

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE

M0004/93B

MINISTERE DE L'EDUCATION

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Génie Civil

THESE DE MAGISTER

Présentée par Ali AHMED-CHAOUCH
Ingénieur d'état Diplômé de l'I.N.F.O.R.B.A

ETUDE DES CARACTERISTIQUES DU BETON DE SABLE DE DUNES

Soutenue en Juillet 1993 devant le Jury composé de :

MM. A.CHAKER	Professeur (U.S.T.H.B)	Président
A.BALI	Professeur (E.N.P)	Rapporteur
Mme A.KHETTAB	Chargé de cours (E.N.P)	Examinatrice
MM T.MESSAFER	Ph.D (ENP)	Examineur
S.BELKACEMI	Ph.D (ENP)	Examineur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION

BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Génie Civil

THESE DE MAGISTER

Présentée par Ali AHMED-CHAOUCH
Ingénieur d'état Diplômé de l'I.N.F.O.R.B.A

ETUDE DES CARACTERISTIQUES DU BETON DE SABLE DE DUNES

Soutenue en Juillet 1993 devant le Jury composé de :

MM. A.CHAKER

A.BALI

Mme A.KHETTAB

MM T.MESSAFER

S.BELKACEMI

Professeur (US.T.H.B) Président

Professeur (E.N.P) Rapporteur

Chargé de cours (E.N.P) Examinatrice

Ph.D (ENP) Examineur

Ph.D (ENP) Examineur

للأهداء

إلى التي حملتني وهنأعلى وهن
إلى والدي الكريم الذي ما فتى يشجعني ويخصني
بالعناية

إلى زوجتي وابنتي
إلى كل أصدقائي وأساتذتي
إلى كل الذين آمنوا بالحق وصبروا في سبيله

إلى كل هؤلاء . . . أهدي ثمرة جهدي

علي لعمري شاوش



REMERCIEMENTS

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer à mon directeur de thèse, A.BALI, Professeur à l'E.N.P, ma profonde gratitude pour sa sollicitude, ses conseils et ses encouragements permanents qu'il m'a prodigué durant le déroulement de ce travail de recherche.

J'adresse mes remerciements à monsieur THIMUS, Professeur, à l'Université Catholique de Louvain La Neuve, pour sa contribution dans la réalisation des essais de fluage.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur A.CHAKER, Professeur à l'U.S.T.H.B, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

J'exprime également ma reconnaissance à , madame R. KHETTAB, chargé de cours à l'E.N.P, monsieur T.MESSAFER, Ph.D à l'E.N.P, et monsieur S.BELKACEMI, Ph.D à l'E.N.P, d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

Je tiens à remercier la direction du projet E.N.P/P.N.U.D d'avoir permis la réalisation de quelques essais en Belgique.

Je tiens également à remercier la Direction de l'I.N.F.O.R.B.A, ainsi que la Direction de l'U.R.E.G, pour leurs contributions dans la réalisation du programme expérimental.

Je remercie enfin, pour leurs aides tous les collègues post-graduant au sein du département de Génie-Civil.

SOMMAIRE



CHAPITRE PREMIER : INTRODUCTION.....	1
1-1-Généralités.....	2
1-2-Interêt et limites des bétons de sable.....	2
1-2-1-Interêt des bétons de sable.....	2
1-2-2-Limites des bétons de sable.....	3
1-3-Objectifs de la recherche.....	3
CHAPITRE DEUXIEME : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
A-BETON DE SABLE DE DUNES.....	5
2-1-Introduction.....	5
2-2-Présentation générale de la recherche bibliographique.....	6
2-3-Etudes antérieures.....	7
2-3-1-Etudes menées en Afrique Occidentale.....	7
2-3-2-Etudes menées en Afrique du Nord et dans le Golfe D'Arabie.....	12
2-3-3-Etudes menées en Allemagne.....	14
2-3-4-Etudes menées en U.R.S.S.....	15
2-3-5-Etudes menées en France.....	19
2-3-6Etudes menées en Algérie.....	22
2-4-Conclusions.....	26
B-RETRAIT.....	28
2-5-Rappel sur le retrait.....	28
C-FLUAGE.....	30
2-6-Rappel sur les mécanismes de fluage.....	30
2-7-Lois générales gouvernant le fluage.....	31
2-7-1-Description d'une courbe de fluage idéale..	31
2-7-2-Modèles rhéologiques décrivant le fluage...	33
2-7-3-Lois empiriques.....	34

CHAPITRE TROISIEME : ETUDE EXPERIMENTALE.....	38
3-1-Introduction.....	38
3-2-Caractéristiques des matériaux.....	38
3-2-1-Le sable.....	39
3-2-1-1-Composition granulométrique.....	39
3-2-1-2-Composition minéralogique.....	39
3-2-1-3-Caractéristiques physiques.....	41
3-2-1-4-Composition chimique.....	41
3-2-1-5-Conclusion.....	42
3-2-2-Le ciment.....	43
3-2-2-1-Analyse chimique.....	43
3-2-2-2-Caractéristiques physiques.....	43
3-2-2-3-Caractéristiques mécaniques.....	44
3-2-2-4-Interprétation.....	44
3-2-3-Les fillers.....	46
3-3-Recherche de compositions optimales.....	46
3-3-1-Dispositions communes.....	47
3-3-2-Propriétés du béton frais.....	47
3-3-2-1-Compositions de base.....	48
3-3-2-2-Compositions avec filler calcaire.....	51
3-3-2-3-Compositions avec adjuvants.....	57
3-4-Propriétés du béton durci.....	58
3-4-1-Caractéristiques mécaniques.....	58
3-4-2-Variation des masses volumiques et températures.....	65
3-4-3-Analyse des déformations.....	68
3-4-3-1-Retraite du béton de sable.....	68
3-4-3-2-Propagation de l'onde sonique dans le béton de sable.....	78
3-4-3-3-Analyse des courbes contrainte -déformation.....	82
3-4-3-4-Analyse du phénomène de fluage.....	95
CHAPITRE QUATRIEME : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	100
BIBLIOGRAPHIE.....	104

LISTE DES FIGURES

fig 2-1 : Courbe de fluage.....	25
fig 2-2 : Courbe idéale de fluage.....	31
fig 3-1 : Courbe granulométrique du sable d'El Goléa.....	40
fig 3-2 : Dimensions de l'appareillage de mesure de la maniabilité.....	52
fig 3-3 : Relation écoulement au Vébé-écoulement au Vébé miniature.....	53
fig 3-4 : Relation masse volumique du béton frais-dosage en correcteur.....	56
fig 3-5 : Relation maniabilité-dosage en correcteur.....	57
fig 3-6 : Variation de la résistance en fonction du rapport E/C.....	62
fig 3-7 : Variation de la résistance en fonction du dosage en correcteur.....	62
fig 3-8 : Variation de la résistance en fonction du rapport C/E.....	63
fig 3-9 : Variation de la résistance en fonction de l'âge du béton.....	63
fig 3-10: Variation de la résistance en fonction du rapport E/C (traction).....	64
fig 3-11: Variation de la résistance en fonction du dosage en correcteur (traction).....	64
fig 3-12: Relation résistance en traction-résistance en compression.....	65
fig 3-13: Dispositif de mesure de la température.....	66
fig 3-14: Influence de la cure sur le retrait(epr 7x7x28)..	71
fig 3-15: Influence de la cure sur le retrait(epr 4x4x16)..	72
fig 3-16: Influence de la cure sur le retrait.....	72

fig 3-17:Retrait en fonction du rapport E/C (epr 7x7x28)...	73
fig 3-18:Influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait.....	74
fig 3-19:Retrait en fonction du dosage en ciment.....	76
fig 3-20:Retrait en fonction du dosage en correcteur.....	76
fig 3-21:Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSF 4-4-1).....	85
fig 3-22:Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSF 3-4-3 SF).....	86
fig 3-23:Courbe contrainte-déformation longitudinale (BS 3-4).....	86
fig 3-24:Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSF 4-4-1).....	88
fig 3-25:Courbe contrainte-déformation longitudinale (BS 3-4).....	89
fig 3-26:Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSF 3-4-3 SF).....	89
fig 3-27:Variation du module d'élasticité tangent (BSF 4-4-1).....	91
fig 3-28:Variation du module d'élasticité tangent (BS 3-4).....	92
fig 3-29:Variation du module d'élasticité tangent (BSF 3-4-3).....	92
fig 3-30:Courbe contrainte-déformation transversale (BSF 4-4-1).....	93
fig 3-31:Courbe contrainte-déformation transversale (BSF 3-4-3 SF).....	94
fig 3-32:Courbe contrainte-déformation transversale (BS 3-4).....	94
fig 3-33:Courbe de fluage (BS 3-4).....	97
fig 3-34:Relation entre courbe de fluage et la loi de Lemaître (BSF 3-4-3 SF).....	98
fig 3-35:Relation entre courbe de fluage et la loi de Lemaître (BS 3-4).....	98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 :Composition granulométrique des sables du sud.....	39
Tableau 3-2 :Propriétés physiques des sables du sud.....	41
Tableau 3-3 :Compositions chimiques des sables du sud.....	42
Tableau 3-4 :Résistances du ciment.....	44
Tableau 3-5 :Définitions des compositions de base et temps d'écoulement.....	49
Tableau 3-6 :Mesure des masses volumiques du béton frais..	51
Tableau 3-7 :Temps d'écoulement au Vébé et Vébé miniature.	52
Tableau 3-8 :Définitions des compositions avec filler.....	54
Tableau 3-9 :Masses volumiques du béton frais avec filler.	55
Tableau 3-10: Définition de la composition avec adjuvant...	58
Tableau 3-11: Résistances du béton à différents âges.....	60
Tableau 3-12: Masses volumiques du béton frais.....	67
Tableau 3-13: Vitesses de propagation de l'onde sonique....	80
Tableau 3-14: Caractéristiques du béton.....	82
Tableau 3-15: Valeurs du module d'élasticité tangent.....	90
Tableau 3-16: Paramètres de la loi de Lemaître.....	96

CHAPITRE PREMIER : INTRODUCTION

INTRODUCTION

1-1-Généralités :

L'Algérie est un pays où le besoin en matériaux de construction est intense.

Dans le sud, cette intensité, est ressentie encore plus à cause de l'insuffisance marquée du gravier. Ce manque implique des surcoûts de la construction causé par les frais de transport.

L'étude présentée dans la thèse, donne une solution judicieuse, qui consiste en l'exploitation des ressources locales, en remplaçant le béton classique à base de gravier par un "béton de sable de dunes" constitué de ciment, d'eau et essentiellement de sable.

Il est utile, de situer ce nouveau matériau par rapport aux bétons traditionnels.

Les bétons traditionnels sont généralement constitués d'un granulat 0/16 à 0/25 et comportent, selon l'utilisation envisagée, entre 250 et 400 Kg de ciment par mètre cube.

Dans ces bétons, compte tenu du diamètre maximal (D_{max}) des grains, le dosage en fines (le ciment) est insuffisant pour assurer au béton une compacité maximale. Si l'on veut diminuer la valeur de D_{max} au dessous de 16 mm, les différentes lois de répartitions granulaires indiquent que pour conserver une compacité maximale, il faut augmenter la teneur en fines, donc en ciment.

Dans la gamme des sables ($D_{max} \leq 5$ mm), le dosage en ciment se situe entre 450 et 700 Kg/m³ : ce sont les mortiers.

Les bétons de sable relèvent d'une autre approche : elle consiste à faire la distinction entre les fines, nécessaires à l'obtention d'une bonne compacité, et le ciment, nécessaire à

l'obtention d'une résistance suffisante pour l'usage envisagé.

Les bétons de sable ont donc, les mêmes dosages en ciment que les bétons traditionnels (250 à 400 Kg/m³), et la compacité est atteinte par un ajout complémentaire de fines, généralement calcaires.

La dénomination "Béton de sable" et non pas mortier, vient justement du fait que du point de vue consommation en ciment, ce matériau a un dosage identique à celui du béton classique, et qu'il est appelé à remplacer dans certains cas le béton de structure et non le mortier d'enduits.

1-2-Intérêt et limites des bétons de sable :

1-2-1-Intérêt des bétons de sable :

On fait très souvent la confusion entre performances et résistance. Dans de nombreux usages, le béton ne nécessite pas un niveau de résistance très élevé. Ces usages exigent, parfois des caractéristiques mal assurées par le béton traditionnel et que le béton de sable peut mieux satisfaire. Parmi ces caractéristiques, on peut citer :

- la maniabilité : le béton de sable étant plus maniable, permet donc, d'augmenter les longueurs de pompage, de diminuer l'énergie de mise en place et, d'une façon générale, de faciliter la mise en oeuvre;

- cohésion et absence de ségrégation : la variation entre dimensions des grains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion, et surtout une absence totale du problème de ségrégation;

- petite granularité : la dimension des grains étant petite, ce matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en oeuvre de structures à fortes densités de ferrailage, ainsi que dans les travaux de rénovation de structures;

- aspect de surface : le souci esthétique est de plus en plus pris en compte dans toutes les constructions; les bétons

de sable permettent la réalisation d'effets architectoniques tant sur la forme que sur l'aspect.

En plus de ces caractéristiques, pour le cas du sud Algérien, un autre intérêt incite à utiliser ce matériau, c'est l'abondance de la matière première qui est le sable, et qui conduira certainement à des économies.

1-2-2-Limites des bétons de sable :

Dans l'état actuel des connaissances, les bétons de sable ne peuvent pas prétendre au remplacement systématique des bétons traditionnels, surtout pour des raisons techniques.

On ignore certaines caractéristiques et comportements du béton de sable, tel que :

- le retrait des bétons de sable courants (le cas du sable de dunes n'est pas inclu) semble être du même niveau que les bétons classiques, leur module d'élasticité est par contre faible;

- par ailleurs, on ne dispose que de peu d'éléments sur leur comportement au fluage, ce qui les exclut dans l'immédiat des éléments de structure fortement sollicités ou précontraints. Dans ce cas, on utilise surtout ce qu'on appelle "Béton de sable chargé". Il s'agit d'un béton de sable chargé par l'ajout de gravillons sans que le rapport gravillon/sable ne dépasse 1;

Les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses.

1-3-Objectifs de la recherche :

Ce travail vise à étudier un nouveau matériau, qui serait bénéfique économiquement au pays.

Ce sujet d'initiation à la recherche, permet de connaître certaines des caractéristiques du béton de sable de dunes, et d'ouvrir la voie à ceux qui auront à associer l'acier au béton.

L'objectif de cette étude est de connaître toutes les propriétés physiques et mécaniques de ce béton, tout en essayant d'améliorer son comportement.

Cette étude a une importance primordiale, car si elle aboutit, permettrait au pays de réaliser plus de constructions dans le sud, avec un moindre coût.

L'étude du béton de sable de dunes s'est faite, en observant l'influence des différents matériaux entrant dans sa composition.

concernant l'étude des propriétés physiques, on a surtout traité l'effet du rapport eau sur ciment, et le dosage en filler calcaire, sur la maniabilité de ce béton.

Cette recherche a permis aussi de voir l'influence de ces deux paramètres sur les résistances du béton, son retrait et son fluage.

La résistance n'est pas très influencée par la compacité du matériau, mais dépend essentiellement de la réduction du rapport E/C.

La mesure de la finesse de mouture du ciment, ainsi que la connaissance de sa composition chimique, ont permis de donner des explications aux forts retraits remarqués.

Le filler calcaire, s'il permet de réduire le rapport E/C, risque par contre d'augmenter le retrait de ce béton.

Cette recherche a permis de mettre en évidence le comportement en fluage du béton de sable.

Les différents chapitres exposés dans cette étude, permettent de définir ce matériau, de connaître ses caractéristiques, et surtout de donner un certain nombre de recommandations à ceux qui auront à développer ce sujet.

Des études similaires, mais traitant des matériaux de caractéristiques différentes, ont été faites dans d'autres pays du monde. Toutes ces études sont présentées dans le deuxième chapitre.

CHAPITRE DEUXIEME : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE DEUXIEME

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

A-BETON DE SABLE DE DUNES

2-1-Introduction :

Dans une synthèse des connaissances relatives au béton de sable [1], on a rapporté que "dès le milieu du XIX siècle, c'est à dire au début du développement du "ciment armé", F.COIGNET a conçu ce qu'il appelait le "béton aggloméré" qu'on pourra peut être considérer comme l'ancêtre du béton de sable, puisque c'était un mélange de sable, de chaux, de ciment et d'eau.

Certains des ouvrages qu'il a fait réaliser, sont encore en service actuellement (Maisons à St Denis, murs de soutènement à Passy ...). Cette technique a également été exportée (Tour à Port Said, Pont à New York...), mais relève exclusivement de la technique des maçonneries (préfabrication de briquettes...).

F.COIGNET a fait confectionner certaines parties de l'Aqueduc de la Vanne en utilisant un mélange de sable fin traditionnel ($M_f=2$) et de sable de Fontainebleau (réputé à l'époque comme impropre à l'utilisation en maçonnerie).

Les proportions de ce béton étaient : 1 part de liant ($2/3$ chaux, $1/3$ ciment), 4 parts de sable, 0.5 part d'eau (en poids), ce qui correspond approximativement à un dosage en liant de 400 Kg/m^3 plus proche de celui des bétons de sable que des mortiers.

Au milieu du XX siècle, REHBINDER et son équipe ont réalisé en U.R.S.S quelques expérimentations en laboratoire, suivies

d'applications en usine sur des bétons de sable plus conforme à l'objet de cette étude, puisqu'ils ont repris les idées de base suivantes :

- l'étendue granulométrique du béton est un facteur d'hétérogénéité, il convient donc de la limiter.

- pour que le liant présente une réactivité maximale, il faut qu'il soit aussi fin que possible; cette réactivité est encore améliorée si on broie ensemble le ciment et une partie du sable, avec un ajout d'agent de mouture suractivé, immédiatement avant emploi.

- un adjuvant réducteur d'eau doit être ajouté lors du malaxage pour réduire le dosage en eau au minimum possible.

- une vibration intense doit être appliquée lors du malaxage et de la mise en place du béton.

L'application de ces principes doit permettre d'obtenir un béton de porosité aussi faible que possible, constituée de capillaires très fin, et d'homogénéité maximale après mise en place. De plus, la plus grande partie (à défaut de la totalité) du ciment de ce béton peut s'hydrater".

2-2-Présentation générale de la recherche bibliographique :

La plupart des titres d'articles relatifs au béton de sable ont pu être déterminés grâce aux références bibliographiques de M.MARIOTTI [2]. Cet auteur a fait appel au service de documentation du C.E.B.T.P, qui grâce à son réseau a pu avoir accès au fichier U.T.I, au fichier automatisé PASCAL⁴ du C.N.R.S, ainsi qu'aux services de documentation du C.E.R.I.L.H L.C.P.C, et du C.S.T.B.

A partir des références bibliographiques de chacun de ces titres on a pu alors compléter notre étude qui s'est révélée assez limitée du fait du nombre peu important de recherches qui ont été entreprises (ou tout au moins publiées) vis à vis du béton de sable.

Les quelques articles trouvés concernent les recherches effectuées en Afrique occidentale (Sénégal, Congo, Sierra

Léone, Nigéria), Afrique du nord et dans le Golfe d'Arabie.

Une pénurie en gros granulats s'étant faite sentir à Berlin, de ce fait une étude consacrée au remplacement partiel des gros granulats par du sable a été publiée en Allemagne.

Par contre, il semble que le béton de sable ait fait l'objet d'investigations plus poussées en U.R.S.S. On a pu collecté un nombre non négligeable d'articles publiés dans ce pays.

Un autre champ d'investigation a été mené en France, par les laboratoires régionaux de Bordeaux et de Blois en collaboration avec le laboratoire du C.E.B.T.P et l'Institut Universitaire de Technologie Génie Civil de Bordeaux avec des sables d'Aquitaine.

Sans oublier bien sûr l'étude faite sur les bétons hypercompactés réalisée par le C.E.B.T.P.

Concernant l'Algérie, les seules études faites, sont celles présentées en tant que projet de fin d'étude par des élèves Ingénieurs de l'Ecole Nationale Polytechnique.

En raison du nombre d'articles peu important, mais faisant néanmoins intervenir plusieurs chercheurs, dont chacun a étudié des matériaux de caractéristiques différentes, il nous a paru préférable de présenter ces travaux, d'abord en les différenciant par pays, puis en les classant par ordre chronologique dans chacun de ces groupes. Il apparaît évident que si les caractéristiques développées par chaque pays avaient été les mêmes, cette analyse ne serait plus judicieuse, et on devrait traiter l'ensemble différemment.

2-3-Etudes antérieures :

2-3-1-Etudes menées en Afrique Occidentale :

Vers 1961, dans les régions anglophones situées au sud du Sahara en Afrique Occidentale, on utilisait, pour la construction des murs, des blocs faits d'un mélange de ciment Portland et de sable.

TYLER [3], dans son rapport, a collecté toutes les informations disponibles sur ces bétons.

En ce qui concerne les matériaux utilisés :

-Le sable: a une qualité qui varie beaucoup d'une région à l'autre. Le sable de mer employé dans les régions cotières est d'une qualité inférieure au sable de rivière ou de carrière employé à l'intérieur. Cette qualité médiocre est due à la finesse, à la forme des grains, à une faible granulométrie et à l'inclusion de coquilles cassables.

-Le ciment : de nombreuses marques sont importées. Il est demandé aux fabricants que le ciment fourni soit en conformité avec la norme Britannique BS 12 "Ciment Portland ordinaire".

La composition recommandée par la norme BS2 028 est : 1 volume de ciment pour 6 volumes de sable, et lorsque la vibration est employée et que le sable a une bonne granulométrie, on peut adopter 1 volume de ciment pour 12 volumes de sable. Les machines utilisées pour fabriquer ces blocs vont de la machine manuelle à la machine automatique. On appella alors ces briques "sandcrete ". Les "sandcrete blocs" de qualité supérieure sont obtenus avec des machines qui vibrent les moules pendant le remplissage ou qui compactent les blocs.

Les résistances en compression de ces blocs, ne dépassaient pas 4.5 MPa.

La fréquence des fissures qui se produisaient sur les murs faits de "sandcrete" dans les constructions de la Sierra Léone a abouti à organiser un programme complet de recherches sur les propriétés de ces blocs. THOMAS [4] a entrepris les recherches pour compléter les informations très fragmentaires recueillies par TYLER.

Cette étude a particulièrement porté sur l'influence de la conservation et de la proportion de ciment sur la résistance en compression des blocs, car l'étude faite par TYLER s'était surtout limitée à des tests de compression sur des éléments fournis par les différents contractants de l'Afrique

Occidentale et fabriqués sans référence à la relation âge/résistance des blocs.

Quatre compositions furent expérimentées, avec un rapport ciment/sable de :

A :1/12

B :1/10

C :1/8

D :1/6

Les mélanges ont été coulés au collège de "Fouray Bay" en Sierra Leone dans une machine manuelle. Les différentes conservations suivantes furent réalisées après le coulage :

α : non protégé (lors des essais, le temps était chaud et humide);

β : conservés humides sous sac pendant 24 heures puis à l'air (28°C-94% H.R);

γ : conservés humides sous sac pendant 24 heures puis à l'air (28°C-79% H.R);

δ : conservés humides sous sac pendant 7 jours puis à l'air (28°C-79% H.R);

ϵ : conservés humides sous sac pendant 24 heures puis à l'air (21°C-67% HR);

λ : conservés humides sous sac pendant 7 jours puis à l'air (21°C-67% H.R);

Les résistances en compression, mesurées à différents âges, à partir du 8^{eme} jour, ont montré l'influence très marquée du dosage en ciment.

L'augmentation de la résistance va de 70 à 300% selon les conservations, lorsque la proportion de ciment double (composition A et D). Par contre pour le même dosage en ciment, l'influence de la conservation est moins nette sur les résistances en compression; elle est surtout marquée pour le dosage en ciment 1/6. La conservation humide (β) donne les meilleurs résultats à 28 jours, mais les plus faibles performances.

Nous pensons que ces conservations auront surtout une influence sur le retrait et par conséquent la fissuration des

blocs, car le fait, qu'il y'ait des bétons qui n'ont pas été protégés et qui malgré cela présentent d'assez bons résultats, est certainement dû au climat chaud et humide qui existe en Sierra Léone pendant certains mois de l'année. C'est la période pendant laquelle ont eu lieu les essais ($25^{\circ}\text{C}-\text{H.R}>85\%$).

Un second rapport sur les propriétés des "sandcrete blocs" a été présenté par YILLA [5]. Ce dernier n'est autre qu'une suite du premier rapport publié par le Dr THOMAS en septembre 1964.

Un trait commun aux bâtiments d'Afrique Occidentale est l'humidité souvent visible sur les murs intérieurs. La seconde phase de la recherche effectuée sur les propriétés des "Sandcrete" concerne les variations de longueur à partir d'une longueur de référence et les variations de poids de mélanges de ciment et de sable dans les conditions d'essai.

Les blocs sont coulés à partir de mélanges de ciment et de sable dans les rapports 1/12; 1/10; 1/8; 1/6 et placés dans différentes conditions de conservation ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \lambda$).

Tous les blocs ont été maintenus dans les conditions de conservation pour 14 jours avant de commencer les tests. A la fin du 14^{eme} jour, les blocs sont immergés dans de l'eau à une température de $14-19^{\circ}\text{C}$ pour une durée de 4 jours, avant de les placer dans une étuve à 50°C pour les 44 dernières heures. L'étuvage a été continué jusqu'à ce que le bloc ait atteint un poids constant. La longueur de l'élément séché est alors mesurée. Les poids des éléments secs et humides sont aussi inscrits.

Cette seconde série de tests sur les "Sandcrete" a révélé que ces blocs absorbent autour de 30% de leurs poids secs d'eau et qu'un tel changement se produit également dans les dimensions.

Ces changements sont en fonction des rapports de mélange C/S et des conditions de conservation.

Quelque soit le milieu de conservation on a une capacité d'absorption d'humidité maximum pour le mélange C/S de 1/10,

par contre le gain minimum en poids est celui du mélange 1/8.

Le plus grand changement de dimension est obtenu dans le cas du mélange 1/8, et la plus petite variation est donnée par le mélange 1/10.

En conclusion, les "Sandcrete blocs" présentent les plus grandes résistances à l'absorption d'humidité pour un pourcentage de ciment de 12.5%, mais pour cette résistance d'importantes variations de dimensions sont également obtenues.

Les résultats les plus significatifs sont ceux du mélange 1/6, qui donne les plus grandes résistances d'après THOMAS [4]. Pour ce mélange les tests révèlent qu'ils a une faible résistance à la pénétration d'humidité, mais aussi souffre d'un faible changement de dimensions pour toutes les conditions de conservation.

Toujours en Afrique Occidentale, une autre recherche a été effectuée par UZOMAKA [6] au Nigéria, dont le but était l'analyse des facteurs suivants, qui affectent la résistance des blocs de "Sandcrete" :

- effet de la dimension des particules de sable et leur distribution;
- effet de la géométrie des blocs;
- effet des conditions de séchage.

Concernant l'étude du premier facteur, UZOMAKA a obtenu de grandes résistances en compression quand il s'agissait de sable grossier, ce qui n'est pas le cas pour le sable fin.

Il apparait évident, quand il s'agit de sable fin, que pour obtenir une résistance égale à celle du matériau coulé avec du sable grossier, on est obligé d'utiliser une grande quantité de ciment.

Pour l'étude de l'effet de géométrie, six dimensions différentes ont été réalisées à partir d'un même mélange, et l'auteur s'est rendu compte du fait que le frottement entre les côtés du moule et le matériau réduisait l'efficacité de la compaction quand il s'agissait d'un petit moule. En conséquence la résistance des blocs pourrait augmenter avec les dimensions

de ce dernier.

Le pôle d'intérêt suivant a été l'influence de l'arrosage sur la résistance.

Les blocs traités à l'eau ont donné une résistance plus importante que celle des blocs qui ont séché sans être arrosés de temps à autre.

L'effet de l'eau d'arrosage est très prononcé quand E/C est bas, le rapport de résistance est autour de 0.4. Mais comme le rapport E/C est en augmentation de 0.4 à 0.6, le rapport de résistance est lui aussi en augmentation, c'est à dire que cette eau d'arrosage aura à contribuer dans l'hydratation du ciment et qu'il existe un certain rapport E/C avec lequel on aura assez d'eau pour provoquer cette hydratation, et le rajout d'eau d'arrosage serait insignifiant.

2-3-2-Etude menées en Afrique du Nord et dans le Golfe d'Arabie

Il n'existe qu'un seul rapport de synthèse des travaux de recherche menés dans ces deux régions, rapport élaboré par STAMATOPOULOS et KOTZIAS [7], on a donc choisi de garder ce regroupement dans l'étude bibliographique.

Dans les deux zones le béton ordinaire a été remplacé par le béton de sable pour les deux raisons suivantes :

1- les gros agrégats sont transportés sur de longues distances et ne sont pas disponibles en quantités importantes;

2- il y'a abondance de sable propre du désert qu'on peut obtenir à moindre frais;

Cependant l'approvisionnement en ciment Portland ne présente aucune difficulté.

Le sable utilisé dans les deux sites était composé de carbonate de calcium et de particules roulées contenant de 5 à 10% de coquilles.

Le module de finesse de 1.5 pour le sable d'Afrique du Nord et de 1.6 pour le sable du Golfe d'Arabie définit des sables fins.

Par ailleurs, les granulométries des deux sables étaient à

l'extérieur de la limite spécifiée par la norme ASTM C33.

Dans le cas de la construction dans le Golfe d'Arabie, le maître d'ouvrage, pour des raisons économiques, a employé le béton de sable pour la réalisation de fondations, de murs de soutènement et des dalles de plancher. Les fondations et les murs de soutènement ont été renforcés par des armatures.

Le ciment employé provenait d'une manufacture Iranienne. Il correspondait au type V de la norme ASTM C150.

La composition adoptée était : 1 volume de ciment pour 3 volumes de sable, avec assez d'eau pour obtenir la consistance voulue. L'eau utilisée était douce.

Les cubes pour le contrôle étaient enveloppés dans du plastique et conservés à l'ombre près du site de la construction.

Les résistances obtenues, pour deux valeurs du rapport E/C, sont :

E/C = 0.5 résistance à 28 jours 22.0 MPa

E/C = 0.65 résistance à 28 jours 12.0 MPa

La fissuration causée par le retrait ou autres, n'était pas plus importante que pour un béton ordinaire placé dans les mêmes conditions.

La possibilité d'un important retard dans la réalisation d'un port urgent en Afrique du Nord par manque d'agréments, a contraint le maître d'ouvrage à continuer son ouvrage et réaliser le brise lame en béton de sable. Près de 18000 blocs cubiques ont été coulés avec ce matériau, dont les plus grands atteignaient 1.6m de côté.

Les matériaux utilisés ont été les suivants :

- ciment en provenance d'Italie, Type II selon la norme ASTM C150;

- eau recueillie dans un puit peu profond ayant la même composition que l'eau de mer;

- du grès tendre ayant un pouvoir d'absorption d'eau d'environ 15% , a été utilisé comme matériau de remplissage, afin de diminuer la chaleur d'hydratation. Des morceaux de pierre ayant des dimensions de 10 à 30cm et humidifiés, sont

versés dans le mortier frais juste après son coulage, et s'enfoncent dans la masse de ce dernier pendant la vibration.

Après une étude en laboratoire, le mélange adopté pour la construction est le suivant :

Agrégat fin (sable)	1350 Kg/m ³
ciment (Type II)	460 Kg/m ³
E/C	0.65

Les variations dues au retrait n'ont pas été mesurées, mais dans ce cas également, la fissuration ne fut pas plus sévère que dans le cas du béton ordinaire.

2-3-3-Etudes menées en Allemagne :

Une seule étude a été menée en Allemagne sur du béton de sable par F.PILNY et K.R.ESCHKE [8].

Le but recherché par cette étude, était le remplacement d'une partie du gravier par du sable, et d'obtenir une bonne qualité de béton, même s'il fallait jouer sur la quantité de ciment en l'augmentant.

Le sable a été ramené de quatre villes différentes qui sont Tegel, Postfenn, Spaundau et Caput

Du béton a été confectionné avec différents pourcentages de sable par rapport à la quantité totale des granulats. Ces pourcentages sont les suivants : 75%, 67.5%, 62%, 47%, 30% .

Le ciment utilisé est un ciment Portland fabriqué en Allemagne dont la résistance moyenne est de 47.8 MPa.

Le dosage en ciment a été donné en fonction du rapport E/C, pour deux types de consistance, l'une plastique K2 et l'autre fluide K3 (selon la norme DIN 1045), pour chaque catégorie de sable.

Les cubes ont été vibrés sur une table vibrante de fréquence 150 Hz pendant 1 mn pour la consistance K2 et pendant 30 sec pour la consistance K3.

En étudiant les résistances obtenues à 28 jours, pour les différents types de sable, et pour des rapports E/C de 0.5 et 0.6, on remarque que le sable de Tegel donne les meilleurs

résultats, quelque soit son pourcentage dans la composition, par rapport à la totalité des granulats. Ceci est dû au fait que ce sable possède moins de fines que les autres.

Il ne faut pas oublier cependant que pour ces bétons le dosage en ciment varie entre 450 et 500 Kg/m³.

2-3-4-Etudes menées en U.R.S.S :

Le béton de sable semble faire l'objet d'un emploi courant en U.R.S.S, où se pose un problème de pénurie pour les gros agrégats.

La difficulté rencontrée réside dans le fait que la majorité des articles russes, qu'on a pu obtenir, ne donnent pas assez d'informations sur les compositions choisies. Généralement les articles soviétiques traitent des procédés technologiques liés au béton de sable. on essayera tout de même de fournir une synthèse de chacun de ces documents.

L'article le plus ancien a été publié par CHERKINSKIJ et SLIPCHENKO [9]. qui décrivait un béton à base de polymères dont trois sont examinés :

- le SBR (42.1% de produits secs)
- le butadiène-Alpha-Méthylstyrène (45% de produits secs)
- l'émulsion polyvinylacétate (58% de produits secs)

La résistance mécanique est très accrue, mais reste très sensible au dosage en eau, par exemple pour :

E/C = 0.3 la résistance obtenue est de 320 Kgf/cm²

E/C = 0.38 la résistance obtenue est de 220 Kgf/cm²

De plus avec tout changement de polymères, on est obligé de revoir le rapport E/C adéquat. En contre partie la résistance de ce béton de sable à la compression croît considérablement par rapport au béton de sable ordinaire, alors que la résistance en traction double seulement.

Si les éprouvettes sont mises dans l'eau pendant 6 mois, on remarque que la résistance en traction ne change pas, par contre la résistance à la compression diminue sans pour autant être au dessous de 70% de la résistance initiale.

Dans la même revue VIRIGIN et PREOBRAZHENSKIJ [10], décrivent un nouveau type de malaxeur qui crée des turbulences au cours de la rotation, détruisant ainsi, la croute hydratée des grains de ciment et les grains eux mêmes. L'intérêt de cette technique réside dans l'absence de bruit et de poussières et la possibilité de production continue de béton.

Toujours dans la description des procédés d'usinage du béton de sable, EHPSHTEJN et USHAKOVA [11] ont décrit une nouvelle installation de fabrication de bordures. Les données technologiques de la chaîne de fabrication sont rapportées dans cet article. Cependant l'intérêt de notre travail est autre.

Les russes utilisaient pour la mesure de la résistance du béton de sable, sur des éléments de construction, une méthode proche de la sclérométrie, appelée méthode du marteau étalon. Ce pendant celle-ci présente des imprécisions, étant donné qu'on essaye de mesurer le diamètre des empreintes laissées par le marteau.

TAMARIN [12] présente une autre méthode pour le contrôle de la résistance qui consiste à mesurer la profondeur du trou formé par la pénétration d'un poinçon de diamètre 10-15mm sur des éléments en béton de sable.

Lors du lancement de cet essai, des mesures ont été effectués sur des cubes de 15cm d'arête. La résistance moyenne était prise comme référence, et toute celle présentant un écart de ± 15 de cette valeur-ci, furent éliminées. Une courbe donnant la résistance en fonction de l'enfoncement a pu ainsi être tracée et est utilisé pour contrôler le degré de compactage des constructions.

La première étude d'éléments porteurs en béton de sable trouvée, a été celle menée par L'VOVICH et al [13] qui ont essayé d'évaluer la capacité de charge de pieux compacts de section carrée.

Le béton de sable a été utilisé, surtout, pour sa grande résistance en traction et aux actions dynamiques, surtout s'il a subit un traitement thermique.

Des essais ont été effectués sur un élément de 6.0 m de longueur et de section 30X30 cm, confectionné avec du béton au sable fin, puis avec du béton au sable normal.

Pour ce béton, contrairement au béton classique, on arrive difficilement à distinguer la fissure engendrant la rupture, par rapport aux autres fissures. Par contre, il adhère bien aux armatures, même en présence de ces fissures.

Autre particularité de ce matériau, c'est qu'il présente deux fois moins de perméabilité que le béton ordinaire. Ceci est dû certainement à la finesse de ces composants, l'eau trouvant des difficultés à les traverser.

Les documents relatifs aux études statistiques faites sur le béton de sable, sont très limités. Une étude a été présentée par MIKHAILOV et al [14], définissant un nombre limite d'essais, permettant de connaître les caractéristiques à obtenir, pour une large gamme de ce matériau.

Des essais de résistance ont été réalisés sur des cubes de 10cm d'arête (en compression) et sur des prismes de 10X10X40cm (en traction), tout en faisant varier les facteurs suivants :

- teneur en eau
- quantité et type de sable
- granulométrie du sable
- méthode de compactage du mélange

Cette analyse statistique a permis de montrer qu'une diminution de 25% dans la consommation de ciment, est possible, lorsqu'on utilise un liant composé de ciment et de sable broyé.

L'VOVITCH et al [13], de leur côté, avaient signalé l'effet positif du traitement thermique sur le béton de sable. Cette influence a été traitée également par TRIFONOV et al [15] sur des piliers en béton de sable avec armatures longitudinales.

Les caractéristiques physico-mécaniques ainsi que physico-chimiques du béton de sable lorsqu'il est utilisé dans des structures supportant des charges de longue durée, ont été également étudiées.

Des essais ont été effectués avec différents nombres

d'armatures longitudinales et verticales, et différentes limites d'élasticité, pour voir l'influence de celles-ci sur le comportement du béton de sable en prenant en compte l'effet du fluage.

Tous les mélanges ont subi un traitement thermique à des températures de 80-86 °C.

Au début les échantillons subissent des charges de courte durée, puis des charges de longues durées avec une ambiance de 18 à 24 °C et une humidité relative (HR) de 60-85% .

Les résultats ont montré que le béton de sable a un module d'élasticité moins élevé que celui du béton ordinaire et il en est de même pour les déformations extrêmes, et la capacité à résister à des déformations post-élastiques.

Par contre l'augmentation de la densité d'armature, augmente la résistance du béton de sable. Des déformations de 0.225-0.3% avec des pas entre armature de 180mm, ont pu être atteintes.

En conclusion, le béton de sable possède une possibilité de déformations non élastiques inférieure à celles prévues par les formules existantes, ce qui exige de revoir ces dernières. De plus les éléments doivent être dimensionnés vis à vis du fluage.

Par ailleurs, l'utilisation d'armatures en acier thermo-résistant, avec des pas assez serrés, a permis d'avoir une augmentation des déformations longitudinales des éléments, et donc une augmentation de la résistance.

D'autres travaux sur le béton de sable ont été publiés, mais ils traitent surtout des modes de fabrication de blocs. C'est le cas par exemple du travail de BRAUDE et al [16], qui décrit une machine à vibrations pour la réalisation d'éléments préfabriqués en béton armé, dont l'avantage est surtout, la production de béton de sable sans dépense excessive en ciment en comparaison avec le béton ordinaire.

2-3-5-Etudes menées en France :

En France, la pénurie en gros granulats se fait sentir dans certaines régions, alors que le sable naturel est surabondant en comparaison avec l'utilisation que l'on fait.

Vers les années 1978 et 1979, trois laboratoires ont participé dans l'étude du béton de sable, le Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP), l'Institut Universitaire de Technologie Génie Civil, le Laboratoire regional des Ponts et chaussée (LPC) de Bordeaux, ainsi que deux sociétés de béton prêt à l'emploi à Bordeaux, bien placées pour assurer des essais en grandeur réelle.

La synthèse de ce travail a été présentée par GUINEZ et al [17].

L'étude a été faite avec un sable de Garonne lavé de granulométrie 0/3 .

Les différentes phases réalisées ont été les suivantes :

-phase 1 : recherche, d'après une composition simple ciment-sable-eau, sans correction granulaire ni adjuvant, d'une formule à minimum de ciment, donnant en compression à 28 jours, avec une bonne maniabilité, des résultats voisins de ceux qui sont admis pour les matériaux de construction traditionnels (briques, parpaings).

-phase 2 : recherche de la meilleure correction possible de la courbe du sable dans ses éléments fins à l'aide de fines calcaires. C'est la correction par le filler le plus fin, qui a donnée, à la fois, les meilleures performances mécaniques et rhéologiques.

-phase 3 : diminution du dosage en ciment, les résistances mécaniques obtenues étant nettement supérieure à celles visées primitivement.

-phase 4 : essais de divers adjuvants (plastifiants et fluidifiants) en recherchant la teneur en eau donnant une maniabilité de 6 à 8 secondes mesurés au maniabilimètre à mortier LPC. C'est à l'issue de ces essais qu'a été définie la

formule de base suivante :

ciment CPJ 45MPa	250Kg
sable 0/3 roulé de garonne	1350Kg
filler V	130Kg
eau	240l
adjuvant plastifiant	0.5Kg

-phase 5 : essais complets sur cette formule de base, permettant de connaître les caractéristiques de ce béton. Les résultats obtenus sont :

ressuage 2.9
perméabilité : 0.248 cm^3 par cm^2 et en 24 heures
retrait à 2 jours : $40 \mu\text{m}$ par m
7 jours : $160 \mu\text{m}$ par m
27 jours : $495 \mu\text{m}$ par m
début de prise : 7 à 8 heures
maniabilité LPC : 7 secondes
résistances mécaniques (MPa) en:

	traction	compression
à 2 jours	1.1	3.9
7 jours	2.5	11
28 jours	4.1	17.3

Ces caractéristiques sont celles d'un matériau de bonne qualité. En effet, on peut ainsi noter :

- le faible retrait à 28 jours (réduisant la tendance à la fissuration);
- une prise retardée permettant une mise en oeuvre soignée;
- une excellente maniabilité;
- des performances mécaniques supérieures à celles qui étaient attendues.

Cette étude de base, avec une seule qualité de sable, a été complétée par une recherche sur l'emploi d'autres types de sables.

Les constatations suivantes, ont été faites :

- les résistances obtenues ,avec des sables lavés, sont systématiquement supérieures à celles des mortiers de sables non lavés;

- le lavage de ces sables, en fait des matériaux excellents, qui donnent parfois au mortier des performances supérieures à celles du sable normalisé.

Par ailleurs, il a été également montré qu'à chaque type de sable, semble correspondre une correction granulaire précise. Les meilleures résistances, étant obtenues avec des sables grenus à granulométrie étalée, et des fillers calcaires; c'est avec ces derniers éléments, qu'il est possible de tendre vers des résistances voisines de celles des bétons classiques.

Après les bétons de sable coulés, l'étude technique a été orientée vers les bétons de sable hypercompactés dynamiquement en vue de l'étude ultérieure de faisabilité de réalisation de structures en blocs postcontraints se substituant aux structures classiques.

MARIOTTI [2], a présenté les résultats, qui ont clairement montré que, grâce à, l'adoption de mélanges granulaires optimaux, à la forte compacité obtenue par hypercompactage et à la forte réduction de teneur en eau (faible rapport E/C) permise par ce type de compactage, il était possible d'atteindre, avec les mêmes dosages en ciment, des performances du même ordre de grandeur que celles des bétons classiques (résistance voisine de 300 bars).

Les résultats de la recherche devait servir essentiellement en Côte d'Ivoire. Un sable de synthèse réalisé à partir de trois sables différents, de caractéristiques proches de celui disponible en Côte d'Ivoire a été utilisé . Pour cela un sable de base relativement grossier (nommé S6) a été associé à deux types de sable fin, l'un argileux (S2), l'autre limoneux (S3). La qualité plus médiocre du mélange S2 + S6 a eu une incidence sur les performances obtenues.

Il apparait que le type de vibro-compactage utilisé (pression appliquée par verin de 4.5 MPa et une fréquence de

250Hz) ne permet aucunement d'améliorer les performances du mélange S3 + S6 essayé avec un dosage en ciment de 230 Kg/m^3 .

De plus, il semblerait que le mode de mise en place par vibro-compactage devrait faire l'objet d'une étude particulière, dans laquelle il faudrait faire varier la fréquence de vibration et la charge appliquée.

Concernant les déformations parasites, les résultats obtenus pour le fluage avec retrait réduit, montrent que l'amplitude des déformations sous charge à 49 jours après le début de chargement intervenu à 28 jours, est du même ordre de grandeur que celle d'un béton classique dosé à 400 Kg/m^3 de ciment.

Bien que l'évolution du retrait soit plus importante pour le béton de sable, comparativement au béton classique entre 1jour et 28jours, l'évolution ultérieure jusqu'à 78jours montre une nette régression de croissance du retrait. On peut dire globalement que le retrait du béton de sable, grâce sans doute à sa forte compacité, reste dans le domaine des valeurs courantes des bétons classiques.

2-3-6-Etudes menées en Algérie :

Vu l'abondance du sable de dunes et la rareté en gros granulats dans le sud Algérien. Le Centre National d'Etudes et de Recherche Intégré en Bâtiment (CNERIB) a essayé de lancer une série de travaux sur le béton de sable, avec la collaboration de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger [18],[19],[20].

La première étude [18] a été menée sur un sable apporté de la zone de Djelfa de classe 0/0.63mm, présentant une porosité de 45% .

La première phase de l'étude consistait à rechercher d'après une composition simple : ciment-sable-eau, une formule à dosage optimum en ciment pour le sable utilisé.

Dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques, des bétons de sable dosés respectivement à 300, 330 et 350 Kg

de ciment au m³, la granulométrie du sable a été corrigée par l'adjonction de fillers dans un premier temps, et d'adjuvants dans un deuxième temps.

Trois types de fillers ont été utilisés : fillers calcaires-fillers siliceux et chaux aérienne.

Suite à cette étude, on peut dire que le filler le mieux adapté au sable de Djelfa est de nature calcaire. La granulométrie la plus intéressante étant la plus fine.

Seulement, toutes les résistances obtenues, lors de la première étude, au cours des différents essais, n'ont pu dépasser les 100 bars, valeur nettement insuffisante, si l'on envisage la confection d'un béton de sable structural.

Par contre, la mesure du retrait, malgré qu'elle ne dépasse pas le 21^{ème} jour, a donné de fortes valeurs.

Une amélioration de la résistance, au vue d'obtenir une valeur voisine de 200 bars, a été recherchée, lors de la deuxième étude [19].

Le sable utilisé, est de classe 0/0.425, présentant un pourcentage de vide de 39.6% .

Les formules ont été retenus sur la base de trois critères:

- dosage minimal en fillers et ciment;
- meilleur maniabilité possible, pour faciliter la mise en oeuvre;
- dosage minimal en eau pour obtenir les meilleurs performances mécaniques.

Grâce à ces critères, une résistance à 28 jours de 210 bars, a été atteinte, seulement avec un affaissement au cône d'Abrams très faible (2 cm).

Concernant le retrait , par manque de comparateurs, des résultats n'ont pu être avancés.

L'obtention de compositions de béton de sable de résistances de 200 bars à 28 jours a ouvert de nouvelles possibilités, permettant d'envisager une association béton de sable-acier. L'action composée des deux matériaux nécessitant une liaison intime entre l'acier et le béton, il fallait donc étudier le phénomène d'adhérence.

Pour cela des éprouvettes de sections différentes : 10x10x40 cm et 15x15x40 cm, avec deux types d'acier, des ronds lisses et des barres à haute adhérence, furent confectionnées.

Dans le béton de sable, le phénomène d'adhérence était pratiquement identique à celui d'un béton ordinaire, donnant des résultats analogues à ceux de ce dernier (τ ultime variant de 30 à 50 bars).

En plus du phénomène d'adhérence, ce qui semblait intéressant à étudier était le comportement d'un élément en béton de sable armé soumis à une flexion simple depuis un état non fissuré jusqu'aux états limites, et voir les phénomènes qui en résulteront. A savoir, les déformations de l'acier et du béton, la fissuration du béton et la flèche de l'élément.

Les constatations suivantes ont été faites sur cet essai :

- le béton de sable a eu le même comportement que le béton classique, à part que la déformation ultime du premier est légèrement inférieure à celle du second;

- la charge ultime théorique se rapproche de la charge de rupture obtenue lors de l'essai;

- le béton comprimé s'est raccourci (la loi charge-déformation est sensiblement linéaire);

- les flèches mesurées au milieu de la poutre sont très sensiblement proportionnelles aux charges;

- la rupture est survenue d'une façon brutale par épaufrement et écrasement du béton dû probablement à la fragilité de celui-ci;

Toujours dans le cadre d'essais sur éléments structurels, un essai sur poteau soumis à la compression simple a été réalisé lors de la troisième étude [20].

L'influence du fluage sur le béton de sable a été étudié, avec des charges de 60, 75 et 90% de la contrainte de rupture. La durée de l'essai était de 24 heures. (fig 2-1).

La conclusion est que les déformations par fluage sont considérables, et que le phénomène ne paraît s'arrêter que par la rupture.

Une série d'éprouvettes a été soumise à un système de

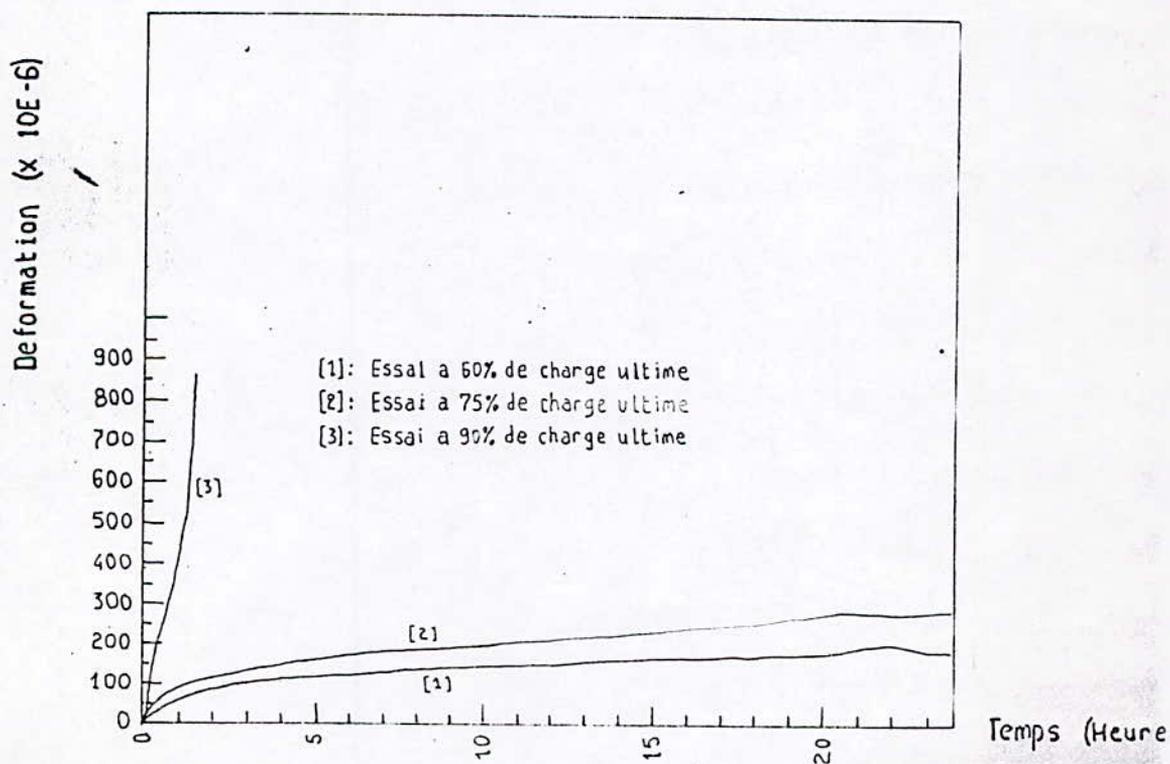
chargement répété avec une montée en charge maximale variable de 90% et 75% de la contrainte de rupture, et une descente à une charge nulle pour permettre d'étudier le phénomène de fatigue.

Concernant l'essai, proprement dit, de compression simple sur poteaux, ces derniers avaient des dimensions de 2.80 m de hauteur et de section carré 20x20 cm, armé avec 4 barres de diamètre 12.

Les déformations ultimes du béton et de l'acier, fixées à 2%, ne sont généralement pas atteintes (moyenne de 1.5%).

En plus, ces déformations sont loin de la limite élastique, et sont plus importantes pour le béton que pour l'acier.

Néanmoins les courbes, pour un chargement dépassant les 20 tonnes devient irrégulières, il y'a apparition de montée et de chute de résistance dues certainement à des chocs dans le béton provenant de la grande concentration de contraintes.



2-4-Conclusions :

Dans cette étude bibliographique tous les documents consacrés au béton de sable ont été présentés. Les expériences qu'ils décrivent sont variées : essais de laboratoire, études statistiques, expériences en chantier.

La diversité dans les objectifs et dans les conditions expérimentales rend la synthèse des renseignements qu'ils renferment peu aisée.

En premier lieu, aucun des documents obtenus, ne traite vraiment du sujet de l'étude du béton de sable coulé, à l'exception de trois, l'un traitant de béton de sable au golfe d'Arabie, l'autre en France, et le troisième traitant une tentative avec le béton de sable de dunes d'Algérie.

En essayant de synthétiser les informations techniques dégagées de l'étude des différents documents, on s'aperçoit qu'elle est compliquée, car il est difficile d'établir une comparaison valable entre des résultats obtenus sur des éprouvettes de formes variées, fabriquées avec des matériaux de provenance diverse, dont les modes de mise en oeuvre et de conservations sont différentes.

Les plus faibles performances sont obtenues par les blocs "sandcrete", leur résistance étant au plus égale à 3 MPa. Ceci s'explique par les faibles dosages en ciment (le rapport C/S en volume variant entre 1/6 et 1/12), et par leur préparation rudimentaire.

Pour les autres expériences, excepté pour les études réalisées avec les sables d'Aquitaine et les sables de dunes d'Algérie, le dosage en ciment est en général élevé, entre 450 et 600 kg/m³, ce qui ne correspond pas au but recherché, puisque on essaye de réaliser des bétons performants et relativement économiques, avec un dosage maximal en ciment de 400 kg/m³.

Concernant l'étude Algérienne, certaines lacunes ont gêné l'interprétation de certains résultats et leur exploitation, sont :

- la composition optimale: dans toute l'étude portant sur les compositions, il semblerait que le cône d'Abrams (essai d'affaissement) n'est pas apte à caractériser la maniabilité du béton de sable comparativement aux bétons conventionnels. Les bétons de sable fin étudiés peuvent être considérés comme ayant des propriétés thixotropiques. Au repos, ils sont doués d'une cohésion physique qui empêche l'affaissement, mais la vibration ou des chocs répétés liquidifient rapidement le matériau.

C'est ce qui expliquerait les résultats médiocres obtenus le plus souvent, avec des rapports E/C rarement inférieur à 1. Il faudrait donc utiliser un autre procédé basé sur la vibration tel que le maniabilimètre LPC par exemple;

- les masses volumiques : elles sont marquées par une assez grande dispersion parfois anormale. Ceci est sans doute attribuable au fait que les éprouvettes ont pu subir après leur démoulage des ressurgences d'eau et des retraits;

- le ciment : la résistance vraie du ciment n'a pas été donnée, il fallait contrôler cette résistance, et stocker le ciment dans des fûts parfaitement étanches;

- l'étude du retrait : les valeurs relevées sont très dispersées;

Les résultats enregistrés dépendent beaucoup des données météorologiques qui ont eu lieu au moment de la série de mesures, malheureusement non contrôlées.

Dans ces conditions, il paraît bien difficile de tirer les conclusions indiquées dans les rapports, surtout en tenant compte de la faible dimension des éprouvettes (4x4x16) utilisées;

- l'étude du fluage : la durée de chargement de 24 heures est insuffisante, en plus le niveau des contraintes a été choisi trop élevé. Il fallait aussi préciser à partir de quel âge les éprouvettes ont elles été sollicitées et indiquer si des dispositions pour éliminer le retrait, ont été prises.

Ainsi, des progrès peuvent être réalisés pour obtenir des performances intéressantes (résistance de l'ordre de 200 bars

ou plus).D'où le but de cette recherche.

B- RETRAIT

2-5-Rappel sur le retrait :

Les mortiers et les bétons subissent des variations importantes quand leur contenu en eau ou l'humidité du milieu environnant varient.

Immédiatement après le gâchage a lieu une première réduction de volume irréversible; après le durcissement du mélange et son exposition à l'air commence une nouvelle réduction de volume qui est partiellement réversible à la réhumidification.

La première réduction de volume due au séchage irréversible s'appelle contraction plastique et la réduction de volume due au séchage réversible s'appelle retrait. La contraction plastique est provoquée par l'hydratation des composants minéralogiques du ciment, tandis que le retrait est dû surtout à l'évaporation de l'eau contenue dans les gels.

On distingue les retraits suivants :

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

Pendant la période de prise l'eau n'est pas encore liée aux constituants des ciments; elle n'est retenue que physiquement et mécaniquement. L'évaporation de cette eau se traduit par un tassement du béton donnant ainsi le retrait d'évaporation, qui, s'il est contrarié provoque de profondes fissures, visibles au démoulage.

Le retrait après prise est beaucoup plus lent à se manifester que le retrait avant prise. Il est dû à une perte

d'une partie de l'eau de gâchage si le béton est conservé dans une atmosphère à faible humidité relative.

Le phénomène du retrait hydraulique a été beaucoup étudié, parce qu'il est en liaison avec la tendance à la fissuration des liants durcis qui représente le premier signe de leur dégradation.

Les facteurs qui influent sur ce retrait sont nombreux :

- Le retrait varie avec l'humidité relative et la température du milieu environnant. Il est d'autant plus important, que l'humidité de l'air est plus faible et la température plus élevée.

- Le retrait est d'autant plus grand que l'hydratation du ciment est plus accentuée. Les ciments finement broyés présentent un retrait plus grand que ceux qui ont été broyés grossièrement.

- La composition minéralogique du ciment influe aussi le retrait, surtout si le ciment est riche en aluminates tricalciques.

- Le retrait dépend aussi des adjonctions minérales pulvérulentes ainsi que de la fraction fine du granulat.

- La forme des ouvrages et les armatures ont leur effet sur le retrait. Dans le cas des barrages, des murs épais, le retrait est négligeable; par contre il peut être appréciable dans le cas des planchers, des dalles, des enduits.

Le retrait thermique est dû à des baisses de température provenant soit du ciment lui-même lors de son hydratation aux premiers âges suivie de son refroidissement, soit des variations climatiques du milieu.

Les retraits possibles sont nombreux, seul le retrait hydraulique sera traité dans l'étude expérimentale du béton de sable de dunes.

C- FLUAGE

2-6-Rappel sur les mécanismes de fluage :

Si l'on maintient le chargement sur une éprouvette constant dans le temps (c'est l'essai de fluage), sa déformation double en quelques semaines, si c'est un béton ordinaire, triple au bout de plusieurs mois et peut, dans des conditions extrêmes, quintupler en quelques années. Le même phénomène peut être constaté, avec la même intensité, en traction, en torsion, etc. Le fluage dépend de nombreux paramètres : nature du béton, âge de mise en charge et, surtout, des conditions ambiantes.

En cas de déchargement, on observe une diminution instantanée des déformations (très proche, en valeur absolue, de celle d'une éprouvette témoin chargée à cet âge) suivie d'une diminution différée, appelée recouvrance. Celle-ci est cependant nettement inférieure, en valeur absolue, au fluage correspondant et se stabilise au bout de quelques semaines.

Le fluage dépend essentiellement :

- de la charge appliquée : sous des charges modérées, on peut considérer qu'il est proportionnel à la charge appliquée, au delà de 50% de la charge de rupture, il croît plus vite que la contrainte

- de la nature du béton : exemple des bétons légers dont les granulats, poreux, constituent une réserve d'eau, leur fluage est en général inférieur à celui d'un béton ordinaire de même résistance

- des conditions ambiantes : lorsqu'il n'y a pas d'échange d'eau avec l'extérieur, le fluage, appelé alors fluage propre, est à peu près proportionnel à la teneur en eau évaporable, et un béton préalablement séché à 105° ne flue pratiquement pas; mais, dans la pratique, le béton subit une perte d'eau, plus ou moins rapide selon le climat ambiant, et cette variation

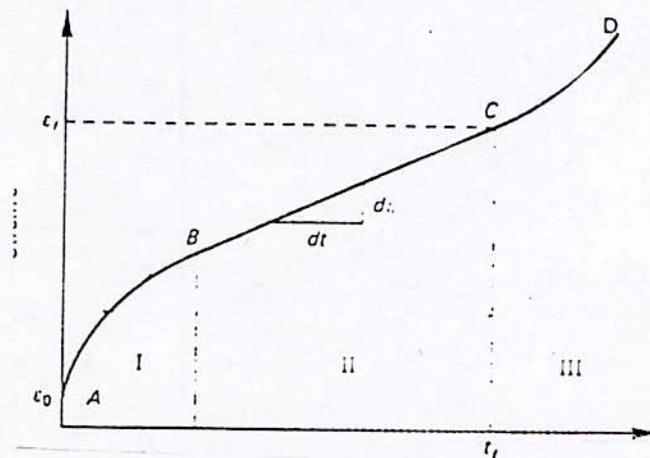
entraîne un fluage important, deux à trois fois supérieur au fluage propre.

2-7-Lois générales gouvernant le fluage :

2-7-1-Description d'une courbe de fluage idéale :

De manière générale, le fluage d'un matériau est observé en laboratoire sur des échantillons soumis à une charge constante.

La mesure des déformations des échantillons jusqu'à leur rupture peut parfois s'étaler sur plusieurs mois. Les courbes idéales de fluage exprimées en diagramme ε - t ayant l'allure suivante (fig 2-2).



Sur cette courbe on distingue :

- une déformation élastique instantanée ε_0 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 s'est déformé élastiquement. Elle est caractérisée par une

croissance de la vitesse de déformation ainsi que par un phénomène d'écrouissage ou de durcissement.

Si la contrainte appliquée à l'échantillon est brusquement annulée lors de l'essai, l'échantillon récupère instantanément sa déformation élastique et, graduellement la déformation élastique différée.

Pour les faibles contraintes et températures, la courbe peut être approchée par une loi logarithmique du type

$$\varepsilon = a_1 \log (t) + c_1$$

A des températures ou contraintes plus élevées, la loi de fluage est plutôt du type exponentielle (loi d'Andrade) :

$$\varepsilon = \beta t^{1/3}$$

- le fluage secondaire (BC) est caractérisé par une vitesse de déformation constante. Durant cette phase, le durcissement rencontré précédemment est contrebalancé par la mise en mouvement de différents plans de matières.

Un cycle de décharge mènera à une déformation permanente.

La loi empirique gouvernant le fluage est du type :

$$\varepsilon = A e^{-U/KT} f(\sigma)$$

- le fluage tertiaire (CD) est caractérisé par une accélération de la vitesse de déformation menant à la rupture. Généralement, la phase tertiaire est de durée assez courte pour un matériau fragile.

Remarques :

Les trois phases de fluage ne peuvent être observées qu'à des niveaux proportionnellement élevés de contraintes (un échantillon à faible contrainte ne présentera pas de fluage tertiaire). Par conséquent, il n'est pas étonnant de voir que la plupart des études, menées dans le domaine du fluage, ont

été dirigées vers les phases primaires et secondaires seulement.

2-7-2-Modèles rhéologiques décrivant le fluage :

Les relations constitutives temporelles d'un matériau peuvent être exprimées à l'aide de modèles mathématiques simples. La théorie des modèles rhéologiques utilise des combinaisons de différents éléments (ressorts, dashpots, résistances au mouvement par frottement ...) connectés en série, en parallèle ou une combinaison des deux. Ces systèmes représentent le comportement mécanique du matériau sous les conditions d'essai et tentent d'approcher le comportement réel de celui-ci.

Deux représentations mathématiques possibles peuvent être citées :

a- La forme différentielle :

Elle peut être généralisée par l'équation différentielle

$$P\sigma = Q\varepsilon$$

$$\text{avec } P = \sum_{r=0}^a p_r \cdot r / t$$

$$Q = \sum_{r=0}^b q_r \cdot r / t$$

qui peut être résolue à l'aide des transformées de Laplace

b- La représentation intégrale :

Pour un matériau linéaire, on définira :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot J(t)$$

$$\text{avec } \sigma = \sigma_0 \cdot H(t)$$

$H(t)$ = fonction de Heaviside

$$= 0 \quad \text{si } t < 0$$

$$= 1 \quad \text{si } t \geq 0$$

$J(t)$ = déformation de fluage par unité de contrainte appliquée

2-7-3-Lois empiriques :

Si les modèles rhéologiques ont connu un grand développement dès le début de l'étude du phénomène de fluage. Néanmoins les chercheurs s'efforcent d'expliquer les mécanismes en se basant sur des lois à caractère empirique. L'essence même de ces lois est la courbe de déformation temporelle obtenue par essais en laboratoire ou in-situ.

Différents facteurs d'influence tels que la température, le niveau de contraintes et évidemment le temps, servent de base à l'élaboration de ces lois.

L'équation générale la plus simple est en fait :

$$\varepsilon = f(\sigma, t, T)$$

Elle résulte des considérations des pionniers de la recherche empirique qui étudiaient le fluage des métaux. En première approximation cette fonction est limitée à une loi cumulative :

$$\varepsilon = f(\sigma) \cdot f(t) \cdot f(T)$$

Chaque composante a été explicitée par différents chercheurs ainsi que le montrent les formules relatives au fluage des métaux. Toutefois, il faut noter que ces relations manquent d'unification.

Si les courbes de fluage sont généralement présentées sous la forme $\varepsilon-t$ ou $\dot{\varepsilon}-t$, il en sera de même des lois empiriques correspondantes. Quant à la procédure d'essai, qu'elle soit à contrainte constante ou variable, elle conditionne également la formulation des lois expérimentales associées.

Ces relations empiriques varient d'un auteur à l'autre et la littérature fournit à ce sujet un nombre invraisemblable de lois caractérisant le comportement d'un matériau. Les unes expriment la déformation en fonction du temps, les autres la variation de la vitesse de déformation dans le temps.

Il ressortira de la confrontation de ces formules que le

phénomène fluage peut être décrit pour différents matériaux (sols, roches, métaux,....) par des lois relativement semblables du type logarithmique ou exponentielle et par des lois de puissance.

L'essai de fluage à incréments de charges présente un intérêt pratique, à savoir :

- il permet à partir d'un même essai, d'obtenir des informations relatives à plusieurs contraintes. Il en résulte une diminution du nombre d'essais nécessaires à l'évaluation des paramètres de fluage;

- il permet de raccourcir la durée des essais.

Raisons pour lesquelles, on a choisit, ce type d'essais, dans le cas du béton de sable de dunes.

Parmi les lois empiriques relatives à cet essai, on peut citer :

- la loi proposée par Eckart, lors de l'étude du fluage des sols gelés;

- la loi proposée par Rabotnov, pour étudier le fluage des métaux;

- la loi proposée par Lemaître et Chaboche : appliquée à l'étude des roches (principalement le sel gemme) ainsi que les sols gelés.

La méthode de résolution des deux premières lois (Eckart et Rabotnov) est très différente de celle de la dernière loi (Lemaître). En effet, celle-ci fait l'objet d'une interprétation numérique par les moindres carrés, alors que les deux premières font appel à des programmes s'inspirant d'une méthode graphique moins précise.

En outre, seul la loi de Lemaître possède un paramètre du module d'élasticité.

Pour ces raisons on a préféré cette méthode lors de l'interprétation de nos résultats d'essai.

La forme la plus générale de la méthode de Lemaître est :

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^m \cdot \epsilon_{fl}^{-n}$$

d'où, par intégration, on obtient dans le cas tout à fait général :

$$\varepsilon_{fL} = (\sigma/K) \cdot t^{\beta \alpha}$$

avec

$$\alpha = 1/(n + 1)$$

$$\beta = m/(n + 1)$$

$$K = (1/((n + 1) \cdot A))^{1/m}$$

Un programme d'ajustement numérique développé à l'Ecole des Mines de Paris à Fontainebleau et se basant sur la méthode des moindres carrés, nous permettra d'en faire l'interprétation.

La déformation totale de la roche est calculée suivant la relation :

$$\varepsilon = Q_2 + Q_2 \sigma + Q_1 \sigma^{P_2} t^{P_1}$$

avec $Q_1, Q_2,$ et Q_3 : paramètres linéaires
 P_1 et P_2 : paramètres non linéaires

Ainsi, l'analogie avec l'équation de base, moyennant la déformation élastique supplémentaire, permet d'écrire :

$$\alpha = P_1$$

$$\beta = P_2$$

$$E = 1/Q_2 : \text{module d'élasticité}$$

$$K = Q_1^{(-1/B)}$$

Toutes les recherches, présentées dans l'étude bibliographique, ne traitent pas un béton quasiment identique au béton de sable de dunes, néanmoins elles donnent une idée sur les différents paramètres jouant un rôle dans l'amélioration des caractéristiques de ce matériau.

L'étude du fluage par la méthode à incréments de charge, sur du béton de sable, n'a pas été réalisée précédemment. Cependant des essais sur des sols gelés, ont été un support pour notre travail.

Cette étude bibliographique, par son exploitation, a permis d'orienter notre étude expérimentale, présentée dans le troisième chapitre.

CHAPITRE TROISIEME : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE TROISIEME

ETUDE EXPERIMENTALE

3-1-INTRODUCTION :

L'étude comporte les trois phases de recherches suivantes :

- phase 1 : recherche d'une ou plusieurs compositions, présentant une bonne maniabilité, sans ou avec correction granulaire et adjuvant.

- phase 2 : le choix des compositions étant fait sur la base de la maniabilité, des essais en compression et en traction à différents âges, ainsi que des mesures à l'ultra son, des mesures des masses volumiques, et des vérifications du retrait, ont été effectués.

- phase 3 : sur les compositions présentant des résistances en compression à 28 jours dépassant 20 MPa, des approches mécaniques par des lois de comportement classiques, ont été élaborées.

Dans ce qui suit ces différentes phases seront présentées, en commençant par définir les matériaux, à travers leurs caractéristiques.

3-2-CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX :

3-2-1-Le sable:

Les propriétés d'un béton dépendent des caractéristiques des éléments le constituant.

Le béton de sable confectionné est à base de sable provenant de la région d'El Golea. Cependant, on espérait que les compositions auxquelles on arriverait seraient généralisées au sud Algérien. A cet effet des études des

compositions granulométriques, minéralogiques et chimiques d'autres sables ont été effectuées à l'Unité de Recherche et d'Etudes Géologiques (UREG-Boumèrdès).

3-2-1-1-Composition granulométrique :

Concernant le sable d'El Golea, le gisement exploité est constitué de formations de sable éolien dunaire de couleur brun, brun-jaunâtre, finement grenus, quartzeux.

Le tamisage du sable a été effectué aux tamis 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.16, 0.125 et 0.08 mm.

Les compositions granulométriques représentées par le pourcentage des tamisats sur chaque tamis, sont reportées au tableau 3-1.

La courbe granulométrique du sable d'El Golea est donnée sur la figure 3-1.

Tableau 3-1: Compositions granulométriques des sables du sud

tamis \ Région	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	99.3	92.71	68.67	4.35	0.57
Ain Sefra	100	99.99	99.97	99.95	95.86	54.23	2.72	0.01

3-2-1-2-Composition minéralogique :

Les constatations suivantes ont été faites sur les compositions minéralogiques des sables provenant des différentes régions :

-dans tous les cas le quartz forme plus de 85% du sable, les grains sont parfois anguleux et dans la majorité des cas arrondis. Pour le cas de la région de Biskra les minéraux

quartzeux représentent 60-70% .

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

-la calcite se manifeste par des grains de couleurs différentes, et ne dépasse pas les 10%, tout en variant généralement autour de 5% .

-le feldspath s'il est existant, ne dépasse pas 4% .

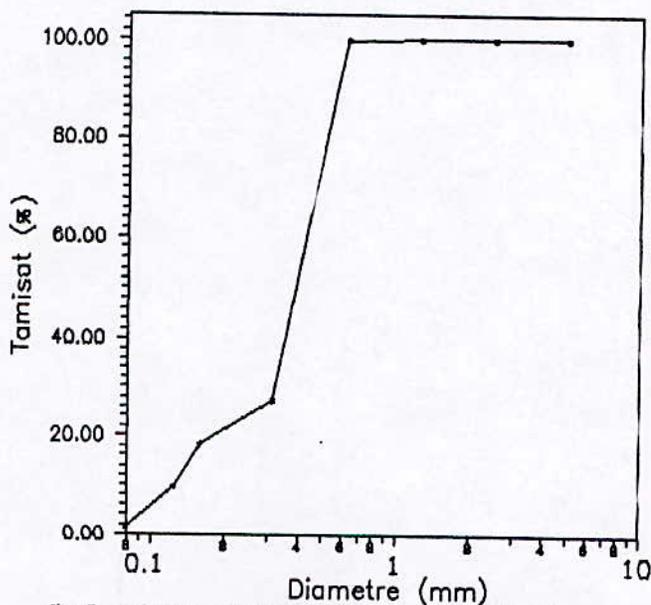


fig 3-1 Courbe granulometrique du sable d'El Golea

3-2-1-3-Caractéristiques physiques :

Les propriétés physiques moyennes déterminées sur les échantillons et pour les sables des différentes régions, figurent au tableau 3-2.

Tableau 3-2: Propriétés physiques des sables du sud

Région	humidité naturelle(%)	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 sefra	0.50	1485	2660

Le sable d'El Golea sera utilisé dans la confection du béton testé , pour cette raison, des essais de compacité, porosité, ainsi que de propreté de ce matériau ont été effectués. Les résultats obtenus sont les suivants :

- compacité : 67.97%
- porosité : 32.03%
- équivalent de sable à vue : 93%
- équivalent de sable à piston : 72%

3-2-1-4-Composition chimique :

La composition chimique moyenne est reportée pour chaque sable au tableau 3-3. Ces sables sont caractérisés par une teneur en silice (SiO₂) qui est relativement importante.

Tableau 3-3: Compositions chimiques des sables du sud

Region	El Golea	El Oued	Biskra	Hassi-Bahbah	Ain Sefra
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	-

3-2-1-5-Conclusion :

L'étude des caractéristiques du sable a montré que celui-ci pourrait donner de fortes résistances grâce à sa propreté (pauvres en éléments argileux), et à sa composition chimique siliceuse. Les granulats siliceux sont ceux qui, présentent les meilleures performances.

L'inconvénient majeur de ce sable, est qu'il présente un pourcentage de vides assez élevé, engendrant une faible compacité du béton, et réduisant ainsi les résistances.

De plus, les sables du sud Algérien, possèdent presque en totalité les mêmes caractéristiques, sauf éventuellement, ceux de la région de Biskra. Il est, donc, possible de généraliser les résultats de cette étude à d'autres régions.

3-2-2-Le ciment :

3-2-2-1-Analyse chimique :

Les essais ont été effectués au laboratoire de l'UREG.

Le ciment CPA 325 utilisé est marqué surtout par un pourcentage appréciable de chaux et de silice, tel que le montrent les résultats d'analyse suivants :

SiO ₂	21.47%
Al ₂ O ₃	4.30%
Fe ₂ O ₃	2.82%
CaO	60.13%
MgO	1.08%
SO ₃	2.23%
Na ₂ O	0.48%
K ₂ O	0.81%
CaO libre	2.91%
R.I	3.09%
P.A.F	5.43%

Cette composition chimique a permis d'obtenir une expansion à chaud jugée normale (valeur de l'expansion 1.5 mm/m).

3-2-2-2-Caractéristiques physiques :

Les essais entrepris se limitent à la détermination du poids spécifique, de la surface spécifique, et du temps de prise.

Les résultats obtenus sont :

- poids spécifique :	3.18 g/cm ³
- surface spécifique :	4230.7 cm ² /g
- temps de prise : début	4 ^h 35 ^{mn}
fin	6 ^h 10 ^{mn}

3-2-2-3-Caractéristiques mécaniques :

Notre intérêt s'est surtout porté sur la détermination de la classe vraie du ciment, qui influe beaucoup sur la résistance du béton de sable.

Sur la base de la quantité du sable normalisé disponible, deux séries d'essais de détermination des résistances en traction et en compression ont été effectuées, à des périodes différentes, pour examiner la capacité de conservation du ciment.

Le nombre d'éprouvettes testées était à chaque fois, au nombre de trois pour la traction, et de six pour la compression.

Les résultats pour les deux séries figurent au tableau 3-4

Tableau 3-4: Résistances du ciment

		1 ^{er} série	2 ^{me} série
Résistance en traction à (Kg/cm ²)	2 jours	36.34	-
	7 jours	55.2	-
	28 jours	69.87	70.50
Résistance en compression à (kg/cm ²)	2 jours	180.93	-
	7 jours	321.25	-
	28 jours	397.34	408.85

3-2-2-4-Interprétation :

Sur la base de l'analyse chimique, un calcul des pourcentages des différents constituants minéralogiques est fait, afin d'avoir en première approximation, une idée sur la chaleur d'hydratation, dont l'influence sur les résistances, surtout initiales, du mortier, est caractéristique.

Ces pourcentages, sont obtenus grâce aux formules de BOGUE

[28], données dans le cas où le rapport $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$ par :

$$C_3S = 4.071(CaO) - 7.600(SiO_2) - 6.718(Al_2O_3) - 1.430(Fe_2O_3) - 2.852(SO_3)$$

$$C_2S = 2.867(SiO_2) - 0.7544(SO_3)$$

$$C_3A = 2.650(Al_2O_3) - 1.692(Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3.043(Fe_2O_3)$$

Soit dans notre cas :

$$C_3S = 42.34\%$$

$$C_2S = 29.61\%$$

$$C_3A = 6.62\%$$

$$C_4AF = 8.58\%$$

Plusieurs analyses visant l'obtention de formules donnant une valeur de la chaleur d'hydratation, ont abouti aux relations suivantes [28] :

$$H_1 = 240(C_3S) + 50(C_2S) + 880(C_3A) + 290(C_4AF)$$

$$H_2 = 490(C_3S) + 225(C_2S) + 1160(C_3A) + 375(C_4AF)$$

où H_1 : chaleur d'hydratation du mortier à 3 jours d'âge

H_2 : chaleur d'hydratation du mortier à 1 année d'âge

Soit dans notre cas :

$$H_1 = 199.559 \text{ j/gr}$$

$$H_2 = 383.06 \text{ j/gr}$$

Ces calculs mettent en évidence, pour le ciment utilisé une faible teneur en aluminat tricalcique et en silicate tricalcique. Ce résultat influence directement la chaleur d'hydratation, avec pour conséquence de faibles valeurs de résistances initiales : Mais cependant, et les essais sur mortier le prouvent, les résistances à 28 jours atteignent le seuil des 400 Kg/cm^2 .

Le broyage fin du ciment, visible à sa surface spécifique dépassant les $4000 \text{ cm}^2/\text{gr}$, aura pour conséquence une tendance à un retrait important (voir § 3-4-3-1).

3-2-3-Les fillers :

Ces fillers sont destinés à corriger l'indice des vides du sable, à améliorer la cohésion, à diminuer la fissurabilité et à limiter le dosage en ciment pour un niveau de performance donné.

Les meilleures performances ont été obtenues , dans les études précédentes, avec le filler calcaire.

Par ailleurs une étude entreprise par BERTRANDY [29] a montré que la maniabilité des bétons, augmentait avec l'ajout de fillers calcaires. On peut ainsi réduire, dans le cas du béton de sable, le rapport E/C, et obtenir de meilleures résistances.

Le calcaire utilisé atteignait jusqu'à 1mm de diamètre et plus, alors que le sable de dunes ne dépassait pas 0.63mm. Logiquement le filler devrait avoir un diamètre inférieur à celui du sable, pour atteindre le but visé.

Dans cette étude, le broyage a été effectué dans un broyeur à boulets, pendant 2 heures, jusqu'à ce que la totalité des grains obtenus soit de diamètre inférieur à 80µm, dont un pourcentage de 50% ne dépassant pas les 50 µm.

Ce sont les fillers les plus fins possibles que le matériel disponible a permis d'obtenir.

La masse volumique absolue de ce filler a pour valeur moyenne 2750 Kg/m³ .

3-3-RECHERCHE DE COMPOSITIONS OPTIMALES :

L'étude de la composition du béton de sable a pour but de définir les dosages optimaux de chacun de ses constituants.

Le choix des formules a été opéré en premier lieu, sur la base de la maniabilité.

3-3-1-Dispositions communes :

a-Malaxage :

Le malaxage a une influence non négligeable sur les caractéristiques des mortiers et bétons.

Pour homogénéiser le béton, le malaxage à sec des matériaux pendant une minute, dans un malaxeur à axe vertical, a été effectué, et pendant deux minutes après introduction de l'eau. Cette procédure a été adoptée pour toutes les compositions.

b-Serrage du béton :

Le béton doit être mis correctement en place tout en essayant de réduire au maximum le pourcentage des vides.

Dans le cas de cette étude, le serrage du béton est obtenu grâce à une vibration, produite par une table vibrante.

Le temps de vibration, pour les éprouvettes de dimension 7x7x28, varie en fonction des compositions.

L'arrêt de la vibration se fait dès qu'il n'y a plus apparition de bulles d'air à la surface des éprouvettes.

Pour les éprouvettes 4x4x16, l'appareil à choc a été utilisé, en coulant le béton en deux couches, recevant chacune 60 coups.

3-3-2-Propriétés du béton frais :

Dans les études précédentes, le béton de sable de dunes présentait une masse volumique variant autour de 2100 Kg/m^3 .

Cette valeur a été prise comme donnée de base pour le choix des proportions à prendre pour chaque matériau.

Par ailleurs, la variation de deux autres paramètres a été prise en compte : le dosage en ciment, et le rapport E/C. Avec la tentative de réduire le rapport E/C au maximum, pour obtenir les plus fortes résistances mécaniques.

Deux appareils de mesures de la maniabilité ont été utilisés. En premier, un maniabilimètre L.C.P.C à mortier, malheureusement, le seul disponible présentait certaines défaillances, indépendamment de la non disponibilité du sable permettant l'étalonnage de cet appareil.

Le deuxième appareil, le Vébé, mis au point par Bahrner, a été utilisé, mais certaines modifications expliquées plus loin ont été introduites sur ce dernier.

3-3-2-1-Compositions de base :

La composition de base comporte le ciment, le sable et l'eau.

Le choix de ces compositions est fait sur la base du temps d'écoulement au maniabilimètre L.C.P.C .

Plus le béton est plastique, maniable et de bonne ouvrabilité, et plus le temps est court. On constate en moyenne les valeurs suivantes :

- pour les bétons mous et très fluides on a $t < 10$ sec
- pour les bétons très plastiques on a $t = 15$ sec
- pour les bétons de bonne ouvrabilité on a $20 < t < 30$ sec
- pour des bétons secs, peu maniables on a $t > 40$ sec

a- Résultats :

Les différentes compositions, avec les dosages en matériaux et les temps obtenus au maniabilimètre figurent au tableau 3-5

Tableau 3-5: Définitions des compositions de base et temps d'écoulement

Rappot E/C	type de composition	dosage en Kg/m ³ du			temps en sec d'écoulement
		ciment	sable	eau	
0.4	BS 1-1	350	1610	140	>120
	BS 1-2	300	1680	120	>120
	BS 1-3	250	1750	100	>120
	BS 1-4	400	1540	160	>120
0.5	BS 2-1	350	1575	175	>120
	BS 2-2	300	1650	150	>120
	BS 2-3	250	1725	125	>120
	BS 2-4	400	1500	200	47
0.6	BS 3-1	350	1540	210	>120
	BS 3-2	300	1620	180	90
	BS 3-3	250	1700	150	>120
	BS 3-4	400	1460	240	38
0.7	BS 4-1	350	1505	245	110
	BS 4-2	300	1590	210	57
	BS 4-3	250	1675	175	>120
	BS 4-4	400	1420	280	2
0.8	BS 5-1	350	1470	280	10
	BS 5-2	300	1560	240	10
	BS 5-3	250	1650	200	52
	BS 5-4	400	1380	320	0

Les raisons qui nous ont amenés à penser que le maniabilimètre présentait des défaillances sont les suivantes:

-certaines compositions paraissaient à l'oeil nu comme étant assez maniable, par contre le temps obtenu au maniabilimètre dépassait 1mn ;

-Pour les compositions BS 4-2 et BS 3-2, lors du coulage et sous l'effet d'une vibration de plus de 1mn 50sec, la composition restait sèche, avec en plus la formation de boules rondes et sèches d'un mélange de ciment et de sable.

Alors que la composition BS 4-1 présentant un temps au maniabilimètre supérieur à celui des deux précédentes, a été coulée et vibrée sans présenter les mêmes phénomènes.

Pour ces raisons, toutes les compositions suivantes :BS 2-4 BS 3-4; BS 4-1; BS 4-4; BS 5-1; BS 5-2; BS 5-4, ont été coulées et testées dans le but de déterminer les résistances mécaniques.

Les travaux antérieurs, n'ont tenu en aucun cas compte, de la mesure de la masse volumique du béton frais. Ceci impliqua des erreurs de dosage, vu que certaines compositions ne donnaient pas réellement 1 m^3 de béton.

Dans cette étude, une mesure systématique de cette masse volumique a été effectuée et comparée à chaque fois à la masse volumique théorique de 2100 Kg/m^3 .

Le tableau 3-6 reprend pour chaque composition ces valeurs, en indiquant également le temps de vibration utilisé.

Les résultats reportés dans ce tableau mettent en évidence:

- que pour certaines compositions, pour lesquelles les résultats de maniabilités laissaient penser qu'il y'a impossibilité de mise en oeuvre, une simple augmentation de l'énergie de vibration a permis de faire le coulage;

- que les masses volumiques réelles sont suffisamment proches de la valeur de 2100 Kg/m^3 , prise hypothétiquement lors du calcul des compositions, il n'est donc pas nécessaire d'introduire des corrections.

Tableau 3-6: Mesure des masses volumiques du béton frais

compositions	temps de vibration (sec)	masse volumique (Kg/m ³)
BS 2-4	90	2210.62
BS 3-4	114	2197.75
BS 4-1	40	2151.57
BS 4-4	75	2197.75
BS 5-1	72	2230.63
BS 5-2	56	2176.57
BS 5-4	60	2207.11

3-3-2-2-Compositions avec filler calcaire :

Dans cette phase l'appareil Vébé a été utilisé pour la mesure de la maniabilité.

L'essai consiste à mesurer l'aptitude d'un mortier ou d'un béton à remplir un moule sous vibration. L'appareillage comprend :

- une table vibrante sur laquelle repose un récipient cylindrique de 24 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur;
- un cône type d'Abrams disposé à l'intérieur du récipient cylindrique et dans lequel on placera le béton
- un plateau circulaire (disque transparent en verre ou en plastique) que l'on mettra en contact après le démoulage avec la partie supérieure du béton.

On mesure ensuite le temps mis par le béton pour remplir complètement l'espace délimité par le plateau circulaire (c'est à dire pour se remouler dans le récipient cylindrique).

L'inconvénient introduit dans cette recherche par cet appareil est relatif aux dimensions de la norme le définissant. De grandes quantités de sables, difficiles à se procurer dans le nord du pays, auraient été nécessaires.

Dans le but de réduire la quantité de sable utilisée, un autre moule a été fabriqué en divisant tous les côtés par

deux. Une mesure du temps mis par le béton pour s'écouler dans les deux appareils pour un certain nombre de compositions, a alors été effectuée pour déterminer un coefficient de corrélation.

Le petit appareil a été appelé "Vébé miniature".

Les dimensions des deux appareils sont données sur la figure 3-2.

Les valeurs des temps obtenus, sont données au tableau 3-7, et repris sur la figure 3-3.

Tableau 3-7: Temps d'écoulement au Vébé et Vébé miniature

compositions	temps en sec au	
	Vébé	vébé miniature
BS 5-2	50	35
BS 3-4	30	14
BSF 5-4-1	8	4
BSF 5-4-2	10	4
BSF 5-1-2	9	4
BSF 5-1-3	16	6

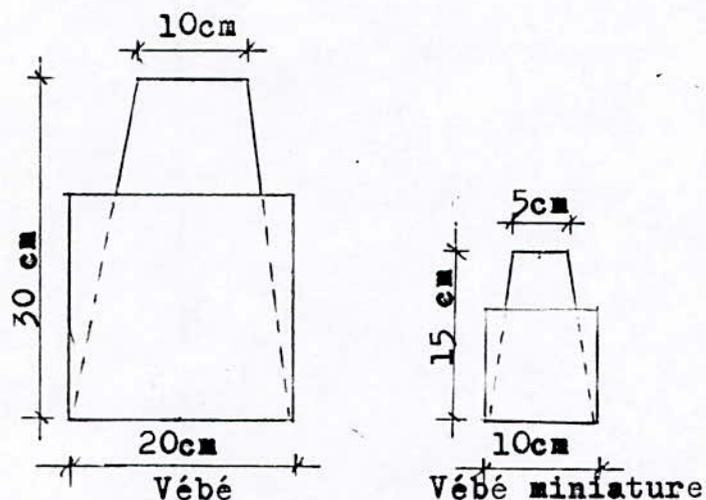


fig 3-2 Dimensions de l'appareillage de mesure de la maniabilité

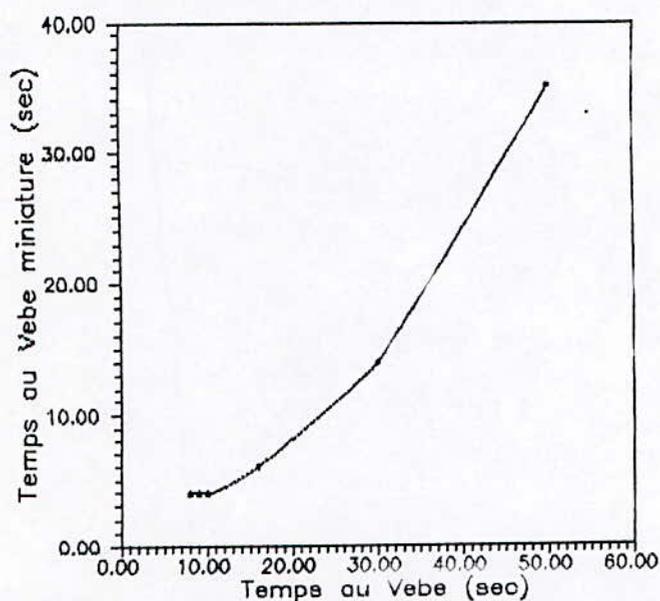


fig 3-3 Relation écoulement au Vebe-écoulement au Vebe miniature

La durée d'écoulement du béton de sable dans le Vébé dépasse de peu le double de celle obtenue dans le Vébé miniature, surtout pour les compositions très maniables.

On pense donc, par la suite, utiliser le Vébé miniature pour mesurer le temps d'écoulement, et ainsi consommer moins de sable.

Des essais ont été effectués sur le reste des compositions avec le Vébé miniature, en faisant varier comme pour les compositions de base, le rapport E/C, le dosage en ciment, ainsi que le dosage en filler.

Le dosage pondéral en filler était respectivement de 200, 250 et 300 kg par mètre cube de béton.

a-Résultats :

Plus de 50 compositions ont été testées, et sont données au tableau 3-8 celles dont le temps d'écoulement au Vébé miniature ne dépassait pas 30 sec.

L'ajout de filler calcaire a eu pour effet la réduction du rapport E/C jusqu'à une valeur de 0.6. Pour cette valeur, le temps d'écoulement était de 17 sec, cependant le béton paraissait encore suffisamment maniable pour être coulé sans difficulté.

Tableau 3-8: Définition des compositions avec fillers

Rapport E/C	Type de composition	dosage en Kg/m ³ du				temps en sec d'écoulement
		filler	ciment	sable	eau	
0.6	BSF 3-4-1	200	400	1260	240	17
0.7	BSF 4-1-1	200	350	1270	245	9
	BSF 4-4-1		400	1220	280	2
	BSF 4-4-2	250	400	1170	280	7
	BSF 4-1-3	300	350	1205	245	22
	BSF 4-4-3		400	1120	280	6
0.8	BSF 5-1-1	200	350	1270	280	3
	BSF 5-4-1		400	1180	320	2
	BSF 5-1-2	250	350	1220	280	8
	BSF 5-2-2		300	1310	240	21
	BSF 5-4-2		400	1130	320	1
	BSF 5-1-3	300	350	1170	280	6
	BSF 5-2-3		300	1260	240	12
	BSF 5-4-3		400	1080	320	2

Le choix des compositions coulées, est fait en premier sur la base des temps d'écoulement.

Pour voir l'influence, des dosages en correcteur et en ciment, ainsi que du rapport E/C, sur les caractéristiques du béton, les compositions suivantes ont été coulées:

BSF 4-4-1;BSF 5-1-1;BSF 5-4-1;BSF 5-4-2;BSF 5-1-3;BSF 5-4-3.

Le tableau 3-9 synthétise pour chacune des compositions étudiées certains paramètres physiques (masse volumique du béton frais, et temps de vibration lors du coulage). L'influence du dosage en filler sur la compacité du béton de sable est ainsi aisément mise en évidence (voir §3-3-2-2/b).

Tableau 3-9: Masses volumiques du béton frais avec filler

composition	temps de vibration (sec)	masse volumique (Kg/m ³)
BSF 4-4-1	50	2247.77
BSF 5-1-1	43	2150.92
BSF 5-4-1	40	2211.28
BSF 5-4-2	40	2233.24
BSF 5-4-3	49	2243.45
BSF 5-1-3	46	2202.36

b-Interprétation :

-Relation masse volumique-dosage en correcteur :

L'influence du dosage en correcteur sur la compacité du béton de sable a été examinée en traçant une courbe liant la masse volumique au dosage du correcteur pour le même rapport E/C (fig 3-4).

Il est visible d'après cette figure que la masse volumique augmente d'autant plus que le dosage en filler est grand. Cependant cette augmentation est surtout visible entre le témoin (sans filler) et le plus faible dosage en filler.

L'augmentation de la compacité se déduit immédiatement de l'augmentation de la masse volumique.

-Relation maniabilité-dosage en correcteur :

A teneur en eau constante, la maniabilité s'améliore lorsque le dosage en correcteur augmente, tel que montré sur la figure 3-5 pour un rapport E/C = 0.8 .

On note cependant l'existence d'un maximum dans la relation exprimant la variation de la maniabilité en fonction du dosage en correcteur.

Ce maximum peut être expliqué ainsi : au départ les fines câlent le matériau en se logeant dans les vides, bloquant ainsi son écoulement.

Mais à partir de l'optimum, la quantité de fines rajoutée devient suffisamment importante pour s'interposer entre les grains de sables, diminuant ainsi la surface de contact intergranulaire, et donc la résistance au cisaillement du mélange.

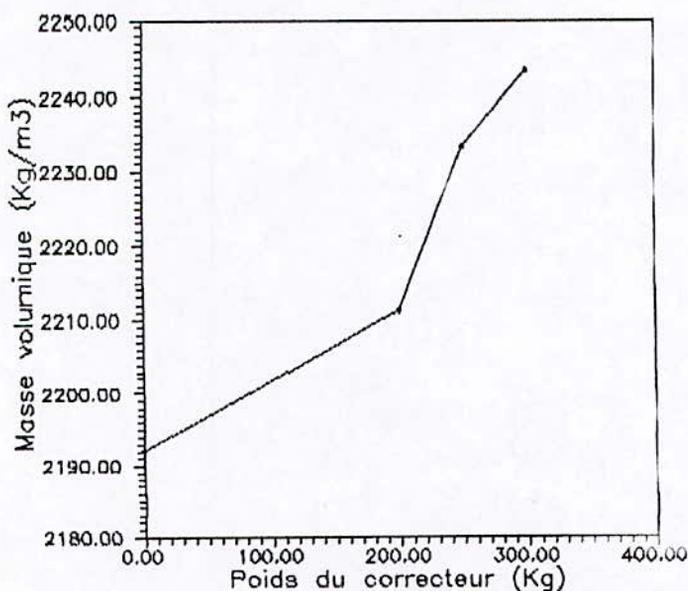


fig 3-4 Relation masse volumique du béton frais-dosage en correcteur

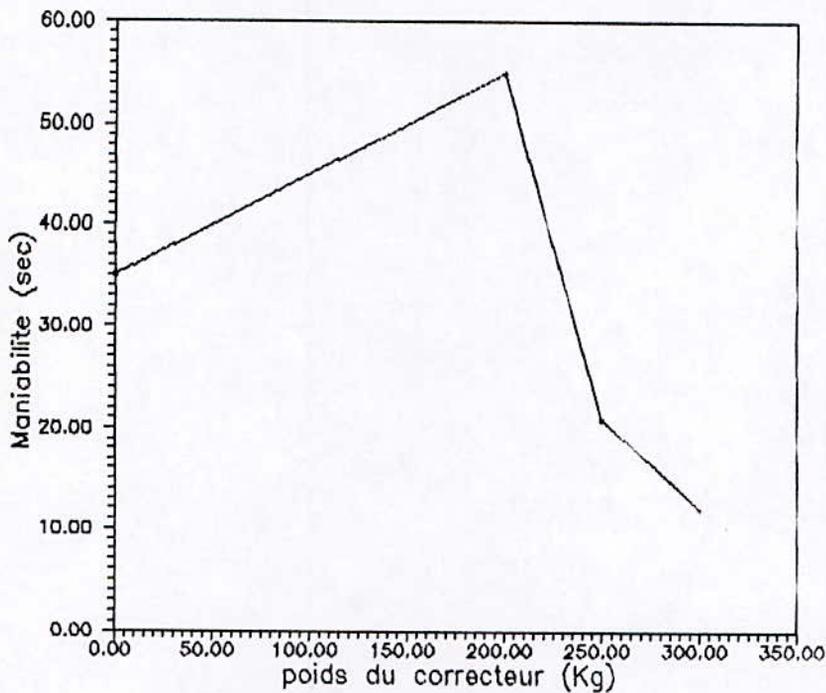


fig 3-5 Relation maniabilité-dosage en correcteur

3-3-2-3-Compositions avec adjuvants :

Dans le but de réduire davantage le rapport E/C les adjuvants suivants ont été ajoutés aux compositions avec filler :

- Sika fluide (fluidifiant): rajouté avec un dosage pondéral égalisant 0.7% du poids du ciment placé dans la composition;

- plastiment BV 40 (plastifiant réducteur d'eau): dosé à 0.7% du poids du ciment;

- plastiretard (plastifiant réducteur d'eau): dosé à 0.2% du poids du ciment;

- plastifiant de Granitex : rajouté avec un dosage de 10 litres par m³.

L'ajout de ces adjuvants n'a pas eu grand effet sur la

maniabilité : la valeur du rapport E/C atteinte est de 0.6 ,et ceci avec le Sikafluide. Cependant le temps d'écoulement obtenu était inférieur à celui de la même composition sans adjuvant.

Le tableau 3-10, présente la composition BSF 3-4-3 SF avec les différents dosages, ainsi que les mesures faites sur béton frais.

Tableau 3-10: Définition de la composition avec adjuvant

E/C	dosage en Kg/m ³ du					temps au Vébé (sec)	masse volumique (Kg/m ³)
	filler	ciment	sable	eau	adjuvant		
0.6	300	400	1160	240	2.8	6	2142.94

3-4-PROPRIETES DU BETON DURCI :

Deux paramètres permettent d'apprécier la qualité d'un béton : sa résistance mécanique et sa déformabilité.

L'étude de ces deux paramètres est développée dans les paragraphes suivants.

La résistance mécanique est d'abord étudiée, de même que la variation des masses volumiques du béton durci.

La variation de la masse volumique est étudiée car elle définit la quantité d'eau en excès dans le béton. Cette quantité d'eau permet d'atteindre une certaine maniabilité, mais au détriment de la résistance de plus elle augmente le retrait.

Les déformations causées par l'augmentation de la charge, le retrait et le fluage sont traitées dans cette étude.

3-4-1-Caractéristiques mécaniques :

Du point de vue intérêt la résistance mécanique est considérée comme une des qualités primordiales à rechercher

pour un béton.

Il est donc indispensable de contrôler les résistances de rupture en traction et surtout en compression.

Le but visé dans cette étude, est d'obtenir des résistances en compression de 200 bars au moins, pour qu'on puisse utiliser ce béton dans la réalisation d'éléments structurels.

Depuis leur confection à leur écrasement, les éprouvettes ont été conservées dans un bac d'eau dont la température a été maintenue à $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Avant chaque essai les éprouvettes sont essuyées, mais non séchées.

Les éprouvettes soumises à l'essai de compression étaient de forme cubique, de 7 cm de côté.

La machine d'essai est une presse hydraulique à deux plateaux horizontaux, appliquant la charge d'une manière continue et sans chocs.

Les éprouvettes soumises à l'essai de traction par flexion, étaient prismatique de dimensions 7x7x28.

a-Résultats :

Les mesures des résistances à la compression ont été effectuées à 7, 14 et 28 jours, alors que pour la traction à 7 et 28 jours seulement.

Pour chaque composition et chaque âge, trois éprouvettes au moins, ont été testées.

Le tableau 3-11 donne les résistances moyennes mesurées aux différents âges.

Tableau 3-11: Résistances du béton à différents âges

composition	Résistance en compression			Résistance en traction	
	(bars) à			(bars) à	
	7j	14j	28j	7j	28j
BS 4-1	81.02	-	140.61	-	10.25
BS 5-2	54.59	70.55	144.56	6.67	10.67
BS 5-1	80.61	123.72	149.41	9.00	11.50
BS 5-4	124.90	128.23	158.17	11.00	13.83
BS 4-4	82.14	125.95	165.67	11.53	15.67
BS 3-4	148.81	175.34	232.65	11.77	17.67
BS 2-4	226.3	236.39	252.72	15.83	20.83
BSF 4-4-1	181.63	-	230.63	13.67	19.33
BSF 5-1-1	111.90	134.35	153.06	12.17	15.82
BSF 5-4-3	96.21	143.11	186.48	-	18.5
BSF 5-4-2	119.39	143.20	179.25	14.17	17.50
BSF 5-4-1	127.96	143.54	169.90	12.50	15.67
BSF 5-1-3	149.18	173.21	206.29	13.17	18.00
BSF 3-4-3SF	214.49	234.01	278.57	20.00	25.00

b-Interprétation :

Concernant les deux premiers cas de figures (fig 3-6 et 3-7) deux remarques peuvent principalement être notées :

1-L'augmentation de la résistance en compression est nette en fonction de la diminution du rapport E/C (de l'ordre de 30% pour les compositions sans ajout)(fig 3-6).

2-Cette augmentation est moins notable lors de l'augmentation du poids du correcteur quand le rapport E/C est maintenu constant (de l'ordre de 10%)(fig 3-7).

L'étude de la variation de la résistance en fonction du rapport C/E, a conduit à une relation linéaire (fig 3-8). La régression $y = ax + b$ pourra donc être appliquée aux résultats

expérimentaux, pour donner :

$$\begin{aligned} a &= 142 \\ b &= - 23.28 \end{aligned}$$

avec un coefficient de corrélation $r = 0.9709$

La formule empirique donnant la résistance en compression à 28 jours, en fonction du rapport C/E pour le cas du béton de sable de dunes, est la suivante :

$$R_{c28j} = 142 [(C/E) - 0.164] \quad (3-1)$$

avec: $1.2 \leq C/E \leq 2.0$

L'étude de la variation de la résistance en compression en fonction du temps met en évidence une relation du type classique. L'augmentation de résistance après 28 jours devient négligeable (moins de 20% d'augmentation dans le meilleur des cas) (fig 3-9).

On arrive aux mêmes remarques quand il s'agit de l'étude des résistances en traction. L'augmentation dépasse 30% en passant d'un rapport E/C de 0.8 à 0.4 (fig 3-10), alors que l'augmentation en fonction du poids du correcteur est moins importante (fig 3-11).

De plus les résistances en traction obtenues égalisent celles des bétons ordinaires. Ce qui implique des rapports entre résistance en compression et résistance en traction du même ordre que ceux des bétons classiques, car pour le béton ordinaire une valeur moyenne de 13 est généralement admise [30]. Cette valeur est obtenue pour les compositions traitées (fig 3-12).

Cette série de test vient de montrer que les variations les plus notables en matière de résistance peuvent être obtenues , plus par la diminution du rapport E/C que par l'augmentation de la compacité du matériau.

Le filler calcaire, par son utilisation, permet entre

autres de diminuer ce rapport.

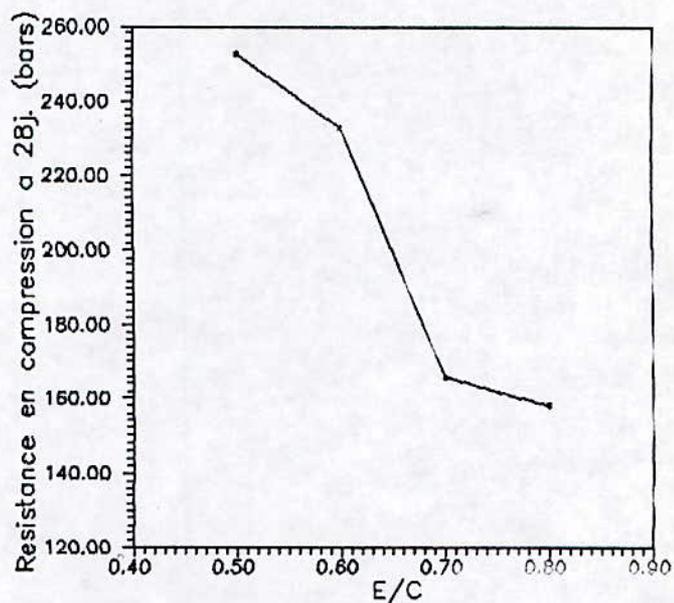


fig 3-6 Variation de la resistance fonction du rapport E/C

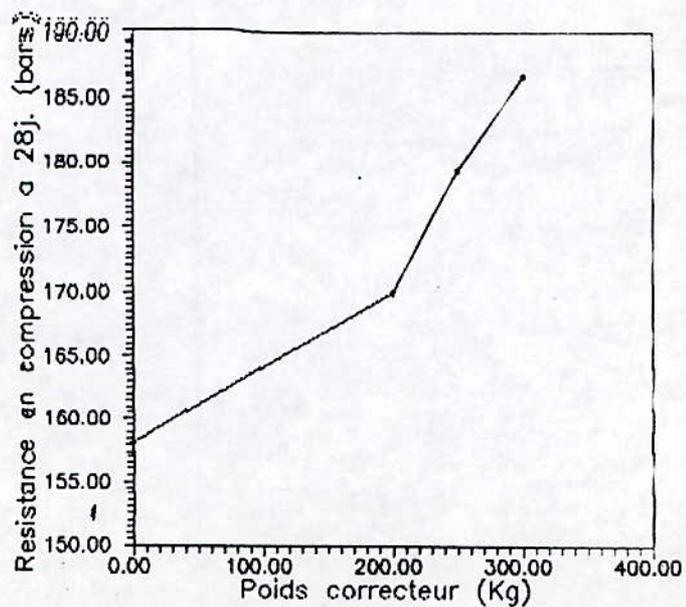


fig 3-7 Variation de la resistance en fonction du dosage en correcteur

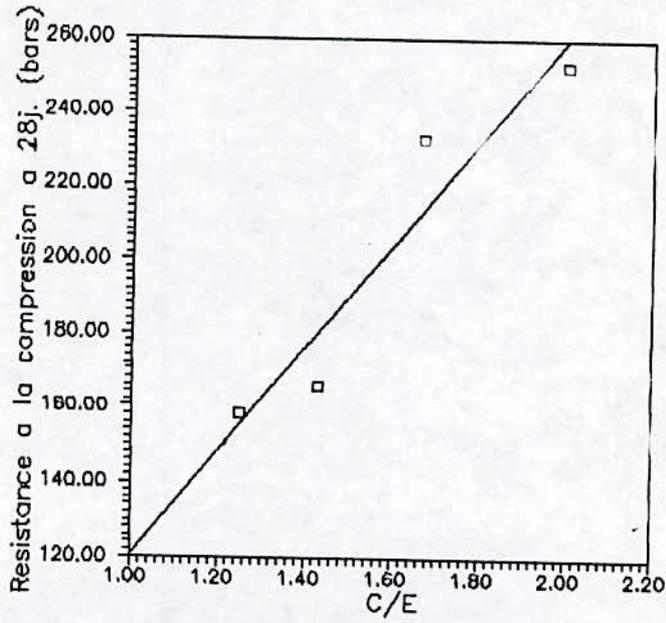


fig 3-8 Variation de la resistance en fonction du rapport C/E

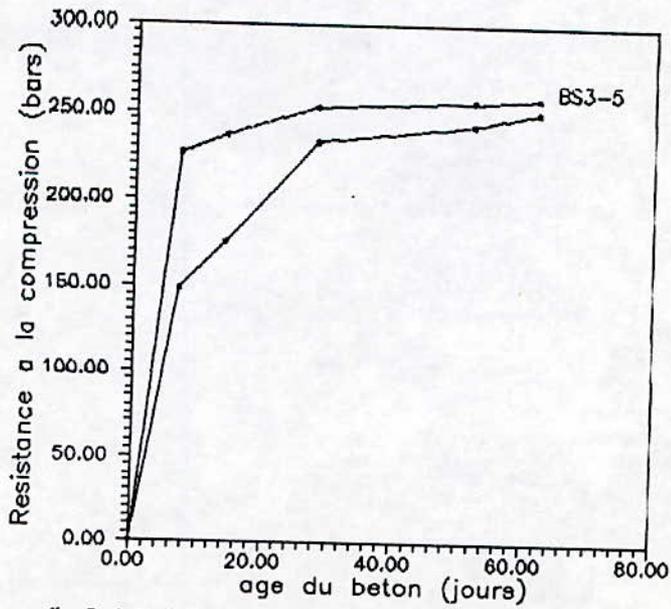


fig 3-9 Variation de la resistance en fonction de l'age du beton

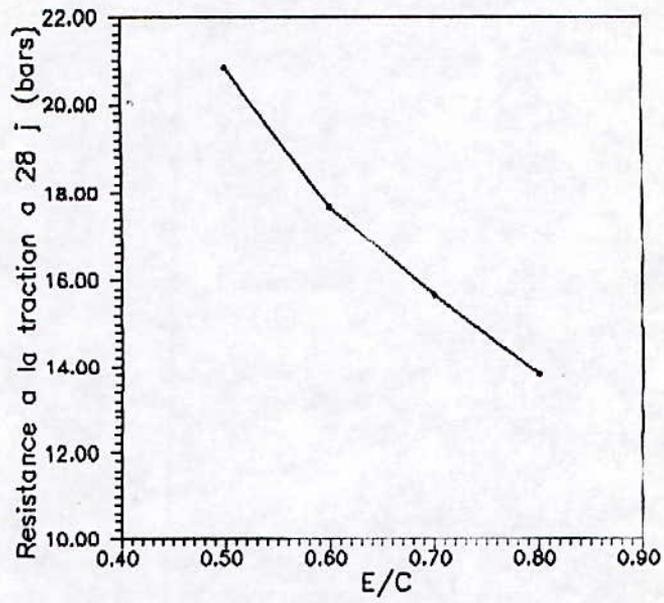


fig 3-10 Variation de la resistance en fonction du rapport E/C

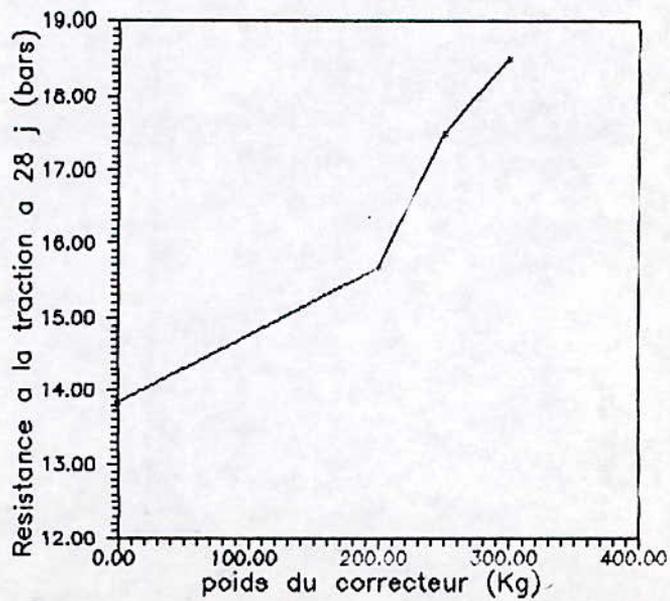


fig 3-11 Variation de la resistance en fonction du dosage en correcteur(E/C=0.8)

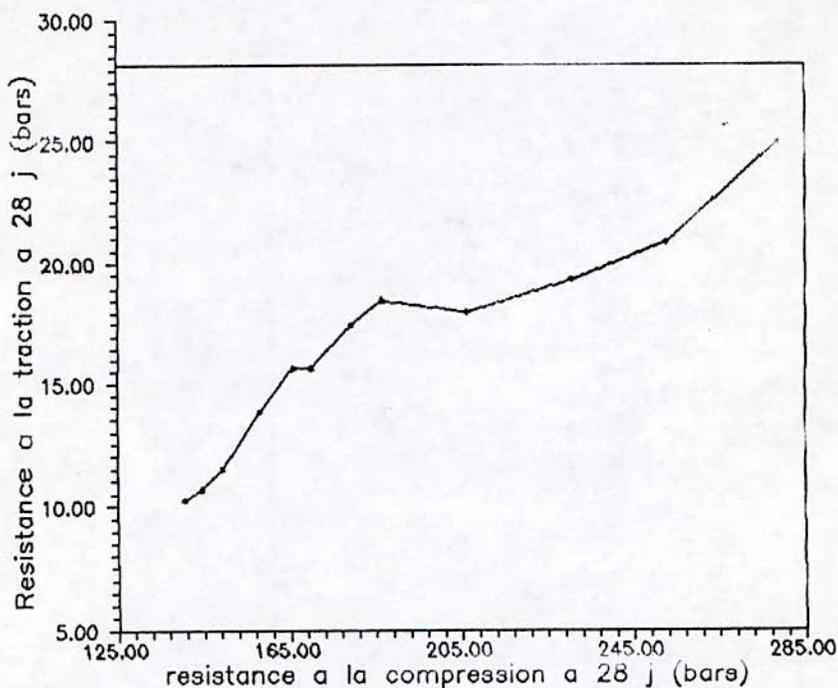


fig 3-12 Relation resistance en traction-resistance en compression

3-4-2-Variation des masses volumiques et températures :

a-Mode opératoire :

La masse d'eau entrant dans la composition du béton n'intervient pas complètement dans la réaction d'hydratation du béton. Une partie, non négligeable, s'évapore.

Des mesures des masses volumiques ont été effectuées dans le but de calculer le pourcentage d'eau évaporable, et ces mêmes mesures serviront plus tard dans l'estimation de la qualité du béton par auscultation à l'ultra-son.

Les mesures de la température à l'intérieur des éprouvettes ont été rendues possibles en procédant comme suit :

- des pailles pour boissons ont été introduites à

l'intérieur du béton et sont fixées à des plots placés sur la surface extérieure des moules

- un thermomètre sous forme de sonde est introduit à chaque fois jusqu'au centre de l'éprouvette.

La mesure de la température, grâce à cette sonde, a été faite (fig 3-13).

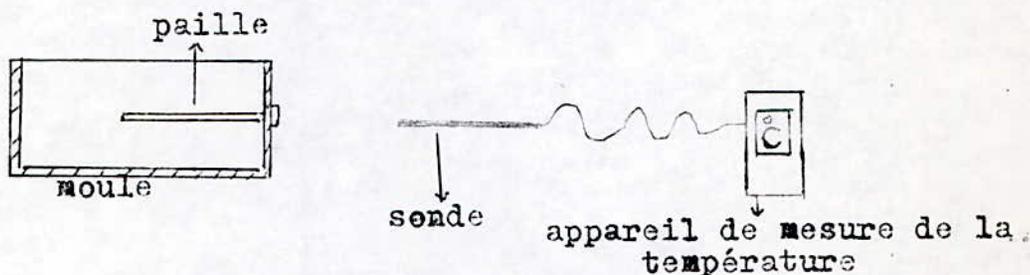


fig 3-13 Dispositif de mesure de la température

La température ambiante est à chaque moment mesurée, et comparée aux valeurs de la température relevées au centre de l'éprouvette, afin de mieux apprécier les dégagements de chaleur du béton.

b-Résultats :

La mesure des températures a permis de révéler de faibles variations entre les températures internes et externes au béton.

Ce résultat était attendu, car le ciment CPA 325 utilisé présentait de faibles chaleurs d'hydratation. Par ailleurs ces chaleurs allaient diminuer en fonction de l'âge du matériau.

Compte tenu du faible écart constaté pour les

températures, seules les masses volumiques sont présentées dans le tableau 3-12.

Ne sont indiquées sur ce tableau que les valeurs des compositions présentant un correcteur, pour mettre en évidence l'influence de l'ajout sur la masse d'eau évaporée.

Cette évaporation de l'eau affectera plus tard le retrait de ce béton (§3-4-3-1).

Tableau 3-12 : Masses volumiques du béton frais

composition \ âge(jours)	BSF 5-4-1	BSF 5-4-2	BSF 5-4-3
1	2211.28	2203.24	22243.45
7	2221.74	2185.55	2185.55
14	2113.18	2077.00	-
28	2062.53	2077.00	2084.24
48	2062.53	2040.82	2048.05
85	-	2011.87	2026.34
	2026.34	2019.10	2026.34
masse volumique en Kg/m ³			

c-Interprétation :

Dans un ciment, dont la prise est terminée, l'eau se trouve en trois situations différentes, à savoir :

- l'eau évaporable, qui se trouve dans les pores capillaires et à la surface des couches d'eau adsorbée par les gels. Cette eau s'évapore simplement par séchage à la température normale;

- l'eau vaporisable, qui se trouve dans les pores des gels et ne s'évapore que par échauffement;

- l'eau non vaporisable, qui ne s'évapore qu'à un échauffement plus élevé, après dissociation thermique des néo-formations hydratées du ciment durci.

Dans le cas du béton de sable, grâce à la mesure des masses

volumiques, le calcul de la quantité d'eau évaporable peut se faire. Cette eau n'est autre, en fait, que celle rajoutée au béton pour obtenir une maniabilité suffisante.

Les masses des éléments solides étant inchangeables en fonction de l'âge, la différence entre masses volumiques pour les mêmes éprouvettes, donne la masse d'eau évaporable.

Les calculs ont mis en évidence que la masse d'eau évaporable représentait près de 50% de la masse d'eau initiale intervenant dans la composition. Etant donné qu'elle est à l'origine de la chute de résistance du béton, le rapport E/C qui permettra de maximiser cette résistance est de moitié moindre du rapport initial. Soit un rapport E/C de 0.4 .

La variation du dosage en correcteur n'a eu aucun effet sur la quantité d'eau évaporable. Les pourcentages trouvés pour les trois compositions étaient du même ordre.

3-4-3-Analyse des déformations :

L'analyse des déformations d'une éprouvette de béton permet de mettre en évidence trois types de variations de longueur :

- une variation de longueur sans chargement (le retrait);
- une variation de longueur fonction du chargement mis en oeuvre (loi de comportement (σ - ϵ) classique);
- une variation de longueur pour un même chargement fonction du temps. Cette dernière est définie par la courbe de fluage.

Dans les paragraphes suivants une étude de chacun de ces trois phénomènes est présentée. Ainsi qu'une étude du module d'élasticité déterminé par l'auscultation dynamique.

3-4-3-1-Retrait du béton de sable :

L'analyse des déformations d'une éprouvette de béton permet de mettre en évidence trois types de variations de longueur :

- une variation de longueur sans chargement (le retrait);

- une variation de longueur fonction du chargement mis en oeuvre (loi de comportement ($\sigma-\epsilon$) classique);

- une variation de longueur pour un même chargement fonction du temps. Cette dernière est définie par la courbe de fluage.

Dans les paragraphes suivants une étude de chacun de ces trois phénomènes est présentée.

La déformation du béton non chargé est un facteur très important dans la conception des structures. Elle se superpose à l'effet de chargement et peut modifier les états d'équilibre et de contraintes.

Le béton frais, considéré avant la prise, subit un changement de volume qui peut être important. C'est le retrait plastique, causé en général par une perte d'eau par exsudation ou évaporation, qui provoque des fissures plus ou moins profondes. Malheureusement l'appareillage conçu pour mesurer ce retrait n'est pas disponible (à l'E.N.P).

La déformation du béton durci : retrait positif ou négatif (gonflement) suit également le mouvement de l'eau et son absorption lors de l'hydratation du ciment. Ceci est lié au milieu de conservation et plus particulièrement à l'humidité atmosphérique, ainsi qu'à d'autres facteurs développés dans cette étude.

a-Mode opératoire :

Le seul retrait mesurable, dans notre cas, est le retrait hydraulique.

Le retrait est mesuré à l'aide de comparateurs, sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 et 7x7x28 .

Dans le but d'étudier l'influence de la conservation, pour les compositions sans ajout de filler, une série d'éprouvettes était placée à l'air libre et une autre dans l'étuve à 45°C.

Le fait que les éprouvettes placées dans l'étuve n'ont pas donné de valeurs de retraits supérieures à celles des

éprouvettes conservées à l'air libre, a poussé à changer le mode de conservation.

Pour les compositions avec filler calcaire, l'influence de la conservation préalable à l'eau a été étudiée.

Les éprouvettes ont d'abord été conservées dans l'eau pendant 7, et 28 jours; elles ont ensuite été placées à l'air libre.

Les normes prévoient de mesurer le retrait sur des éprouvettes conservées à 50% d'humidité et 20°C. Ne disposant pas d'une salle conditionnée, l'utilisation d'un thermo-humidimètre pour avoir une idée sur les conditions régnant dans le laboratoire s'est avérée indispensable.

b-Résultats et interprétation :

Le béton de sable de dunes a donné un important retrait.

Seulement tel que cela sera mis en évidence ultérieurement, le ciment est un élément principal de la composante de ce retrait. Devant un tel retrait une étude de chacun des facteurs susceptibles de l'augmenter devient incontournable.

Influence de la cure:

Le retrait final est peu modifié par la conservation dans l'étuve.

Le fait de conserver les éprouvettes à de hautes températures, a eu certainement pour effet, d'accélérer l'évaporation de l'eau contenue dans le béton pendant les premiers jours donnant ainsi des valeurs importantes du retrait (voir fig 3-14 et 3-15).

Une fois cette eau évaporée le retrait commence à se stabiliser. Par contre le retrait des éprouvettes conservées à l'air libre commence par de faibles valeurs pour terminer avec des valeurs supérieures à celles des éprouvettes conservées

dans l'étuve.

Les éprouvettes conservées initialement dans l'eau pendant des durées variables puis à l'air ont donné, à long terme, un retrait du même ordre que celui des éprouvettes témoins conservées à l'air libre dès le premier jour (fig 3-16).

Ceci est tout à fait normal, car des études sur le retrait des mortiers et bétons [32] [33] [35], ont montré que celui-ci diminue lorsque l'hygrométrie du milieu augmente et croît lorsque la durée de conservation préalable dans l'eau a été plus longue tout en tendant vers une certaine limite. Cette limite croît avec la diminution de l'hygrométrie de l'ambiance de conservation.

Concernant l'hygrométrie, il est nécessaire de faire la remarque suivante : dans le laboratoire des variations de l'humidité relative de 60 à 85%, et des variations de la température de 15 à 30°C, étaient courantes. Or pour un bon nombre d'éprouvettes, une augmentation du retrait pendant les premiers jours, est suivie d'une diminution de celui-ci dans les autres jours. Cette diminution est certainement due à une augmentation de l'humidité relative.

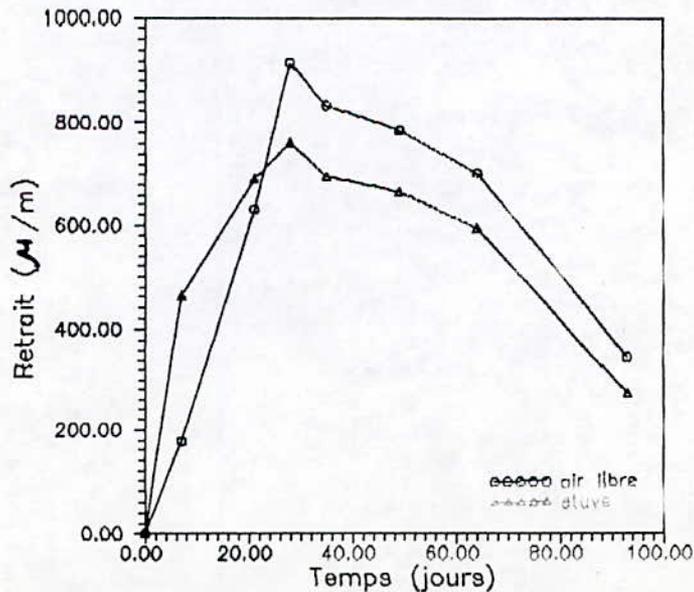


fig 3-14 Influence de la cure sur le retrait (epr 7x7x28)

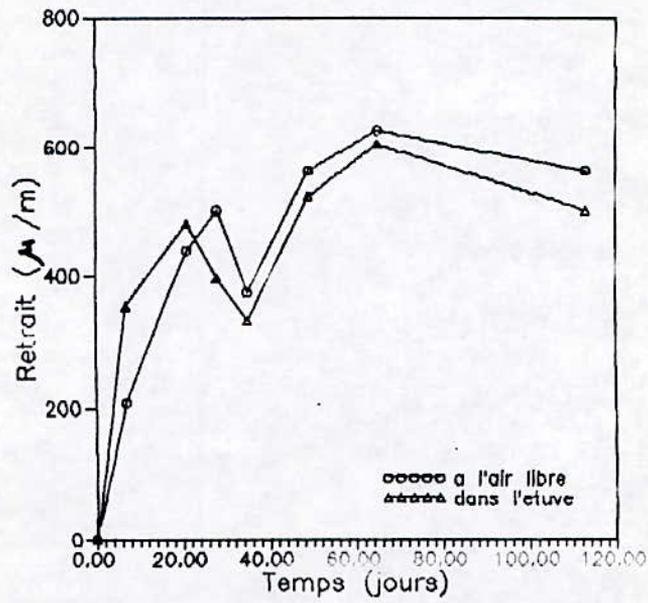


fig 3-15 Influence de la cure sur le retrait (epr 4x4x16)

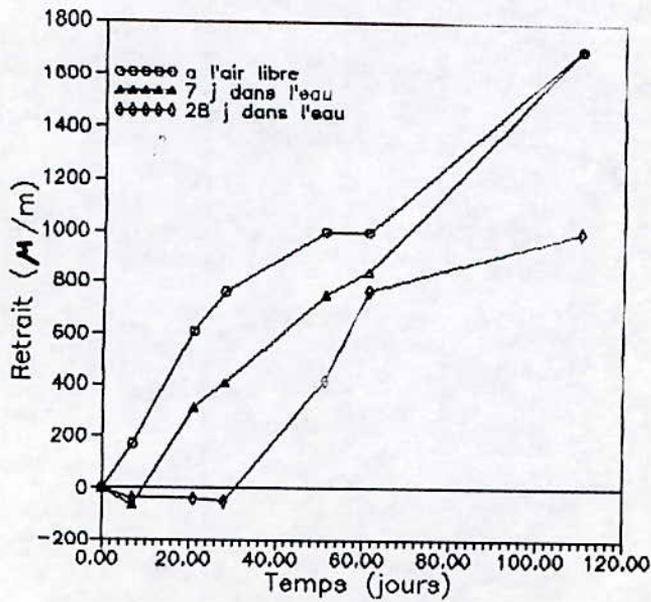


fig 3-16 Influence de la cure sur le retrait

Influence du dosage en eau :

Le dosage en eau n'a pas une très grande influence sur le retrait des bétons, mais il semble en avoir une plus nette sur les mortiers riches en ciment [35].

Du point de vue composition granulométrique, le béton de sable, ressemble plus à un mortier qu'à un béton.

Une étude de l'influence du rapport E/C sur le retrait final dans le cas de compositions dosées à 400 Kg de ciment par mètre cube de béton (fig 3-17), a donc été entreprise.

Les résultats sont identiques à ceux des mortiers, sauf dans les relations temporelles, car à des âges avancés une perturbation apparaît, due certainement à ce que les compositions n'étant pas coulées le même jour, les conditions hygrométriques étaient différentes.

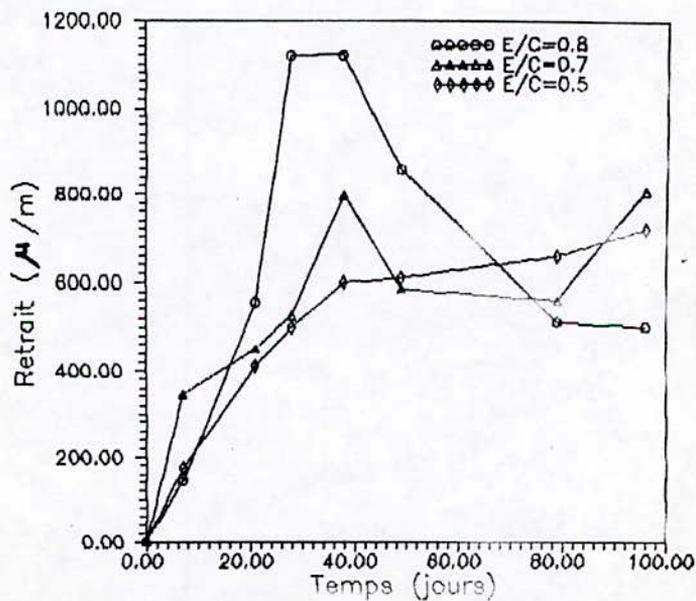


fig 3-17 Retrait en fonction du rapport E/C (epr 7x7x28)

Le retrait semble augmenter avec l'augmentation du dosage en eau.

Influence de la forme et de la dimension de l'éprouvette:

Les dimensions et la forme des éléments ont une influence très marquée sur la vitesse d'évaporation de l'eau [31] [35]. La valeur limite de perte en eau diminue lorsque la dimension absolue augmente.

Les mesures faites sur toutes les compositions (un exemple est donné sur la figure 3-18) montrent que les éprouvettes de grandes dimensions assument leur retrait plus lentement que celles de petites dimensions. La valeur finale de la déformation relative due au retrait est même numériquement plus faible.

Ce phénomène peut être expliqué par un état de contrainte opposé à cette déformation, et également proportionnel à la dimension de l'éprouvette : celui dû aux forces de viscosités générées par l'écoulement de l'eau dans les différentes parties de l'élément, à travers des interstices.

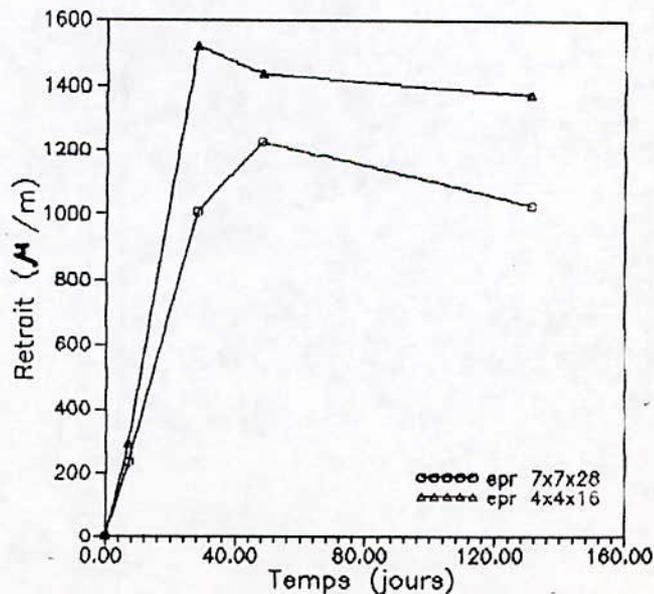


fig 3-18 Influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait

Influence du dosage en ciment :

L'influence du dosage en ciment est faible sur le retrait du béton [34] en comparaison avec les mortiers, pour lesquels les retraits sont d'autant plus élevées qu'ils sont riches en ciment et en éléments fins [31] [32] [35].

Pour le béton de sable, les résultats sont, au contraire, inversés. Pour un dosage de 300 Kg de ciment par mètre cube de béton, les retraits sont plus élevés que ceux obtenus à des dosages en ciment de 350 et 400 Kg/m³ (fig 3-19).

Ce phénomène s'explique probablement par le fait, que les compositions n'étant pas coulées pendant la même période, elles ont du subir des conditions climatiques différentes.

De plus pour les compositions dosées à 300 Kg/m³, la quantité de ciment est plus faible, mais le pourcentage en sable est plus important. Le sable de dunes est très fin, il a donc tendance à augmenter le retrait final .

Par ailleurs toujours dans la tranche fine de la composition, l'effet de l'ajout du filler calcaire ne peut être négligé.

C'est ce que met en évidence l'étude faite par l'HERMITE [35], où trois bétons de granulométries identiques, ont été confectionnés avec des granulats de natures minéralogiques différentes. L'un avec des granulats quartzeux, l'autre avec des granulats de Seine et le troisième avec des granulats calcaires. Le béton avec les granulats calcaires a donné le retrait le plus important.

La décision d'examiner l'influence, sur le retrait, du correcteur granulométrique calcaire, a donc été prise (fig 3-20).

Les résultats obtenus, montrent effectivement, que pour le même rapport E/C et le même dosage en ciment, la composition sans ajout, présente les plus faibles retraits.

Les compositions corrigées par le filler calcaire n'étant pas coulées pendant la même période, ont présentées des

incohérences dues probablement aux variations des conditions climatiques.

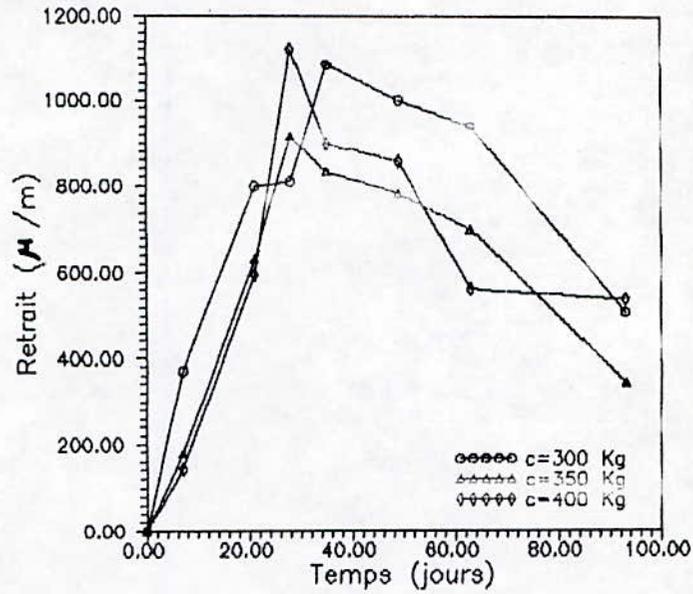


fig 3-19 Retrait en fonction du dosage en ciment (E/C=0.8 epr 7x7x28)

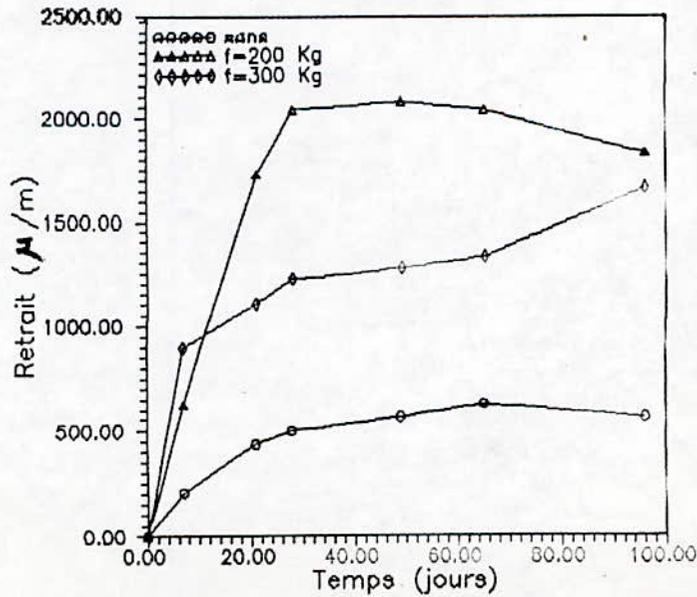


fig 3-20 Retrait en fonction du dosage en correcteur (epr 4x4x16)

Influence de la composition chimique du ciment :

Des facteurs technologiques du ciment, tels que la température de cuisson, et la vitesse de refroidissement peuvent influencer sur le retrait. Cependant pour une même composition chimique, la finesse de mouture peut jouer un rôle important dans l'évolution du retrait [35].

Une étude faite par VENUAT [32], sur un clinker broyé à 6 finesses de mouture différentes : 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, et 5500 cm^2/gr Blaine, a montré que le retrait du mortier augmente avec la finesse de mouture. Ainsi, un ciment ayant une finesse de 4000 cm^2/g a donné un retrait de 1500 μ/m .

Le ciment utilisé dans notre cas a une finesse de 4230 cm^2/g . Le retrait dépassant 1500 μ/m , mesuré lors des essais, est donc logique.

La variation du retrait dépend également de la composition chimique du liant.

L'étude présentée par VENUAT [32], a mis également en évidence les conclusions suivantes :

- le retrait diminue lorsque le silicate tricalcique C_3S augmente : cela peut s'expliquer par le fait que les ciments fortement dosés en chaux contiennent toujours un peu de chaux libre. L'hydratation de cette chaux provoque des gonflements qui diminuent le retrait;

- le retrait augmente avec l'aluminat tricalcique C_3A .

Dans ce dernier cas une droite de regression a même pu être déterminée.

Si on appelle :

x le retrait en μ/m à 28 jours du mortier
et y la teneur en C_3A en %

$$\text{on a : } x = 17.2y + 494 \quad (3-2)$$

Connaissant le pourcentage de C_3A , qui est de 6.62%, la valeur du retrait a pu être déterminé par la relation (3-2) :

$$x = 17.2(6.62) + 494$$

$$x = 607.86 \mu/m$$

Cette valeur de 607.86 μ/m a été dépassée par la plupart des compositions testées.

Dans la même étude, le retrait semble augmenter quand le ciment est riche en C₃A et possède une finesse de mouture importante. Pour un clinker broyé à 4000 cm^2/gr Blaine, et avec un pourcentage en C₃A de 18.9%, le retrait atteint à 182 jours était de l'ordre de 1500 μ/m .

Les retraits obtenus dans le cas du béton de sable de dunes, avec un ciment pauvre en C₃A, sont donc dus à la finesse de mouture qui est importante.

3-4-3-2-Propagation de l'onde sonique dans le béton de sable :

Dans le cadre de l'étude de la propagation de l'onde sonique, les mesures ont été effectuées conformément aux recommandations de la RILEM [36], en opérant avec un appareil PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Testor).

a- Mode opératoire :

Dans ce type d'appareil une impulsion est produite par un transducteur électro-acoustique que l'on applique sur une face de l'élément en béton. Elle est réceptionnée par un second transducteur et convertie en signal électrique. Un appareil électronique permet de mesurer le temps de propagation.

Ces mesures ont été effectuées de trois façons :

- première mesure directe : les transducteurs ont été placés sur les faces opposées de l'éprouvette dans le sens longitudinal;

- deuxième mesure directe : les transducteurs sont toujours placés sur des faces opposées, mais cette fois-ci dans le sens transversal de l'éprouvette, pour pouvoir juger l'homogénéité

du matériau;

- mesure indirecte : les transducteurs sont placés sur la même face. Cette mesure indirecte rend compte de la célérité de l'onde dans une bande superficielle de faible épaisseur qui représente la "peau", ce qui est différent de la masse du béton.

b-Résultats :

Pour mesurer la vitesse de propagation du son, on mesure la distance entre les transducteurs et le temps mis par l'onde à la parcourir.

La vitesse est donnée par :

$$V = L/T \quad (3-3)$$

avec L : longueur du parcours en mètre

T : temps de propagation en seconde

Dans le tableau 3-13, sont données les vitesses de propagation obtenues pour les trois modes.

Compte tenu de la non disponibilité de l'appareil ultra-son, au début du coulage, les mesures obtenues ont été toutes effectuées sur des éprouvettes renfermant le correcteur.

c-Interprétation :

De ces mesures les remarques suivantes peuvent être faites:

- pour un certain nombre de compositions, la variation de la vitesse de propagation, obtenue sur une même éprouvette, en fonction du temps est quasi aléatoire. Ceci est très certainement lié aux changements physico-chimiques dans la structure, très importants quand le béton est encore jeune. Cette perturbation se stabilise tout en s'approchant du 28^{eme} jour;

- les défauts d'homogénéité dans le béton entraînent des variations dans les vitesses de propagation. Pour cette raison

des mesures de vitesses dans deux sens opposés ont été effectuées. Les valeurs obtenues confirment cette hétérogénéité. Elle est certainement causée par la présence de vides car l'écart entre vitesses diminue avec l'augmentation du dosage en correcteur;

- une différence appréciable, mais pas trop importante existe entre les vitesses obtenues par des mesures directes et des mesures indirectes. La résistance en surface n'est exactement la même qu'au centre des éprouvettes. Cette dernière est plus faible car les valeurs des vitesses, données par mesures indirectes, sont plus faibles.

Tableau 3-13 : Vitesses de propagation de l'onde sonique en m/sec

composition	mesure	âge du béton en jours				
		1	7	14	21	28
BSF 5-1-1	directe 1	3120	3210	2380	2010	2070
	directe 2	3720	3190	4260	3760	2830
	indirecte	1960	2190	1170	2130	2820
BSF 5-4-1	directe 1	1730	3610	-	3830	3670
	directe 2	2870	4240	-	4380	4380
	indirecte	1670	2020	-	2070	2320
BSF 5-4-2	directe 1	2580	1930	3510	-	2551
	directe 2	3850	2210	3050	-	3640
	indirecte	2180	2030	1077	-	2411
BSF 5-4-3	directe 1	3230	2860	3630	-	3820
	directe 2	3380	4350	3970	-	3970
	indirecte	1340	1880	2750	-	2930
BSF 5-1-3	directe 1	-	4020	4100	4010	4220
	directe 2	-	5530	4470	4570	5050
	indirecte	-	2960	3740	2800	3640

Le module dynamique de Young (E) du béton peut être déterminé à partir de la vitesse de propagation V et du coefficient de Poisson ν au moyen de la relation suivante

$$E = \rho V^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)/(1 - \nu) \quad (3-4)$$

Le coefficient dynamique de Poisson pour un béton est généralement de l'ordre de 0.25, mais des variations comprises entre 0.2 et 0.35 ont été constatées.

Un coefficient de 0.2 sera pris sur la base de la valeur moyenne du coefficient de Poisson statique de 0.18 (voir §3-4-5).

La relation (3-4) donne, donc :

$$E = \rho V^2 / 111.11 \quad (\text{bars}) \quad (3-5)$$

avec V : vitesse longitudinale du signal en m/sec
 ρ : masse spécifique en t/m³

Bien qu'il n'existe pas de relation générale entre le module dynamique et la résistance en compression mesurée dans les conditions normalisées, l'expérience met en évidence une corrélation entre ces deux grandeurs.

La meilleure régression, est le plus souvent obtenue par la fonction puissance du type :

$$R_c = aE^b \quad (3-6)$$

Les valeurs du module dynamique E calculées grâce à la relation (3-5), ont donc été corrélés à la résistance en compression à 28 jours.

Le tableau 3-14 donne les résistances en compression mesurées lors de l'écrasement des éprouvettes, ainsi que les modules dynamiques calculés.

Tableau 3-14 : Caractéristiques du béton

composition	BSF 5-1-1	BSF 5-4-1	BSF 5-4-2	BSF 5-4-3	BSF 5-1-3
vitesse du son (m/s)	2830	3670	3640	3820	4220
ρ (t/m ³)	2.171	2.147	2.171	2.219	2.243
module E (bars)	156487.46	260262.16	258886.52	291427.73	359501.77
Rc (bars)	153.06	169.90	179.25	186.48	206.29

La régression $y = ax^b$ appliquée à ces résultats donne :

$$a = 2.35$$

$$b = 0.348$$

avec un coefficient de corrélation $r = 0.938$

Dorénavant une estimation de la résistance peut être faite, grâce à la relation de corrélation suivante :

$$R_c = 2.35 E^{0.348} \quad (3-7)$$

3-4-3-3-Analyse des courbes contrainte-déformation :

Pour un matériau idéal, isotrope, homogène et élastique, la détermination de deux constantes suffit à en décrire le comportement :

- le module d'élasticité longitudinal E_L ;
- et le coefficient de Poisson ν

a-Mode opératoire :

Pour tracer la courbe (σ - ϵ), on dispose de deux méthodes , l'une à taux de chargement contrôlé, l'autre à taux de déformation contrôlé.

La particularité de la deuxième méthode, est qu'elle permet de suivre l'évolution de la déformation même après avoir atteint la résistance ultime. La courbe (σ - ϵ) peut être entièrement obtenue, y compris la branche descendante.

Pour le béton de sable de dunes, on a d'abord utilisé l'essai à chargement contrôlé, en remarquant que ce matériau présentait une rupture du type fragile, et pour avoir une meilleure appréciation, des essais à déformation contrôlée ont été effectués.

Les éprouvettes utilisées dans l'essai à taux de chargement contrôlé étaient cylindriques avec un diamètre de 6 cm et un élanement égal à 2.

Pour l'essai à taux de déformation contrôlée et l'essai de fluage (§ 3-4-3-4), des éprouvettes identiques ont été réalisées.

Des irrégularités de mises en oeuvres ont nécessité un carottage à 5 cm de diamètre, l'élanement étant maintenu à 2.

Les échantillons, ainsi préparés, sont retirés de l'eau à 28 jours d'âge et intercalés entre deux répartiteurs de contraintes métalliques à surface lisse.

L'essai de compression à chargement contrôlé, est réalisé dans une presse hydraulique permettant un chargement manuel par palier de 5 KN. Pour cet essai les déformations sont mesurées à l'aide de jauges collées selon les deux directions principales.

Dans le cas de l'essai à taux de déformation contrôlé, un capteur de déformation transmettant un signal électrique à une console permet le contrôle de la déformation.

Dans les deux types d'essai, trois éprouvettes pour chacune des trois compositions retenues ont été testées.

Le choix des compositions s'est fait sur la base de deux facteurs :

- des résistances en compression à 28 jours dépassant 200 bars;
- prendre une composition de base, une avec ajout de

filler, une autre avec ajout d'adjuvant.

Le choix a aboutit alors aux compositions: BS 3-4, BSF 4-4-1 et BSF 3-4-3 SF.

Cependant lors des essais, la résistance moyenne recherchée de 200 bars, n'a pu être obtenu. Cela est certainement dû:

- au fait que les valeurs dépassant 200 bars ont été obtenus sur des éprouvettes cubiques, alors que pour cette série d'essais les éprouvettes sont cylindriques;

- ces essais étant réalisés en dernier, le ciment a certainement dû perdre certaines de ses caractéristiques, sous l'effet de la longue conservation.

b-Résultats et interprétation :

Module de Young :

La connaissance du module élastique tangent étant nécessaire. Ses valeurs ont été calculées grâce aux pentes de la partie élastique initiale.

Les essais à déformations contrôlées, présentent, malheureusement, une augmentation rapide de la déformation sous un faible accroissement de contrainte, en début de chargement.

En fait ce phénomène trouve son origine dans la mise en contact de la presse avec l'échantillon. Pour une interprétation plus rigoureuse du module d'élasticité, une translation du repère de la courbe ($\sigma-\epsilon$) vers la déformation ϵ_0 , qui constitue la fin de cette phase de mise en contact : presse-échantillon, a été effectuée.

En traçant les courbes contrainte-déformation, obtenues lors de l'essai à taux de chargement contrôlé (fig 3-21, 3-22, 3-23) on remarque que :

- le comportement du matériau est quasi linéaire ou bilinéaire jusqu'à des taux de déformation de l'ordre de 0.4%;

- dès que cet ordre de déformation est atteint, la rupture survient brusquement, par effondrement de l'éprouvette sur l'un de ses plans de fracture.

Ceci met en évidence le caractère fragile du matériau.

L'analyse visuelle des ruptures fait penser à une rupture par décohesion. Phénomène des ruptures de certaines roches.

La "décohesion est une perte totale des liaisons moléculaires du solide par écartement local excessif des distances moléculaires". Ce phénomène peut être induit par "l'action d'efforts de traction tels que ceux qui peuvent résulter de pressions interstitielles internes non équilibrées par des compressions extérieures. Dans ce cas, les surfaces de décohesion sont perpendiculaires à la direction des efforts de traction" [38].

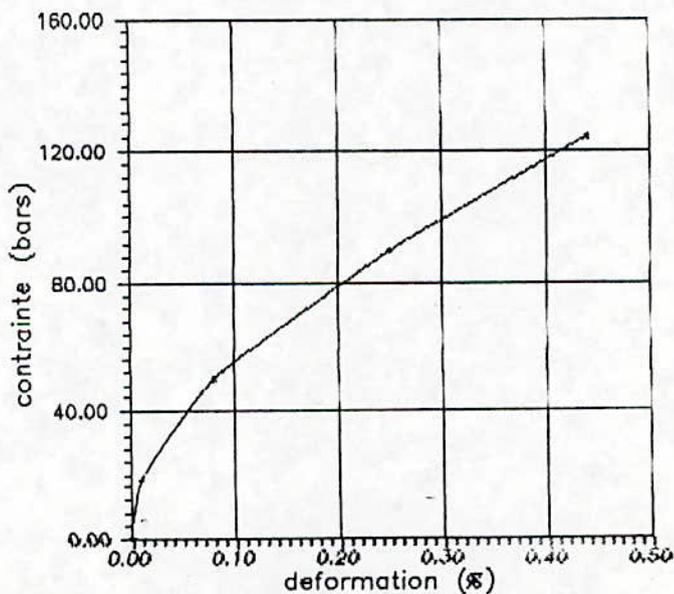


fig 3-21 Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSF 4-4-1)

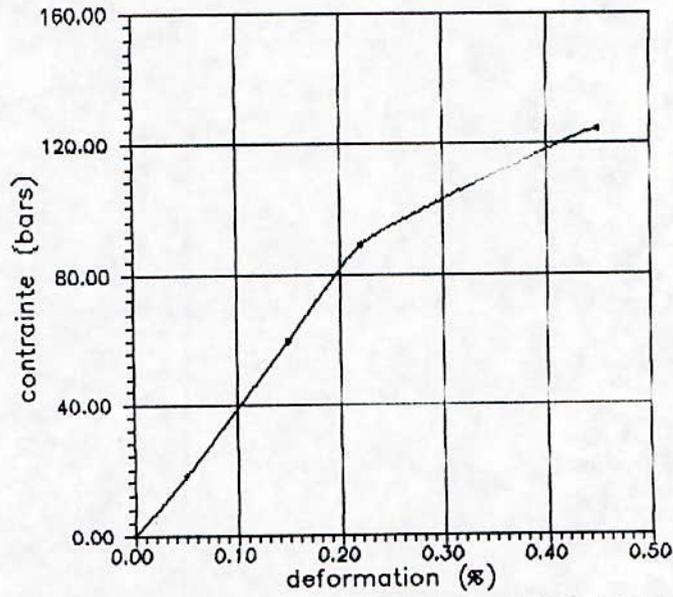


fig 3-22 Courbe contrainte-déformation longitudinale (BSF 3-4-3 SF)

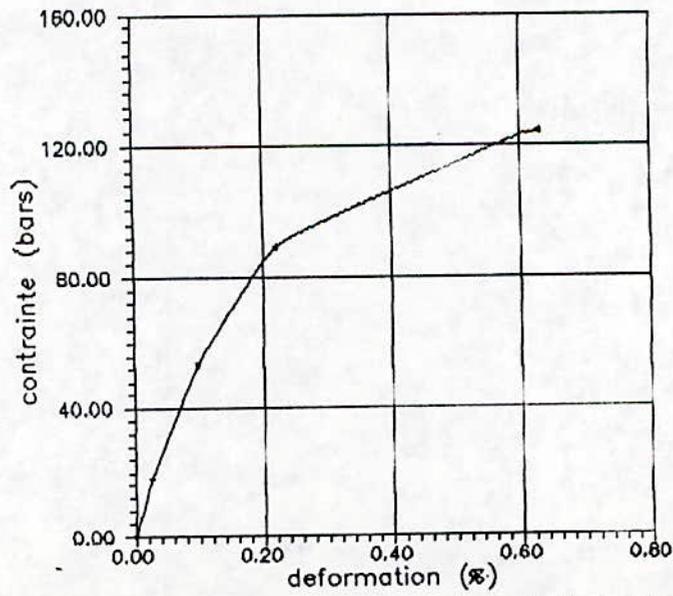
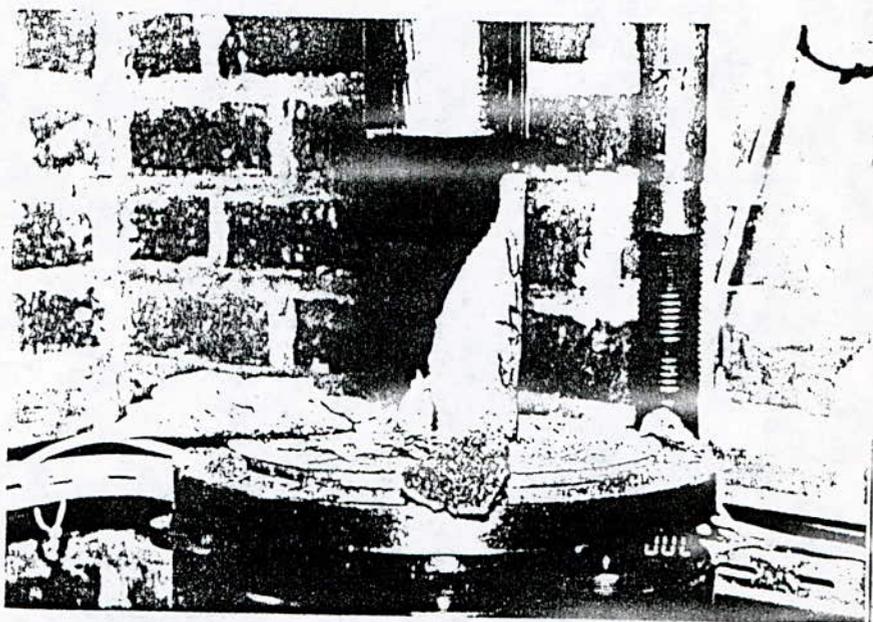


fig 3-23 Courbe contrainte-déformation longitudinale (BS 3-4)

La rupture brutale, ainsi que l'angle de rupture sont visibles sur les photos 3-1 et 3-2.



L'essai à taux de déformation contrôlé a affirmé la fragilité de la rupture.

Dans un béton classique, le diagramme de compression est sensiblement rectiligne au début, puis il s'infléchit et passe par un maximum correspondant à la contrainte de rupture. Lorsqu'on atteint cette contrainte, l'éprouvette continue à se raccourcir, sans augmentation de la force exercée par la presse, jusqu'à la rupture.

Dans le cas du béton de sable, la branche descendante de la courbe (σ - ε) est inexistante (voir fig 3-24, 3-25, 3-26). Dès qu'on atteint la résistance ultime la rupture a lieu sans augmentation notable de déformation.

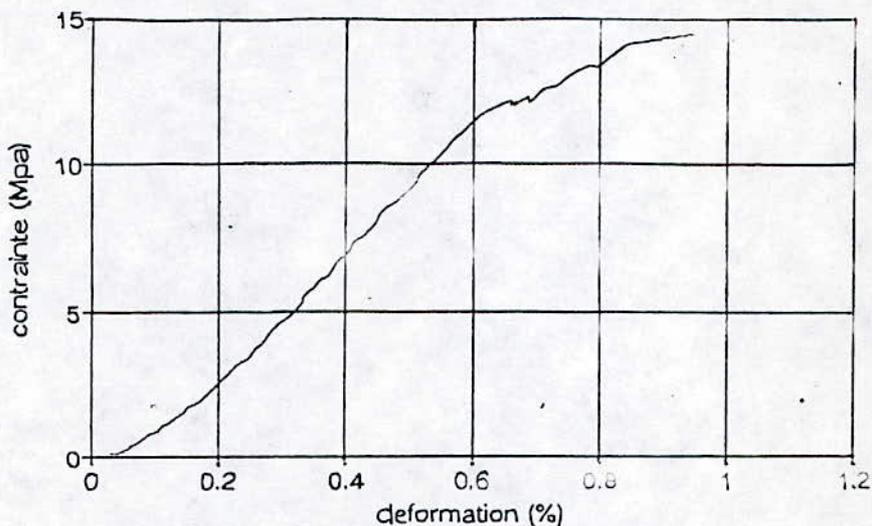


fig 3-24 Courbe contrainte-déformation longitudinale(BSF 4-4-1)

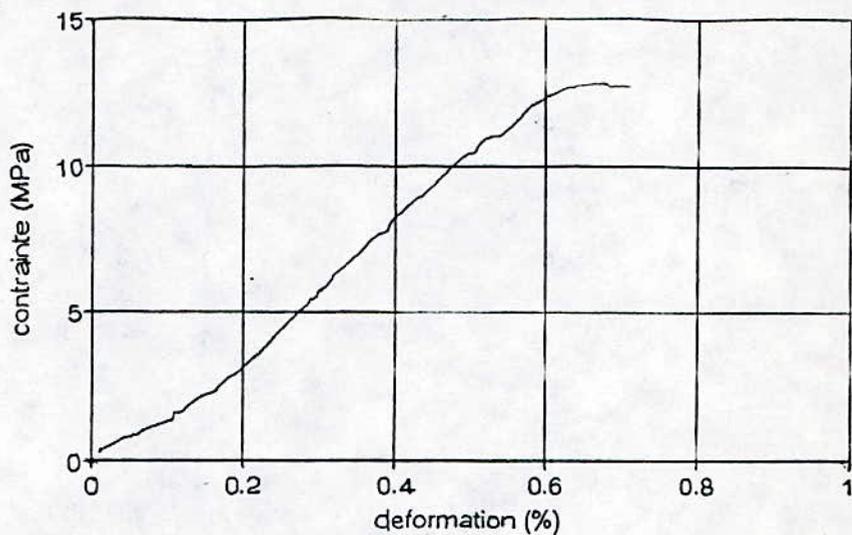


fig 3-25 Courbe contrainte-déformation longitudinale (BS 3-4)

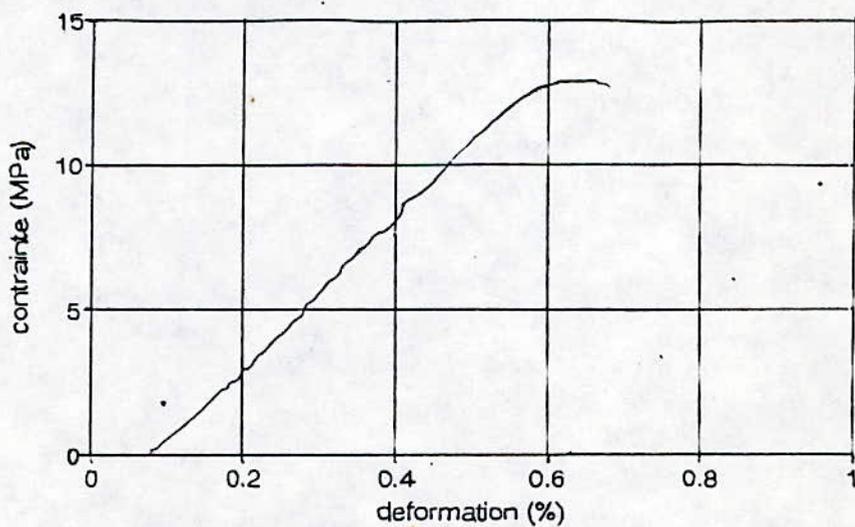


fig 3-26 Courbe contrainte-Déformation longitudinale (BSF 3-4-3 SF)

La lecture des déformations et contraintes étant plus précise lors de l'essai à taux de déformation (faite directement sur ordinateur), les modules de Young tangent sont alors calculés et comparés à ceux obtenus par la première méthode d'essais (tableau 3-15).

Tableau 3-15 : Valeurs du module d'élasticité tangent

composition mode d'essai	module de Young en MPa		
	BS 3-4	BSF 4-4-1	BSF 3-4-3SF
1 ^{er} mode d'essai	3869.57	3560.00	4045.45
2 ^{ème} mode d'essai	2166.67	2100.00	2181.18

Sur la base de ces valeurs, on peut dire :

- qu'une différence existe entre les valeurs du module d'élasticité, due certainement à la précision de la deuxième méthode d'essai par rapport à la première;

- que le module d'élasticité du béton de sable de dunes semble faible par rapport à celui d'un béton ordinaire (compris entre 25000 et 45000 MPa). Sachant que le module d'élasticité varie selon l'âge du béton, les dosages, et les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles des agrégats, ces faibles valeurs semblent par conséquent normales.

La plus faible déformation atteinte avant la rupture est de 0.44% et la plus importante de 1%.

Dans les calculs aux états limites une valeur de 0.35% est prise en compte. Cette valeur peut être aussi adoptée dans le cas du béton de sable de dunes car les déformations atteintes avant la rupture dépassent 0.4% .

La variation du module de Young tangent, tout au long de la compression a été étudié. Ce module est calculé en chaque point de la courbe contrainte-déformation.

Une forte oscillation de ce module autour de sa valeur moyenne est mise en évidence par les figures 3-27, 3-28 et 3-29.

Des variations alternatives du module au cours du chargement sont observées.

Cette alternance peut être expliquée par le phénomène de décohesion. Après l'apparition de chaque rupture locale, tant que la cohésion d'ensemble est conservée, la charge est retransmise au squelette sableux. La rupture correspondrait à une diminution du module, et le comportement "sableux" à une augmentation du module.

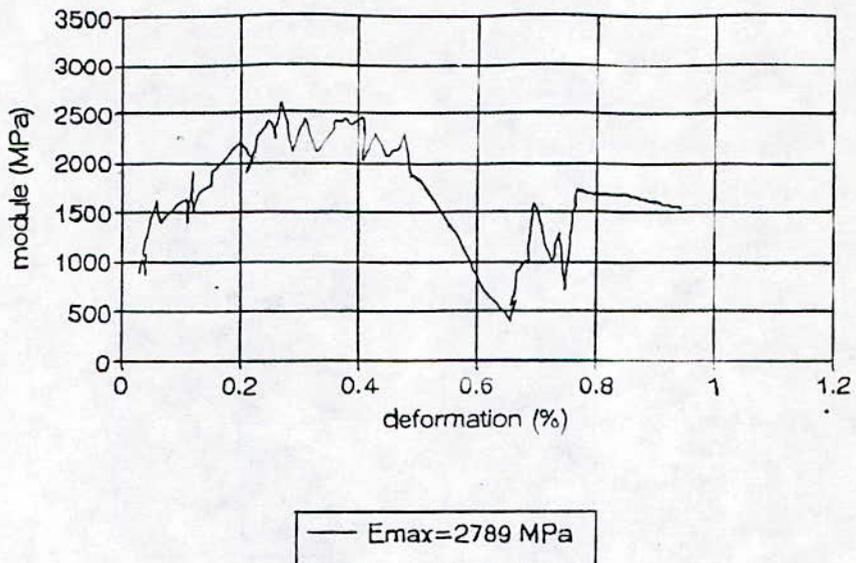
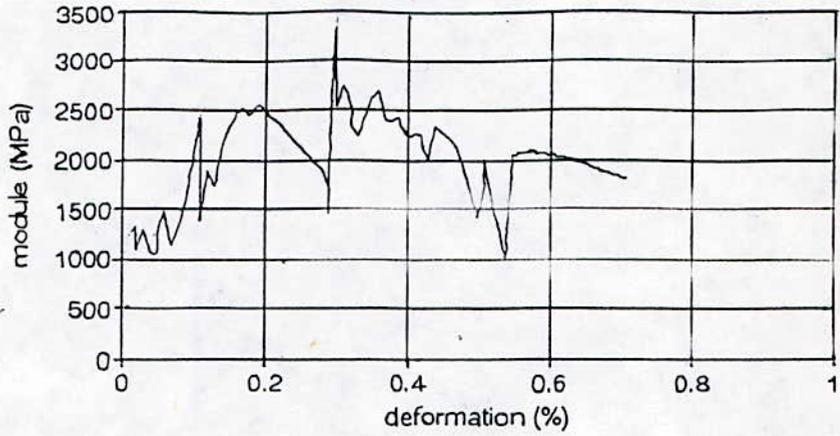
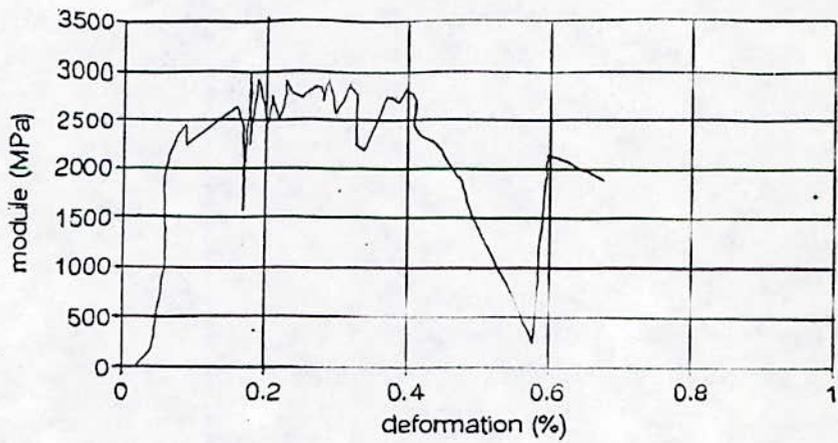


fig 3-27 Variation du module d'élasticité tangent (BSF 4-4-1)



— $E_{max}=3474$ MPa

fig 3-28 Variation du module d'élasticité tangent (BS 3-4)



— $E_{max}=3033$ MPa

fig 3-29 Variation du module d'élasticité tangent (BSF 3-4-3 SF)

Coefficient de Poisson :

Les courbes (σ - ε) des figures 3-30, 3-31 et 3-32, ont été tracées afin de permettre la détermination de ν .

Les valeurs suivantes du coefficient de poisson ont été obtenues pour les trois compositions :

BS 3-4 : $\nu = 0.11$

BSF 4-4-1 : $\nu = 0.17$

BSF 3-4-3SF : $\nu = 0.20$

Apparemment, le béton de sable de dunes, présente des coefficients de Poisson faibles en comparaison à ceux du béton classique.

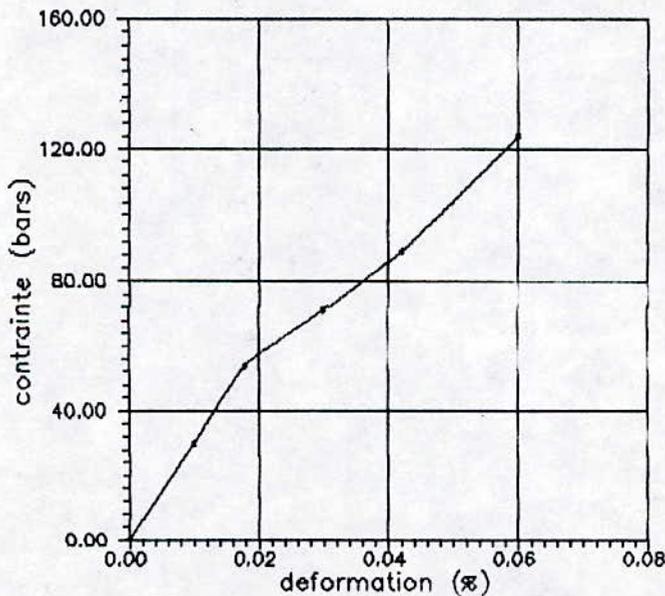


fig 3-30 Courbe contrainte-déformation transversale (BSF 4-4-1)

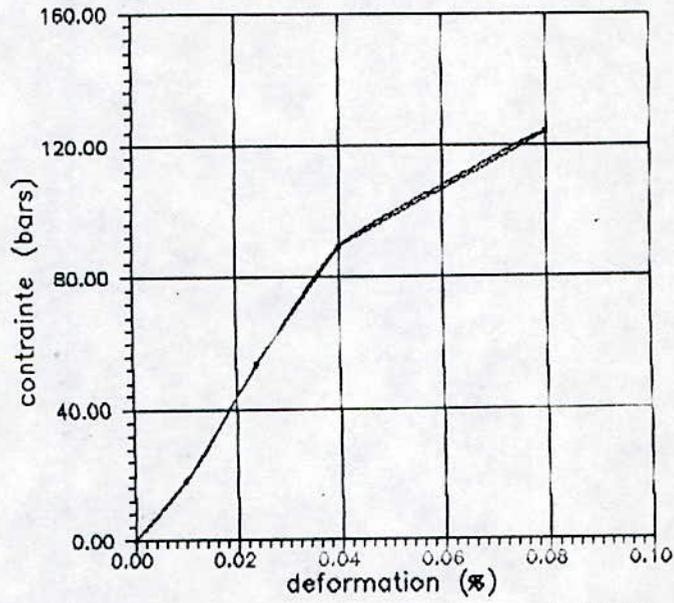


fig 3-31 Courbe contrainte-deformation transversale (BSF 3-4-3 SF)

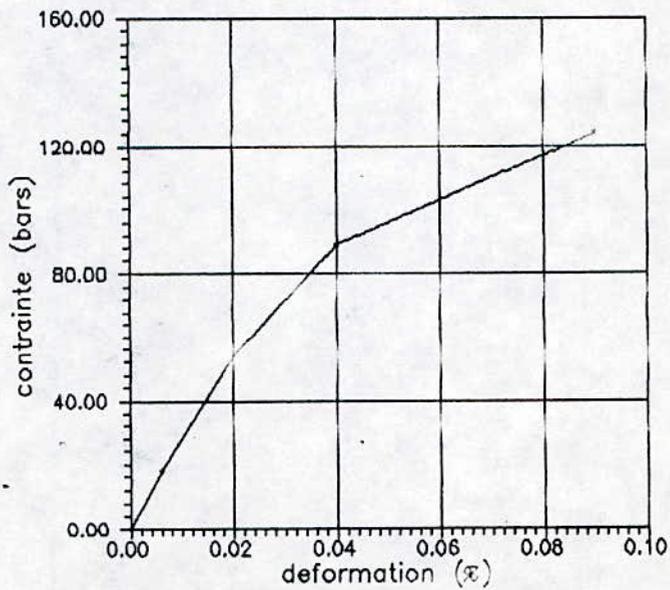


fig 3-32 Courbe contrainte-deformation transversale (BS 3-4)

3-4-3-4-Analyse du phénomène de fluage :

a-Mode opératoire :

Cette série d'essais a pour but, l'analyse de l'aspect du comportement temporel du béton de sable de dunes.

La mesure essentielle étant la déformation due au fluage d'un matériau soumis à une charge donnée. Il est nécessaire de disposer d'une presse capable d'assurer le maintien de cette charge constante dans le temps.

Les essais ont été réalisés sur la même presse que l'essai de compression à taux de déformation constant. Celle-ci possède un système d'asservissement électrohydraulique de la position de la déformation ou de la force. Un ordre d'entrée est comparé continuellement à un signal de retour; le signal d'écart qui en résulte règle l'action d'un organe de puissance de façon à ce que le signal de retour soit identique à celui de l'ordre d'entrée. Les mesures sont relevées et traitées directement par un ordinateur.

Cette presse, selon le besoin permet de réaliser des essais de compression à taux de chargement contrôlé, des essais de compression à taux de déformation contrôlé, ou des essais de fluage à incréments de charge.

On procède à la mesure du fluage par incréments de charge jusqu'à la rupture. Cette méthode permet d'explorer, sur un même échantillon, l'évolution du comportement en fonction du niveau de contrainte appliquée, ce qui réduit fortement le volume d'essais nécessaire pour l'interprétation.

Le nombre minimum de paliers est fixé à 3 ou 4. Le début de chaque nouvel incrément correspond à la stabilisation du taux de déformation (fluage secondaire); mais pratiquement, cette limite est difficile à apprécier. La vitesse de mise en charge est en général de l'ordre de 2 à 3 KN/min, afin de permettre quelques mesures intermédiaires.

Les essais ont été effectués à l'Université Catholique de

Louvain La Neuve (Belgique), d'ou le nombre limité d'éprouvettes testées (deux par composition).

b-Résultats et interprétations :

Une phase d'initiation au matériel utilisé lors de l'essai de fluage a été à l'origine de la perte d'un certain nombre d'éprouvettes. Ces éprouvettes se sont rompues avant d'atteindre le troisième palier de chargement (exemple donné par la figure 3-33).

Par ailleurs pour la composition BS 3-4, une fois le palier atteint, la contrainte ne s'est pas stabilisée, mais a présenté de faibles variations (visibles sur la figure 3-34)

Les figures 3-34 et 3-35, donnent la courbe obtenue lors de l'essai de fluage, ainsi que la courbe ajustée obtenue après utilisation du programme d'ajustement numérique de l'Ecole des Mines de Paris.

La loi de Lemaître a été choisie lors de l'interprétation de l'essai de fluage, car le calcul par les moindres carrés, utilisé dans cette méthode, permet d'avoir des résultats plus précis. En outre c'est la seule méthode qui possède un paramètre qui donne la valeur du module d'élasticité.

Les différents paramètres obtenues figurent au tableau 3-15.

Tableau 3-16 : Paramètres de la loi de Lemaître

Loi de Lemaître					
$\epsilon = Q_3 + Q_2 \sigma + Q_1 \sigma^{P_2} \cdot t^{P_1}$					
composition	P1	P2	1	Q2	Q3
BS 3-4	0.2800	0.620	0.745	0.2571	0.1578
BSF 3-4-3SF	0.7029	7.000	0.011	0.3702	0.1316

La particularité de l'essai de fluage à incrément de charge est la durée très limitée d'exécution. Pour le béton de sable de dunes l'essai le plus long a duré près de sept heures.

Les paramètres P1, P2, Q1, Q2, sont obtenues grâce au programme d'ajustement (voir §2-7-3), et permettent de calculer le module de Young.

Les formulations donnant la déformation occasionnée par le chargement, en fonction du temps et de la contrainte, sont les suivantes :

- pour la composition BS 3-4 :

$$\varepsilon = 0.1578 + 0.2571\sigma + 0.0745\sigma^{0.67} t^{0.28}$$

- pour la composition BSF 3-4-3 SF :

$$\varepsilon = 0.1316 + 0.3702\sigma + 0.0011\sigma^7 t^{0.7029}$$

Les modules d'élasticité quant à eux , sont donnés par :

- pour BS 3-4 : E = 2701.24 MPa
- pour BSF 3-4-3 SF E = 3889.54 MPa

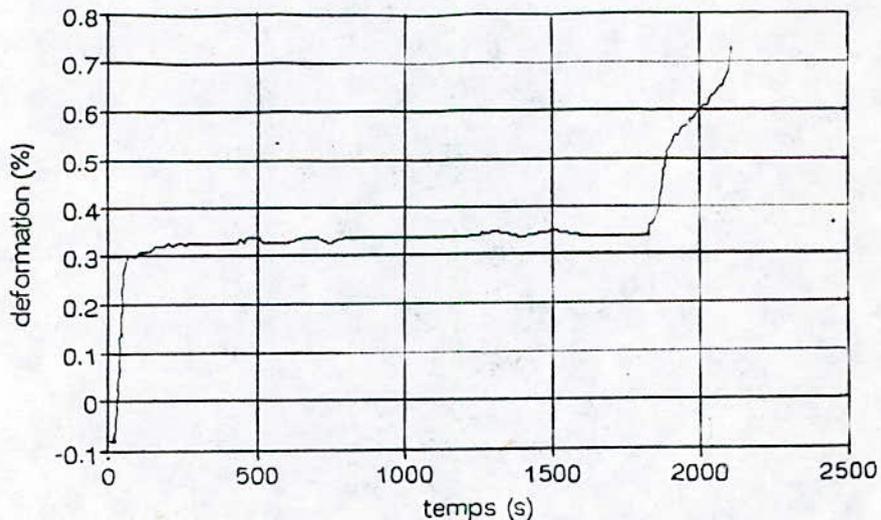


fig 3-33 Courbe de fluage (BS 3-4)

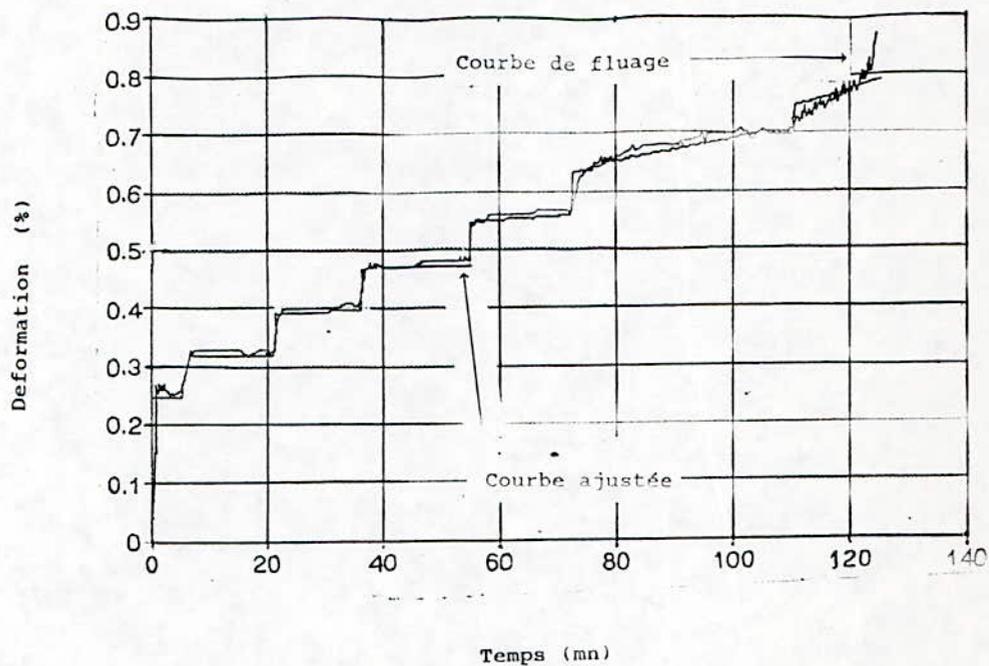


fig 3-34 Relation entre courbe de fluage et la loi de Lemaitre (BSF 3-4-3 SF)

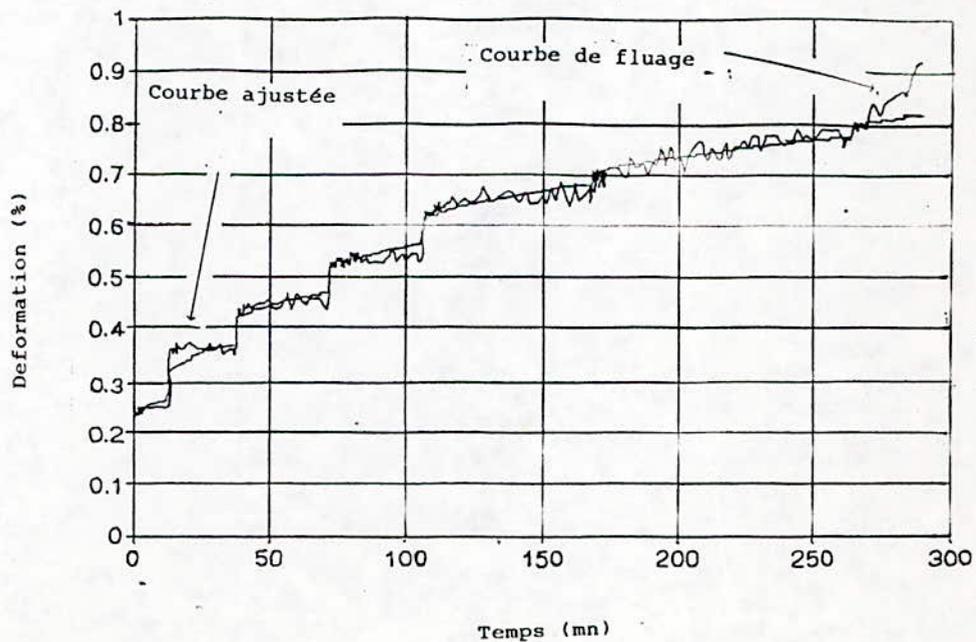


fig 3-35 Relation entre courbe de fluage et la loi de Lemaitre (BS 3-4)

L'essai de fluage ainsi effectué, permet de tirer les conclusions suivantes :

- le comportement en fluage du béton de sable de dunes dépend de l'état de contrainte mis en oeuvre. Une augmentation de la déformation, est surtout observable pour des valeurs de contraintes proches des valeurs limites de résistance. Pour de faibles valeurs de la contrainte la déformation s'arrete au bout de quelques secondes;

- les déformations atteintes lors de l'essai de fluage sont presque les mêmes que celles obtenues lors de l'essai de compression. Les valeurs de ces déformations ne dépassent pas 1%, valeur qui dépasse de peu celles données par la compression;

-l'essai de fluage à incréments de charge n'est quasiment pas significatifs pour les bétons de sable de dunes, car pour la même composition, on semble aboutir à des lois différentes d'une éprouvette à l'autre. L'impossibilité de transporter un nombre important d'éprouvettes au laboratoire d'essai, n'a pas permis de vérifier statiquement cette propriété;

-les résultats ont montré que les modules de young sont faibles, et sont du même ordre que ceux obtenues lors de l'essai de compression.

CHAPITRE QUATRIEME :

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CHAPITRE QUATRIEME

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le but visé par cette étude, est le remplacement du béton classique, utilisé dans les éléments structurels, par un béton confectionné à base de sable de dunes sans graviers.

Lors de ce travail, un certain nombre de problèmes, tel que le manque de matériels, n'a pas permis une expérimentation plus précise. Cependant le problème posé par le manque d'une bibliographie assez large est également un handicap à la bonne marche du travail entrepris.

Par ailleurs, le béton de sable, ne présente d'intérêt réel du point de vue mécanique que lorsque le sable utilisé appartient à une certaine classe granulométrique. Que cette classe granulométrique soit atteinte naturellement ou par composition artificielle.

Or, pour le sud Algérien, on se trouve dans le cas le plus difficile, où le sable est fin, à grains quasi uniformes, ayant une faible masse volumique apparente, et exigeant ainsi une forte teneur en eau de gâchage.

Néanmoins, il a été mis en évidence dans ce travail, la possibilité de remplacer le béton classique par un béton de sable de dunes.

L'étude de ce matériau, a permis de tirer les conclusions et recommandations suivantes.

1)- La résistance du béton de sable de dunes, comme pour les bétons classiques, augmente avec la diminution du rapport E/C. Le rapport donnant un béton optimal, au vu des essais de maniabilité, est de 0.6. Cependant l'apport éventuel de superplastifiants permettra de réduire ce rapport jusqu'à une valeur de 0.4, et donc aboutir à des bétons plus résistants et

plus durables.

2)- Le filler calcaire semble jouer un rôle dans l'augmentation des résistances, non pas en permettant d'obtenir une meilleure compacité, mais plutôt en réduisant le rapport E/C en conservant une maniabilité acceptable.

Le filler calcaire risque de donner un effet inverse, si le dosage en correcteur est faible. D'après cette étude un dosage de 300 Kg de filler par mètre cube de béton conviendrait.

Le critère de compacité permet de donner une augmentation de la résistance de seulement 10% .

3)- Les conditions climatiques des régions du sud s'apparentent le plus souvent à des conditions de zone aride à fortes températures maximales, à fortes variations thermiques journalières, et à faible degré hygrométrique de l'air. Le risque de voir apparaître d'importants retraits en est donc accru.

Les essais ont montré que sous des degrés hygrométriques élevés, le béton de sable de dunes présente de forts retraits hydrauliques. Cependant ce retrait n'est pas seulement dû à la finesse du sable, mais à la finesse de mouture du ciment. Des précautions importantes doivent donc être envisagées vis à vis du retrait lors des réalisations.

Par ailleurs, le filler calcaire, semble ne pas convenir à cause de sa composition minéralogique, qui augmente de façon appréciable les valeurs du retrait quand il s'agit d'un même rapport E/C.

La température, semble ne pas avoir une grande influence sur le retrait, mais présente par contre, un risque non négligeable vis à vis de la résistance.

Des essais sur site (dans le sud) devraient être effectués, et donneraient une meilleure idée du retrait.

On recommande donc, d'utiliser un ciment présentant une finesse moindre (de l'ordre de 2500 cm^2/g Blaine), et pauvre en CaA.

Le gonflement, selon notre étude, étant faible dans le cas du béton de sable de dunes; aucune recommandation spéciale

relative à ce phénomène ne semble donc nécessaire.

Les ajouts de fumée de silice, présentés classiquement, comme un atout du point de vue de la résistance, semblent également pouvoir intervenir sur les valeurs de retraits. Cependant le manque de moyens n'a pas permis de réaliser des investigations plus profondes dans cette voie.

4)- Les modules d'élasticité mesurés sont plus faibles que ceux des bétons ordinaires, il en est de même des déformations limites.

Cependant, le matériau béton de sable présente une fragilité encore plus grande que celle des bétons ordinaires, et la phase post-élastique est quasi inexistante. La phase élastique semble donner de faibles déformations.

Il faut donc, prendre en compte ce facteur dans les calculs par l'introduction de coefficients de sécurité.

Le comportement global du béton ferrailé peut éventuellement présenter une ductilité intéressante, surtout que la granulométrie du béton permet d'homogénéiser la structure par un ferrailage sous forme de petites mailles.

Néanmoins des prescriptions importantes, au vu des résultats du module de déformation, devront être introduites relativement au taux de déformation, qui risque d'être plus préjudiciable, vis à vis du comportement de ce matériau, (surtout pour les revêtements de structure), que les critères de rupture classiques.

5)- Le béton de sable est un matériau qui flue peu .

Les déformations atteintes lors d'un essai de fluage à incréments de charges sont du même ordre que celles obtenues en compression.

La nécessité, donc, de renforcer le béton de sable par des fibres végétales ou synthétiques, lorsqu'il est sollicité par des efforts importants est à prendre en considération (surtout pour les éléments précontraints).

Par ailleurs, au vu des résultats des essais de fluages, un complément d'investigation sur des modèles à l'échelle 1, permettra de fournir rapidement des informations plus précises

sur le comportement des structures en béton de sable armé.

Cependant, les éléments les plus importants de cette étude, outre les perspectives économiques qu'ouvrent ce matériau à l'Algérie, sont les axes de recherches qui permettront de mieux appréhender son comportement.

Les principaux axes de recherche sont :

1)- L'étude de l'influence du laitier, soit en tant que rajout filler, ou en tant que matériau entrant dans la fabrication du liant.

2)- L'utilisation de fibres végétales, synthétiques ou métalliques dans les compositions du béton à titre d'éléments de confinement.

3)- L'introduction de cendres volantes, ou de fumées de silice dans la composition, afin d'en étudier l'influence sur le retrait, qui reste encore malgré les éléments de cette étude un facteur difficile à gérer sous les conditions climatiques du sud Algérien.

4)- Etudier le phénomène fluage par les méthodes classiques, et voir la possibilité d'utiliser la précontrainte.

5)- Etudier, sur des pièces de structures complètes à l'échelle réelle, le comportement du béton de sable armé.

Ce travail, apporte une contribution dans la connaissance du béton de sable de dunes, même si à l'origine le but de ces travaux est de nous initier à la recherche scientifique, il n'en a néanmoins permis d'ouvrir une porte sur la possibilité de remplacer le béton classique par le béton de sable.

Les axes de recherche définies ci-dessus, ainsi que d'autres, permettront peut être dans un avenir proche aux habitants du sud d'utiliser un matériau local.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [11] "Synthèse des connaissances sur les bétons de sable"
Rapport du C.E.B.T.P et L.R.P.C (1986).
- [12] MARIOTTI.M "Les bétons de sable hypercompactés" Rapport
terminal du C.E.B.T.P
- [13] TYLER.R.G "Sandcrete blocks" West African Building
Research Institute, Note n°4 (1961).
- [14] THOMAS.K "Influence of the curing conditions and mix
proportions on the compressive strengths of Sandcrete
blocks" Mat.Struct 00 (1964) p 149-155.
- [15] YILLA.I.S "The effect of mix proportion and curing
condition on shrinkage of Sandcrete blocks" Mat.Struct
00 (1967) p 87-90.
- [16] UZOMAKA.O.J "Some factors wich affect the crushing
strength of Sandcrete blocks" Mat.Struct 10 (1977)
p 45-48 .
- [17] STAMATOPOULOS.A.C, KOTZIAS.P.C "Concrete without coarse
aggregate" ACI journal (sept 1971) p 704-711 .
- [18] PILNY.F, ESCHKE.K.R "Sandreicher beton" Beton and
stahlbetonbau -Berlin n°12- (1971) p 298-302 .
- [19] CHERKINSKIJ.YU.S, SLIPCHENKO.G.F "Béton de sable au
résine ciment, avec propriétés améliorées" Beton I
zhelezobeton S.S.S.R (1975) n°5 p 13-14 .

- [10] VIRGIN. YU. A, PREOBRAZHENSKIJ. N. S "Activation turbulente des liants d'un béton de sable-ciment" Beton I Zhelezobeton S.S.S.R (1973) n°5 p 19 .
- [11] EHPSHTEJN. L. P, USHAKOVA. I. N "Chaine de production de bordures en béton de sable" Beton I Zhelezobeton S.S.S.R (1973) n°6 p 28-30 .
- [12] TAMARIN. A. A "Controle de la résistance du béton de sable par une méthode de pénétration" Beton I Zhelezobeton S.S.S.R (1974) n°2 p 30-31 .
- [13] L'VOVICH. K. I, SHAKHNOVICH. R. V, MIKHAJLOV. N. V "Pieux en béton de sable" Beton I Zhelezobeton S.S.S.R (1974) n°12 p 27-29 .
- [14] MIKHAILOV. N. V, LVOVITCH. K. I, GASTROUBINESTKI. K. L "Influence de la composition et de la technologie de préparation du béton de sable sur ces caractéristiques" Beton I Zhelezobeton (1970) n°10 .
- [15] TRIFONOV. I. A, KRASNOV. YU. Y, PARFENOV. S. G, ZAKHAROV. V. F "Résistance des piliers en béton de sable avec armature longitudinale traitée thermiquement" Beton I Zhelezobeton (1980) n°6 p 7-9 .
- [16] BRAUDE. F. G, OSMAKOV. S. A, GOLUBENKOV. V. A "Vibro montage de produits en béton de sable" Beton I Zhelezobeton (1982) n°3 p 30-31 .
- [17] GUINEZ. R, GLUAIS. G, DELUDE. P "Les bétons de sable" Rapport diffusé par le ministère de l'urbanisme et du logement, Laboratoires Régionaux de Blois et de Bordeaux (1984) .

- [18] CHELGOUM.F, LOUATI.M "Béton de sable-sable de dunes"
mémoire de fin d'études E.N.P Juin 85 .
- [19] CHIKHI.H, OUCHERIF.N "Etude du béton de sable" mémoire
de fin d'études E.N.P Janvier 86 .
- [20] GUESSOUM.A, CHAID.A "Etude du béton de sable" mémoire
de fin d'études E.N.P Janvier 87 .
- [21] CHAMBERLAND.J.M, GAASCH.F "Etude du fluage de la roche"
Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du
diplôme d'Ingénieurs Civil des constructions, Université
Catholique de Louvain, Unité de Génie Civil (1988) .
- [22] RABOTNOV "Creep problems in structural members" North
Holland Publishing Company, Amsterdam-London (1969) .
- [23] PENNY et MARIOTT "Design of creep" Mc Graw Hill
London.
- [24] LINZE.P "Analyse du fluage de la roche (approche
bibliographique et essais de laboratoire)" Travail de
fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieurs Civil des constructions, Université
Catholique de Louvain, Unité de Génie civil (1990) .
- [25] FINDLEY.W.N, LAI.J.S, ONARAN.K "Creep and relaxation of
non linear viscoelastic materials" North Holland
Publishing Company, Amsterdam-New york-Oxford (1976)
- [26] HULT.J.A.H "Creep in Engineering structures" Blaisdell
Publishing Company (1970) .
- [27] ANDR.J.P, LACOMBE.P " Déformation et rupture par
fluage" Editions Dunod- Paris (1970) .

- [28] MINDESS. S, YOUNG. J.F "Concrete" Prentice-Hall, Inc,
New Jersey, USA (1981) .
- [29] BERTRANDY. R "Influence des fillers calcaires sur la
maniabilité des bétons" Annales de l'I.T.B.T.P n°147
supplément au n°328 Mai 1975 .
- [30] DREUX. G, GORISSE. F "Guide pratique du béton" Editions
Eyrolles (1976).
- [31] LAFUMA. M. H "Retrait et fissuration des ciments,
mortiers et bétons" Annales de l'I.T.B.T.P n°108
Dec 1956 .
- [32] VENUAT. M "Compte rendu de recherches sur le retrait, le
gonflement et la fissurabilité des ciments, mortiers et
bétons" Revue des matériaux de constructions n°540
Sept 1960 .
- [33] VENUAT. M "Compte rendu de recherches sur le retrait, le
gonflement et la fissurabilité des ciments, mortiers et
bétons" Revue des matériaux de constructions n°541
Sept 1960 .
- [34] Colloque de Madrid "Influence de la dimension et de la
forme sur le retrait des pièces de béton" Annales de
l'I.T.B.T.P n°249 Sept 1968 .
- [35] L'HERMITE. R "Expériences et théories sur la technologie
du béton-Déformation du béton sans charge (retrait et
gonflement)" Annales de l'I.T.B.T.P n°375 Sept 1979
- [36] "Les essais sur béton par la méthode de l'auscultation
dynamique (Recommandation de la RILEM)" Annales de
l'I.T.B.T.P n°309-310 Sept-Oct 1973 .

- [37] NEVILLE. A. M "Properties of concrete" Pitman
Publishing Limited.
- [38] TALOBRE. J. A "La mécanique des roches" Editions Dunod
1967 .
- [39] GORISSE. F "Essais et contrôle des bétons" Editions
Eyrolles (1978).
- [40] STEOPOE. A "La durabilité du béton" Editions Eyrolles
(1970).