

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Civil
Laboratoire de Construction et d'Environnement

Projet de Fin d'Etude
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

THEME

ETUDE ET FORMULATION D'UN BETON DE
SABLE DE DUNE

Proposé et dirigé par :

Mme KETTAB

Chargée de cours à l'ENP

Réalisé par :

GUENOUN Rachid

Promotion : 2003

ملخص: ان الهدف من هذه الدراسة التجريبية هو الوصول الى تركيبة لخرسانة رمل الكثبان مع اضافات وهذا لتحسين خصائصه الميكانيكية بغية استعماله في عناصر المنشآت. من أجل هذا قمنا بسلسلة تجارب مع اضافة مادتين بنسب مختلفة وهما: الرمل (0.3) و الحصى (0.8). النتائج الايجابية المتحصل عليها أثبتت نجاعة بعض التركيبات من ناحية المقاومة و الليونة الا أن ثابت المرونة يبقى ذو قيمة منخفضة.
كلمات مفتاحية: رمال الكثبان, الخرسانة الرملية, الحبيبات المألنة, عناصر المنشآت, المرونة, المقاومة النوعية, ثابت المرونة.

Objet: Etude et formulation d'un béton de sable de dune.

Résumé: l'objectif de cette étude expérimentale est d'aboutir à une formulation du béton de sable de dune avec ajouts afin d'améliorer ses performances mécaniques et l'utiliser en éléments de structure. Pour cet effet, on a effectué deux séries d'essais avec ajout de deux matériaux à des pourcentages différents à savoir le sable concassé (0/3) et le gravillon (3/8). Les résultats fiables obtenus lors de cette étude ont montré la validité de certaines compositions du point de vu résistance et maniabilité alors que leur module d'élasticité reste insuffisant.

Mots clés: béton de sable, sable de dunes, fillers, éléments de structure, maniabilité, résistance caractéristique, module de d'élasticité.

Subject: study and formulation of a sand of dunes concrete.

Abstract: The objective of this experimental study is to find a formulation of sand concrete with adding in order to improve its mechanical performances and to use it in structural elements. For this reasons, we had done two experimentals with two adding witch are sand (0/3) and stone (3/8).

The obtined results have shown the validity of some formulations concerned resistance and workability. However, the elastic modulus stay small.

Key words: sand concrete, sand of dunes, fillers, structural elements, workability, caracteristical resistance, elastic modulus.

Dédicace



Je dédie ce modeste travail

A la plus adorable maman de toutes les mamans, à ma très chère mère.

A mon très cher père

A mon frère Mourad

A tous mes frères

A mes grands parents

A toute ma famille

A mes amis et collègues...

Rachid. GUENOUN

Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à ma promotrice madame R. KETTAB pour son suivi, ses conseils et orientations qui m'ont été d'une grande utilité tout au long de ce travail.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont également à tous les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

J'exprime également mes reconnaissances à l'équipe du laboratoire central des travaux publics LCTP, en particulier Mr Kamel AIT CHAALLAL.

Mes reconnaissances s'adressent aussi à BOUAISSA et ABDALLAH EL HADJ pour leur aide précieuse.

En fin, que toute personne qui a contribué de près ou de loin à la mise au point de ce travail trouve ici ma profonde gratitude.

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 3 |
| Historique : | 3 |
| I. LES SABLES : | 5 |
| I.1. Introduction : | 5 |
| I.2. Définition : | 5 |
| I.3. Différents types de sable : | 5 |
| I.3.1. Les sables issus d'une chaîne d'élaboration: | 5 |
| I.3.2. Les sables naturels : | 5 |
| I.3.2.a. Les sables marins : | 6 |
| I.3.2.b. Les sables marins littorales : | 6 |
| I.3.2.c. Les sables fluviatiles : | 6 |
| I.3.2.d. Les sables éoliens : | 6 |
| I.4. Classification des sables : | 6 |
| I.4.1. Classification selon la granulométrie : | 6 |
| I.4.2. Classification selon la propreté: | 8 |
| I.5. Propriétés mécaniques des sables : | 8 |
| I.6. Foisonnement des sables : | 9 |
| I.7. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction : | 10 |
| I.7.1. La granulation : | 10 |
| I.7.2. Le module de finesse: | 11 |
| I.7.3. La propreté : | 11 |
| I.7.4. La dureté : | 11 |
| I.7.5. L'angularité : | 11 |
| I.7.6. La forme : | 11 |
| I.7.7. L'aspect de surface : | 12 |
| I.7.8. Analyse chimique : | 12 |
| I.8. Propriétés de sable de dune : | 12 |
| I.8.1. Composition granulométrique : | 12 |
| I.8.2. Composition minéralogique : | 13 |
| I.8.3. caractéristiques physiques : | 13 |
| I.8.4. composition chimique : | 13 |
| I.8.5. Conclusion : | 14 |
| I.9. Approvisionnement et stockage du sable : | 14 |
| I.10. Traitement des sables aux liants hydrauliques: | 15 |
| II. LE BETON DE SABLE | 16 |
| II.1. Introduction | 16 |
| II.2. Définition | 16 |
| II.3. Composition d'un béton de sable | 18 |
| II.3.1. Les sables | 18 |
| II.3.2. Les ciments | 18 |
| II.3.3. L'eau de gâchage | 19 |

| | |
|---|----|
| ii.3.4. Les fines d'ajout (d'addition)..... | 19 |
| ii.3.5. Les adjuvantes :..... | 21 |
| II.3.6. Autres ajouts..... | 21 |
| II.4. Propriétés des bétons de sable..... | 22 |
| II.4.1. Granulométrie et maniabilité :..... | 22 |
| II.4.2. Granulométrie et résistance..... | 23 |
| II.4.3. Adhérence aux armatures..... | 24 |
| II.4.4. Durabilité des bétons de sable..... | 26 |
| II.4.5. Résistance au gel et au dégel..... | 26 |
| II.4.6. Phénomène de ségrégation des constituant :..... | 27 |
| II.5. Le retrait :..... | 27 |
| II.6. le fluage :..... | 28 |
| II.6.1. Description d'une loi de fluage :..... | 29 |
| II.7. Désignation des béton de sable :..... | 30 |
| II.8. Avantage et limites des bétons de sable :..... | 30 |
| II.9. Principaux essais sur béton de sable :..... | 31 |
| II.9.1. Dispositions communes :..... | 31 |
| II.9.1.a. Le malaxage :..... | 31 |
| II.9.1.b. Serrage de béton de sable :..... | 31 |
| II.9.1.c. Précaution contre la dessiccation :..... | 31 |
| II.9.2. Essais sur béton de sable frais :..... | 32 |
| II.9.2.a. Essais de la maniabilité :..... | 32 |
| II.9.2.a.1. Le maniabilimètre LCPC :..... | 32 |
| II.9.2.b. Essai de prise :..... | 33 |
| II.9.2.c. Essai sur la masse volumique :..... | 33 |
| II.9.3. Essai sur béton de sable durci :..... | 34 |
| II.9.3.a. Essai de résistance a la compression :..... | 34 |
| II.9.3.b. Essai de résistance a la traction :..... | 34 |
| II.9.3.c. Essai d'extensomètre :..... | 35 |
| II.9.3.d. Essai de retrait :..... | 37 |
| II.9.3.e. Essai de fluage :..... | 37 |
| II.9.3.f. Essai de fatigue :..... | 37 |
| II.10. Domaine d'application des bétons de sable :..... | 38 |
| II.10.1. Préfabrication d'éléments destinés a rester apparents :..... | 38 |
| II.10.2. La projection :..... | 38 |
| III. CORRECTION GRANULOMETRIQUE DES BETONS DE SABLE :..... | 39 |
| III.1. Introduction :..... | 39 |
| III.2. Correction granulométrique par l'apport d'un sable concassé :..... | 39 |
| III.2.1. Correction des sables pauvre en fines :..... | 39 |
| III.2.2. Correction du sable mal gradué :..... | 39 |
| III.3. Correction par l'ajout de gravillon :..... | 39 |

| | |
|---|----|
| III.3.1. Spécifications sur gravillon pour béton hydraulique : | 40 |
| III.3.1.a. La forme de gravillon : | 40 |
| III.3.1.b. La propreté des gravillons : | 40 |
| III.3.1.c. Adhérence et cohésion des gravillons. | 40 |
| III.3.1.d. La dureté des gravillons : | 41 |
| III.3.2. Principaux essais sur gravillons : | 41 |
| III.3.2.a. Essai MicroDeval: | 41 |
| III.3.2.b. L'Essai Los Angeles : | 41 |
| III.4. Dosage en gravillon : | 41 |
| III.5. L'influence de l'ajout du gravillon | 42 |
| IV. Les méthodes de formulations | 45 |
| IV.1. Définition | 45 |
| IV.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable : | 45 |
| IV.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable : | 45 |
| IV.2.2. Dosage en eau d'un béton de sable. | 47 |
| IV.2.3. Dosage en sable : | 48 |
| IV.2.4. Estimation de la résistance en compression. | 48 |
| IV.3. Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable : | 52 |
| IV.3.1. Etape de la formulation : | 52 |
| IV.3.1.a. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition : | 52 |
| 1. Le dosage en ciment : | 52 |
| 2. Dosage en eau : | 52 |
| IV.3.1.b. Dosage en sable : | 52 |
| IV.3.2. Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule : | 53 |
| IV.3.3. Détermination du dosage en fines d' adition : | 53 |
| IV.4. Evaluation de la résistance : | 54 |
| V. LA PARTIE EXPERIMENTALE | 55 |
| V.1. Introduction | 55 |
| V.2. Identification des matériaux utilisés | 56 |
| Module de finesse | 56 |
| V.3. Sable de dune | 57 |
| V.3.1. Analyse granulométrique | 57 |
| V.3.2. Caractéristiques physiques | 57 |
| V.3.3. Analyse chimique | 58 |
| V.4. Sable de concassage | 60 |
| V.4.1. Analyse granulométrique | 60 |
| V.4.2. Caractéristiques physiques | 61 |
| V.4.3. Analyse chimique | 61 |
| V.5. Gravillon | 63 |
| V.5.1. Analyse granulométrique | 63 |
| V.5.2. Caractéristiques physiques | 64 |

| | |
|--|----|
| V.5.3. Analyse chimique | 64 |
| V.6. Le ciment | 66 |
| V.7. Eau de gâchage | 66 |
| V.8. L'adjuvant | 66 |
| V.9. Conclusion sur les matériaux utilisés | 66 |
| V.10. FORMULATION DES BETONS DE SABLE | 67 |
| V.10.1. Confectionnement du béton | 67 |
| V.11. Formulation de base (100% sable de dune) : | 68 |
| V.11.1. Dosage en ciment : | 68 |
| V.11.2. Dosage en adjuvant : | 68 |
| V.11.3. Dosage en eau : | 68 |
| V.11.4. Dosage en sable | 69 |
| V.12. Première série d'essais : | 71 |
| V.12.1. Interprétation des résultats : | 72 |
| V.13. Deuxième série d'essais : | 73 |
| V.13.1. Interprétation des résultats : | 75 |
| V.13.2. Choix de la composition optimale : | 75 |
| V.13.3. Description de la composition optimale : | 76 |
| V.13.4. Description de la formule BS50 | 76 |
| V.14. La troisième série d'essais | 77 |
| V.14.1. Composition BS 32.4 FP 3/8 : | 78 |
| V.14.1.a. Analyse contrainte déformation : | 78 |
| V.14.1.b. Analyse de déformation : | 79 |
| V.14.1.c. Module d'élasticité : | 79 |
| V.14.1.d. Module de Poisson : | 81 |
| V.14.2. Composition (BS 24.5 FP) | 82 |
| V.14.2.a. Analyse des déformations | 82 |
| V.14.2.b. Analyse des déformations | 83 |
| V.14.2.c. Module d'élasticité | 83 |
| V.14.2.d. Le module de Poisson | 84 |
| Conclusion Générale | 86 |

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Exemple de quelques courbes granulométriques[8]..... | 7 |
| Figure I-2: Branche de courbe intrinsèque d'un sable sec et d'un sable humide..... | 7 |
| Figure I-3 Réduction du volume réel d'un sable par suite du foisonnement..... | 10 |
| Figure II.1Relation entre dosage en ciment et résistance caractéristique pour divers diamètres de granulats | 17 |
| Figure II.2 Relation entre diamètre et résistance pour divers dosages en cime | 17 |
| Figure II.3 Effet de la finesse d'un filler sur la résistance mécanique | 20 |
| Figure II-4 influence de la nature des fines sur la maniabilité..... | 20 |
| Figure II-5 :Fines sphérique: leur usage conduit à une réduction d'eau..... | 21 |
| Figure II-6 Fines anguleuses : leur usage conduit à un dosage supérieur en eau..... | 21 |
| Figure II-7 Maniabilité en fonction du module de finesse du sable..... | 22 |
| Figure II-8 Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire)23 | 23 |
| Figure II-9 Effet de la granularité sur la résistance. | 24 |
| Figure II-10 Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation | 25 |
| Figure II-11 :influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures..... | 25 |
| Figure II-12 Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores..... | 26 |
| Figure II.13 :épreuves non vibrées non piquées..... | 27 |
| Figure II-14 : Effet de la granulométrie sur le retrait | 28 |
| Figure II-15 Courbe idéale de fluage..... | 29 |
| Figure II-16 l'effet de la résistance sur le fluage..... | 29 |
| Figure II.17 Le maibilimètre LCPC..... | 33 |
| Figure II-18 : Disposition de l'éprouvette de traction | 35 |
| Figure II-19 : Exemple d'éprouvette soumise à la compression uniaxiale | 36 |
| Figure II-20 : Allure générale de la courbe contrainte-déformation | 36 |
| Figure II-21:Essai de fluage..... | 37 |
| Figure II-22 : Courbe de la fatigue [1]..... | 38 |
| Figure III-1 : Influence du dosage en gravillon sur la résistance au choc | 41 |
| Figure III-2 :Influence de G/S sur la résistance à l'attrition | 43 |
| Figure III-3 : Influence de G/S sur la résistance à la compression..... | 43 |
| Figure III-4 : Influence de G/S sur le module d'élasticité | 44 |
| Figure IV-1 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. | 44 |
| Figure IV-2: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable..... | 47 |
| Figure IV-3: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée. | 48 |
| Figure IV-4: Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)..... | 49 |
| Figure IV.5 :organigramme de la méthode théorique..... | 51 |
| figure V.I Analyse granulométrique de Ouargla..... | 59 |
| figure V.2 Analyse granulométrique (carrière JOBERT)..... | 62 |
| figure V.3 Analyse granulométrique (carrière JOBERT)..... | 65 |
| Figure V.4 Evolution de la compacité en fonction du dosage du sable concassé..... | 72 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure V.5 Evolution de la résistance en fonction du dosage du sable concassé..... | 72 |
| Figure V.6 relation compacité dosage en gravillon..... | 74 |
| Figure V.7 relation résistance dosage en gravillon | 74 |
| FigureV.8 Eprouvette équipée de jauges placée entre les plateaux de la presse..... | 77 |
| FigureV.9 Courbe contrainte-déformation (BS 32.4 FP 3/8)..... | 78 |
| Figure V.10 Courbe contrainte-déformation transversale (BS 32.4 FP 3/8) | 78 |
| FigureV.11 Courbe contrainte-déformation longitudinale tronquée (BS 32.4 FP 3/8)..... | 80 |
| FigureV.12 Courbe déformation transversale en fonction de déformation longitudinale (BS 32.4 FP 3/8)..... | 81 |
| FigureV.13 Courbe tronquée déformation transversale/Déformation longitudinale (BS 32.4 FP 3/8)..... | 81 |
| Figure V.14 relation contrainte déformation longitudinale (BS 24.5 FP)..... | 82 |
| Figure V.15 Contrainte déformation transversale(BS 24.5 FP)..... | 82 |
| Figure V.16 relation contrainte déformation longitudinale (BS 24.5 FP | 83 |
| Figure V.17 relation déformation transversale en fonction du déformation longitudinale (BS 24.5 FP)..... | 84 |
| Figure V.18 courbe déformation transversale en fonction du déformation longitudinale..... | 84 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau (I.1) classification des sables selon la granulométrie..... | 7 |
| Tableau (I.2) : Compositions granulométriques des sables de dune..... | 13 |
| Tableau (I.3) : propriétés physiques des sables du sud (6)..... | 13 |
| Tableau (I.4) : compositions chimiques des sables du sud..... | 14 |
| Tableau V.1 Analyse granulométrique du sable de dune..... | 57 |
| Tableau V.2 : Analyse chimique sommaire du sable de dune..... | 58 |
| Tableau V.3 Analyse granulométrique du sable concassé..... | 60 |
| Tableau V.4 : Analyse chimique sommaire du sable concassé..... | 61 |
| Tableau V.5 Analyse granulométrique du gravillon..... | 63 |
| Tableau V.6 : Analyse chimique sommaire du gravillon..... | 64 |
| Tableau V.7 Comparaison entre les caractéristiques du sable de dune et celle du sable de carrière..... | 66 |
| Tableau V.8 Dosage du sable..... | 69 |
| Tableau V.9 composition et caractéristique de la formulation de base..... | 70 |
| Tableau V.10 compositions du béton de sable avec ajout de sable concassé..... | 71 |
| Tableau V.11 caractéristiques des différentes compositions avec ajout du sable concassé..... | 71 |
| Tableau V.12 : les compositions avec ajout du gravillon..... | 73 |
| Tableau V.13 caractéristiques des différentes compositions avec ajout du gravillon..... | 73 |
| Tableau V.14 caractéristiques de la composition (BS 32.45 FP 3/8)..... | 76 |
| Tableau V.15 caractéristique de la composition (BS24.5 Fp)..... | 76 |

Introduction générale

Construire avec des matériaux très peu coûteux et disponibles en grande quantité est le but recherché par de nombreux pays en voie de développement, cependant certaines régions de ces pays présentent un grand déficit, en matériaux nobles de construction tels que les gravillons. Ce déficit implique des surcoûts de la construction et une dégradation des réseaux routiers causés par le transport, en revanche ces régions présentent des réserves très importantes en matériaux sableux complètement surabondants et dont la technique d'exploitation et de mise en œuvre sont maîtrisables facilement.

Dans ce contexte de raréfaction des ressources en gros granulats, il était alors aisé d'entrevoir dès l'origine l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter la valorisation des sables naturels, ou d'autres matériaux peu ou pas exploités.

Cet intérêt a conduit les ingénieurs et les spécialistes du domaine à rechercher une solution judicieuse permettant l'utilisation rationnelle des matériaux locaux pour la réalisation de nouveaux bétons dont ils seraient les constituants principaux.

Dans cette perspective le béton de terre stabilisé (BTS) ; constitué essentiellement de tuf et environ 10% de ciment a été étudié, expérimenté et plusieurs documents techniques sont mis à la portée de la main d'œuvre courante expliquant la technologie de fabrication des blocs en (BTS), ainsi leur mise en œuvre. Malgré l'économie de ce matériau et sa disponibilité, il n'a pas eu le succès et l'engouement attendus.

Dans la même gamme un autre matériau, plus intéressant a refait surface et commence à retenir l'attention ; c'est le béton de sable : Constitué essentiellement de sable formant son squelette solide et un dosage en ciment similaire à celui des bétons classiques traditionnels. Ce matériau pourrait, sous réserve d'en étudier les possibilités, remplacer le béton traditionnel de structure dans certains cas.

En plus de la valorisation des matériaux locaux l'idée de base du béton de sable est née du fait que de nombreuses parties dans la construction et surtout en bâtiment sont peu sollicitées, et peuvent être réalisées par un matériau moins performant que le béton classique.

L'expérience du béton de sable à travers le monde est considérable vu les articles publiés un peu partout (Sénégal, Congo, Afrique du nord, le golfe d'Arabie, Allemagne...etc.) et fait même l'objet d'une norme AFNOR. Il semble que ce matériau ait fait l'objet d'investigations plus poussées en ex-union soviétique, pays pauvre en gros granulats et roches massives et ses ressources sont mal réparties sur son vaste territoire; des pistes d'aérodromes militaires, bâtiment, tunnels et autres réalisations ont pu voir le jour prouvant la crédibilité du matériau.

En Algérie la promotion d'un matériau tel que le béton de sable rentre dans le développement de la construction dans le cadre de valorisation des sables de dune étalés sur les 2/3 de la superficie du territoire national.

Le centre national d'études et de recherche intégrée du bâtiment (CNERIB) en collaboration avec le centre d'études techniques de l'équipement du sud ouest (CETE) et le laboratoire régional de Bordeaux (France), ont effectué des travaux tout à fait intéressants, ces travaux pourraient être la base pour de futures investigations en Algérie pour peu que les résultats trouvés soient confirmés et complétés par d'autres.

Le problème, qui se pose dans le cas de ce béton est la grande porosité des sables et pour résoudre ce problème on doit soit :

- Comblent cette porosité par l'adjonction d'un filler dont la granulométrie se situe dans l'intervalle (0 – 80 μ m).

- Créer une granulométrie aussi étalée par l'apport d'autres matériaux en faible dosage tel que les sables de concassage et les gravillons; dans ce cas le béton de sable est appelé « Béton de sable chargé ».

La plus part des études effectuées précédemment en Algérie cherchent à remplir les vides inter-granulaires des sables par l'adjonction de fillers. Plusieurs fillers, tels que les fillers calcaire, fillers de laitier, ont été employés donnant des résultats plus ou moins acceptables.

Dans ce travail nous vous proposons la deuxième solution, c'est à dire l'apport d'autres matériaux en essayant de rester le plus économique possible.

Nous sommes conscients que ce travail ne peut donner qu'une petite idée de ce type de béton, vue les connaissances insuffisantes sur son utilisation pour éléments de structure, mais il peut constituer une première étape pour les études à venir.

Historique

Le béton de sable est un matériau ancien, utilisé bien antérieurement au béton traditionnel d'aujourd'hui. Il trouve ses origines au milieu du 19^{ème} siècle c'est à dire au début du développement du ciment armé.

En 1853 l'ingénieur François COIGNET a conçu ce qu'il appelait le béton aggloméré.

Il s'agissait, en effet d'un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité [1]

Il construit pour sa famille une vaste maison à saint Denis (Nord de Paris France) entièrement édifié en béton aggloméré.

En 1869, le phare de Port-Saïd en Égypte de 52 mètres de hauteur fut construit en béton de sable de plage avoisinante et chaux importée de France.

Vers les années 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut construit en béton aggloméré et sert à relier Fontainebleu à Orléans. Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleu et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui correspond à un dosage en liant de 400 kg / m³, très proche du dosage du béton de sable que celui des mortiers.

François COIGNET exporta sa technique jusqu'au USA et c'est à New York que son entreprise (New York and long Island Coignet stone compagny) construit vers les années 1871 et 1872 le pont de Brooklyn en blocs du béton aggloméré .

En 1918 on note l'expérience très originale qui fut faite par Nicolas DE ROCHEFORT à Saint -Peters Bourg (Russie) cette expérience consistait à broyer ensemble une part de sable avec une autre part égale en ciment. Ce produit de broyage était en suite mélangé avec trois (3) parts de sable. Les résistances obtenues par le mélange furent les mêmes que celles d'un mélange composé d'une part de ciment et 2 parts de sable.

A partir de l'année 1910, avec le développement du béton à gros granulats et le remplacement de la chaux par le ciment, le béton aggloméré, ancêtre du béton de sable tombait en désuétude, sauf l'union soviétique qui ne cessa de réaliser des diverses constructions avec des bétons composés essentiellement de sable et d'un ou deux liants.

Dans les années soixante dix, notamment en France on constatait que les sables provenant de concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles. Dans ce contexte s'ouvre la réflexion sur la formulation des nouveaux bétons de sable qui utiliseraient les ressources peu exploitées, ou complètement abandonnées et présenteraient des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels.

A partir des années quatre- vingt, après le succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, et qui ont trouvé un écho auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a enregistré un projet national appelé SABLOCRET [1], pour la promotion et le développement de ce matériau.

Mais promouvoir le développement de l'usage courant des béton de sable nécessite de regrouper les initiatives et l'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en œuvre.

En Algérie malgré l'intérêt qui pourrait apporter ce matériau au pays aucun programme n'a été mis en place, à l'exception d'une initiative du CNERIB en 1988 malheureusement abandonnée.

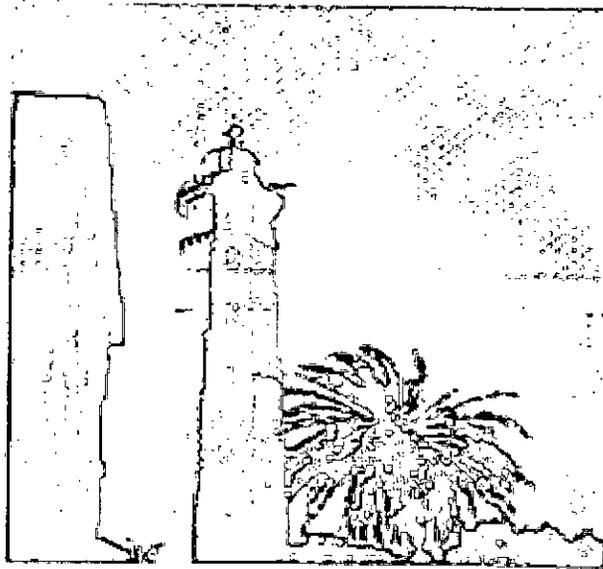
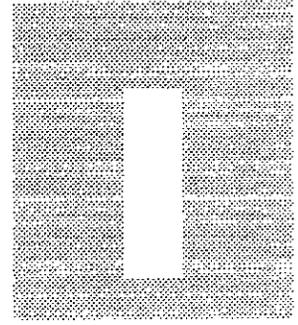


Photo1 Phare de Port-Saïd (Egypte) [1]



Photo 2 Le pont de Brooklyn en blocs du béton aggloméré



Les sables

I. LES SABLES

I.1. Introduction

Les propriétés d'un béton dépendent des caractéristiques des éléments qui le constituent ; elles dépendent non seulement du liant choisi, du dosage en liant et des conditions de préparation, mais aussi dans une mesure essentielle du choix des agrégats et notamment le sable.

Le béton de sable comme sa dénomination indique est un béton hydraulique dont la quantité de sable est très importante, ce qui revient à dire que l'influence du sable sur le comportement de ce béton est dominante, donc il est tout à fait intéressant de connaître les sables et leurs propriétés afin de bien les utiliser tout en profitant de leurs avantages et en corrigeant leurs défauts, afin d'obtenir un béton de sables de bonne qualité.

I.2. Définition

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 μ m et 05 mm.

Dans le sens le plus courant, on entend pas "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les fillers. En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination.

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique et d'une désintégration mécanique des roches [10], les deux phénomènes sont suivis par un processus de transport qui est à l'origine de ses caractéristiques physico-chimiques.

I.3. Différents types de sable

Les sables se différencient par un grand nombre de paramètres, tels que la granulométrie, la composition chimique, minéralogique et pétrologique, la forme des grains, les caractéristiques de fines... etc.

- Dans un premier temps, il est très important de distinguer deux (02) types de sables : les sables issus d'une chaîne d'élaboration et les sables naturels.

I.3.1. Les sables issus d'une chaîne d'élaboration (appelés aussi sables artificiels)

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée (gravier ou gravillon) , ils peuvent être soit :

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant.
- Des sables de concassage, qui sont très souvent l'excédent de la production d'une carrière ou d'une ballastière.

Notons ici que d'autres produits industriels qui ne répondent pas exactement à ces définitions ont des caractéristiques permettant de les assimiler à des sables de ce type, le cas des cendres volantes silico-alumineuses, pour ces derniers les méthodologies d'étude et d'utilisation sont comparables.

I.3.2. Les sables naturels

Ce sont des matériaux qui existent en abondance dans la nature dans certaines régions, ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation

s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivies d'un transport qui les amène à un dépôt, où ils demeurent sous différentes formes.

- il existe plusieurs sables naturels, les plus rencontrés et les plus connus sont :

1.3.2.a. Les sables marins

On trouve ce type de sable au fond des mers, ils n'ont pas été trop influencés par l'action fluviatile, mais ces sables sont mélangés avec d'autres éléments qui proviennent de l'action d'arrachement de la mer aux côtes et finissent par se déposer après avoir subis beaucoup de frottements. Ils se caractérisent par leurs petites tailles de forme anguleuse.

1.3.2.b. Les sables marins littoraux

On trouve ces sables dans les régions littorales et peu proches de la mer. Ils se caractérisent par une granulométrie uniforme, des grains fins qui peuvent contenir de grandes quantités de minéraux rares, comme ils peuvent aussi avoir de fortes teneurs en calcaire ou complètement privés de cette matière.

1.3.2.c. Les sables fluviatiles

On trouve ce genre de sable dans les fleuves et les rivières et éventuellement dans leurs cotés, ce sont des restes d'altération transportés par ces fleuves et rivières et déposés avant d'atteindre la mer.

En raison de la courte distance du transport, les grains de ces sables sont plus grossiers, mal concassés et présentent une forme anguleuse et un aspect très rugueux.

1.3.2.d. Les sables éoliens

Ces sables se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes, qui occupent des vastes surfaces (exemples de sud algérien), leur origine est très différente, ils sont pris et déposés par le vent. Ils se caractérisent par une granulométrie uniforme, des grains arrondis et dépolis, à cause de nombreux chocs entre eux. La vitesse du vent ainsi que sa capacité de porter sont les seuls facteurs qui déterminent la taille des grains.

1.4. Classification des sables

Il est très utile de classer les sables, afin de pouvoir préciser à priori et pour un sable donné, les divers procédés de traitement qui conviennent mieux à son utilisation dans un domaine et selon ses spécifications.

Les sables peuvent être classés à partir de plusieurs paramètres, mais les classifications simplifiées qui se basent sur les critères de granulométrie et la propreté sont les plus retenues.

1.4.1. Classification selon la granulométrie

on distingue trois (03) catégories de sable :

- **sable grossier**: plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont naturellement des propriétés qui se rapprochent des graves.

- **sable moyen** : moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,2 et 2mm.

- **sable fin**: plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μ m, sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.

EXEMPLES DE COURBES GRANULOMETRIQUES DE DIFFERENTS SABLES

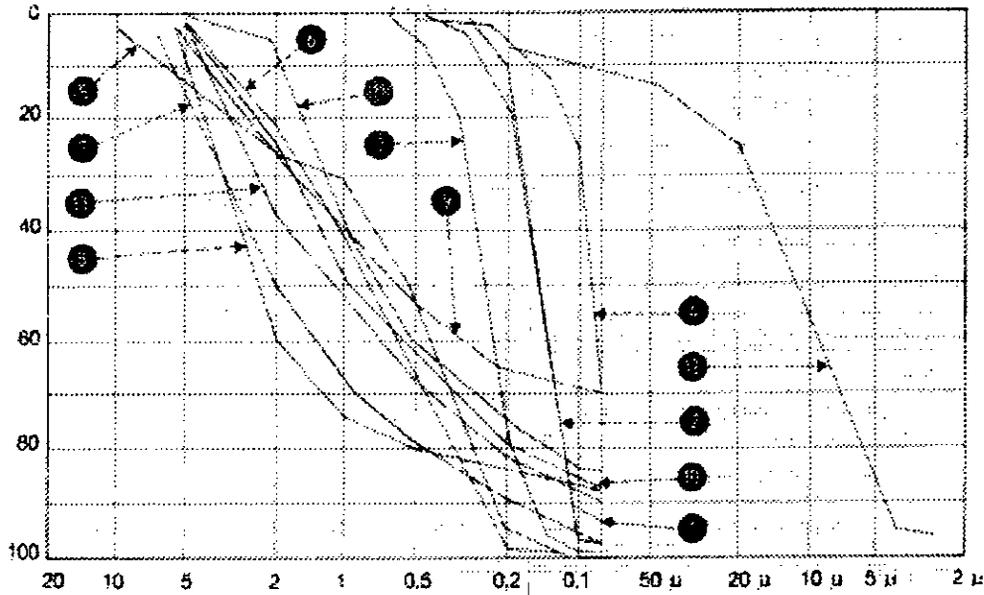


Figure I.1 : Exemple de quelques courbes granulométriques[8]

Tableau (I.1) classification des sables selon la granulométrie[8]

| | Nature et dimensions en mm | | | % fines |
|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------|---------|
| | | | | |
| Matériaux de base | 1 | sable fin | 0/0,3 | 6 |
| | 2 | sable fin | 0/0,2 | 2 |
| | 3 | sable moyen | 0/0,4 | 1 |
| | 4 | sable fin | 0/0,2 | 30 |
| | 5 | sable de dessablage (grossier) | 0/6 | 1 |
| | 6 | sable de dessablage (moyen) | 0/4 | 1 |
| | 7 | sable de carrière (grossier) | 0/5 | 4 |
| Matériaux d'apport (correcteurs) | 8 | sable riche en fines de carrière | 0/5 | 15 |
| | 9 | sable riche en fines de carrière | 0/5 | 30 |
| | 10 | sable riche en fines de carrière | 0/4 | 15 |
| | 11 | sable riche en fines alluvionnaires | 0/2 | 15 |
| | 12 | fines | 0/0,3 | 90 |
| | 13 | sable riches en fines | 0/4 | 12 |

I.4.2. Classification selon la propreté

La propreté d'un sable est une caractéristique déterminante, elle est appréciée soit par l'essai d'équivalent de sable, soit l'essai au bleu de méthylène. Afin de donner des limites pour chaque type de sable, le deuxième essai est plus précis, car il est réalisé sur la totalité du sable en écrétant toutefois le matériau à 6,3mm [8]. Le résultat obtenu doit être exprimé en gramme de bleu.

Pour 100gramme de sable, la valeur de bleu de méthylène est notée VBS.

Dans cette classification on distingue quatre (04) catégories définies comme suit :

- 1) $VBS \leq 0,2$: sable propre
- 2) $0,2 \leq VBS \leq 0,4$: sable légèrement pollué.
- 3) $0,4 \leq VBS \leq 1$: sable pollué.
- 4) $VBS > 1$: sable très pollué.

On peut également classer les sables selon d'autres critères qui font intervenir des paramètres ayant prouvé leur influence sur le comportement des mélanges à base de sable notamment les bétons de sable, on site alors :

- La teneur en fines.
- La nature minéralogique (sable calcaire, siliceux, ...).
- La teneur en matière organique et sa nature.

I.5. Propriétés mécaniques des sables [7]

Les sables constituent un matériau pulvérulent, c'est-à-dire sans cohésion propre du moins à l'état sec.

Si le sable est humidifié, il y apparaît trois phases : sable, air et eau. Les forces capillaires par mouillage des éléments solides au contact de l'élément liquide, et formation de ménisques à l'intérieur des capillaires, donnent un système cohérent, capable de supporter les efforts de cisaillement et de traction.

Si le sable est gorgé d'eau, il n'y a plus que deux phases : sable et eau. On retrouve les propriétés des systèmes pulvérulents, à la différence près, résultant de la viscosité de l'eau qui d'ailleurs est relativement faible.

Le sable acquiert de la pseudo-thixotropie: rigide au repos, déformable sous les efforts appliqués très progressivement en raison de la flexibilité des bulles d'air, et raide sous les chocs ou les mises en charges brutales. Mais il ne s'agit que d'une cohésion capillaire, d'autant plus forte, d'ailleurs pour une même granulométrie du sable, et pour un même volume d'air occlus, que le diamètre des bulles d'air est plus petit car le rayon de courbure des ménisques est plus faible et la cohésion capillaire est inversement proportionnelle à ce rayon. En fait, il ne s'agit pas d'une véritable thixotropie. La thixotropie vraie est due à la réversibilité de la structure rigide des gels, qui se détruit sous l'agitation et les contraintes et se reforme sous le repos, après "un temps de raffermissement" qui peut être très bref.

- Les sables résistent mal aux efforts de traction et de compression, la seule caractéristique étudiée durant longtemps a été la résistance au cisaillement T pour des charges normales N .

COULOMB a énoncé la loi suivante :

$$T = N \times \operatorname{tg} \varphi$$

Cette droite représente la courbe intrinsèque du sable sec, alors que si le sable est humide, la droite de COULOMB sera exprimé comme suit :

$$T = N \times \operatorname{tg} \varphi + c$$

Où T : Résistance au cisaillement.

N : Effort normal appliqué.

φ : Angle de frottement interne du sable.

C : constante appelée cohésion.

La valeur $N = -C \cot g\varphi$ qui correspond à une valeur de T nulle, serait donc la résistance du sable à la traction simple.

L'angle de frottement interne d'un sable est lié, toutes choses égales par ailleurs, à la compacité que l'on donne à ce sable. Pour un sable naturel si les grains sont ronds et gros, sa compacité minimale est de l'ordre de 0.56, et par suite à une correction granulométrique jusqu'à l'obtention d'une compacité de 0.63, on constate une augmentation de l'angle de frottement du sable (φ) visiblement. Il croit également quand les grains sont anguleux. Un sable artificiel rebroyé a un angle de frottement interne plus élevé qu'un sable naturel de même nature et de même composition granulométrique, il faut toutefois que la forme des grains de sable artificiel soit bonne et permette d'obtenir une compacité du même ordre que celle obtenue avec du sable naturel.

Pour les sables totalement gorgés d'eau, on a à peu près le même comportement au point de vue du sens de la variation de l'angle de frottement, qu'avec le sable sec, mais les valeurs de φ ne sont pas exactement les mêmes. Le sable est lubrifié par l'eau, mais par contre cette eau est cent fois plus visqueuse que l'air d'un sable sec.

Il en va tout autrement, si le volume d'eau inclus inférieur au volume des vides du sable, les grains sont liés par des films d'eau adhérant à leurs parois et formant des ménisques à la limite de la phase air, ce qui donne à la masse une cohésion qui n'existe pas avec les sables secs ou totalement imbibés. Le sable fin est alors plus cohérent que le gros sable, car le rayon de ménisque diminue comme le rayon des grains.

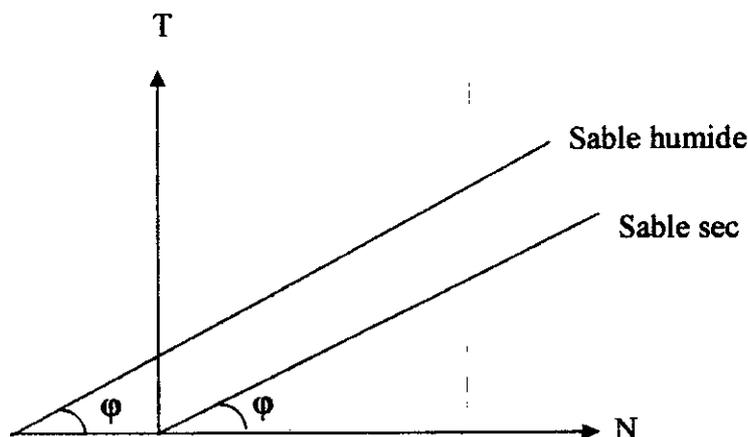


Figure I-2: Branche de courbe intrinsèque d'un sable sec et d'un sable humide [7]

I.6. Foisonnement des sables

Dans le cas des mélanges nécessitant l'eau pour le malaxage ou l'hydratation, on doit tenir compte de la présence d'humidité dans les granulats, pour une correction des proportions dans la composition finale, on doit soustraire de la masse d'eau ajoutée au mélange la masse d'eau libre contenue dans les granulats, alors que la masse des granulats humides doit être

augmentée de cette même quantité. Dans le cas des sables on assiste à un second effet de présence d'humidité : le foisonnement ; il s'agit de l'augmentation de volume d'une masse donnée de sable due à des films d'eau repoussant les particules des sables les unes des autres. Alors que le foisonnement en soi n'affecte pas les proportions massiques des matériaux dans le cas où ces proportions sont déterminées en volume, le foisonnement a pour effet qu'une plus petite masse de sable occupe le volume prévu. (Figure I.2)

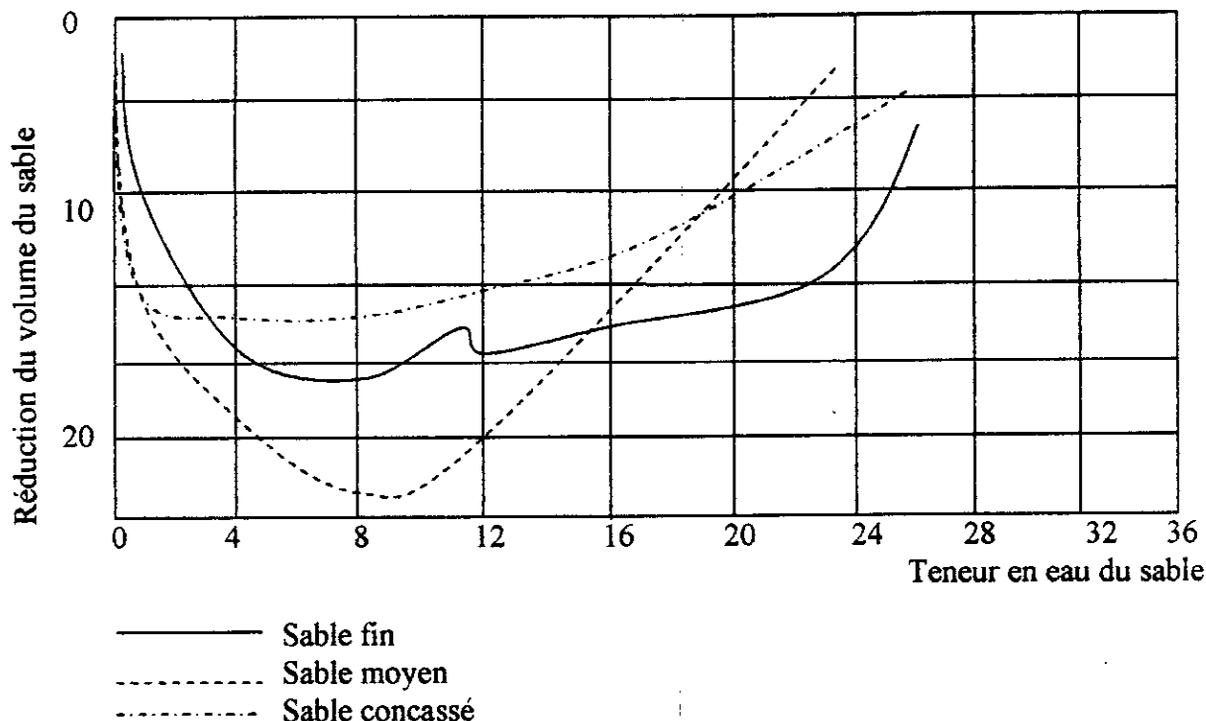


Figure I-3 Réduction du volume réel d'un sable par suite du foisonnement [9]

I.7. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction

Le choix des matériaux de construction de base, tels que les sables qui rentrent dans le confectionnement des mélanges composés, doit être dicté par un certain nombre de considérations afin d'atteindre les objectifs recherchés (résistance, durabilité,...). Selon le rôle du sable, ces considérations sont plus au moins sévères.

I.7.1. La granulométrie

Son importance est primordiale dans toute étude quelque soit le domaine de la construction, c'est la caractéristique physique essentielle, puisque la notion de sable est basée sur le critère de taille des éléments, elle est effectuée par tamisage au moyen de tamis à mailles carrées.

L'analyse granulométrique nous permet de déterminer la répartition des grains de ce sable suivant sa grosseur. Cette répartition est traduite par des courbes appelées courbe granulométriques (voir annexe 1).

1.7.2. Le module de finesse

Le module de finesse est déduit de l'étude granulométrique du sable; il représente le centième de la somme des refus sur les différents tamis de la série exprimé en pourcentage pondéral. C'est donc tout simplement un nombre, sensiblement égale à l'aire de la courbe de granulométrie en coordonnées semi-logarithmiques. En effet, les dimensions des tamis sont en progression géométrique. En prenant un axe des dimensions de tamis à échelle logarithmique, les écarts sont constants; les ordonnées mesurées à échelle arithmétique représentent les refus successifs en poids sur les divers tamis.

1.7.3. La propreté

La propreté est définie comme étant l'absence d'éléments fins, c'est-à-dire qui ont un diamètre inférieur à 80 μ m (limon et argile), ces éléments se trouvent dans les sables naturels, soit de la présence originelle des matériaux argileux, soit suite à une contamination par les matériaux organiques d'origine végétale ou biologique.

Dans le cas d'un sable artificiel, les fines sont le résultat du concassage, le mode de concassage détermine le pourcentage de ces fines, alors que la nature des roches constitutives détermine leur caractère plus ou moins nocif. Cependant, la présence des éléments fins peut jouer un rôle positif car ces derniers remplissent les vides entre les granulats et augmentent de ce fait la compacité et par conséquent conduisent à un meilleur comportement du matériau ; leur excès provoque une réduction de la perméabilité et une augmentation de la capillarité, c'est pourquoi les sables pollués présentent une sensibilité à l'eau, une difficulté de mise en place, une stabilité médiocre et une résistance mécanique faible.

Afin de donner une indication sur la présence des fines et leur pourcentage on se réfère à l'essai normalisé équivalent de sable (voir annexe1).

1.7.4. La dureté

La résistance des matériaux de construction aux différents efforts destructifs est directement liée à la dureté.

La dureté du matériau lui procure une bonne résistance à la fragmentation, à l'attrition, à l'usure et au polissage sous des efforts statiques ou dynamiques.

Il est constaté que cette dureté est liée à la nature minéralogique du matériau ; un sable d'origine calcaire est plus friable par rapport à un sable siliceux.

Notons aussi que les sables durs sont peu sensibles à l'eau, moins sensibles au gel ce qui est favorable à la résistance et à la durabilité du matériau. Dans le but d'apprécier cette dureté, on utilise l'essai de friabilité des sables dont ces détails sont exposés en annexe1.

1.7.5. L'angularité

Caractéristique importante pour la stabilité du matériau, elle confère au sable un angle de frottement interne plus élevé, capable de résister aux différents déplacements. Les sables artificiels de concassage présentent des formes plus anguleuses, et par suite leur stabilité est améliorée, mais leur inconvénient majeur c'est que leur compactage est difficile, la raison pour laquelle ces sables présentent des densités nettement plus faibles que celles des sables roulés d'une même granulométrie.

1.7.6. La forme

La forme des grains de sable est essentielle pour des propriétés telles que la compacité du mélange, l'angle de frottement interne, la maniabilité des mortiers, la résistance au broyage, à l'attrition ou à la fragmentation par écrasement. Cette forme bien que moins visible à l'œil nu, a autant d'importance pour les sables quand il s'agit de béton soit hydraulique, soit

hydrocarboné ; ce sont les grains de sable naturel ayant subi une attrition leur donnant une forme arrondie, qui présentent la meilleure forme au point de vue de la régularité du volume occupé par un poids donné, de résistance à la fragmentation, de la meilleure maniabilité dans les mortiers de ciment et la moindre tendance de ces derniers à la fissuration.

A noter aussi que la nature de la roche d'origine influe beaucoup sur la forme des grains pour un mode de concassage donné dans le cas des sables artificiels.

I.7.7. L'aspect de surface

Les grains à surface plus émoussée avec des arêtes vives sont plus favorables pour la stabilité du matériau, leur angle de frottement interne est élevé et l'adhésion du liant à de telles surfaces est meilleure. Le mode de transport et la nature minéralogique des sables ont une influence sur l'aspect de surface des grains.

I.7.8. Analyse chimique

Ces analyses concernent la détermination des proportions de matières organiques : sulfates, sulfures, chlorures et d'autres éléments chimiques contenus dans les sables étudiés. Ces éléments qui présentent au-delà d'un certain seuil un caractère nuisible pour les propriétés des bétons ainsi réalisés.

En plus de ces études effectuées sur les sables, d'autres paramètres physiques ne manquent pas d'importance doivent être définis, car ils vont servir comme données de base à la formulation, en particulier la masse volumique et le poids spécifique.

I.8. Propriétés de sable de dune

Le sable dunaire est en abondance dans près de 60% de la superficie du territoire algérien, soit une surface estimée à 1,075.886 m². L'épaisseur moyenne de la couche sableuse est de 6m. Cette énorme quantité a amené les ingénieurs à s'interroger sur les propriétés physico-chimiques de ses sables afin de les valoriser et de les utiliser dans le domaine de la construction. Pour cet effet, des études de composition granulométrique, minéralogique, chimiques et d'autres sur différents gisements ont été effectuées par certains organismes tel que l'Unité de Recherche et d'Etude Géologique (U.R.E.G. Boumerdés) [6], dont les résultats ont permis de tirer les constatations suivantes :

I.8.1. Composition granulométrique

Les gisements sont constitués par la formation de sable éolien sous forme de dunes, de couleur variable, finement grenu. Tous ces sables ont une granulométrie fine, avec quelques nuances non significatives (les plus gros grains n'atteignent pas 1mm de taille).

Les compositions granulométriques représentées par le pourcentage des tamis sur chaque tamis d'une série de tamis normalisés sont reportées au tableau I.2:

Tableau (L2) : Compositions granulométriques des sables de dune

| | 5,0 | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 | 0,125 | 0,08 |
|--------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| EL GOLEA | 100 | 100 | 100 | 99,76 | 27,13 | 18,27 | 9,57 | 1,46 |
| EL OUED | 100 | 100 | 100 | 99,46 | 91,42 | 65,59 | 9,12 | 0,65 |
| BISKRA | 100 | 100 | 100 | 99,37 | 83,84 | - | 6,89 | 1,58 |
| HASSI BAHBAH | 100 | 99,98 | 99,91 | 99,30 | 92,71 | 68,67 | 4,34 | 0,57 |
| AIN SAFRA | 100 | 99,99 | 99,97 | 99,95 | 95,86 | 54,23 | 2,72 | 0,01 |

1.8.2. Composition minéralogique

Les tests effectués sur la composition minéralogique des sables provenant des différentes régions ont permis de constater les trois (03) points suivants :

- Dans tous les cas le quartz forme plus de 85% du sable, les grains sont généralement arrondis et parfois anguleux.

- La calcite se manifeste par des grains de couleurs différentes variant autour de 5% et en aucun cas ne dépassent les 10%.

- Le gypse se trouve sous forme de grains fins, de couleur blanchâtre avec des pourcentages ne dépassant pas les 2-3%.

- On peut également trouver dans certains gisements le feldspath, son pourcentage ne dépasse pas les 4%.

1.8.3. Caractéristiques physiques

On peut regrouper les propriétés moyennes des différents sables étudiés sous forme de tableau

Tableau (L3) : Propriétés physiques des sables du sud (6)

| Région | Humidité naturelle en % | Masse volumique apparente (kg/m ³) | Masse volumique absolue (kg/m ³) |
|--------------|-------------------------|--|--|
| EL GOLEA | 0,34 | 1590 | 2500 |
| EL OUED | 2,60 | 1420 | - |
| BISKRA | 1,40 | 1510 | - |
| HASSI BAHBAH | 2,62 | 1550 | - |
| AIN SAFRA | 0,50 | 1485 | 2660 |

1.8.4. Composition chimique

Les sables de dune sont caractérisés par une teneur relativement importante de silice (SiO₂), on trouve également d'autres matières diverses à des teneurs plus ou moins significatives.

Les résultats des analyses chimiques donnés par l'unité citée précédemment sont regroupés dans le tableau I.4 :

Tableau (I.4) : Compositions chimiques des sables du sud

| Région | EL GOLEA | EL OUED | BISKRA | HASSI BAHBAH | AIN SAFRA |
|--------------------------------|----------|---------|--------|--------------|-----------|
| SiO ₂ | 94,88 | 86,85 | 67,90 | 94,50 | 96,86 |
| Al ₂ O ₃ | 1,28 | 1,15 | 0,65 | 1,67 | 0,89 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,54 | 0,40 | 0,50 | 0,25 | 0,39 |
| CaO | 0,97 | 5,81 | 15,88 | 1,43 | 0,66 |
| MgO | 0,63 | 0,30 | 0,60 | 0,10 | 0,09 |
| SO ₃ | 0,52 | 0,24 | 0,79 | 0,65 | 0,29 |
| K ₂ O | 0,25 | 0,37 | 0,16 | 0,22 | 0,32 |
| Na ₂ O | 0,14 | 0,08 | 0,09 | 0,23 | 0,02 |
| TiO ₂ | 0,12 | - | - | - | 0,08 |
| MnO | 0,04 | - | - | - | 0,05 |
| Cl | 0,04 | 0,004 | - | - | - |
| P-F | 1,00 | 4,60 | 13,33 | 1,43 | - |

I.8.5. Conclusion

L'étude des caractéristiques des sables de dune qui existent dans le sud Algérien a montré que ces sables possèdent, presque en totalité, les mêmes caractéristiques, sauf ceux de la région de BISKRA, ce qui permet la possibilité de généraliser cette étude à d'autres régions. Ils présentent des caractéristiques chimiques et physiques très favorables à l'utilisation en construction, telles que leur propreté (l'absence quasi-totale des éléments argileux), et leur composition chimique siliceuse (présentant les meilleurs performances mécaniques). Cependant ils présentent un inconvénient majeur qui est le pourcentage de vides élevé engendrant une faible compacité du béton, et réduisant de ce fait les résistances.

I.9. Approvisionnement et stockage du sable

Les risques de ségrégation sont beaucoup plus limités pour les sables que pour les graves. En revanche, le problème de la teneur en eau est souvent important ; lorsque le sable est extrait dans l'eau, il nécessite un essorage avant emploi, il est donc indispensable de réaliser un drainage particulièrement efficace de l'aire de stockage ; ce drainage est tout aussi important pour les matériaux d'apport riches en fines qui peuvent présenter des écarts importants de teneur en eau.

Une protection efficace des stocks de ces matériaux contre les intempéries est souvent utile (bâchage ou voile d'émulsion) pour éviter les départs sous l'effet du vent ainsi que l'apport d'eau.

- Les sables naturels sont souvent hétérogènes. Une étude préalable ou reconnaissance géologique et géotechnique devra être faite pour définir les risques d'hétérogénéité ; cette étude sera entreprise avant le démarrage de l'exploitation du gisement et avant l'étude de formulation en laboratoire. Elle permettra d'envisager selon les cas les différentes méthodes pour obtenir un matériau régulier ou des formulations différentes selon les qualités.

Des techniques de pré homogénéisation pourront être définies: stockage préalable stratifié, gerbage, passage du sable sur saute-relle vibrante... des recompositions en centrale entre sables des différentes qualités seront éventuellement envisagées si une séparation nette entre les différentes qualités de sables est possible à l'extraction. Il est aussi important, par ailleurs, de vérifier l'absence de matières organiques qui sont souvent présentes en surface ainsi que la valeur de l'acidité naturelle.

-les sables de carrières ou ballastières sont stockés d'une manière permettant leur protection contre l'humidité et la ségrégation exactement comme pour les graves.

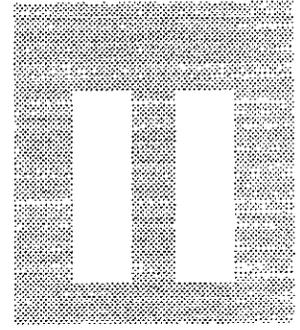
I.10. Traitement des sables aux liants hydrauliques

On appelle sable traité aux liants hydrauliques, le mélange d'un sable, le cas échéant d'un correcteur granulométrique, d'un liant hydraulique et d'eau dans des proportions définies [6]. L'objectif de cette opération est de conférer aux sables des caractéristiques mécaniques satisfaisantes, afin de les utiliser dans certains domaines de la construction, notamment le renforcement vu l'aspect économique que présentaient ces sables.

Ce mélange est élaboré suivant les critères arrêtés dans les normes appropriées. Il est étudié pour pouvoir être fabriqué et mis en œuvre aisément et pour avoir à moyen et long termes des caractéristiques mécaniques fixes.

On ne peut pas, à priori, définir des spécifications fixées, mais à posteriori on peut définir les conditions et les limites d'utilisation de chaque sable, car la stabilité du mélange sable-liant dépend en grande partie du sable.

Le traitement des sables est fonction de plusieurs facteurs telles que la sévérité des conditions de service et la fonction de l'élément traité : pour un climat chaud, il faut s'opposer au départ brutal de l'eau, alors que pour un élément de fondation, on est très sévère sur la perméabilité et la résistance.



Le béton de sable

II. LE BETON DE SABLE

II.1. Introduction

Le béton de sable est un matériau de construction connu bien avant le béton traditionnel d'aujourd'hui comme certains ouvrages témoignent, mais il a été complètement abandonné après la découverte du béton à gros granulats qui donne des performances meilleures. Cependant la raréfaction des gros granulats et leur coût élevé dans certaines régions suite à leur transport causent des surcoûts considérables à la construction d'une part, ainsi que la dégradation du réseau routier d'autre part. En revanche, ces régions en Algérie disposent d'un important gisement du sable sous forme de dunes et des ergs : Un matériau complètement abandonné et insuffisamment utilisé et dont les technologies d'exploitation et de mise en œuvre sont maîtrisables rapidement. Dans ces conditions et dans un but de valorisation des matériaux locaux, pourquoi ne pas remplacer la totalité des granulats par du sable local ? Le béton de sable, qui présente une solution judicieuse, retrouve son intérêt à grande échelle.

II.2. Définition

Le béton en sable est un mélange de liant hydraulique (généralement ciment), eau et essentiellement d'un ou plusieurs sables (environ 70%) qui constituent son squelette solide. Du point de vue constituants, le béton de sable est semblable au mortier, alors que son dosage en ciment est semblable au béton classique (compris entre 250 kg/m³ et 400 kg/m³) ; en plus le matériau béton de sable sera appelé à remplacer le béton de structure et non pas le mortier destiné aux enduits superficiels.

Les bétons destinés aux éléments structuraux (poteaux, poutres...etc.) doivent avoir une résistance caractéristique suffisante. Cette dernière est étroitement liée à la compacité du mélange. Les différentes lois de répartition granulaire montrent que pour garder la compacité maximale d'un mélange granulaire en faisant diminuer la valeur du diamètre du plus gros granulat, il faut augmenter la teneur en fines et alors augmenter le dosage en ciment

J.BARRON, et R.LESAGE proposent la formule suivante[5] :

$$C = \frac{730 \pm 50}{\sqrt[3]{D}}$$

C : dosage minimale en ciment (kg/m³)

D : diamètre de plus gros granulats (mm)

Alors que la norme française NFP18305 raffine encore plus cette formule et donne [6]

$$C = \frac{250 \pm 10 f_{ck}}{\sqrt[3]{D}}$$

C : dosage en ciment (kg/m³)

f_{ck} : résistance caractéristique (MPa)

D : diamètre du plus gros granulat (mm)

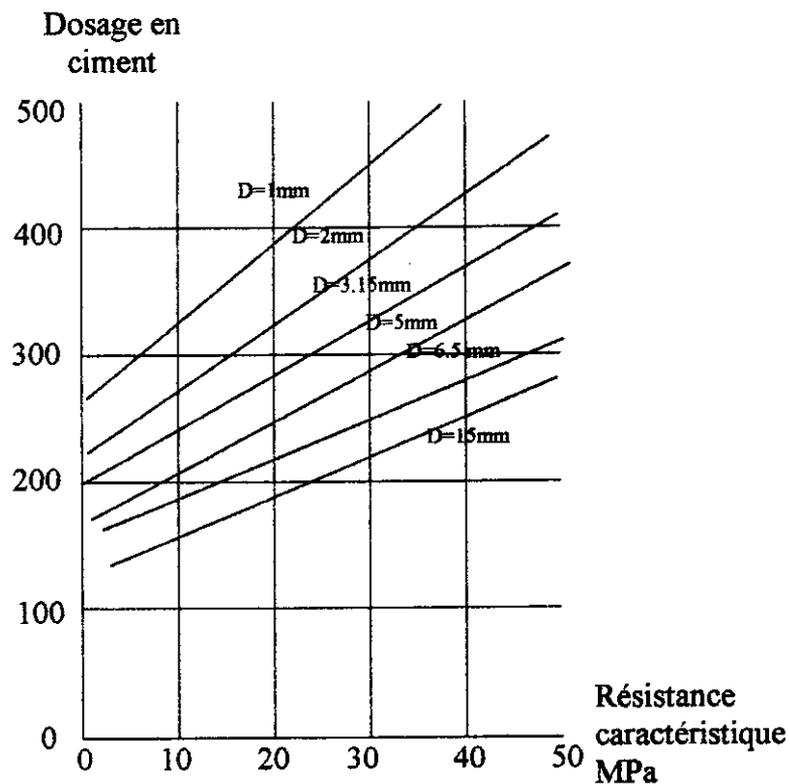


Figure II.1 Relation entre dosage en ciment et résistance caractéristique pour divers diamètres de granulats[7]

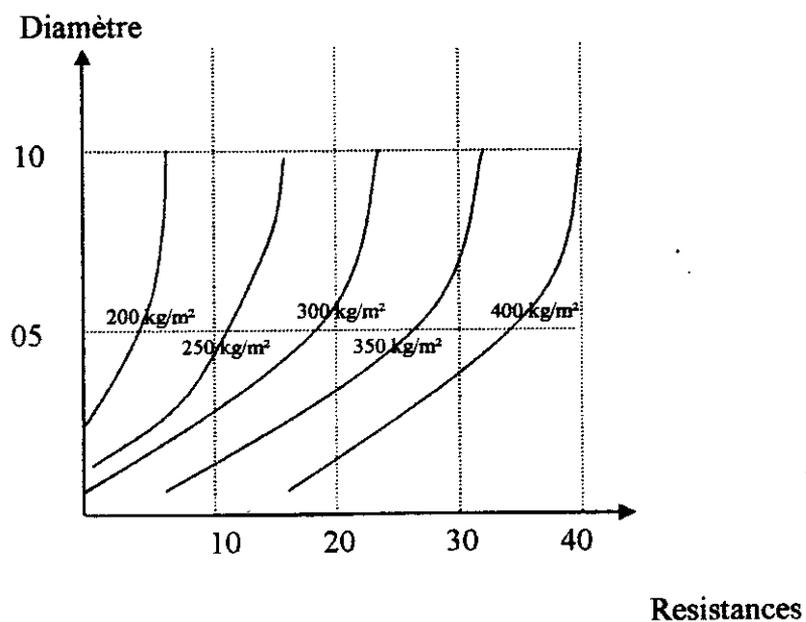


Figure II.2 Relation entre diamètre et résistance pour divers dosages en ciment[7]

Dans la gamme des sables ($D_{\max} \leq 5\text{mm}$), le dosage en ciment se situe entre 450 kg/m^3 et 700 kg/m^3 ; ce sont les mortiers. Ce fort dosage en ciment provoque deux inconvénients majeurs :

- 1) Le coût de revient élevé du béton et par conséquent le matériau ne présente aucun avantage économique.
- 2) L'importance des phénomènes de retrait et de fissuration qui résultent de l'hydratation des grains anhydres du ciment et leur transformation en cristaux, ceci exclut l'utilisation du matériau à l'usage prévu .

Afin d'éviter ces défauts, le béton de sable relève d'une autre approche, cette approche consiste à diviser les fines du mélange en deux types: les fines nécessaires pour l'obtention d'une résistance suffisante et qui sont les ciments et les fines d'ajout servant à combler les vides et permettant l'obtention d'une bonne compacité.

En faisant jouer sur ces paramètres ; le béton ainsi formulé présente une importance économique primordiale, et assure des résistances acceptables. Il constitue un matériau de construction de base qui peut remplacer le béton traditionnel dans plusieurs cas et par conséquent permet de débloquent la situation de la construction dans certaines régions du monde en particulier le Sud algérien.

II.3. Composition d'un béton de sable

Un béton de sable composé obligatoirement d'un mélange de base sable, ciment et eau, au quel d'autres ajouts spécifiques complémentaires peuvent être employés pour répondre aux besoins de certains usages.

II.3.1. Les sables

Aucun critère granulaire n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable, on peut utiliser aussi bien un sable fin même homométrique (type sable de dune), qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou de type (O/D) de concassage [1]. L'étendu des sables utilisés a été élargi afin de mieux préciser les différentes influences de leurs caractéristiques. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté ; même si des études ont été faites sur les sables pollués, aucune application n'a été réalisée avec ces sables. Par ailleurs les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau de gâchage, ce qui entraîne une chute de la résistance. Mais il est plus prudent à ce stade de se limiter à l'utilisation des sables propres tels qu'ils sont employés pour les bétons classiques.

II.3.2. Les ciments

Le ciment d'une façon générale peut être défini comme étant un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettant de lier, en un ensemble compact, des fragments de matériaux. Dans le bâtiment et le génie civil on parle de ciment d'origine calcaire [9] . Les ciments utilisés dans la fabrication du béton ont la propriété de faire prise et de durcir sous l'eau en raison de leur réaction chimique avec celle-ci. Ils sont d'ailleurs appelés ciments hydrauliques.

Le choix du ciment se fait essentiellement selon sa classe de résistance, mais il se peut que d'autres critères spécifiques affectent ce choix tel que les caractéristiques d'hydratation du ciment, l'agressivité du milieu, la composition du béton , ainsi que sa destination. Dans le concept de béton de sable, et pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique des fines d'addition, il est souvent préconisé d'utiliser un ciment artificiel au clinker pur type CPA.

Dans le cas particulier d'un ciment composé type CPJ aux fillers calcaires en proportion de 15%. Cette partition revient à inclure dans les fillers d'addition les 15% de fillers calcaires provenant du ciment composé, et à considérer un ciment CPA équivalent réduit à 85% du ciment composé et ayant une classe vraie équivalente majorée d'environ 18% par rapport à la classe vraie du ciment composé CPJ.

II.3.3. L'eau de gâchage

L'eau sert à l'hydratation du liant, le mouillage du granulat, permet le malaxage du béton et par conséquent facilite sa mise en œuvre ; pour assurer ces rôles cette eau doit être conforme aux prescriptions des normes en qualité et en quantité.

De point de vue qualitatif : l'eau doit aussi être exempte que possible d'impuretés telles que les argiles ou les matières humiques en suspension, elle ne doit être ni acide ni souillée de déchets industriels solubles [11], alors que de point de vue quantitatif : elle doit être en rapport convenable avec le ciment comprise entre certaines valeurs assez étroites conduisant à une résistance et une maniabilité acceptables.

En béton de sable, les autres quantités d'eaux apportées par les différents constituants surtout les sables, ne sont pas négligeables et leur somme avec l'eau de gâchage constitue l'eau efficace du béton.

II.3.4. Les fines d'ajout (d'addition)

La compacité est l'une des qualités essentielles d'un béton. Elle se définit comme le rapport du volume solide sur le volume total et correspond au complément à l'unité de la porosité. Dans le cas d'un béton traditionnel l'optimisation de cette compacité se fait de telle sorte que les macro-vides créés par les plus gros éléments soient remplis par le sable et les vides de sable par le ciment, dans ce cas la quantité nécessaire du ciment pour l'obtention d'une bonne compacité coïncide avec celle qu'il faut pour assurer la résistance. Ceci se traduit par les formules connues :

$$C = \frac{550}{\sqrt[3]{D}} \quad \text{ou} \quad C = \frac{700}{\sqrt[3]{D}} \quad (\text{selon l'usage du béton})$$

où C : dosage du ciment

D : diamètre de plus gros granulat

Dans le béton de sable, avec l'absence des gros granulats, le dosage habituel en ciment nécessaire à la rigidité ne suffit pas pour l'optimisation de la compacité, d'où la nécessité des autres fines que les ciments et qui sont les fines d'ajout ou d'addition.

Les fines d'ajout, appelées aussi fillers, sont des poudres minérales dont la taille maximale de leur diamètre ne dépasse pas 80 μm , elles sont mélangées avec le sable pour combler une partie de ses vides inter-granulaire et améliorent de ce fait la compacité. La nature de ces fines, telle que leur finesse et leur affinité avec le ciment, affectent les performances apportées au béton. C'est pourquoi, actuellement, les nouvelles normes introduisent la notion de liant équivalent $(C + KA)$ et les règles précédentes en $\sqrt[3]{D}$ peuvent encore s'appliquer avec

C : le dosage en ciment

K : coefficient de prise en compte lié à la nature de l'addition

A : dosage en fine d'addition

On peut ainsi parler non plus de E/C, mais du rapport $E/(C+KA)$

Pour les mêmes dosages en ciment, il est constaté que la résistance à la compression du béton est plus importante avec les fillers les plus fins (Figure II.3)

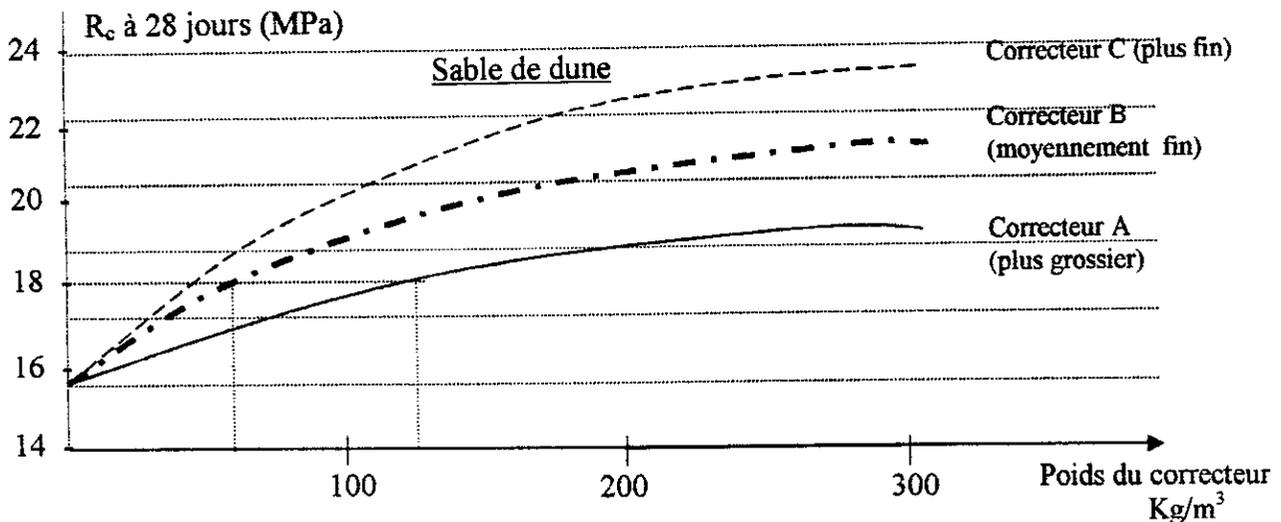


Figure II.3 Effet de la finesse d'un filler sur la résistance mécanique[9]

En pratique il est aussi constaté que la facilité de mise en œuvre du béton s'améliore avec l'augmentation du rapport eau/ciment, alors que pour un rapport eau/ciment fixe, cette facilité dépend de la nature et le dosage en fines d'addition.

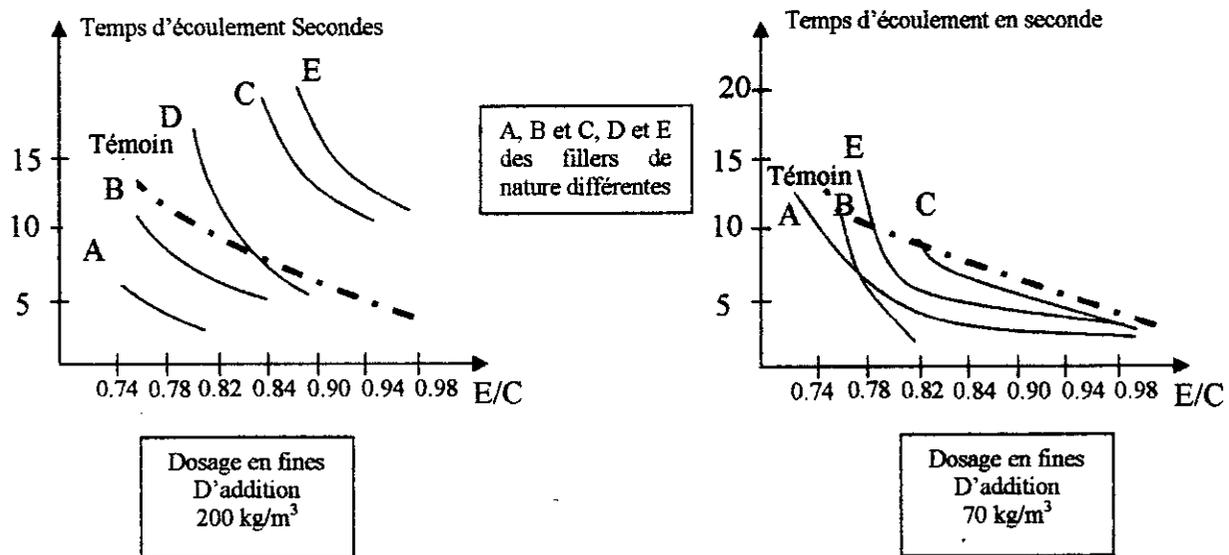


Figure II-4 Influence de la nature des fines sur la maniabilité[1]

Il existe deux types de fines d'ajout : les fines actives qui apportent un complément d'hydraulicité au mélange et qui sont, en général, laitier moulu, cendres volantes, pouzzolanes broyées ...etc., et les fines inertes qui n'apportent pas ce complément et qui sont les fines calcaires, ou ceux qui proviennent du broyage de roches massives.

Le dosage élevé de ces fines (qui peut atteindre les $220 kg/m^3$), influe graduellement sur les caractéristiques du béton et tient d'avantage à la morphologie de ces fines, ainsi que leur finesse (les fines de forme sphériques seront réductrices d'eau par contre, des fines anguleuses nécessiteront davantage d'eau d'où une chute de résistance)

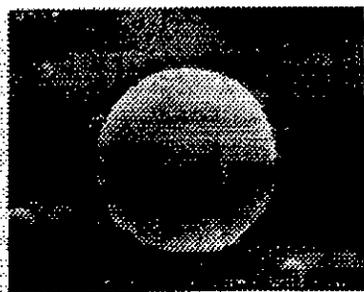


Figure II-5 : Fines sphériques: leur usage conduit à une réduction d'eau

III



Figure II-6 Fines anguleuses : leur usage conduit à un dosage supérieur en eau [1]

II.3.5. Les adjuvants

Les adjuvants sont les produits qui sont incorporés à faible dose dans les bétons, modifiant certaines de leurs propriétés. Ils sont soit liquides soit pulvérulents. Leur emploi doit faire l'objet d'une étude mettant en évidence leur rôle et l'absence de perturbation des autres caractéristiques du béton. Ils sont en plusieurs types dont les principaux sont :

- Les entraîneurs d'air : utilisés dans certains usages dans le but de créer un réseau de micro-bulles dans le béton de sable pour le protéger du gel.
- Les plastifiants réducteurs d'eau : utilisés pour améliorer la maniabilité du béton. Ils permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire ce qui entraîne une croissance de la résistance mécanique du béton ainsi qu'une meilleure cohésion du matériau lors du transport. Toutes fois ils peuvent présenter un effet retardateur ; lorsque leur dosage est très important. Il faut alors profiter de cette propriété surtout lorsque les distances de transport sont grandes. Les spécifications du béton de sable privilégient toujours ce type d'adjuvant
- Les fluidifiants : utilisés pour donner une certaine consistance fluide au béton pendant un temps limité.

En tout état de cause, des essais de compatibilité des adjuvants, des ciments et des éléments fins doivent être réalisés sur mortier au moment de l'étude.

II.3.6. Autres ajouts

En plus des éléments cités, qui constituent les principaux éléments, d'autres ajouts peuvent être employés afin d'apporter certaines qualités recherchées à un usage donné.

II.3.6.a. Les gravillons

L'ajout des gravillons dispersés dans le sable à faibles doses améliore sensiblement certaines caractéristiques, et tant que les gravillons ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste le même et le béton conserve sa dénomination, on parlera de cette notion avec plus de détails au chapitre IV.

II.3.6.b. Les fibres

Les fibres peuvent faire l'objet d'un ajout dans le béton de sable vue les qualités qui peuvent les apporter surtout en terme de retrait au jeune âge. A noter que leur dosage et nature sont des paramètres importants pour assurer l'efficacité. Pour un béton de sable où les exigences sur le retrait sont sérieuses, les recommandations préconisent l'utilisation des fibres

organiques tel que le polypropylène, alors que pour l'amélioration de la ductilité, elles préconisent des fibres métalliques (aciers).

II.3.6.c. Les colorants

Dans certains usages particuliers du béton de sable, les colorants utilisés dans le béton classiques peuvent également être utilisés, à condition de prendre soin de l'homogénéisation et la stabilité de la teinte au cours du temps, pour cela il est recommandé de procéder à une formulation appropriée à ce cas.

II.4. Propriétés des bétons de sable

II.4.1. Granulométrie et maniabilité

Parmi les propriétés essentielles des bétons de sable c'est le fait qu'ils nécessitent plus d'eau de gâchage que les bétons traditionnels pour atteindre la même maniabilité. Le rapport E/C (eau/ciment) est systématiquement supérieur à 0,5, il est en général compris entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange qui doit être complètement mouillé, alors que si on considère le rapport $E/(C+A)$ (addition en fines), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels. La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau ; plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse de sable et la maniabilité (Figure II.2)

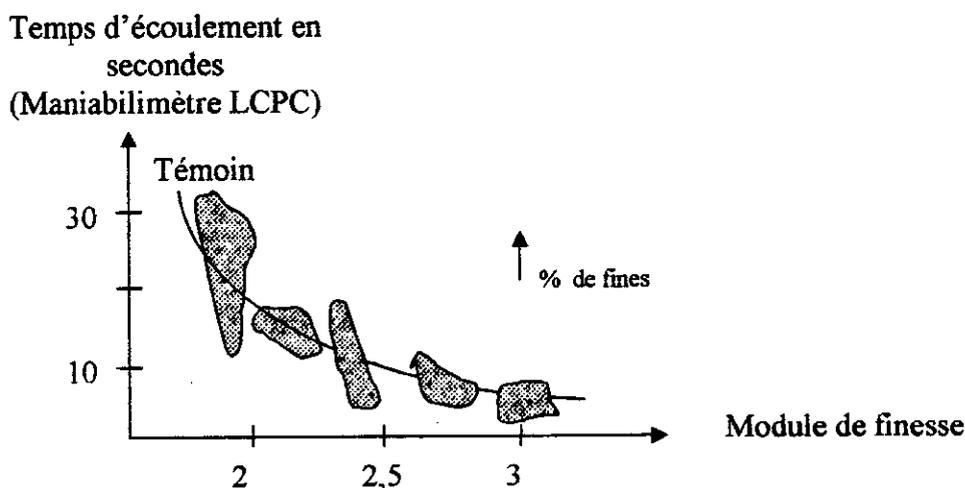


Figure II-7 Maniabilité en fonction du module de finesse du sable

La figure (II.7) montre l'effet des éléments grossiers sur la maniabilité du béton. Cinq (05) sables ont été utilisés, chacun à des teneurs en fines variables entre 0 et 10%. D'un sable à un autre présenté sur la figure (II.7) on a pu constater que l'augmentation du module de finesse entraîne une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de la maniabilité. On remarque ainsi que pour chaque sable l'augmentation de la teneur en fines diminue implicitement le module de finesse et entraîne de ce fait une maniabilité moins bonne. Ce phénomène n'a pas un caractère systématique, il dépend de la nature des fines incorporées car l'ajout des fines de type sphérique diminue la quantité des vides et rend l'eau plus efficace et donc améliore la maniabilité (figures II.5es) .

On constate ainsi que la relation entre le dosage en fines et la maniabilité dépend aussi de la nature du sable et sa granulométrie. Les graphiques de la figure (II.7) montrent l'effet différent des fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune.

Pour le sable de dune, l'ajout de fines jusqu'à 200 kg/m^3 entraîne une chute de maniabilité, alors que pour le sable alluvionnaire (plus compact) on constate une chute continue

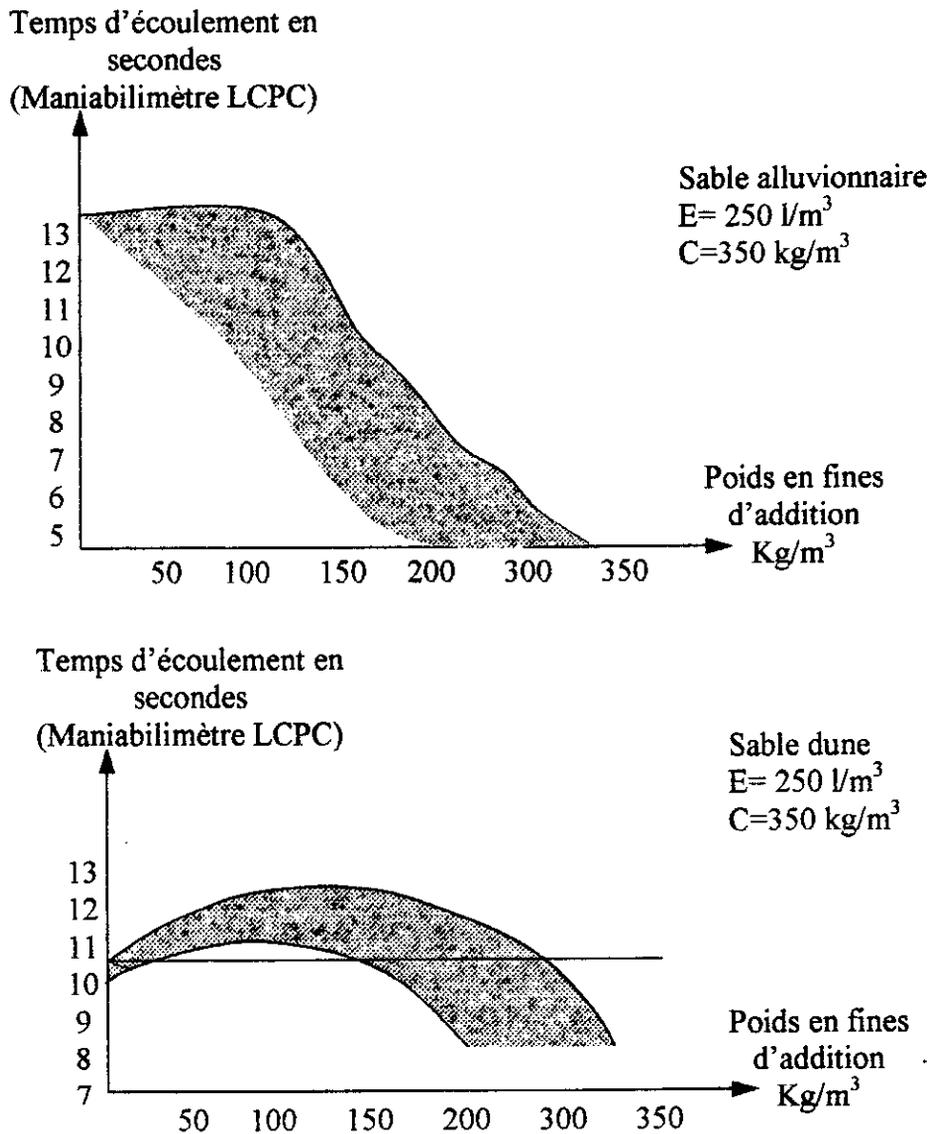


Figure II-8 Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire)[1]

II.4.2. Granulométrie et résistance

Les matériaux employés dans le confectionnement des bétons sont en général plus ou moins tenaces, la granulométrie, le dosage en ciment, la nature des constituants, la quantité d'eau de gâchage, ainsi que d'autres paramètres plus ou moins importants ont des effets majeurs sur les résistances, à la traction, à la flexion et en particulier la résistance caractéristique spécifique du béton de sable qu'est la résistance à la compression.

La figure (II.9) montre l'effet de la granulométrie sur la résistance :

- Pour des rapports E/C (eau/ciment) constants, on constate que l'effet du diamètre du plus gros granulat (D_{\max}) est peu important et en tout état de cause, pas défavorable aux sables

[1]. Cependant on constate que la maniabilité est très différente selon le béton. A titre d'exemple pour un D_{\max} égale à 20mm, le béton de sable est très maniable, ce qui n'est pas le cas pour un diamètre D_{\max} égal à 1,6 mm. Ce dernier cas nécessite une quantité d'eau supplémentaire, et par conséquent une chute de résistance plus ou moins importante.

- L'effet de la granulométrie sur la résistance apparaît plus clairement à des dosages en ciment constants.
- Chaque fois que le diamètre maximal D_{\max} diminue, il faut plus d'eau pour garder la même maniabilité ce qui fait chuter implicitement la résistance. Dans le cas du béton de sable ($D_{\max} < 5\text{mm}$), et pour minimiser la chute de résistance, on prévoit l'utilisation d'un Adjuvant plastifiant réducteur d'eau.

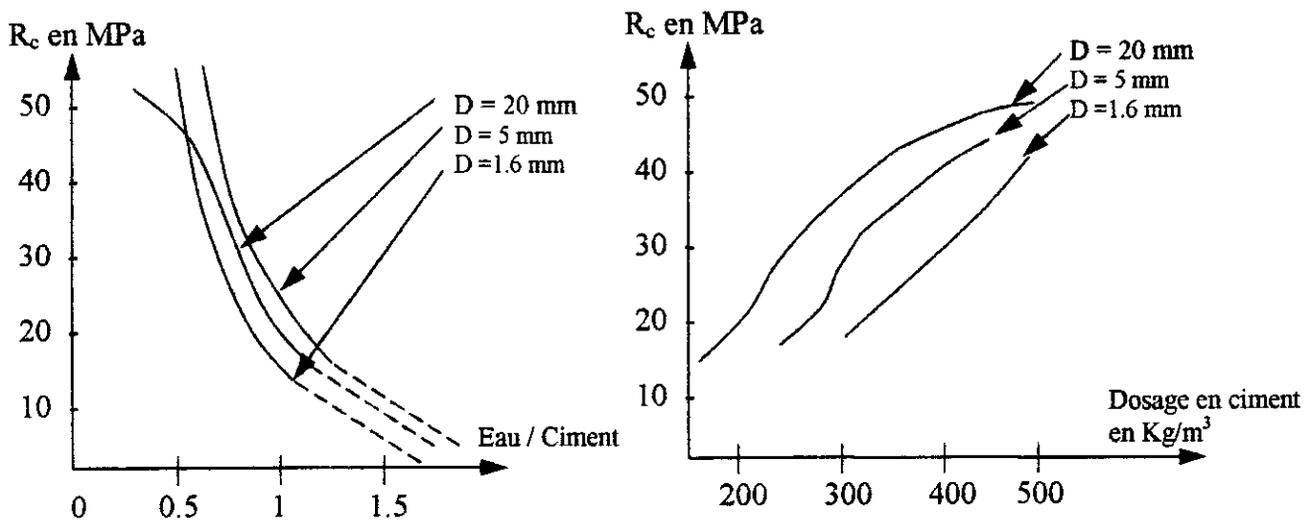


Figure II-9 Effet de la granularité sur la résistance.[6]

II.4.3. Adhérence aux armatures

Selon la formulation du béton de sable (donc son niveau de performance) on obtient des propriétés spécifiques à l'adhérence aux armatures plus ou moins bonnes. Quelques comparaisons ont été réalisées entre différentes formulations de béton de sable par rapport à un béton témoin traditionnel. Il s'agit de mesurer le déplacement d'une armature qui se trouve dans le matériau durci suite à l'application d'un effort de traction.

Sur la base des résultats de cet essai, on remarque que des variations de composition appliquées au béton de sable mènent à des écarts du même ordre que les bétons traditionnels, ce qui a amené à penser que les bétons de sable ne se distinguent pas particulièrement sur cet aspect des bétons traditionnels classiques.

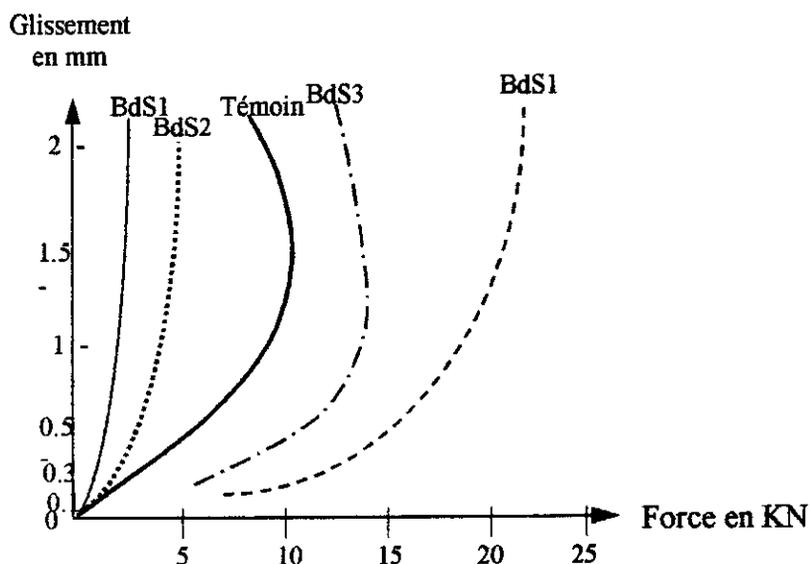


Figure II-10 Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation[1]

Dans le cas des petites déformations (partie initiale), on constate que la contrainte correspondante au même niveau de déformation (50 microns) est d'autant plus forte que la résistance en traction du béton de sable est élevée [1]. Le phénomène d'adhérence observé dans le béton de sable est pratiquement identique à celui des bétons traditionnels (contrainte ultime varie de 30 à 60 bars), alors qu'on peut dire que l'association béton de sable-acier engendre une adhérence suffisante entre les deux matériaux, ceci permet d'envisager l'utilisation du béton de sable comme béton de structure.

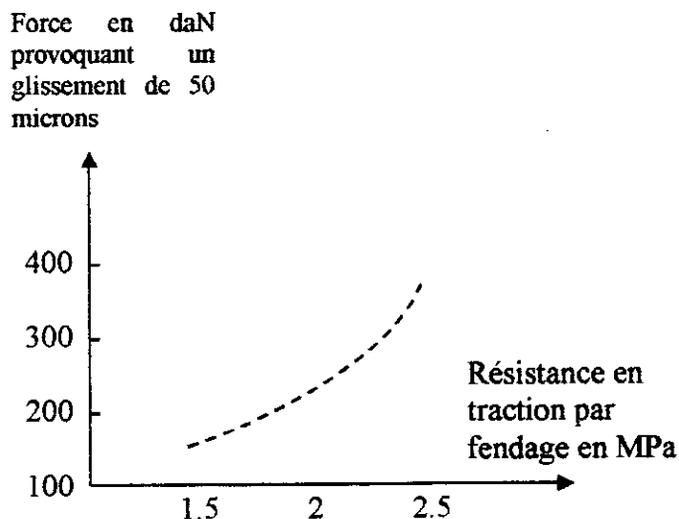


Figure II-11 : influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures.[3]

II.4.4. Durabilité des bétons de sable [1]

Conventionnellement, la durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les paramètres tels que la porosité, l'organisation géométrique des pores et la perméabilité sont des paramètres physiques du premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcali-réaction ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur. La tenue du béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais selon l'environnement prévisible du matériau (milieu urbain, montagneux, marin... etc). Ces essais de durabilité dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des attaques physico-chimiques, sont en général des essais accélérés qui permettent d'obtenir rapidement des informations comparatives.

D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels: s'ils ont d'avantage de vides, la taille et le nombre de ces vides se distinguent à ceux des bétons traditionnels ; ils sont plus nombreux, plus petits et en plus mono-dimensionnels, leur nombre plus élevé entraîne une probabilité de colmatage plus grande compte tenu de leur faible taille.

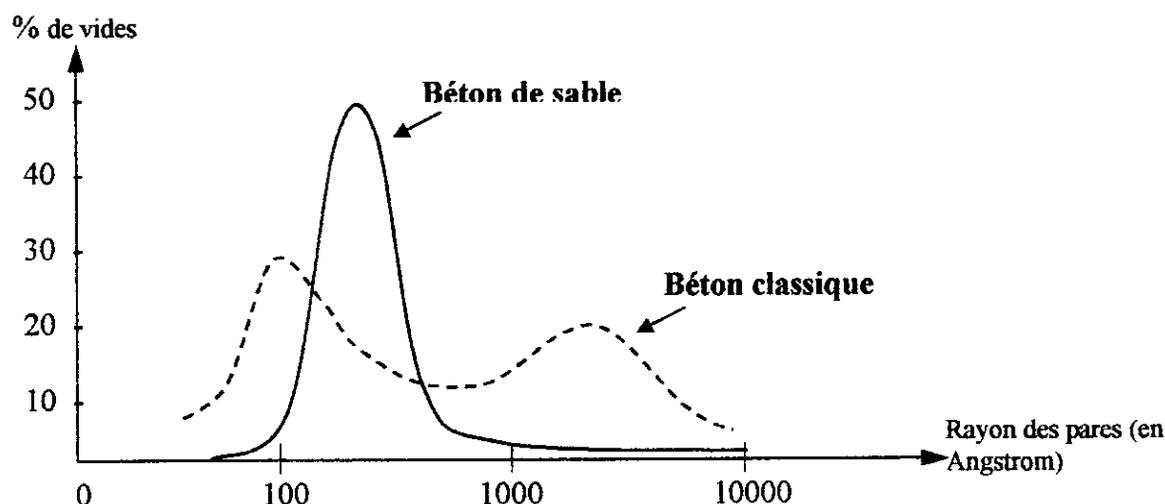


Figure II-12 Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores[8]

La perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables, ces résultats entrent dans le cadre du projet **SABLOCRETE** [1] qui contribue à l'étude du comportement des bétons de sable vis-à-vis de la durabilité. Ils ne sont pas généralisés à toutes les formulations de béton de sable mais plutôt à des bétons de sable correctement formulés. C'est-à-dire pour lesquels il y a eu optimisation des dosages en fines d'addition et en ciment. Dans ces conditions le comportement est très satisfaisant et même excellent.

II.4.5. Résistance au gel et au dégel

De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout

d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalente aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores.

II.4.6. Phénomène de ségrégation des constituants

Du fait de son faible étendue granulaire, et donc sa plus grande homogénéité, combinée à une bonne maniabilité, le béton de sable présente un meilleur comportement vis à vis des phénomènes de ségrégation que les bétons traditionnels. Cette faculté apparaît plus clairement à travers des expériences comparatives sur des bétons de sable et des bétons classiques équivalents, avec des plasticités et des modes de mis en œuvre variables.

Les deux figures qui suivent montrent les différences d'aspect de la peau de deux éprouvettes coulées, sans action extérieure sur le serrage, à des consistances plastique équivalentes (cône de 14 cm.)

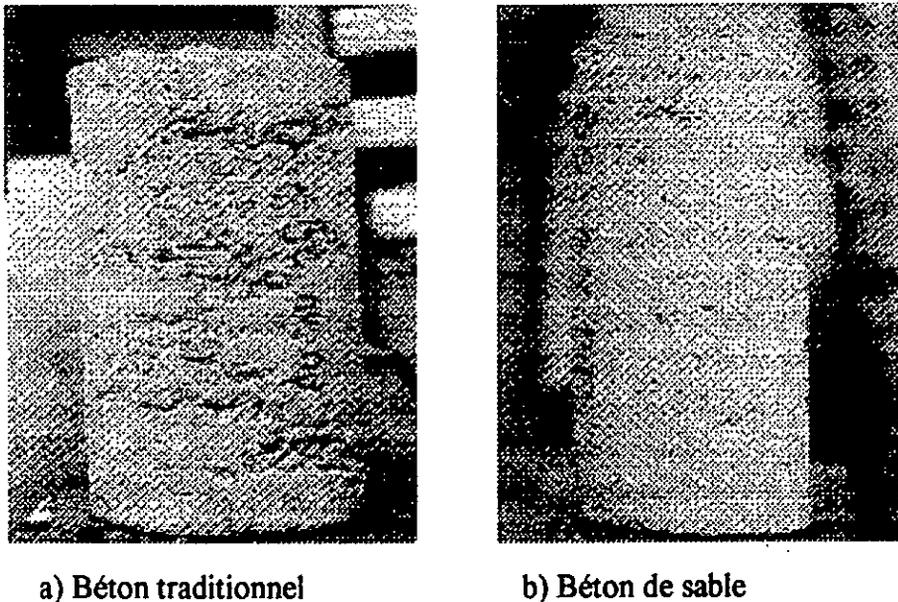


Figure II.13 :Epreuves non vibrées non piquées[1]

II.5. Le retrait

Le béton de sable est un matériau en évolution avec le temps: ses propriétés se modifient au cours de son existence suivant l'état de l'atmosphère, la température et les charges appliquées. Il sera le siège de transformations diverses.

En l'absence de toute charge, les bétons en générale subissent des déformations plus ou moins importantes quand leur contenu en eau ou l'humidité du milieu environnant varie. Pour les bétons conservés à l'air on observe une diminution des dimensions initiales. Cette variation est due surtout à l'évaporation de l'eau contenue dans les gels. Ce phénomène porte le nom de retrait.

Il existe plusieurs sortes de retraits

- Le retrait d'hydratation (ou de dessiccation inerte) ;

- Le retrait d'évaporation avant prise ;
- Le retrait hydraulique après prise ;
- Le retrait thermique.

Au début, et pendant la période de prise, l'eau n'est pas encore liée aux constituants des ciments, elle n'est retenue que physiquement, son évaporation provoque un tassement du béton donnant le retrait d'évaporation ainsi que des éventuelles fissures.

Le retrait après prise est beaucoup plus lent à se manifester, il est dû à une perte d'une quantité d'eau de gâchage si le béton est conservé dans un environnement à faible humidité, mais le phénomène de retrait a été particulièrement étudié dans le cas de retrait hydraulique qui est en liaison directe avec la fissuration des liants durcis (premier signe de leur dégradation).

Plusieurs facteurs influent sur le phénomène, en particulier l'humidité relative et la variation de la température du milieu, alors que le retrait dépend d'une grande partie de la composition du ciment et de la fraction fines/granulats.

Le béton de sable dunaire contenant une grande proportion d'éléments fins et parfois très fins (fillers) est affecté par le phénomène de retrait. Néanmoins, il est appelé à être utilisé dans des zones où la sécheresse de l'air et les variations de la température sont très importantes. D'où l'intérêt de porter sur les causes et les lois les plus probables de ce phénomène et de prévoir les variations dimensionnelles dans le temps, afin de pouvoir procéder à limiter au maximum ses effets.

Certains remèdes sont préconisés selon le cas; soit l'utilisation d'un adjuvant, ou d'un produit de cure afin de s'opposer au départ brutal de l'eau et par suite limiter le retrait avant prise, soit éviter les surdosages en ciment qui provoquent un retrait thermique, alors que si on veut limiter le retrait hydraulique, on doit donner un intérêt particulier au compactage du béton.

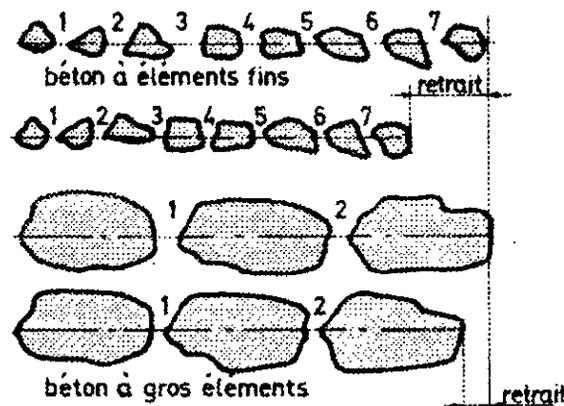


Figure II-14 : Effet de la granulométrie sur le retrait[11]

II.6. Le fluage

Le fluage est un phénomène de déformation différée sous une charge fixe indéfiniment appliquée. Le phénomène peut être constaté avec la même intensité, en traction, en compression, en torsion... etc., il est étroitement lié à la structure du matériau que confirment par ailleurs les valeurs du module d'élasticité.

Le déchargement des matériaux provoque une diminution instantanée des déformations très proches, en valeurs absolues, de celle d'une éprouvette témoin chargée à cet âge, suivie d'une diminution différée, appelée recouvrance, nettement inférieure au fluage correspondant, et se stabilise au cours de quelques semaines.

Le fluage dépend d'un certain nombre de paramètres en particulier :

- La charge appliquée : sous des charges modérées, on peut considérer qu'il est proportionnel à la charge appliquée, alors que si cette charge dépasse 50% de la charge à la rupture, le fluage croît plus vite que la contrainte.
- Nature du béton: dans le cas d'un béton léger, dont les granulats poreux constituent une réserve d'eau, leur fluage est en générale inférieur à celui d'un béton ordinaire de même résistance.

II.6.1. Description d'une loi de fluage

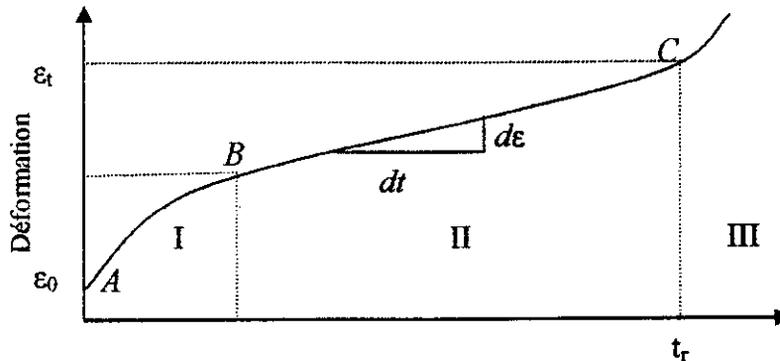


Figure II-15 Courbe idéale de fluage [8].

Sur cette courbe on distingue :

- Une déformation élastique instantanée qui apparaît lors de l'application de la charge. Celle-ci est dépendante du module de Young.
- Le fluage primaire (AB) est une réponse viscoélastique, cette première phase du fluage démarre dès que l'échantillon se déforme élastiquement. Elle est caractérisée par une croissance de la vitesse de déformation, ainsi que par un phénomène d'écrouissage ou de durcissement.

Il faut signaler toute fois que ces résultats comparatifs sont obtenus à un niveau de résistance en compression de 25MPa , et qu'en matière de fluage notamment, un béton de sable plus résistant, n'a pas le même comportement: fluage plus faible voisin de celui d'un béton classique. Des études confirment cette hypothèse, puisqu'en passant de 25 à 50 MPa, on divise le fluage par 5. Au même niveau de résistance (exemple 50 MPa), le fluage du béton de sable n'est supérieur à celui d'un béton classique, de même niveau de résistance, que de 20%.

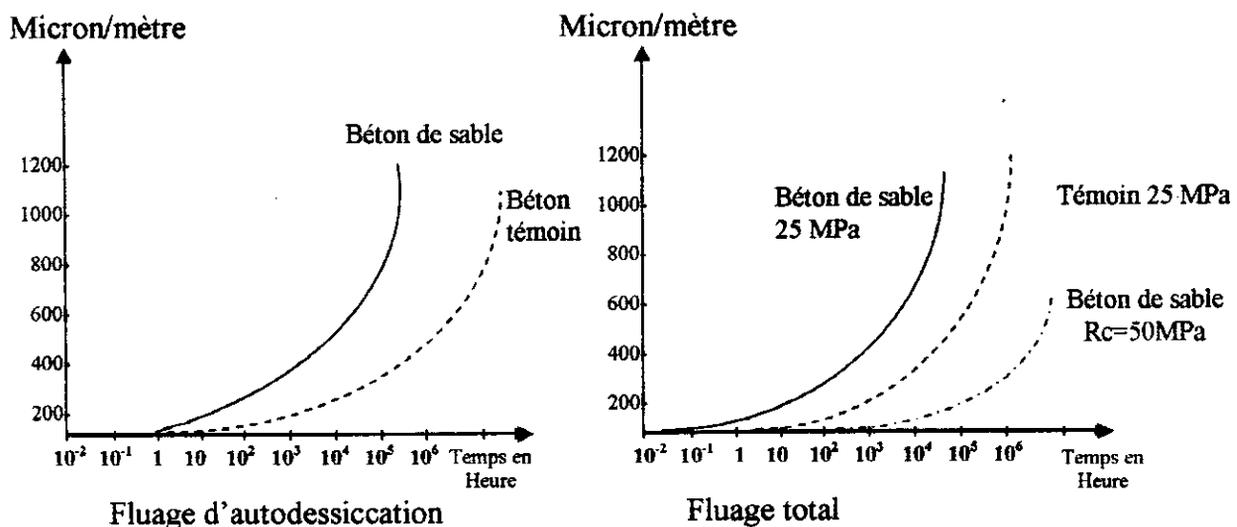


Figure II-16 l'effet de la résistance sur le fluage[1]

II.7. Désignation des bétons de sable

La désignation des bétons de sable fait l'objet d'une convention entre le producteur et le client. A défaut, la convention suivante est applicable: le symbole **BS**, signifiant « béton de sable », est suivi de la mention de la résistance caractéristique en méga pascals et de classe d'ouvrabilité, s'il y a lieu, la désignation est complétée par les dimensions maximales des gravillons et par l'indication du liant hydraulique et du (ou des) adjuvant (s).

A titre d'exemple, on a la désignation suivante :

- **BS12-FL** : désigne un béton de sable sans gravillon, de résistance caractéristique 12MPa, de consistance fluide sans prescriptions particulières, notamment sur le choix des constituants.
- **BS12FL0/20-CPJ45PM** : désigne un béton de sable chargé de gravillons de dimension maximale 20mm, de résistance caractéristique 12MPa, de consistance fluide constitué de ciment CPJ « prise mer ».

II.8. Avantages et limites des bétons de sable

Parfois, certains usages du béton exigent des caractéristiques mal assurées par le béton traditionnel et que le béton de sable peut mieux satisfaire, parmi ces particularités on cite :

- **La maniabilité**: Le béton de sable étant très maniable et donc sa mise en œuvre, sa capacité à remplir des moules avec une énergie de serrage moindre et sans préjudice pour les autres propriétés de matériau, constitue un atout significatif, en effet la grande maniabilité des bétons de sable permet d'augmenter les longueurs de pompage (horizontales et verticales) et d'utiliser des pompes plus rustiques (modestes).
- **La cohésion et l'absence de ségrégation**: La variation entre les dimensions des gains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion et faible ressuage et surtout une absence totale du problème de ségrégation.
- **La petite granulométrie**: La dimension des grains étant petite, le matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en œuvre des structures à fortes densités de ferrailage, ainsi que dans les travaux de rénovation de structures.
- **Le transport**: Le transport du béton de sable du lieu de production au lieu d'utilisation s'effectue par les mêmes moyennes que les bétons classiques, bien que les bétons de sable soit généralement plus plastiques et les risques de ségrégation pendant le transport est faibles ce qui permet son transport a des distances lointaines.
- **L'aspect de surface**: La granulométrie continue et serrée des bétons de sable permet la réalisation des effets architectoniques très esthétiques, soit sur la forme des éléments, ou bien sur l'aspect de surface. Cet aspect est un souci de plus en plus recherché pour toutes les constructions.

En plus de ces caractéristiques, le béton de sable possède un autre intérêt plus important pour les régions du sud algérien et qui consiste à utiliser les sables qui se trouvent en abondance dans ces régions, ce qui conduit à des économies certaines surtout en gravillon.

Mais le béton de sable à l'état actuel des connaissances, ne peut pas prétendre à remplacer systématiquement le béton traditionnel surtout pour des raisons techniques et exigences modernes. En effet, on ignore à ce jour, certaines caractéristiques et comportement de ce béton, alors que certaines autres caractéristiques, dénomment ses défauts en particulier leur faible module d'élasticité.

Par ailleurs, on ne dispose que peu d'éléments sur leur comportement au fluage, ce qui les exclut, dans l'immédiat, des éléments de structures fortement sollicités, ou précontraints. Dans ce cas on utilise un béton de sable chargé par l'ajout des gravillons (voir chapitre III).

II.9. Principaux essais sur béton de sable

L'expérience du béton de sable à travers le monde est très importante. Certaines études ont été menées par des organisations, et les résultats obtenus sont concluants, prouvent la vraisemblance de ce matériau. Il a été alors établi des normes auxquelles il faut se référer si l'on veut exécuter des ouvrages, ou parties d'ouvrages en béton de sable.

Plusieurs essais ont été effectués un peu par tous, afin de bien vérifier les qualités de ce matériau et connaître les meilleures conditions pratiques de sa mise en œuvre, aussi que son comportement vis-à-vis des différentes sollicitations et intempéries.

II.9.1. Dispositions communes

II.9.1.a. Le malaxage

Le malaxage a pour but de régulier la dispersion du sable dans le béton et de répartir le ciment autour des grains inertes. Généralement on utilise un malaxeur classique à axe vertical. En effet la dispersion des éléments fins s'effectue sans difficulté particulière dans les malaxeurs, il est même déconseillé de trop malaxer, car un entraînement d'air peut en résulter avec les conséquences qui en découlent (micro bullage interne).

La durée de malaxage des bétons de sable doit être inférieure à celle des bétons ordinaires, ceci suite à des études effectuées à ce sujet, en général cette durée est estimée à 60 secondes dans un malaxeur en usine de fabrication des bétons de sable[1].

En ce qui concerne les modalités de malaxage des constituants actifs, qui sont les ciments et les additions, ils doivent être introduits en dernier dans le mélangeur immédiatement avant la mise d'eau, et compte tenu de l'importance de la quantité d'eau apportée par les sables et éventuellement les additions humides, il est essentiel de bien connaître cet apport d'eau.

Bien entendue, comme pour les bétons classiques, la faculté d'absorption d'eau dans les sables doit être connue pour pouvoir être maîtrisée.

II.9.1.b. Serrage de béton de sable

Afin d'assurer une bonne mise en place des bétons dans les moules, on utilise le moyen le plus efficace et qui est la vibration. La vibration permet la liquéfaction du béton et son tassement d'où une augmentation de la compacité et une diminution de la teneur en air. Ce qui améliore les performances du béton: augmente les résistances mécaniques, résistances aux eaux agressives et au pérennité.

Les frottements internes du béton dus aux multiples contacts des grains entre eux, ainsi que les frottements du béton au coffrage et aux armatures s'annuleront momentanément lors de cette vibration, qui sera autant plus efficace que sa fréquence est élevée, cependant un excès de vibration peut provoquer la ségrégation à cause de la différence de densités entre la pâte du ciment et les granulats.

II.9.1.c. Précaution contre la dessiccation

La dessiccation est l'action d'enlever au corps l'humidité qu'il renferme. Elle s'accompagne de formation de miro-fissures qui diminuent les propriétés mécaniques du béton.

L'influence de dessiccation est autant plus élevée que les moules à remplir sont très petits, surtout s'ils sont conservés dans l'eau. Il conviendra donc d'éviter la dessiccation depuis le moment où elles seront retirées du milieu dans lequel ils ont été conservés et ceci en s'opposant au départ brut de l'eau par l'emploi d'un adjuvant.

II.9.2. Essais sur béton de sable frais

Les propriétés du béton frais agissent sur les caractéristiques des bétons durcis et conditionnent de ce fait la résistance mécanique et son homogénéité, le retrait, l'aspect du démoulage et la pérennité. La raison pour laquelle des essais sur le béton frais sont toujours à effectuer.

On recherche un matériau qui présente une maniabilité suffisante, pour remplir le plus facilement et le plus rapidement possible les moules sans qu'il soit trop liquide. Ainsi il doit présenter après sa mise en place une porosité minimale, afin d'obtenir après durcissement la plus forte résistance mécanique, et la meilleure durabilité.

II.9.2.a. Essais de la maniabilité

Le choix d'un moyen de mesure de la maniabilité est la plupart du temps, dicté par la particularité du mélange : le plus souvent la taille maximale des grains entrant dans le mélange, ou encore le volume de la gâchée d'essai.

L'essai à l'affaissement au cône d'Abrams (slump-test) demeure l'essai le plus connu et le plus répandu sur les chantiers et les laboratoires du monde entier, son utilisation est de simplicité record.

Dans sa particularité, le béton de sable étant constitué uniquement d'éléments fins ou très fins, n'a pas un comportement à la mise en œuvre, ou une ouvrabilité directement comparable à celle des bétons graveleux traditionnels.

Il en résulte que l'on ne doit pas juger l'ouvrabilité d'un béton destiné à la vibration par un essai type affaissement au cône : un affaissement nul du béton de sable peut très bien correspondre à une bonne ouvrabilité. Pour une meilleure approche de cette caractéristique, la consistance et l'ouvrabilité des bétons de sable seront classées en temps d'écoulement au maniabilimètre à mortier type LCPC.

1. Le maniabilimètre LCPC

L'appareil mis au point par LEZY et LESAGE au laboratoire des ponts et chaussées de Paris (France) permet de lier la consistance d'une gâchée au temps mis par celle-ci pour atteindre un trait repéré sur la cuve parallélépipédique du côté de vibreur. Ce temps d'écoulement correspond à l'intervalle du temps compris entre le moment où le béton atteint un trait de repère sous l'action des vibrations standardisées (voir figure II.17).

Plus le béton est maniable et plus le temps de parcours est court. L'essai fait l'objet d'une norme NFP15452.

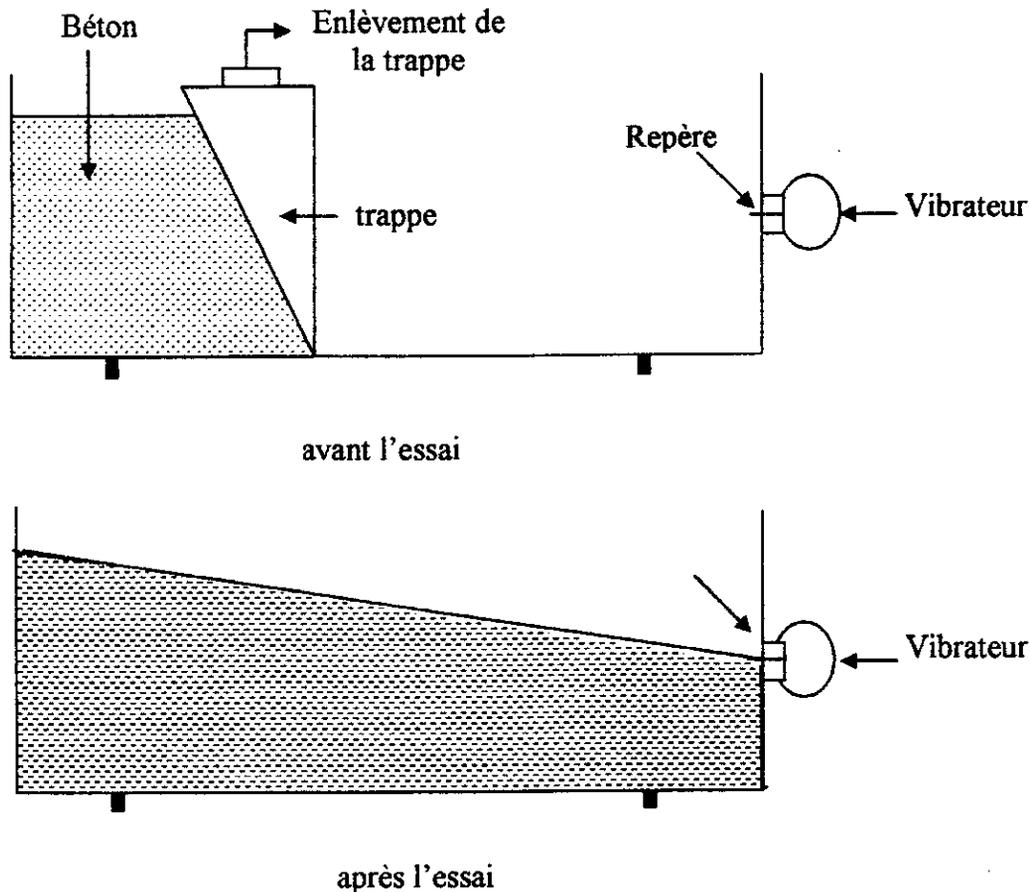


Figure II.17 Le maniabilimètre LCPC [11]

II.9.2.b. Essai de prise

Les réactions qui se produisent dès l'instant où l'eau est ajoutée au ciment, et qui se poursuivent dans le temps sont très complexes. Plusieurs théories ont été émises concernant le phénomène de prise. D'après la théorie cristalloïdale de Chatelier, les constituants anhydres du ciment portland artificiel, mis en présence d'eau donneraient naissance à des hydrates qui précipiteraient en donnant des micro-cristaux: Cela correspondrait au début de prise. Le durcissement en suite serait dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés. Généralement cet essai est réalisé par l'appareil classique de prise « Vicat »[9]. Il a pour but de déterminer les temps de :

- Début de prise: c'est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant où le liant est mis en contact avec l'eau de gâchage et celui où l'aiguille de VICAT s'arrête à une distance du fond de 2.5mm.
- Fin de prise: elle se situe au moment où l'aiguille s'arrête à 2.5mm du niveau supérieur.

II.9.2.c. Essai sur la masse volumique

La masse volumique d'un corps est la masse d'un échantillon de ce corps par unité de volume total, vides compris. Si V est le volume total, la masse volumique est M/V (M étant

la masse du corps prise assez grande pour que le volume soit considéré comme homogène malgré les vides).

Dans le cas des matériaux composés à base de ciment, tels que les bétons, cette caractéristique est très importante, elle indique la qualité en terme de résistance, les résistances sont très élevées autant que la masse volumique est plus grande.

Les bétons classiques ordinaires possèdent une masse volumique de 2500 Kg/m³, alors que pour les bétons de sable de dune, l'étude précédente a montré que leur masse volumique varie autour de 2100 Kg/m³.

II.9.3. Essai sur béton de sable durci :

Une fois qu'on a obtenu un béton de sable frais jouissant de certaines qualités adéquates à sa destination; une bonne maniabilité du mélange à la quelle on aura des temps de début et de prise conformes aux normes, nous devons encore vérifier les propriétés du béton de sable durci. Les essais les plus importants sont cités ci après.

II.9.3.a. Essai de résistance à la compression

La résistance à la compression simple est une caractéristique très importante pour les bétons. En fait, elle est considérée comme la caractéristique spécifique et la qualité primordiale à rechercher en raison des charges que les ouvrages sont à supporter du fait de la pesanteur. L'expression de la résistance à la compression simple s'oppose à la notion de résistance avec frottement latéral, mais si on analyse ce qu'on mesure sous le nom de compression simple, on s'aperçoit que c'est en fait un résultat de mesure fort complexe [15].

La résistance à la compression est déterminée généralement au moyen d'une presse dont les plateaux sont rotulés, et qui comprime progressivement le matériau bien centré, confectionné dans des moules soit en cube, en prisme ou en cylindre ; jusqu'à l'obtention de la rupture. Elle est exprimée en kilogramme-force par centimètre carré (Kg/cm²) ou bien par Méga pascals (MPa) et notée f_{c28} .

II.9.3.b. Essai de résistance à la traction

La résistance à la traction est une caractéristique essentielle, surtout pour les bétons de ciment tel que le béton de sable. Dans la mesure de cette résistance, la viscosité du corps solide intervient de telle sorte que le résultat dépend plus au moins de la vitesse de mise en charge, ou de la vitesse de déformation, donc implicitement du temps. L'essai le plus utilisé pour apprécier cette résistance est l'essai de traction par flexion. Il s'agit de confectionner des éprouvettes prismatiques de dimensions $a \times a \times 4a$. L'appareil de charge doit transmettre la charge à des appuis horizontaux définissant exactement la ligne d'application de celle-ci et la répartissant sur l'éprouvette aussi uniformément que possible comme illustre la figure (II.18).

La charge est appliquée d'une manière continue et sans choc. La vitesse de chargement est constante égale à 0.5 ± 0.1 bars par seconde.

La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et la résistance à la rupture exprimée sous la forme de contrainte est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{28} = (1.8 \times F) / 0.2$$

F : la force à la rupture lue sur la machine.

σ_{28} : la résistance à la traction en Méga pascals.

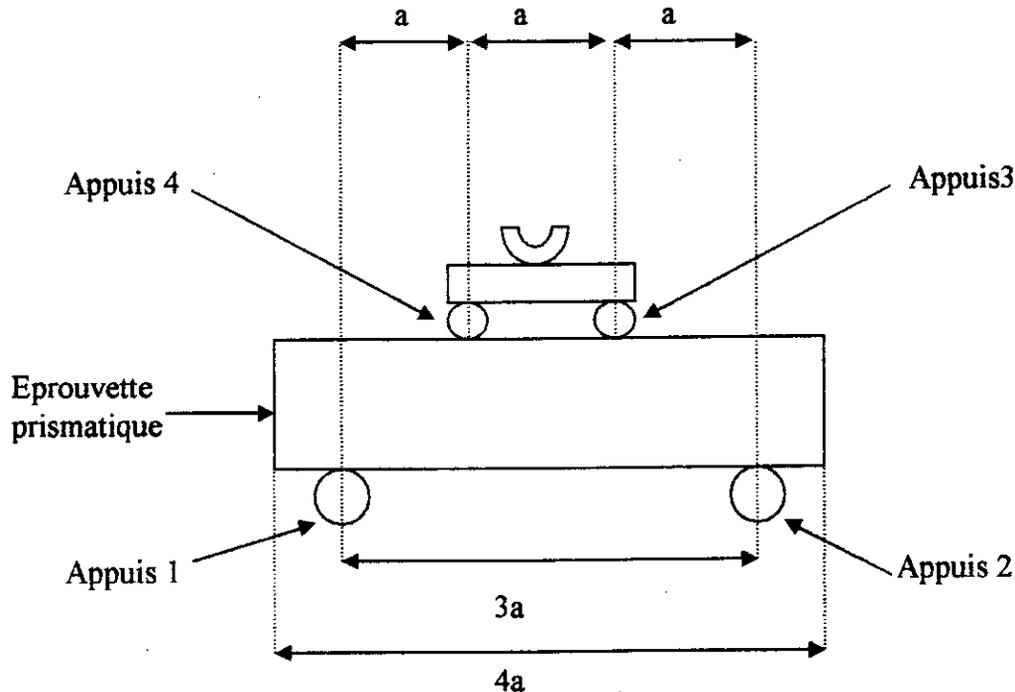


Figure II-18 : Disposition de l'éprouvette de traction

Les appuis (1) et (2) oscillent autour d'axes passant par leur centre, parallèles au grand axe de l'appareil et de l'éprouvette et situés dans le plan de réflexion. Quant à la charge, elle est appliquée aux appuis (3) et (4) par l'intermédiaire d'une rotule.

A noter que d'autres essais de résistance peuvent être réalisés sur les bétons de sable en particulier la résistance à la réflexion au cisaillement ainsi que l'essai de dureté. Ce qui est de la résistance en réflexion des bétons, elle est généralement raccordée à la résistance à la compression ou à la torsion, alors pour la résistance au cisaillement elle est raccordée au module de YOUNG.

II.9.3.c. Essai d'extensomètre

On appelle extensométrie l'ensemble des techniques permettant la mesure des contraintes qui apparaissent dans un corps donné conformément à la théorie d'élasticité, lorsque ce dernier est soumis à des sollicitations extérieures. L'essai a pour but de déterminer en premier lieu les valeurs numériques des paramètres qui caractérisent les structures. En second lieu il fixe ces paramètres sous forme de coefficients qui définissent le comportement sous certaines sollicitations, les grandeurs caractérisent en général les corps homogènes, on attribue pour ce béton une homogénéité conventionnelle qui se manifeste par des valeurs moyennes des constantes.

Plusieurs extensomètres sont employés aux laboratoires. Les plus utilisés sont les extensomètres électriques (voir annexe2).

Il s'agit donc de mesurer les déformations d'une éprouvette de béton de sable sollicitée en compression simple. On est en présence d'un état de contrainte mono-axiale, longitudinalement, il se produit un raccourcissement de l'éprouvette de ΔL_L (contraction) et par suite une déformation notée ε_L égale au rapport du raccourcissement sur la longueur.

$$\varepsilon_L = \Delta L_L / L$$

transversalement on aura un autre allongement ΔL_T qui correspond à une déformation transversale notée ε_T égale au rapport de l'allongement relatif sur la largeur de l'éprouvette ε

$$\varepsilon_T = \Delta L_T / L$$

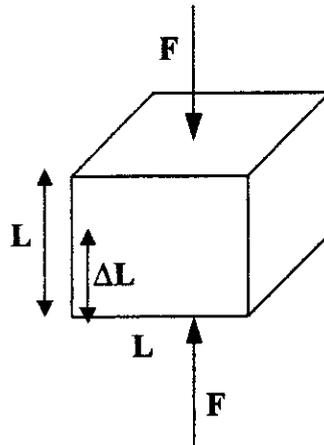


Figure II-19 : Exemple d'éprouvette soumise à la compression uniaxiale

Les relations expérimentales classiques donnent les deux équations suivantes:

$$\varepsilon_T = -\delta \times \varepsilon_L$$

Où δ : est le coefficient de poisson.

Le signe moins indique que les deux déformations sont de sens différents

$$\sigma_{28} = E \times \varepsilon_L$$

Où E: module de YOUNG longitudinal

σ_{28} : contrainte appliquée

ε : la déformation correspondante à la contrainte appliquée.

L'allure générale du comportement en compression du béton est indiquée sur la figure (II.20) suivante :

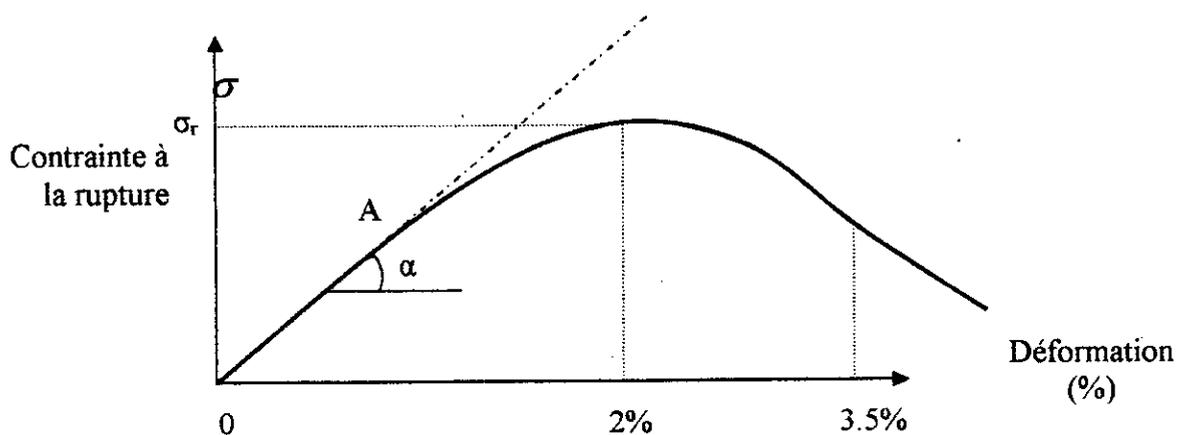


Figure II-20 : Allure générale de la courbe contrainte-déformation

Pour de petits chargements, la parabole présente un tronçon rectiligne (OA), il s'agit du domaine élastique du béton où les deux dernières relations sont valables. Dans ce cas, le module de Young est le coefficient angulaire de la droite (OA).

$$E = \text{tg}\alpha$$

Pour des chargements plus élevés (au delà de A), le béton présente un comportement plastique.

II.9.3.d. Essai de retrait

Comme nous avons vu précédemment, il existe plusieurs types de retrait. Le seul retrait mesurable est le retrait hydraulique après prise.

On mesure ce retrait à l'aide des comparateurs sur des éprouvettes normalisées. Pour pouvoir comparer les résultats, les éprouvettes doivent avoir les dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ et conservées à l'air libre.

II.9.3.e. Essai de fluage

Le but principal recherché est d'étudier l'influence du fluage sur le béton de sable avec des charges différentes, ainsi le comportement de celui-ci. Une éprouvette cylindrique est placée sous une charge constante appliquée par les plateaux de la presse de compression, les déformations sont mesurées par un extensomètre (voir annexe) et comparateurs de déformations qui nous permettent de lire la déformation tout les quarts d'heure pendant toute la durée de l'essai (24 heures).

L'allure générale des courbes de fluage pour différentes charges est indiquée sur la figure (II.21)

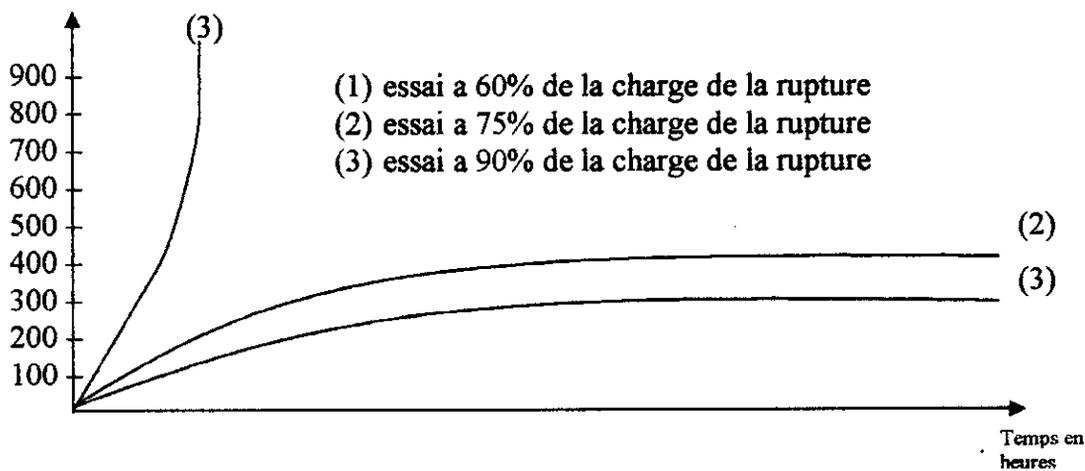


Figure II-21: Essai de fluage [8]

II.9.3.f. Essai de fatigue :

Cet essai a pour but de voir le comportement du béton de sable sous des sollicitations répétées et d'en déduire, par la suite, l'influence du nombre de cycles sur la chute de la résistance.

Cet essai est important dans le domaine des chaussées du fait du caractère répétitif des charges, cependant il est toujours intéressant de connaître le comportement du matériau.

L'essai est réalisé sur une éprouvette trapézoïdale encastree à la base et sollicitée en tête. Il est réalisé à différents niveaux de contraintes. A chaque niveau correspond un nombre de sollicitations provoquant la rupture.

L'allure générale de la courbe qui relie la contrainte au nombre de coups nécessaires à la rupture, représentée en coordonnées semi-logarithmiques, est donnée par la figure(II.22) .

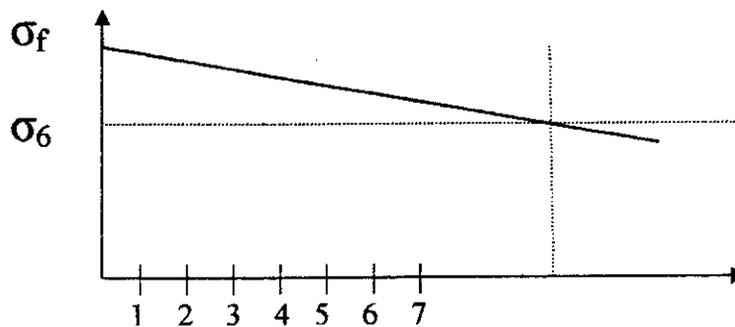


Figure II-22 : Courbe de la fatigue [1]

II.10. Domaine d'application des bétons de sable

Le béton de sable a trouvé beaucoup de domaine d'utilisation au passé et trouve de plus en plus d'autres domaines suite à ses diverses qualités et au développement de la technologie qui lui offre des qualités supplémentaires (développement des adjuvants super-plastifiants). Par exemple J.J.CHAUVIN [12], dans son rapport de mission en ex URSS consacré à l'examen des réalisations en béton de sable, donne les principaux domaines d'utilisation de ce matériau.

II.10.1. Préfabrication d'éléments destinés à rester apparents

Les qualités de fini des surfaces et arêtes qu'on peut obtenir avec des bétons de sable, alliées à de bonnes performances mécaniques sont des critères déterminants pour de tels éléments, type blocs de construction pour bâtiment ou clôture, et éléments de mobilier urbain ou de jardin. On a réalisé également des dalles des pavés pour allées piétonnes et même des toitures à plis.

Des éléments de bâtiment peuvent aussi être réalisés en béton de sable lorsque ce dernier présente un intérêt économique. On note à ce titre la remarquable banque pour commerce extérieur implantée à Moscou, elle est construite presque entièrement en béton de sable préfabriqué.

II.10.2. La projection

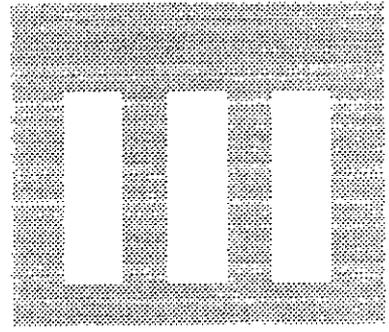
Le béton de sable se prête au renforcement des structures par projection par voie mouillée ainsi que les travaux de rénovation avec ferrailage de surface et une couche de béton de sable. En effet, ils se sont révélés particulièrement intéressants techniquement et économiquement pour :

- La réhabilitation de collecteurs d'assainissement.
- La stabilisation de parois de talus.

II.10.3. Les bétons non vibrés

Lorsque la vibration est impossible ou bien qu'il est jugé avantageux de s'en abstenir, ces bétons sont souvent préconisés, en particulier dans la fabrication des pieux fossés et la réalisation de dallages auto-compactant ou auto-nivelant.

Toute fois, d'autres applications du béton de sable, que ce soit en génie civil ou en bâtiment sont également réalisables. Le choix entre ces bétons et les bétons traditionnels réside dans la prise en compte globale de données technico-économiques locales.



**Correction
granulométrique
des bétons de
sable**

III. CORRECTION GRANULOMETRIQUE DES BETONS DE SABLE

III.1. Introduction

La granulométrie et l'angularité du sable de base peuvent ne pas lui assurer des caractéristiques suffisantes pour son emploi dans les bétons hydrauliques. Pour satisfaire les spécifications du béton et conférer au mélange après durcissement une structure fermée, c'est-à-dire une compacité proche de la valeur optimale, on doit procéder à une correction granulométrique des sables présentant des pourcentages de vides élevés, la solution est de chercher une granulométrie aussi étalée et continue que possible.

L'apport du ciment constitue une première correction qui sera complétée par l'apport d'autres matériaux naturels ou artificiels.

La technique souvent employée pour les bétons de sable, que ce soit le sable utilisé concassé ou naturel, est celle qui consiste à corriger la porosité du sable par l'adjonction de fines capables d'occuper les vides inter-granulaires. Cependant dans certains cas de sables particuliers, une correction par l'apport de sable concassé s'impose.

III.2. Correction granulométrique par l'apport d'un sable concassé

III.2.1. Correction des sables pauvres en fines

Pour les sables contenant moins de 10% de fines, la correction est généralement réalisée avec un sable broyé de granularité (0/2) mm ou (0/5) mm contenant jusqu'à 30% de fines, les caractéristiques de ce sable peuvent normalement être adaptées et doivent être définies selon le sable à corriger dans le but de déterminer le dosage en correcteur (pour un sable fin dosé en dosage habituel en ciment ce mélange doit être amélioré par l'apport d'un sable broyé à un dosage pouvant atteindre 30% de fines).

III.2.2. Correction des sables mal gradués

Les sables mal gradués peuvent être corrigés par l'apport d'un autre sable concassé. C'est le cas de certains sables provenant de l'écrêtage de graves naturelles mal graduées qui sont un mélange de sable roulé (0/6,3) mm et de gravillons de tailles moyennes (10 à 30mm) en faibles proportions ; ils peuvent être corrigés par l'incorporation, dans le sable roulé (0/6,3) mm obtenu par criblage, du sable artificiel obtenu par concassage des gravillons.

III.3. Correction par l'ajout de gravillons

C'est une autre manière de correction granulométrique plus intéressante dans le cas du béton de sable et qui a fait l'objet d'une investigation particulière donnant des résultats fascinants. En effet, l'utilisation du gravillon pour corriger la compacité de sable est une éventualité envisagée dans le cas général, mais l'idée d'incorporer ce matériau doué de caractéristiques dans une composition du béton de sable peut surprendre et paraître contradictoire avec la volonté d'utiliser ce type de béton. Alors qu'un tel ajout ne modifie pas les propriétés spécifiques du béton de sable et le comportement reste le même du fait que le dosage adapté en gravillon soit faible et ne forme pas un squelette structural. Il s'agit d'un béton de sable chargé. D'autre part une telle charge améliore sensiblement certaines

performances du béton, particulièrement le fluage et le module d'élasticité (caractéristiques très importantes pour les éléments porteurs de structure).

Il paraît donc tout à fait clair que la nature et les propriétés des gravillons sont à l'origine de cette amélioration.

Sans prescriptions particulières, les gravillons adaptés pour le béton de sable sont de mêmes propriétés que ceux utilisés dans les bétons traditionnels.

III.3.1. Spécifications sur gravillons pour béton hydraulique

Les gravillons sont utilisés dans les bétons de ciment comme éléments d'ossature destinés à donner plus de compacité à l'ensemble; ils permettent également d'économiser le ciment. Pour satisfaire ces rôles, ils doivent répondre à certaines exigences :

III.3.1.a. La forme du gravillon

La forme du gravillon est un élément important au point de vue des caractéristiques d'utilisation. En pratique on distingue trois (03) formes principales :

- Les gravillons cubiques (ou cuboïdes) à forme ramassée.
- Les gravillons en plaquettes.
- Les gravillons en aiguilles.

Les gravillons en plaquettes sont, peut être, les éléments les plus résistants au point de vue intrinsèque, puisqu'ils ne sont pas fragmentés lors du concassage malgré une forme peu propice à la résistance.

Signalons d'ailleurs, que la forme des grains de gravillon définie comme ci-dessus n'est pas suffisante: il y'a également des questions de forme en surface outre les questions en volume.

En définitive, les gravillons roulés sont plus recherchés, par ce qu'ils donnent des produits plus maniables, un meilleur arrangement des grains et on obtient donc une meilleure compacité effective.

III.3.1.b. La propreté des gravillons :

Les gravillons destinés à la fabrication des bétons doivent être rigoureusement propres, c'est-à-dire dépourvus de gangues superficielles, ou même une pellicule de matière pouvant nuire à l'adhérence, en particulier s'il s'agit d'argile. Aucune autre poussière ou matière étrangère ne doit former un film continu à moins que ce film ne favorise l'adhésivité sauf la poussière de matériau lui-même « filler », peut être tolérée si la quantité est faible et si elle ne provient pas d'éléments altérés.

En général, les matériaux de rivière ou de ballastière sont propres, par contre les matériaux de carrière peuvent laisser à désirer à ce point de vue.

III.3.1.c. Adhérence et cohésion des gravillons.

La propreté des gravillons est une condition nécessaire pour une bonne adhérence, mais ce n'est nullement une condition suffisante. L'adhésivité est une question d'affinité naturelle ou créée de gravillon pour les liants, elle varie avec la nature, la composition, l'origine et l'altération éventuelle des roches d'où sont tirés les gravillons.

L'adhésivité dépend partiellement du grain de la surface et de sa rugosité, mais beaucoup aussi de la fraîcheur de la cassure et bien entendu de sa nature chimique.

Pour les bétons de ciment, l'adhérence dépend aussi de l'affinité en général chimique de la paroi des grains pour les produits d'hydratation du ciment, on parle dans ce cas d'affinité d'ordre chimique que la liaison est d'ordre épitaxique à l'interface ; c'est le cas par exemple

des sables de laitier granulés, qui donnent plus rapidement une adhérence meilleure et donc des bétons plus résistants si la surface des grains a été décapée par attrition. [7]

On se contente d'éliminer, à priori, des éléments réputés trop tendres par leur nature ou leur origine, mais cette méthode qualitative n'est pas toujours sûre, certains granites à gros grains par exemple donnent souvent des résistances insuffisantes, alors que certains calcaires durs ne sont pas à mépriser.

III.3.1.d. La dureté des gravillons :

Pour la dureté des gravillons; il faut savoir qu'elle est étroitement liée à la fois, à sa résistance à la compression et à l'angle de frottement interne de la pierre auxquels se joint la résistance à l'écrasement du gravillon.

Ces paramètres ainsi que d'autres, plus ou moins importants, permettent de faire une opinion sur la fragilité ou la dureté des gravillons par rapport à des matériaux types.

Notant que d'autres caractéristiques liées à la nature du gravillon ont des influences non négligeables sur la résistance du mélange.

III.3.2. Principaux essais sur gravillons :

En plus des essais courants d'identification employés pour les sables, s'ajoutent deux (02) autres essais principaux, servant à déterminer les caractéristiques de résistance du gravillon.

III.3.2.a. Essai MicroDeval:

La résistance à la fragmentation et à l'usure est généralement caractérisée par l'essai micro Deval. Dans un cylindre standard de 20cm de diamètre et 34 cm de longueur, on introduit 50 pièces écrasées de la roche en cause et pesant en total (500grammes). Le cylindre effectue 10.000 révolutions à 30 tours à la minute autour d'un axe faisant un angle de 32° avec l'axe du cylindre.

Le résultat de l'essai consiste à mesurer le coefficient MicroDeval, noté MD , par la formule

$$MD=100 \times \frac{500-P}{500}$$

Où P : La masse des refus au tamis 1,6mm étuvée à 105°C jusqu'à une masse constante.

III.3.2.b. L'Essai Los Angeles

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs des boules d'acier. Il s'agit de placer dans un cylindre à axe horizontal de 70 cm de diamètre et 50 cm de longueur les granulats d'essai et les boules d'acier, leurs poids sont déterminés en fonction du diamètre maximal des granulats.

Après exécution de cet essai, les matériaux sont criblés au tamis de 1,6mm de maille, le poids de la fraction passante est rapporté au poids de la prise d'essai. Le rapport multiplié par 100 est appelé coefficient Los Angeles et noté LA.

$$LA = \frac{5000-M}{5000} \times 100$$

Où M : Masse sèche du refus au tamis de 1,6mm.

III.4. Dosage en gravillon

Pratiquement on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable, tant que le rapport massique gravillon sur sable (G/S) reste inférieur à 0,70 (G/S < 0,70).

Ce béton de sable est appelé chargé. Cette notion sous-entend une forte discontinuité entre le diamètre maximum $D1$ du sable $O/D1$ et le diamètre minimum $d2$ du gravillon $d2/D2$

$d2 \gg D1$.

En outre, l'expérience montre que l'on peut considérer des matériaux à granulométrie continue O/D avec $D \leq 8\text{mm}$, comme des bétons de sable à partir du moment où le dosage pondéral d'éléments supérieurs à 4 mm (notées G) satisfait la règle précédente ($G/S < 0,70$). Avec S représente le dosage pondéral en éléments inférieurs à 4mm.

III.5. L'influence de l'ajout de gravillons

Afin de bien qualifier les effets d'ajout de gravillon et vérifier les autres caractéristiques des bétons de sable, une étude a été faite en laboratoire sur trois types de gravillons de nature différente.

Les quantités de gravillons ajoutés ont volontairement été limitées à des taux faibles tel que le rapport massique du gravillon sur sable soit compris entre 0 et 1. Dans cet intervalle la charge en gravillon est suffisamment faible pour ne constituer qu'un ajout de composition, sans réellement avoir un effet structurel.

La formulation et le comportement de tels bétons de sable chargés restent ceux d'un béton de sable et non ceux d'un béton traditionnel pour lequel le rapport massique de gravillon sur sable (G/S) est supérieur à 1.5

Les figures(1) (a),(b),(c),(d) montrent l'influence d'ajout de gravillon sur quatre caractéristiques du béton de sable, celles où cette influence a été la plus sensible.

- La résistance au choc

La figure (1)(a) montre l'influence de l'ajout de gravillon sur la résistance au choc.

La particularité des bétons de sable est qu'ils résistent mieux aux chocs, cette particularité a été constatée empiriquement et 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, facilités par le déchaussement des gros granulats sous l'effet du choc. Cette propriété a été étudiée à l'aide de l'essai Los Angeles sur des cubes obtenus par sciage [2]. L'influence de l'ajout de gravillons n'est favorable que jusqu'à un rapport du gravillon sur sable(G/S) de 0.25, au-delà de ce rapport, le gain est peu sensible et l'influence est même négative à partir du rapport (G/S) égale à 0.75, où la teneur en gravillons commence à avoir le même effet que sur un béton traditionnel.

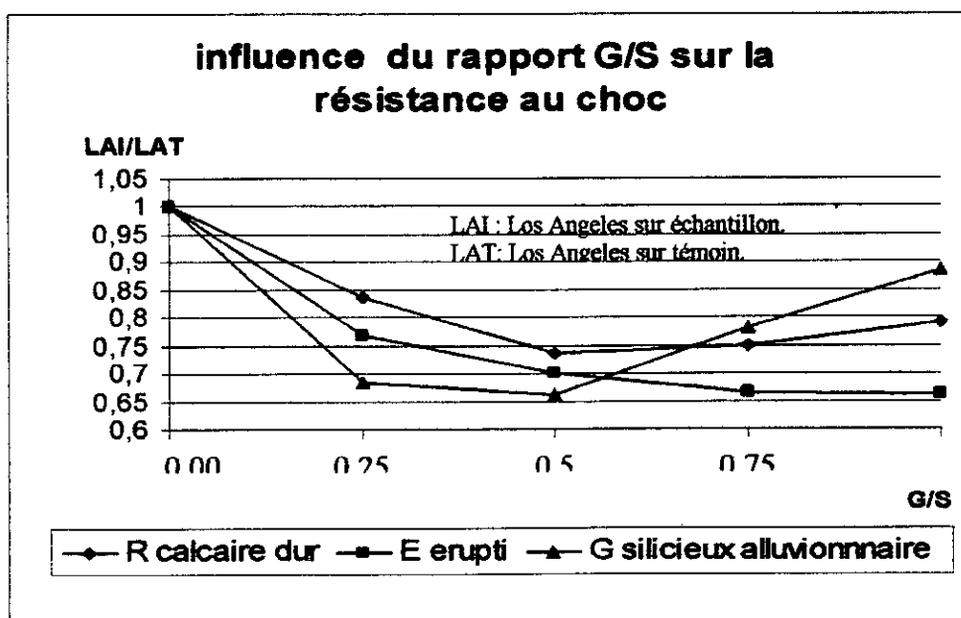


Figure III-1 : Influence du dosage en gravillon sur la résistance au choc[2]

• La résistance à l'attrition

Quantifiée à l'aide de l'essai Deval, on peut constater que, comme il était prévisible, l'ajout de gravillons, quelle qu'en soit la nature, améliore sensiblement cette caractéristique d'environ de 50% a un rapport G/S égale à 0.5. Au-delà de ce dosage il n'y a presque plus d'amélioration. La figure (1) (b) montre l'allure du développement de la résistance à l'attrition en fonction du dosage en gravillons.

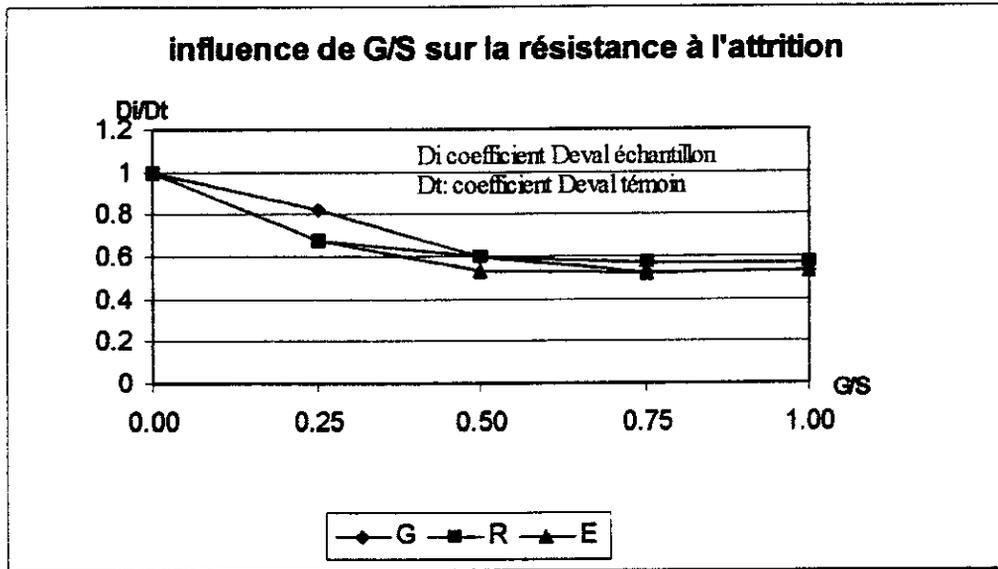


Figure III-2 :Influence de G/S sur la résistance à l'attrition[2]

• La résistance à la compression

Un ajout de gravillons avec un rapport massique G/S égale à 0.25 se révèle très valorisant; 50% d'amélioration de cette caractéristique très importante et l'objectif recherché dans toute étude du béton en particulier celui destinée à la structure. Quelle que soit la nature du gravillon ajouté à partir de 0.25 l'influence est beaucoup moins significative.

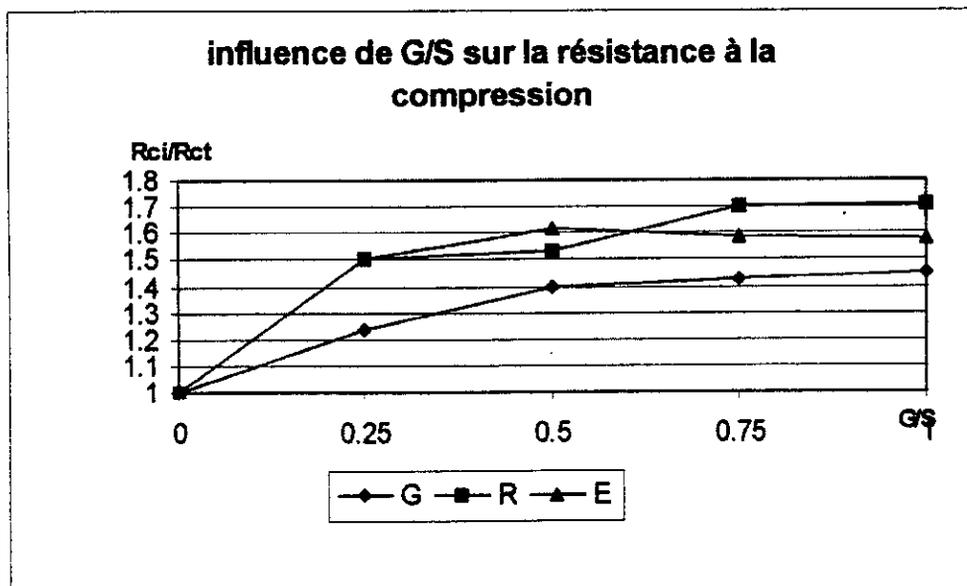


Figure III-3 : Influence de G/S sur la résistance à la compression[2]

• Module d'élasticité

Les bétons de sable ont des modules d'élasticité plus faible que ceux des bétons classiques : c'est une donnée générale des matériaux granulaires (0/D), pour les quels le module d'élasticité diminue lorsque le diamètre du gros granulat D_{max} diminue. Un béton de sable ayant une résistance à la compression de 24 à 30 MPa a généralement un module d'élasticité de l'ordre de 22000 MPa à 28 jours.

L'ajout de gravillons comme indique la figure c fait varier le module d'élasticité du béton de la même façon que la résistance à la compression. Le gain étant encore plus net quant le rapport du gravillon sur sable (G/S) passe de 0 à 0.25 et l'absence de l'influence est encore plus grande au delà de ces valeurs.

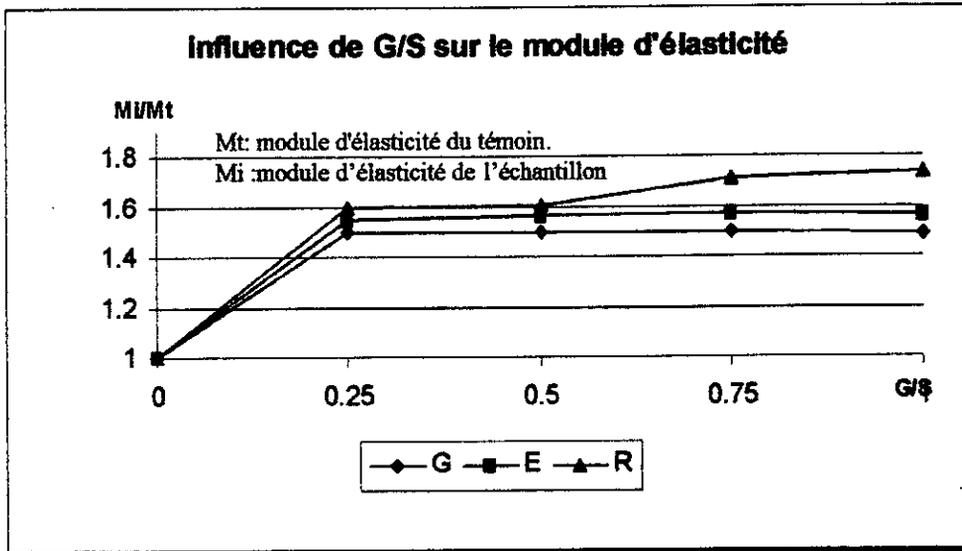
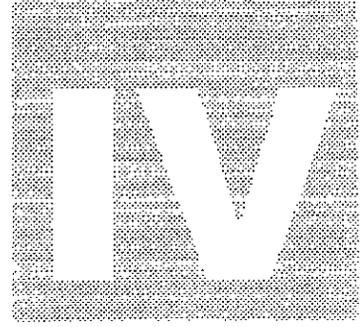


Figure III-4 : Influence de G/S sur le module d'élasticité[2]

Finalement, on peut dire que l'ajout d'une quantité de gravillon limitée telle que le rapport du gravillon sur sable soit inférieur à 0.5 ($G/S < 0.5$) est suffisante pour améliorer les performances du béton.

Lorsque le rapport G/S est compris entre 0.25 et 0.5 toutes les propriétés des bétons de sable testées sont améliorées considérablement, notamment le module d'élasticité et la résistance à la compression; principales caractéristiques des bétons de structure. Aussi le fait que l'ajout de gravillons révèle inopérant au-delà d'un plafond faible tel que $G/S < 0.5$ constitue un élément très intéressant qui pourrait être à la base d'une famille de bétons.



Méthodes de formulation des bétons de sable

IV. Les méthodes de formulation

IV.1. Définition

Le but de la formulation d'un béton de sable est de trouver les proportions des différents constituants, à fin de réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent aux critères techniques et économiques. Ainsi toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème. Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchées successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique. A ce titre il y a lieu de présenter deux (02) types de formulations, dont l'une est théorique et l'autre est expérimentale, en se basant sur les deux (02) critères principaux des bétons structuraux

- La résistance mécanique.
- La maniabilité qui est la facilité de la mise en œuvre.

IV.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les granulats et donnant une certaine durabilité au matériau durci.

Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot [1] a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/D_{\max}).

Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit :

$$V = V_0 (d / D_{\max})^{1/5} \quad (1)$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V_0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

D_{\max} : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

IV.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable

Dans le but d'optimiser la compacité du béton de sable, les constituants du mélange sont séparés en deux (02) fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à $80 \mu\text{m}$ et qui sont le ciment, les fines d'ajout et la fraction du sable inférieure à $80 \mu\text{m}$.
2. Toute l'étendue du sable comprise entre $80 \mu\text{m}$ et le diamètre maximal du sable D_{\max} , ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à $80 \mu\text{m}$. provenant des fines d'ajout.

En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à $80 \mu\text{m}$ et l'étendue du sable comprise entre $80 \mu\text{m}$ et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot

$$P_s = V = 0.75 (0.08/D)^{1/5} \quad (2)$$

$P_s(v)$: Porosité du sable d'étendu $80 \mu\text{m}$ et D_{max}

D_{max} : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (V_0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7 - 0.8).

Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure $80 \mu\text{m}$, et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relevant surtout des forces électriques inter-granulaires.

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) et le volume des vides associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

$$[\text{Fines}] = [\text{Vides}].$$

Il suffit de combiner les deux (02) résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

$$[\text{Fines}] = 0.38 (0.08/D_{\text{max}})^{1/5}.$$

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente.

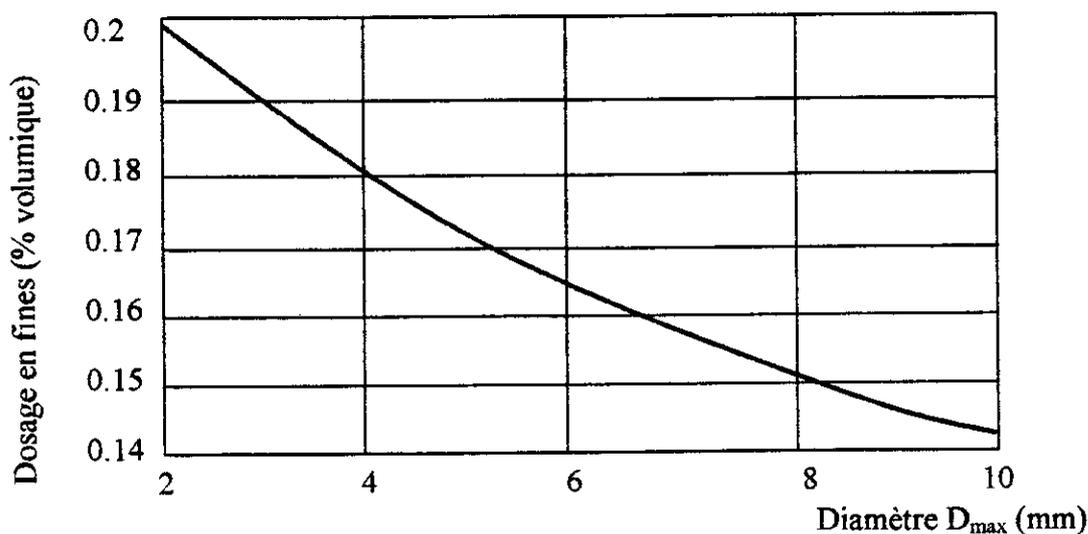


Figure IV-1 : Influence du diamètre D_{max} du sable sur le dosage en fines.[1]

IV.2.2. Dosage en eau d'un béton de sable

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement e et v .

$$(e + v)_{\min} = 0.8 (d/D_{\max})^{1/5} \quad (3)$$

Cette formule exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange (d). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

$$d = (60 / (f \times \rho)) \text{ mm.} \quad (4)$$

Avec:

f : surface spécifique exprimée en cm^2/g du constituant.

ρ : densité du constituant exprimée en g/cm^3 .

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés: la dimension des floccs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale comme la figure (IV.2) le montre :

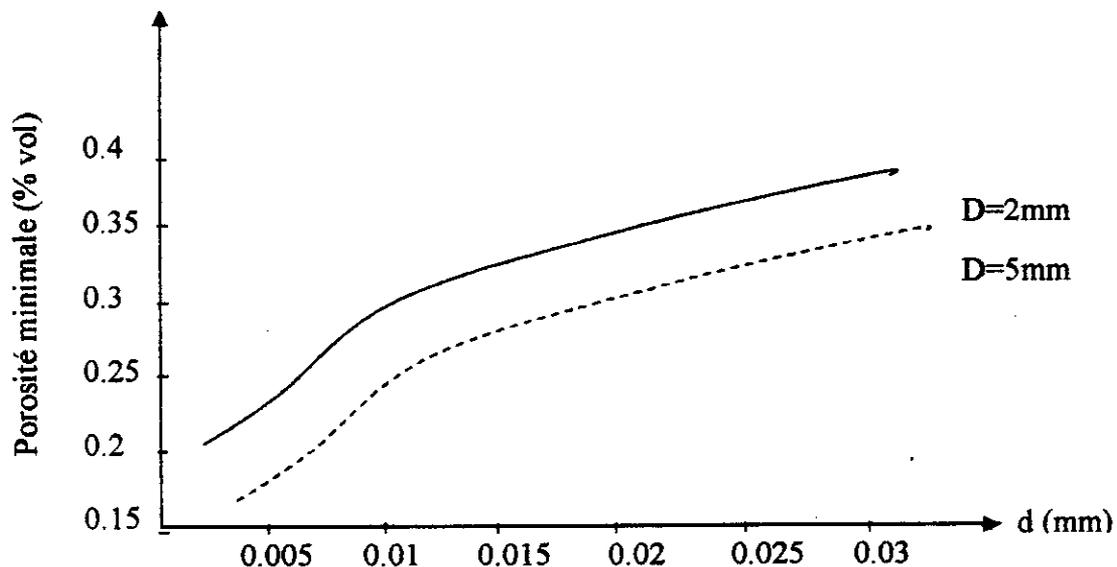


Figure IV-2: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable[1].

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume des vides (v).

En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la figure (IV-3) nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

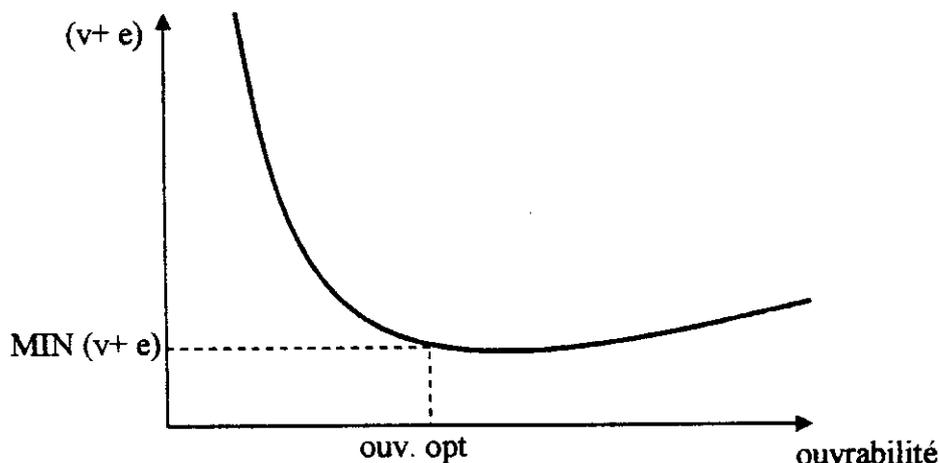


Figure IV-3: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée[1].

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piègera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité $(e+v)$ supérieure à $(e+v)_{\min}$. alors pour des quantités d'eau supérieures à celle qui donne l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans les bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[\text{Vides}] = K [\text{eau}] \quad (5)$$

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

IV.2.3. Dosage en sable

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, (1m^3), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fins, eau, vide).

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fine}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \quad (1/\text{m}^3). \quad (6)$$

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à $80\mu\text{m}$, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

IV.2.4. Estimation de la résistance en compression

Après avoir optimiser la compacité et déterminer les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [1] a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad (7)$$

Avec :

- K_f : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;
- R_c : classe vraie du ciment (MPa) ;
- E : dosage en eau total (l/m^3) ;
- V : air piégé (l/m^3) ;
- C : dosage en ciment (kg/m^3) ;
- R_b : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec :

$$K_1 = K_{cv}(CV/C) + K_{fs}(FS/C) ;$$

$$0.2 < K_{cv} < 0.4 \quad 2 < K_{fs} < 3.3 \quad K_1 \leq 0.5$$

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

$$0 < K_{fil} \leq 0.4 \quad K_1 < 0.2$$

K_1 : coefficient pouzzolanique

K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

K_{cv}, K_{fs}, K_{fil} : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

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

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente [1], alors que d'autres paramètres pourraient influencer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques.

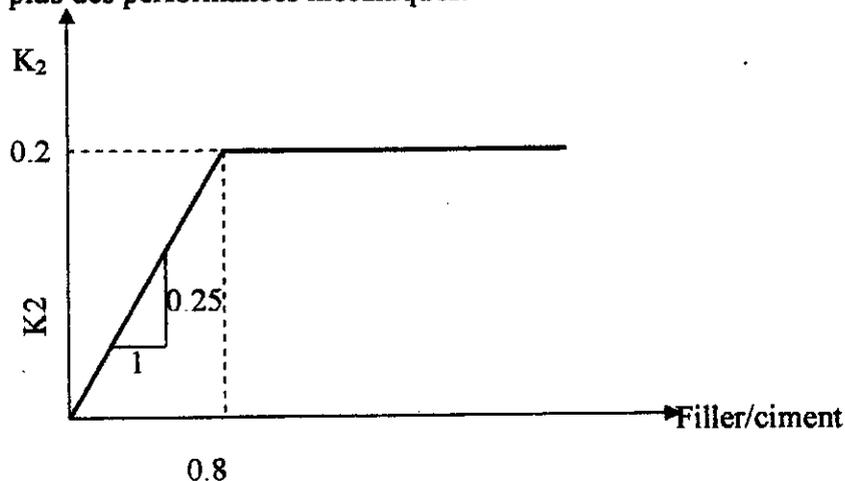


Figure IV-4: Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).[1]

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, toute fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité regroupant les fines d'addition et le ciment, alors que l'optimum de la résistance s'obtient en se fixant le rapport des dosages en fines d'addition-ciment au maximum d'activité. Le problème revient à résoudre le système de deux équations simples

- Dosage en ciment + dosage en fines d'ajout = dosage en fines.
- Dosage en fines d'ajout / dosage en ciment = optimum d'activité.

Il en résulte de tout ce qui précède que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable. Tout de même elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme.

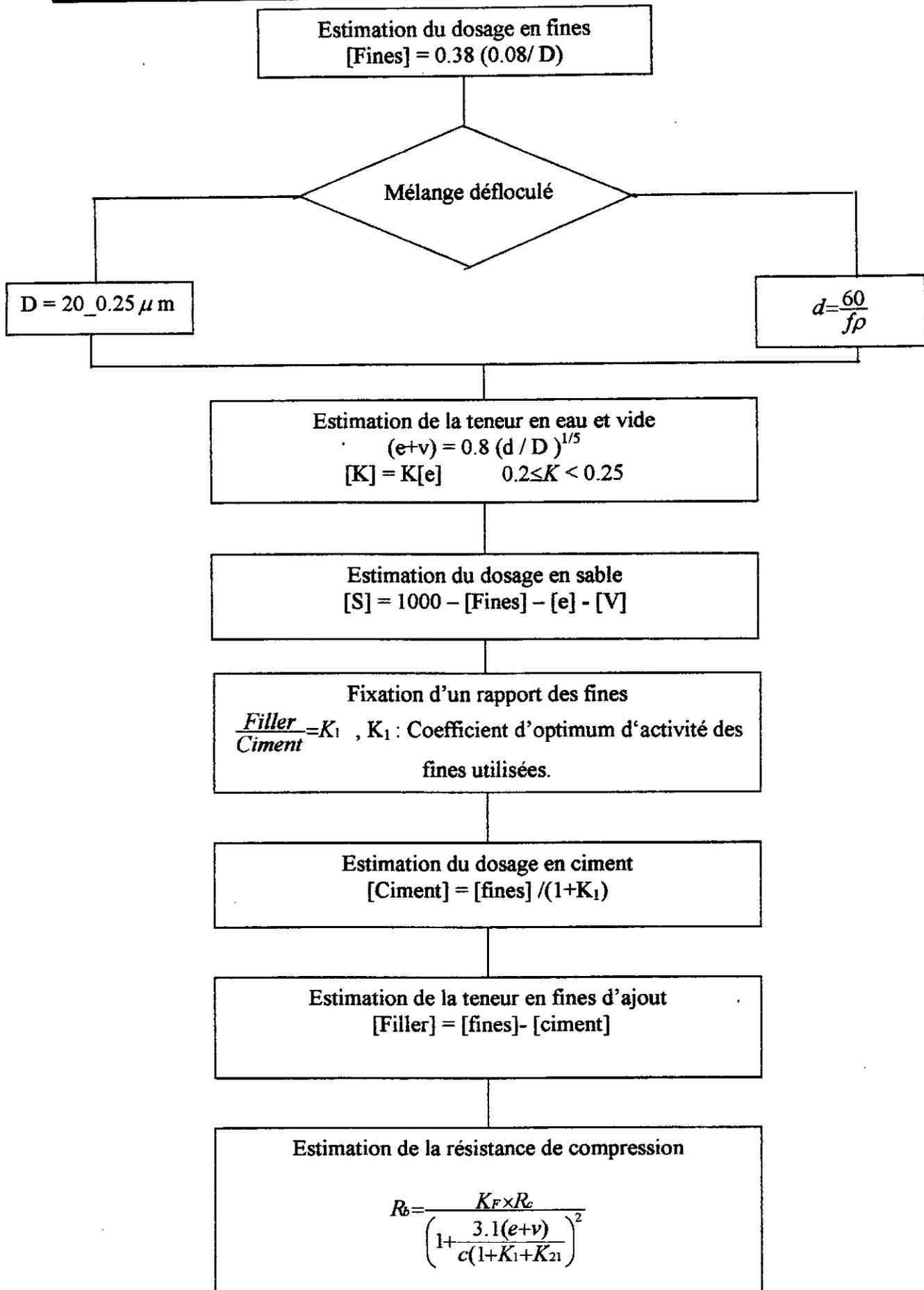


Figure IV.5 : organigramme de la méthode théorique

IV.3. Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable

Dans le même but recherché par l'approche théorique, diverses méthodes expérimentales ont été mises au point ; ceci est dû aux nombreux facteurs qui sont à prendre en compte lors d'une étude de composition d'un béton. Chacune de ces formules conférerait au béton certaines qualités au même temps des défauts. La base de toutes ces méthodes est la réalisation des légères gâchées de béton à fin d'effectuer quelques mesures susceptibles de donner une appréciation à l'aptitude du béton dans sa destination.

La méthode présentée ici est une adaptation de la méthode de Baron-LESAGE : Méthode itérative, les gâchées réalisées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité et de la masse volumique apparente. A noter que plusieurs formulations de béton de sable ont déjà été réalisées par cette méthode et ont donné toute satisfaction.

IV.3.1. Etape de la formulation :

Après avoir rendu compte des matériaux entrant dans la composition du béton par une identification précise, l'obtention du mélange doit satisfaire à l'ordonnancement suivant :

IV.3.1.a. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Pour cela on cherche à réaliser un béton de sable dont la maniabilité est comprise entre 7 et 10 secondes au maniabilimètre LCPL ; ce béton est composé seulement de ciment, d'eau et de sable.

1. Le dosage en ciment

Les dosages en ciment sont souvent influencés par la destination du béton (bâtiment, barrage, milieu agressif... etc.), mais on opte toujours à des minimums selon les prescriptions et les normes en vigueur. Ces dosages sont fixés lors de l'étude et notés par C (kg/m^3).

2. Dosage en eau

L'estimation du dosage en eau est approximative. A ce stade de la formulation et sur la base de l'expérience, les praticiens donnent à titre indicatif un dosage en eau de 220 l/m^3 pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3 , 250 l/m^3 d'eau pour un dosage en ciment de 400 kg/m^3 , mais on peut toujours utiliser la formule exposée dans la méthode théorique permettant d'estimer la quantité d'eau.

IV.3.1.b. Dosage en sable

Dans un premier temps et pour permettre la défloculation des fines, un fluidifiant réducteur d'eau au dosage normal préconisé par le fabricant et qui est un pourcentage d'éléments inférieurs à $80 \mu\text{m}$ [1]. Connaissant sa densité, on peut avoir son volume, en sachant aussi que le béton contient toujours un volume d'air résiduel qui se situe entre 5 et 7 % du volume dans le béton de sable. Le dosage en sable peut être calculé par soustraction des différents volumes des constituants précédents

$$V_{\text{sable}} = 1000 - V_c - V_{\text{adj}} - V_{\text{air}} - V_{\text{eau}} \quad (8) \quad (\text{les volumes exprimés en litre}).$$

Connaissant la masse volumique absolue du sable, on peut déduire la masse nécessaire pour la formulation d'un mètre cube (1 m^3) du béton de sable.

$$M_{\text{sable}} = MVA * V_{\text{sable}}$$

M_{sable} : masse nécessaire pour 1 m^3 du béton de sable

MVA_{sable} : masse volumique absolue du sable.

V_{sable} : volume du sable.

Après détermination des différentes proportions des constituants, cette formulation permet de calculer la masse volumique apparentes théorique ($MVAT$) en sommant l'ensemble des masses ainsi calculées pour le volume unitaire (1 m^3).

$$MVAT = m_{\text{ciment}} + m_{\text{eau}} + m_{\text{adj}} + m_{\text{sable}} \quad (9)$$

IV.3.2. Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule

Le mélange obtenu selon les formules précédentes doit répondre aux objectifs fixés et qui se résument dans les deux (02) critères essentiels :

- La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (9)
- La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre.

Dans le cas où la masse volumique apparente réelle ($MVAR$) obtenue via l'expérience ne correspond pas à la masse volumique apparente théorique ($MVAT$), la formule du béton doit être corrigée à l' aide de l' équation itérative suivante (correction sur le sable).

$$S_i = S_{i-1} (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V * MVA_{\text{sable}} . \quad (10)$$

Ou S_i : dosage en sable après correction

S_{i-1} : dosage en sable avant correction

$MVAT$, $MVAR$: les masses volumiques du béton théorique et réelle

MV_{sable} : masse volumique absolue du sable

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

Il sera rajouté si l'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente).

Il sera retranché si l'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule)

Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle.

En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s , et la formule fait le mètre cube du béton de sable

IV.3.3. Détermination du dosage en fines d' adition

Les fines d'ajout destinées à corriger l'indice des vides des sables et à limiter le dosage en ciment des bétons de sable Ils sont incorporées au mélange de base à un rapport E / C constant et à un dosage optionnel permettant d'augmenter la compacité sans changement du volume total, ce qui revient à dire que la masse volumique théorique du mélange et la

masse volumique réelle restent égales. Pour cela des gâchées de béton de sable seront réalisées aux différents dosages en fines dans leur plage d'emploi usuelle.

Pour chaque gâchée, les essais de maniabilité et la détermination de la masse volumique doivent être réalisés afin de les comparer aux critères imposés et fixés précédemment. Si ces derniers ne sont pas vérifiés, la correction sur le sable s'effectue toujours selon la formule suivante jusqu'à égalité des masses volumiques théorique et expérimentale.

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \quad (11)$$

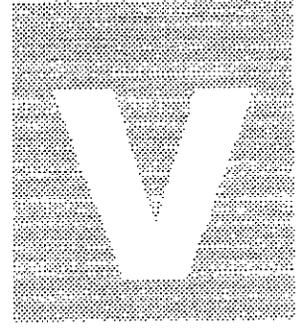
Connaissant la maniabilité et la masse volumique pour chaque dosage en fines d'addition, on trace les courbes correspondantes : la masse volumique en fonction du dosage en fines et l'évolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines. Ces deux (02) courbes permettent de définir les dosages optimums en fines et en sable correspondant à la formule la plus compacte et la plus maniable.

Toutefois pour des raisons économiques ou lorsque l'ajout de fines n'améliore que très peu les caractéristiques, le dosage en fines peut être pris avant l'optimum [1]

IV.4. Evaluation de la résistance

Dans le but de détermination de la résistance caractéristique du béton de sable ainsi formulé, des essais mécaniques classiques sont effectués. Si les résistances obtenues ne correspondent pas à celles recherchées, elles peuvent être modifiées en jouant sur les paramètres de départ; augmentation ou réduction du dosage en eau, en adjuvant, ou changement du ciment.

La méthode expérimentale permet de formuler des bétons de sable et conduit à réaliser un nombre important de gâchées en laboratoire ; le recours préalable à une approche théorique constitue un outil efficace et utile et permet de réduire considérablement ce nombre de gâchées



Expérimentation

V. PARTIE EXPERIMENTALE

V.1. Introduction

Après avoir présenté la synthèse bibliographique de ce travail qui nous a permis d'acquérir les notions nécessaires et les éléments de réflexion, on entame la partie expérimentale en se fixant comme objectif la réalisation d'un béton de sable de dune performant capable d'être utilisé comme un béton de structure.

L'étude qui suit comporte trois phases :

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'identification des matériaux de base entrant dans le confectionnement du béton de sable, ceci par une étude de leurs caractéristiques physico-chimiques. En fait, la connaissance de certains paramètres est nécessaire et constitue une base sur laquelle on établit la formulation du mélange.

Dans la deuxième partie, on commence le confectionnement des différentes formules corrigées par l'apport des deux matériaux correcteurs (sable concassé, gravillon) à différents pourcentages. Des essais en compression et en traction, à différents âges, ainsi que des mesures de la masse volumique ont été effectués

La troisième partie est basée sur les résultats obtenus à la deuxième partie, on doit établir le choix des compositions adéquates, auxquelles des approches mécaniques des lois de comportement classiques sont élaborées.

V.2. Identification des matériaux utilisés

La réalisation de certains essais et analyses de base sur les matériaux utilisés au cours de ce travail est d'un intérêt primordial. En effet, la connaissance des propriétés physicochimiques des matériaux permet la bonne formulation du béton, et facilite ainsi l'interprétation des résultats obtenus.

Les essais à effectuer pour chaque matériau sont :

- Granulométrie ;
- Module de finesse ;
- Equivalent de sable ;
- Essai au bleu de méthylène ;
- Analyse chimique ;
- Friabilité des sables ;
- Micro Deval ;
- Masse volumique (absolue, apparente) ;
- Compacité et porosité.

Tous les essais sont effectués suivant les normes en vigueur mentionnées dans l'annexe.[1,2,3,4,5.]

□ Module de finesse

Dans le cas des bétons hydrauliques des structures, le module de finesse est égal au centième de la somme des refus exprimés en pourcentage pondéral des tamis 0,16-0,315-0,63-1,25-2,5-5mm. Il est noté M_f

□ La surface spécifique

Exprimée en mètre carré par unité de poids, la surface spécifique est égale à la somme des surfaces extérieures de tous les grains. Elle varie avec la dimension des grains : plus le matériau est fin, plus la surface spécifique est grande.

La formule de DURIEZ, permet de la calculée

$$\sum = 4.75 + 1.3f$$

f : Le pourcentage de fines ($d < 80 \mu m$).

□ La compacité

La compacité d'un béton est définie comme le rapport du volume solide sur le volume total, c'est le complément à l'unité de la porosité.

$$C = (V_{\text{plein}}) / (V_{\text{apparent}})$$

$$C = (MV_{\text{apparente}}) / (MV_{\text{absolue}})$$

□ La porosité

La porosité est le complément à l'unité de la compacité

$$P = 1 - C$$

V.3. Sable de dune

Le sable qui a été utilisé dans nos essais est un sable de dune provenant de la région de Ouargla, et qui a été prélevé de manière assurant son homogénéité. Les résultats des essais sont exposés ci après :

V.3.1. Analyse granulométrique

Tableau V.1 Analyse granulométrique du sable de dune

| Tamis (mm) | Tamisât (%) |
|-------------|-------------|
| 2 | 100 |
| 1 | 99,81 |
| 0,63 | 99,75 |
| 0,5 | 99 |
| 0,4 | 97,55 |
| 0,315 | 91,68 |
| 0,2 | 54,98 |
| 0,16 | 30,56 |
| 0,1 | 9,4 |
| 0,08 | 2,87 |

V.3.2. Caractéristiques physiques

- $M_f = 0,78$;
- Equivalent de sable = 87,25 % ;
- Valeur au bleu de méthylène = 0,03 ;
- Friabilité = 7,20 % ;
- Masse volumique absolue = 2560 kg/m³ ;
- Masse volumique apparente = 1500 kg/m³ ;
- Compacité = 58,2 % ;
- Porosité = 41,8

V.3.3. Analyse chimique

Tableau V.2 : Analyse chimique sommaire du sable de dune

| Eléments | Pourcentage (%) |
|--|-----------------|
| Insoluble (Silice + Silicates) | 98,24 |
| Oxyde de fer (Fe_2O_3) et Alumine (Al_2O_3) | 1,04 |
| Sulfates ($\text{SO}_4 \text{ Ca}, 2 \text{ H}_2\text{O}$) | Traces |
| Chlorures (NaCl) | 0,18 |
| Carbonates ($\text{CO}_3 \text{ Ca}$) | 1,71 |
| Anhydride Carbonique (CO_2) | 0,75 |
| Perte au feu à 1050 °C | 0,82 |
| Eau de constitution (H_2O) | 0,93 |
| BILAN CHIMIQUE PONDERAL | 99,81 |

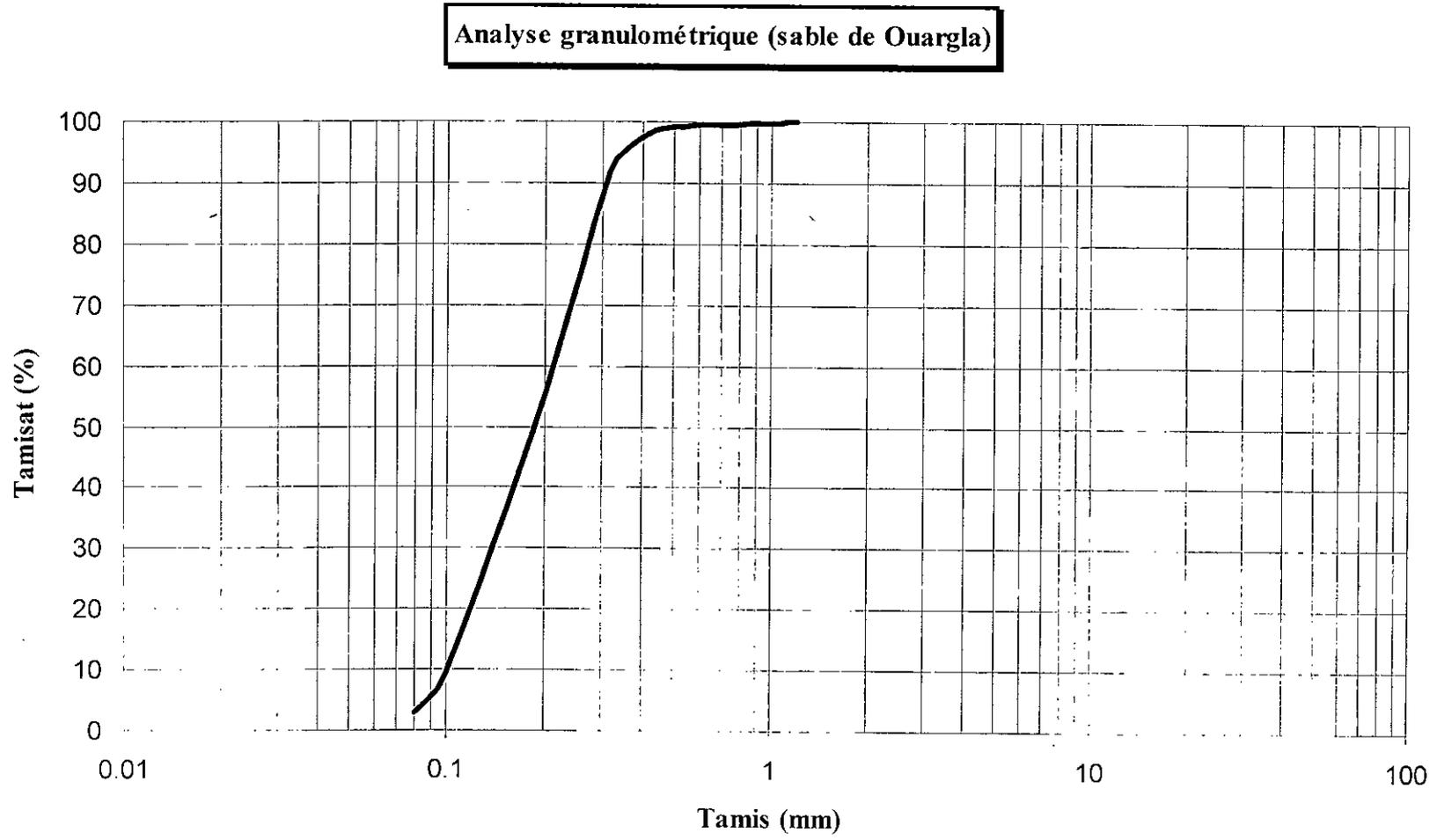


Figure V.I Analyse granulométrique du sable de Ouargla

V.4. Sable de concassage

C'est un sable de concassage d'une roche tendre provenant de la carrière JOBERT. Les résultats des essais sont présentés comme suit.

V.4.1. Analyse granulométrique

Tableau V.3 Analyse granulométrique du sable concassé

| Tamis (mm) | Tamisât (%) |
|-------------|-------------|
| 6,3 | 100 |
| 5 | 99,65 |
| 4 | 92,66 |
| 2,5 | 72,68 |
| 2 | 67,75 |
| 1,25 | 49,33 |
| 1 | 47,18 |
| 0,63 | 37,42 |
| 0,5 | 35,8 |
| 0,4 | 33,6 |
| 0,315 | 31,17 |
| 0,2 | 27,6 |
| 0,16 | 25,98 |
| 0,1 | 23,36 |
| 0,08 | 20,47 |

V.4.2. Caractéristiques physiques

- $M_f = 2,83$;
- Equivalent de sable = 52,3 % ;
- Valeur au bleu de méthylène = 0.15 ;
- Friabilité = 55,6 % ;
- Masse volumique absolue = 2685 kg/m^3 ;
- Masse volumique apparente = 1527 kg/m^3 ;
- Compacité = 56,87 % ;
- Porosité = 43,13 %.

V.4.3. Analyse chimique

Tableau V.4 : Analyse chimique sommaire du sable concassé.

| Eléments | Pourcentage (%) |
|--|-----------------|
| Insoluble (Silice + Silicates) | 9,8 |
| Oxyde de fer (Fe_2O_3) et Alumine (Al_2O_3) | 1,75 |
| Sulfates ($\text{SO}_4 \text{ Ca}, 2 \text{ H}_2\text{O}$) | Traces |
| Chlorures (NaCl) | 0,23 |
| Carbonates ($\text{CO}_3 \text{ Ca}$) | 82,05 |
| Anhydride Carbonique (CO_2) | 36,10 |
| Perte au feu à 1050 °C | 40,50 |
| Eau de constitution (H_2O) | 4,4 |
| BILAN CHIMIQUE PONDERAL | 98,23 |

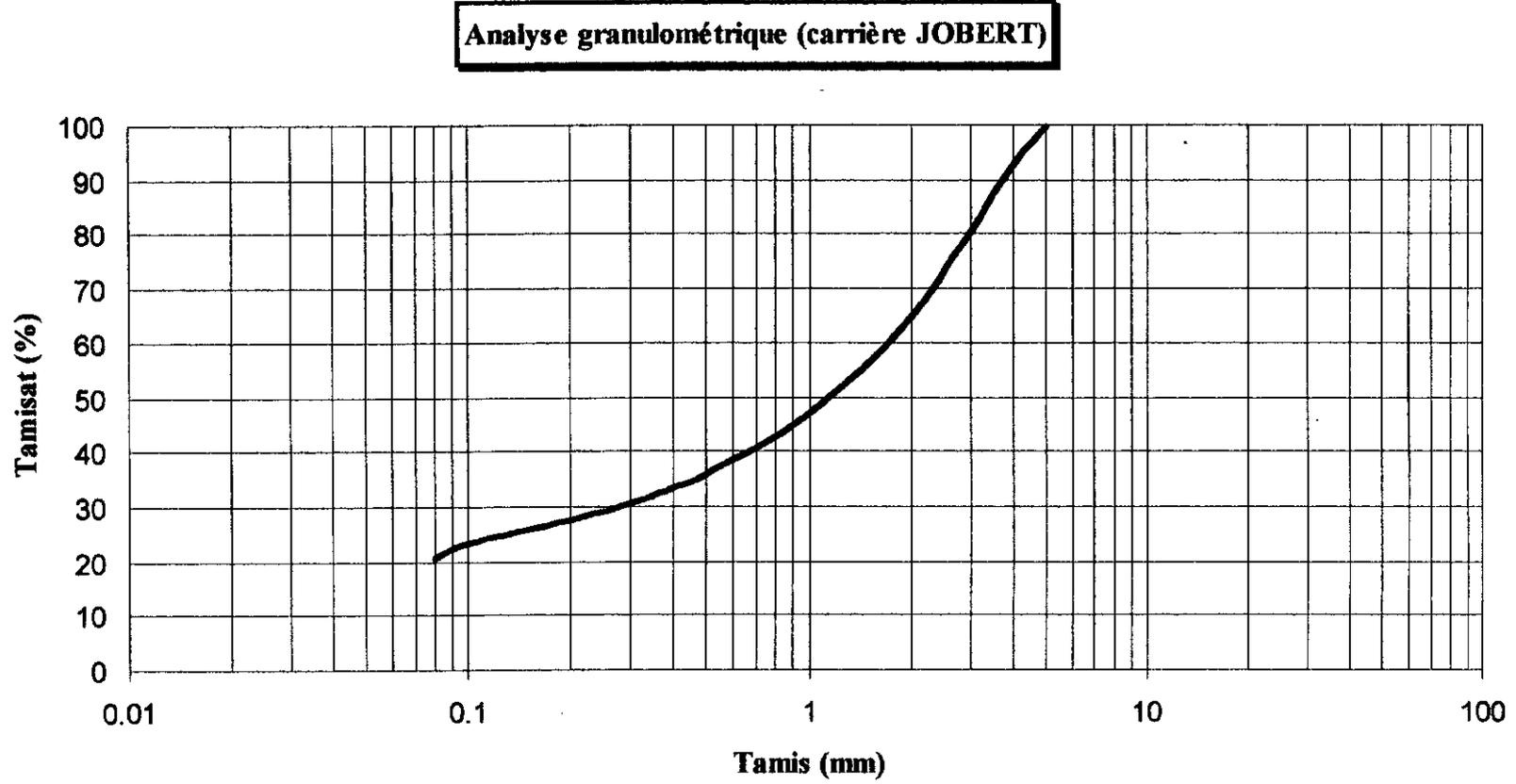


Figure V.2 Analyse granulométrique du sable concassé (carrière JOBERT)

V.5. Gravillon

Nous avons utilisé un gravillon d'une roche basaltique dure qui provient de la carrière de Cap DJINET. Les résultats des essais sont présentés dans ce qui suit :

V.5.1. Analyse granulométrique

Tableau V.5 Analyse granulométrique du gravillon

| Tamis (mm) | Tamisât (%) |
|-------------|-------------|
| 16 | 100 |
| 12,5 | 100 |
| 10 | 100 |
| 8 | 95,3 |
| 6,3 | 74,15 |
| 5 | 59,9 |
| 4 | 38,25 |
| 2 | 5,75 |
| 1 | 1,35 |
| 0,5 | 0,95 |
| 0,4 | 0,9 |
| 0,315 | 0,85 |
| 0,2 | 0,75 |
| 0,1 | 0,65 |
| 0,08 | 0,45 |

V.5.2. Caractéristiques physiques

- Masse volumique apparente = 1000 kg/m^3 ;
- Masse volumique absolue = 2640 kg/m^3 ;
- Coefficient d'aplatissement = 25,18
- Micro Deval = 1,56 % ;
- Los Angeles = 22,16 %.
- Compacité=37.88%
- Porosité=62.12%

V.5.3. Analyse chimique**Tableau V.6 : Analyse chimique sommaire du gravillon.**

| Eléments | Pourcentage (%) |
|---|-----------------|
| Insoluble (Silice + Silicates) | 72,41 |
| Oxyde de fer (Fe_2O_3) et Alumine(Al_2O_3) | 18,08 |
| Sulfates ($\text{SO}_4 \text{ Ca}, 2 \text{ H}_2\text{O}$) | Traces |
| Chlorures (NaCl) | 0,17 |
| Carbonates ($\text{CO}_3 \text{ Ca}$) | 5,12 |
| Anhydride Carbonique (CO_2) | 2,25 |
| Perte au feu à $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ | 4,39 |
| Eau de constitution (H_2O) | 2,14 |
| BILAN CHIMIQUE PONDERAL | 98,82 |

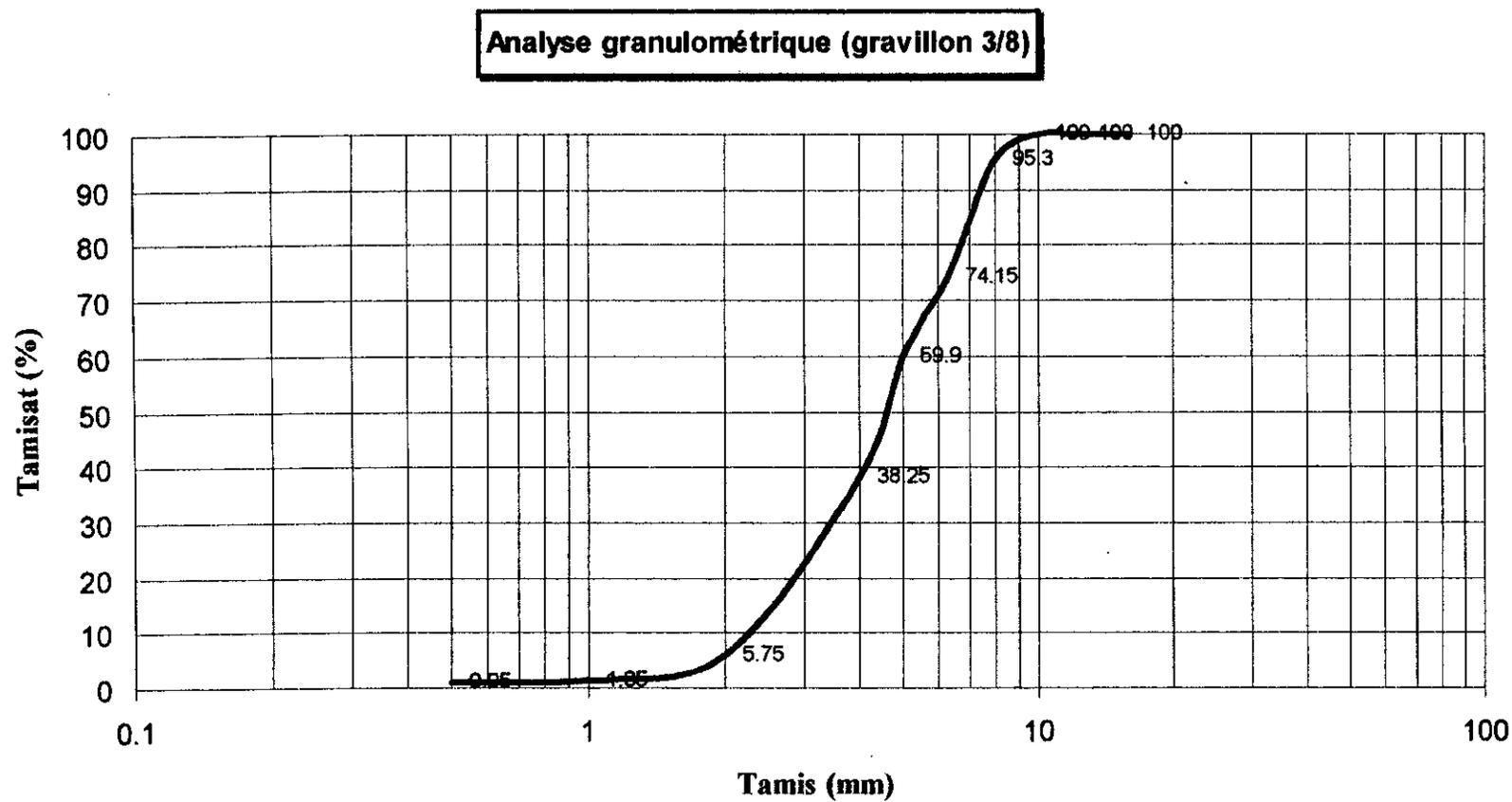


Figure V.3 : Analyse granulométrique du gravillon 3/8

V.7. Le ciment

Nous avons utilisé, dans les différentes formulations, un seul ciment de type CPJ, qui gagne aujourd'hui le monopole du marché algérien. Notre ciment provient de la cimenterie de Rais HAMIDOU enveloppé dans des sacs de 50 kg de fabrication récente, il possède donc toutes les capacités liantes. (Voir caractéristiques à l'annexe3);

-Sa masse volumique absolue = 3144.33 kg/m^3 .

V.8. l'eau de gâchage

Nous avons utilisé dans tous les essais une eau courante de robinet, connue par ces faibles pourcentages en sels, en sulfates et en acides, qui sont nuisibles au confectionnement du béton et surtout, sur sa durabilité.

V.9. L'adjuvant

Nous avons utilisé un adjuvant BV 40 compatible avec tous les ciments (voir annexe7)

Densité : 1.18

Plage normale d'utilisation : 0.3 à 1% du poids de ciment

V.10. Conclusion sur les matériaux utilisés

Dans une synthèse des résultats d'identification, on peut tirer les conclusions suivantes :

Tableau V.7 Comparaison entre les caractéristiques du sable de dune et celles du sable de carrière

| Caractéristiques | Sable de dune | Sable de carrière |
|-------------------|----------------------|-------------------|
| Granulométrie | Serrée | Étalée |
| Module de finesse | Inférieur aux normes | Dans les normes |
| Propreté | Très bonne | Hors normes |
| Dureté | Bonne | Faible |
| Analyse chimique | Bonne | — |

D'après ce tableau, le sable de dune et le sable concassé ne peuvent être utilisés chacun seul pour le confectionnement du béton; à cause de certaines caractéristiques hors normes. Leur mélange pourrait conduire à un bon résultat suite à la correction mutuelle de leurs caractéristiques.

Si on fait une comparaison entre les deux sables, on remarque bien que les inconvénients de l'un sont comblés par les avantages de l'autre.

V.11. FORMULATION DES BETONS DE SABLE

Comme nous avons dit auparavant la formulation consiste à trouver les meilleures proportions des différents constituants après d'être assuré de leur compatibilité, puis évaluer à l'aide des tests prédictifs le comportement du béton de sable.

Le choix de ces compositions est fait à partir des deux (02) critères principaux du béton de structure :

- La maniabilité.
- la masse volumique (MV).

➤ la maniabilité :

Pour apprécier cette caractéristique nous avons utilisé le maniabilimètre LCPC cité précédemment. On doit confectionner un béton de sable dont le temps d'écoulement sur cet appareil est compris entre 7 et 10s, ce qui correspond à un béton plastique.

➤ la masse volumique :

Il s'agit ici de la masse volumique du béton frais déterminée juste après avoir obtenu la maniabilité recherchée. De la même manière que pour les autres matériaux, on pèse une quantité de béton de sable frais occupant un volume connu. La masse volumique s'obtient par le rapport de la masse sur le volume.

V.11.1. Confectionnement du béton

Le béton doit être soigneusement confectionné et correctement mis en place pour que les résultats obtenus soient significatifs.

le confectionnement comporte deux étapes principales

➤ Le malaxage :

Le but de cette opération est d'homogénéiser le béton et lui donner une bonne cohésion, pour cela on commence à malaxer le ciment et le sable à sec suffisamment pour pouvoir entourer les grains de sable par le ciment, ensuite l'eau mélangée avec l'adjuvant est introduite dans le mélange à l'intérieur d'un malaxeur à mortier de 5L.

Les constituants du béton seront malaxés d'avantage jusqu'au mouillage complet des grains, Cette procédure a été adaptée pour toutes les compositions réalisées.

➤ Le serrage :

La mise en place du béton a été effectuée grâce à une vibration moyenne par piquage pour réduire au maximum le pourcentage de vides à l'intérieur des bétons et augmenter la compacité.

Les éprouvettes utilisées :

Nous avons utilisé au cours de cette étude deux types d'éprouvettes :

1. Les éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm pour toutes les compositions afin de mesurer les résistances à 7 et 28 jours
 - Les résistances à la compression sont obtenues par l'écrasement des cubes de dimensions (4×4×4) cm obtenus par découpage à la tronçonneuse des prismes (4×4×16) cm, alors que pour les résistances à la traction nous avons utilisé les éprouvettes telles qu'elles sont, et on les a écrasées selon l'essai de traction par flexion.
2. Les éprouvettes cubiques de dimensions (10×10×10)cm³ sont utilisées pour certaines compositions qui présentent des intérêts particuliers (compositions optimales). Ces éprouvettes sont en suite soumises à des essais d'extensométrie, permettant la mesure du module d'élasticité (module de Young)

V.12. Formulation de base (100% sable de dune)

La composition de base sert comme témoin. Elle comporte le ciment, l'eau de gâchage, un adjuvant plastifiant et le sable de dune.

V.12.1. Dosage en ciment

Dans le cas des bétons de sable, nous avons vu que le ciment qui convient le mieux est le ciment artificiel CPA, mais ceci n'exclut pas l'utilisation d'un ciment composé CPJ avec une indication particulière.

- Comme il est indiqué à la page(17) le ciment CPJ est divisé en deux fractions pondérales; 85% du poids de CPJ est considéré comme un CPA, et 15% est considéré comme des fillers calcaire.

Cette division conduit à une majoration de la classe de ciment de 18%.

Pour obtenir un béton de sable dosé à 320kg/m^3 en ciment CPA, on doit chercher le dosage en CPJ correspondant

$$[\text{CPA}] = 0.85 \times [\text{CPJ}] \rightarrow [\text{CPJ}] = \frac{[\text{CPA}]}{0.85} = \frac{320}{0.85}$$

$$[\text{CPJ}] = 376.4 \text{ kg/m}^3$$

On prend un dosage en CPJ égale à 375kg/m^3

Sachant que la masse volumique absolue de ciment est égale à 3145 kg/m^3 , alors son dosage volumique est égal à 119.3 l/m^3 .

$$[\text{CPJ}] = 119.3 \text{ l/m}^3$$

Les 15% de ciment restant sont considérés comme des fines calcaires, leur dosage est déterminé comme suit

$$[\text{fillers calcaire}] = 0.15 \times [\text{CPJ}]$$

$$[\text{fillers calcaire}] = 56.25 \text{ kg/m}^3$$

V.12.2. Dosage en adjuvant

Le dosage en adjuvant est pris égal à 0,4% du poids du ciment pour permettre une réduction de l'eau de gâchage de 10% (voir annexe7)

$$[\text{adj}] = \frac{0.4 \times 375}{100} = 1.5 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 1,18 \Rightarrow MV_{\text{adj}} = 1180 \text{ kg/m}^3$$

D'où le dosage volumique en adjuvant est égal à 1.3 l/m^3

$$[\text{adj}] = 1.3 \text{ l/m}^3$$

V.12.3. Dosage en eau

Le dosage en eau est fonction du dosage en ciment. L'expérience des praticiens, nous donne les valeurs suivantes :

□ 220 l/m^3 pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3

□ 250 l/m^3 pour un dosage en ciment de 400 kg/m^3

L'estimation approximative du dosage en eau pour un dosage en ciment de 375 kg/m^3 est de 235 l/m^3

Cette quantité doit être révisée lors de la réalisation des gâchées surtout avec l'utilisation des adjuvants réducteurs d'eau

Le dosage en adjuvant utilisé permet de réduire l'eau de 10% donc le dosage en eau est égal à 211.5 l/m^3

$$[\text{eau}] = 211.5 \text{ l/m}^3$$

Cette quantité doit être versée par étapes jusqu'à l'obtention de la maniabilité recherchée.

V.12.4. Teneur en air :

Un béton contient toujours un volume d'air. Dans le cas des bétons de sable, la teneur en air est de l'ordre 5 à 7%, on prend une valeur moyenne de 6%

$$[\text{air}] = \frac{6 \times 1000}{100}$$

$$[\text{air}] = 60 \text{ l/m}^3$$

V.12.5. Dosage en sable

Après avoir déterminé les valeurs du ciment, de l'eau, de l'adjuvant et d'air, le volume du sable s'obtient en complétant la formule d'un mètre cube

$$[\text{ciment}] + [\text{eau}] + [\text{adju}] + [\text{air}] + [\text{sable}] = 1000$$

$$[\text{sable}] = 607.9 \text{ l/m}^3$$

Sachant que la masse volumique absolue du sable est de 2560 kg/m^3 .

Le dosage massique en sable est égal à 1556.24 kg/m^3

Les résultats sur le maniabilimètre LCPC de cette composition en fonction de la quantité d'eau de gâchage sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau V. Maniabilité en fonction du dosage en eau

| Quantité d'eau en (l) | Maniabilité (s) |
|-----------------------|-------------------|
| 200 | 53 |
| 210 | 36 |
| 211,5 | 34,5 |

On remarque que la quantité d'eau de gâchage calculée théoriquement n'est pas suffisante pour l'obtention de la maniabilité recherchée ; ceci est dû à la finesse des grains du sable, et donc une quantité supplémentaire d'eau est nécessaire pour mouiller toute l'interface entre grains et facilite ainsi l'écoulement du béton.

Pour cela on doit corriger la formulation par l'équation itérative (10)

$$S1 = 1556,24 - (2144,24 - 2130,72) - 2560 \times 6 \times 10^{-3}$$

$$S1 = 1527,36 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \text{maniabilité égale } 27 \text{ s.}$$

$$S2 = 1527,36 - (2269,5 - 2181) - 2560 \times 10 \times 10^{-3}$$

$$S2 = 1413,26 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \text{maniabilité égale } 15 \text{ s}$$

$$S3 = 1413,26 - (2241,01 - 2173,51) - 2560 \times 5 \times 10^{-3}$$

$$S3 = 1332,96 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \text{maniabilité égale à } 9 \text{ s.}$$

La formule de base étant retenue, des essais de résistance à la compression ont été effectués à 7 et 28 jours, alors que pour la résistance à la traction, les essais sont effectués à 28 jours seulement.

Trois éprouvettes ont été testées à chaque essai et à chaque âge, et les résultats sont donnés dans le tableau ci-après :

Tableau V.9 Composition et caractéristiques de la formulation de base

| Dosage des éléments (kg/m ³) | | | | Maniabilité (s) | ρ_{th} (kg/m ³) | ρ_a (kg/m ³) | R _c (MPa) | | R _t (MPa) |
|--|----------|-------|---------|-----------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------|----------------------|
| Ciment | Adjuvant | Eau | Sable | | | | 7j | 28j | |
| 375 | 1,5 | 232,5 | 1332,96 | 9 | 2221,95 | 2084,19 | 8,03 | 16,73 | 1,24 |

Où :

ρ_{th} : masse volumique théorique.

ρ_a : masse volumique apparente.

R_c : Résistance à la compression.

R_t : Résistance à la traction .

Par rapport aux études précédentes sur le béton de sable, les caractéristiques de cette formulation sont considérables car elles ne sont atteintes que par la réalisation de plusieurs gâchées, alors que le recours aux méthodes de formulation exposées dans le chapitre IV a permis de réduire considérablement le nombre de gâchées, mais ses caractéristiques restent insuffisantes. Pour corriger cette insuffisance et atteindre les objectifs recherchés, on s'efforcera à avoir une granulométrie plus étalée et plus continue.

V.13. Première série d'essais

Dans cette phase, le sable de carrière est employé comme correcteur granulaire à des pourcentages différents. La démarche consiste à déterminer le pourcentage nécessaire en correcteur afin d'atteindre les résistances souhaitées. La maniabilité est toujours la base de l'acceptation des compositions.

Les pourcentages en correcteur varie entre 10% et 50% par pas de 10%.

Les compositions réalisées sont données dans le tableau suivant

Tableau V.10 Compositions du béton de sable avec ajout de sable concassé

| Compositions | BS10 | BS20 | BS30 | BS40 | BS50 |
|-----------------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Constituant(kg) | | | | | |
| Ciment | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 |
| Adjuvant | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Sable de dune | 1199,69 | 1066,39 | 933,10 | 799,79 | 666,49 |
| Sable concassé | 141,11 | 282,22 | 423,33 | 564,44 | 705,55 |
| Eau | 227,82 | 220,52 | 219,19 | 218,5 | 217,84 |

Les résultats des essais et les analyses effectués sur ces compositions sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau V.11 Caractéristiques des différentes compositions avec ajout du sable concassé

| Caractéristiques composition | ρ_{th} (kg/m ³) | ρ_a (kg/m ³) | Maniabilité (s) | R_c (MPa) | | R_t (MPa) |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------|-------|-------------|
| | | | | 7j | 28j | |
| BS10 | 2237,83 | 2114,75 | 8 | 9,90 | 18,88 | 1,37 |
| BS20 | 2258,23 | 2150,05 | 7 | 12,04 | 20,28 | 1,40 |
| BS30 | 2268,58 | 2170,80 | 9,5 | 12,71 | 21,76 | 1,84 |
| BS40 | 2278,7 | 2186,87 | 10 | 14,45 | 23,98 | 1,93 |
| BS50 | 2288,78 | 2202,03 | 7,5 | 14,6 | 24,5 | 1,98 |

Les graphes représentant l'évolution des compacités et les résistances mécaniques en fonction du dosage en correcteur sont donnés ci-après :

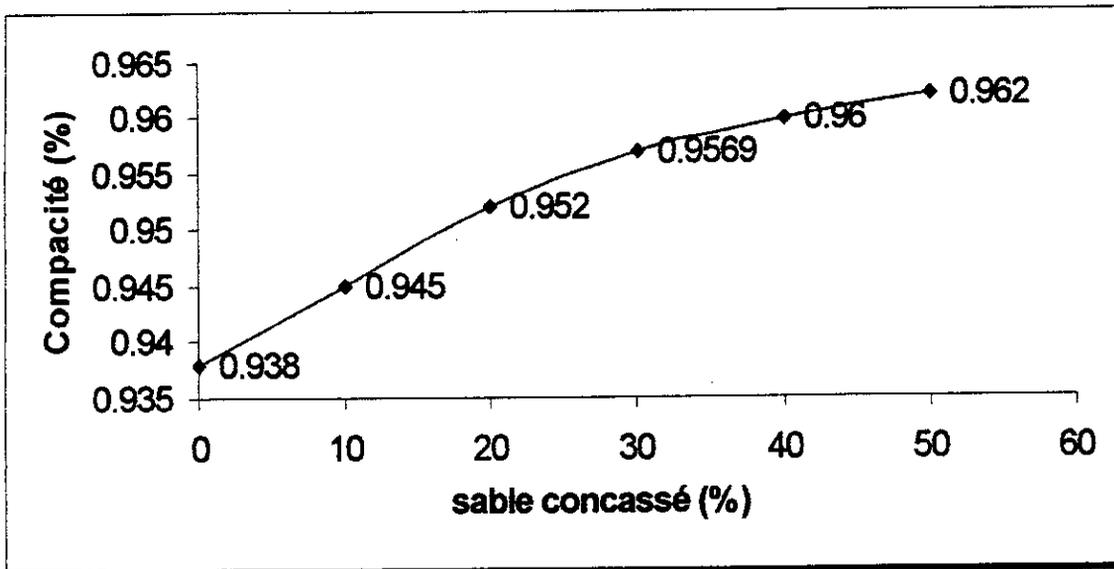


Figure V.4 Evolution de la compacité en fonction du dosage du sable concassé

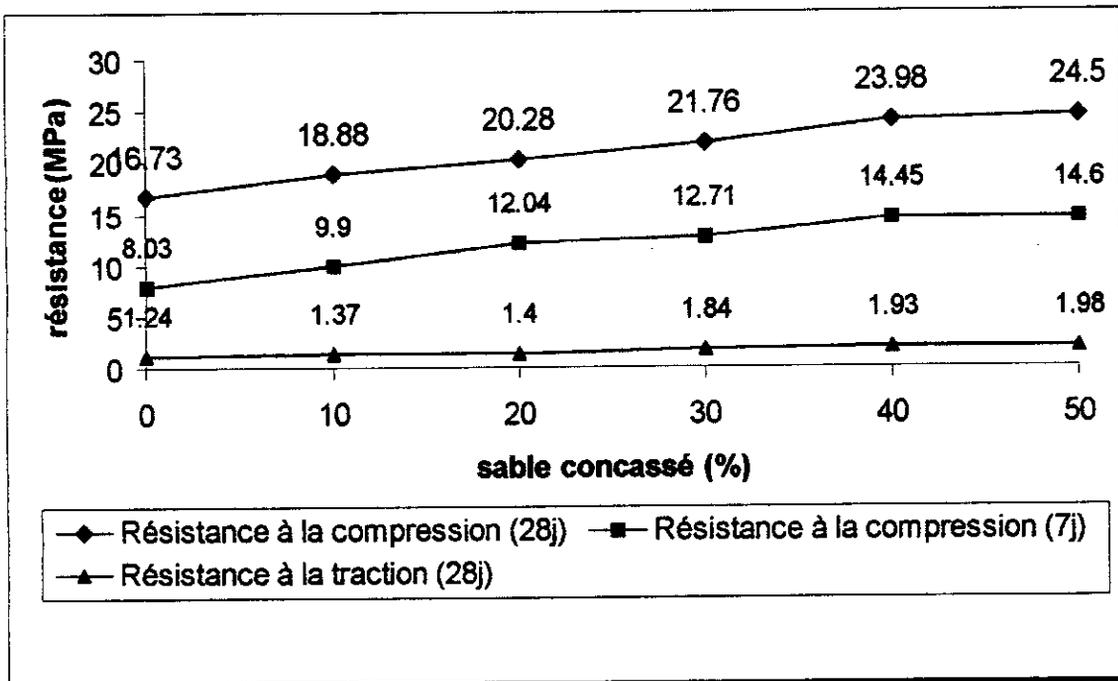


Figure V.5 Evolution des résistances en fonction du dosage en sable concassé

V.13.1. Interprétation des résultats

a) En faisant varier le pourcentage de sable concassé de 0 à 50% par pas de 10% on remarque que la compacité du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage du correcteur. Ceci s'explique par la granulométrie un peu étalée du sable correcteur et sa teneur en fines ; la granulométrie devient plus étalée, ce qui favorise le réarrangement des grains alors que les fines vont occuper les vides inter-granulaires du sable de dune et augmenter la compacité par diminution du volume des vides. Cette augmentation est plus visible entre 0 et 30% au

pourcentage élevé des vides à remplir qui devient de plus en plus limité, aussi la raison pour laquelle la masse volumique a augmenté.

b) On remarque que les résistances s'améliorent avec l'augmentation des pourcentages de sable concassé. Cela s'explique par l'existence de fines qui favorise l'arrangement des grains et le contact inter-granulaires, ce qui a pour conséquence la diminution d'eau de gâchage et par suite une augmentation de la résistance (E/C diminue). D'autre part, l'aspect anguleux que présentent les grains de sable concassé favorise considérablement le frottement entre grains et améliore de ce fait la cohésion inter-granulaire.

En effet cette amélioration est prévisible suite à la remarque précédente sur l'augmentation de la compacité facteur étroitement lié à la résistance.

L'ajout de sable concassé à 50% a permis d'obtenir un gain de résistance de l'ordre de 47,67% , qui est un gain très satisfaisant par rapport les objectifs recherchés.

V.14. Deuxième série d'essais :

Dans cette série d'essais, on procède à la correction par l'apport de deux matériaux correcteurs, le sable concassé et le gravillon, en jouant sur leur pourcentage, alors que le dosage total en correcteur est maintenu à 50%.

Le tableau suivant donne les constituants en poids des différentes compositions :

Tableau V.12 :Les compositions avec ajout du gravillon

| compositions | BSG10 | BSG20 | BSG30 | BSG40 | BSG50 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Constituant(kg) | | | | | |
| Ciment | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 |
| Adjuvant | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Sable de dune | 666,49 | 666,49 | 666,49 | 666,49 | 666,49 |
| Sable concassé | 564,44 | 423,33 | 282,22 | 141,1 | ----- |
| Gravillon | 137,46 | 274,93 | 412,39 | 549,86 | 687,32 |
| Eau | 218,36 | 216,23 | 215,63 | 214,94 | 214,56 |

Les résultats des essais sur ces compositions sont donnés dans le tableau ci-après :

Tableau V.13 Caractéristiques des différentes compositions avec ajout du gravillon

| Caractéristiques composition | ρ_{th} (kg/m ³) | ρ_a (kg/m ³) | Maniabilité (s) | R _c (MPa) | | R _t (MPa) |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------|-------|----------------------|
| | | | | 7j | 28j | |
| BSG10 | 2283,91 | 2212,42 | 9 | 9,4 | 24,18 | 2,03 |
| BSG20 | 2282,77 | 2211,50 | 8 | 15,3 | 29,78 | 2,47 |
| BSG30 | 2279,68 | 2218,13 | 10 | 16,71 | 32,45 | 2,89 |
| BSG40 | 2276,20 | 2200,40 | 8,5 | 16,55 | 31,32 | 2,74 |
| BSG50 | 2272,57 | 2159,46 | 9 | 14,89 | 27,03 | 2,52 |

Les graphes représentant l'évolution des compacités et des résistances mécaniques en fonction du dosage en correcteurs sont donnés ci-après :

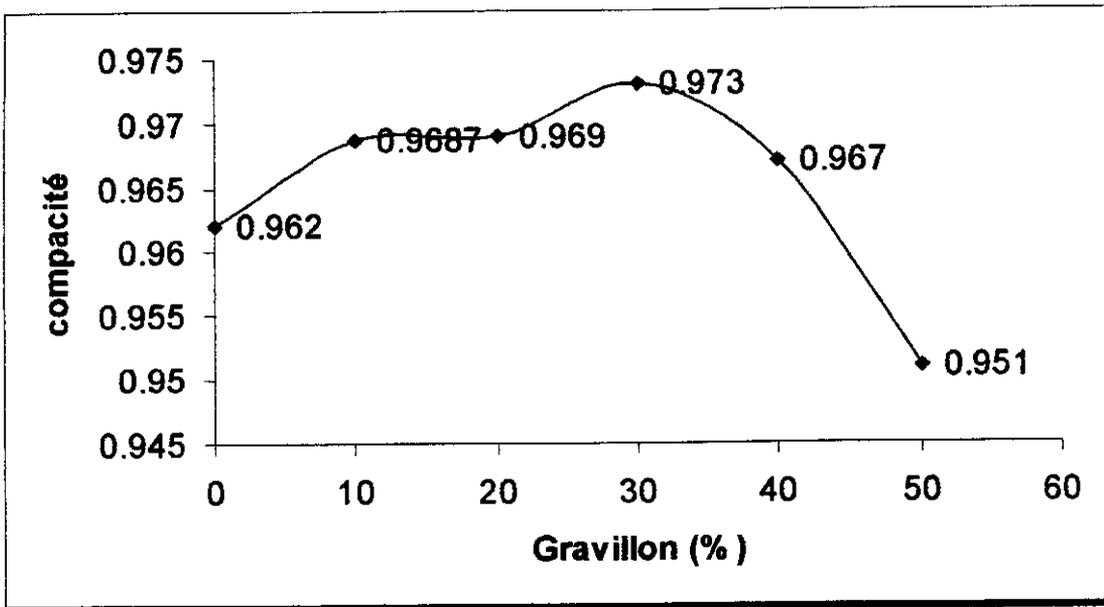


Figure V.6 Relation compacité dosage en gravillon

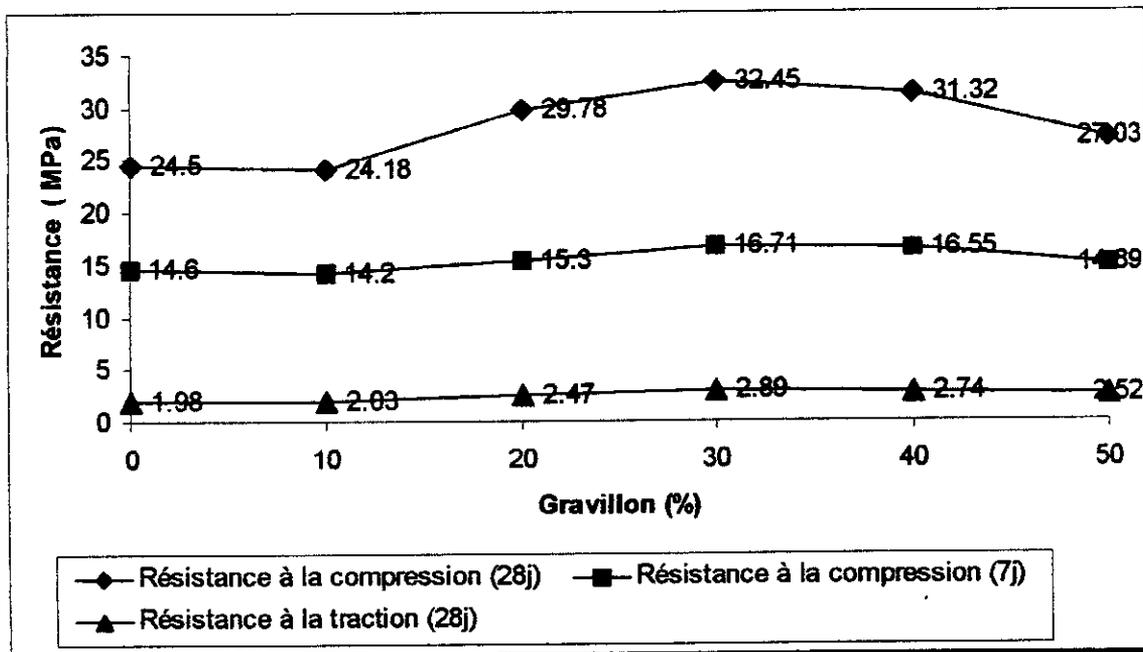


Figure V.7 Relation résistance dosage en gravillon

V.14.1. Interprétation des résultats

a) En faisant varier le pourcentage des deux matériaux correcteurs employés, on s'aperçoit que la relation compacité fonction du dosage en gravillon a une allure parabolique qui présente un optimum correspondant à 30% du gravillon.

Pour la partie gauche de la courbe, c'est-à-dire un dosage en gravillon inférieur à celui de l'optimum, on remarque que la compacité augmente. Ceci est attribué au gravillon qui fait étaler la granulométrie d'avantage et les grains des différents constituants trouvant une grande facilité à ce réarranger d'une manière plus compacte (ferme).

Pour le point correspondant à 30% de gravillon, on remarque la plus grande compacité (97,3%). Ceci permet de dire que le mélange est optimisé dans son squelette, c'est-à-dire que les proportions des différents constituants sont en bon rapport.

Les vides les plus gros créés par le gravillon sont occupés par les grains du sable de dune alors que les fines provenant du sable concassé sont suffisantes pour occuper les vides inter-granulaires des deux sables limitant de ce fait leur pourcentage au maximum.

Pour la partie droite de la courbe, c'est-à-dire un dosage en gravillon supérieur à 30%, on remarque que la compacité diminue d'une manière significative. Ceci est dû au pourcentage retranché du sable concassé, qui est un peu important.

En effet, la diminution du sable concassé entraîne une diminution des pourcentages des fines et une partie des vides inter-granulaires des sables reste inoccupée, ce volume des vides est à l'origine de la diminution de la compacité.

b) En traçant la courbe reliant les résistances en fonction du dosage en gravillon. On remarque que la courbe est aussi parabolique présentant le même point précédent comme pique (30% de gravillon).

Pour la partie gauche de cette courbe correspondant à un dosage en gravillon inférieur à 30%, le gravillon fait étaler l'étendu granulométrique, facilitant le réarrangement des grains et met en évidence l'effet du diamètre maximal (D_{max}), dont le béton tire une part de sa résistance. Cependant, le pourcentage du sable concassé est considérable pour assurer le frottement entre les grains et améliorer la cohésion inter granulaire, et le mélange acquis ainsi de plus en plus de résistance.

Au-delà de 30% de gravillon, on remarque une chute de résistance, de même que la compacité. Ceci est dû au manque des éléments anguleux qui deviennent de plus en plus insuffisants pour assurer le frottement entre grains et diminue dès lors la cohésion inter-granulaire d'où une chute de résistance.

Pour le point 30% du gravillon on obtient l'optimum de résistance, ceci est dû à la contribution de toutes les performances des éléments constituants le béton suite à leurs proportions convenables ainsi que leur affinité.

Le pourcentage du sable concassé est voisin de celui du gravillon. Le sable concassé assure pour sa part le frottement inter-granulaires, alors que le gravillon étale l'étendu granulométrique et facilite l'arrangement des grains. Ces deux facteurs favorisant la résistance sont disponibles dans cette composition, ce qui traduit la bonne résistance obtenue.

V.14.2. Choix de la composition optimale

Sur la base des résultats des essais effectués, on constate clairement que la composition optimale est BSG30 qui présente les meilleures résistances. Si on se réfère aux objectifs fixés d'avance, on remarque que plusieurs compositions sont satisfaisantes. Pour un intérêt économique et écologique nous avons jugé que la formule BS50 est aussi intéressante du fait qu'elle présente une résistance acceptable.

V.14.3. Tableau récapitulatif de la composition optimale

Tableau V.14 Caractéristiques de la composition (BS 32.45 FP 3/8)

| Dosage des éléments en (Kg/m ³) | | | | | | Maniabilité(s) | ρ_a (kg/m ³) | Compacité(%) | R _c (Mpa) | | R _t (Mpa) |
|---|----------|---------------|----------------|-----------|--------|----------------|-------------------------------|--------------|----------------------|-------|----------------------|
| Ciment | Adjuvant | Sable de dune | Sable concassé | Gravillon | Eau | | | | 7j | 28j | |
| 375 | 1,5 | 666,49 | 282,22 | 412,39 | 215,63 | 10 | 2218,13 | 97,36 | 16,71 | 32,45 | 2,89 |
| | | | | | | | | | 7j | 28j | |

La désignation de cette formule conformément aux normes est BS 32,45 FP 3/8

V.14.4. Tableau récapitulatif de la formule BS 50

Tableau V.15 Caractéristiques de la composition (BS24.5 FP)

| Dosage des éléments en (Kg/m ³) | | | | | Maniabilité(s) | ρ_a (kg/m ³) | Compacité(%) | R _c (Mpa) | | R _t (Mpa) |
|---|----------|---------------|----------------|--------|----------------|-------------------------------|--------------|----------------------|------|----------------------|
| Ciment | Adjuvant | Sable de dune | Sable concassé | Eau | | | | 7j | 28j | |
| 375 | 1,5 | 666,49 | 705,55 | 217,89 | 7,5 | 2202,03 | 96,63 | 14,6 | 24,5 | 1,98 |
| | | | | | | | | 7j | 28j | |

La désignation de cette formule conformément aux normes est BS 24,5 FP

BS 32.45 FP 3/8 : Béton de sable de résistance caractéristique de 32.45 MPa, de fluidité plastique avec gravillon 3/8

BS 24.5 FP : Béton de sable de résistance caractéristique de 24.5 MPa et de fluidité plastique

V.15. La troisième série d'essais

Dans cette partie les deux compositions précédentes(BS 32.45 FP 3/8) et (BS 24.5 FP) sont soumises à des essais supplémentaires pour mieux les caractériser et donner une idée sur le comportement des bétons de sable.

Dans ce qui suit, nous allons déterminer les déformations relatives sous charge, afin d'apprécier la loi de comportement(contrainte- déformation), le module d'élasticité et finalement le coefficient de Poisson.

Pour cela nous avons utilisé les éprouvettes cubiques d'arrêtes 10 cm. Ces éprouvettes sont équipées de jauges électriques permettant la mesure de la déformation dans les deux sens longitudinal et transversal

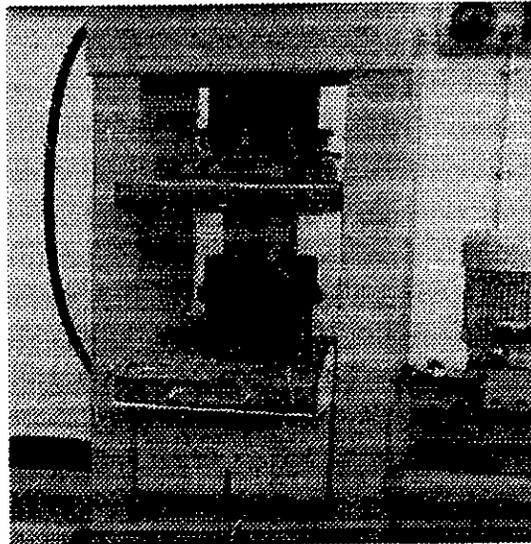


Figure V.8 Eprouvette équipée de jauges placée entre les plateaux de la presse

L'essai consiste à placer une éprouvette entre les deux plateaux de la presse et une charge croissante par palier de 20kN est alors appliquée avec une vitesse moyenne de 10kN/sec. Pour chaque incrément de charge ; on note à la fois la charge appliquée et les déformations longitudinale et transversale. Les résultats de ces essais pour les deux compositions sont représentés graphiquement ci après :

V.15.1. Composition BS 32.4 FP 3/8 :

V.15.1.a. Analyse contrainte déformation :

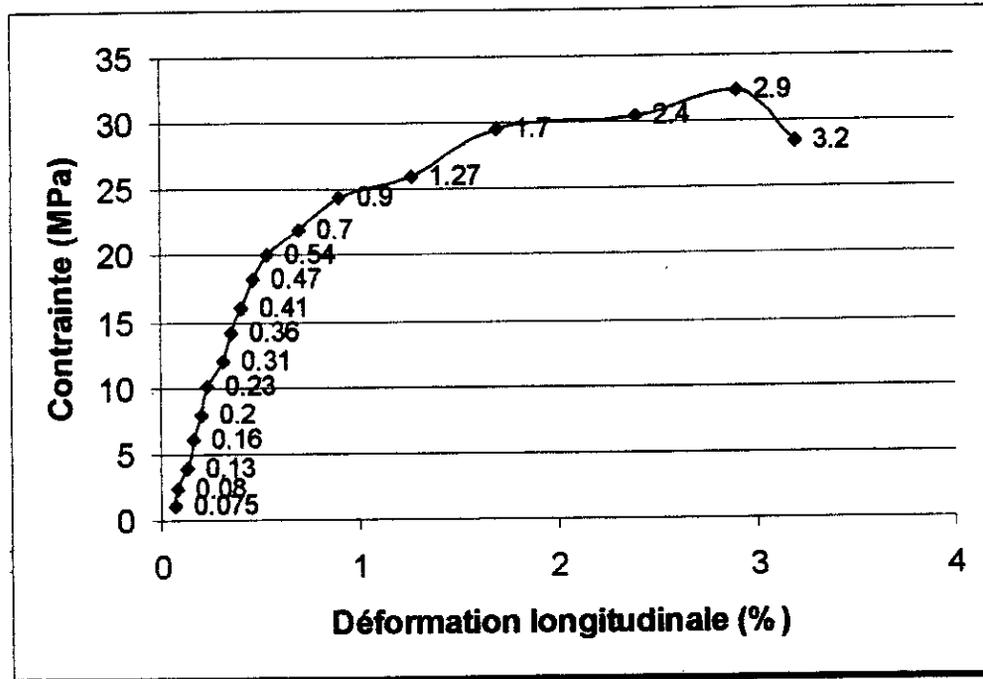


Figure V.9 Courbe contrainte-déformation longitudinale (BS 32.4 FP 3/8)

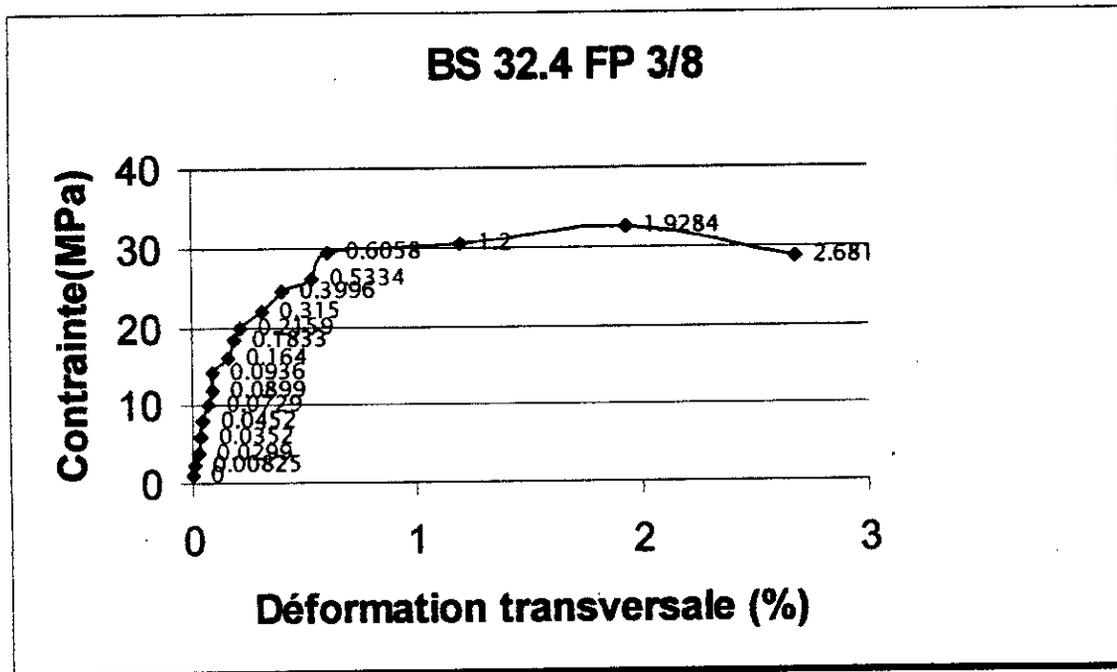


Figure V.10 Courbe contrainte-déformation transversale (BS 32.4 FP 3/8)

V.15.1.b. Analyse des déformations

En traçant la courbe contrainte-déformation longitudinale, on remarque que le comportement du matériau est quasi-linéaire ou bilinéaire jusqu'à un taux de déformation de l'ordre de (0.23%), au delà de cet ordre, la relation contrainte déformation commence à avoir une allure parabolique jusqu'à un seuil correspondant au chargement maximal (32,45 MPa). A partir de ce point, la déformation continue à augmenter malgré une réduction de la charge appliquée et ceci jusqu'à la rupture. Ces phases sont aussi observées dans le cas de béton classique. De ce fait, on peut dire que notre béton de sable chargé présente un comportement analogue à celui des bétons classiques vis à vis des déformations sous charges monotones.

Cette allure s'explique par l'interface entre la pâte de ciment et les granulats à cause de la différence des propriétés mécaniques. Le développement des microfissures à ces interfaces réduit la surface effective résistante à la charge appliquée de sorte que la contrainte locale est plus grande que la contrainte moyenne calculée sur la totalité de la section droite de l'éprouvette. Ces changements signifient que la déformation augmente plus vite que la contrainte nominale appliquée, en sorte que la courbe contrainte déformation présente une courbure de plus en plus prononcée, avec un comportement pseudo élastique apparent, et lorsque la contrainte dépasse 25 MPa, la courbe s'incurve à une vitesse de plus en plus grande, ce qui correspond à la fissuration du mortier, les fissures à l'interface continuent jusqu'à la charge maximale. Le nombre élevé de ces fissures engendre une diminution importante de la surface effective qui ne peut résister même à des charges inférieures à la charge maximale, c'est pourquoi d'ailleurs on remarque une continuité de la déformation même avec une réduction de la charge.

Cette allure est aussi observée dans la courbe contrainte déformation transversale sauf que les seuils sont beaucoup plus restreints.

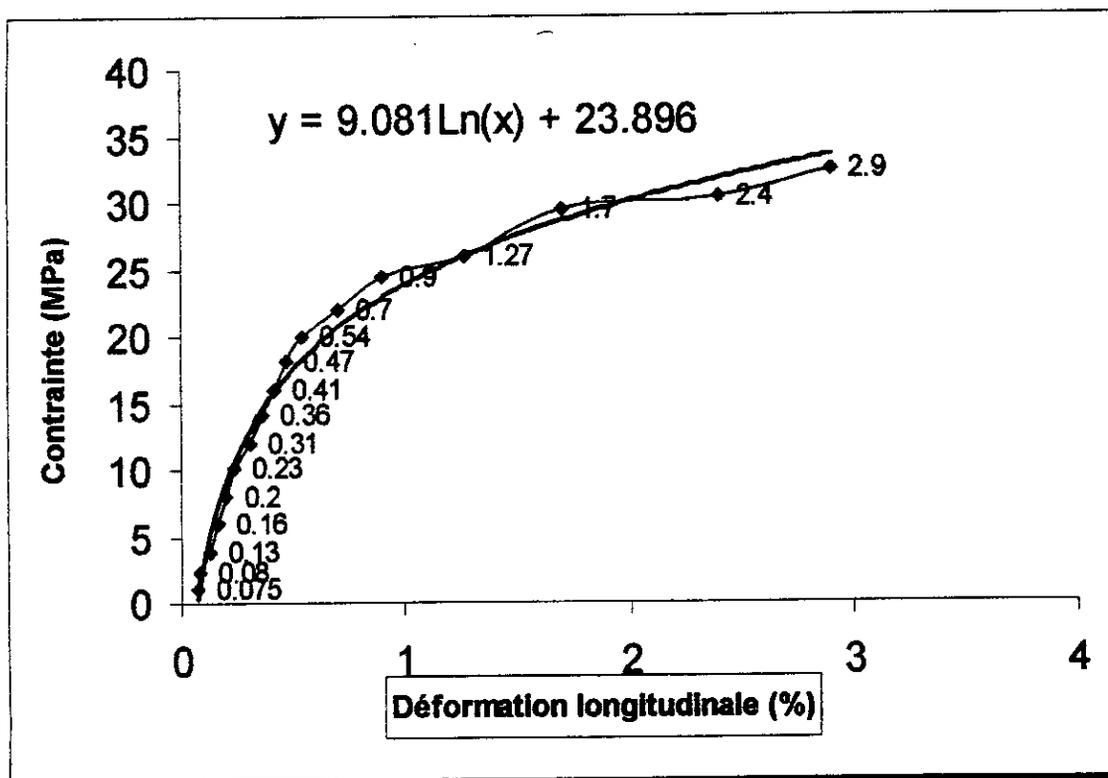
L'observation visuelle de la rupture permet de conclure que le mode de rupture des éprouvettes est tronconique (formation de cône à la rupture).

V.15.1.c. Module d'élasticité

La notion du module d'élasticité de Young ne peut être appliquée, au sens strict, qu'au seul segment linéaire de la courbe contrainte déformation, ou, en l'absence de toute partie linéaire, à la tangente de la courbe à son origine. Dans ce cas on parle du module d'élasticité à l'origine, ce module d'élasticité présente une grande utilité, mais elle est quand même limitée, alors on peut déterminer un module tangent en tout point de la courbe, mais ce module ne s'applique qu'à de très petites variations de la charge aux alentours du point considéré.

Pour un intérêt pratique, on peut déterminer le module d'élasticité sécant, il s'agit dans ce cas de déterminer à partir de la courbe contrainte déformation la pente de la courbe, considérée droite, entre deux points dont le premier est l'origine et le deuxième correspond à une contrainte donnée qui doit être mentionnée.

La détermination exacte de cette constante est très délicate vue l'augmentation rapide des déformations sous une faible charge alors que les paliers des charges utilisés sont importants (20kN), mais pour résoudre ce problème et déterminer la valeur du module d'élasticité, nous avons établi une approche numérique de la courbe tronquée au point correspondant à la charge maximale, et en suite on va faire une translation du repère de la courbe contrainte déformation tronquée vers la première déformation pour une bonne approche du problème (voir figure V.10).



FigureV.11 Courbe contrainte-déformation longitudinale tronquée
(BS 32.4 FP 3/8)

La valeur approchée du module d'élasticité tangent à l'origine est

$$E=12108 \text{ MPa}$$

Le module d'élasticité tangent correspond à la déformation $\varepsilon = 0.08$ est

$$E(0.08)=11351.25 \text{ MPa}$$

La valeur du module d'élasticité sécant correspond à la contrainte 10 MPa est

$$E_s(10)= 5741.93 \text{ MPa}$$

La valeur du module d'élasticité tangent à l'origine est très faible par rapport à celles des bétons traditionnels. Ceci est dû au manque des gros granulats des quels le béton tire une grande partie de sa dureté, mais elle est aussi faible par rapport aux valeurs des études précédentes sur les bétons de sable.

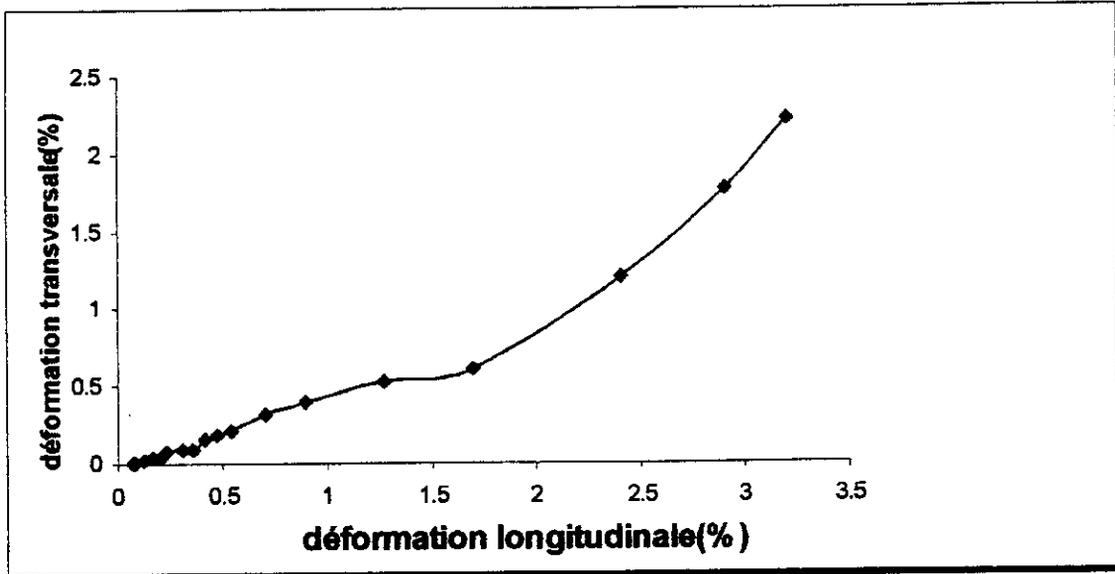
Un béton de sable ayant une résistance en compression de 24 à 30 MPa a généralement un module d'élasticité de l'ordre 22000 MPa à 28jours [1], alors malgré que les résistances de notre béton soient comparables à ces valeurs, son module d'élasticité calculé à l'origine demeure faible.

En effet les relations contrainte-déformation sont influencées par divers facteurs qu'on peut pas contrôler, alors que ces relations dépendent en grande partie de la vitesse de chargement, on a observé des courbes contrainte déformation très réduites présentant une courbure presque nulle à des vitesses extrêmement rapides, or que l'augmentation de taux de chargement de cinq (5)secondes à environ deux(2) minutes peut augmenter les déformations jusqu'à 15%

Pendant le moule cubique utilisé peut être considéré comme un deuxième facteur à prendre en considération

V.15.1.d. Coefficient de Poisson

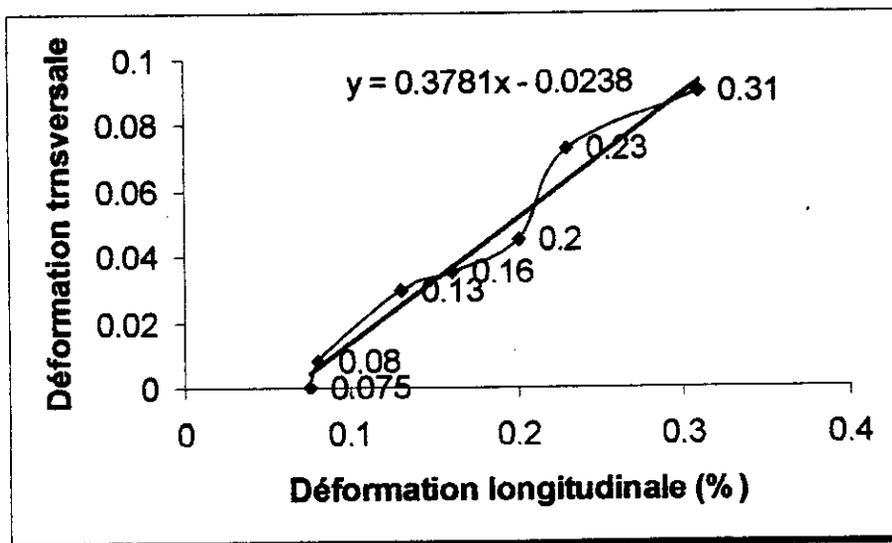
En compression comme en traction, la déformation dans le sens de l'effort est accompagnée d'une déformation transversale (effet Poisson). En plus du module d'élasticité, le coefficient de Poisson est défini comme le rapport entre les deux déformations sera déterminé à titre complémentaire en traçant la courbe reliant les déformations longitudinale et transversale



FigureV.12 Courbe déformation transversale en fonction de déformation longitudinale (BS 32.4 FP 3/8)

On remarque que la courbe présente deux phases. La première est d'une forme presque droite, montrant une proportionnalité entre la déformation longitudinale et la déformation transversale et correspond à la partie quasi élastique. En suite, la courbe devient de plus en plus parabolique et converge jusqu'à la rupture.

Pour déterminer le coefficient de Poisson on se limite à la phase élastique (figureV.12)



FigureV.13 Courbe tronquée déformation transversale/Déformation longitudinale (BS 32.4 FP 3/8)

La valeur de coefficient de Poisson est égale à 0.378

Le coefficient de Poisson du béton de sable de cette composition est un peu grand par rapport à celui des bétons traditionnels (compris entre 0.15 et 0.3).

V.15.2. Composition (BS 24.5 FP)

V.15.2.a. Analyse des déformations

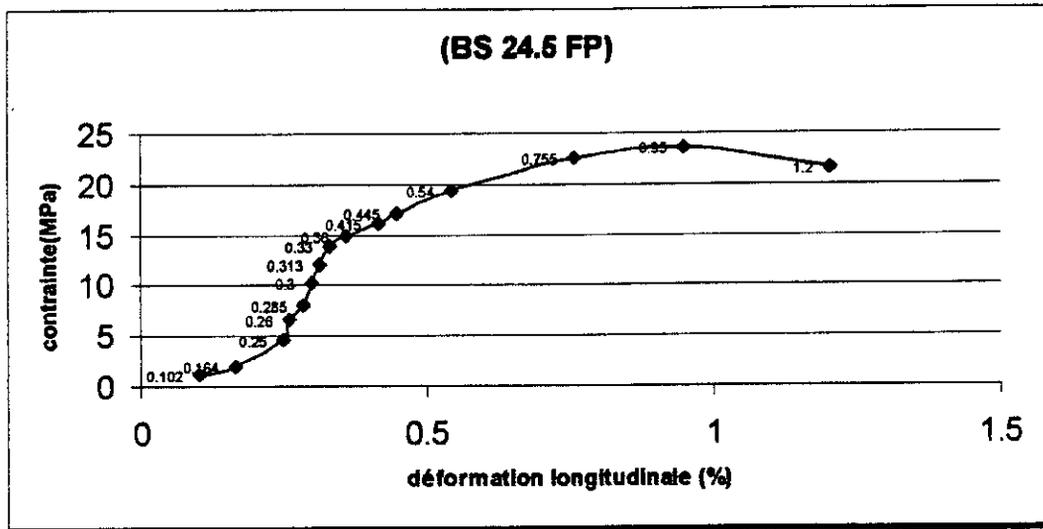


Figure V.14 relation contrainte déformation longitudinale (BS 24.5 FP)

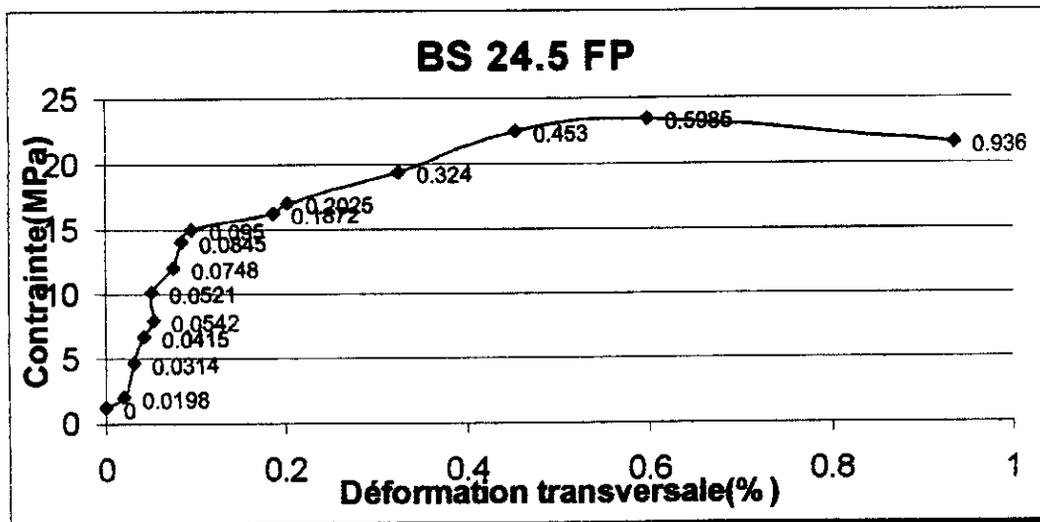


Figure V.15 Contrainte déformation transversale(BS 24.5 FP)

V.15.2.b. Analyse des déformations

En traçant la courbe contrainte déformation de composition BS 24.5 FP, on remarque que la courbe présente un petit segment au début de chargement, concave vers le haut, qui s'étale jusqu'au point correspondant à une déformation de (0.25%). Ceci s'explique par la fermeture de fines fissures au moment de la mise en contact avec la presse. A partir de ce point la courbe présente de nouveau les trois phases précédentes, avec une partie ascendante moins raide que pour la composition optimale qui a développé moins de fissures et donc a gardé sa surface nominale presque constante, ce qui se traduit par le comportement quasi linéaire de cette composition. Cependant, pour la formule BS24.5 FP, il apparaît qu'elle a perdu une grande partie de sa résistance au début du chargement suite à son développement des micros fissures (due à la présence importante des fines provenant de sable concassé) qui ont réduit la surface résistante, et par suite une diminution un peu importante de la charge maximale à la rupture, on constate clairement que le gain de résistance est de l'ordre de 24.38%

V.15.2.c. Module d'élasticité

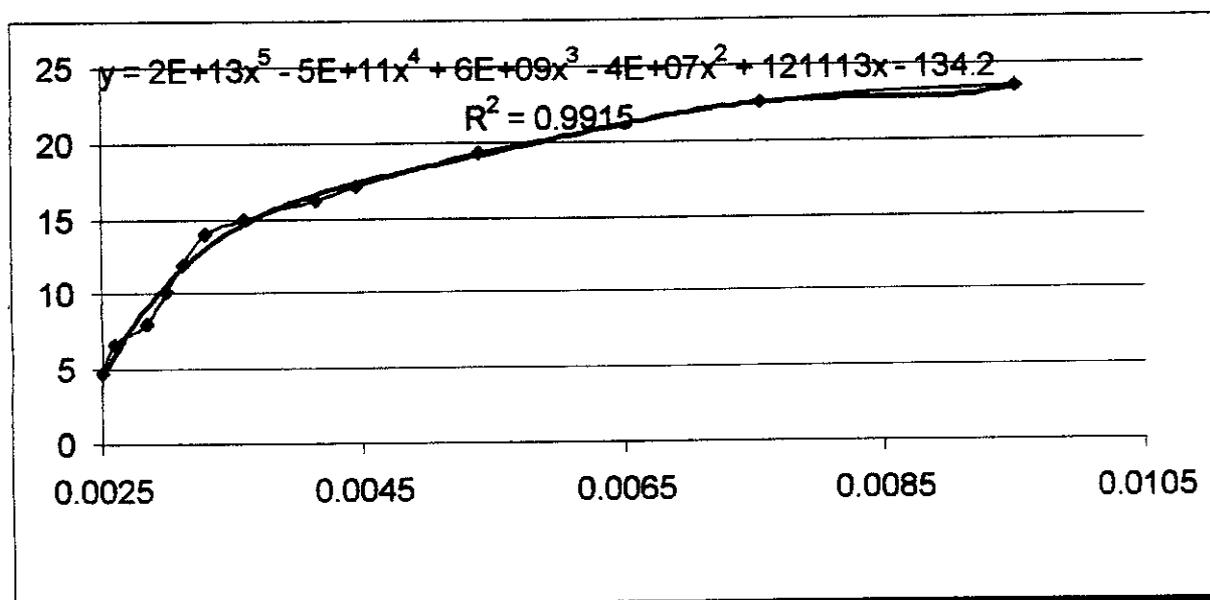


Figure V.16 Relation contrainte déformation longitudinale (BS 24.5 FP)

Le module d'élasticité à l'origine présente une valeur très faible du fait de la forme concave de la courbe. Pour cet effet et pour une interprétation plus rigoureuse du module d'élasticité, une translation du repère de la courbe contrainte-déformation vers la valeur 0.25%, qui constitue la fin de cette phase de fermeture de fissures, a été effectuée

Le module d'élasticité de Young calculé au point 0.25

$$E=6300 \text{ MPa}$$

On remarque que la valeur du module d'élasticité à 0.25% de BS 24.5 FP a diminué par rapport à celle de la composition précédente, ceci s'explique par la diminution du diamètre du plus gros grains (D_{max}). En fait, c'est une donnée générale pour tous les matériaux granulaires 0/D. Le béton tire une importante partie de sa résistance du gros granulat et son module d'élasticité est conditionné par le module d'élasticité du granulat qui le constitue, ainsi que les proportions volumiques qu'il occupe dans le béton. La nature même du béton constitué de deux phases, l'une avec la pâte de ciment hydraté, et l'autre avec les granulats, a pour effet que les proportions volumiques de chacune d'elles influencent la valeur du module

d'élasticité. Pour une résistance donnée du béton, les granulats de densité normale ayant un module d'élasticité plus élevé que la pâte de ciment hydraté, une teneur plus élevée en granulats donnée entraîne une augmentation du module d'élasticité pour une même résistance à la compression, alors que la diminution de la résistance à la compression diminue implicitement le module d'élasticité

V.15.2.d. Coefficient de Poisson

Dans le but de déterminer le coefficient de Poisson de cette formule, on trace la courbe reliant les deux déformations longitudinale et transversale, et en se limitant à la partie presque linéaire de la courbe, on peut donner une valeur moyenne de ce coefficient

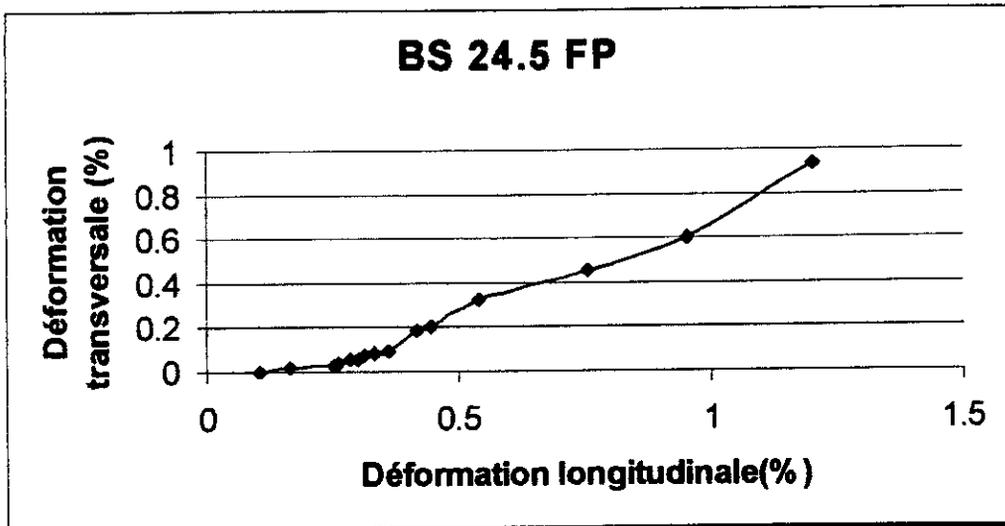


Figure V.17 relation déformation transversale en fonction du déformation longitudinale (BS24.5 FP)

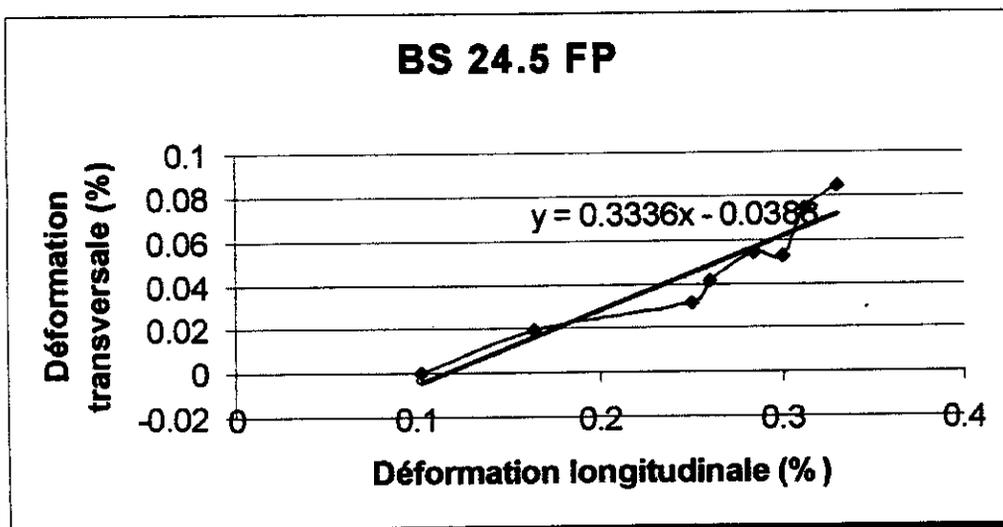


Figure V.18 Courbe déformation transversale en fonction du déformation longitudinale (BS 24.5 FP)

la valeur approximative du coefficient de Poisson de cette formule est

$$\nu = 0.3336$$

Cette valeur est presque un peu plus grande que celle de la formulation optimale ceci est logique vu les performances améliorées de la composition optimale.

Signalant que ce coefficient est tiré de la courbe de déformation et donc sa valeur est 'excessivement sensible à la vitesse de l'application de la charge.

Notant que les valeurs obtenues, dans cette troisième partie, ne sont pas très précises à causes de l'essai à contrainte constante qui reste moins transparent que l'essai à taux de déformation contrôlé par ordinateur qui donne des résultats plus significatifs.

Conclusion Générale

Le but de cette étude est de voir la possibilité de remplacer le béton classique de gros granulats par un béton confectionné à base de sable de dune en ajoutant deux matériaux de correction.

Le recours préalable aux méthodes nouvelles de formulation des bétons de sable, basées sur le critère de la compacité, constitue une bonne approche et nous a permis de trouver une composition de base, sans ajout, ayant des performances acceptables par rapport à celles des études précédentes, mais elles restent toujours insuffisantes pour les exigences des éléments de structure, cette insuffisance de résistance est attribuée à la finesse et le pourcentage élevé de vides de sable de dune. Par ailleurs le béton de sable ne présente d'intérêt réel, de point de vue mécanique, que lorsque le sable utilisé appartient à une certaine classe granulométrique, que cette classe, soit atteinte naturellement ou par composition artificielle. Dans ce contexte nous avons jugé intéressant de procéder à une correction granulométrique du sable de dune pour améliorer les performances mécaniques de notre béton de sable. Cette correction consiste à l'adjonction d'un matériau contenant un pourcentage de fines élevé, ou par l'apport d'un matériau d'une granulométrie étalée, ceci dans la mesure où elle peut se faire, et dans les limites raisonnables.

L'étude expérimentale sur les compositions testées a permis de montrer que les performances du béton de sable de dune rentrent dans les spécifications du béton de structure après incorporation de 50% de sable concassé (0/3) avec un gain de résistance de l'ordre de 46.44%, alors que l'apport de gravillon à des pourcentages compris entre 10% et 50% en complément au sable de concassage à 50% a amélioré considérablement les résistances.

Cette étude a permis également de constater que les résistances sont beaucoup influencées par la compacité du mélange lors de la correction, où on a observé la résistance à la compression optimale de 32.4 MPa à un dosage en gravillon correspondant à 30% et celui de sable concassé à 20%. et le gain de résistance est de l'ordre de 32.24% par rapport à la composition corrigée. Cependant les résistances à la traction et les résistances à la compression de béton de sable de dune chutent avec la diminution de la compacité malgré l'augmentation du rapport (C/E).

Nous avons aussi tracé les courbes contrainte-déformation, ceci nous a permis de montrer que le comportement du béton de sable, comme tous les autres matériaux composites à base de ciment, pressentent un comportement analogue à celui des bétons classiques vis-à-vis de la relation contrainte déformation, sauf que le défaut de ces bétons demeure dans leur module d'élasticité très faible en particulier avec l'utilisation des sables de dune.

Malgré qu'on a arrivé à des résistances satisfaisantes de même grandeur que pour le béton classique, le module d'élasticité conventionnel de ces bétons demeure très faible, non seulement par rapport à celui des bétons traditionnels, mais aussi à celui des bétons de sable courants. Or une déformation peut également avoir d'autres causes que l'application d'une contrainte, et le comportement du matériau dans ce cas est lié en une grande partie à sa rigidité, ce qui a pour conséquences la limitation de l'utilisation des bétons de sable, surtout en structure,

D'autre part cette étude mise en évidence l'aspect économique et écologique, très intéressant de ce matériau, elle rente dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et trouve une autre issue au sable de concassage qui commence à être en excès dans les carrières

Conclusion Générale

L'émergence de préoccupations nouvelles liées à l'exploitation des granulats et leur utilisation rationnelle au même temps qu'une prise en compte des problèmes d'environnements sont à l'origine de l'intérêt à nouveau porté au béton de sable et leur tendance actuelle d'être utilisée devient nécessaire, surtout pour les régions dépourvues de roches massives, et de fait de son aspect économique très intéressant

Le développement technique de la science des matériaux et l'industrie des adjuvants a permis de gagner des gains considérables prouvés en résistances, alors que la rigidité reste un grand handicap à leur utilisation générale, c'est dans ce contexte que doivent s'orienter les nouvelles réflexions sur la formulation des nouveaux bétons de sable.

Annexes

ANALYSE GRANULOMETRIQUE METHODE PAR TAMISAGE A SEC APRES LAVAGE

I. Domaine d'application

Le présent document d'analyse granulométrique par tamisage au moyen de tamis à mailles carrées de dimensions inférieures ou égale à 100 mm s'applique aux sols, aux matériaux rocheux après extraction et aux sous-produits industriels utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil, dans la mesure où les sollicitations provoquées par le processus d'essai ne modifient par leur structure.

Pour les particules de tailles inférieures à 80 μm , analyse granulométrique est faite par la méthode par sédimentation (norme NF P 94-057).

Ce présent document s'applique à la description des sols en vue de leur classification à la détermination des classes granulométrique et à la vérification de conditions granulométrique imposées.

II. Définition

II.1. Analyse granulométrique par tamisage

C'est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des élément constituant un échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

II.2. Refus sur un tamis

Partie du matériau retenue sur un tamis.

II.3. Tamisa ou passant

Partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.

II.4. Pourcentage massique d'un tamisât

C'est le rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d , à la masse totale initiale du matériau sec passant à travers le tamis d'ouverture de maille d_m .

II.5. Courbe granulométrique

Représentation du pourcentage massique des différents tamisâtes en fonction de la dimension normale d'ouverture des tamis.

III. Appareillage

-Un dispositif de lavage avec arroseur et, éventuellement, de malaxage ;

-Un jeu de tamis emboîtables à mailles d'ouvertures carrées conforme à la norme **NF ISO 565** dont les montures ont au moins :

- ❖ Un diamètre ≥ 200 mm pour des ouvertures de maille inférieures à 10 mm ;
- ❖ Un diamètre ≥ 250 mm pour des ouvertures de maille comprises entre 10 mm et 50 mm ;
- ❖ Un diamètre ≥ 315 mm pour des ouvertures de maille supérieures à 50 mm ;

Toutes les montures des tamis d'une même colonne ont le même diamètre imposé par la dimension de la plus grande maille des tamis utilisés.

-Couvercles et fonds de tamis de même diamètre que tamis ;

-Récipients en matériau non altérable, brosse, pinceau, ... ;

-Balances dont les portées maximales et minimales sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1 / 1000 de la valeur mesurée ;

-Étuve : une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 50 °C et à 150 °C ;

IV. Exécution de l'essai

IV.1. Prise de l'échantillon

L'échantillon doit représenter le plus fidèlement possible la composition moyenne du matériau à essayer, le poids de l'échantillon à analyser dépend des dimensions et du pourcentage des éléments les plus gros qu'il contient. Il est recommandé de se tenir aux limites définies par la formule suivante :

$$200 D < P < 600 D$$

-**P** : poids de l'échantillon exprimé en grammes ;

-**D** : la dimension maximale exprimée en mm des plus gros grains.

IV.2. Tamisage par voie séché

-Le matériau, préalablement échantillonné, est séché dans une étuve à 105 °C ;

-On procède à l'élimination des fines par lavage continu ; pour cela on introduit le matériau dans un récipient pourvu à sa partie supérieure d'un bec. Le lavage est effectué par renouvellement continu de l'eau qui s'écoule par le bec, cette eau se déverse sur un tamis de 0.08 mm destiné à retenir les éléments supérieurs qui auraient peut être entraînés.

-On poursuit ce procédé jusqu'à ce que l'eau contenue dans le récipient devienne claire.

-On laisse le matériau à l'étuve jusqu'à dessiccation complète. On procède ensuite au tamisage par voie sèche soit manuellement, soit au tamis soit au vibro-tamis.

EQUIVALENT DE SABLE

I. Objet

La présente norme a pour objet de définir une caractéristique des sables intitulée « équivalent de sable » et de fixer la méthode permettant cette caractéristique.

II. Domaine d'application

La présente norme s'applique aux sables, d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et de génie civil.

III. Généralités

L'essai de l'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floclent.

La valeur de l'équivalent de sable (E_s) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale de flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

IV. Appareillage et produits utilisés

IV.1. Appareillage

IV.1.1. Appareillage d'usage courant

- Tamis de 5 mm d'ouverture de mailles avec fond ;
- Spatule et cuillère ;
- Récipients de pesée pouvant recevoir environ 200 ml ;
- Balance dont la portée limitée est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0.1 % ;
- Chronomètre donnant la seconde ;
- Réglet de 500 mm, gradué en millimètres ;
- Goupillon pour le nettoyage des éprouvettes ;
- Bacs pour tamisage ;

IV.1.2. Appareillage spécifique

Éprouvettes cylindriques et transparentes en matière plastique (figure 1) de diamètre extérieur constant à ± 0.5 mm, de diamètre intérieur de $32 \text{ mm} \pm 0.5$ mm et d'une hauteur de $430 \text{ mm} \pm 0.1$ mm.

Chaque éprouvette porte des traits de repères à $100 \text{ mm} \pm 0.25$ mm et $380 \text{ mm} \pm 0.25$ mm de la base.

L'éprouvette est fermée par bouchon de caoutchouc ; l'équipement comprend deux éprouvettes et deux bouchons.

Un piston taré, conforme à la figure 2, constitué par :

- Une tige de $440 \text{ mm} \pm 0.1$ mm de longueur ;
- Une embase de $25 \text{ mm} \pm 0.1$ mm de diamètre, dont la surface inférieure est plate, lisse et perpendiculaire à l'axe de la tige et qui comporte latéralement trois vis de centrage du piston dans l'éprouvette, avec un léger jeu. Ses parties plongeantes sont en métal inoxydable (laiton ou acier inoxydable) ;
- Un manchon de $10 \text{ mm} \pm 0.1$ mm d'épaisseur, qui s'adapte sur l'éprouvette cylindrique et permet de guider la tige piston, en même temps qu'il sert à répéter l'enfoncement du piston dans l'éprouvette. Ce manchon comporte une vis qui permet de la bloquer sur la tige de piston, ainsi qu'une encoche pour le passage de la réglette ;
- Un poids fixé à l'extrémité supérieure de la tige pour donner à l'ensemble du piston taré, hormis le manchon, une masse totale de $1 \text{ kg} \pm 5 \text{ g}$;
- Un tube lavure, conforme à la figure 3, constitué par un tube rigide (acier inoxydable ou cuivre écroui) de diamètre extérieur de $6 \text{ mm} \pm 0.5$ mm et de diamètre intérieur de $4 \text{ mm} \pm 0.1$ mm.

Ce tube est muni à la partie supérieure d'un robinet, à la partie inférieure d'un embout fileté (figure 4) en métal inoxydable formant dièdre, chaque face du dièdre étant percée d'un trou de $1 \text{ mm} \pm 0.1$ mm ;

- Un flacon transparent en verre ou en matière plastique, d'environ 5 l, muni d'un système de siphon, dont le font est placé à 1 m au-dessus de la table travail ;
- Un tube de caoutchouc ou de plastique de 1.50 m de longueur de 5 mm de diamètre intérieur reliant le tube lavure au siphon ;
- Un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique (figure 5) ;

- Une machine d'agitation, manuelle ou électrique, capable d'imprimer à l'éprouvette un mouvement horizontal rectiligne et périodique de $20 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ d'amplitude et de période $1 / 3 \text{ s}$.

IV.1.3. Produits utilisés

IV.1.3.1. Solution concentrée

La préparation de la solution concentrée s'effectue à partir :

- De chlorure de calcium cristallisé, qualité produit pur ;
- De glycérine à 99 % de glycérol, qualité pharmaceutique ;
- De formaldéhyde en solution en 40 % en volume, qualité pharmaceutique ;
- D'eau distillée ou déminéralisée ;

Préparer une solution concentrée avec :

- $111 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de chlorure de calcium anhydre ;
- $480 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de glycérine ;
- 12 à 13 g de la solution de formaldéhyde ;

Il est recommandé de stocker la solution concentrée dans des flacons en matière plastique contenant $125 \text{ ml} \pm 1 \text{ ml}$, pour des raisons de commodité d'emploi et de meilleure conservation de cette solution.

IV.1.3.2. Solution lavant

La solution lavante est préparée, en prenant $125 \text{ ml} \pm 1 \text{ ml}$ de la solution concentrée et en diluant à $5 \text{ l} \pm 0.005 \text{ l}$ avec de l'eau distillée.

Pour la préparation de la solution lavante, à partir de la solution concentrée, on peut se contenter sur les chantiers d'eau déminéraliser au lieu d'eau distillée et même d'eau potable.

Remplacer la solution lavante au bout d'un mois ou si un léger dépôt ou des troubles apparaissent.

Le mélange est vigoureusement agité au utilisation.

Dans le cas où la solution concentrée serait stockée dans un flacon de 125 ml, rincer plusieurs fois le flacon et verser les eaux de rinçage dans le flacon de 5 l avant de diluer le contenu de ce dernier à 5 l.

V. Préparation de l'échantillon pour essai

L'échantillon pour laboratoire doit être préparé suivant les prescriptions de la norme **P 18-553**. Sa masse doit être telle que la fraction passant au tamis de 5 mm pèse 500 à 700 g.

Si l'échantillon pour laboratoire n'est pas humide, l'humidifier afin d'éviter les pertes de fines et la ségrégation.

Sur celui-ci, procéder à la préparation d'un échantillon pour la détermination de la teneur en eau « w » et de deux échantillons pour essai.

L'essai s'effectue sur le sable à sa teneur en eau naturelle, la masse sèche de l'échantillon pour l'essai doit être de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$.

V.1. Détermination de la teneur en eau du tamisât

A partir du premier échantillon, déterminer la teneur en eau w exprimée en pourcentage sur deux prises de 100 à 200 g par une méthode rapide de telle que : séchage au gaz, rayonnement infrarouge,...

V.2. Préparation des échantillons pour essai

La masse de l'échantillon pour essai, exprimée en grammes, est alors égale à :

$$120 \left(1 + \frac{w}{100} \right)$$

Dans tous les cas préparer deux échantillons par essai.

VI. Exécution de l'essai

VI.1. Mise en place de la première prise d'essai

La solution lavante ayant été siphonné dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de matériau, est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.

Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon. Laisser reposer dix minutes.

VI.2. Agitation de l'éprouvette

A la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation.

Faire subir à l'éprouvette 90 cycles \pm 1 cycle en 30 s \pm 1 s.

Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essai.

VI.3. Lavage

Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.

En descendant le tube lavant dans l'éprouvette rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.

Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

VI.4. Mesures

Laisser reposer pendant 20 min \pm 10 s.

Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide de réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette.

Mesurer également la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.

Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.

Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire la réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face intérieure de la tête du piston (figure 2).

Lire la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon.

Arrondir les hauteurs h_1 , h_2 et h_2 au millimètre le plus voisin.

VII. Expression des résultats.

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$E_s = 100 \times \frac{h_2}{h_1}$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$E_s = 100 \times \frac{h'_2}{h_1}$$

Ces résultats sont donnés avec une décimale.

La détermination portant sur deux échantillons, la propreté du sable est la moyenne des valeurs obtenues.

La valeur de la moyenne est arrondie à l'entier le plus voisin.

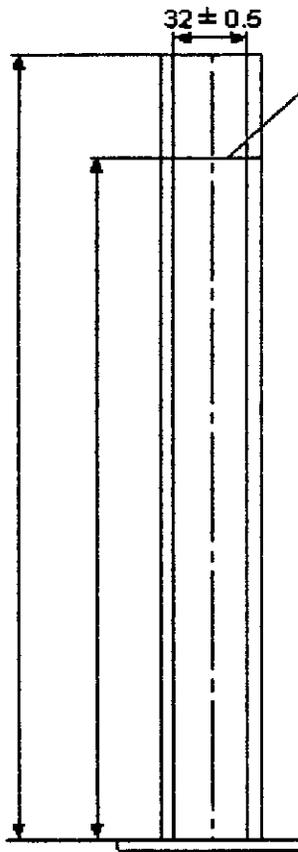


Figure 1: Eprovette d'équivalent de sable

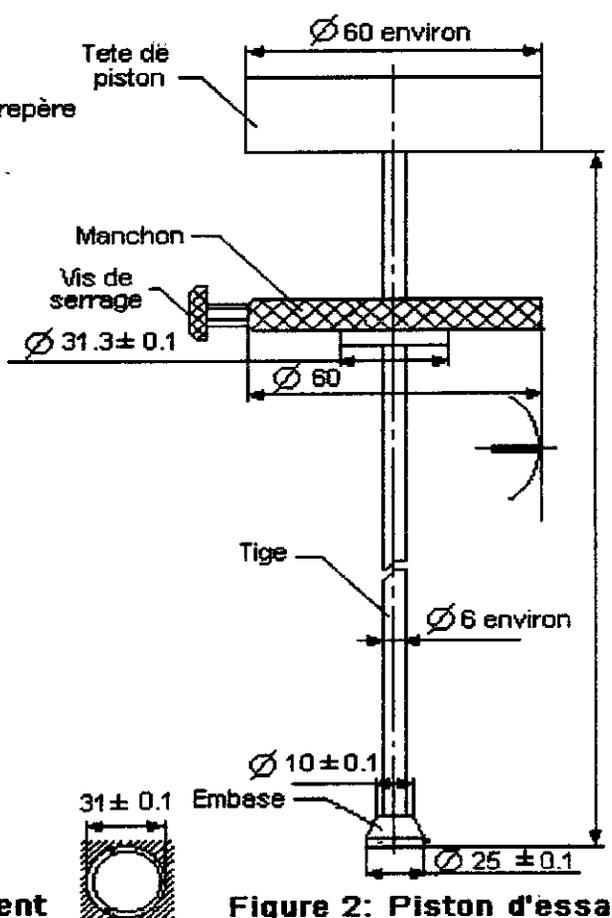


Figure 2: Piston d'essai

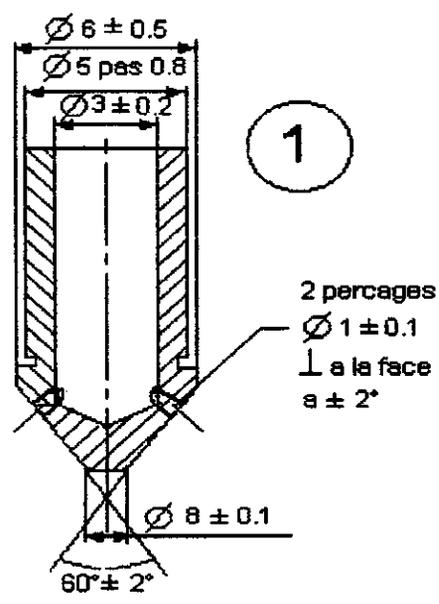


Figure 4: Détail de l'embout

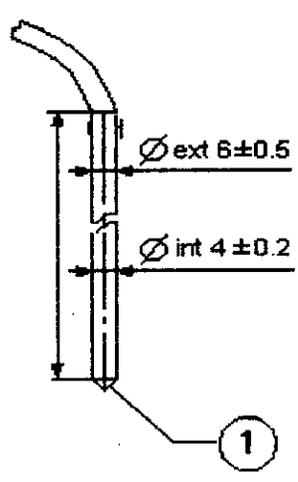


Figure 3: Tube laveur

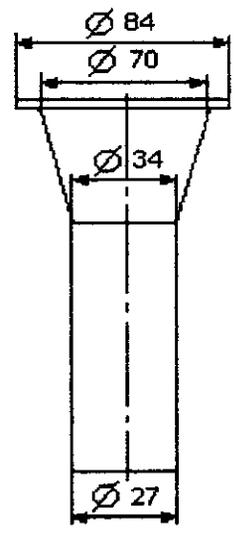


Figure 5: Entronoir

ESSAI DE MASURE DU COEFFICIENT DE FRIABILITE DES SABLES

I. Objet

La présence norme a pour but de définir le mode opératoire pour la détermination de la résistance à la fragmentation des sables.

II. Domaine d'application

La présence norme s'applique aux sables contenus dans les granulats d'origine naturelle ou artificielle dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

III. Généralités

III.1. But de l'essai

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produits dans un cylindre en rotations bien définies, par fragmentation à l'aide d'une charge en présence d'eau.

Les éléments fins du sable, inférieur à 0.1 mm, ne soient pas étudiés.

Le sable est écrêté à 2 mm.

III.2. Définition

L'évolution granulométrique sera caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0.05 mm produits au cours de l'essai.

Si M est la masse de produits au cours de l'essai, par définition le coefficient de friabilité du sable sera :

$$FS = 100 \times \frac{m}{M}$$

IV. Appareillage

IV.1. Appareillage spécifique

- L'appareil micro-Deval ;
- Une charge abrasive constituée par les billes sphériques en acier inoxydable Z 30 C 13 conformément à la norme NF A 35-572, de diamètre $30 \begin{pmatrix} +0.1 \\ -0.5 \end{pmatrix}$ mm, $18 \begin{pmatrix} +0.1 \\ -0.5 \end{pmatrix}$ mm et (10 ± 0.5) mm).

IV.2. Appareillage d'usage courant

Le matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage dont un jeu de tamis de 0.05- 0.1- 0.21- 2- 8 mm de 200 mm de diamètre au moins.

V. Matériaux soumis a l'essai

V.1. Prise d'échantillon

La masse du matériau envoyé au laboratoire sera d'au moins 2000 g.

L'échantillon sera préparé suivant les prescriptions de la norme NF P 18-553.

L'essai sera effectué sur un sable 0.1 / 2 mm.

V.2. Préparation de l'échantillon pour essai

- Préparer l'échantillon pour l'essai de la façon suivante :
 - Tamiser par voie humide les 2 kg de matériau sur les tamis 0.1 et 2 mm ;
 - Sécher à l'étuve de 105 °C jusqu'à masse constante ;
 - Homogénéiser et peser l'échantillon pour essai de 500 grammes, à deux grammes près.
- Préparer la charge par des billes d'acier de la façon suivante :
 - Prendre 9 billes de 30 mm de diamètre, dont la masse doit être de $\begin{pmatrix} +10 \\ 975 \\ -50 \end{pmatrix}$ g ;
 - Ajouter 21 billes de 18 mm de diamètre, dont la masse doit être de $\begin{pmatrix} +10 \\ 490 \\ -50 \end{pmatrix}$ g ;
 - Compléter avec des billes de 10 mm de diamètre, de façon que la masse totale de la charge soit de (2500 ± 4) g.

Note : L'usure de la charge doit être contrôlé périodiquement. Les billes de 18 et 30 mm sont contrôlées par pesée de l'ensemble et remplacement des plus usées par pesées à l'intérieur des tolérances. Les billes de 10 mm sont contrôlées en les faisant passer sur deux barreaux parallèles de 9.5 mm d'écartement.

VI. Exécution de l'essai

- Introduire la charge dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, puis les 500 grammes de matériau préparé suivant les dispositions du paragraphe V ;
- Ajouter 2.5 litre d'eau, maître le couvercle ;
- Mettre le cylindre en rotation à la vitesse de (100 ± 5) tr / min pendant 1500 tours ou 15 min ;
- Verser ensuite le matériau et la charge abrasive dans un bac, en évitant toutes les pertes, laver soigneusement l'intérieur du cylindre et recueillir l'eau et les parties minérales entraînées ;
- Verser lentement la totalité du contenu du bac sur 3 tamis de 8 mm (pour recueillir la charge abrasive), de 0.2 mm (pour soulager les tamis de 0.05 mm) et de 0.05 mm ;
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau jusqu'à eau claire puis enlever le tamis de 8 mm ;
- Sécher les tamis de 0.2 et 0.05 mm à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante ;
- Tamiser à sec simultanément les refus à 0.2 et 0.05 mm ;
- Peser au gramme près l'ensemble des refus sur les deux tamis, recueillis avec soin, soit m' cette masse.

VII. Expression des résultats

La masse des éléments inférieurs à 0.05 mm produits durant l'essai, à partir des 500 grammes initiaux est égale à $m = 500 - m'$.

Le coefficient de friabilité est alors :

$$FS = 100 \times \frac{500 - m'}{M}$$

DETERMINATION DE LA VALEUR DE BLEU METHYLENE PAR L'ESSAI A LA TACHE

I. Domaine d'application

La présente norme a pour objet de préciser le domaine d'application de la valeur de bleu méthylène d'un sol et ses modalités de détermination au moyen de l'essai dénommé essai au bleu méthylène « à la tache ».

La valeur de bleu méthylène d'un sol **VBS** constitue un paramètre d'identification qui mesure globalement la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans un sol ou un matériau rocheux.

Si l'un des paramètres d'identification sur lequel s'appuie la classification des sols d'écrite dans la norme **NF P 11-300**, la présente norme d'essai de détermination de la valeur de bleu méthylène d'applique à tous les sols et matériaux rocheux.

II. Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer, par dosage, la quantité de bleu méthylène pouvant s'absorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol, laquelle est avant tout régie par l'importance et l'activité des matériaux argileux présents dans la fraction fine du sol.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'absorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache.

L'absorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante se produit à la périphérie de la tache.

III. Appareillage et matériel d'essai

III.1. Appareillage spécifique

- Un dispositif de dosage permettant d'injecter par pas de 2.5 cm^3 des volumes de solutions de bleu et de connaître la quantité totale injectée à $\pm 1 \text{ cm}^3$;
- Un agitateur mécanique à ailettes tournant entre 400 et 700 tr / min le diamètre des ailettes est compris entre 70 mm et 80 mm ;

- Un récipient cylindrique (en verre, plastique ou métal inoxydable) d'une capacité de 3000 cm³ et de diamètre de 155 mm ;
- Une baguette de verre de (8 ± 1) mm de diamètre ;
- Un papier filtre blanc avec teneur en cendres < 0.01% ; de masse surfacique 95g/cm² ; épaisseur 0.2 mm ; vitesse de filtration de 75 s ; diamètre de rétention 8 mm ;
- Un tamis de maille 5 mm et 50 mm, conforme à la norme NF ISO 565.

III.2. Appareillage courant

- Balances dont les portées sont compatibles avec les masses à peser et permettant de faire les pesées avec une incertitude relative de 0.1 % de la valeur mesurée ;
- Thermomètre gradué en degrés (de 0° à 100°) ;
- Chronomètre indiquant la seconde ;
- Enceinte thermique ou appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des sols selon une méthode normalisée.

III.3. Produits

- Solution de bleu de méthylène de qualité médicale à 10 g/l cm ± 0.1 g/l fabriquée depuis moins de 30 jours et conservée dans un flacon bouché à l'abri de la lumière ;
- Eau déminéralisée ou distillée.

IV. Préparation de l'échantillon

Si le D_{max} du matériau est ≤ 50 mm, prélever une masse du matériau à sa teneur en eau naturelle telle que : $m > 200 D_{max}$ (m en gramme, D_{max} en millimètres).

Si le D_{max} du matériau est > 50 mm, prélever 10 kg de sa fraction 0/50 mm.

Si le D_{max} de l'échantillon prélever est ≥ 5 mm :

- Séparer par tamisage et si nécessaire par lavage la fraction 0/5 mm contenue dans cet échantillon ;

- Déterminer la proportion pondérale C de la fraction 0/5 mm (sèche) contenue dans le matériau (ou dans sa fraction 0/5 mm lorsque D_{\max} mm). Cette proportion peut être lue sur la courbe granulométrique du matériau si elle est connue par ailleurs ou sinon déterminée sur un autre échantillon représentatif du matériau.

Quarter et homogénéiser la fraction 0/5 mm ainsi séparée (ou la totalité de l'échantillon prélevé si $D_{\max} < 5$ mm) de manière à préparer trois prises d'essai de masse sensiblement égales (± 5 g) et de l'ordre de :

- 30 g à 60 g dans le cas des sols très argileux à argileux ;
- 60 g à 120 g dans le cas des sols moyennement à peu argileux.

La 1^{ère} prise d'essai de masse m_1 est introduit dans le récipient de 300 cm³, mise en suspension dans 500 cm³ \pm 10 cm³ d'eau déminéralisée et dispersée à l'aide de l'agitateur à ailettes (vitesse 700 tr/min \pm 100 tr/min) au minimum durant 5 min et dans tous les cas jusqu'à disparition visuelle de tout agglomérat de particules d'argile dans la suspension.

La 2^{ème} prise d'essai de masse m_2 est utilisée pour déterminer la teneur en eau de chacune des prises d'essai.

La 3^{ème} prise d'essai est conservée dans un sac ou récipient hermétique en prévision de l'éventualité où l'essai devait être renouvelé (mauvaise estimation des incréments de solution de bleu ajoutés après chaque teste).

V. Mode opératoire

La prise d'essai étant mise en imbibition comme décrit précédemment, procéder au dosage au bleu de méthylène comme indiqué ci-après.

A l'aide de dispositif de dosage, introduire dans la suspension, maintenue en agitation permanente à 400 tr/ min, 5 à 10 cm³ de solution de bleu selon l'argilosité estimée du matériau (10 cm³ pour les matériaux les plus argileux) ; au bout 1 min \pm 10 s, procéder à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante :

- Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore ;
- La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 mm et 12 mm de diamètre.

Procéder à des injections successives par pas de 5 cm³ (selon l'argilosité du matériau) de solution de bleu jusqu'à ce qu'apparaisse une auréole clair dans la zone humide périphérique de la tache. L'essai est dit alors positif. A partir de ce moment, laisser se poursuivre l'absorption du bleu et effectuer des essais, de minute en minute, sans ajout de solution.

Si l'auréole bleu clair disparaît avant la cinquième minute, procéder à de nouvelle injection de bleu avec des pas de 2 cm³ à 5 cm³, selon l'argilosité du matériau, au lieu et place des pas de 5 cm³ à 10 cm³ introduits précédemment, car à ce stade de l'essai de suspension et en voie de saturation.

Chaque addition est suivie d'essai effectués de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai devienne positif pendant cinq minutes consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total V de la solution de bleu nécessaire pour atteindre l'adsorption total.

Le récipient et les accessoires en contact avec la suspension de sol et de bleu sont lavés et abondamment rincés à l'eau claire si des produits nettoyant ont été utilisés.

VI. Calculs et expressions des résultats

Les grandeurs mesurées au cours de l'essai sont :

m_1 : masse humide de l'échantillon constituant la première prise d'essai (en grammes).

m_2 : masse humide de l'échantillon séché à l'étuve (en grammes).

m_3 : masse sèche de l'échantillon séché à l'étuve(en grammes).

V : le volume de la solution de bleus utilisée (en centimètres cubes).

Les calculs à exécuter sont :

- teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5mm):

$$w = (m_2 - m_3) / m_3$$

- masse sèche de la prise d'essai :

$$m_0 = m_1 / (1+w)$$

- masse de bleu introduit (en grammes) :

$$B = V * 0.01$$

L'expression du résultat est (en grammes de bleu pour 100 de sol sec)

$$\mathbf{VBS=B*100 / m_0}$$

Pour les matériaux dont le $D_{\max} > 5$ mm, l'expression du résultat est :

$$\mathbf{VBS=B*C*100 / m_0}$$

Avec C comme proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du sol sec.

Extensométrie

Définition :

On appelle extensométrie l'ensemble des techniques permettant la mesure des contraintes qui apparaissent dans un corps donné conformément à la théorie de l'élasticité, lorsque ce dernier est soumis à des sollicitations extérieures.

Maintenant, l'extensométrie ne se borne plus au côté mesure de ces contraintes, mais recouvre les procédés qualitatifs de mise en évidence et d'observation des contraintes.

Buts :

Les sciences, telles que la statique, la dynamique ou la résistance des matériaux, se révèlent assez vite limitées quant au calcul des structures. Il est donc apparu des techniques expérimentales d'analyse des contraintes et de mesure de ces contraintes. Le but de l'extensométrie est donc de suppléer à la RDM.

Notions de base de mesure :

D'après la théorie de l'élasticité, les déformations qui interviennent dans les relations sont très localisées sur la structure. En pratique on ne peut faire la mesure que sur une longueur finie, qu'on appellera « base de mesure » : on mesurera la déformation de cette base, en admettant que ses dimensions sont suffisamment petites pour que l'on puisse considérer la déformation uniforme suivant sa direction.

Procédés utilisés en extensométrie :

Nombreux procédés sont actuellement employés pour l'étude des contraintes des matériaux, la plupart des phénomènes physiques étant mis à contribution pour ces études : phénomènes mécaniques, optiques, acoustiques, électriques....

Présentation de quelques extensométries :

Les extensométries mécaniques :

Destinés à mesurer les variations de distances entre deux points de la pièce étudiée.

Les extensométries électriques :

JAUGES ELECTRIQUES DE DEFORMATION

Principe

Si on considère un fil que l'on soumet à une traction, dans les limites de son domaine élastique, il s'allonge sous l'effet de la charge, cependant que sa section diminue. Si ε est l'allongement relatif le diamètre subit une diminution relative, soit $-\nu\varepsilon$, ν étant le coefficient de POISSON, chiffre voisin de 0.3 pour la plupart des matériaux.

Sachant que la résistance d'un fil conducteur est : $R = \rho \frac{L}{s}$ avec ρ résistivité, L longueur, s section, on a par dérivation logarithmique, et en confondant les faibles variations de grandeurs physiques avec les différentielles mathématiques : $\frac{\nabla R}{R} = \frac{\nabla \rho}{\rho} + \frac{\nabla L}{L} - \frac{\nabla s}{s}$

Soit en tenant compte des relations précédentes : $\frac{\nabla R}{R} = \frac{\nabla \rho}{\rho} + \frac{\nabla L}{L} (1 + 2\nu)$

Si, en première approximation, on admet que la résistivité ρ est constante, on devrait trouver : $\frac{\nabla R}{R} = 1.6 \frac{\nabla L}{L}$ avec $\nu=0.3$

En fait la résistivité varie, mais il a été montré expérimentalement que sa variation est fonction linéaire de la déformation pour des gammes de déformations très étendues.

Par suit, la variation relative de résistance s'écrit : $\frac{\nabla R}{R} = k \frac{\nabla L}{L}$

k est une constante qui dépend des matériaux considérés.

k=2 pour le constantan, le nickel-chrome

k=3.2 pour l'élinvar

k=2 pour le mangasin

le facteur k du matériau étant connu il suffirait de mesurer la variation de résistance subie par un fil rectiligne de longueur L, collé à la structure, pour appréhender la dilatation de la structure dans la direction du fil.

D'autres métaux sont très fantaisistes. Par exemple le nickel a un k négatif (k=-11), puis au-delà d'une certaine élongation, il redevient positif et voisin de 2. Inutile de préciser que de tel métaux ne peuvent être employer en extensométrie.

Pour la précision de la mesure il est indispensable satisfaire aux conditions suivantes :

- ❖ Le fil doit être parfaitement collé à la structure afin d'épouser exactement ses déformations.
- ❖ La base de mesure L doit être suffisamment petite pour pouvoir assimiler la variation unitaire de longueur $\frac{\nabla L}{L}$ à la dilatation ϵ .

Si la première condition est aisément satisfaite, la seconde ne peut l'être si la jauge est constituée d'un fil unique. C'est pourquoi dans la pratique les jauges d'extensométrie sont constituées par un fil collé sur un support souple, très fin, conformément au dessin de la figure 1, c'est-à-dire avec un arrangement du fil tel que la majeure partie de sa longueur soit parallèle à une direction.

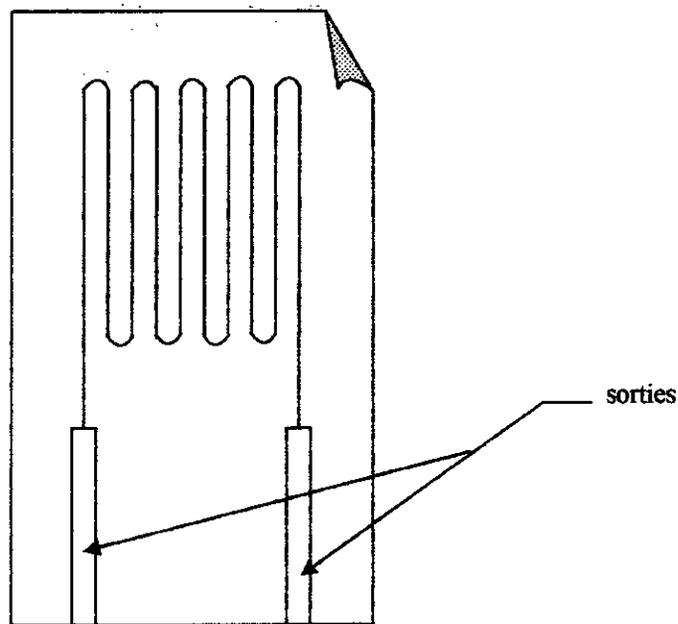


Figure 1

Ainsi la sensibilité de la jauge est considérablement multipliée et la condition précédente pour être satisfaite. Cependant, il convient de remarquer qu'une partie du fil est implanté dans la direction perpendiculaire à la direction de mesure. L'erreur introduite par ces parties transversales pourra être négligée soit si les virages sont très courts, soit s'ils sont constitués de fil de gros diamètre.

Utilisation des jauges

Elles peuvent servir à mesurer les déformations d'une structure en vue d'en calculer les contraintes par les lois connues de l'élasticité ou de la plasticité, c'est-à-dire de façon plus générale, qu'elles servent à vérifier expérimentalement les calculs de structures, réalisés en application des théories de la résistance des matériaux, d'autant moins sûres que les formes sont plus complexes. Une jauge utilisée dans ces conditions, une fois collée, permet de d'exécuter un nombre indéfini d'expériences, avec des modes de charge différents, mais elle ne peut être récupérée.

D'autre part les jauges servent à réaliser des capteurs. Un capteur est un dispositif mécanique destiné à transformer une grandeur physique quelconque, pression, force, accélération, etc. ... en déformation d'une pièce dite corps d'épreuve. Des jauges collées sur celle-ci détectent ces déformations, en vue de la mesure de la grandeur physique ou pour agir sur des dispositifs régulateurs.

Lorsque l'on prend contact pour la première fois avec la technique des jauges, on est étonné de constater que le fil subit des allongements, mais aussi des raccourcissements. En effet, le fil est enrobé par la colle qui le maintient sur son support et lui permet de subir les déformations négatives sans flamber.

Egalement, il paraît étrange qu'un corps relativement « mou », à savoir le support ou la colle, puisse transmettre les déformations d'un corps dur (la structure) à un autre corps dur (le fil électrique). Il bien s'entend sur le mot « mou » employer

dans le langage courant avec des sens différents. Si effectivement on entend par là que le corps peut fluer, les indications de la jauge seront faussées par ce phénomène. Par contre si le corps est parfaitement élastique, bien que de module bas, il existe toujours la même relation entre les déformations de la structure et celles du fil, et le rapport est très voisin de l'unité si le support s'étend suffisamment de part et d'autre du circuit actif pur permettre un arrangement des isostatiques qui passent de la structure dans la jauge (figure 2)

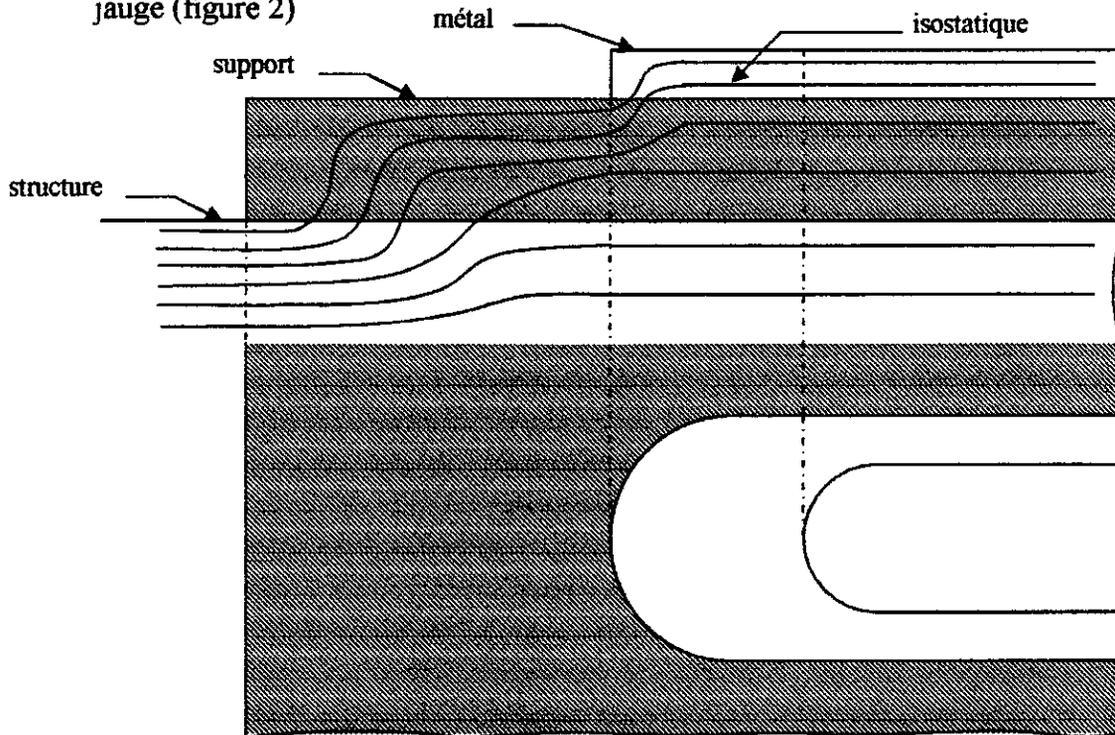


Figure2

Description des jauges

Les jauges, comme leurs instruments étant fabriquées par des spécialistes, il est nécessaire d'avoir prévu une norme pour leurs résistance nominale. La valeur la plus répandue, et de loin, est la norme 120 ohms. Viennent en suite, mais très en deçà, les valeurs 260, 350, 600, 1000 ohms. Il est toujours souhaitable d'adopter la norme la plus courante soit 12 ohms. Pourquoi cette valeur ? D'abord parce qu'il en fallait une, mais bien que d'autres auraient pu être également adoptées, si historiquement les 12 ohms ne s'étaient imposées, elles auraient de toute façon été voisines de cette valeur. En effet, plus faibles, elles auraient donné des signaux trop petits pour être exploités ; plus élevées elles auraient été perturbées par les défauts d'isolement qui pour une même valeur de variation perturbent relativement plus les mesures. D'autre part, les jauges de résistance élevées ont des fils bien plus fins, et sont donc plus fragiles. En conclusion la norme 120 ohms semblent raisonnables et il est du devoir des producteurs comme des utilisateurs de l'adopter sauf cas de force majeure.

Lorsque des jauges sont utilisées pour des mesures des déformations en vue du calcul des contraintes, il est nécessaire de connaître le facteur k de la relation. Celui ci est donné par

le producteur de jauges. Comme une jauge collée ne peut être récupérée, c'est par des prélèvements par lots, que sont connues les valeurs de k. Divers dispositifs sont utilisés pour ces mesures :

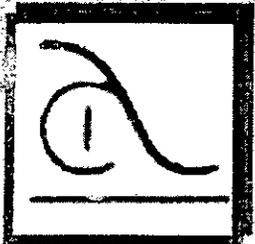
- Des lames soumises à des tractions dont on mesure l'allongement par des dispositifs mécaniques,
- Des lames triangulaires en iso flexion,
- Des poutres très longues d'égales sections soumises à des flexions circulaires par deux poids égaux et deux appuis disposés symétriquement.
- L'expérience prouve que, dans des conditions de fabrication identiques, des prélèvements statistiques permettent de garantir que toutes les jauges d'un même lot ont des facteurs identiques à 1% près ou même 0.5 % près suivant leurs tailles

Les jauges sont fabriquées suivant divers procédés mis au point par les différents producteurs.

Certaines sont obtenues sur des petites tablettes présentant des aspérités en forme d'aiguilles. Le fil est guidé suivant la forme de la jauge autour de ces points, sortant d'un outil en forme de seringue de Pravas. D'autres enroulent le fil sur un mandrin de papier, comme un solénoïde, qui est ensuite aplati. Un autre procédé consiste à tendre des fils parallèles sur une grande longueur et à souder ensuite entre les brins adjacents, des liaisons par des bandes métalliques plus larges. Certaines fabrications sont exécutées non à partir de fil mais de feuilles laminées de quelques microns. Le circuit est découpé à l'emporte pièce puis collé sur le support.

Une autre technique utilise comme conducteurs de petits cristaux de silicium dopé, analogues à ceux qui servent à la fabrication des transistors. Ces corps, dits semi-conducteurs ont une sensibilité considérable, au point que c'est surtout le terme $\frac{\nabla l}{l}$ de la formule 2 qui agit, les variations géométriques étant négligeables à cette échelle. On peut obtenir avec ces jauges des facteurs k de l'ordre de 5 ou même 200, très supérieurs à la valeur 2 des jauges classiques. Ces jauges sont employées pour des mesures de très faibles déformations et servent à réaliser des capteurs de faibles dimensions donnant des signaux de sortie importants.

ENTREPRISE DES CIMENTS ET DERIVES-CENTRE E.R.C.C/S.P.A
FILIALE : SOCIETE DES CIMENTS ALGEROIS



S.C.A.L.

CIMENTS PORTLAND

CPJ 45 NORME NF P 15 301

CONFORMÉMENT À L'INSTRUCTION MINISTÉRIELLE N°00161 DRN DU 09 SEPTEMBRE 1989, LES REGLEMENTS TECHNIQUES ET NORMES DE CONSTRUCTION RETENUS POUR LES LIANTS HYDRAULIQUES ET EN USAGE EN ALGÉRIE A TITRE TRANSITOIRE SONT LES NORMES AFNOR (NF).

LE CIMENT PORTLAND COMPOSE CPJ 45

DEFINITION

Le ciment Portland composé CPJ 45 résulte de la mouture :
D'au moins 65 % de CLINKER PORTLAND
Du complément à 100 % d'un ou plusieurs constituants secondaire :
(Laitier, filler calcaire, ...) ;
De sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise

CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANQUES

Les résistances à la compression du CPJ 45 font l'objet d'un contrôle statistique faisant apparaître une valeur moyenne des résultats obtenus à 28 jours voisine de 450 Bars (45 MPa).

La majorité des résultats obtenus se situe entre 350 Bars et 550 Bars (35 et 55 MPa). Ces deux dernières valeurs sont les limites inférieure et supérieure de la classe de résistance du CPJ.45.

En tout état de cause, les valeurs minimales garanties sont: 175 Bars (17.5 MPa) à 7 jours
350 Bars (35 MPa) à 28 jours.

Le temps de début de prise, à 20°C, mesuré sur pâte pure est supérieur à 90.

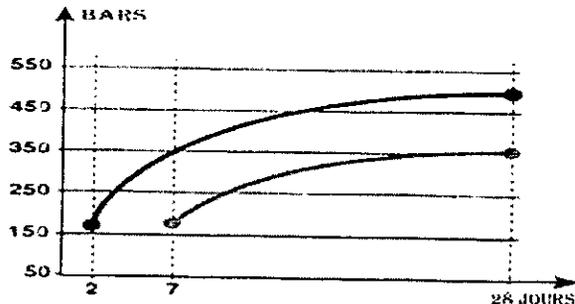
Le retrait à 28 jours du mortier normal est inférieur à 800 micro- mètres / mètre.
L'expansion mesurée à chaud et à froid sur éprouvette de pâte pure est inférieure à 10 mm

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

- La proportion des sulfates (SO₃) dans le ciment est inférieure à 4 %.
- La teneur en chlorures (Cl-) est inférieure à 0,05%.

L'ADDITION DE SELS SOLUBLES TELS QUE CHLORURES OU SULFATES EST INTERDITE

EVOLUTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION



Conforme aux normes NF P 18-336 et NF P 18-337.

Présentation

Le PLASTIMENT BV 40 est un réducteur d'eau plastifiant énergétique qui :

- Augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité.
- Facilite la mise en place du béton.
- Permet éventuellement de réduire le dosage en ciment.
- Permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation.

Caractères généraux

Liquide brun foncé ne contenant pas de chlore.

Densité : $1,18 \pm 0,01$

pH : $4,5 \pm 1$

Le PLASTIMENT BV 40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

Sur béton frais :

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage.
- de disperser le ciment dans la masse.
- d'améliorer l'adhérence ciment-agrégat-fer.
- de s'opposer à la ségrégation.
- d'améliorer la thixotropie.
- d'étaler éventuellement la prise.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques.
- d'accroître la compacité.
- d'augmenter l'imperméabilité.
- de diminuer le retrait et le fluage.

Le PLASTIMENT BV 40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.

Domaines d'application

1. Augmentation des résistances mécaniques

Le PLASTIMENT BV 40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée.

La compacité et l'imperméabilité sont améliorées.

Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Le PLASTIMENT BV 40 est donc particulièrement indiqué pour :

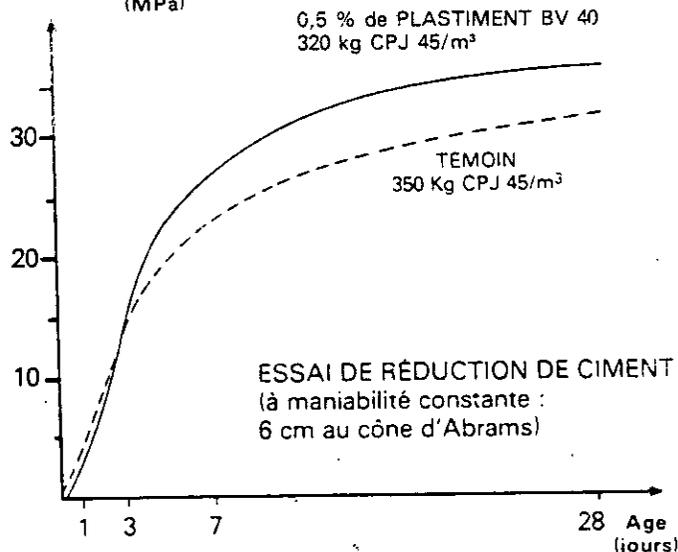
- Les bétons armés à hautes performances.
- Les bétons précontraints.
- Les bétons préfabriqués étuvés.

2. Réduction du dosage en ciment.

Le PLASTIMENT BV 40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10 % en conservant les résistances mécaniques.

Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

Résistance à la compression (MPa)



Prescriptions

Article n°

- 1) Les bétons fortement sollicités et devant présenter une grande compacité seront additionnés au moment du gâchage d'un plastifiant réducteur d'eau énergétique du type PLASTIMENT BV 40 ou similaire. Le produit sera utilisé suivant les indications du fournisseur.
- 2) Les bétons transportés à la pompe...
seront additionnés au moment du gâchage d'un plastifiant retardateur du type PLASTIMENT BV 40 ou similaire. Le produit sera utilisé suivant les indications du fournisseur.

Bibliographie

- [1] SABLOCRETE, (1994), *Béton de sable*, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
- [2] J.J. CHAUVIN, (sep 1990), *Le béton de sable*, LRPC, bordeaux, France.
- [3] M.BENMALEK, (1992), *Contribution à l'étude des bétons de sable*, thèse de magistère, ENP, Alger, Algérie.
- [4] M.BEN DHIA, (1988), *Quelques particularités de l'utilisation du sable de dunes en construction routière en milieu saharien*, Bulletin de liaison du LCPC, N° 213, Paris, France.
- [5] A.CHAOUCH, (1993), *Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes*, thèse de magistère, ENP, Alger, Algérie.
- [6] M.CHEMROUKH, (juin 2000), *Le béton de sable : Identification et utilisation du matériau*, Conférence internationale de géoengineering IGC/USTHB, Alger, Algérie.
- [7] J.ARRAMBIDE, M.DURIEZ, (1962), *Nouveau traité de matériaux de construction, Tome 1, Granulats, ciments, bétons, construction, techniques générales d'emploi*, DUNOD, Paris, France
- [8] LCPC et SETRA, (1985), *Réalisation des assises de chaussées en sables traités aux liants hydraulique*, presse du Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, France.
- [9] A.M. NEVILLE, (2000), *Propriétés des bétons*, édition EYROLLES, Paris, France.
- [10] L.PERIMEL, (août 1968) *Origine et caractéristiques des principaux types de sables*, Bulletin du laboratoire des ponts et chaussées.
- [11] H.RENAUD, F.LETERTRE (1978), *Ouvrages en béton armé*, Les Editions FOUCHER, Paris, France
- [12] G. DREUX, J.FESTA, (1998), *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Edition EYROLLES, Paris, France.
- [13] A.GHERIB, (2003) *Etude d'un béton de sable de dunes pour pistes aéronautiques*, thèse de magistère, ENP, Alger, Algérie.
- [14] JF.CHELGHOU, M.LOUATI, (1985), *Béton de sable –sable de dunes-*, P.F.E, ENP, Alger, Algérie.
- [15] JCNERIB, (1991) *Colloque maghrébin sur les actions par le développement de la construction en matériaux locaux*, CNERIB, Alger, Algérie.
- [16] M.MAZA, T.AYADA, (dec 1995), *Traitement des bétons et mortiers à base de sables concassés locaux par des adjuvants*, Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics, Paris, France