, de manière précise et déterminée : c'est le rôle des joints. En fait la chaussée en béton se présente comme une succession de dalles séparées par des joints. La conception correcte des joints est une condition essentielle de la pérennité de la chaussée. On distingue trois grandes familles de joints :

- **les joints transversaux** : elles sont perpendiculaires à l'axe de la route et sont classées en trois catégories :

* **les joints de retrait** : leur rôle est de réduire les sollicitations dues au retrait et au gradient de température. Ils sont plus fréquents dans un revêtement en béton. Ils sont réalisés en créant dans le revêtement une saignée ou une entaille matérialisant un plan de faiblesse. Ces joints doivent avoir une profondeur comprise entre $1/4$ et $1/3$ de l'épaisseur du revêtement et une largeur comprise entre 3 et 5 mm.

L'espacement des joints est fonction des propriétés du béton, des caractéristiques de friction de l'infrastructure et de l'épaisseur du revêtement. Le tableau ci-dessous donne les espacements recommandés en fonction des épaisseurs de dalles.

| | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Épaisseur de la dalle (cm) | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Espacement des joints (m) | 3,00 | 3,25 | 3,50 | 3,75 | 4,00 | 4,25 | 4,50 | 4,75 | 5,00 |

Tableau 3.20 : Espacement des joints en fonction de l'épaisseur de la dalle, (CIM béton 1995)

* **les joints de construction** : ils sont réalisés après chaque arrêt de bétonnage supérieur à une demie-heure. La dalle est rataillée à 90° pour obtenir un bord franc, et solidarisée avec la coulée de béton suivante à l'aide de goujous d'un diamètre de 30 mm, placés dans le sens longitudinal et espacés de 0,75 m.

* **les joints de dilatation** : ils servent à compenser les variations dimensionnelles des dalles dues essentiellement à la variation de température. Ils constituent une interruption totale de la dalle.

Quand les joints de retrait sont correctement espacés, comme il a été précisé plus haut, des joints de dilatation ne sont pas requis sauf dans des cas particuliers. Ils sont utilisés alors pour séparer complètement la dalle de certains équipements fixes comme les regards d'égouts, les socles de lampadaires, les bâtiments, les approches d'ouvrage d'art, les virages à faible rayon de courbure, ceci afin d'empêcher que le revêtement n'y exerce une poussée. Un soin particulier doit être accordé à leur réalisation.

- Les joints longitudinaux

Ces joints sont parallèles à l'axe de la route. Ils servent principalement à compenser les contraintes provoquées par le gradient thermique. Ils ne sont nécessaires que si la largeur de la chaussée est supérieur à 4,50 mètres.

4- Disposition des joints :

Les règles suivantes doivent être pris en compte pour une conception correcte d'un schéma de jointolement :

- les joints découpent un revêtement en dalles. Il est préférable de donner à ces dalles une forme carrée ou rectangulaire avec un rapport dimensionnel maximum de 1,5 à 1 ;

- l'espacement des joints transversaux et longitudinaux doit se situer entre 3 m et 5 m ;

- ces formes autres que carrés ou rectangulaires sont cependant permises pour les classes 1 et 2 de la norme correspondant à des bétons qualifiés de maigres, avec un dosage en ciment compris entre 150 et 220 kg/m³.

La classe 3 correspond à des bétons de sable dosés entre 300 et 370 kg/m³. La classe 6 de la norme paraît peu applicable aux bétons de sable pour des raisons économiques.

Ces classes sont définis dans le paragraphe suivant.

3.5.1.2 Dimensionnement

Le dimensionnement se fera en respectant les étapes suivantes :

- la détermination de la classe de trafic,
- l'évaluation de la portance de la plateforme,
- la définition de la classe de résistance du béton,
- et enfin le dimensionnement

3.5.1.2.1 Choix de la classe de trafic

La classe de trafic est désignée à partir du trafic moyen journalier annuel (JMA) estimé à la mise en service et exprimé en poids lourd de charge utile supérieure ou égale à (03) trois tonnes. Le pourcentage de poids lourds est supposé de l'ordre de 30 % du trafic total qui correspond aux valeurs que nous donnons ci-après :

$$\begin{aligned}
 T_1 &< 5.10^5 \\
 5.10^5 &< T_2 < 1.5.10^6 \\
 1.5 \cdot 10^6 &< T_3 < 4.10^6 \\
 4.10^6 &< T_4 < 10^7 \\
 10^7 &< T_5 < 2.10^7
 \end{aligned}$$

(Source : Guide Pratique de Dimensionnement des Chaussées dans les Pays Tropicaux - C.E.B.T.P) (1984)

3.5.1.2.2 Evaluation de la portance de la plateforme

Cinq classes de portance ont été retenues correspondant à cinq classes de sols constamment rencontrées dans nos pays.

Elles sont données dans le tableau suivant :

| Classe de portance | Remarques sur le sol (essieu de 13 tonnes) | Indice de portance C.B.R | Module de déformation de la plaque EV_2 (MPa) |
|--------------------|---|--------------------------|---|
| P ₀ | Circulation impossible, sol inapte très déformable | $CBR \leq 3$ | $EV_2 \leq 15$ |
| P ₁ | Ornières derrière l'essieu de 13 t déformable | $3 < CBR \leq 6$ | $15 < EV_2 \leq 30$ |
| P ₂ | Pas d'ornières derrière l'essieu de 13 t, peu déformable | $6 < CBR \leq 10$ | $30 < EV_2 \leq 50$ |
| P ₃ | Pas d'ornières derrière l'essieu de 13 t, peu déformable | $10 < CBR \leq 20$ | $50 < EV_2 \leq 120$ |
| P ₄ | Pas d'ornières derrière l'essieu de 13 t, très peu déformable | $20 < CBR \leq 50$ | $120 < EV_2 \leq 250$ |

Tableau 3.22 : Différentes classes de portance de la plateforme (CIM béton, 1995)

3.5.1.2.3 : Définition de la classe de résistance du béton

Les sollicitations auxquelles seront soumises les bétons routiers (sollicitations répétées du trafic, effets climatiques) nous obligent à définir des classes de résistance en fonction du trafic.

Le tableau suivant donne les résistances caractéristiques par différents trafics.

| Classes de résistances NFP 98170 | Résistances en traction (fendage) NFP18408 | Résistance en compression NFP 18406 | Flexion | Trafic |
|-------------------------------------|--|--|---------|--------|
| 6 | - | 3.3 | 5.5 | T3 |
| 5 | - | 2.7 | 4.5 | T4, T5 |
| 4 | - | 2.4 | 4 | T5 |
| 3 | 25 | 2 | 3.33 | T6 |
| 2 | 20 | 1.7 | 2.83 | - |
| 1 | 15 | 1.2 | 2 | - |

**Tableau 3.23 : Classes de résistance pour différents niveau de trafic (Source : Béton de sable
Caractéristiques et pratiques d'utilisation, CIM béton - 1995)**

3.5.1.2 .4 Dimensionnement proprement dit

Le dimensionnement des chaussées se fera à partir des résistances en traction par fendage. Suite à des essais réalisés au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux (LRPC) (1994), l'utilisation du béton de sable pour les forts trafics n'est recommandée qu'en couche de base par contre pour les faibles trafics, ils peuvent être utilisés en couche de roulement.

Pour faire le dimensionnement nous supposerons un niveau de portance suffisant pour l'assise (du fait de l'absence de site déterminée pour une application de notre étude)

et niveau de trafic donné.

Pour les deux types de trafics (forts ou faibles) nous ferons les suppositions suivantes :

- Forts trafics exemple T_4

- . période de service : 20 ans
- . taux de croissance du trafic : 7 % par an ;
- . résistance du béton à la traction par fendage à 28 jours

$$R_{tf} = 3,3 \text{ Mpa} ;$$

- Faibles trafics exemple T_2

- . périodes de service : 20 ans
- . taux de croissance du trafic : 4 % par an ;
- . résistance du béton à la traction par fendage à 28 jours

:

$$R_{tf} = 2,7 \text{ Mpa},$$

Fort de ces hypothèses nous allons procéder de la manière suivante :

- Choisir un niveau de trafic ;
- pour chaque matériau, supposer les épaisseurs des différentes couches de la chaussée ;
- à l'aide du logiciel ALIZE 3 déterminer les contraintes et les déplacements auxquels elles sont soumises ;

- De ces contraintes et déplacements, vérifier la durée de vie de la chaussée par rapport aux différentes formes de ruptures par fatigue à savoir :
 - la fissuration de l'enrobé,
 - la fatigue en flexion des couches traitées aux liants hydrauliques,
 - le poinçonnement du sol d'assise,
 - l'apparition d'ornièrre en surface (sur le revêtement),

Si la durée de vie trouvée reste dans la plage de celle qui a été supposée au départ, on maintient les épaisseurs des différentes couches ; sinon refaire autant d'itérations que nécessaires pour avoir une durée de vie adéquate.

*** Exemple de dimensionnement : cas d'un faible trafic T₂**

Les paramètres d'entrées sont données dans le tableau ci-après :

| Ajouts | Basalte | Silexite | Cal.Bandia | Cal.Bargny | Gré |
|---------------------------------|---------|----------|------------|------------|--------|
| Module d'élasticité E (bars) | 20 000 | 18 000 | 17 000 | 16 000 | 15 500 |
| Coefficient de Poisson ν | 0.21 | 0.2 | 0.18 | 0.17 | 0.16 |

Les valeurs de module d'élasticité et de coefficient de poisson ont été obtenues à partir d'un certain nombre d'essai relativement faibles (3 pour les uns et 4 pour les autres) ainsi avons nous eu recours à la littérature pour nous caller aux valeurs conseillées.

Ces valeurs consignées dans le tableau ci-dessus sont celles de la couche de roulement en béton de sable. Pour ce qui est du revêtement en bitume gravillons 0/3 et de la couche de fondation les valeurs suivantes ont été retenues :

bitume gravillonné 0/3 : $E = 30000$ $V = 0.35$ épaisseur

3 cm

fondation : $E = 15000$ $V = 0.16$

Après plusieurs essais les valeurs suivantes ont été retenues :

| Ajouts | Basalte | Silexite | Cal.Bandia | Cal.Bargny | Gré |
|-----------------|---------|----------|------------|------------|------|
| Rtf28 (Mpa) | 2,78 | 2.70 | 2.61 | 2.59 | 2.46 |
| épaisseurs (cm) | 17 | 21 | 23 | 23 | 25 |
| espacements | 5.25 | 5.25 | 5.75 | 5.75 | 6.25 |

Tableau 3.24 : Épaisseur de la couche de roulement (pour un trafic T₂) en fonction de la résistance en traction par fondage.

Les valeurs de contraintes et des déplacements pour chaque ajout sont mentionnées dans les tableaux T₂, en annexe.

* Vérification des différentes formes de fatigue.

Pour notre exemple, du fait de la méconnaissance du site, le poinçonnement de l'assise ne se fera pas.

- vérification de la fissuration du revêtement

Les valeurs du nombre de cycles de chargement est donnée par la relations suivante :

$$N_e = \left(\frac{1,6 \times 10^{-3}}{\epsilon_N} \right)^{\frac{1}{0,21}}$$

ϵ_N = déformation tangentielles à la base du revêtement.

Pour nos différents matériaux, la valeur de N_e en fonction ϵ_N est égale à :

| | | | |
|----------|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Basalte | $\epsilon_N = 8,792 \text{ E-5}$ | $N_e = 10^6$ | cycles de chargement |
| silexite | $\epsilon_N = 8,989 \text{ E-5}$ | $N_e = 9.10^5$ | cycles de chargement |
| calcaire | $\epsilon_N = 9,788 \text{ E-5}$ | $N_e = 6 \cdot 10^5$ | cycles de chargement |
| gré | $\epsilon_N = 9,968 \text{ E-5}$ | $N_e = 6 \cdot 10^5$ | cycles de chargement |

- Vérification de la fatigue en flexion de la couche de roulement

Elle se fait par la relation ci-après :

$$N_f = 10^{20 \left(1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_0} \right)}$$

avec

N_f = le nombre de cycles de chargement

σ_r = contrainte tangentielle au niveau supérieure de la couche de roulement

σ_0 = contrainte de rupture en traction par flexion de la couche traitée au liant hydraulique

Pour nos différents matériaux les valeurs N_f en fonction de σ_r et σ_0 sont :

| | | | |
|----------|-------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Basalte | $\sigma_r = 16,6$ bars | $\sigma_0 = 2,96$ bars | $N_f = 2,715 \cdot 10^{16}$ cycles |
| Silexite | $\sigma_r = 16,2$ bars | $\sigma_0 = 2,53$ bars | $N_f = 7,525 \cdot 10^{16}$ cycles |
| Calcaire | $\sigma_r = 15,70$ bars | $\sigma_0 = 2,23$ bars | $N_f = 1,443 \cdot 10^{17}$ cycles |
| Gré | $\sigma_r = 16,6$ bars | $\sigma_0 = 2,96$ bars | $N_f = 2,715 \cdot 10^{16}$ cycles |

Le nombre de cycle de chargement à considérer pour la durée de vie de la chaussée sera égale à $\min(N_e, N_f) = N$ pour chaque matériau.

Donc pour chaque matériau $N = N_e$.

Ces valeurs comparées au niveau du trafic initial à savoir T_2 ($5 \cdot 10^5 < T_2 < 1.5 \cdot 10^6$). On voit alors que les épaisseurs du tableau 3.24 conviennent bien.

Les valeurs de σ_r ont été trouvées en fonction des valeurs de R_{tf} suivant la relation expérimentale

$$\sigma_r = 0,6 R_{tf}$$

CHAPITRE IV :

ÉTUDE ÉCONOMIQUE

CHAPITRE 4 : ÉTUDE ÉCONOMIQUE

L'objectif de ce chapitre est de faire une évaluation économique de l'étude technique précédente et de faire une comparaison entre chaussées en bétons de sables et chaussées en enrobés denses.

4.1 HYPOTHÈSE DE CALCUL DES COÛTS

1- On considère une couche de fondation identique pour les deux types de chaussées (cas forts trafics).

2- Les coûts calculés ne prennent pas en compte les frais éventuels d'entretien, pour lesquels nous n'avons pas une idée précise pour les routes en béton de sable.

3- la largeur des chaussées est prise égale à 7m pour les chaussées supportant de forts trafics (exemple T₆, T₅) et 6m pour les faibles trafics (T₁, T₂).

4- Pour les chaussées en béton de sable nous retenons un enduit gravillonné 0/3 de 3cm comme mentionné dans le chapitre précédent.

5- la distance maximale de transport des sables de dune et de sables fillerisés est supposée égale à 35 km en moyenne.

6- Pour les paramètres qualitatives tels que le confort, la sécurité etc, nous les considérons identiques. Elles peuvent cependant être estimés par une étude plus approfondie pour chaque variante.

7- Pour les faibles trafics, la dalle en béton de sable est directement coulée sur la plateforme support compactée.

4.2 CAS DES FAIBLES TRAFICS T5

La chaussée en béton de sable comportera en dehors de la couche de fondation une dalle en béton de sable et une couche de 3 cm de bitume gravillonné 0/3 dosé à 20 l/m² de chaussée.

| Matériaux | Basalte | Silexite | Calcaire de Bandia | Calcaire de Bargny | Gré |
|--|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|
| Épaisseurs Bds (cm) | 19 | 21 | 23 | 23 | 25 |
| Bitume gravillonné 0/3 (cm) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

Tableau 4.1 : Épaisseur de la couche de roulement

4.2.1 Composition des différents bétons et quantité des composantes pour 1 km de chaussée

Ces compositions sont celles trouvées dans le chapitre III (paragrphe 3.3.2) nous les rappelons dans le tableau ci-après obtenus à partir des tableaux 3.9 et 3.7

| Ajouts | Basalte | Silexite | Calcaire de Bandia | Calcaire de Bargny | Gré |
|---|---------|----------|-----------------------|-----------------------|-----|
| Eau (e/m ³) | 227,5 | 230 | 235 | 235 | 245 |
| Ciment kg/m ³ | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 |
| Sable de dune (kg/m ³) | 424,5 | 392 | 543 | 438 | 494 |
| Sable fillérisé (kg/m ³) | 277,56 | 311 | 152 | 263 | 377 |

Tableau 4.2 : Dosage des différents constituants

Suivant les dosages du tableau ci-dessous et des épaisseurs respectives, nous donnons dans le tableau qui suit les quantités de matériaux requises.

| Ajouts | Basalte 0/3 | Silexite 0/3 | Calcaire Bandia 0/3 | Calcaire Bargny 0/3 | Gré 0/3 |
|------------------------------------|----------------|-----------------|------------------------|------------------------|---------|
| Volume de Bds (m ³) | 1140 | 1260 | 1380 | 1380 | 1500 |
| Eau (m ³) | 259 | 290 | 324 | 324 | 368 |
| Ciment (tonne) | 399 | 441 | 483 | 483 | 525 |
| Filler (tonne) | 317 | 392 | 210 | 363 | 566 |
| Sable (tonne) | 484 | 494 | 738 | 605 | 741 |

Tableau 4.3 : Quantités de matériaux pour 1 km de chaussée en béton de sable

4.2.2 Etude des coûts

4.2.3 Cas des chaussées en béton de sable

Rappelons d'abord les prix unitaires pour les différents constituants :

- Ciment 48.500 F CFA/tonne (variable)
- Eau 742 F CFA/m³
- Bitume gravillonné 0/3 18.000 F CFA/m³
- Basalte 0/3 3.000 F CFA/m³
- Calcaire 0/3 1.000 F CFA/m³
- Silexite 0/3 résidu
- Gré 0/3 résidu

Les tableaux qui suivent donnent les coûts d'investissement à court terme (fréquente variation de prix des différents constituants) en fonction de l'ajout utilisé.

| Composants | Quantités | Prix Unitaire | Coûts HTVA | Remarques |
|-------------------------|-----------|---------------|-------------------|------------|
| Eau | 259 | 742 | 192 178 | |
| Ciment | 399 | 48 500 | 19 351 500 | |
| Sable dune | 484 | 662 | 320 408 | transporté |
| Transport | 484 | 48 | 23 053 | sur 35 km |
| Filler | 317 | 1 818 | 576 306 | transporté |
| Transport | 317 | 48 | 15 099 | sur 35 km |
| Bitume gravillonné | 120 | 18 000 | 2 160 000 | |
| Coût hors main d'oeuvre | | | 22 638 544 | |
| Main d'oeuvre | 10 % | | 2 263 854 | |
| Total | | | 24 902 398 | |

Tableau 4.4 : Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de basalte

| Composants | Quantités | Prix Unitaire | Coûts HTVA | Remarques |
|----------------------------|-----------|------------------|-------------------|------------|
| Eau | 290 | 742 | 215 180 | |
| Ciment | 441 | 48 500 | 21 388 500 | |
| Sable dune | 494 | 662 | 327 028 | transporté |
| Transport | 494 | 48 | 23 529 | sur 35 km |
| Filler | | | | transporté |
| Transport | 392 | 48 | 18 671 | sur 35 km |
| Bitume gravillonné 0/3 | 120 | 18 000 | 2 160 000 | |
| Coût hors main d'oeuvre | | | 24 132 908 | |
| main d'oeuvre | | | 2 413 291 | |
| Total | | | 26 546 199 | |

Tableau 4.5 : Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de silicite

| Composants | Quantités | Prix Unitaire | Coûts HTVA | Remarques |
|----------------------------|-----------|------------------|-------------------|------------|
| Eau | 324 | 742 | 240 408 | |
| Ciment | 483 | 48 500 | 23 425 500 | |
| Sable dune | 738 | 662 | 488 556 | transporté |
| Transport | 738 | 48 | 35 151 | sur 35 km |
| Filler | 210 | 667 | 140 070 | transporté |
| Transport | 210 | 48 | 10 002 | sur 35 km |
| Bitume gravillonné 0/3 | 120 | 18 000 | 2 160 000 | |
| Coût hors main d'oeuvre | | | 26 499 687 | |
| Main d'oeuvre | 10 % | | 2 649 969 | |
| Total | | | 29 149 656 | |

Tableau 4.6 : Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de calcaire de Bendia

| Composants | Quantités | Prix Unitaire | Coûts HTVA | Remarques |
|----------------------------|-----------|------------------|-------------------|------------|
| Eau | 324 | 742 | 240 408 | |
| Ciment | 483 | 48 500 | 23 425 500 | |
| Sable dune | 605 | 662 | 400 510 | transporté |
| Transport | 605 | 48 | 28 816 | sur 35 km |
| Filler | 363 | 667 | 242 121 | transporté |
| Transport | 363 | 48 | 17 290 | sur 35 km |
| Bitume gravillonné 0/3 | 120 | 18 000 | 2 160 000 | |
| Coût hors main d'oeuvre | | | 26 514 645 | |
| Main d'oeuvre | 10 % | | 2 651 464 | |
| Total | | | 29 166 109 | |

Tableau 4.7 : Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de selaire de Bergny

| Composants | Quantités | Prix Unitaire | Coûts HTVA | Remarques |
|----------------------------|-----------|------------------|-------------------|------------|
| Eau | 368 | 742 | 273 056 | |
| Ciment | 525 | 48 500 | 25 462 500 | |
| Sable dune | 741 | 662 | 490 542 | transporté |
| Transport | 741 | 48 | 35 294 | sur 35 km |
| Filler | | | | transporté |
| Transport | 566 | 48 | 26 959 | sur 35 km |
| Bitume gravillonné 0/3 | 120 | 18 000 | 2 160 000 | |
| Coût hors main d'oeuvre | | | 28 448 350 | |
| main d'oeuvre | | | 2 844 835 | |
| Total | | | 31 293 185 | |

Tableau 4.8 : Coût du km de chaussée en béton de sable à ajout de gré

4.2.4 Cas des chaussées en enrobés denses

Nous faisons une évaluation de coût à partir de données obtenues du Bureau de Gestion des Données Routières (1995).

* Couche de base en latérite amélioré au ciment

- épaisseur de la couche de latérite 20 cm
- volume de latérite = $0,2 \times 7 \times 1000 = 1400 \text{ m}^3$
- prix unitaire = 12 000 F/m³
- transport sur 20 km = $1400 \times 20 \times 47,63 \times 1,5 = 2\ 016\ 000$ F
- coût au km = $1400 \times 1200 + 2\ 016\ 000 = 2\ 696\ 000$ F

* Couche de roulement en enrobés denses

- épaisseur de la couche = 3 cm
- volume d'enrobés = $0,03 \times 7 \times 1000 = 210 \text{ m}^3$
- Masse d'enrobés = $2,4 \times 210 = 504 \text{ t}$
- Coût au km des enrobés = $89\ 286 \times 672 = 45\ 000\ 144$ F
(ce coût tient compte de la main d'oeuvre)

* Coût global de la structure

- Couche de base en latérite amélioré = 2 696 000 F
- Couche de roulement en enrobés denses = 45 000 144 F
- Total = $2\ 696\ 000 + 45\ 000\ 144 = 47\ 696\ 144$ F

En faisant le rapport du coût de la chaussée en enrobés dense sur le coût de la chaussée en béton de sable on trouve une valeur moyenne de 1,9.

Cette valeur obtenue en faisant la moyenne des cinq rapports pour nos cinq ajouts reflète tout simplement la

compétitivité des bétons de sable pour certaines applications déterminées.

4.3 ÉTUDE DU COÛT DES PARPAINGS

Comme le montre les tableaux 3.16 et 3.14 les résistances offertes par le béton de sable sont largement suffisantes pour une application en bâtiment. Les performances offertes par le béton ordinaire dépassent souvent les valeurs requises ce qui ne rime pas avec une optimisation des matériaux ou du coût de la construction.

Pour une comparaison économique, il faut dire que la différence entre parpaings en béton de sable et parpaings en béton ordinaire réside au niveau des caractéristiques physiques d'abord. Les premiers ont une meilleure compacité une plus grande maniabilité et surtout une plus faible rugosité. Leurs coûts sont sensiblement égales à ceux des parpaings habituels.

Pour le dimensionnement des parpaings nous nous conformerons aux moules habituellement utilisés dans la construction (moules de 20, 15, et 10 cm).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Après cette étude on se rend compte que les raisons ne manquent plus pour une utilisation à plus grande échelle de ce matériau.

Partant des réserves inépuisables de sable réparties à travers le pays en passant par des ressources géologiques favorables et des coûts relativement faibles des produits fillerisés.

Les recherches expérimentaux révèlent une utilisation possible du béton de sable en couche de roulement pour les faibles trafics et en couche de fondation pour les forts trafics. Pour des raisons économiques évidentes l'utilisation du béton de sable en couche de roulement pour les forts trafics est déconseillée. Des constats faits, on peut aussi dire que les sables fillerisés de basalte sont de loin les meilleurs, suivi des silexites, des calcaires et enfin des grès.

Notons cependant que cette étude occulte l'utilisation d'adjuvant pouvant réduire la quantité d'eau, et, par conséquent améliorer la résistance et de réduire l'épaisseur des dalles trouvée dans l'étude expérimentale.

Il est recommandé, sinon même nécessaire d'utiliser en couche de roulement un enduit gravillonné 0/3 pour d'une part imperméabiliser la chaussée et d'autre part améliorer l'adhérence avec les pneumatiques.

Notons toute fois avec intérêt que ce matériau, pour sa

meilleure connaissance, la réalisation de plusieurs planches d'essais s'impose pour non seulement des études plus approfondies mais aussi plus élaborées.

L'évaluation économique de l'entretien des routes en béton de sable s'avère aussi difficile du fait de l'absence d'expériences dans le passé qui pourraient aujourd'hui révéler des formes de dégradations réelles qui pourraient être prises en compte pour une comparaison plus objective.

Quand aux parpaings, moins exigeants qu'une application en technologie routière, sont d'une application plus évidente. L'état de surface est nettement meilleure. L'ouvrabilité plus facile, la résistance mécanique suffisante et le coût plus bas.

Pour une autre étude, il serait intéressant de connaître le comportement des bétons de sable à la place du béton armé en technologie de bâtiment.

Les limites de cette étude expérimentale nous font penser donc à une suite qui aurait pour objectif de déterminer de manière empirique certains paramètres de matériau tels le module d'élasticité sous plusieurs directions de chargement ainsi le coefficient de poisson. - Il en est de même pour la dégradation en surface du béton de sable s'il est utilisé en couche de roulement -

Nous en rappelons tout simplement que l'objectif de ce travail n'était pas de remplacer le béton de sable par un autre matériau mais tout simplement de prouver la pertinence de son utilisation pour certains travaux en lieu et place du béton ordinaire, et ce avec satisfaction.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARON J et LESAGE (1976) : La composition du béton hydraulique du Laboratoire au chantier Rapport de recherche n°64 L.C.P.C - Paris (Décembre 1976)

C.E.B.T.P (1984) : Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux

CIM Béton (1995) : Conception et exécution du béton désactivé 86 pages

CIIC (1990) Document technique : Conception et dimensionnement 8 pages

Centre de Recherches Routières Bruxelles (1984) : Étude en laboratoire des possibilités de valorisation des scories d'aciéries et des laitiers de haut fourneau en construction routière

CEREEQ (1994) : Essais effectués sur le silexite de Taïba (rapport d'essai) 1994

CAQUOT A. (1937) : Le rôle des matériaux continus Mécanique des structures

DIOP Mbareck . : Rapport du laboratoire des ponts et chaussées de Bordeaux. Suite à la mission technique de Dakar 41 pages

EUSEBIO A. C.. (1995) : Projet de fin d'étude (PFE)
d'ingénieur de conception École Polytechnique de Thiès 62
pages

FREY FRANÇOIS : Analyse des structures en milieux continu-
Mécanique des structures.

FREY François Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
(Presses Polytechniques et universitaires romandes)

LCPC-SETRA (1987) : Catalogue des structures types de
chaussées neuves Guide de dimensionnement des renforcements
de chaussées

SABLOCRETE (1994) Béton de sable : Caractéristiques et
pratiques d'utilisation

SIDIBE M. (1995) : Projet de fin d'étude (PFE) d'ingénieur
de conception École Polytechnique de Thiès

ITINÉRAIRES DE GIRONDE (1994) : Document technique : le
béton de sable 15 pages

ANNEXES

ANNEXE 1 :

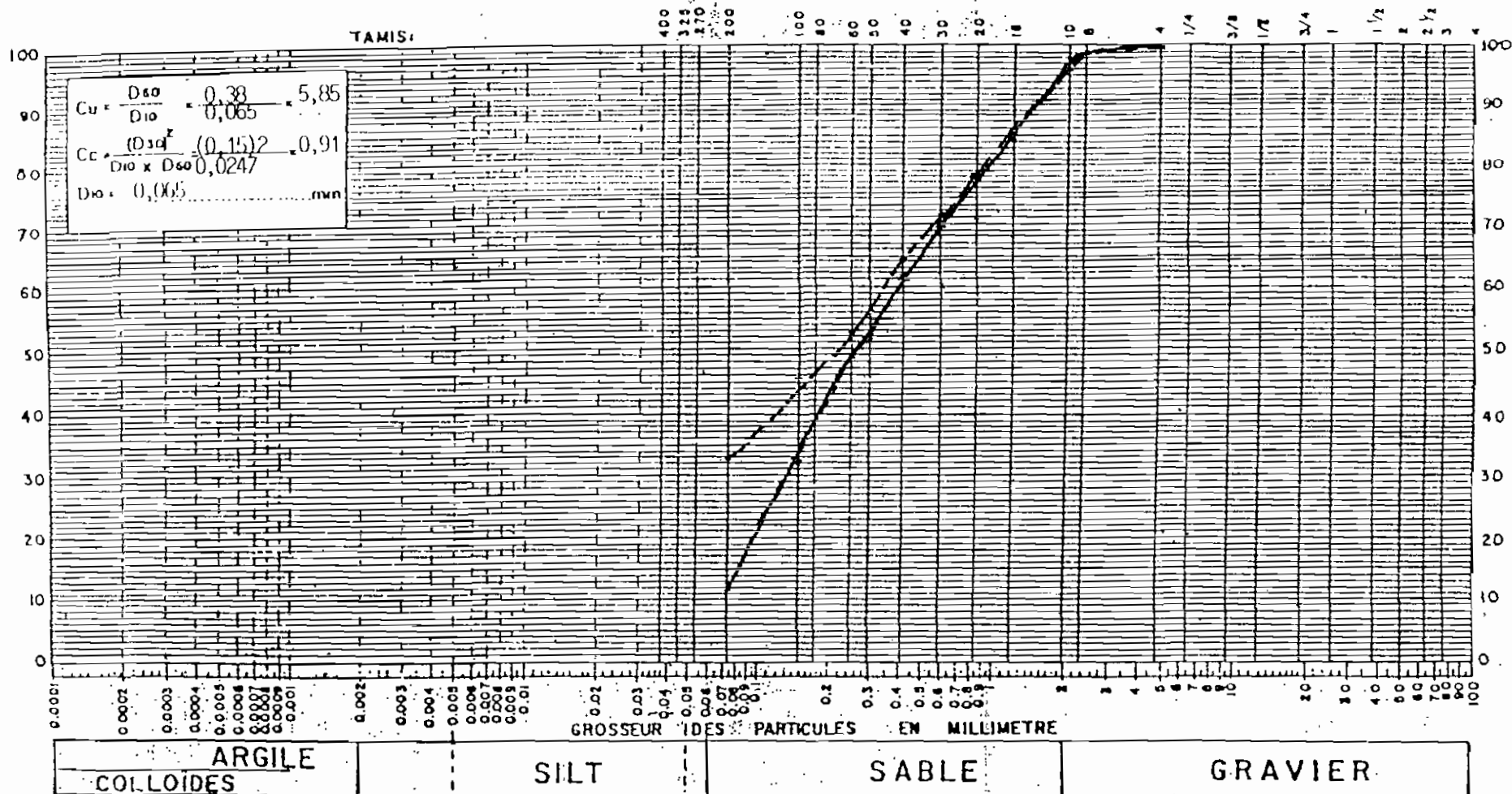
RÉSULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE



DATE 15/01/96

ECHANTILLON NO. C4

COURBE GRANULOMETRIQUE



Courbe C5

Description : Calcaire de Bandia composé de : pour une granulométrie à sec

Remarques : 2 % de gravier, 86 % de sable et 12 % de fines, ces valeurs sont de 2 %, 65 %, 33 % respectivement après lavage

----- courbe après lavage

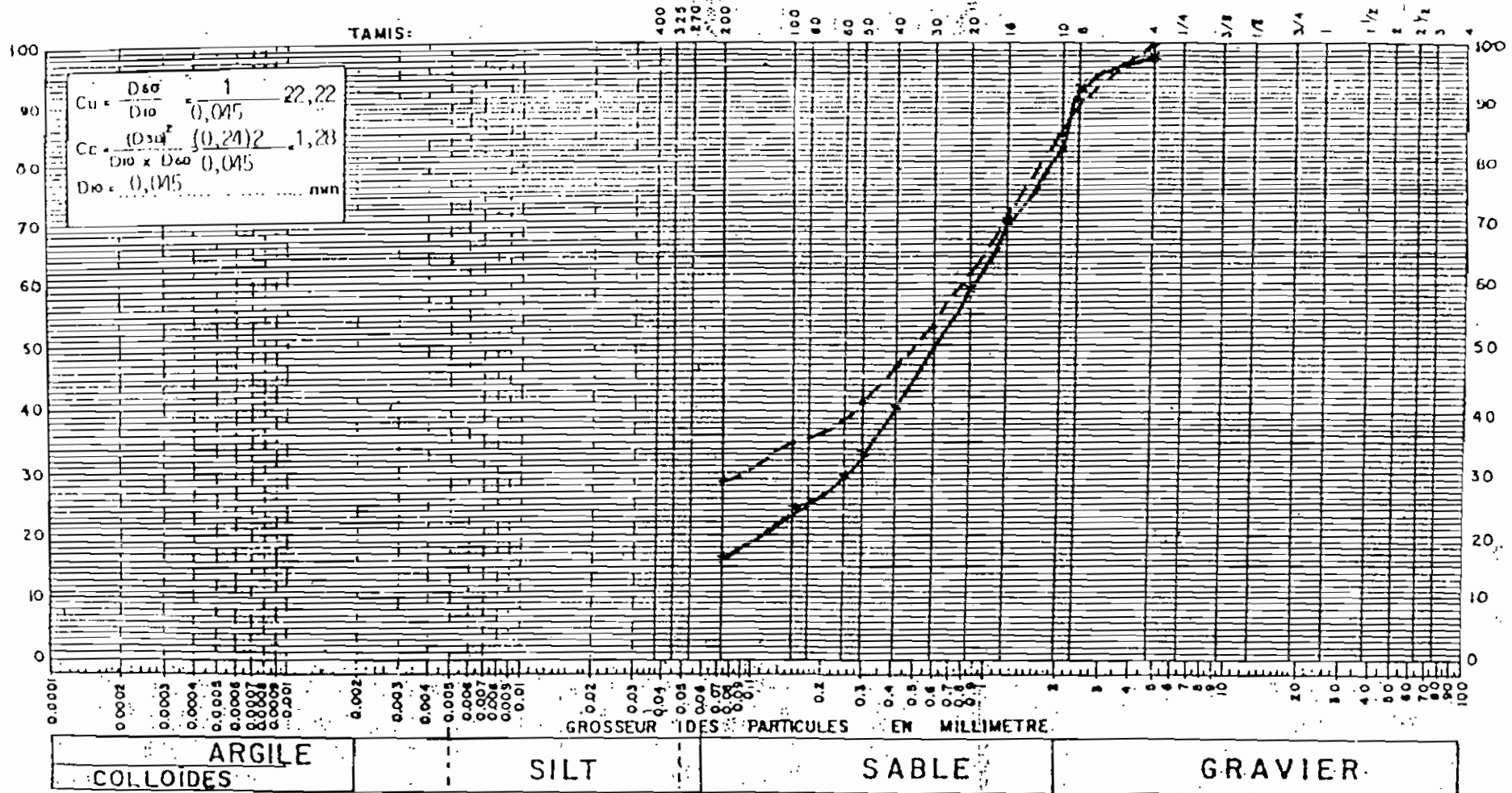
_____ " à sec



DATE 15/01/96

ECHANTILLON NO. C 3

COURBE GRANULOMETRIQUE



Courbe C4

Description : Calcaire de Bargny composé de : pour une granulométrie à sec

Remarques : 17 % de gravier, 77 % de sable et 16 % de fines, ces valeurs sont de 10 %, 60 %, et 30 % après lavage

----- courbe après lavage

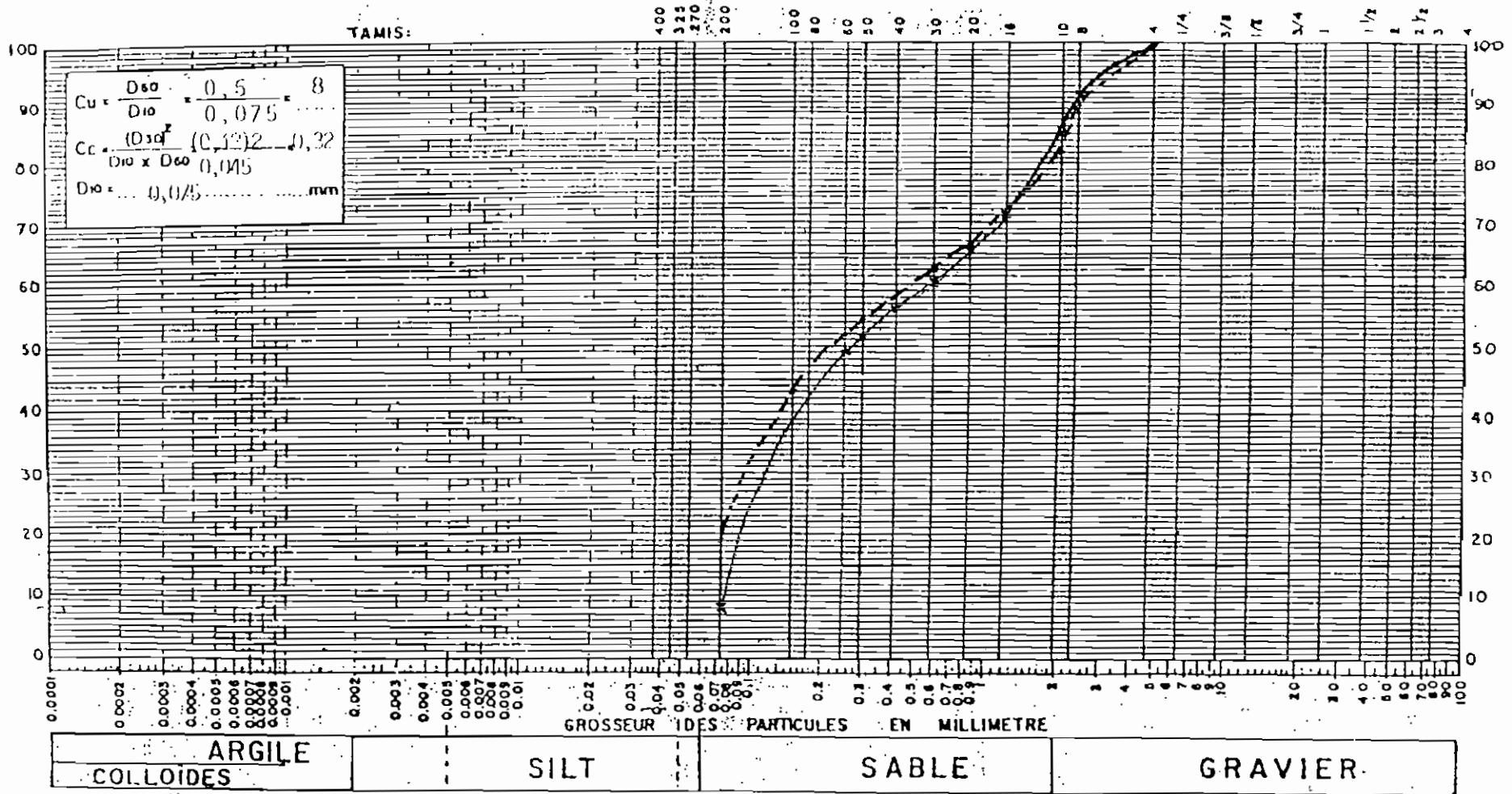
_____ " à sec



DATE 15/01/96

ECHANTILLON NO. C.1

COURBE GRANULOMETRIQUE



AFNOR → Courbe C3

Description : Grès de Toglou composé de : pour une granulométrie à sec

Remarques : 8 % de gravier, 83 % de sable et 9 % de fines, ces valeurs sont respectivement de 8 %, 73 %, et 19 % après lavage

----- courbe après lavage

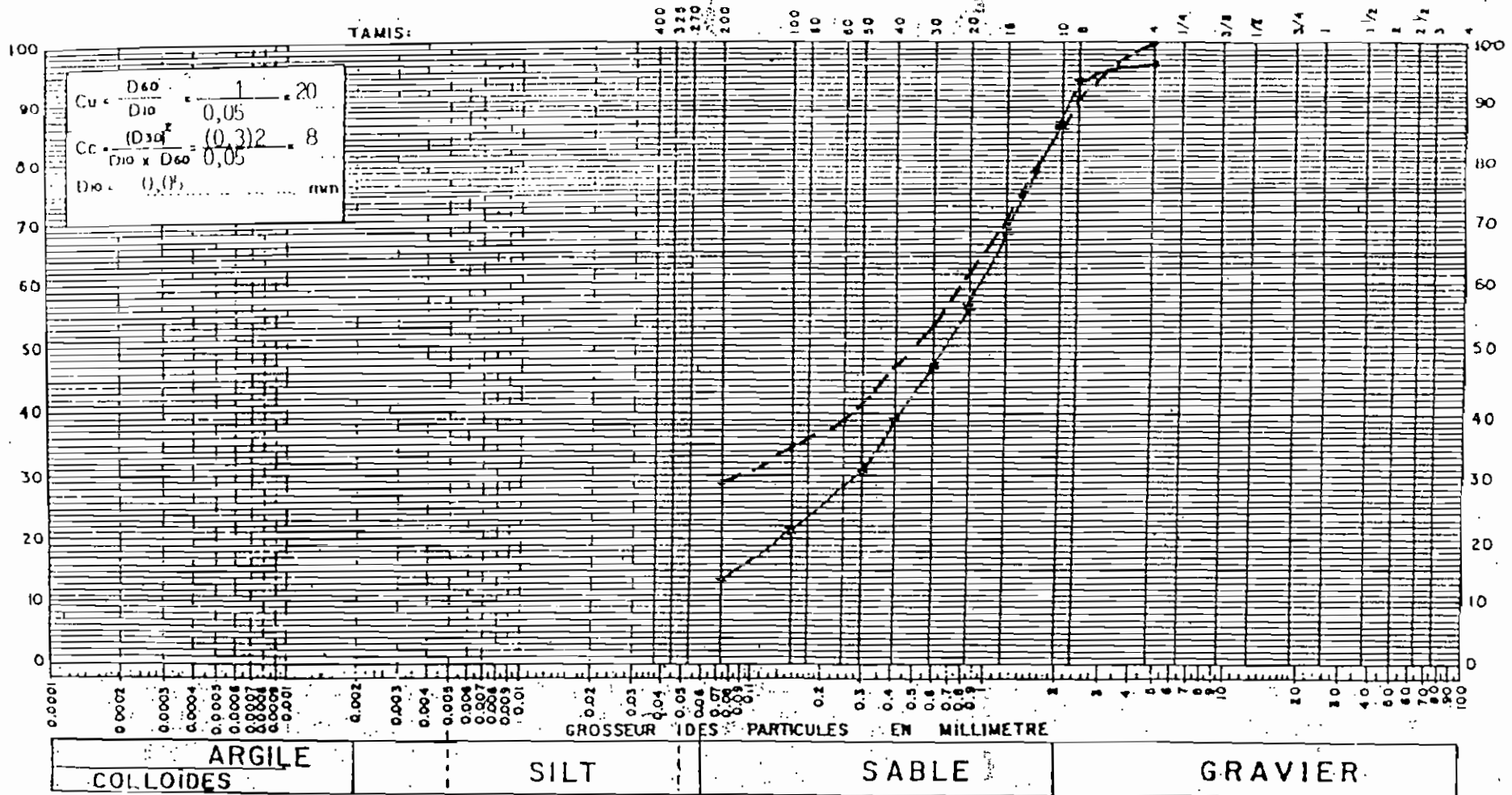
_____ " à sec



DATE 15/01/96

ECHANTILLON NO. C2

COURBE GRANULOMETRIQUE



Courbe C2

Description : Basalte de Diack (Thiès) composé de : pour une granularité à sec

Remarques : 6 % de gravier, 80 % de sable et 14 % de fines, les valeurs sont respectivement de 10 %, 61 % et 29 % après lavage

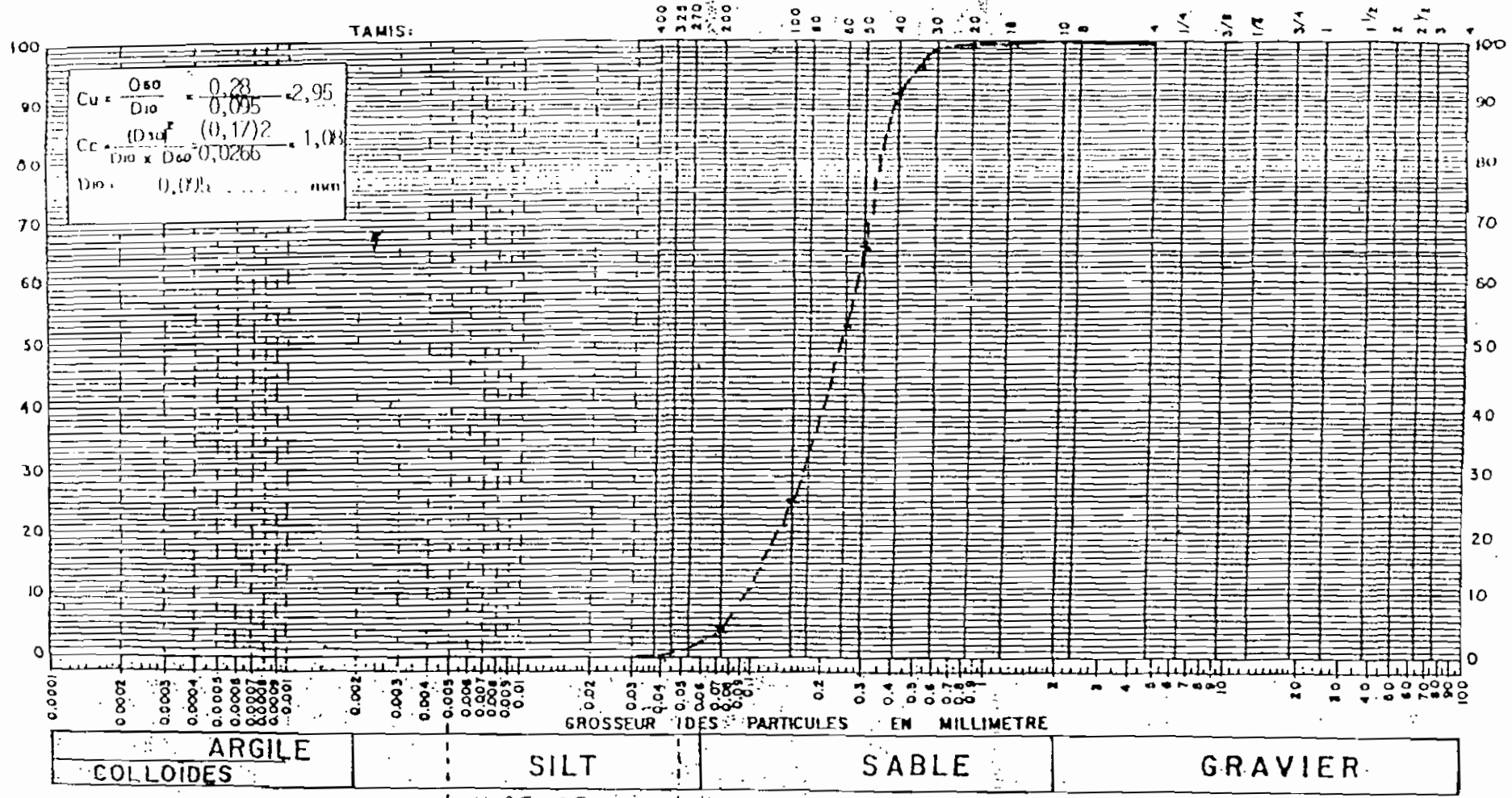
----- Courbe après lavage
 _____ " " à sec



DATE _____

ECHANTILLON NO. C 6

COURBE GRANULOMETRIQUE



Courbe C1

Description : Sable de dune composé de :

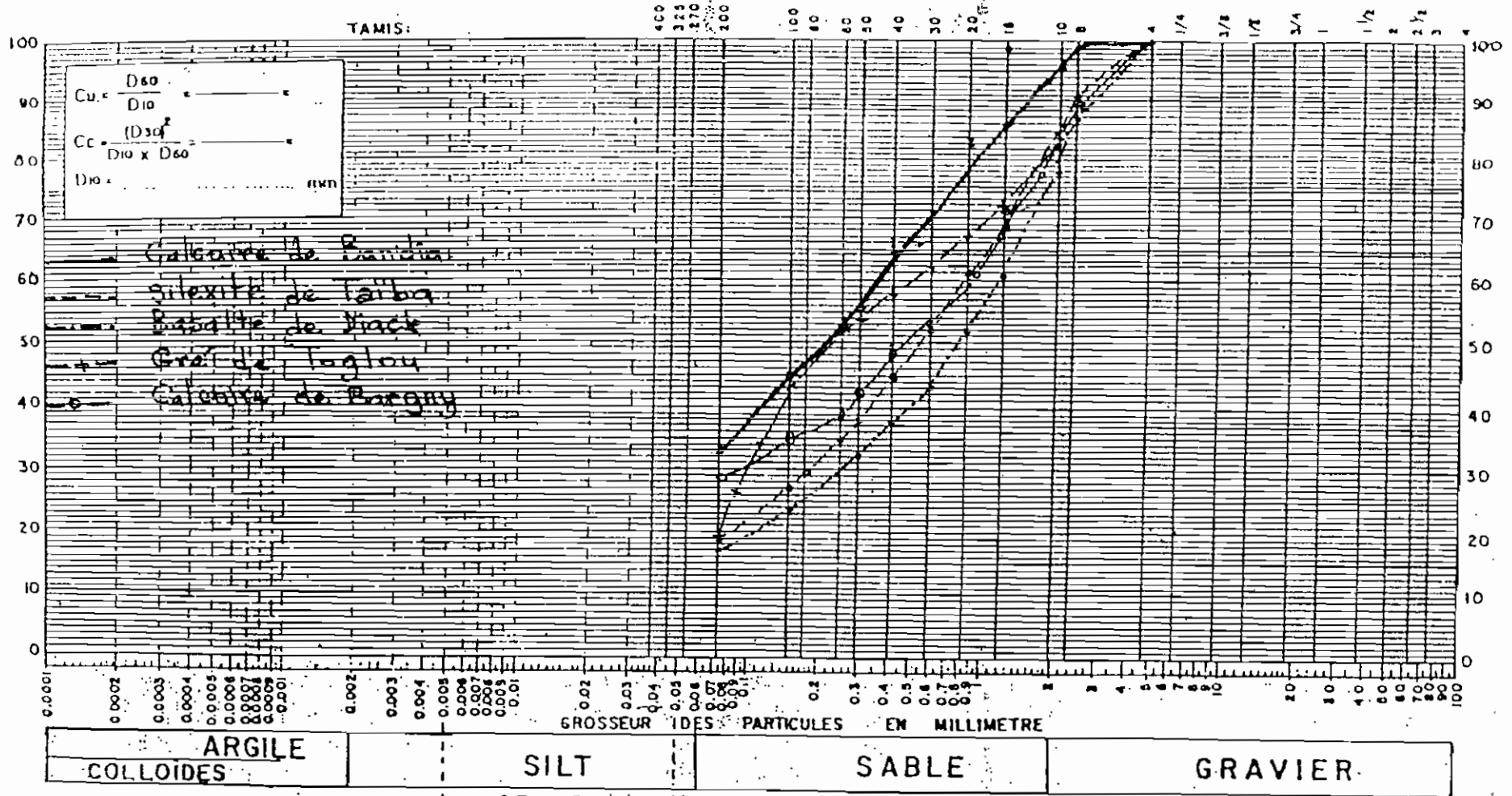
Remarques : 96 % de sable et 4 % de fines



DATE _____

ECHANTILLON NO. 08

COURBE GRANULOMETRIQUE (après lavage)



Courbe C7

Description : _____

Remarques : Pour les valeurs de Cc, Cu, M_f, d/D... Voir tableau 4

ANNEXE 2 :

FORMULATION POUR LES DIFFÉRENTS FILLERS

| tableau a1 | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|------------|-------|--------|---------|--------|---------|----------|----------|-----------------------|
| Application: chaussée | | | | | | | | | | | |
| Formulation pour le Basalte avec f1= 4% et f2 =29% | | | | | | | | | | | |
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | [(F1+F2)*100/(S1+S2)] |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 30 | 1877.9 | -117.95 | 1956.2 | -129.61 | 78.24782 | -11.6651 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 50 | 1823.4 | -63.362 | 1899.3 | -69.629 | 75.97344 | -6.26662 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 60 | 1796.1 | -36.07 | 1870.9 | -39.637 | 74.83624 | -3.56735 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 70 | 1768.8 | -8.7773 | 1842.5 | -9.6454 | 73.69905 | -0.86808 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 80 | 1741.5 | 18.515 | 1814 | 20.346 | 72.56186 | 1.83118 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 90 | 1714.2 | 45.808 | 1785.6 | 50.338 | 71.42467 | 4.53045 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 100 | 1686.9 | 73.1 | 1757.2 | 80.33 | 70.28748 | 7.22971 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 110 | 1659.6 | 100.39 | 1728.8 | 110.32 | 69.15029 | 9.92898 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 120 | 1632.3 | 127.69 | 1700.3 | 140.31 | 68.0131 | 12.6282 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 40 | 1360.7 | -40.699 | 1417.4 | -44.724 | 56.69578 | -4.02515 | 3% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 50 | 1333.4 | -13.406 | 1389 | -14.732 | 55.55859 | -1.32588 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 60 | 1306.1 | 13.886 | 1360.5 | 15.26 | 54.4214 | 1.37339 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 70 | 1278.8 | 41.179 | 1332.1 | 45.252 | 53.28421 | 4.07265 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 80 | 1251.5 | 68.472 | 1303.7 | 75.244 | 52.14702 | 6.77192 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 90 | 1224.2 | 95.764 | 1275.2 | 105.24 | 51.00983 | 9.47118 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 100 | 1196.9 | 123.06 | 1246.8 | 135.23 | 49.87263 | 12.1704 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 110 | 1169.7 | 150.35 | 1218.4 | 165.22 | 48.73544 | 14.8697 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 120 | 1142.4 | 177.64 | 1190 | 195.21 | 47.59825 | 17.569 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 40 | 1034.1 | -7.3945 | 1077.1 | -8.1258 | 43.08588 | -0.73132 | 3% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 50 | 1006.8 | 19.898 | 1048.7 | 21.868 | 41.94869 | 1.96794 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 60 | 979.48 | 47.191 | 1020.3 | 51.858 | 40.8115 | 4.66721 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 70 | 952.18 | 74.483 | 991.86 | 81.85 | 39.67431 | 7.36648 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 80 | 924.89 | 101.78 | 963.43 | 111.84 | 38.53712 | 10.0657 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 90 | 897.6 | 129.07 | 935 | 141.83 | 37.39993 | 12.765 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 100 | 870.31 | 156.36 | 906.57 | 171.83 | 36.26274 | 15.4643 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 110 | 843.01 | 183.65 | 878.14 | 201.82 | 35.12555 | 18.1635 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.6667 | 120 | 815.72 | 210.95 | 849.71 | 231.81 | 33.98836 | 20.8628 | 6% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 40 | 800.75 | 16.394 | 834.11 | 18.016 | 33.36452 | 1.62141 | 3% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 50 | 773.46 | 43.687 | 805.68 | 48.008 | 32.22733 | 4.32068 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 60 | 746.16 | 70.979 | 777.25 | 77.999 | 31.09014 | 7.01994 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 70 | 718.87 | 98.272 | 748.82 | 107.99 | 29.95295 | 9.71921 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 80 | 691.58 | 125.56 | 720.39 | 137.98 | 28.81576 | 12.4185 | 5% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 90 | 664.29 | 152.86 | 691.86 | 167.97 | 27.67857 | 15.1177 | 6% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 100 | 636.99 | 180.15 | 663.53 | 197.97 | 26.54138 | 17.817 | 6% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 110 | 609.7 | 207.44 | 635.1 | 227.96 | 25.40419 | 20.5163 | 6% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.14286 | 120 | 582.41 | 234.73 | 606.67 | 257.95 | 24.267 | 23.2155 | 6% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 40 | 625.76 | 34.236 | 651.84 | 37.622 | 26.07351 | 3.38596 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 50 | 598.47 | 61.528 | 623.41 | 67.614 | 24.93632 | 6.08522 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 60 | 571.18 | 88.821 | 594.98 | 97.605 | 23.79913 | 8.78449 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 70 | 543.89 | 116.11 | 558.55 | 127.6 | 22.66194 | 11.4838 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 80 | 516.59 | 143.41 | 538.12 | 157.59 | 21.52475 | 14.183 | 7% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 90 | 489.3 | 170.7 | 509.69 | 187.58 | 20.38755 | 16.8823 | 7% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 100 | 462.01 | 197.99 | 481.26 | 217.57 | 19.25036 | 19.5816 | 8% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 110 | 434.72 | 225.28 | 452.83 | 247.56 | 18.11317 | 22.2808 | 9% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 120 | 407.42 | 252.58 | 424.4 | 277.56 | 16.97588 | 24.9801 | 10% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m3

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m3

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m3

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m3

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m3

S1,S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| tableau a2 | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|------------|-------|--------|---------|--------|---------|----------|------------|-----------------------|
| Application: chaussée | | | | | | | | | | | |
| Formulation pour le calcaire de Bandia avec f1=4% et f2=33% | | | | | | | | | | | |
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | [(F1+F2)*100/(S1+S2)] |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 30 | 1856 | -95.95 | 1933.3 | -105.44 | 77.33126 | -9.4895868 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 50 | 1811.5 | -51.545 | 1887 | -56.643 | 75.48105 | -5.0978861 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 60 | 1789.3 | -29.343 | 1863.9 | -32.245 | 74.55595 | -2.9020358 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 70 | 1767.1 | -7.1403 | 1840.8 | -7.8465 | 73.63085 | -0.7061855 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 80 | 1744.9 | 15.062 | 1817.6 | 16.552 | 72.70574 | 1.48966486 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 90 | 1722.7 | 37.265 | 1794.5 | 40.95 | 71.78064 | 3.6855152 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 100 | 1700.5 | 59.467 | 1771.4 | 65.349 | 70.85554 | 5.88136553 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 110 | 1678.3 | 81.67 | 1748.3 | 89.747 | 69.93043 | 8.07721586 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 120 | 1656.1 | 103.87 | 1725.1 | 114.15 | 69.00533 | 10.2730662 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 40 | 1353.1 | -33.108 | 1409.5 | -36.383 | 56.37951 | -3.274452 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 50 | 1330.9 | -10.906 | 1386.4 | -11.984 | 55.45441 | -1.0786017 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 60 | 1308.7 | 11.297 | 1363.2 | 12.414 | 54.52931 | 1.11724865 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 70 | 1286.5 | 33.499 | 1340.1 | 36.812 | 53.6042 | 3.31309898 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 80 | 1264.3 | 55.702 | 1317 | 61.211 | 52.6791 | 5.50894931 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 90 | 1242.1 | 77.904 | 1293.8 | 85.609 | 51.754 | 7.70479964 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 100 | 1219.9 | 100.11 | 1270.7 | 110.01 | 50.82889 | 9.90064997 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 110 | 1197.7 | 122.31 | 1247.6 | 134.41 | 49.90379 | 12.0965003 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 120 | 1175.5 | 144.51 | 1224.5 | 158.8 | 48.97869 | 14.2923506 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 40 | 1032.7 | -6.0154 | 1075.7 | -6.6103 | 43.02842 | -0.594929 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 50 | 1010.5 | 16.187 | 1052.6 | 17.788 | 42.10332 | 1.60092128 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 60 | 988.28 | 38.39 | 1029.5 | 42.186 | 41.17821 | 3.79677161 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 70 | 966.07 | 60.592 | 1006.3 | 66.585 | 40.25311 | 5.99262194 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 80 | 943.87 | 82.795 | 983.2 | 90.983 | 39.328 | 8.18847227 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 90 | 921.67 | 105 | 960.07 | 115.38 | 38.4029 | 10.3843226 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 100 | 899.47 | 127.2 | 936.94 | 139.78 | 37.4778 | 12.5801729 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 110 | 877.26 | 149.4 | 913.82 | 164.18 | 36.55269 | 14.7760233 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 120 | 855.06 | 171.6 | 890.69 | 188.58 | 35.62759 | 16.9718736 | 5% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 40 | 803.81 | 13.337 | 837.3 | 14.656 | 33.49192 | 1.31901592 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 50 | 781.6 | 35.539 | 814.17 | 39.054 | 32.56682 | 3.51486626 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 60 | 759.4 | 57.742 | 791.04 | 63.452 | 31.64172 | 5.71071659 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 70 | 737.2 | 79.944 | 767.92 | 87.851 | 30.71661 | 7.90656692 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 80 | 715 | 102.15 | 744.79 | 112.25 | 29.79151 | 10.1024172 | 5% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 90 | 692.79 | 124.35 | 721.66 | 136.65 | 28.8664 | 12.2982676 | 5% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 100 | 670.59 | 146.55 | 698.53 | 161.05 | 27.9413 | 14.4941179 | 5% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 110 | 648.39 | 168.75 | 675.4 | 185.44 | 27.0162 | 16.6899682 | 6% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 120 | 626.19 | 190.96 | 652.28 | 209.84 | 26.09109 | 18.8858186 | 6% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 40 | 632.15 | 27.851 | 658.49 | 30.605 | 26.33955 | 2.75447466 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 50 | 609.95 | 50.053 | 635.36 | 55.004 | 25.41445 | 4.95032499 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 60 | 587.74 | 72.256 | 612.23 | 79.402 | 24.48934 | 7.14617532 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 70 | 565.54 | 94.458 | 589.11 | 103.8 | 23.56424 | 9.34202565 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 80 | 543.34 | 116.66 | 565.98 | 128.2 | 22.63914 | 11.537876 | 6% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 90 | 521.14 | 138.86 | 542.65 | 152.6 | 21.71403 | 13.7337263 | 7% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 100 | 498.93 | 161.07 | 519.72 | 177 | 20.78893 | 15.9295766 | 7% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 110 | 476.73 | 183.27 | 496.8 | 201.39 | 19.86382 | 18.125427 | 8% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 120 | 454.53 | 205.47 | 473.47 | 225.79 | 18.93872 | 20.3212773 | 8% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m3

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m3

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m3

Sg1 = Masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m3

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m3

S1, S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| Application: chaussée | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|------------|-------|--------|---------|--------|---------|----------|----------|-----------------------|
| Formulation pour le calcaire de Bargny avec f1=4%et f2=30% | | | | | | | | | | | |
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | ((F1+F2)*100/(S1+S2)) |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 30 | 1871.8 | -111.84 | 1949.8 | -122.9 | 77.99344 | -11.0614 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 50 | 1820.1 | -60.083 | 1895.9 | -66.025 | 75.83678 | -5.94226 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 60 | 1794.2 | -34.203 | 1869 | -37.586 | 74.75845 | -3.3827 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 70 | 1768.3 | -8.323 | 1842 | -9.1461 | 73.68012 | -0.82315 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 80 | 1742.4 | 17.557 | 1815 | 19.293 | 72.60179 | 1.7364 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 90 | 1716.6 | 43.437 | 1788.1 | 47.733 | 71.52348 | 4.295952 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 100 | 1690.7 | 69.317 | 1761.1 | 76.172 | 70.44513 | 6.855505 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 110 | 1664.8 | 95.197 | 1734.2 | 104.61 | 69.3668 | 9.415057 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 120 | 1638.9 | 121.08 | 1707.2 | 133.05 | 68.28847 | 11.97461 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 40 | 1358.6 | -38.592 | 1415.2 | -42.409 | 56.60801 | -3.8168 | 3% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 50 | 1332.7 | -12.712 | 1388.2 | -13.969 | 55.52068 | -1.25725 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 60 | 1306.8 | 13.168 | 1361.3 | 14.47 | 54.45135 | 1.3023 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 70 | 1281 | 39.048 | 1334.3 | 42.909 | 53.37302 | 3.861852 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 80 | 1255.1 | 64.928 | 1307.4 | 71.349 | 52.29489 | 6.421405 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 90 | 1229.2 | 90.807 | 1280.4 | 99.788 | 51.21636 | 8.980957 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 100 | 1203.3 | 116.69 | 1253.5 | 128.23 | 50.13803 | 11.54051 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 110 | 1177.4 | 142.57 | 1226.5 | 156.67 | 49.0597 | 14.10006 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 120 | 1151.6 | 168.45 | 1199.5 | 185.11 | 47.98137 | 16.65961 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 40 | 1033.7 | -7.0117 | 1076.7 | -7.7052 | 43.06993 | -0.69347 | 3% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 50 | 1007.8 | 18.868 | 1049.8 | 20.734 | 41.9916 | 1.866084 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 60 | 981.92 | 44.748 | 1022.8 | 49.174 | 40.91327 | 4.425636 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 70 | 956.04 | 70.628 | 995.87 | 77.613 | 39.83494 | 6.985189 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 80 | 930.16 | 96.508 | 968.92 | 106.05 | 38.75661 | 9.544741 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 90 | 904.28 | 122.39 | 941.96 | 134.49 | 37.67828 | 12.10429 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 100 | 878.4 | 148.27 | 915 | 162.93 | 36.59995 | 14.66385 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 110 | 852.52 | 174.15 | 888.04 | 191.37 | 35.52162 | 17.2234 | 5% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 120 | 826.64 | 200.03 | 861.08 | 219.81 | 34.44329 | 19.78295 | 5% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 40 | 801.6 | 15.546 | 835 | 17.083 | 33.39988 | 1.537486 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 50 | 775.72 | 41.426 | 808.04 | 45.523 | 32.32155 | 4.097039 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 60 | 749.84 | 67.306 | 781.08 | 73.962 | 31.24322 | 6.656591 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 70 | 723.96 | 93.185 | 754.12 | 102.4 | 30.16489 | 9.216143 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 80 | 698.08 | 119.07 | 727.16 | 130.84 | 29.08656 | 11.7757 | 5% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 90 | 672.2 | 144.95 | 700.21 | 159.28 | 28.00823 | 14.33525 | 6% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 100 | 646.32 | 170.83 | 673.25 | 187.72 | 26.9299 | 16.8948 | 6% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 110 | 620.44 | 196.71 | 646.29 | 216.16 | 25.85157 | 19.45435 | 6% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 120 | 594.56 | 222.59 | 619.33 | 244.6 | 24.77324 | 22.0139 | 6% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 40 | 627.54 | 32.464 | 653.68 | 35.674 | 26.14734 | 3.210702 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 50 | 601.66 | 58.344 | 626.73 | 64.114 | 25.06901 | 5.770255 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 60 | 575.78 | 84.224 | 599.77 | 92.553 | 23.99068 | 8.329607 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 70 | 549.9 | 110.1 | 572.81 | 120.99 | 22.91235 | 10.88936 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 80 | 524.02 | 135.98 | 545.85 | 149.43 | 21.83402 | 13.44891 | 6% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 90 | 498.14 | 161.86 | 518.89 | 177.87 | 20.75569 | 16.00846 | 7% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 100 | 472.26 | 187.74 | 491.93 | 206.31 | 19.67736 | 18.56802 | 8% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 110 | 446.38 | 213.62 | 464.98 | 234.75 | 18.59903 | 21.12757 | 9% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 120 | 420.5 | 239.5 | 438.02 | 263.19 | 17.5207 | 23.68712 | 9% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m3

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m3

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m3

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m3

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m3

S1, S2 = masse totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| Application: chaussée | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|------------|-------|--------|---------|--------|---------|----------|----------|-------------------------|
| Formulation pour le gres avec f1=4% et f2=19% | | | | | | | | | | | |
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | $[(F1+F2)/(S1+S2)]*100$ |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 40 | 1932.6 | -172.64 | 2013.2 | -189.71 | 80.52668 | -17.0743 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 50 | 1880.7 | -120.67 | 1959 | -132.6 | 78.36105 | -11.9339 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 60 | 1828.7 | -68.69 | 1904.9 | -75.484 | 76.19543 | -6.79354 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 70 | 1776.7 | -16.715 | 1850.7 | -18.368 | 74.0298 | -1.65315 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 80 | 1724.7 | 35.26 | 1796.6 | 38.747 | 71.86417 | 3.48724 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 90 | 1672.8 | 87.235 | 1742.5 | 95.863 | 69.69854 | 8.62763 | 5% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 100 | 1620.8 | 139.21 | 1688.3 | 152.88 | 67.53292 | 13.76802 | 5% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 110 | 1568.8 | 191.19 | 1634.2 | 210.09 | 65.36729 | 18.90841 | 5% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 120 | 1516.8 | 243.16 | 1580 | 267.21 | 63.20166 | 24.0488 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 40 | 1397.5 | -77.505 | 1455.7 | -85.171 | 58.22938 | -7.66535 | 3% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 50 | 1345.5 | -25.53 | 1401.6 | -28.055 | 56.06376 | -2.52496 | 3% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 60 | 1293.6 | 26.445 | 1347.5 | 29.06 | 53.89813 | 2.61543 | 3% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 70 | 1241.6 | 78.42 | 1293.3 | 86.176 | 51.7325 | 7.75582 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 80 | 1189.6 | 130.4 | 1239.2 | 143.29 | 49.56687 | 12.89621 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 90 | 1137.6 | 182.37 | 1185 | 200.41 | 47.40125 | 18.0366 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 100 | 1085.7 | 234.35 | 1130.9 | 257.52 | 45.23562 | 23.17699 | 6% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 110 | 1033.7 | 286.32 | 1076.7 | 314.64 | 43.06999 | 28.31738 | 6% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 120 | 981.7 | 338.3 | 1022.6 | 371.75 | 40.90437 | 33.45777 | 6% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 40 | 1040.7 | -14.082 | 1084.1 | -15.474 | 43.36452 | -1.3927 | 3% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 50 | 988.77 | 37.893 | 1030 | 41.641 | 41.19889 | 3.747687 | 3% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 60 | 936.8 | 89.868 | 975.83 | 98.756 | 39.03326 | 8.888077 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 70 | 884.82 | 141.84 | 921.69 | 155.87 | 36.86784 | 14.02847 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 80 | 832.85 | 193.82 | 867.55 | 212.99 | 34.70201 | 19.16886 | 6% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 90 | 780.87 | 245.79 | 813.41 | 270.1 | 32.53638 | 24.30925 | 6% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 100 | 728.9 | 297.77 | 759.27 | 327.22 | 30.37076 | 29.44964 | 7% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 110 | 676.92 | 349.74 | 705.13 | 384.33 | 28.20513 | 34.59003 | 7% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 120 | 624.95 | 401.72 | 650.99 | 441.45 | 26.0395 | 39.73042 | 7% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 40 | 785.92 | 31.221 | 818.67 | 34.308 | 32.74676 | 3.087759 | 3% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 50 | 733.95 | 83.196 | 764.53 | 91.424 | 30.58113 | 8.228148 | 3% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 60 | 681.97 | 135.17 | 710.39 | 148.54 | 28.4155 | 13.36854 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 70 | 630 | 187.15 | 656.25 | 205.65 | 26.24988 | 18.50893 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 80 | 578.02 | 239.12 | 602.11 | 262.77 | 24.08425 | 23.64932 | 7% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 90 | 526.05 | 291.1 | 547.97 | 319.89 | 21.91862 | 28.78971 | 7% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 100 | 474.07 | 343.07 | 493.82 | 377 | 19.75299 | 33.9301 | 8% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 110 | 422.1 | 395.05 | 439.68 | 434.12 | 17.58737 | 39.07049 | 8% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 120 | 370.12 | 447.02 | 385.54 | 491.23 | 15.42174 | 44.21088 | 9% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 40 | 594.8 | 65.198 | 619.59 | 71.646 | 24.78344 | 6.448105 | 3% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 50 | 542.83 | 117.17 | 565.45 | 128.76 | 22.61781 | 11.58849 | 3% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 60 | 490.85 | 169.15 | 511.3 | 185.88 | 20.45218 | 16.72888 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 70 | 438.88 | 221.12 | 457.16 | 242.99 | 18.28656 | 21.86927 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 80 | 386.9 | 273.1 | 403.02 | 300.11 | 16.12093 | 27.00966 | 11% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 90 | 334.93 | 325.07 | 348.88 | 357.22 | 13.9553 | 32.15005 | 13% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 100 | 282.95 | 377.05 | 294.74 | 414.34 | 11.78967 | 37.29044 | 17% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 110 | 230.98 | 429.02 | 240.6 | 471.45 | 9.624047 | 42.43083 | 22% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 120 | 179 | 481 | 186.46 | 528.57 | 7.45842 | 47.57122 | 30% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m³

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m³

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m³

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m³

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m³

S1, S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| Application: chaussee | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|------------|-------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|-----------------------|
| Formulation pour le Silixes avec f1=4%et f2=18,5% | | | | | | | | | | | |
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | ((F1+F2)*100/(S1+S2)) |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 30 | 1993.1 | -233.1 | 2076.1 | -256.15 | 83.046 | -23.05 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 50 | 1885.2 | -125.22 | 1963.8 | -137.61 | 78.551 | -12.38 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 60 | 1831.3 | -71.284 | 1907.6 | -78.334 | 76.303 | -7.05 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 70 | 1777.3 | -17.346 | 1851.4 | -19.062 | 74.056 | -1.716 | 3% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 80 | 1723.4 | 36.591 | 1795.2 | 40.21 | 71.809 | 3.6189 | 4% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 90 | 1669.5 | 90.529 | 1739 | 99.482 | 69.561 | 8.9534 | 5% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 100 | 1615.5 | 144.47 | 1682.8 | 158.75 | 67.314 | 14.288 | 5% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 110 | 1561.6 | 198.4 | 1626.7 | 218.03 | 65.067 | 19.622 | 5% |
| 0.2 | 440 | 350 | 1760 | 120 | 1507.7 | 252.34 | 1570.5 | 277.3 | 62.819 | 24.957 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 40 | 1400.4 | -80.431 | 1458.8 | -88.386 | 58.351 | -7.955 | 3% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 50 | 1346.5 | -26.494 | 1402.6 | -29.114 | 56.104 | -2.62 | 3% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 60 | 1292.6 | 27.443 | 1346.4 | 30.158 | 53.857 | 2.7142 | 3% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 70 | 1238.6 | 81.381 | 1290.2 | 89.429 | 51.609 | 8.0487 | 4% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 80 | 1184.7 | 135.32 | 1234 | 148.7 | 49.362 | 13.383 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 90 | 1130.7 | 189.26 | 1177.9 | 207.97 | 47.114 | 18.718 | 5% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 100 | 1076.8 | 243.19 | 1121.7 | 267.25 | 44.867 | 24.052 | 6% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 110 | 1022.9 | 297.13 | 1065.5 | 326.52 | 42.62 | 29.387 | 6% |
| 0.25 | 440 | 350 | 1320 | 120 | 968.93 | 351.07 | 1009.3 | 385.79 | 40.372 | 34.721 | 6% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 40 | 1041.3 | -14.613 | 1084.7 | -16.059 | 43.387 | -1.445 | 3% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 50 | 987.34 | 39.324 | 1028.5 | 43.213 | 41.139 | 3.8892 | 3% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 60 | 933.41 | 93.261 | 972.3 | 102.49 | 38.892 | 9.2237 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 70 | 879.47 | 147.2 | 916.11 | 161.76 | 36.644 | 14.558 | 4% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 80 | 825.53 | 201.14 | 859.93 | 221.03 | 34.397 | 19.893 | 6% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 90 | 771.59 | 255.07 | 803.74 | 280.3 | 32.15 | 25.227 | 6% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 100 | 717.66 | 309.01 | 747.56 | 339.57 | 29.902 | 30.562 | 7% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 110 | 663.72 | 362.95 | 691.37 | 398.84 | 27.655 | 35.896 | 7% |
| 0.3 | 440 | 350 | 1026.667 | 120 | 609.78 | 416.89 | 635.19 | 458.12 | 25.408 | 41.23 | 7% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 40 | 784.74 | 32.399 | 817.44 | 35.604 | 32.698 | 3.2043 | 3% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 50 | 730.81 | 86.337 | 761.26 | 94.876 | 30.45 | 8.5388 | 3% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 60 | 676.87 | 140.27 | 705.07 | 154.15 | 28.203 | 13.873 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 70 | 622.93 | 194.21 | 648.89 | 213.42 | 25.955 | 19.208 | 4% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 80 | 568.99 | 248.15 | 592.7 | 272.69 | 23.708 | 24.542 | 7% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 90 | 515.06 | 302.09 | 536.52 | 331.96 | 21.461 | 29.877 | 8% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 100 | 461.12 | 356.02 | 480.33 | 391.24 | 19.213 | 35.211 | 8% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 110 | 407.18 | 409.96 | 424.15 | 450.51 | 16.966 | 40.546 | 9% |
| 0.35 | 440 | 350 | 817.1429 | 120 | 353.24 | 463.9 | 367.96 | 509.78 | 14.718 | 45.88 | 9% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 40 | 592.34 | 67.659 | 617.02 | 74.351 | 24.681 | 6.6916 | 3% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 50 | 538.4 | 121.6 | 560.84 | 133.62 | 22.433 | 12.026 | 3% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 60 | 484.47 | 175.53 | 504.65 | 192.89 | 20.186 | 17.361 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 70 | 430.53 | 229.47 | 448.47 | 252.17 | 17.939 | 22.695 | 4% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 80 | 376.59 | 283.41 | 392.28 | 311.44 | 15.691 | 28.029 | 11% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 90 | 322.65 | 337.35 | 336.1 | 370.71 | 13.444 | 33.364 | 14% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 100 | 268.72 | 391.28 | 279.91 | 429.98 | 11.197 | 38.698 | 18% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 110 | 214.78 | 445.22 | 223.73 | 489.25 | 8.9491 | 44.033 | 24% |
| 0.4 | 440 | 350 | 660 | 120 | 160.84 | 499.16 | 167.54 | 548.53 | 6.7017 | 49.367 | 33% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m³

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m³

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m³

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m³

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m³

S1, S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

*Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| Application: parking de remplissage | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|------------|-------|--------|---------|--------|---------|----------|----------|-------------------------|
| Formulation pour le Basalte avec f1=4% et f2=29% | | | | | | | | | | | |
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | $((F1+F2)*100/(S1+S2))$ |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 30 | 1165.3 | -45.284 | 1213.8 | -49.762 | 48.55349 | -4.47862 | 3% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 50 | 1110.7 | 9.3013 | 1157 | 10.221 | 46.27911 | 0.91991 | 4% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 60 | 1083.4 | 36.594 | 1128.5 | 40.213 | 45.14192 | 3.619176 | 4% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 70 | 1056.1 | 63.886 | 1100.1 | 70.205 | 44.00473 | 6.318441 | 4% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 80 | 1028.8 | 91.179 | 1071.7 | 100.2 | 42.86754 | 9.017707 | 5% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 90 | 1001.5 | 118.47 | 1043.3 | 130.19 | 41.73035 | 11.71697 | 5% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 100 | 974.24 | 145.76 | 1014.8 | 160.18 | 40.59316 | 14.41624 | 5% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 110 | 946.94 | 173.06 | 986.4 | 190.17 | 39.45597 | 17.1155 | 5% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 120 | 919.65 | 200.35 | 957.97 | 220.16 | 38.31878 | 19.81477 | 5% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 40 | 826.2 | 13.799 | 860.63 | 15.164 | 34.42504 | 1.364749 | 3% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 50 | 798.91 | 41.092 | 832.2 | 45.156 | 33.28785 | 4.064015 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 60 | 771.62 | 68.384 | 803.77 | 75.148 | 32.15066 | 6.76328 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 70 | 744.32 | 95.677 | 775.34 | 105.14 | 31.01346 | 9.462546 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 80 | 717.03 | 122.97 | 746.91 | 135.13 | 29.87627 | 12.16181 | 5% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 90 | 689.74 | 150.26 | 718.48 | 165.12 | 28.73908 | 14.86108 | 6% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 100 | 662.45 | 177.55 | 690.05 | 195.11 | 27.60189 | 17.56034 | 6% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 110 | 635.15 | 204.85 | 661.62 | 225.11 | 26.4647 | 20.25961 | 6% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 120 | 607.86 | 232.14 | 633.19 | 255.1 | 25.32751 | 22.95888 | 6% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 40 | 618.34 | 34.993 | 644.1 | 38.454 | 25.76419 | 3.460819 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 50 | 591.05 | 62.285 | 615.68 | 68.445 | 24.627 | 6.160084 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 60 | 563.76 | 89.578 | 587.25 | 98.437 | 23.48981 | 8.85935 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 70 | 536.46 | 116.87 | 558.82 | 128.43 | 22.35262 | 11.55862 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 80 | 509.17 | 144.16 | 530.39 | 158.42 | 21.21543 | 14.25788 | 6% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 90 | 481.88 | 171.46 | 501.96 | 188.41 | 20.07824 | 16.95715 | 6% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 100 | 454.59 | 198.75 | 473.53 | 218.4 | 18.94105 | 19.65641 | 7% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 110 | 427.29 | 226.04 | 445.1 | 248.4 | 17.80386 | 22.35568 | 7% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 120 | 400 | 253.33 | 416.67 | 278.39 | 16.66667 | 25.05495 | 7% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 40 | 469.87 | 50.131 | 489.45 | 55.089 | 19.57787 | 4.958011 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 50 | 442.58 | 77.424 | 461.02 | 85.081 | 18.44068 | 7.657277 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 60 | 415.28 | 104.72 | 432.59 | 115.07 | 17.30349 | 10.35654 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 70 | 387.99 | 132.01 | 404.16 | 145.06 | 16.1663 | 13.05581 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 80 | 360.7 | 159.3 | 375.73 | 175.06 | 15.02911 | 15.75507 | 7% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 90 | 333.41 | 186.59 | 347.3 | 205.05 | 13.89192 | 18.45434 | 7% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 100 | 306.11 | 213.89 | 318.87 | 235.04 | 12.75473 | 21.15361 | 8% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 110 | 278.82 | 241.18 | 290.44 | 265.03 | 11.61754 | 23.85287 | 8% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 120 | 251.53 | 268.47 | 262.01 | 295.02 | 10.48035 | 26.55214 | 8% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 40 | 358.52 | 61.485 | 373.45 | 67.566 | 14.93814 | 6.080906 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 50 | 331.22 | 88.777 | 345.02 | 97.557 | 13.80095 | 8.780172 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 60 | 303.93 | 116.07 | 316.59 | 127.55 | 12.66376 | 11.47944 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 70 | 276.64 | 143.36 | 288.16 | 157.54 | 11.52656 | 14.1787 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 80 | 249.34 | 170.66 | 259.73 | 187.53 | 10.38937 | 16.87797 | 10% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 90 | 222.05 | 197.95 | 231.3 | 217.52 | 9.252183 | 19.57723 | 12% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 100 | 194.76 | 225.24 | 202.87 | 247.52 | 8.114993 | 22.2765 | 15% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 110 | 167.47 | 252.53 | 174.45 | 277.51 | 6.977802 | 24.97577 | 18% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 120 | 140.17 | 279.83 | 146.02 | 307.5 | 5.840611 | 27.67503 | 23% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m3

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m3

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m3

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m3

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m3

S1, S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| tableau a7 | | Application: parking de remplissage Formulation pour le calcaire de Bandia avec f1=4% et f2=33% | | | | | | | | |
|------------|-----|--|-------|--------|---------|----------|--------|-------|-----------------------|--|
| a | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | ((F1+F2)*100/(S1+S2)) | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 30 | 1156.8 | -36.838 | 1205.04 | -40.48 | 48.2 | 3% | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 50 | 1112.4 | 7.5666 | 1158.785 | 8.315 | 46.35 | 4% | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 60 | 1090.2 | 29.769 | 1135.657 | 32.713 | 45.43 | 4% | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 70 | 1068 | 51.972 | 1112.53 | 57.112 | 44.5 | 4% | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 80 | 1045.8 | 74.174 | 1089.402 | 81.51 | 43.58 | 5% | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 90 | 1023.6 | 96.377 | 1066.274 | 105.91 | 42.65 | 5% | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 100 | 1001.4 | 118.58 | 1043.147 | 130.31 | 41.73 | 5% | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 110 | 979.22 | 140.78 | 1020.019 | 154.7 | 40.8 | 5% | |
| 0.2 | 220 | 1120 | 120 | 957.02 | 162.98 | 996.8917 | 179.1 | 39.88 | 5% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 40 | 828.77 | 11.226 | 863.3067 | 12.336 | 34.53 | 4% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 50 | 806.57 | 33.428 | 840.1791 | 36.734 | 33.61 | 4% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 60 | 784.37 | 55.631 | 817.0515 | 61.132 | 32.68 | 4% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 70 | 762.17 | 77.833 | 793.9239 | 85.531 | 31.76 | 4% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 80 | 739.96 | 100.04 | 770.7963 | 109.93 | 30.83 | 5% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 90 | 717.76 | 122.24 | 747.6687 | 134.3 | | 5% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 100 | 695.56 | 144.44 | 724.5411 | 158.6 | | 5% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 110 | 673.36 | 166.64 | 701.4136 | 183.12 | 28.06 | 6% | |
| 0.25 | 220 | 840 | 120 | 651.15 | 188.85 | 678.286 | 207.52 | 27.13 | 6% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 40 | 624.87 | 28.467 | 650.9029 | 31.282 | 26.04 | 4% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 50 | 602.66 | 50.669 | 627.7753 | 55.68 | 25.11 | 4% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 60 | 580.46 | 72.872 | 604.6477 | 80.079 | 24.19 | 4% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 70 | 558.26 | 95.074 | 581.5201 | 104.48 | 23.26 | 4% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 80 | 536.06 | 117.28 | 558.3925 | 128.88 | 22.34 | 6% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 90 | 513.85 | 139.48 | 535.2649 | 153.27 | 21.41 | 6% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 100 | 491.65 | 161.68 | 512.1374 | 177.67 | 20.49 | 6% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 110 | 469.45 | 183.88 | 489.0098 | 202.07 | 19.56 | 6% | |
| 0.3 | 220 | 653.333 | 120 | 447.25 | 206.09 | 465.8822 | 226.47 | 18.64 | 6% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 40 | 479.22 | 40.782 | 499.1859 | 44.815 | 19.97 | 4% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 50 | 457.02 | 62.984 | 476.0583 | 69.213 | 19.04 | 4% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 60 | 434.81 | 85.187 | 452.9307 | 93.612 | 18.12 | 4% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 70 | 412.61 | 107.39 | 429.8031 | 118.01 | 17.19 | 4% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 80 | 390.41 | 129.59 | 406.6755 | 142.41 | 16.27 | 6% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 90 | 368.21 | 151.79 | 383.548 | 166.81 | 15.34 | 7% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 100 | 346 | 174 | 360.4204 | 191.2 | 14.42 | 7% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 110 | 323.8 | 196.2 | 337.2928 | 215.6 | 13.49 | 7% | |
| 0.35 | 220 | 520 | 120 | 301.6 | 218.4 | 314.1652 | 240 | 12.57 | 7% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 40 | 369.98 | 50.018 | 385.3982 | 54.965 | 15.42 | 4% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 50 | 347.78 | 72.22 | 362.2706 | 79.363 | 14.49 | 4% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 60 | 325.58 | 94.423 | 339.143 | 103.76 | 13.57 | 4% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 70 | 303.37 | 116.63 | 316.0154 | 128.16 | 12.64 | 4% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 80 | 281.17 | 138.83 | 292.8878 | 152.56 | 11.72 | 9% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 90 | 258.97 | 161.03 | 269.7602 | 176.96 | 10.79 | 10% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 100 | 236.77 | 183.23 | 246.6326 | 201.35 | 9.865 | 11% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 110 | 214.56 | 205.44 | 223.505 | 225.75 | 8.94 | 13% | |
| 0.4 | 220 | 420 | 120 | 192.36 | 227.64 | 200.3774 | 250.15 | 8.015 | 15% | |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m³

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m³

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m³

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m³

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m³

S1, S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| Application: parking de remplissage | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|------------|-------|--------|--------|--------|---------|----------|----------|-------------------------|
| Formulation pour le calcaire de Bargny avec f1=4% et f2=30% | | | | | | | | | | | |
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | $((F1+F2)*100/(S1+S2))$ |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 30 | 1162.9 | -42.94 | 1211.4 | -47.187 | 48.45583 | -4.24681 | 3% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 50 | 1111.2 | 8.8199 | 1157.5 | 9.6922 | 46.29917 | 0.872295 | 4% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 60 | 1085.3 | 34.7 | 1130.5 | 38.132 | 45.22084 | 3.431848 | 4% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 70 | 1059.4 | 60.58 | 1103.6 | 66.571 | 44.14251 | 5.9914 | 4% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 80 | 1033.5 | 86.46 | 1076.6 | 95.011 | 43.06418 | 8.550952 | 5% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 90 | 1007.7 | 112.34 | 1049.6 | 123.45 | 41.98585 | 11.1105 | 5% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 100 | 981.78 | 138.22 | 1022.7 | 151.89 | 40.90752 | 13.67006 | 5% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 110 | 955.9 | 164.1 | 995.73 | 180.33 | 39.82919 | 16.22961 | 5% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 120 | 930.02 | 189.98 | 968.77 | 208.77 | 38.75086 | 18.78916 | 5% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 40 | 826.92 | 13.085 | 861.37 | 14.379 | 34.4548 | 1.29411 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 50 | 801.04 | 38.965 | 834.41 | 42.818 | 33.37647 | 3.853662 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 60 | 775.16 | 64.845 | 807.45 | 71.258 | 32.29814 | 6.413214 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 70 | 749.28 | 90.725 | 780.5 | 99.697 | 31.21981 | 8.972766 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 80 | 723.4 | 116.6 | 753.54 | 126.14 | 30.14148 | 11.53232 | 5% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 90 | 697.52 | 142.48 | 726.58 | 156.58 | 29.06315 | 14.09187 | 5% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 100 | 671.64 | 168.36 | 699.62 | 185.02 | 27.98482 | 16.65142 | 6% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 110 | 645.76 | 194.24 | 672.66 | 213.46 | 26.90649 | 19.21098 | 6% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 120 | 619.88 | 220.12 | 645.7 | 241.89 | 25.82816 | 21.77053 | 6% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 40 | 620.15 | 33.182 | 645.99 | 36.463 | 25.83966 | 3.281687 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 50 | 594.27 | 59.061 | 619.03 | 64.903 | 24.76133 | 5.84124 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 60 | 568.39 | 84.941 | 592.07 | 93.342 | 23.683 | 8.400792 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 70 | 542.51 | 110.82 | 565.12 | 121.78 | 22.60467 | 10.96034 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 80 | 516.63 | 136.7 | 538.16 | 150.22 | 21.52634 | 13.5199 | 6% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 90 | 490.75 | 162.58 | 511.2 | 178.66 | 20.44801 | 16.07945 | 6% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 100 | 464.87 | 188.46 | 484.24 | 207.1 | 19.36968 | 18.639 | 6% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 110 | 438.99 | 214.34 | 457.28 | 235.54 | 18.29135 | 21.19855 | 7% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 120 | 413.11 | 240.22 | 430.33 | 263.98 | 17.21302 | 23.75811 | 7% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 40 | 472.46 | 47.536 | 492.15 | 52.238 | 19.68599 | 4.701386 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 50 | 446.58 | 73.416 | 465.19 | 80.677 | 18.60766 | 7.260938 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 60 | 420.7 | 99.296 | 438.23 | 109.12 | 17.52933 | 9.82049 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 70 | 394.82 | 125.18 | 411.28 | 137.56 | 16.451 | 12.38004 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 80 | 368.94 | 151.06 | 384.32 | 166 | 15.37267 | 14.93959 | 7% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 90 | 343.06 | 176.94 | 357.36 | 194.43 | 14.29434 | 17.49915 | 7% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 100 | 317.18 | 202.82 | 330.4 | 222.87 | 13.21601 | 20.0587 | 7% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 110 | 291.3 | 228.7 | 303.44 | 251.31 | 12.13788 | 22.61825 | 8% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 120 | 265.42 | 254.58 | 276.48 | 279.75 | 11.05935 | 25.1778 | 8% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 40 | 361.7 | 58.302 | 376.77 | 64.068 | 15.07074 | 5.766159 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 50 | 335.82 | 84.182 | 349.81 | 92.508 | 13.99241 | 8.325712 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 60 | 309.94 | 110.06 | 322.85 | 120.95 | 12.91408 | 10.88526 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 70 | 284.06 | 135.94 | 295.89 | 149.39 | 11.83575 | 13.44482 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 80 | 258.18 | 161.82 | 268.94 | 177.83 | 10.75742 | 16.00437 | 10% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 90 | 232.3 | 187.7 | 241.98 | 206.27 | 9.679089 | 18.56392 | 12% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 100 | 206.42 | 213.58 | 215.02 | 234.71 | 8.600759 | 21.12347 | 14% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 110 | 180.54 | 239.46 | 188.06 | 263.14 | 7.522429 | 23.68303 | 17% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 120 | 154.66 | 265.34 | 161.1 | 291.58 | 6.444099 | 26.24258 | 20% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m³

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m³

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m³

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m³

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m³

S1, S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| tableau a9 | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|------------|-------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|-------------------------|
| Application: parking de remplissage | | | | | | | | | | | |
| Formulation pour le gres avec f1=4% et f2=19% | | | | | | | | | | | |
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1' | S2 | F1 | F2 | $[(F1+F2)/(S1+S2)]*100$ |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 30 | 1206.2 | -86.237 | 1256.5 | -94.766 | 50.26 | -8.53 | 3% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 50 | 1102.3 | 17.713 | 1148.2 | 19.465 | 45.93 | 1.752 | 3% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 60 | 1050.3 | 69.688 | 1094.1 | 76.58 | 43.76 | 6.892 | 3% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 70 | 998.34 | 121.66 | 1039.9 | 133.7 | 41.6 | 12.03 | 4% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 80 | 946.36 | 173.64 | 985.79 | 190.81 | 39.43 | 17.17 | 6% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 90 | 894.39 | 225.61 | 931.65 | 247.93 | 37.27 | 22.31 | 6% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 100 | 842.41 | 277.59 | 877.51 | 305.04 | 35.1 | 27.45 | 6% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 110 | 790.44 | 329.56 | 823.37 | 362.16 | 32.93 | 32.59 | 6% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 120 | 738.46 | 381.54 | 769.23 | 419.27 | 30.77 | 37.73 | 7% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 40 | 813.72 | 26.279 | 847.63 | 28.878 | 33.91 | 2.599 | 3% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 50 | 761.75 | 78.254 | 793.49 | 85.993 | 31.74 | 7.739 | 3% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 60 | 709.77 | 130.23 | 739.35 | 143.11 | 29.57 | 12.88 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 70 | 657.8 | 182.2 | 685.2 | 200.22 | 27.41 | 18.02 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 80 | 605.82 | 234.18 | 631.06 | 257.34 | 25.24 | 23.16 | 7% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 90 | 553.85 | 286.15 | 576.92 | 314.45 | 23.08 | 28.3 | 7% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 100 | 501.87 | 338.13 | 522.78 | 371.57 | 20.91 | 33.44 | 8% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 110 | 449.9 | 390.1 | 468.64 | 428.69 | 18.75 | 38.58 | 8% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 120 | 397.92 | 442.08 | 414.5 | 485.8 | 16.58 | 43.72 | 8% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 40 | 586.69 | 66.639 | 611.14 | 73.23 | 24.45 | 6.591 | 3% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 50 | 534.72 | 118.61 | 557 | 130.35 | 22.28 | 11.73 | 3% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 60 | 482.74 | 170.59 | 502.86 | 187.46 | 20.11 | 16.87 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 70 | 430.77 | 222.56 | 448.72 | 244.58 | 17.95 | 22.01 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 80 | 378.79 | 274.54 | 394.58 | 301.69 | 15.78 | 27.15 | 9% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 90 | 326.82 | 326.51 | 340.44 | 358.81 | 13.62 | 32.29 | 9% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 100 | 274.84 | 378.49 | 286.3 | 415.92 | 11.45 | 37.43 | 10% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 110 | 222.87 | 430.46 | 232.16 | 473.04 | 9.286 | 42.57 | 10% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 120 | 170.89 | 482.44 | 178.01 | 530.15 | 7.121 | 47.71 | 11% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 40 | 424.53 | 95.468 | 442.22 | 104.91 | 17.69 | 9.442 | 3% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 50 | 372.56 | 147.44 | 388.08 | 162.03 | 15.52 | 14.58 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 60 | 320.58 | 199.42 | 333.94 | 219.14 | 13.36 | 19.72 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 70 | 268.61 | 251.39 | 279.8 | 276.26 | 11.19 | 24.86 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 80 | 216.63 | 303.37 | 225.66 | 333.37 | 9.026 | 30 | 11% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 90 | 164.66 | 355.34 | 171.52 | 390.49 | 6.861 | 35.14 | 12% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 100 | 112.68 | 407.32 | 117.38 | 447.6 | 4.695 | 40.28 | 12% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 110 | 60.707 | 459.29 | 63.236 | 504.72 | 2.529 | 45.42 | 13% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 120 | 8.7318 | 511.27 | 9.0956 | 561.83 | 0.364 | 50.56 | 14% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 40 | 302.91 | 117.09 | 315.53 | 128.67 | 12.62 | 11.58 | 3% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 50 | 250.94 | 169.06 | 261.39 | 185.79 | 10.46 | 16.72 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 60 | 198.96 | 221.04 | 207.25 | 242.9 | 8.29 | 21.86 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 70 | 146.99 | 273.01 | 153.11 | 300.02 | 6.124 | 27 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 80 | 95.01 | 324.99 | 98.969 | 357.13 | 3.959 | 32.14 | 36% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 90 | 43.035 | 376.96 | 44.828 | 414.25 | 1.793 | 37.28 | 87% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 100 | -8.9397 | 428.94 | -9.3122 | 471.36 | -0.372 | 42.42 | -452% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 110 | -60.915 | 480.91 | -63.453 | 528.48 | -2.538 | 47.56 | -71% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 120 | -112.89 | 532.89 | -117.59 | 585.59 | -4.704 | 52.7 | -41% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m³

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m³

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m³

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m³

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m³

S1, S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

| Application: parping de remplissage Formulation pour le Silexe avec f1=4% et f2=18,5% | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|------------|-------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------------------------|
| a | C' | C | C'*(1-a)/a | F1+F2 | Sg1 | Sg2 | S1 | S2 | F1 | F2 | $[(F1+F2)*100/(S1+S2)]$ |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 30 | 1209.5 | -89.493 | 1259.9 | -98.344 | 50.4 | -8.85 | 3% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 50 | 1101.6 | 18.382 | 1147.5 | 20.2 | 45.9 | 1.82 | 3% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 60 | 1047.7 | 72.319 | 1091.3 | 79.472 | 43.85 | 7.15 | 3% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 70 | 993.74 | 126.26 | 1035.1 | 138.74 | 41.41 | 12.5 | 4% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 80 | 939.81 | 180.19 | 978.96 | 198.02 | 39.16 | 17.8 | 6% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 90 | 885.87 | 234.13 | 922.78 | 257.29 | 36.91 | 23.2 | 6% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 100 | 831.93 | 288.07 | 866.59 | 316.56 | 34.66 | 28.5 | 6% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 110 | 777.99 | 342.01 | 810.41 | 375.83 | 32.42 | 33.8 | 7% |
| 0.2 | 280 | 220 | 1120 | 120 | 724.06 | 395.94 | 754.23 | 435.1 | 30.17 | 39.2 | 7% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 40 | 812.73 | 27.271 | 846.59 | 29.968 | 33.86 | 2.7 | 3% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 50 | 758.79 | 81.208 | 790.41 | 89.24 | 31.62 | 8.03 | 3% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 60 | 704.85 | 135.15 | 734.22 | 148.51 | 29.37 | 13.4 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 70 | 650.92 | 189.08 | 678.04 | 207.78 | 27.12 | 18.7 | 4% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 80 | 596.98 | 243.02 | 621.85 | 267.06 | 24.87 | 24 | 7% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 90 | 543.04 | 296.96 | 565.67 | 326.33 | 22.05 | 29.4 | 7% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 100 | 489.1 | 350.9 | 509.48 | 385.6 | 20.38 | 34.7 | 8% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 110 | 435.17 | 404.83 | 453.3 | 444.87 | 18.13 | 40 | 8% |
| 0.25 | 280 | 220 | 840 | 120 | 381.23 | 458.77 | 397.11 | 504.14 | 15.88 | 45.4 | 9% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 40 | 584.18 | 69.155 | 608.52 | 75.994 | 24.34 | 6.84 | 3% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 50 | 530.24 | 123.09 | 552.33 | 135.27 | 22.09 | 12.2 | 3% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 60 | 476.3 | 177.03 | 496.15 | 194.54 | 19.85 | 17.5 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 70 | 422.37 | 230.97 | 439.96 | 253.81 | 17.6 | 22.8 | 4% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 80 | 368.43 | 284.9 | 363.78 | 313.08 | 15.35 | 28.2 | 9% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 90 | 314.49 | 338.84 | 327.59 | 372.35 | 13.1 | 33.5 | 9% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 100 | 260.55 | 392.78 | 271.41 | 431.63 | 10.86 | 38.8 | 10% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 110 | 206.62 | 446.72 | 215.23 | 490.9 | 8.609 | 44.2 | 11% |
| 0.3 | 280 | 220 | 653.3333 | 120 | 152.68 | 500.65 | 159.04 | 550.17 | 6.362 | 49.5 | 11% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 40 | 420.93 | 99.072 | 438.47 | 108.87 | 17.54 | 9.8 | 3% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 50 | 366.99 | 153.01 | 382.28 | 168.14 | 15.29 | 15.1 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 60 | 313.05 | 206.95 | 326.1 | 227.41 | 13.04 | 20.5 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 70 | 259.12 | 260.88 | 269.91 | 286.69 | 10.8 | 25.8 | 4% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 80 | 205.18 | 314.82 | 213.73 | 345.96 | 8.549 | 31.1 | 11% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 90 | 151.24 | 368.76 | 157.54 | 405.23 | 6.302 | 36.5 | 12% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 100 | 97.303 | 422.7 | 101.36 | 464.5 | 4.054 | 41.8 | 13% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 110 | 43.366 | 476.63 | 45.173 | 523.77 | 1.807 | 47.1 | 14% |
| 0.35 | 280 | 220 | 520 | 120 | -10.572 | 530.57 | -11.012 | 583.05 | -0.44 | 52.5 | 14% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 40 | 298.49 | 121.51 | 310.93 | 133.53 | 12.44 | 12 | 3% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 50 | 244.55 | 175.45 | 254.74 | 192.8 | 10.19 | 17.4 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 60 | 190.61 | 229.39 | 198.56 | 252.07 | 7.942 | 22.7 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 70 | 136.68 | 283.32 | 142.37 | 311.34 | 5.695 | 28 | 4% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 80 | 82.74 | 337.26 | 86.188 | 370.62 | 3.448 | 33.4 | 43% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 90 | 28.803 | 391.2 | 30.003 | 429.89 | 1.2 | 38.7 | 133% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 100 | -25.135 | 445.13 | -26.182 | 489.16 | -1.05 | 44 | -164% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 110 | -79.072 | 499.07 | -82.367 | 548.43 | -3.29 | 49.4 | -56% |
| 0.4 | 280 | 220 | 420 | 120 | -133.01 | 553.01 | -138.55 | 607.7 | -5.54 | 54.7 | -35% |

a = teneur en fines

C' = quantité de ciment pour béton ordinaire en kg/m3

F1 = masse de fines pour le sable de dune en kg/m3

F2 = masse de fines pour le filler en kg/m3

Sg1 = masse de la partie grossière du sable de dune en kg/m3

Sg2 = masse de la partie grossière du filler en kg/m3

S1, S2 = masses totales de fines de la partie grossière pour le sable de dune et le filler

* Les lignes ombrées sont celles qui ont été choisies pour les essais mécaniques

ANNEXE 3 :

**CALCUL DES CONTRAINTES ET DÉFORMATIONS
PAR LE LOGICIEL ALIZE 3**

Basalte (T2)

POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE

A SOUS UNE ROUE SIMPLE

B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE

C AU CENTRE DU JUMELAGE

A = 12.500 D = 37.500 Q = 6.620

NOMBRE DE COUCHES 3

| Z | | EPSILON T | SIGMA T | EPSILON Z | SIGMA Z |
|-------|------------------------------------|------------|-------------|-----------------|------------|
| .00 | E= 30000. NU= .35 H1= 3.00 | -431E-05C | -.746E+00C | .139E-03B | .662+01A |
| 3.00 | DECOLLE | -114E-03B | -.136E +01B | -.879E-04C | -.631E-01C |
| 3.00 | E= 20000. NU= .21 H2= 19.00 | .155E-03B | .555E + 01B | -.6169-05C | -.631E-01C |
| 28.00 | DECOLLE | -.156E-03C | -.296E+01B | -.195E-03B | -284E+01B |
| 28.00 | E= 15000. NU= .16 H3= INFINI | .905E-04C | .208E+01B | .149E-03B | -284E+01B |
| D | | 9.18mm/100 | | R*D | |
| R | | 367.42m | | 3371.94m*mm/100 | |

TABEAU 11 : MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

Silexite (T2)

POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE

A SOUS UNE ROUE SIMPLE

B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE

C AU CENTRE DU JUMELAGE

A = 12.500 D = 37.500 Q = 6.620

NOMBRE DE COUCHES 3

| Z | | EPSILON T | SIGMA T | EPSILON Z | SIGMA Z |
|-------|------------------------------------|--------------|-------------|-------------------|------------|
| .00 | E= 30000. NU= .35 H1= 3.00 | -224E-05C | -798E+00C | .135E-03B | .662+01A |
| 3.00 | DECOLLE | -118E-03B | -.153E +01B | -.899E-04C | -.460E-01C |
| 3.00 | E= 18000. NU= .21 H2= 21.00 | .168E-03B | .533E + 01B | -.495-05C | -.460E-01C |
| 24.00 | DECOLLE | -.150E-03C | -.253E+01B | -.192E-03B | -260E+01B |
| 24.00 | E= 15000. NU= .16 H3= INFINI | .845E-04C | .191E+01B | .137E-03B | -260E+01B |
| D | | 9.35mm / 100 | | R*D | |
| R | | 350.32m | | 3273.90m*mm / 100 | |

TABLEAU T2 : MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

Bandia (T2)

POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE

A SOUS UNE ROUE SIMPLE

B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE

C AU CENTRE DU JUMELAGE

A = 12.500 D = 37.500 Q = 6.620

NOMBRE DE COUCHES 3

| Z | | EPSILON T | SIGMA T | EPSILON Z | SIGMA Z |
|-------|------------------------------------|------------|-------------|----------------|------------|
| .00 | E= 30000. NU= .35 H1= 3.00 | -110E-05C | -.837E+00C | .132E-03B | .662+01A |
| 3.00 | DECOLLE | -120E-03B | -.164E +01B | -.878E-04C | -.345E-01C |
| 3.00 | E= 17000. NU= .18 H2= 23.00 | .182E-03B | .513E + 01B | -.414-05C | -.345E-01C |
| 26.00 | DECOLLE | -.140E-03C | -.223E+01B | -.178E-03B | -236E+01B |
| 26.00 | E= 15000. NU= .16 H3= INFINI | .783E-04C | .174E+01B | .124E-03B | -236E+01B |
| D | | 9.45mm/100 | | R*D | |
| R | | 341.63M | | 3228.06m*m/100 | |

TABEAU T3 :

MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

Bargny (T2)

POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE

A SOUS UNE ROUE SIMPLE

B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE

C AU CENTRE DU JUMELAGE

A = 12.500 D = 37.500 Q = 6.620

NOMBRE DE COUCHES 3

| Z | | EPSILON T | SIGMA T | EPSILON Z | SIGMA Z |
|-------|------------------------------------|------------|-------------|----------------|------------|
| .00 | E= 30000. NU= .35 H1= 3.00 | -978E-05A | -841E+00C | .128E-03B | .662+01A |
| 3.00 | DECOLLE | -124E-03B | -.182E +01B | -.888E-04C | -.216E-01C |
| 3.00 | E= 16000. NU= .17 H2= 23.00 | .194E-03B | .520E + 01B | -.256-05C | -.216E-01C |
| 26.00 | DECOLLE | -.145E-03B | -.215E+01B | -.188E-03B | -.240E+01B |
| 26.00 | E= 15000. NU= .15 H3= INFINI | .812E-04C | .175E+01B | .129E-03B | -.240E+01B |
| D | | 9.66mm/100 | | R*D | |
| R | | 323.28m | | 3228.06m*m/100 | |

TABLEAU T4 : MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

Grès (T2)

POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE

A SOUS UNE ROUE SIMPLE

B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE

C AU CENTRE DU JUMELAGE

A = 12.500 D = 37.500 Q = 6.620

NOMBRE DE COUCHES 3

| Z | | EPSILON T | SIGMA T | EPSILON Z | SIGMA Z |
|--------|------------------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|------------|
| .00 | E= 30000. NU= ,35 H1= 3.00 | .111E-04A | -.871E+00C | .126E-03B | .662+01A |
| 3.00 | DECOLLE | -126E-03B | -.188E +01B | -.997E-04C | -.143E-01C |
| 3.00 | E= 15500. NU= .16 H2= 25.00 | .203E-03B | .493E + 01B | -.229-05C | -.143E-01C |
| 28.00 | DECOLLE | -.137E-03C | -.193E+01B | -.173E+01B | -.218E+01B |
| 28.00 | E= 15000. NU= .15 H3= INFINI | .749E-04C | .159E+01B | .117E-03B | .218E+01B |
| D R | | 9.72mm / 100 320.13m | | R*D 3112.373m*mm/100 | |

TABLEAU 15 : MODULES ET CONTRAINTES EN BARS