

Ministère de l'Éducation Nationale

École Nationale Polytechnique d'Alger

Département de GENIE CIVIL

THESE DE MAGISTER

Présentée par ; **BENMALEK Mohamed Larbi**
Ingénieur d'Etat ; Université de CONSTANTINE
D E A de Génie Civil ; ENSM de NANTES (France)

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

- T H E M E -

CONTRIBUTION A L'ETUDE DU BETON DE SABLE DUNAIRE POUR ELEMENTS DE STRUCTURES

Soutenue en Mai 1993,

Devant le Jury composé de :

Mrs. — A, CHARIF, Professeur (Université de Batna)	Président
A. BALI, Professeur (ENP)	Rapporteur
S. BELKACEMI, PHd (ENP)	Examineur
Mme R, KETTAB, Chargé des cours (ENP)	Examineur
R, BOUTEMEUR, Chargé des cours (ENP)	Examineur

République Algérienne Démocratique et Populaire

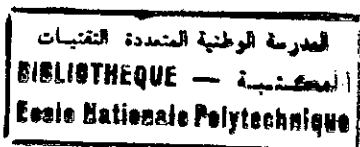
Ministère de l'Education Nationale

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

Departement de GENIE CIVIL

THESE DE MAGISTER

Présentée par ; **BENMALEK Mohamed Larbi**
Ingénieur d'Etat ; Université de CONSTANTINE
D E A de Génie Civil ; ENSM de NANTES (France)



- T H E M E -

CONTRIBUTION A L'ETUDE DU BETON DE SABLE DUNAIRE POUR ELEMENTS DE STRUCTURES

Soutenue en Mai 1993.

Devant le Jury composé de :

Mrs, — A. CHARIF, Professeur (Université de Batna)

Président

A. BALI, Professeur (ENP)

Rapporteur

S. BELKACEMI, PHd (ENP)

Examineur

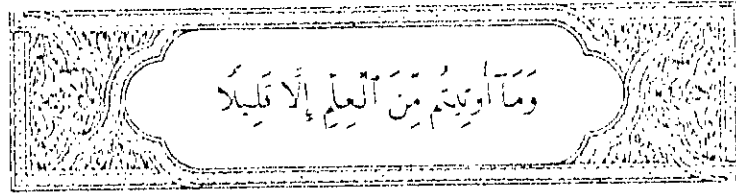
Mme R. KETTAB, Chargé des cours (ENP)

Examineur

R. BOUTEMEUR, Chargé des cours (ENP)

Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

A Mourad,
Lamia et
Nassira.

R E S U M E

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé bien antérieurement au béton traditionnel. Il est tombé en désuétude après l'avènement du béton à gros granulats qui donne des performances beaucoup plus importantes.

Il retrouve cependant de nos jours un intérêt certain, et ce pour diverses raisons: élévation du coût des matériaux traditionnels, raréfaction des gros granulats, tendance à l'utilisation des matériaux locaux aux fins de leur rentabilisation ...

Si quelques études concernant son utilisation dans les domaines peu sensibles à la sécurité tels les voiries, les éléments de remplissage, les revêtements, les pavés de dalles etc...ont pu voir le jour, en revanche très peu d'études concernant son utilisation dans des éléments porteurs ont pu être réalisées.

L'objet de ces travaux se veut être une contribution à l'étude du béton de sable pour éléments structurels. Les sables utilisés sont ceux des dunes, en abondance dans près de 80% du territoire Algérien.

La démarche adoptée est résumée comme suit:

Après avoir relaté l'historique de ce matériau et analysé la synthèse bibliographique, nous avons proposé une méthodologie de recherche d'une formulation du béton de sable structurel et mis au point une méthode expérimentale rapide pour la détermination de la maniabilité de ce matériau.

A partir de là, nous avons adopté une composition optimale parmi 42 compositions testées. Celle-ci possède une résistance mécanique appréciable et une maniabilité plastique répondant aux objectifs que nous nous sommes fixés préalablement.

Avec cette composition, nous avons essayé de déterminer les caractéristiques mécaniques de ce béton non conventionnel: adhérence avec les aciers, flèches et déformations maximales, charges ultimes...

Les résultats obtenus sont forts encourageants et gagneraient à être complétés par d'autres travaux notamment sur le fluage.

Mots clés: sable- béton- fillers- béton de sable- maniabilité-
consistance- formulation- composition- structure- essai-
comportement.

S U M M A R Y

Sand concrete is an old material which has been used before the traditionally usual concrete. It becomes obsolete just after the advent of concrete with coarse aggregates which gives better performance.

Nowadays, however, it regains a big interest for many reasons such as the high cost of traditional materials, the scarcity of coarse aggregates, the trend to make profit of using local materials...

Many studies has been achieved on its uses as non-structural elements material (highways, filling components, coatings, cobblestones etc...), whereas only few works have been conducted about its uses as structural elements.

The aim of this thesis is a contribution to the study of dune sand concrete for structural elements. Nearly 80% of Algerian land is covered by this type of sand.

After the historical review of this material and the analysis of the bibliographical synthesis, a research methodology has been suggested for the formulation of structural sand concrete. Furthermore, an experimental method for rapid determination of its workability has been established.

In order to find a mix which has the best resistance with a plastic workability, an optimal composition has been adopted among 42 compositions tested.

With this composition and in order to get more knowledge about this non-conventional concrete, some characteristics have been determined such as adhesion with steel, maximal yieldings and bendings, ultimate loads ...

In spite of these encouraging results, more work have to be done on its other properties such as creep.

keywords: sand- concrete- fillers- sand concrete- workability- consistency- formulation- composition- structure- test- behaviour.

ملخص

لقد استعملت الخرسانة الرملية كمادة للبناء قبل الخرسانة الاعتيادية ولكنها أهملت بعد بروز الخرسانة ذات الركام الخشن والتي تمنح نتائج أحسن. إلا أن الاهتمام بالخرسانة الرملية قد ظهر من جديد في الفترة الأخيرة نظرا لعدة أسباب منها ارتفاع تكلفة المواد التقليدية وندرة الركام الخشن والتوجه نحو استعمال المواد المحلية من أجل تقييدها ...

وحتى اذا ظهرت بعض الدراسات المتعلقة باستعمال الخرسانة الرملية في ميادين قليلة الحساسية للأمن مثل الطرق الثنائية وعناصر الملء والتغليف والممرات... الخ إلا أن القليل من البحث قد أجري على استعمال هذه المادة في العناصر الحاملة.

إن الهدف الرئيسي من عملنا هذا هو المساهمة في دراسة خرسانة الرمل بالنسبة للعناصر الهيكلية ، أما عن الرمل المستعمل فهو رمل الكثبان الذي يغطي حوالي 80 % من التراب الجزائري .

وبخصوص المنهجية المتبعة في هذا البحث فاننا بدأنا بالتعرض لتاريخ المادة وبعدها تحليل حوصلية البيلوغرافيا ، على أثر ذلك تم اقتراح منهج بحث من أجل التحديد السريع لقابلية التشغيل هذه المادة . ومن هنا تم اعتماد تركيبة مثلى من بين 42 تركيبة تم فحصها . هذه الأخيرة تملك مداومة ميكانيكية لا بأس بها وقابلية التشغيل بلاستيكية تستجيب تماما للأهداف التي قمنا بتحديد هامتها

وبايععمال هذه التركيبة حاولنا تحديد الخصائص الميكانيكية لهذه الخرسانة منها تماسكها مع الفولاذ ، والتشوهات القصوى وكذا الأعباء النهائية .

ومع أن النتائج المحصل عليها مشجعة إلا أنها لا تكتمل إلا بانجاز أبحاث إضافية تتعلق خصوصا بتأثير هذه الخرسانة تحت الاجهاد المتواصل .

العبارات الأساسية: الرمل - الخرسانة - الحبيبات المألثة - الخرسانة الرملية
قابلية التشغيل - تماسك - صياغة - تركيبة - هيكل - اختبار
أو فحص - سلبوك .

A V A N T - P R O P O S

Les travaux de recherche présentés dans ce document ont été effectués sous la direction de monsieur le professeur A. BALI. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Ma reconnaissance va également à messieurs A. ROUICHED, chef d'antenne du CTC de Laghouat, M. HADJ KADDOUR et A. LEDHEM, collègues enseignants au centre universitaire de Laghouat pour leurs concours précieux et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux.

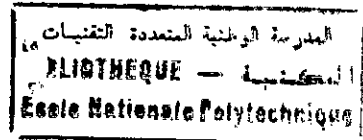
Je tiens à exprimer ici mon profond respect et ma reconnaissance à messieurs P. MORLIER, professeur à l'université de Bordeaux, J. J. CHAUVIN et A. BENAÏSSA, chercheurs au LRPC de Bordeaux pour m'avoir accueilli dans leurs laboratoires, aidé à rassembler divers documents se rapportant au béton de sable et pour les échanges très fructueux qu'on a pu avoir ensemble sur le sujet.

J'adresserai aussi mes plus vifs remerciements à mes amis et collègues Y. OUINTEN et A. MEDJEDEL pour leurs diverses contributions aussi bien techniques que morales.

Je remercie messieurs les membres du jury d'avoir bien voulu accepter de juger ce travail après avoir, pour certains d'entre eux, participé à son élaboration.

Ce travail doit beaucoup à la compétence des techniciens du laboratoire de GC de l'ENP, en l'occurrence messieurs RABAH et RACHID. Qu'ils soient assurés de mes sincères remerciements.

SOMMAIRE



Résumé.

Avant-propos.

PREMIERE PARTIE: PRESENTATION.

CHAPITRE 1: INTRODUCTION GENERALE	page 2
1.1 Généralités	page 2
1.2 Eléments de reflexion	page 4
CHAPITRE 2: DEFINITION DU BETON DE SABLE	page 7
2.1 Intoduction	page 7
2.2 Définitions	page 7
2.2.1 Béton traditionnel et mortier	page 7
2.2.2 Béton de sable	page 9
2.3 Synthèse	page 10
CHAPITRE 3: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	page 12
3.1 Historique	page 12
3.2 Synthèse des connaissances	page 14
3.2.1 Le béton de sable en CEI	page 15
3.2.1.1 Synthèse des études	page 15
3.2.1.2 Réalisations	page 16
3.2.2 Le béton de sable en France	page 17
3.2.3 Travaux circonstanciels sur les bétons de sable	page 20

DEUXIEME PARTIE: CARACTERISATION DES ELEMENTS DE COMPOSITION DU BETON DE SABLE STRUCTUREL.

CHAPITRE 4: CARACTERISATION DES SABLES DE DUNES	page 25
4.1 Caractéristiques physiques	page 25
4.1.1 Granulométrie	page 25
4.1.2 Densité	page 27
4.1.3 Compacité, porosité	page 27
4.1.4 Propreté	page 28
4.2 Analyses chimiques	page 29
4.2.1 Matières organiques	page 29
4.2.2 Sulfates et sulfures	page 30
4.2.3 Chlorures	page 31
4.3 Choix d'un sable dunaire	page 32
4.4 Etude comparative de sables dunaires de quelques régions du sud Algérien	page 33
CHAPITRE 5: CARACTERISATION DES AUTRES COMPOSANTS	page 36
5.1 Les fillers	page 36
5.2 Le ciment	page 41
5.3 L'eau	page 41

TROISIEME PARTIE: RECHERCHE D'UNE COMPOSITION OPTIMALE DU BETON DE SABLE STRUCTUREL.

CHAPITRE 6: ETUDE DE FORMULATIONS DU BETON DE SABLE	page 42
6.1 Introduction	page 42
6.2 Description de différentes approches	page 42

6.2.1	Approche de B.COURET, 1982	page 42
6.2.2	Approche de P.DELUDE, 1984	page 44
6.2.3	Approche de GUINEZ et al, 1984	page 45
6.2.4	Approche de J.J.CHAUVIN, 1987	page 47
6.3	Conclusions	page 48
CHAPITRE 7: METHODOLOGIE DE RECHERCHE DE LA		
	COMPOSITION OPTIMALE	page 49
7.1	Introduction	page 49
7.2	Description des deux variantes	page 51
7.2.1	Première variante	page 51
7.2.2	Deuxième variante	page 52
7.3	Conclusions	page 53
CHAPITRE 8: MISE AU POINT D'UNE METHODE EXPERIMENTALE		
	DE MESURE DE LA MANIABILITE DES BETONS DE	
	SABLE	page 54
8.1	Introduction	page 54
8.2	Description sommaire des principaux	
	moyens de la mesure de la maniabilité	
	des bétons	page 55
8.2.1	Le slump-test	page 55
8.2.2	Le flow-test	page 56
8.2.3	Le maniabilimètre LCPC	page 56
8.4	Conclusions	page 57
8.5	Détermination de la maniabilité du béton	
	de sable à l'aide de l'appareil de mesure	
	de la limite de liquidité	page 58
8.6	Principe du wattmètre différentiel	page 61
8.6.1	Description du montage	page 61
8.6.2	Malaxeur à mortier utilisé	page 61
8.7	Etalonnage du wattmètre différentiel	page 63
8.8	Résultats expérimentaux	page 64
8.9	Conclusions	page 66
CHAPITRE 9: CHOIX DE LA COMPOSITION OPTIMALE		
9.1	Introduction	page 67
9.2	Etude des compositions résultant de	
	la variante 1	page 68
9.2.1	Avec les fillers calcaires	page 68
9.2.1.1	Maniabilité	page 68
9.2.1.2	Résistance à la rupture	page 69
9.2.2	Avec les fillers siliceux	page 72
9.2.2.1	Maniabilité	page 72
9.2.2.2	Résistance à la rupture	page 72
9.3	Etude des compositions résultant de	
	la variante 2	page 74
9.4	Conclusions	page 79
9.4.1	Exploitation des résultats	page 79
9.4.2	Choix de la composition optimale	page 80

QUATRIEME PARTIE: COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE STRUCTUREL

CHAPITRE 10: CARACTERISTIQUES MECANQUES ET		
	PHYSIQUES DU BETON DE SABLE	page 83
10.1	Introduction	page 83
10.2	Déformations relatives sous charge	page 83
10.2.1	Loi de comportement σ - ϵ	page 83
10.2.1.1	Mode opératoire	page 84
10.2.1.2	Résultats expérimentaux	page 84

10.2.1.3 Conclusions	85
10.2.2 Module d'élasticité	86
10.3 Adhérence avec les aciers	87
10.3.1 Introduction	87
10.3.2 Détermination expérimentale de l'adhérence	88
10.3.3 Conclusions	90
CHAPITRE 11: ETUDES STRUCTURELLES EN BETON DE SABLE DUNAIRE	91
11.1. Introduction	91
11.2 Comportement en flexion simple	92
11.2.1 Etude expérimentale	92
11.2.1.1 Schéma de l'essai	92
11.2.1.2 Matériaux utilisés	92
11.2.1.3 Description de la poutre testée	93
11.2.1.4 Dispositif expérimental	95
11.2.2 Analyse des résultats	96
11.2.2.1 Charge et moment ultimes	96
11.2.2.2 Flèche maximale	97
11.2.2.3 Déformations	98
11.2.2.4 Morphologie des fissures	100
11.3 Comportement au cisaillement	100
11.4 Conclusions	103

CINQUIEME PARTIE: CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.

CHAPITRE 12 UNIQUE: CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	105
12.1 Conclusions générales	105
12.2 Perspectives	107

Références bibliographiques.
 Annexes.

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
École Nationale Polytechnique

PREMIERE PARTIE

P R E S E N T A T I O N

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE.

1.1 GENERALITES:

Depuis les années soixante dix, le problème de déficit en logements en Algérie n'a pas cessé de s'amplifier et de gagner toutes les régions du territoire. Il a atteint aujourd'hui un seuil critique, à la limite de l'intolérable. Ceci est non seulement le fait d'une forte demande liée à une démographie galopante et à la nucléarisation de la famille algérienne mais aussi celui du faible taux de croissance en matière de construction. Le coût des matériaux devenant onéreux, les moyens mis en place pour la réalisation des projets se sont avérés insuffisants.

Parallèlement, et en l'absence quasi-totale de recherches et de synthèses sur d'autres matériaux de construction pouvant le remplacer avantageusement (dans certaines situations et certaines régions), le béton tenait une place royale dans le rang des matériaux. Il a été utilisé à outrance (malgré son prix) et pratiquement dans tous les domaines de la construction.

De cette constatation est née l'idée de l'emploi des matériaux locaux. Pourquoi ne pas utiliser des matériaux qui se

substitueraient dans certains cas au béton classique, afin de minimiser les coûts de construction et du coup réaliser avec le même budget un nombre plus élevé de logements?

Le béton de terre stabilisé (BTS), constitué essentiellement de tuff et de quelques 5 à 10% de ciment a été choisi, étudié et expérimenté. Cela s'est concrétisé par l'organisation en 1986 d'un colloque international à Ouargla [1] où beaucoup de compétences de renommée mondiale ont pu être rassemblées et les différentes expériences échangées. Le résultat a été traduit par la publication par le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) d'un document technique [2] à la portée d'une main d'oeuvre courante expliquant la technologie de fabrication des blocs en BTS ainsi que leur mise en oeuvre.

Malgré tous les avantages liés à son emploi (économie, disponibilité, facilité de mise en oeuvre...), ce matériau n'a malheureusement pas eu le succès et l'engouement attendus. Ceci pour des raisons diverses, entre autres la confiance de l'utilisateur habitué au béton classique réputé robuste et ayant fait ses preuves.

Dans la même gamme, un autre matériau a commencé à retenir l'attention: le béton de sable. Il est constitué essentiellement de sable formant son squelette. Celui-ci disponible en quantité quasi-infinie en Algérie (probablement en milliards de m³) pourrait, sous réserve d'en étudier les possibilités, constituer un matériau de substitution pour les granulats du béton classique.

Il demeure entendu que les performances de ce nouveau béton ne peuvent égaler celles du béton classique mais pourraient s'avérer suffisantes pour la réalisation de constructions peu ou pas étagées répondant aux exigences urbanistiques des villes du sud du pays.

Le CNERIB, mettant à profit l'expérience du centre d'études techniques de l'équipement du sud-ouest (CETE, laboratoire

régional de Bordeaux, France), notamment dans le choix de la composition optimale de ce nouveau béton, a effectué des travaux tout à fait intéressants [3]. Ces travaux pourraient être la base pour de futures investigations en Algérie, pour peu que les résultats trouvés soient confirmés et complétés.

Compte tenu du lieu où nous nous trouvons (centre universitaire de Laghouat, situé à 400 km au sud d'Alger), et vu l'abondance du sable dunaire dans la région, nous nous proposons dans cette étude de contribuer à ces travaux en étudiant le béton de sable dunaire destiné aux éléments de structure.

Le mélange recherché doit répondre en premier lieu et en plus de l'aspect économique (économie sur la consommation des granulats) à deux objectifs techniques essentiels:

- . une résistance mécanique moyenne (15 à 20 MPa) qui devrait suffire pour les structures faiblement étagées.
- . une maniabilité plastique facilitant sa mise en oeuvre.

1.2 ELEMENTS DE REFLEXION:

Avant d'aborder le problème, il nous a paru légitime de nous interroger sur les points suivants:

1) Le sable dunaire est en abondance dans près de 80% de la superficie du territoire algérien, ses caractéristiques physico-chimiques sont elles les mêmes d'une région à une autre? sinon, quels sont les critères nécessaires pour le choix d'un sable répondant à nos objectifs?

2) La nature homométrique des sables dunaires laisse présager une porosité importante, nuisible à la résistance du béton envisagé. La solution souvent avancée pour réduire ces vides intergranulaires et augmenter la compacité est une correction granulométrique par adjonction d'un filler*. Dans ce cas, quel

* Filler: mot anglais signifiant remplissage. To fill=remplir.

type de filler faut il adopter? qu'implique ce remplissage en fillers vis à vis de son affinité avec le ciment et vis à vis de la résistance du béton de sable?

3) La recherche d'une composition optimale de ce béton à base de sable de dunes, de ciment, de fillers et d'eau exige une grande quantité de matériaux. Cette recherche consiste à trouver un mélange ayant essentiellement une consistance plastique et une résistance mécanique satisfaisante. Si ces quantités sont disponibles en ce qui concerne les sables, le ciment et l'eau courante, il est en revanche difficile de préparer les quantités nécessaires de fillers, tant le processus d'obtention est pour le moment manuel, donc très long (tamisage classique au moyen de tamis de 80 μm de maille).

D'un autre côté, les moyens de mesure classiques de la consistance (cône d'Abrams, maniabilimètre LCPC,...) nécessitent des gâchées importantes de béton frais, et par conséquent beaucoup de fillers.

Le problème du choix du moyen de mesure de la consistance et du type d'éprouvettes d'essais de résistance est donc posé avec acuité, si l'on veut effectuer suffisamment d'essais et obtenir des résultats crédibles.

Comment peut-on mener un maximum d'investigations avec un minimum de fillers? quel type d'éprouvettes serait le mieux adapté à nos objectifs? et surtout quel moyen de mesure de la consistance doit on adopter?

4) Le béton de sable de dunes, peut il être armé? possède-t-il une bonne adhérence avec les armatures?. A priori oui, car la finesse du sable et des autres composants devrait permettre une bonne adhésion. Les contraintes d'adhérence ont elles le même ordre de grandeur que celles obtenues habituellement avec les bétons classiques?

5) L'expérimentation tient une part importante dans la plupart des travaux de recherche appliquée, il est donc essentiel de

choisir convenablement en nombre et en taille les sujets testés et de définir un type d'essai représentatif. Cela nous conduit à l'interrogation suivante: comment choisir une expérimentation représentative et comment la mener?. Dans notre cas, le béton de sable dunaire étudié est destiné aux éléments de structure, ne faut il pas tester alors des éléments de structure grandeur nature?

6) Enfin tout travail amène son lot de conclusions, certaines heureuses, d'autres exprimées avec réserves ou avec regret. Quoi qu'il en soit il faudra dresser un bilan; les résultats obtenus engendrent des commentaires et des perspectives. Comment peut on tirer parti de ce travail?

Nous avons essayé de répondre à ces 6 points au fur et à mesure de l'avancement de l'étude que nous présentons dans les 5 parties suivantes:

Après avoir analysé l'état des connaissances dans la première partie, nous aborderons ensuite le choix des composants de notre béton. La troisième partie sera consacrée à la recherche d'une composition optimale, à la mise au point d'une méthode de mesure de la consistance et à la détermination des caractéristiques mécaniques de ce béton. Enfin les essais sur des éléments de structure seront décrits dans la quatrième partie.

Au terme de cet exposé, nous tirerons quelques conclusions et nous indiquerons les voies qui nous semblent possibles pour les développements futurs.

Nous sommes conscients que ce travail ne représente qu'une approche en vue de la connaissance du béton de sable dunaire pour les éléments structurels, mais nous pensons qu'elle constitue une étape utile pour les études menées dans cette voie.

CHAPITRE 2

DEFINITION DU BETON DE SABLE.

2.1 INTRODUCTION:

La notion de béton de sable est à distinguer de celle des bétons dits "traditionnels" et des mortiers. Si les composants (granulats, liant, adjuvant éventuel et eau) sont sensiblement les mêmes pour les trois matériaux, la formulation et la destination ne sont pas identiques.

Nous donnons ci-après les différentes définitions.

2.2 DEFINITIONS:

2.2.1 Béton traditionnel et mortier

Les bétons traditionnels sont généralement constitués d'un mélange comprenant un granulats 0/25 (sable 0/5, gravillon 5/15 et gravier 15/25) et comportent selon l'utilisation envisagée entre 250 et 400 kg de ciment au mètre cube. Ce dosage en ciment est, compte tenu du diamètre maximal des grains, suffisant pour assurer au mélange une compacité maximale.

Si l'on veut diminuer la valeur du plus gros granulats tout en conservant la compacité maximale, il faut selon la formule empirique de J.BARON et R.LESAGE [4] augmenter la teneur en

fines, donc de ciment:

$$C = \frac{730 \mp 50}{\sqrt[5]{\gamma D}}$$

C: dosage minimum (kg/m³)

D: diamètre du plus gros grain (mm).

La norme française NFP 18 305 raffine encore plus cette formule et donne:

$$C = \frac{250 + 10f_{ck}}{\sqrt[5]{\gamma D}}$$

où, C: dosage en ciment (kg/m³).

f_{ck}: résistance caractéristique (MPa).

D: diamètre du plus gros grain (mm):

Ce qui est traduit par les courbes des figures 1 et 2.

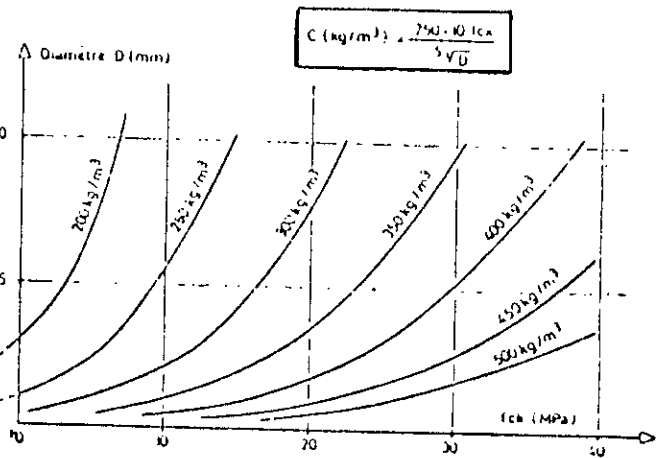
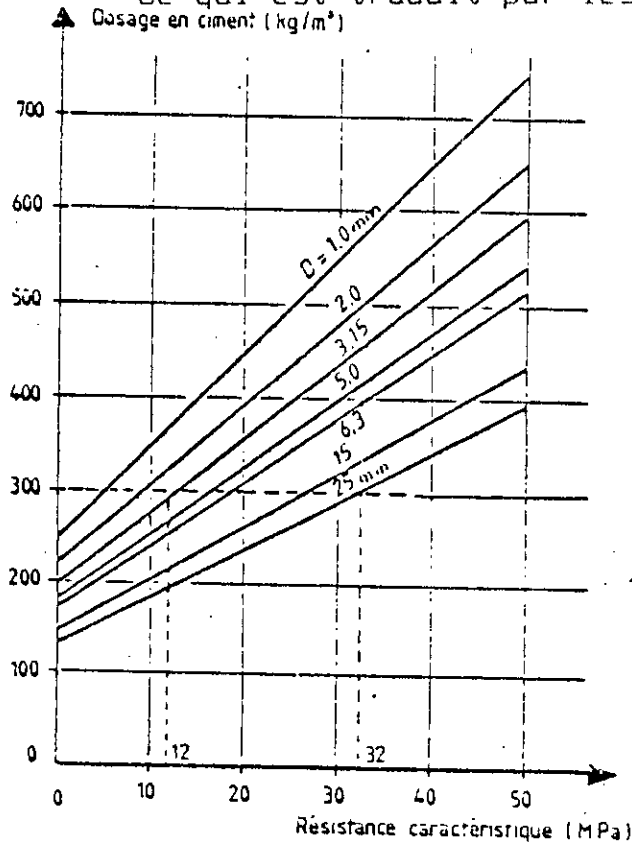


Fig 2: Relation entre diamètres et résistances pour divers dosages en ciment.

Fig 1: Relation entre dosage en ciment et résistance caractéristique pour divers diamètres de granulats.

Pour un béton ordinaire ($f_{ck} = 40 \text{ MPa}$) et en application de la formule normalisée indiquée ci-dessus, les dosages en ciment recommandés aux différents granulats seront ceux du tableau 1.

Granularité 0/D	$\frac{5}{\gamma D}$	$C = \frac{650}{\frac{5}{\gamma D}}$
0/25	1.90	340
0/20	1.82	360
0/15	1.72	380
0/12	1.63	400
0/10	1.58	410
0/6	1.44	450
0/5	1.38	470
0/3	1.25	520
0/1	1.00	650

Tableau 1:

relation entre la granularité et le dosage en ciment.

Dans la gamme des sables ($D_{max} \leq 6\text{mm}$), on est donc amené à envisager des dosages en ciment compris entre 450 et 650 kg/m^3 : ce sont des dosages correspondant aux mortiers.

Le mortier est défini comme étant un agglomérat artificiel de grains de sable réunis par un liant, dans un dosage allant de 450 à 700 kg/m^3 .

2.2.2 Béton de sable

Le béton de sable est un mélange dont le squelette est formé essentiellement de sable. Sa constitution est semblable à celle des mortiers et son dosage en ciment à ceux des bétons classiques (250 à 400 kg/m^3).

Mais un tel mélange nécessiterait, si l'on se réfère aux valeurs du tableau 1, un plus grand dosage en ciment, ce qui ne manquerait pas de provoquer au moins deux inconvénients:

- L'un d'ordre économique, dû au coût élevé engendré par l'utilisation d'un excédent de ciment.

- L'autre lié à l'incompatibilité avec les usages prévus, puisqu'un fort dosage engendre les phénomènes de retrait et de fissuration.

Dans ces conditions, l'intérêt même du béton de sable se trouve considérablement limité.

Afin de lever cette contrainte d'augmentation du dosage en ciment, l'idée est venue d'augmenter au maximum la compacité naturelle du sable en comblant ses vides intergranulaires par adjonction d'un filler dont la granulométrie est située dans l'intervalle [0-80] μm . La nature et la finesse de cet ajout seront déterminantes pour les performances du béton de sable structurel envisagé.

Si en plus, cet ajout est disponible localement et à bon marché, la contrainte d'ordre économique citée plus haut est également levée.

2.3 SYNTHÈSE:

En définitive, le béton de sable sera défini comme étant un mélange ternaire (sable, ciment, filler) et se distinguera des bétons traditionnels (sable, granulats, ciment) et des mortiers (sable, ciment).

Il se distinguera également des micro-bétons, constitués essentiellement de sable ayant une structure granulaire similaire à celle des bétons traditionnels [5] et destinés à la fabrication de modèles réduits d'éléments structurels [6].

Afin de situer davantage le béton de sable dans la gamme des matériaux similaires, nous devons noter qu'il diffère totalement des sables stabilisés. Ces derniers ne consomment qu'un faible dosage en ciment, moins que 150 kg/m^3 , et sont destinés principalement à la construction des routes.

Le projet de norme française AFNOR admet à travers sa définition se rapportant au béton de sable, l'introduction d'une proportion de gravillons telle que le rapport massique sable/gravillon soit supérieur à 1.

Enfin l'introduction, à faible dose, d'un adjuvant plastifiant (réducteur d'eau) peut être envisagée afin de diminuer la quantité d'eau nécessaire au mouillage des composants du béton de sable. Cette quantité est manifestement plus importante que dans un béton classique et est liée à une surface spécifique plus importante.

Diminuer cette quantité permet d'augmenter les performances, de réduire les risques de retrait excessif et d'améliorer le comportement au ressuage.

CHAPITRE 3

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.

3.1 HISTORIQUE:

Le béton de sable est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel. Selon P.POITEVIN [7], il trouve ses origines dans les années 1850-1875 sous l'appellation de "béton aggloméré". Il était alors constitué de sable, ciment, chaux et eau.

F.COIGNET qui est à l'origine de ce matériau construit pour sa famille en 1851 à Saint Denis (nord de Paris, France) une maison de 60 m de long et 7 m de hauteur, du type R+2, avec mur de soutènement (photo 1). Cet ouvrage fut entièrement édifié en béton aggloméré, des fondations jusqu'au toit.

P.POITEVIN rapporte encore qu'entre 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km (photo 2) fut partiellement construit en béton aggloméré afin de relier Fontainebleau à Orléans (France). Le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleau, d'une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau (en poids), ce qui correspond approximativement à un dosage en liant de 400 kg/m³, plus proche de celui des bétons de sable que des mortiers.

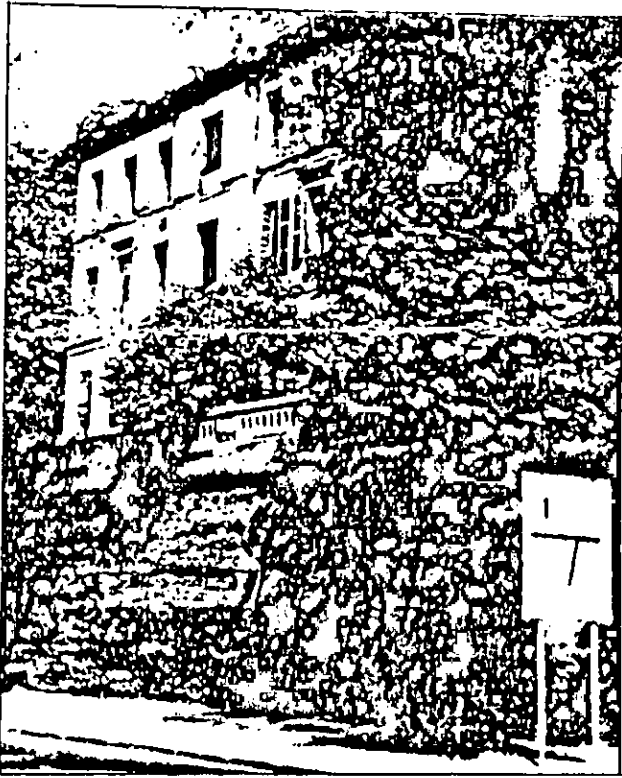


Photo 1: Maison de F.COIGNET
à Saint Denis (France).

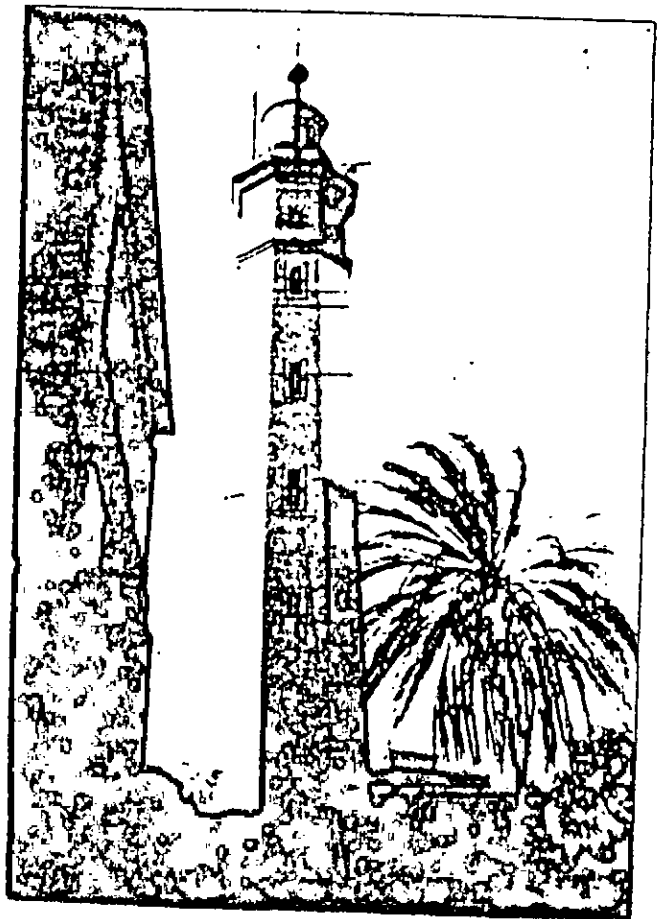


Photo 3: Phare de Port-Said
(Egypte). Photo prise en 1985.

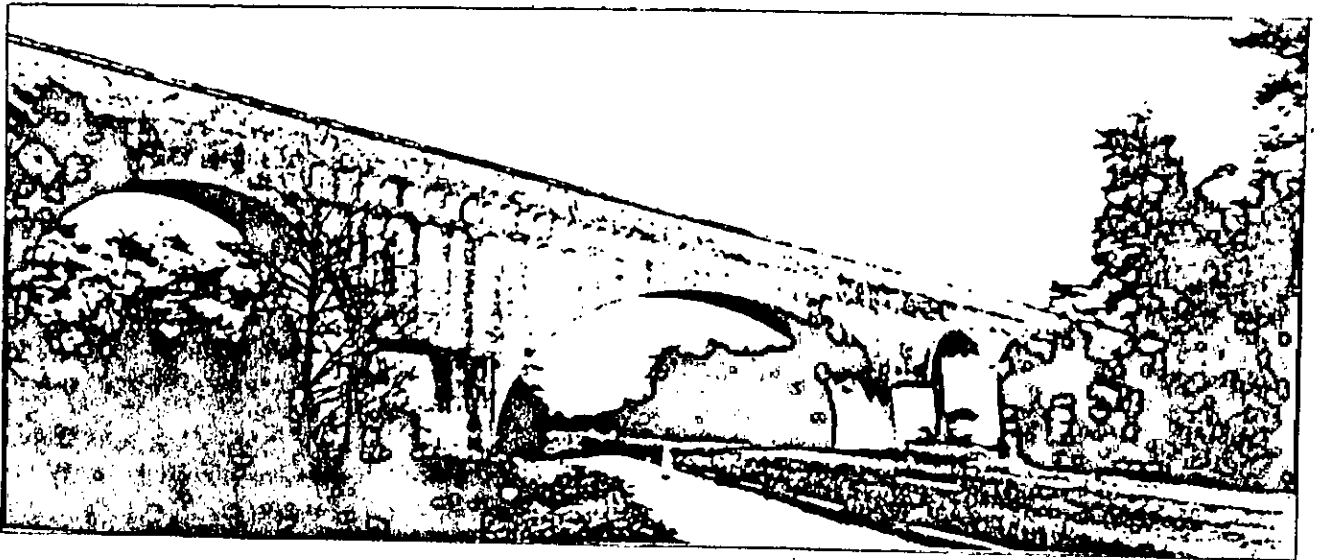


Photo 2: Aqueduc de Vannes (France). 40 km de long.

Mis en service en 1869, le phare de Port-Said (Egypte) de 52 m de hauteur (photo 3) fut également construit en béton aggloméré composé de sable d'une plage avoisinante et de chaux importée de France.

F.COIGNET exporta sa technique jusqu'aux USA, où son entreprise "New york and Long Island Coignet Stone Compagny" construit en 1871-72 en blocs de béton aggloméré le pont de Brooklyn à New york.

Notons que tous ces ouvrages sont encore en service.

Avec le développement, entre 1880 et 1910, du béton utilisant des granulats de plus gros calibres et le remplacement de la chaux par le ciment, des niveaux élevés de résistance (jusqu'à 20 MPa) furent facilement obtenus; le béton aggloméré, ancêtre du béton de sable tombait alors en désuétude.

3.2 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES:

L'étude des documents bibliographiques concernant le béton de sable met clairement en évidence que l'essentiel des travaux a été effectué en ex Union Soviétique (aujourd'hui Communauté des Etats Indépendants, CEI) et à un degré moindre en France.

Des travaux circonstanciels et au demeurant très intéressants ont pu être réalisés également en Afrique du nord et Asie (Golfe d'Arabie) par STAMAPOULOS et KOTSIAS [8].

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'extraire les principales informations contenues dans ces documents afin de dégager par la suite les éléments utiles pour l'obtention d'un béton performant, tel qu'on le projette.

Pour présenter les extraits de ces travaux, nous avons le choix entre une description chronologique et une description "géographique". Nous avons préféré la seconde méthodologie à la première pour une raison bien simple: la disparité des objectifs

poursuivis, des expériences réalisées et des résultats obtenus par les différents travaux.

Dans son rapport d'activité, du 02 avril 1990 [9], l'association SABLOCRETE (*) a inscrit dans son programme une action de coopération avec la CEI (ex URSS) dont entre autres objectifs la confrontation des méthodes de recherche et la réalisation de recherches communes. C'est dire que les travaux sur le béton de sable ont été, jusque là, effectués dans des contextes très différents.

3.2.1 Le béton de sable en CEI (ex URSS)

La CEI est le premier pays à redécouvrir le béton de sable. Ceci peut être expliqué par le fait que ce pays est très pauvre en granulats et ses ressources sont mal réparties. Dans certaines régions, les granulats doivent être transportés sur 1000 km et plus.

L'idée de base revient au professeur académicien REHBINDER qui a pensé, en 1954, qu'en broyant ensemble le ciment et une partie de sable et en vibrant intensément lors du malaxage, on pouvait obtenir un béton de porosité minimale et d'homogénéité maximale.

Les premières expérimentations furent orientées dans ce sens et les applications furent essentiellement en préfabrication.

3.2.1.1 Synthèse des études

Selon l'étude réalisée par J.J.CHAUVIN [10], la bibliographie soviétique concernant le béton de sable n'a commencé à devenir relativement abondante qu'en 1973. Il a dénombré une trentaine de références. A toutes fins utiles, nous mettons en annexe 1 ces références traduites en langue française.

(*) SABLOCRETE: Association Française à caractère national chargée par le ministère de l'équipement et du logement d'organiser des recherches approfondies sur le béton de sable.

Les articles publiés sont, selon lui, exclusivement courts (2 à 3 pages). Ils présentent généralement des expérimentations régionales et ont un caractère technologique. Aucun ne traite d'étude approfondie à caractère général.

Très peu d'articles font état du comportement du béton de sable. Seulement quatre articles lui ont été consacrés:

- 1) L'influence de la forme des grains et de la granularité.
- 2) L'influence d'adjuvants réducteurs d'eau.
- 3) L'influence d'adjuvants fluidifiants.
- 4) La déformation sous charge.

Si ces articles sont apparamment intéressants, il semble qu'ils restent relativement éloignés vis à vis de l'objectif fixé par ce mémoire.

3.2.1.2 Réalisations

Les réalisations sont nombreuses et sont, comme il a été noté plus haut, essentiellement dans le domaine de la préfabrication. D'autres réalisations en béton de sable projeté et coulé ont été également effectuées.

Nous allons dans ce qui suit donner quelques exemples illustratifs cités par J.J.CHAUVIN [11] dans son rapport de mission en ex URSS consacrée à l'examen des réalisations en béton de sable.

i) en préfabrication:

- . des dalles et pavés pour allées piétonnes.
- . des pieux.
- . des toitures à plis.
- . des éléments de bâtiments, lorsque le béton de sable préfabriqué présente un intérêt économique.
- . Notons le cas remarquable de la banque pour le commerce extérieur implantée à MOSCOU. A part l'ossature métallique et le parement de façade en pierres, l'ouvrage est entièrement en béton de sable préfabriqué; pas moins de 5000 m³ de ce matériau ont été utilisés.

ii) en béton de sable projeté:

- . travaux de rénovation avec ferrailage de surface et une couche de béton de sable: cas des installations sportives de MOSCOU à l'occasion des derniers jeux olympiques, en 1980. (photo 4).
- . rénovation des égouts visitables: renforcement intérieur par projection de béton de sable.
- . travaux neufs de piscines (photo 5), de voutes, de pistes de luges etc...

iii) en béton de sable coulé

Ce procédé est d'un usage beaucoup moins fréquent que les deux premiers. Il a été utilisé notamment dans la réalisation de:

- . pistes (routes, autoroutes, aérodromes)
 - cas de l'autoroute MOSCOU-TOULA , section SERPOUKOV-TOULA, réalisée en 1988. L'auteur ne définit pas la longueur de la section.
 - cas de l'aérodrome militaire de PEVEK, réalisé en 1976.
- . divers petits travaux de bourrage et de jointage.

Cette liste n'est pas exhaustive.

3.2.2 Le béton de sable en FRANCE

En France, le béton de sable a retrouvé un regain d'intérêt durant la dernière décennie. L'idée a commencé à se développer dans la région d'Aquitaine (sud de la France) où le sable naturel est surabondant et les granulats alluvionnaires se raréfient pour diverses raisons.

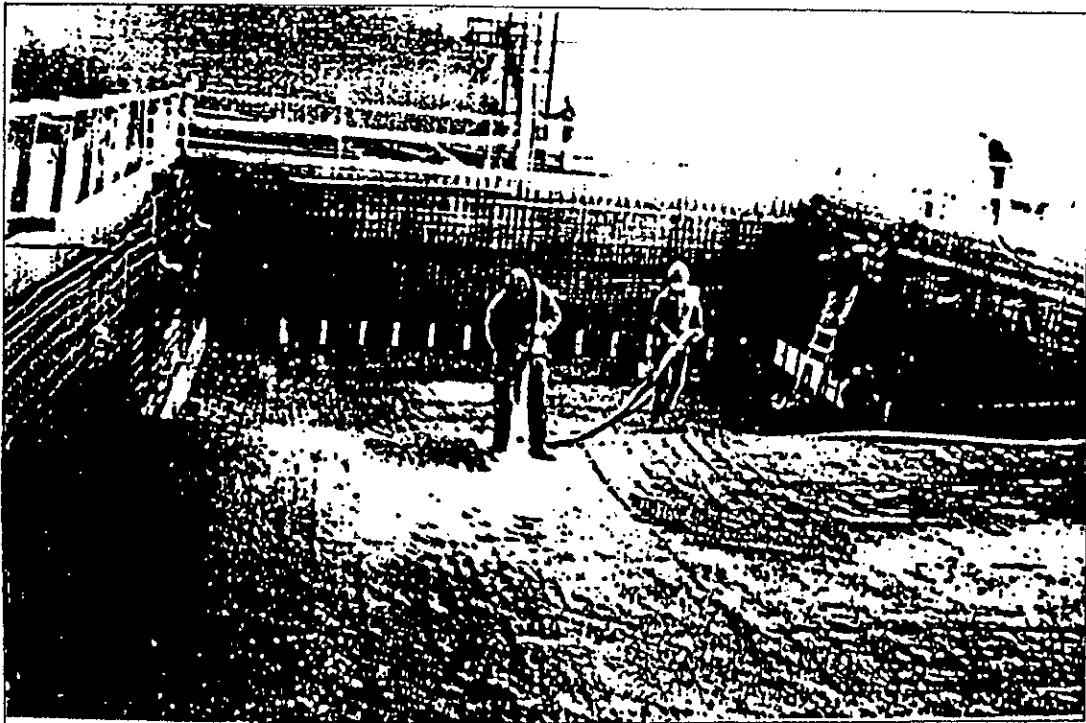
L'approche n'est pas tout à fait la même avec celle adoptée en CEI (ex URSS). Il ne s'agit plus de broyer ensemble le ciment et une partie de sable et de vibrer intensément lors du malaxage pour obtenir un béton de porosité minimale, mais d'apporter une correction granulaire au sable par adjonction d'un filler.

Les premiers travaux ont été réalisés conjointement à Bordeaux par l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de génie-civil, le CETE, le Centre Expérimental de recherches et études du Bâtiment et Travaux Publics (CEBTP) et la profession "Béton Prêt à l'Emploi".



Photo 4: Projection sur surface ancienne avec nouveau ferrailage.

Photo 5: Réalisation d'une piscine avec béton de sable projeté.



Ces travaux avaient pour objectif la recherche d'une composition de béton de sable utilisable en technique routière pour couches de base dans des voiries secondaires: chemins départementaux, voies communales, voies de lotissement...

Ceci a été concrétisé par un mémoire d'ingénieur soutenu en décembre 1982 par B.COURET [12] et la réalisation d'une voirie de lotissement expérimental.

Les travaux se sont ensuite étendus à d'autres régions (nord de la France, région parisienne...), pour d'autres utilisations (bâtiment (*), assainissement, rénovation de bâtiments anciens...) et par d'autres techniques (béton projeté, béton hypercompacté...). Différents types de sables et de fillers ont été testés.

Des résultats partiels intéressants et disparates ont conduit le CEBTP à établir en 1986 un document de synthèse sur le béton de sable hypercompacté [13] et dans la même année l'association CEBTP et LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), un autre document sur la synthèse des connaissances sur les bétons de sable [14].

Ces documents sont à l'origine du vaste programme de recherche développement sur l'utilisation optimale du sable pour les applications aux bétons de sable, parrainé par le ministère de l'équipement et du logement et confié à l'association SABLOCRETE.

L'objectif fixé par le programme est d'organiser des recherches approfondies sur les propriétés des bétons de sable et de mener des actions pilotes de développement dans différents domaines (bâtiment, ouvrages d'art, routes...) en France et à l'étranger en vue d'une normalisation de ce matériau et de l'exportation de ses techniques.

(*): essentiellement des murs de parement.

Beaucoup de travaux et d'actions pilotes entrant dans ce cadre sont actuellement en cours. Nous citons entre autres, le projet "matériaux locaux, programme bétons de sable" approuvé par le comité des projets Algéro-Français en juin 1989 et dans lequel le CNERIB est l'opérateur du côté Algérien et SABLOCRETE du côté Français.

A la lumière de la bibliographie consultée, nous constatons que les travaux sur la formulation des bétons de sables sont très peu nombreux et qu'il n'existe pas de méthodologie adaptée, quelques approches sont proposées. Nous les résumerons dans la troisième partie de ce mémoire, afin d'essayer d'en tirer parti, car l'essentiel de nos travaux se trouve dans cet axe: la recherche de compositions de bétons de sables dunaires pour éléments de structure.

3.2.3 Travaux circonstanciels sur les bétons de sables

Ces travaux ont été effectués par STAMATOPOULOS et KOTZIAS [8] sur des sables de dunes (de désert): un sable du golf d'Arabie et un autre d'Afrique du nord (voir granulométries sur la figure 3). Les numéros donnés sur l'axe des abscisses sont des modules ASTM de tamis et ont les correspondances suivantes en mm: (tableau 2).

Les auteurs ne donnent pas plus de précisions sur les régions de prélèvement de ces sables.

module ASTM	3/8	4	8	16	30	50	100	200
dimension du tamis	9.5	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075

Tableau 2: équivalences entre modules ASTM et dimensions de tamis.

i) Dans le golf d'Arabie:

Le béton de sable a été utilisé pour des raisons économiques (les gros agrégats ne sont disponibles qu'à des endroits très lointains) pour la construction de fondations, murs de soutènement et dalles de planchers.

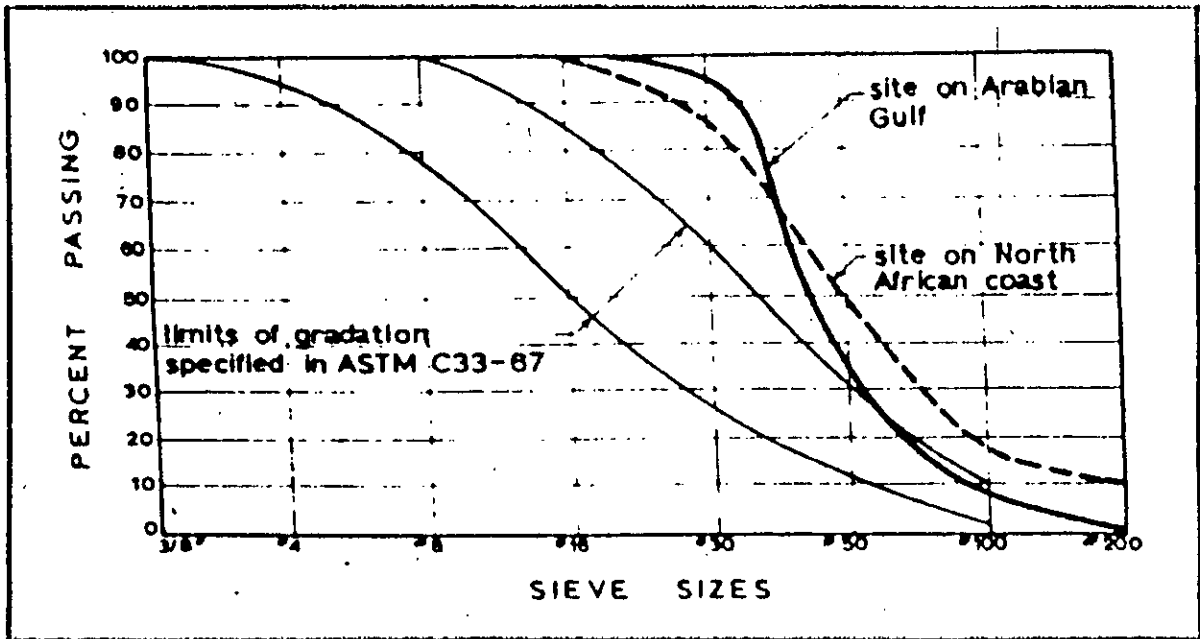
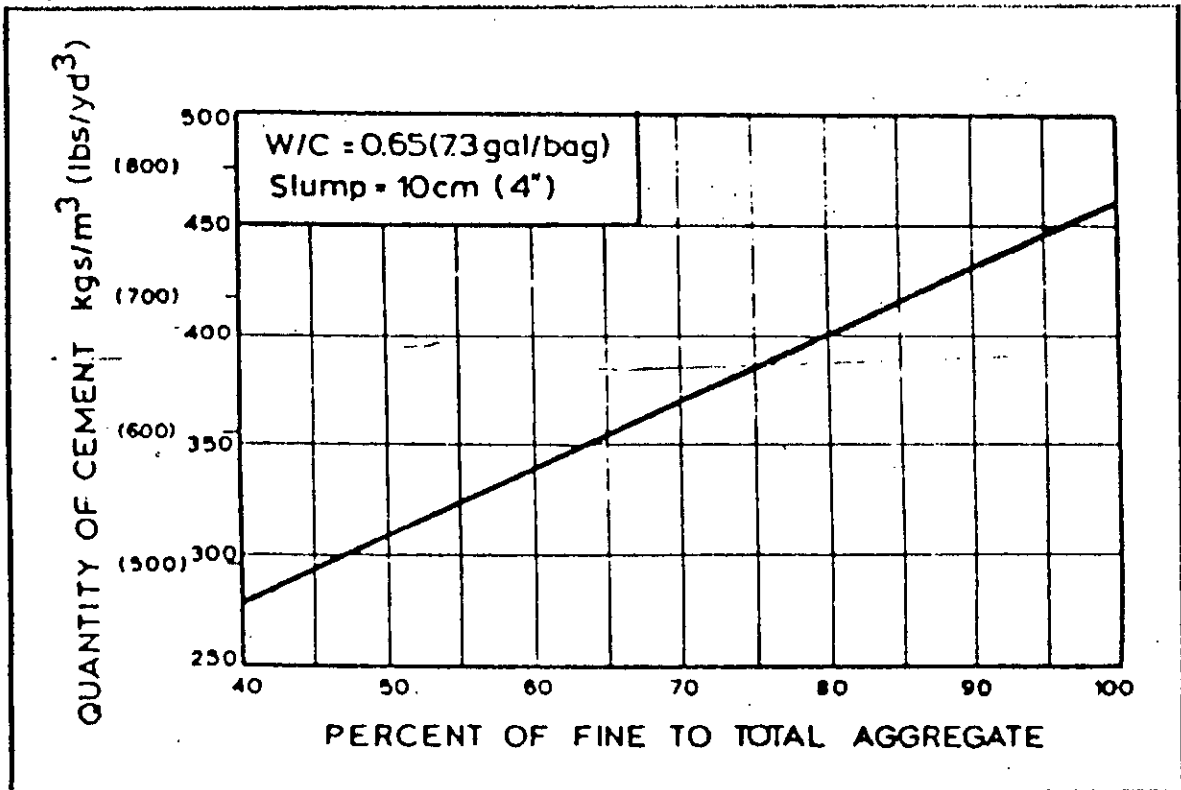


Fig 3: Situation des courbes granulométriques des sables de dunes étudiés par rapport aux limites définies par la norme ASTM C33-67.

Fig 4: Pour le même rapport E/C, la quantité de ciment augmente linéairement avec l'augmentation de la proportion des agrégats fins.



La composition adoptée rétaite ont été réalisées et la composition adoptée a été un volume de ciment (type 5 de la norme ASTM 150).

- . trois volumes de sable.
- . eau douce. $R_{c28} = 20,5 \text{ MPa}$

Les meilleurs résultats de résistances mécaniques obtenues étaient: pour le retrait n'a pas été plus important que pour

pour $E/C = 0,501$. $\implies R_{c28} = 22 \text{ MPa}$.

$E/C = 0,65 \implies R_{c28} = 12 \text{ MPa}$.

Conclusion:

Les auteurs font remarquer que les fissures dues au retrait ne sont pas plus importantes que pour un béton traditionnel placé dans les mêmes conditions visées par le tableau ci-dessus.

ii) En Afrique du Nord:

Le béton de sable a été utilisé pour la construction d'un brise-lame suite à une pénurie de gros granulats.

Les matériaux utilisés étaient:

- . ciment type 2 de la norme ASTM 150.
- . eau de mer.
- . sable du désert.
- . grès tendre (en guise de filler).

Juste après le coulage du brise-lame, des morceaux de pierres de 10 à 30 cm ont été versés pour s'enfoncer dans la masse du béton.

composition adoptée:

- agrégat fin (sable + grès tendre) 1350 kg/m^3 .
- ciment 460 -
- E/C 0.65

Cette composition a été retenue après une étude au laboratoire qui a permis de déterminer la relation entre la quantité de ciment en fonction du pourcentage d'agrégat fin par rapport à la totalité des agrégats. (figure 4).

C'est la caractéristique physique essentielle puisque la notion même de sable est basée sur un critère de taille des éléments.

L'essai normalisé NFP-18-304 nous permet de déterminer la répartition des grains de sable suivant leurs grosseurs. Cette répartition est traduite par les courbes granulométriques de la figure 5 ci-après.

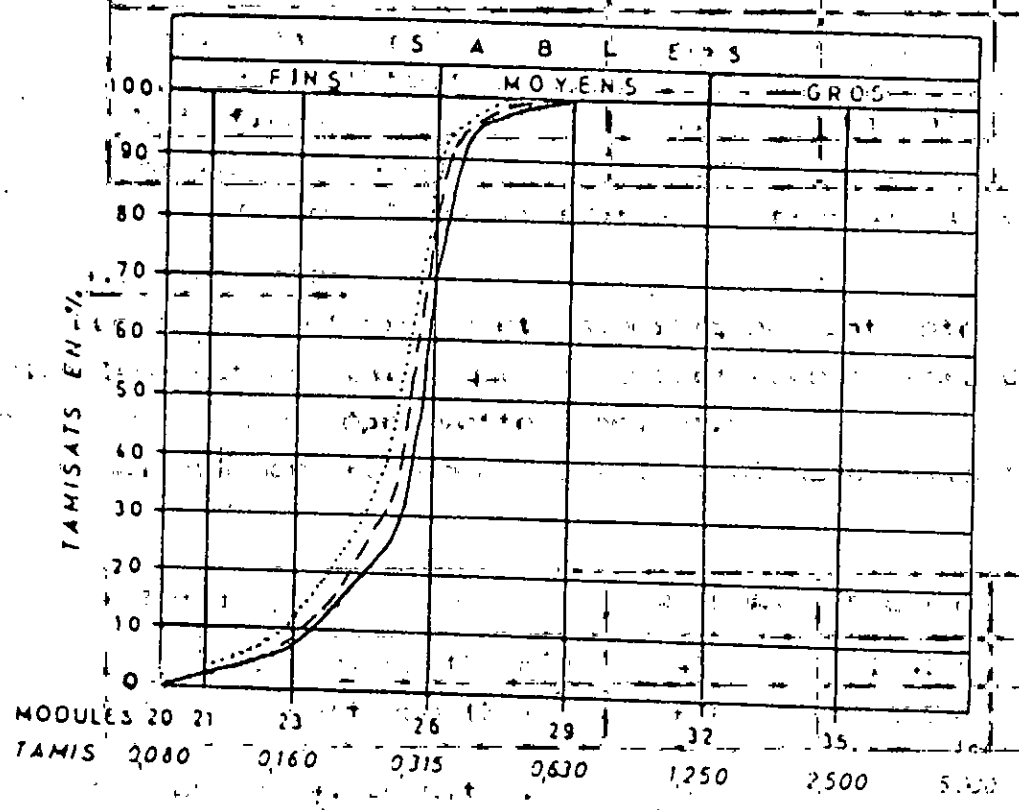


fig 5: courbes granulométriques

- : sable dunaire, région de Laghouat.
- - -: sable dunaire, région de Djelfa.
-: sable dunaire, région de Ghardaia.

Les courbes granulométriques des trois sables sont similaires. Elles sont toutes continues et montrent clairement que ces sables sont constitués essentiellement de grains fins.

Le module de finesse de ces sables, défini comme étant le centième de la somme des refus (exprimés en % de poids) aux tamis de: 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 et 5.0 confirme à son tour le manque de grains moyens et gros (tableau 3).

V: volume total du matériau, y compris le vide entre les grains.

Région	LAGHOUI	DJELFA	GHARDAIA
v: volume du vide entre les grains. Es à vue	93	94	88
Es piston	89	89	80

D'un autre côté, la compacité et la porosité sont, de par leurs définitions, des valeurs complémentaires, valent de sable.

Si l'on se réfère aux valeurs de l'équivalent de sable préconisées $C_s = \frac{V-v}{V}$ GORISSE [16] (pour les sables à béton traditionnel, on peut conclure que les sables dunaires des régions de (Laghouat, Djelfa et Ghardaia) sont très propres (Es à vue ≥ 85 et Es piston ≥ 80).

(2) et (3) donnent:

4.2 ANALYSES CHIMICOLOGIQUES (4)

Exprimée en % , la relation (4) devient:

Ces analyses %C+e%R= 100. détermination des proportions de MA partir des relations (4a), et (5) et connaissant M et n, nous avons déterminés les compacités et porosités suivantes: (voir tableau 5) peuvent être nuisibles aux propriétés du béton étudié.

Les résultats chiffrés de ces analyses sont présentés dans l'anne

Région	LAGHOUI	DJELFA	GHARDAIA
compacité (%)	56	58	55
2 porosité (%) organique	44	42	45

Elles résultent de la décomposition partielle des sables par les végétaux et animaux. Il existe beaucoup de variétés et elles peuvent avoir des effets indésirables sur le béton. Rappelons que G.DREUX [15] admet pour le "sable à béton" traditionnel une compacité de l'ordre de 60 à 70% . C'est dire que ces sables seraient rejetés pour la confection des bétons traditionnels. retrait et gonflement dans le cas où le béton est soumis à forts changements de température.

4.1.4 Propreté

La présence de matières organiques dans le sable est détectée par l'essai calorimétrique (norme NFP 18-301) d'équivalent de sable, régi par la norme NFP 18-598. Il permet de mettre en évidence la proportion relative de poussières fines ou d'éléments argileux présents dans le sable.

Deux indices sont déterminés: Es à vue et Es piston (tableau 6).

Types de béton	Cl ⁻ (%)
Bétons non armés	1.00
Bétons armés	0.65
Bétons précontraints par post-tension	0.15
Bétons précontraints par pré-tension	0.06

Tableau 10: taux maximum d'ion-chlores admis.

Le pouvoir corrosif des chlorures présents dans les sables dunaires étudiés est donc négligeable.

4.3 CHOIX D'UN SABLE DUNAIRE:

En se référant aux prescriptions des différentes normes, on peut qualifier les trois sables étudiés de sables " hors-normes":

- . Granulométries fines.
- . Faibles modules de finesses
- . Grandes porosités.
- . Faibles compacités.

Ils présentent par contre des qualités exploitables pour leurs emplois dans les bétons de sables.

- . Courbes granulométriques continues.
- . Très bons équivalents de sable.
- . Présence insignifiante d'éléments nocifs.

Le sable dunaire de la région de Laghouat paraît le mieux placé pour être utilisé dans la suite des travaux. Si ses caractéristiques physico-chimiques sont globalement équivalentes à celles des autres, il se distingue du lot par:

- 1) une meilleure relative propreté par rapport à celui de Ghardaia (ES plus grand).
- 2) une meilleure relative classe granulaire (0/0.63) par rapport à celui de Ghardaia (0/0.425).
- 3) un plus grand relatif module de finesse (1.20 contre 1.10 pour celui de Ghardaia et 1.11 pour celui de Djelfa).
- 4) une absence totale de matières organiques, il convient mieux que celui de Djelfa dont la teneur est de 1.14% .

En conclusion, le sable de la région de Laghouat est choisi pour la suite des travaux, mais vu sa porosité importante (44%), une correction granulaire par adjonction d'un filler semble indispensable si l'on veut obtenir par son emploi un béton performant.

La nature de ce filler reste à définir.

4.4 ETUDE COMPARATIVE DE SABLES DUNAIRES DE QUELQUES REGIONS DU SUD ALGERIEN:

Dans le tableau 11 qui suit ont été regroupées les caractéristiques physico-chimiques de sables dunaires des régions de:

- . Laghouat, Djelfa et Ghardaia, déterminées dans le cadre du présent mémoire.
- . Hassi Bahbah, Ouargla et El Goléa, recueillies auprès du CNERIB [3].

Les résultats indiqués permettent d'établir les constatations suivantes:

- a) Tous ces sables ont une granulométrie fine, avec quelques nuances non significatives. Les plus gros grains n'atteignent pas 1mm de taille.
- b) Ils sont tous propres. Les valeurs des équivalents de sable obtenues ne se rencontrent que rarement dans les sables alluvionnaires ou de concassage utilisables dans la confection des bétons traditionnels.
- c) Les éléments nocifs présents dans ces sables sont insignifiants eu égard aux teneurs maximales réglementaires, sauf peut-être celui de Djelfa qui présente un taux non négligeable de matières organiques.
- d) Le module de finesse, bien que faible pour l'ensemble de ces sables est relativement plus grand pour ce qui est du sable d'El Goléa. Sa valeur (1.47) est supérieure de quelques 36 % à celle de Ouargla (0.93).

	HASSI BABBAH (*)	DJELFA	LAGHOUAT	GHARDAIA	OUARGLA(*)	EL GOLEA(*)	
GRANULOMETRIE	continue 3% de fines	continue 1.2% de fines	continue 1.8% de fines	continue 2.4% de fines	-	-	
CLASSE (0/d) (en mm)	0/0.425	0/0.63	0/0.63	0/0.425	0/0.425	0/0.50	
MODULE DE FINESSE	1.13	1.11	1.20	1.10	0.93	1.47	
DENSITE APPARENTE (Kg /m ³)	1459	1540	1480	1520	1644	1774	
DENSITE ABSOLUE (Kg /m ³)	2549	2655	2630	2764	2627	2570	
POROSITE (en %)	42	42	44	45	42	34	
COMPACTITE (en %)	58	58	56	55	58	66	
PROPRETE	ES a vue	92	94	93	88	94	93
	ES piston	81	89	89	80	84	88
ELEMENTS NOCIFES (en %)	matieres organiques	neant	1.14	neant	neant	neant	neant
	sulfates et sulfures	neant	0.55	0.91	0.69	neant	neant
	chlorures	-	0.00035	0.0007	0.00053	-	-

(*) : Valeurs des caracteristiques recueillies apres du CNERIB [3].

Tableau 11: caracteristiques physico-chimiques de sables dunaires de différentes régions.

e) Seul ce sable possède une compacité acceptable (66 %). Elle est même comparable à celles des sables pour béton traditionnel si l'on se réfère à l'ordre de grandeur donné par G.DREUX [15] et cité plus haut.

Pour clore cette comparaison et au point actuel de notre étude, nous pouvons conclure que les six sables caractérisés sont globalement hors normes et que celui d'El Goléa semble posséder les meilleurs atouts pour des études ultérieures.

réf. 19) l'absence de fines dans le béton de sable.

Il faut donc concevoir l'élaboration de ce béton de sable de telle sorte que la finesse du sable employé du béton est plus importante que celle du mortier.

CHAPITRE 5

CARACTERISATION DES AUTRES COMPOSANTS.

5.1 LES FILLERS:

Ce sont des poudres minérales dont le diamètre maximal n'excède pas 80 μm .

Mélangés avec le sable, les fillers comblent ses vides intergranulaires améliorant ainsi sa compacité naturelle et permettant l'augmentation des performances du béton de sable.

Il est évident que l'introduction d'un surdosage en ciment pour combler ces vides apporterait au béton envisagé de meilleurs résultats du point de vue mécanique mais entrainerait les inconvénients suivants (par rapport à l'emploi des fillers):

1. Perte de la notion de béton au profit de celle de mortier.

2. Augmentation du coût du produit obtenu.

3. Accroissement des phénomènes de retrait, fissurabilité et excès de rigidité. Bien que ces phénomènes soient dus à l'excès de ciment, ils sont reconnaissables de par leur caractère local.

L'amélioration des performances apportée par l'adjonction des fillers dépend de la nature de ces derniers, essentiellement de leurs finesse et de leurs affinités avec le ciment.

Pour ces raisons, nous avons cherché pour notre béton de sable, ainsi par exemple, J.J. CHAUVIN et G. GRIMALDI [19] ont étudié, avec un sable de dune, l'influence de la finesse des fillers sur la

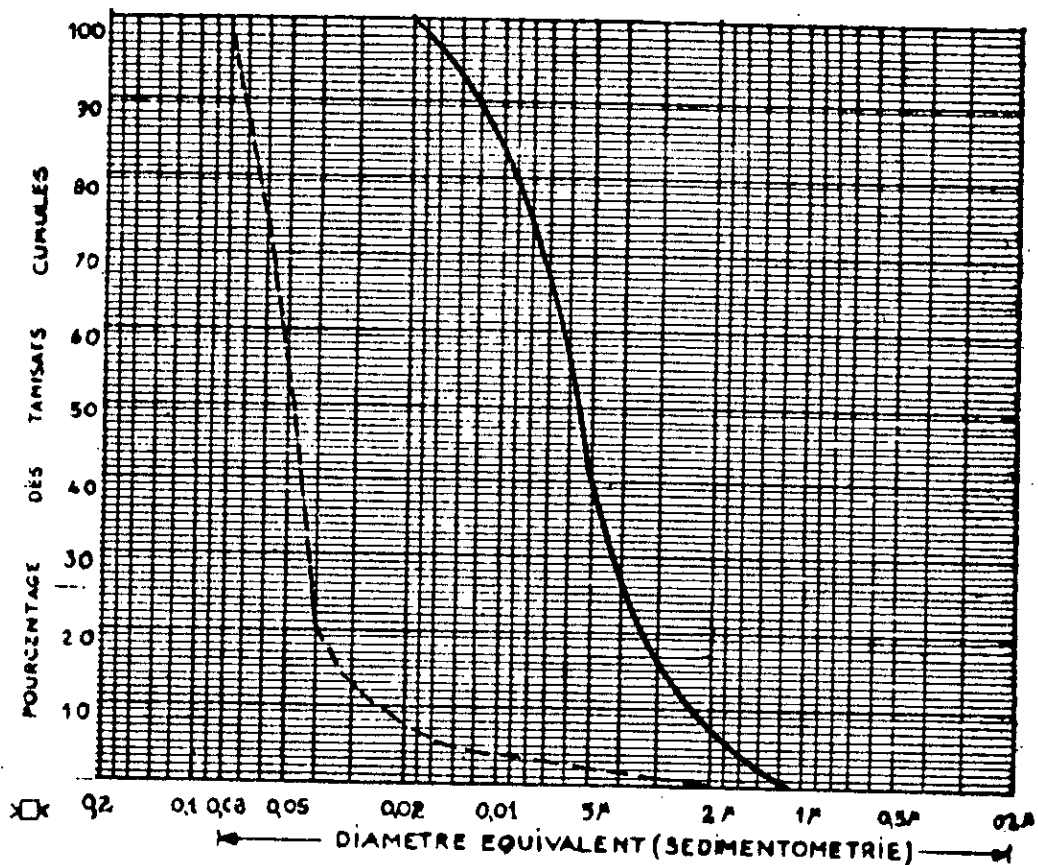


Fig 7: Courbes sédimentométriques des fillers.

————— : Filler calcaire.

----- : Filler siliceux.

filler calcaire:

Granulométrie très fine.
 Les diamètres des grains sont compris entre 1 et 20 µm.
 De ce point de vue, ce filler s'apparente à une farine.

filler siliceux:

Granulométrie plus étendue et moins fine. Les grains ont des diamètres variant entre 2 et 80 µm. Plus de 75% des grains sont supérieurs à 50µm.

d) ANALYSES CHIMIQUES:

filler calcaire:

L'annexe 3 montre que ce filler est constitué de 97.5% de CaCO₃. Les éléments nocifs essentiels (sulfates et sulfures) sont pratiquement inexistant (taux de SO₃ : 0.83%)

filler siliceux:

Dérive du sable dunaire de la ville de LAGHOAT étudié au chapitre 4. Rappelons que ce sable présente des taux insignifiants d'éléments nocifs. (voir annexe 2).

Produits	Eau / Filler
.Billes de verre	0.00
.Cendres volantes	0.17
.Ciment	0.27
.Chaux	0.28
.Oxyde de fer	0.44

Tableau 12: Eau de mouillage de quelques produits.
(source:GUINEZ et al [22]).

Les valeurs de E/F de nos fillers sont proches de celles des liants traditionnels. Leurs emplois ne devraient donc poser aucun problème particulier vis à vis de la maniabilité du béton de sable envisagé ou encore de son ressuage.

f) COUT:

Le coût des deux types de fillers est très compétitif par rapport à d'autres types tels le ciment ou la chaux. Il est obtenu gratuitement, si l'on excepte le prix du transport de l'endroit de prélèvement jusqu'au lieu d'expérimentation.

5.2 LE CIMENT:

Un seul type de ciment a été employé dans l'ensemble des expérimentations. Il s'agit du ciment CPA-325, utilisé dans la quasi-totalité des chantiers en Algérie.

Ce ciment enveloppé dans des sacs de 50 kg était de fabrication très récente au moment des essais. Il possédait donc toute sa capacité liante.

5.3 L'EAU:

L'eau de gâchage utilisée dans tous les essais de béton de sable frais est une eau courante de robinet, donc dépourvue des excès de sels, de sulfates et d'acides.

TROISIEME PARTIE

RECHERCHE D'UNE COMPOSITION
OPTIMALE DU BETON DE
SABLE STRUCTUREL.

6.1 INTRODUCTION:

Le béton de sable est un matériau nouveau encore au stade de la recherche. Le principal problème posé par son emploi est la conception de méthodes de compositions compatibles avec les divers usages qu'on en fait.

En l'absence de normalisation régissant sa formulation et de méthodes standards et fiables de compositions adoptées par la communauté scientifique, quelques auteurs ont tenté des expériences en laboratoires en posant au préalable des hypothèses propres.

Dans ce qui suit, nous essaierons d'exposer les quelques approches recueillies dans la bibliographie ainsi que les résultats obtenus avec les diverses compositions. Nous proposerons ensuite une approche basée sur deux variantes et visant l'obtention d'une composition compatible avec le béton structurel envisagé.

6.2 DESCRIPTION DE DIFFERENTES APPROCHES:

6.2.1 Approche de B.COURET, 1982 [12]

B.COURET, pour son béton de sable à usage routier s'est

basé sur la composition d'un mortier ISO (0.5 part d'eau en poids, une part de ciment et trois parts de sable normal (*)) dosé à 450 kg/m³ de ciment.

MORTIER ISO

- . ciment CPJ 45 450 kg/m³
- . sable normal 1350 -
- . eau 225 l/m³

BETON DE SABLE

- . ciment CPJ 45 450 kg/m³
- . sable alluvionnaire 1350 -
- . eau 225 l/m³

Des essais sur éprouvettes 4*4*16 sur les deux compositions ont donné les résistances comparatives suivantes (tableau 13). Les valeurs indiquées sont exprimées en MPa.

	flexion	compression
mortier ISO	8.0	50.6
béton de sable	6.9	43.2

tableau 13: résistances comparatives

Après cela, B.COURET, jugeant le dosage en ciment excessif, l'a réduit et fixé à 330 kg/m³ (dosage très courant dans la construction des routes).

D'autres adjuvants ont été introduits et une série très longue d'essais a été alors effectuée par tatonnement. Les caractéristiques recherchées étaient une bonne résistance mécanique et une maniabilité plastique.

(*): C'est un sable provenant de l'étang de Leucate, dans les Pyrénées orientales au sud ouest de la France. Il est grossier, propre et à grains arrondis. Sa composition granulométrique est normalisée (NFP 15-409) et il sert pour la confection des mortiers normalisés dits ISO.

composition finale retenue:

. ciment CPJ 45	330 kg/m ³
. sable alluvionnaire	1300 -
. filler (diamètre de 0 à 200 µm)	130 -
. plastifiant	1.65 -
. entraîneur d'air	0.66 -
. eau courante	215 l/m ³

performances obtenues:

Résistance à la compression à 28 jours:	22.2 MPa
Résistance à la flexion à 28 jours:	5.1 MPa
Maniabilité (au maniabilimètre lcpc):	6.5 s

6.2.2. Approche de P.DELUDE, 1984 [23]

L'objectif que s'est fixé P.DELUDE pour obtenir la formulation de son béton était la recherche d'un squelette optimal. Il s'agit de déterminer par approximations successives, l'ensemble des proportions relatives des constituants solides inertes, pour lesquelles à dosage en ciment et eau fixes, le mélange s'écoule le plus rapidement dans le maniabilimètre LCPC.

La courbe de la figure 8 présente la variation du temps d'écoulement au maniabilimètre en fonction du rapport $x = \frac{F}{S}$, où:
F: représente la teneur volumique en filler.
S: représente la teneur volumique en sable.

La courbe présente dans la zone de son minimum une partie plus ou moins aplatie. C'est dans cette zone que sont choisies les formules retenues pour essais complémentaires de détermination des caractéristiques physiques et mécaniques.

exemple de formule retenue:

. ciment CPA 55	350 kg/m ³
. sable alluvionnaire 0/4	1400 -
. filler calcaire	160 -
. eau courante	255 l/m ³

performances obtenues:

- . maniabilité: 6 secondes au maniabilimètre LCPC
- . Rc28: 28.9 MPa
- . Rt28: 3.4 MPa

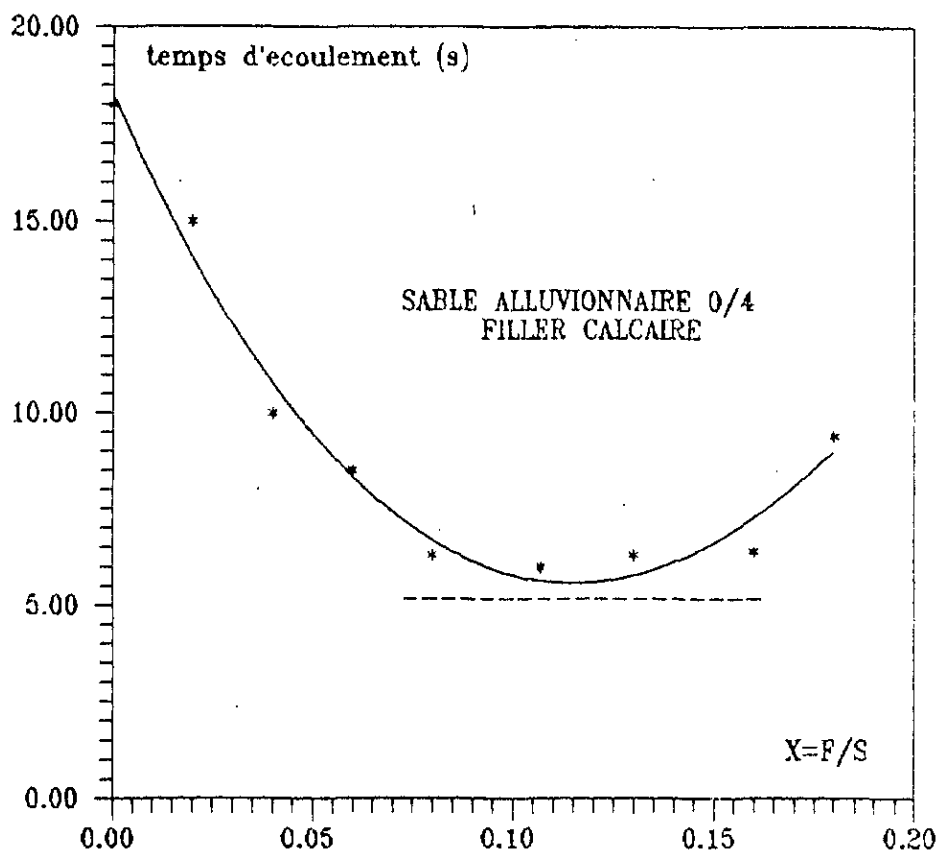


fig 8: courbe représentative de la variation du temps d'écoulement en fonction du rapport volumétrique F/S.

6.2.3 Approche de GUINEZ, GLUAIS, DELUDE ,1984 [22]

Cette approche est basée sur l'augmentation de la compacité naturelle du sable par l'adjonction d'un filler.

L'étude de base a été menée sur un sable alluvionnaire 0/3 pour être ensuite étendue à d'autres types de sable. L'objectif recherché était l'obtention d'une compacité maximale et par conséquent de performances mécaniques et rhéologiques satisfaisantes.

La première étape consiste à rechercher par tâtonnement un mélange de sable, ciment et eau possédant une bonne maniabilité et une résistance à la compression voisine de celle des briques et parpaings (autour de 8 MPa).

Cinq formules dosées respectivement de 450, 350, 300, 250 et 200 kg de ciment au m³ ont été soumises à des essais mécaniques.

La formule retenue est la suivante:

- . ciment CPJ 45 300 kg/m³
- . sable 0/3 1600 -
- . eau 320 l/m³

performances obtenues:

R_{c28}: 8.2 MPa.

Maniabilité: 8 secondes.

La deuxième étape consiste à améliorer les performances de cette composition par la recherche de la meilleure correction granulaire possible, ou encore par l'introduction du type de filler qui convient le mieux.

Pour cela, trois types de fillers (tous calcaires) et différents par leurs granulométries ont été utilisés à divers dosages.

De la formule précédente, les dosages en ciment et en eau ont été fixés constants et égaux à 300 kg/m³ et 240 l/m³ respectivement. La quantité de sable a été modifiée.

Les fillers employés avaient les caractéristiques suivantes:

filler V: le plus fin, 75 % des grains inférieurs à 20 µm.

filler R: 62 % des grains inférieurs à 40 µm.

filler F3: 20 % des grains inférieurs à 40 µm et 75 % inférieurs à 200 µm.

C'est la correction par le filler le plus fin (filler V) qui a donné les meilleurs résultats mécaniques et rhéologiques:

Ciment CPJ 45	300 kg/m ³	} ⇒	R _{c28} : 20.2 MPa Maniabilité: 10s
Sable 0/3	1325 -		
Filler V	130 -		
Eau	240 l/m ³		

Dans la troisième étape, la quantité de ciment a été réduite à 250 kg/m³ et divers adjuvants (plastifiants et fluidifiants) ont été testés.

La formule finale adoptée (pour le sable alluvionnaire 0/3) est la suivante:

Ciment CPJ 45	250 kg/m ³	} →	Rc28: 17.3 MPa Maniabilité: 7s
Sable 0/3	1350 -		
Filler V	130 -		
Eau	240 l/m ³		
Plastifiant	0.5 kg		

6.2.4 Approche de J.J.CHAUVIN, 1987 [24]

Pour la formulation de ses bétons de sables, J.J.CHAUVIN s'était fixé au préalable les dosages en ciment et en eau:

- ciment CPJ 45 350 Kg/m³
- eau courante 250 l/m³

Si le dosage en ciment est des plus courants, celui de l'eau par contre a été choisi arbitrairement. Ce choix implique un rapport E/C = 0.7.

Il a ensuite étudié les relations existant entre la nature et le dosage en fillers d'un côté et les principaux paramètres du béton de l'autre (résistance, compacité et maniabilité).

Nous donnons ci-après un exemple de relation obtenue (fig 9).

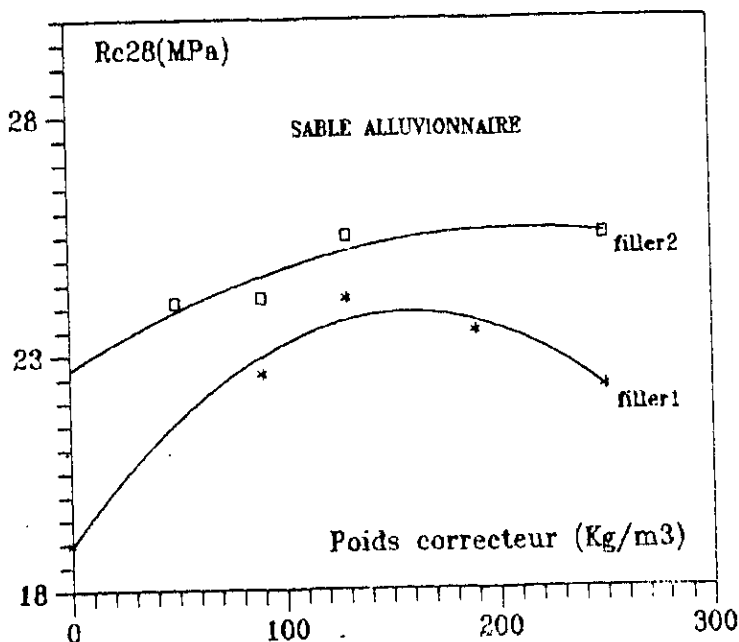


fig 9: Effet de la nature et du dosage en fillers sur la résistance mécanique. filler 2 plus fin que filler 1.

exemple de composition et de performances obtenues:

- . sable alluvionnaire 0/4 1345 kg/m³
- . ciment CPJ 45 350 -
- . filler calcaire (filler 2, diamètre max = 40 µm) 250 -
- . eau courante 250 l/m³

maniabilité: 7 secondes

Rc28: 25.5 MPa

Rflexion28: 5.3 MPa

6.3 CONCLUSIONS:

Nous pouvons conclure qu'il n'existe pas encore de méthodologie de recherche de la composition du béton de sable comme c'est le cas par exemple pour le béton classique (Faury, Valette, Bolomey, Ferret...). Toutes les approches proposées sont basées exclusivement sur le tâtonnement ou sur les approximations successives.

Cette difficulté est liée, à notre avis, à la multitude de paramètres qui caractérisent les composants de ce béton (nature et granulométrie des sables, nature et finesse des fillers...) et à la multitude des objectifs recherchés par les auteurs.

Les différentes compositions obtenues ont donné des résistances mécaniques intéressantes (Rc28 ≥ 20 MPa dans la plupart des cas).

Il semble également qu'aucune approche basée sur le comportement du béton de sable vis à vis du traditionnel rapport E/C ou sur le rapport E/C+F caractérisant la teneur en eau de gâchage n'ait été proposée. C'est pourquoi, nous avons essayé d'exploiter cette voie et les résultats des différentes approches pour déterminer la composition optimale de notre béton.

METHODOLOGIE DE RECHERCHE DE LA
COMPOSITION OPTIMALE.

7.1 INTRODUCTION:

Comme nous l'avons écrit précédemment, la démarche consiste à rechercher une composition de béton de sable structural ayant comme principales caractéristiques: une résistance mécanique maximale à 28 jours et une maniabilité plastique facilitant la mise en oeuvre de ce béton sur chantier.

Pour cela, nous avons adopté une méthodologie basée sur le critère de la recherche d'une compacité maximale, comportant deux variantes et inspirée des travaux sur les bétons de sables effectués en 1988 par J.J.CHAUVIN et G. GRIMALDI [19].

Les auteurs ont travaillé sur deux types de sable (un sable de dune et un sable alluvionnaire). Ils ont fixé par ailleurs le dosage en ciment.

L'essentiel de leurs études a consisté à définir la quantité de filler nécessaire pour obtenir la compacité et la résistance maximales de leurs bétons.

La figure 10 illustre leurs résultats et montre l'évolution de la densité réelle du béton de sable en fonction du dosage en filler.

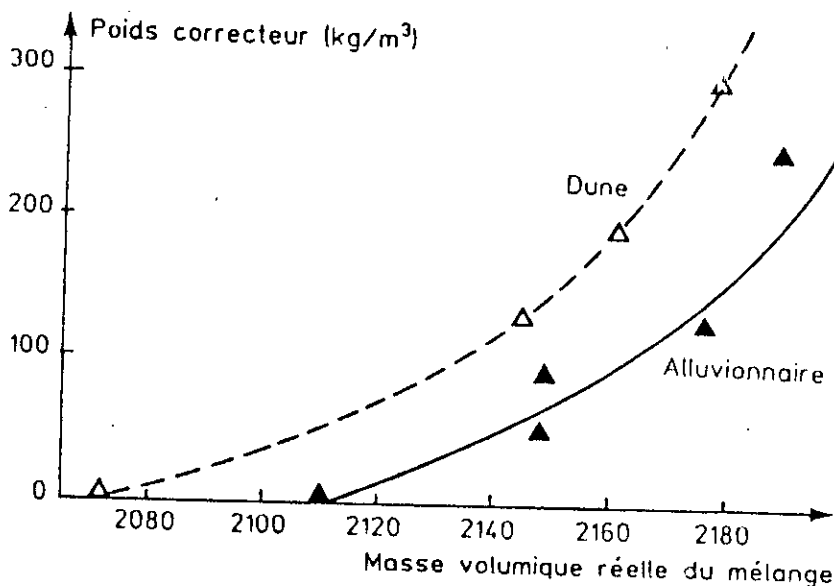


fig 10: Evolution de la densité réelle en fonction du dosage en filler pour deux types de sable.

La lecture de cette figure fait ressortir clairement que quelque soit le type de sable utilisé, la densité du béton (et donc sa compacité) augmente avec l'augmentation de la quantité de filler.

Or un gain de compacité s'accompagne d'un gain de résistance, mais ce dernier dépend d'autres paramètres, en particulier de la finesse du filler et de sa nature minéralogique.

De ce constat, nous avons opté pour une quantité fixe et maximale de filler (300 kg/m^3) pour les deux variantes afin d'atteindre une résistance maximale correspondante.

Pour chaque variante, nous avons utilisé deux types de fillers différents par leurs finesses et par leurs natures minéralogiques: un filler calcaire et un filler siliceux. Les deux types ont été caractérisés au chapitre 5.

En ce qui concerne la maniabilité plastique, nous la recherchons dans les deux variantes citées plus haut:

- . La première basée sur la variation du rapport E/C.
- . La seconde sur celle du rapport E/C+F (F étant la quantité de filler).

Nous décrivons ci-après les détails des deux variantes et les compositions qui en découlent.

7.2 DESCRIPTION DES DEUX VARIANTES:

7.2.1 Première variante

Nous fixons dans cette variante le dosage en filler à 300 kg/m³ et celui du ciment à 350 kg/m³. Ce dernier dosage est habituel pour les bétons courants de structures.

Nous cherchons avec ces deux paramètres fixes l'évolution de la maniabilité en faisant varier le rapport E/C de 0.80 à 1.20 par pas de 0.05.

Les différentes compositions qui en résultent sont regroupées dans le tableau 14 qui suit:

Rapport E/C	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
Dosage en ciment (kg/m ³)	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Sable dunaire (kg/m ³)	1249	1232	1215	1197	1180	1162	1145	1127	1110
Eau de gâchage (l/m ³)	281	298	315	333	350	368	385	403	420
Filler (kg/m ³)	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Tableau 14: Compositions du béton de sable dunaire obtenues à partir de la première variante.

7.2.2 Deuxième variante

La deuxième variante est basée sur le même critère de la recherche d'une compacité maximale mais diffère de la première par :

- i) la variation du dosage en ciment entre 300 et 400 kg/m³ au lieu de sa fixation à 350 kg/m³.
- ii) la recherche de la maniabilité plastique dans la variation du rapport E/C+F au lieu du rapport E/C.

Le rapport E/C+F caractérise en réalité la teneur en eau de gâchage de l'ensemble ciment et filler. Il semble donc évident qu'il faut rechercher la quantité d'eau nécessaire pour mouiller (C+F) au lieu de la quantité d'eau pour mouiller C seulement.

Avec ces nouvelles données, nous cherchons dans cette variante l'évolution de la maniabilité en faisant varier le rapport E/C+F dans la gamme 0.40 à 0.60 par pas de 0.05. Cette gamme correspond à celle de E/C dans les bétons traditionnels.

Le tableau 15 qui suit donne les différentes compositions obtenues par le recours à cette variante.

E/C+F	0.40			0.45			0.50			0.60		
ciment (kg/m ³)	300	350	400	300	350	400	300	350	400	300	350	400
sable (kg/m ³)	1340	1270	1200	1310	1238	1165	1280	1205	1130	1220	1140	1060
eau (l/m ³)	240	260	280	270	292	315	300	325	350	360	390	420
filler (kg/m ³)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Tableau 15: Compositions du béton de sable dunaire obtenues à partir de la seconde variante.

7.3 CONCLUSIONS:

L'objectif que nous nous sommes fixé au départ sera à rechercher dans 21 formulations différentes résultant des deux variantes.

- . Neuf (09) dans la première variante.
- . Douze (12) dans la seconde.

Si maintenant chaque formulation est étudiée avec les deux fillers, le nombre de compositions sera élevé à 42:

- . Dix huit (18) compositions résultant de la première variante.
- . Vingt quatre (24) compositions de la seconde.

Enfin pour que les résultats des essais de maniabilité et de résistance que nous voulons réaliser soient crédibles, il faut que chaque essai soit refait au moins trois (03) fois. Ce qui porte le nombre minimal d'éprouvettes à $42 \times 3 = 126$, sans que l'objectif recherché ne soit garanti. Les résultats obtenus pourraient s'avérer insatisfaisants et nécessiter un complément d'investigation.

Compte tenu de ce nombre important d'essais à réaliser et des grandes quantités de matériaux que cela nécessite, le problème du choix du moyen de mesure de la maniabilité et du type d'éprouvette d'essais de résistance est posé avec acuité.

Pour ces raisons, nous avons mis au point un moyen de mesure de la maniabilité simple, fiable et ne nécessitant pas énormément de matériaux.

Ce moyen de mesure ainsi que le choix des éprouvettes sont décrits dans le chapitre qui suit.

MISE AU POINT D'UNE METHODE EXPERIMENTALE
DE MESURE DE LA MANIABILITE DES BETONS DE
SABLE.

B.1 INTRODUCTION:

Le choix d'un moyen de mesure de la maniabilité est la plupart du temps dicté par la particularité du mélange, le plus souvent la taille maximale des grains entrant dans le mélange, ou encore le volume de la gâchée d'essai. Ainsi par exemple R.LANCHON [25] recommande de ne pas introduire de granulats de dimension D dans un espace dont la plus petite dimension n'est pas au moins égale à $4D$.

Avant d'aborder la description de la méthode expérimentale proposée pour la détermination de la maniabilité des bétons de sables, nous allons dans ce qui suit décrire sommairement quelques uns des moyens de mesure les plus couramment utilisés, et qui resteront à notre avis encore longtemps les moyens de base, tant ils ont fait leurs preuves dans le temps.

Beaucoup d'autres moyens de mesure plus ou moins connus existent et sont adaptés à des situations particulières. Pour en prendre connaissance, nous renvoyons le lecteur aux excellents ouvrages

de A.M.NEVILLE [26] ou celui de F.GORISSE [16] qui renseignent d'une manière très satisfaisante sur la question.

8.2 DESCRIPTION SOMMAIRE DES PRINCIPAUX MOYENS DE LA MESURE DE LA MANIABILITE DES BETONS:

8.2.1 Le slump-test (ou affaissement au cône d'Abrams)

Cet essai statique, appelé à juste titre le "ROI SLUMP" par François de LARRARD [27], demeure avec le consistomètre Vébé (qui en est d'ailleurs une version) l'essai le plus connu et le plus répandu sur les chantiers et les laboratoires du monde entier. Son utilisation est d'une simplicité record (fig 11).

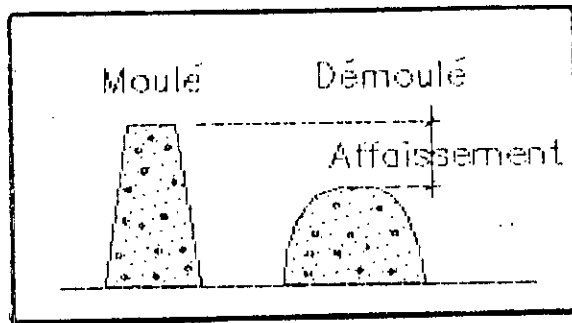


fig 11: Slump-test.

L'essai a fait l'objet en 1966 de la norme Française NFP 18451. L'indication donnée par l'essai (affaissement mesurée en cm) le relie qualitativement au mode de mise en oeuvre. Plus l'affaissement est important et plus le béton est maniable.

Il est sollicité pour les essais et contrôles des bétons dont les graviers ont une dimension maximale de 25mm. La contenance du tronc de cône est de 6 litres.

R.LHERMITE a écrit [28] que cet essai est un excellent indice de la quantité d'eau de gâchage, dont il permet de vérifier la régularité.

On lui fera quand même un reproche; c'est celui de confondre, à affaissement nul, un béton compactable lorsque sa consistance est à la limite du mesurable avec un béton totalement sec.

8.2.2 L'étalement à la table à secousses (ou flow-test)

Cet essai dynamique a fait lui aussi l'objet de la norme allemande DIN 1048. Il est utilisé pour les gros bétons (diamètre du plus gros granulats supérieur à 25mm). Son emploi est simple (voir fig 12).

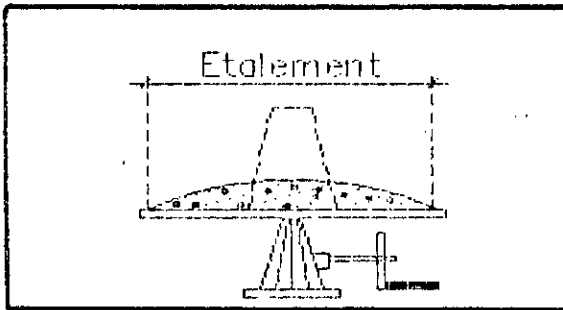


fig 12: table à secousses.

Plus l'étalement est important et plus le béton est maniable. La contenance du tronc de cône utilisé est de 5 litres.

G.DREUX, illustre référence en matière de béton pense [15] que cet essai n'est pas parfaitement représentatif de l'ouvrabilité, il donne, selon lui, des valeurs faibles pour les bétons présentant une bonne cohésion (ce qui est pourtant une qualité quant à l'ouvrabilité) et des valeurs plus élevées lorsque le béton a tendance à la ségrégation.

8.2.3 Le maniabilimètre LCPC

L'appareil mis au point par LEZY et LESAGE au laboratoire des ponts et chaussées de Paris (France), permet de lier la consistance d'une gâchée au temps mis par celle-ci pour atteindre un trait repère sur la cuve parallélépipédique, côté vibreur (voir fig 13).

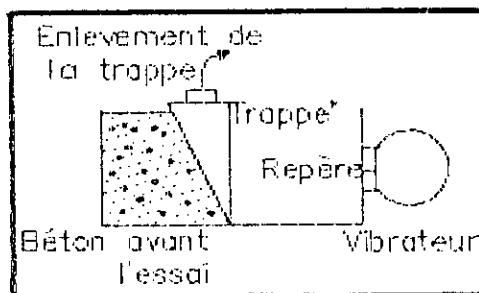


fig 13: Maniabilimètre LCPC.

Plus le béton est maniable et plus le temps de parcours est court. L'essai a fait l'objet de la norme Française NFP 15 452.

La gâchée nécessaire pour un essai est de 30 litres, ce qui est un handicap pour son utilisation dans les laboratoires.

Son domaine d'application le plus courant, c'est le contrôle du béton des ouvrages d'art et du béton de route dans les gros chantiers. Autrement dit, des bétons à gros granulats.

8.4 CONCLUSIONS:

Nous constatons que les moyens classiques de mesure de cette caractéristique ne sont pas vraiment adaptés pour répondre au mieux à notre préoccupation, puisque:

. Ils ont été fabriqués pour tester des bétons avec squelettes de graviers de 15 mm minimum de dimension. Ce qui explique, en partie peut être, les grands volumes des gâchées d'essais.

. Ils nécessitent, pour chaque test de maniabilité de grandes quantités de béton frais. Les 6 litres du cône d'Abrams ou les 30 litres du maniabilimètre rebutent bien de bonnes volontés.

. Ils ont un inconvénient commun, c'est d'être imprécis au delà et en deça du domaine plastique. Le reproche fait au slump-test, à affaissement nul est une parfaite illustration de cet inconvénient.

D'après ce qui précède, et compte tenu:

. du nombre important d'éprouvettes que nous avons à confectionner (et des quantités de fillers que ça nécessite) pour étudier la maniabilité de notre béton.

. de la taille maximum de ses granulats, qui ne dépasse pas 0,63mm.

Nous avons réalisé le montage du wattmètre différentiel dont le principe est décrit plus loin.

8.5 DETERMINATION DE LA MANIABILITE DU BETON DE SABLE A L'AIDE DE L'APPAREIL DE MESURE DE LA LIMITE DE LIQUIDITE:

Comme nous l'avons fait remarquer à la fin du chapitre 3, STAMAPOULOS et KOTZIAS [8] ont utilisé cet appareil pour des travaux circonstanciels sur le béton de sable dans le golfe d'arabie et en afrique du nord.

Le béton de sable étudié est composé de sable fin, de ciment et d'eau. Trois (03) types de sable ont été employés:

- sable de dune du golfe d'arabie: granularité 0/1 mm.
- sable de rivière: granularité 0/2 mm.
- sable de concassage: granularité 0/2 mm.

L'appareil utilisé est connu sous le nom d'"appareil de CASAGRANDE" (Photo N° 6). Il sert à mesurer conventionnellement la limite de liquidité des sols fins (taille maximale des grains: 0.42 mm).

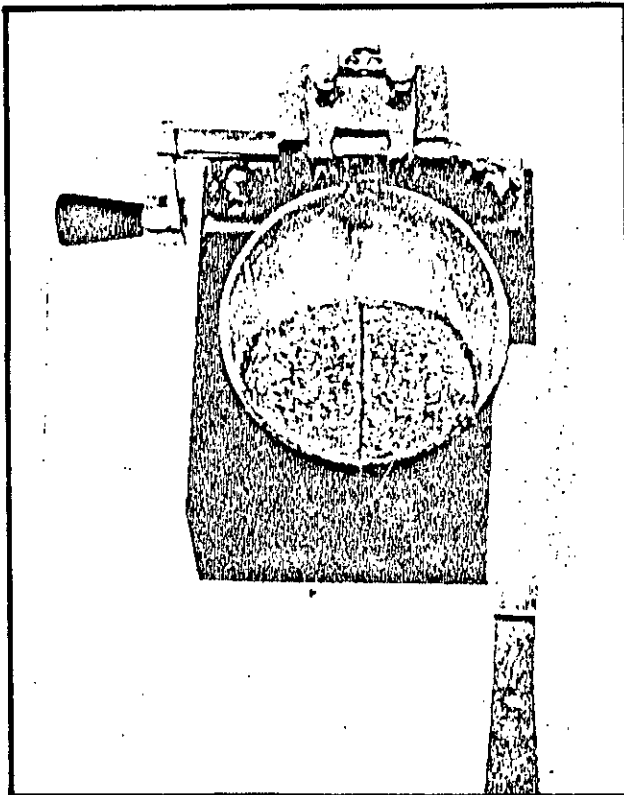


Photo N° 6: Appareil de CASAGRANDE.

La coupelle de l'appareil est remplie de béton de sable de la même manière que dans le cas d'un test ordinaire de mesure de la limite de liquidité des sols fins et telle que prescrit par la norme américaine ASTM D 423 régissant l'essai.

Une rainure est tracée à travers le béton selon le diamètre de la coupelle.

La maniabilité est alors mesurée par le nombre de chocs nécessaire pour la fermeture entière de la rainure, contrairement à l'essai normalisé où la limite de liquidité est mesurée lorsque la fermeture de la rainure atteint 1cm (voir figures 14 et 15).

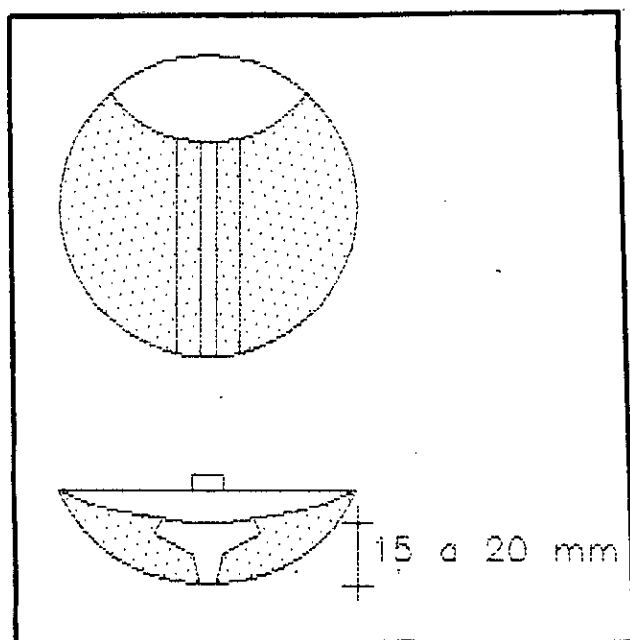


fig 14: Après rainure.

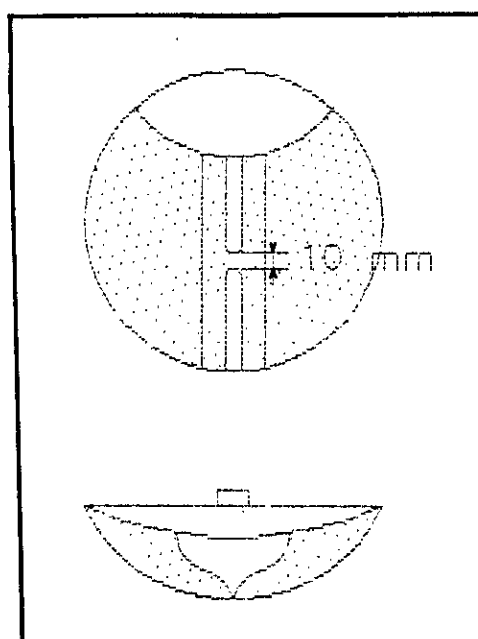


fig 15: Après choc.

Une corrélation entre les mesures de la maniabilité obtenus par le cône d'Abrams et par l'appareil de CASAGRANDE est alors établie (fig 16).

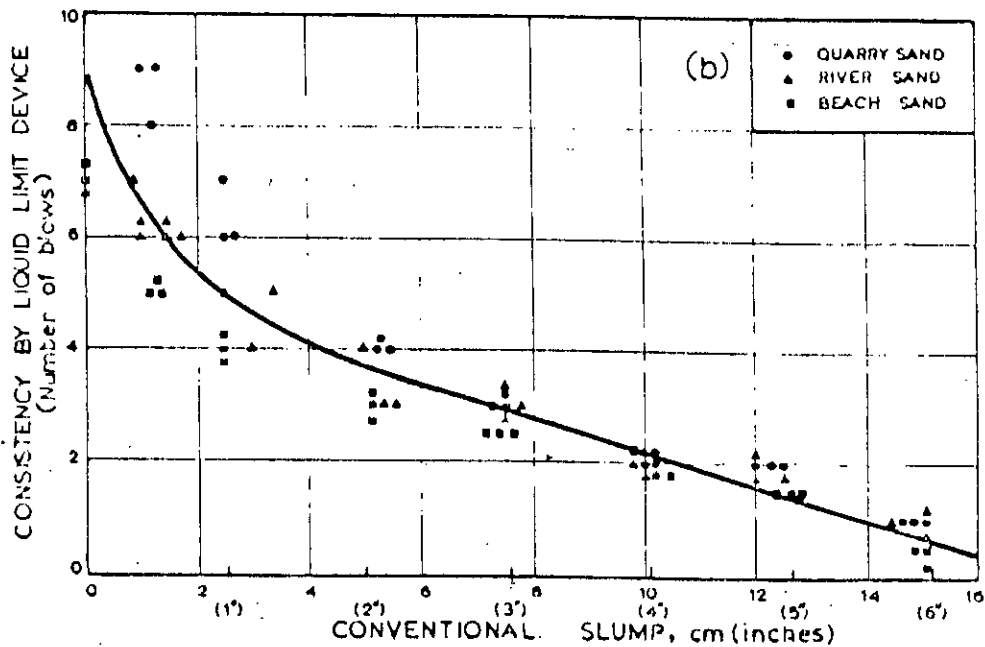


Fig 16: Relation entre les mesures de maniabilités obtenues par le cône d'Abrams et l'appareil de CASAGRANDE.

Ce moyen de mesure est tout à fait convenable, il permet de déterminer la maniabilité grâce à un appareil simple et peu coûteux.

D'un autre côté, l'essai nécessite une très petite quantité de matériau (50 g par essai). Les auteurs qui ont réalisé 32 essais de maniabilité n'ont utilisé que 2 kg de matériau alors qu'il leur a fallu pas moins de 320 kg pour réaliser ces mêmes essais au moyen du cône d'Abrams.

Deux interrogations nous ont cependant poussé à la prudence quant à son utilisation abusive:

- 1) La quantité de matériau utilisé pour un essai nous paraît trop petite et nous permet de nous interroger sur le degré de fiabilité de cet essai.
- 2) l'appareil de CASAGRANDE et plus précisément le diamètre de sa coupelle est conçu pour des matériaux ayant une taille maximale

de 0.42 mm (norme ASTM D 423). Peut-on alors l'utiliser sans précautions particulières pour un matériau de 2 mm de diamètre maximal (5 fois plus grand)?.

B.6 PRINCIPE DU WATTMETRE DIFFERENTIEL:

Le principe repose sur la mesure à l'aide d'un wattmètre, de la puissance électrique absorbée par le moteur d'un malaxeur à mortier au cours du malaxage du béton. Ce paramètre varie avec la consistance du béton. Il est d'autant plus élevé que le béton est ferme.

B.6.1 Description du montage

Le moteur du malaxeur est monté en série avec un ampèremètre et un wattmètre et en parallèle avec un voltmètre (fig 17).

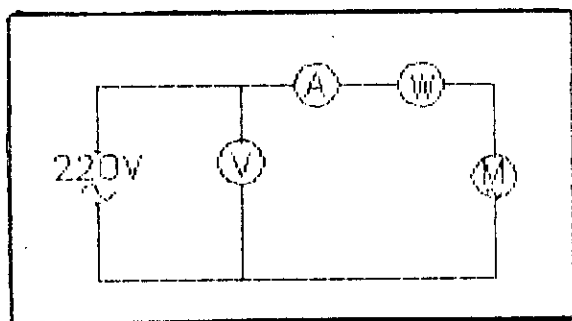


fig 17:Schéma du dispositif électrique.

Le wattmètre permet la lecture directe de la puissance totale développée par le moteur: puissance pour se faire tourner et puissance utile pour malaxer le béton à différentes consistances. La première est obtenue en faisant tourner le malaxeur à vide et la seconde par une simple opération de soustraction.

L'ampèremètre et le voltmètre permettent de leurs côtés les lectures de l'intensité du courant qui traverse le circuit et de la tension aux bornes du moteur. Grâce à leurs présences, la régularité des mesures de la puissance développée est vérifiée à tout moment.

B.6.2 Malaxeur à mortier utilisé

Le malaxeur (fig 18) a une contenance de 3 litres. Ce volume relativement réduit se prête très bien pour le malaxage des petites quantités du béton de sable que nécessite notre étude et permet d'éviter la perte d'éléments fins (ciment et fillers).

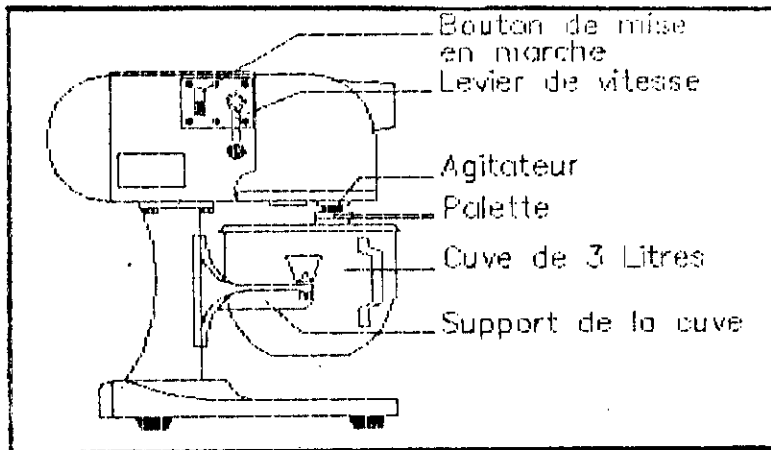


fig 18: Malaxeur à mortier utilisé. Les éprouvettes que nous avons adopté pour tester la résistance à la compression de notre béton (après mesure de sa maniabilité) sont du type cubique 7x7x7 obtenus par découpage à la tronçonneuse de prismes de dimensions 7x7x28 (fig 19).

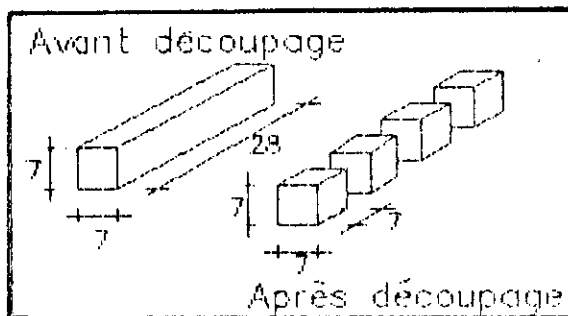


fig 19: éprouvettes utilisées pour essais de compression.

Ce type d'éprouvettes a été choisi pour pouvoir tester un maximum de compositions et utiliser un minimum de fillers. Ces derniers sont, en effet, très difficiles à obtenir en grandes quantités.

Pour revenir au malaxeur, sa palette est munie de deux types de mouvement:

- .un mouvement de rotation de vitesse égale à 139t/mn.
- .un mouvement planétaire de vitesse égale à 65t/mn.

Il est évident que plus la dimension D du béton est petite et plus il est utile de procéder à un mélange à vitesse élevée. Le mélange y gagne très sensiblement en plasticité pour la même quantité d'eau.

Pour un béton classique (D=20mm), la vitesse de rotation du malaxeur est de l'ordre de 15 à 20t/mn. F.GORISSE [5], pour son micro-béton (D=1,6mm) a proposé 160 secondes de temps de malaxage par gâchée avec une vitesse de 44t/mn pendant 120 secondes et 84t/mn pendant le reste du temps.

La vitesse de rotation que nous avons adopté pour malaxer notre béton paraît donc tout à fait convenable.

8.7 ETALONNAGE DU WATTMETRE DIFFERENTIEL :

Le wattmètre différentiel a été étalonné au moyen du cône d'Abrams. Celui-ci étant le plus pratique et le plus pratiqué comme nous l'avons vu précédemment.

Pour cela, douze (12) compositions différentes de béton de sable dunaire de base (ou de référence) ont été préparées avec des consistances allant de la plus ferme à la plus molle (E/C variant de 0,40 à 1.20), voir tableau 16.

Le béton de référence est constitué de sable dunaire, de ciment et d'eau. les fillers ont été volontairement omis dans le but d'avoir un étalonnage standard, valable pour n'importe quel type de fillers d'ajout.

Le dosage en ciment a été choisi constant (C=350 kg/m³) étant donné que c'est un dosage habituel pour béton de structure.

E/C	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	1,00	1,03	1,06	1,10	1,20
C(kg/m ³)	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
E(kg/m ³)	140	175	210	245	280	315	333	350	360	371	385	420
S(kg/m ³)	1690	1655	1620	1585	1550	1515	1490	1480	1470	1459	1445	1410

Tableau 16:Composition au m³ du béton de sable de référence.

Ces 12 compositions ont été soumises au slump-test et au wattmètre différentiel. Une correspondance systématique a été alors établie entre l'affaissement au cône et la puissance utile développée par le moteur du malaxeur.

L'opération au wattmètre différentiel est passée par les étapes décrites sur la figure 20.

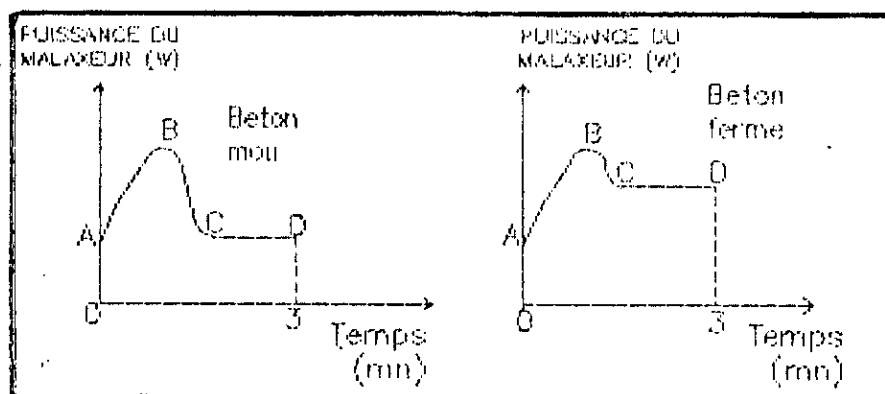


fig 20: courbe caractéristique d'un cycle complet pour la fabrication d'une gâchée.

OA: Puissance du malaxeur tournant à vide.

AB: Introduction des composants du béton et malaxage du mélange.

BC: Homogénéisation du mélange. L'eau se répartit dans le mélange.

CD: Mélange homogène. La puissance absorbée se stabilise.

La mesure de la puissance absorbée a été effectuée systématiquement pour toutes les gâchées à 3 minutes du début de l'essai, après s'être assuré de la stabilité de la mesure.

Notons que les mélanges obtenus après malaxage sont très homogènes.

8.8 RESULTATS EXPERIMENTAUX:

Le tableau 17 et la figure 21 montrent les résultats expérimentaux obtenus.

La puissance utile du malaxeur nécessaire pour malaxer le mélange est désignée par P_u , avec:

$$P_u = P_f - P_i$$

P_f : Puissance finale développée par le malaxeur

P_i : Puissance initiale.

No	E/C	I (amp)	U (volt)	Pi (watt)	Pf (watt)	Pu (watt)	Aff (cm)
01	0,40	1,65	230	100	240	140	0,00
02	0,50	1,65	232	100	220	120	0,00
03	0,60	1,67	232	100	205	105	0,00
04	0,70	1,65	232	100	192	92	1,00
05	0,80	1,65	232	100	165	65	2,60
06	0,90	1,65	235	100	170	70	4,20
07	0,95	1,63	232	100	157	57	5,00
08	1,00	1,65	232	100	142	42	9,00
09	1,03	1,65	232	100	125	25	9,20
10	1,06	1,65	230	100	112	12	11,80
11	1,10	1,67	232	100	100	00	12,20
12	1,20	1,65	232	100	107	07	15,00

Tableau 17: Résultats d'étalonnage du wattmètre différentiel.

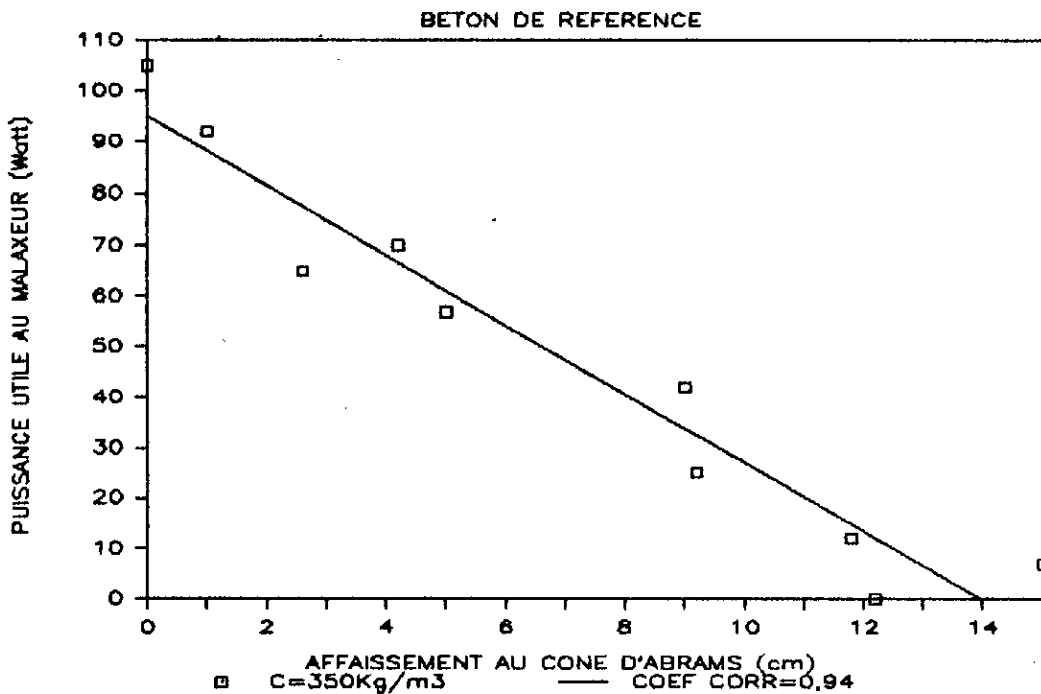


fig 21: Relation puissance utile du malaxeur-affaissement au cône d'Abrams.

On constate sur la figure 21 que la relation puissance utile du malaxeur-affaissement au cône d'Abrams est une relation quasi-linéaire (coefficient de corrélation égal à 0.94). Plus le béton de sable est mou (augmentation de l'affaissement au cône) et moins le malaxeur développe de puissance.

Nous donnons dans le tableau 18 qui suit les correspondances chiffrées des différents domaines de consistance du béton de sable de référence étudié.

Domaine de consistance	Affaissement au cône d'Abrams (cm)	Puissance utile du malaxeur (W)
BETON FERME	0 - 5	0 - 27
BETON PLASTIQUE	5 - 10	27 - 61
BETON MOU	10 - 15	> 61

Tableau 18: Correspondance des domaines de consistance.

8.9 CONCLUSIONS:

Le wattmètre différentiel utilisé permet de rendre compte d'une manière simple de la consistance du béton de sable.

Le procédé n'utilise que peu de matériau: 3 kg (le poids d'une éprouvette 7x7x28) au lieu de 14 kg nécessaires au cône d'Abrams. Cette économie de matériau et notamment de filler (très difficile à obtenir manuellement dans le cas du filler calcaire) est très appréciable. Elle nous permet de réaliser un maximum d'essais de maniabilité et de préparer avec les mêmes gâchées un maximum d'éprouvettes pour les essais de résistance.

D'un autre côté, le wattmètre différentiel donne des informations complémentaires lorsque la consistance du béton étudié est ferme ou bien molle.

CHOIX DE LA COMPOSITION OPTIMALE.

9.1 INTRODUCTION:

La composition optimale sera celle qui se trouvera du point de vue maniabilité dans le domaine plastique et qui aura du point de vue mécanique la meilleure résistance à la compression à 28 jours.

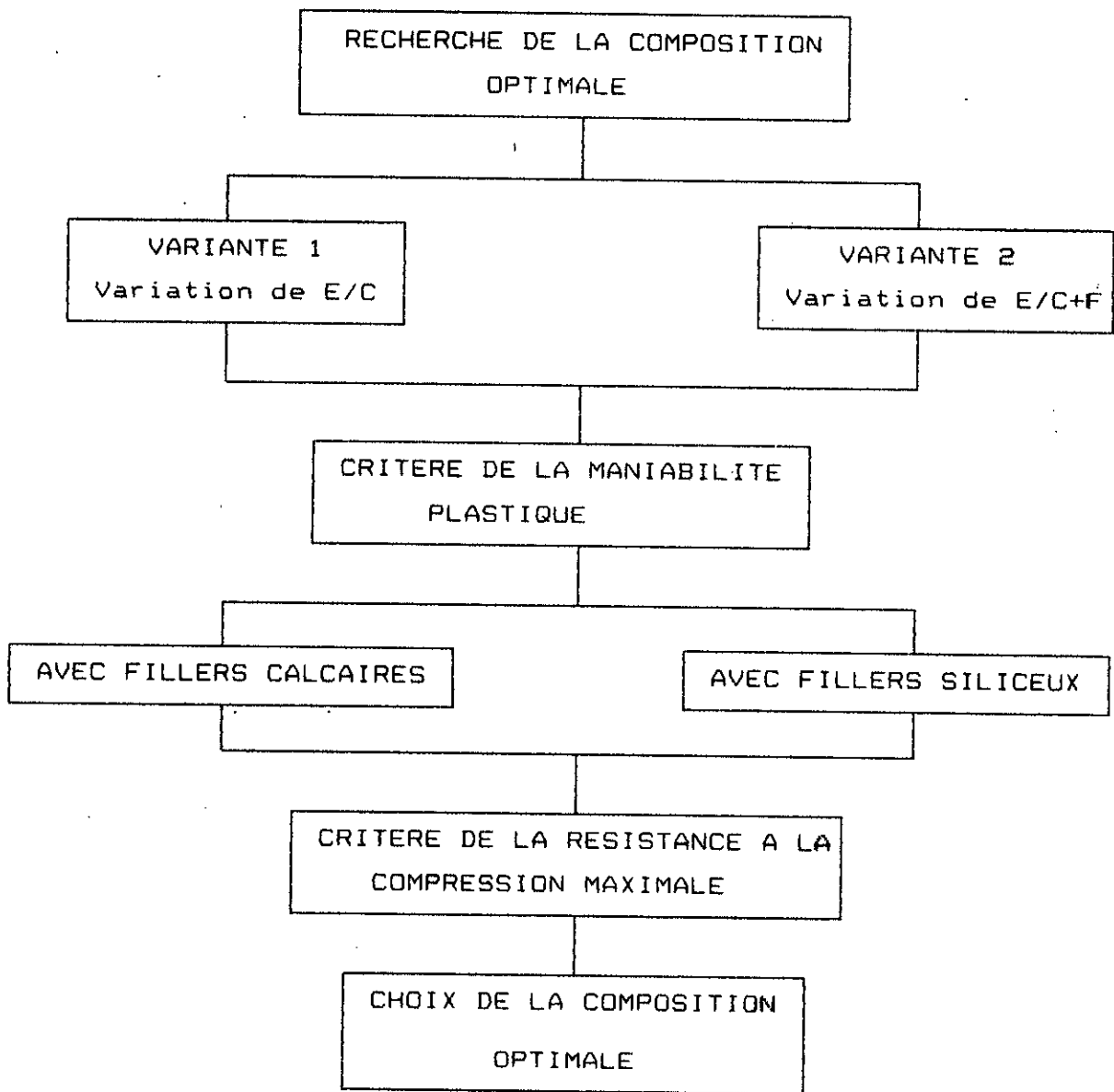
Cette composition sera à rechercher parmi les 42 compositions établies dans le chapitre 7, en l'occurrence:

- 18 compositions résultant de la variante 1 (soit 9 avec chaque filler).
- 24 compositions résultant de la variante 2 (soit 12 avec chaque filler).

L'organigramme qui suit donne les différentes étapes suivies pour l'obtention de la composition optimale.

Sur cette composition seront réalisés par la suite d'autres essais physico-mécaniques:

- Essai d'extensométrie,
- Essai d'adhérence avec les aciers,
- Comportement à la flexion,
- Comportement au cisaillement.



ORGANIGRAMME DE RECHERCHE DE LA COMPOSITION OPTIMALE DU
BETON DE SABLE DUNAIRE A L'AIDE DES DEUX VARIANTES.

9.2 ETUDE DES COMPOSITIONS RESULTANT DE LA VARIANTE 1:

Ces compositions sont basées sur la variation du rapport E/C. Elles sont décrites dans le tableau 14, chapitre 7.

9.2.1 Compositions avec les fillers calcaires

9.2.1.1 Maniabilité

Elle est étudiée au moyen du wattmètre différentiel dont le

principe, l'étalonnage et l'instrumentation ont été décrits précédemment.

Les résultats chiffrés sont regroupés dans le tableau 19.

L'évolution de la maniabilité avec la variation du rapport E/C est indiquée par la courbe de la figure 22.

9.2.1.2 Résistance à la rupture par compression

Elle est déterminée sur des éprouvettes cubiques $7 \times 7 \times 7$ confectionnées dans des moules prismatiques $7 \times 7 \times 28$ puis découpées en cubes de $7 \times 7 \times 7$ à l'aide d'une tronçonneuse.

Après décoffrage à 24 heures, ces moules sont maintenus dans un bac d'eau jusqu'au 27^{ème} jour.

Les essais ont été réalisés à 28 jours d'âge.

Les échantillons ont été écrasés sous une presse hydraulique du CTC sud (agence de Laghouat), très récemment étalonnée.

La vitesse de chargement adoptée est de 10KN /seconde, vitesse habituelle pour de tels essais.

Chaque essai a été refait trois fois et le résultat moyen a été pris en compte (voir tableau 19 et figure 23).

symboles utilisés dans le tableau 19:

I : Intensité du courant qui traverse le circuit (Amp).

U : Tension aux bornes du moteur du malaxeur (Volt).

Pi : Puissance initiale (à vide) fournie par le moteur du malaxeur (Watt).

Pf : Puissance finale (totale) fournie par le moteur du malaxeur lors du malaxage (Watt).

Pu : Puissance utile: $P_f - P_i$ (Watt).

Frupt : Force nécessaire pour rompre l'éprouvette (KN).

Rrupt : Résistance à la rupture de l'éprouvette (MPa).

Rrmoy: Résistance moyenne à la rupture de trois (03) essais (MPa).

N° épr	Rapport E/C	I (ampère)	U (volt)	Pi (watt)	Pf (watt)	Pu (watt)	Frupt (KN)	Rrupt (MPa)	Rmoy (MPa)
1	0.80	1.64	230	100	137	37	89 85 87	18.16 17.35 17.76	17.76
2	0.85	1.62	230	100	120	20	82 78 77	16.73 15.92 15.71	16.12
3	0.90	1.62	230	100	111	11	67 68 -	13.67 13.88 -	13.78
4	0.95	1.62	230	100	106	06	63 62 63	12.86 12.65 12.86	12.79
5	1.00	1.60	232	100	103	03	50 57 60	10.20 11.63 12.24	11.36
6	1.05	1.62	234	100	101	01	43 46 50	8.77 9.39 10.20	9.45
7	1.10	1.62	232	100	100	00	39 39 38	7.96 7.96 7.76	7.89
8	1.15	1.62	234	100	100	00	31 32 32	6.33 6.53 6.53	6.46
9	1.20	1.60	230	100	100	00	34 30 31	6.94 6.12 6.33	6.46

Tableau 19: Résultats des études de maniabilité et de résistance à la rupture par compression. (variante 1 avec fillers calcaires).

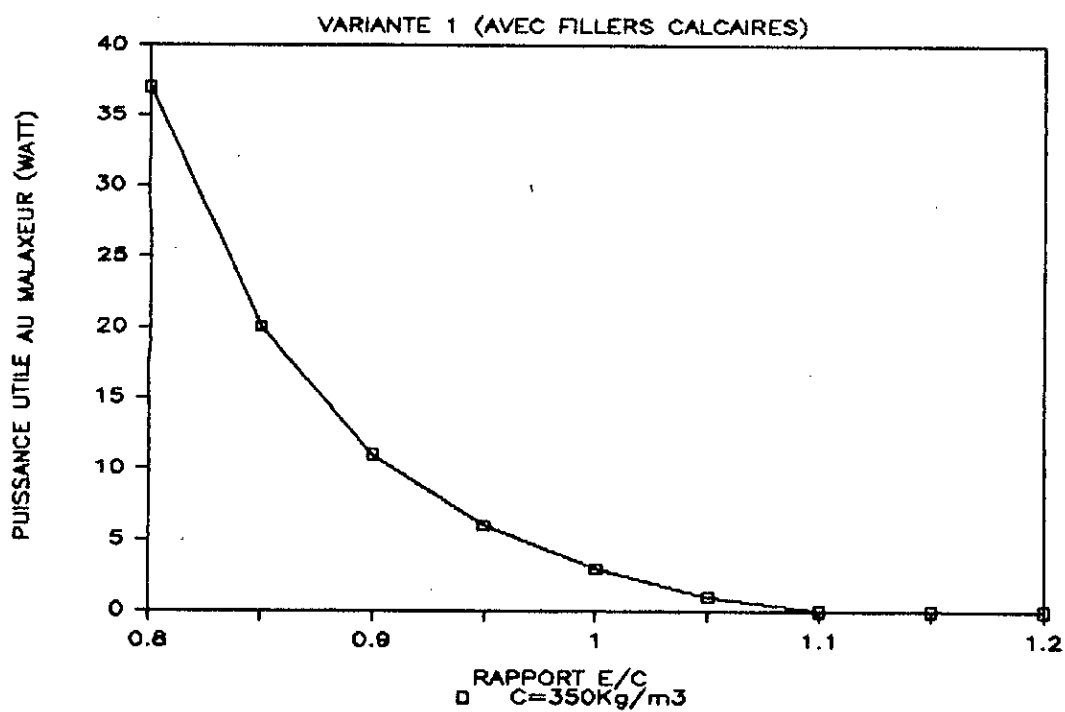


Fig 22: Variation de la maniabilité avec le rapport E/C

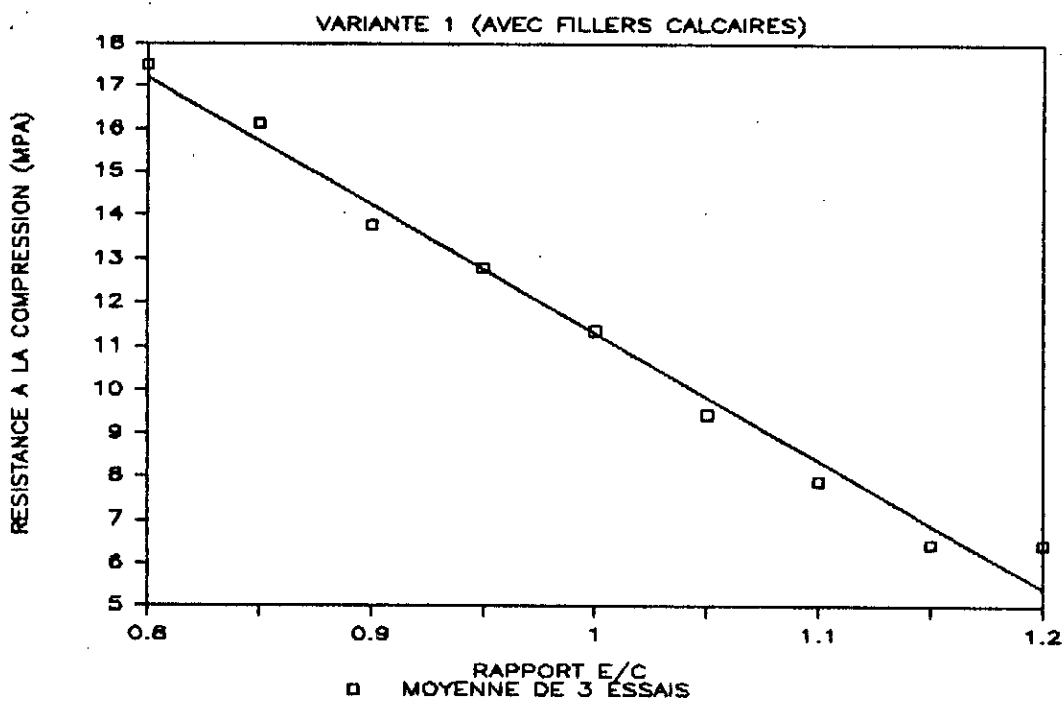


Fig 23: Variation de la résistance à la compression avec le rapport E/C

9.2.2 Compositions avec les fillers siliceux

Il s'agit de la même formulation que celle obtenue avec les fillers calcaires, seulement dans les compositions les fillers calcaires sont remplacés par les fillers siliceux.

9.2.2.1 Maniabilité

De la même manière que précédemment, nous obtenons les résultats chiffrés du tableau 20.

La courbe de la figure 24 montre l'évolution de la maniabilité avec la variation du rapport E/C.

9.2.2.2 Résistance à la rupture par compression

La même procédure que précédemment a donné les résultats du tableau 20 et la courbe de la figure 25 ci-après.

N° épr	Rapport E/C	I (ampère)	U (volt)	Pi (watt)	Pf (watt)	Pu (watt)	Frupt (KN)	Rrupt (MPa)	Rmoy (MPa)
1	0.80	1.68	232	100	153	53	75	15.30	15.30
							73	14.90	
							77	15.71	
2	0.85	1.67	235	100	146	46	60	12.24	12.04
							58	11.84	
							57	12.04	
3	0.90	1.68	232	100	135	35	58	11.84	11.22
							52	10.61	
							-	-	
4	0.95	1.65	233	100	130	30	49	10.00	10.00
							49	10.00	
							-	-	
5	1.00	1.65	235	100	120	20	39	7.96	8.16
							41	8.37	
							-	-	
6	1.05	1.65	232	100	110	10	37	7.55	7.55
							38	7.75	
							36	7.35	
7	1.10	1.65	232	100	105	05	30	6.12	6.53
							34	6.94	
							-	-	
8	1.15	1.65	232	100	101	01	28	5.71	5.71
							-	-	
							-	-	
9	1.20	1.67	232	100	100	00	27	5.51	5.44
							26	5.31	
							27	5.51	

Tableau 20: Résultats des études de maniabilité et de résistance à la rupture par compression. (variante 1 avec fillers siliceux).

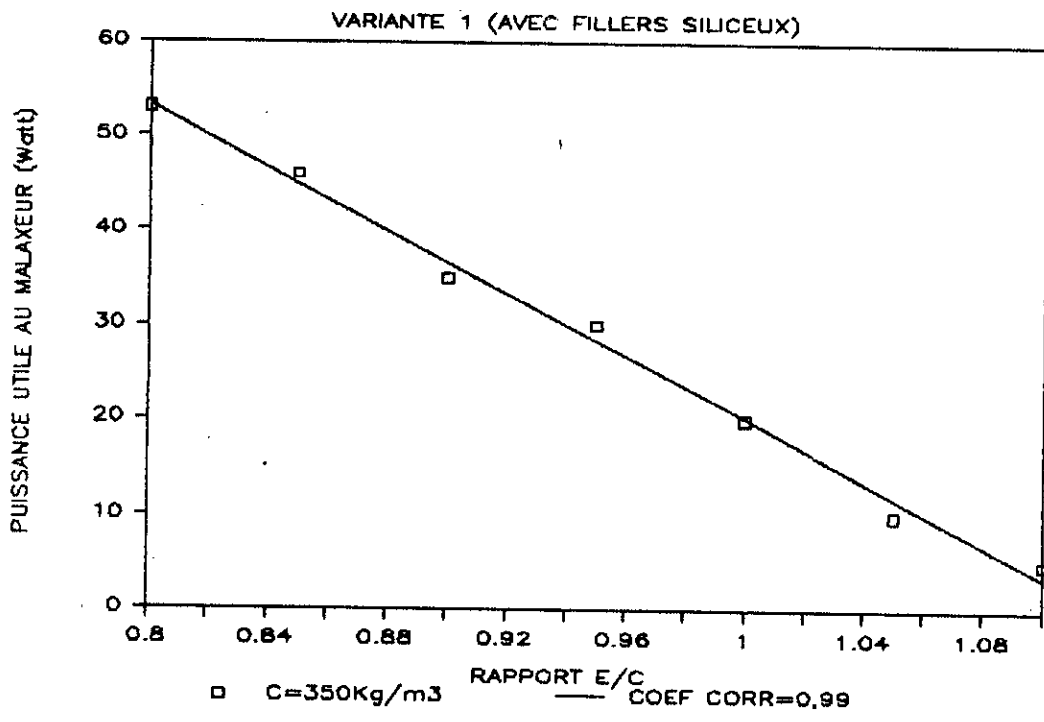


Fig 24: Variation de la maniabilité avec le rapport E/C

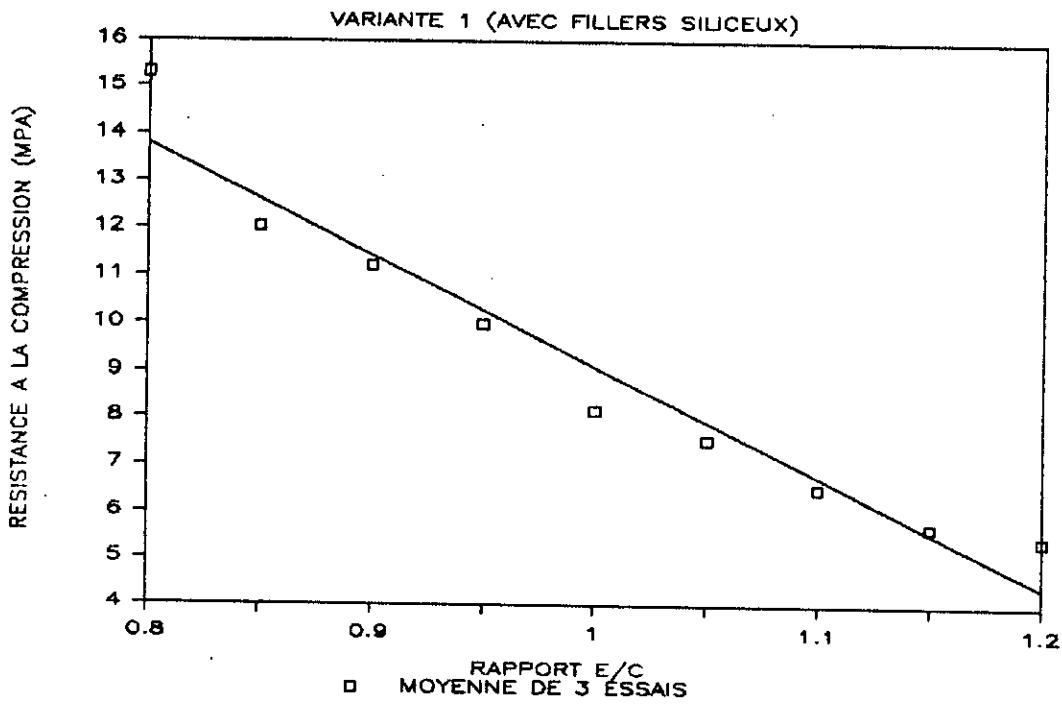


Fig 25: Variation de la résistance à la compression avec le rapport E/C

9.3 ETUDE DES COMPOSITIONS RESULTANT DE LA VARIANTE 2:

Ces compositions sont basées sur la variation du rapport E/C+F. Chaque rapport est étudiée avec trois (03) dosages en ciment différents (300, 350 et 400 kg/m³). Voir la formulation dans le tableau 15 au chapitre 7.

Les essais de maniabilité (pour les deux types de fillers) ont été réalisés, comme pour la variante 1, au moyen du wattmètre différentiel.

Ceux relatifs à la résistance à la compression ont été réalisés en même temps et dans les mêmes conditions que ceux de la variante 1.

Tous les résultats chiffrés sont regroupés dans les tableaux 21 et 22 et traduits par les courbes des figures 26, 27, 28 et 29 qui suivent.

N° épr	$\frac{E}{C+F}$	$\frac{E}{C}$ correspondant	I (A)	U (V)	Pi (W)	Pf (W)	Pu (W)	Frupt (KN)	Rrupt (MPa)	Rrmoy (MPa)
1	0.40	0.80	1.62	232	100	157	57	70 72 -	14.28 14.69 -	14.49
2	0.40	0.74	1.62	230	100	150	50	82 85 90	16.73 17.35 18.37	17.48
3	0.40	0.70	1.64	232	100	135	35	82 85 -	18.98 19.38 -	19.18
4	0.45	0.90	1.62	232	100	132	32	60 65 60	12.24 13.26 12.24	12.58
5	0.45	0.83	1.60	232	100	126	26	71 70 83	14.49 14.28 16.94	15.24
6	0.45	0.79	1.62	230	100	117	17	85 84 82	17.35 17.14 16.73	17.07
7	0.50	1.00	1.62	232	100	115	15	44 42 37	8.98 8.57 7.55	8.37
8	0.50	0.93	1.60	230	100	108	08	46 48 48	9.39 9.80 9.80	9.66
9	0.50	0.88	1.60	230	100	103	03	58 57 57	11.84 11.63 11.63	11.70
10	0.60	1.20	1.62	230	100	100	00	30 28 24	6.12 5.71 4.90	5.58
11	0.60	1.11	1.62	230	100	100	00	36 33 31	7.35 6.73 6.33	6.80
12	0.60	1.05	1.62	230	100	100	00	40 40 43	8.16 8.16 8.78	8.36

Tableau 21: Résultats des essais de maniabilité et de résistance à la rupture par compression (variante 2, fillers calcaires).

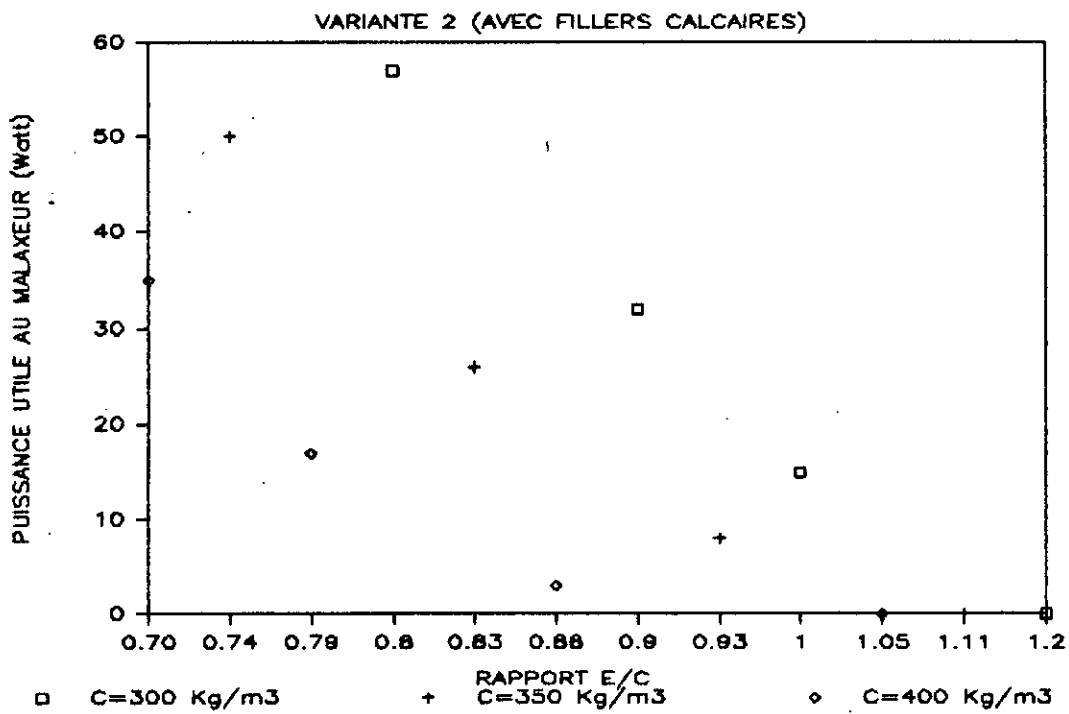


Fig 26: Variation de la puissance utile du malaxeur avec le rapport E/C (Fillers calcaires).

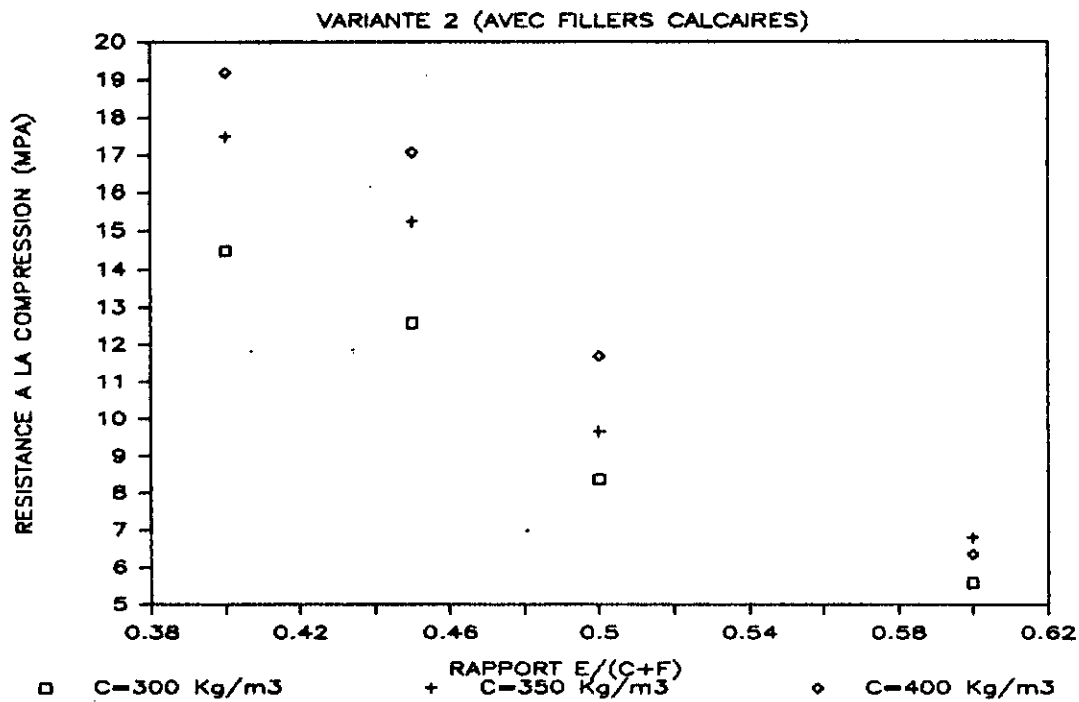


Fig 27: Variation de la résistance à la compression avec le rapport E/C+F (Fillers calcaires).

N° épr	$\frac{E}{C+F}$	$\frac{E}{C}$ correspondant	I (A)	U (V)	Pi (W)	Pf (W)	Pu (W)	Frupt (KN)	Rrupt (MPa)	Rmoy (MPa)
1	0.40	0.80	1.67	232	100	160	60	46 54 -	9.39 11.02 -	10.21
2	0.40	0.74	1.65	230	100	155	55	68 74 -	13.88 15.10 -	14.49
3	0.40	0.70	1.65	232	100	150	50	83 83 -	16.94 16.94 -	16.94
4	0.45	0.90	1.65	231	100	147	47	43 48 44	8.78 9.80 8.98	9.18
5	0.45	0.83	1.65	232	100	145	45	65 61 63	13.27 12.45 12.86	12.86
6	0.45	0.79	1.65	232	100	136	36	80 60 -	16.32 12.24 -	14.28
7	0.50	1.00	1.65	230	100	140	40	35 31 33	7.14 6.33 6.73	6.73
8	0.50	0.93	1.66	230	100	127	27	47 44 44	9.59 8.98 8.98	9.18
9	0.50	0.88	1.65	232	100	122	22	57 57 51	11.63 11.63 10.41	11.22
10	0.60	1.20	1.66	232	100	115	15	27 28 -	5.51 5.71 -	5.61
11	0.60	1.11	1.67	232	100	105	05	32 33 31	6.53 6.73 6.33	6.53
12	0.60	1.05	1.65	232	100	100	00	37 41 -	7.55 8.37 -	7.96

Tableau 22: Résultats des essais de maniabilité et de résistance à la rupture par compression (variante 2, fillers siliceux).

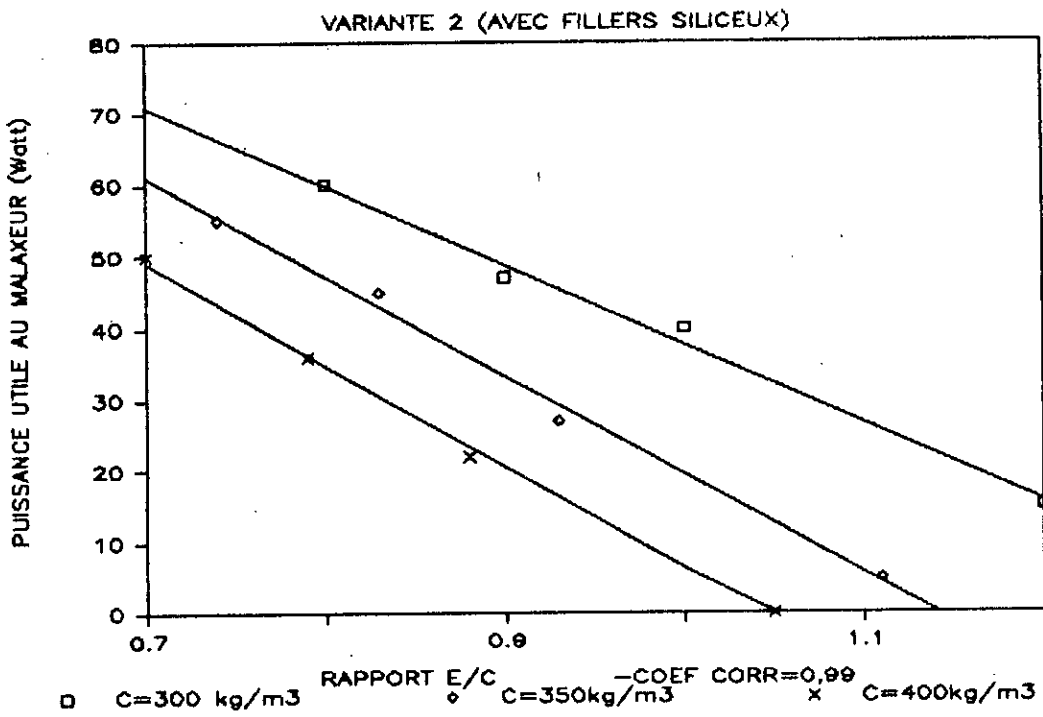


Fig 28: Variation de la puissance utile du malaxeur avec le rapport E/C (Fillers siliceux).

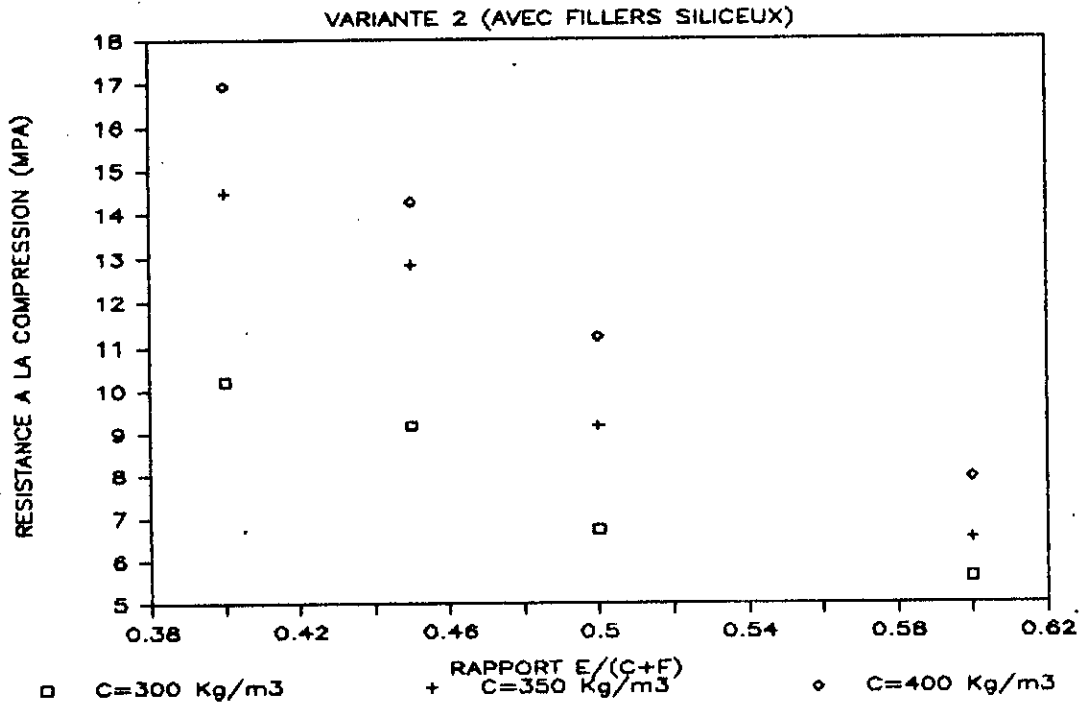


Fig 29: Variation de la résistance à la compression avec le rapport E/C+F (Fillers siliceux).

9.4 CONCLUSIONS:

9.4.1 Exploitation des résultats

Afin de conclure et de procéder au choix de la composition optimale du béton de sable pour éléments de structures, nous regroupons dans le tableau 23 qui suit les paramètres de comparaison et de choix.

Ce choix se fera parmi toutes les compositions ayant une maniabilité plastique: Puissance utile au malaxeur variant entre 27 et 61 watt et correspondant à un affaissement au cône variant entre 5 et 10 cm.

	FILLERS CALCAIRES					FILLERS SILICEUX				
	Pu (W)	Aff éq (cm)	$\frac{E}{C}$	$\frac{E}{C+F}$	Rcz8 (MPa)	Pu (W)	Aff éq (cm)	$\frac{E}{C}$	$\frac{E}{C+F}$	Rcz8 (MPa)
VARIANTE 1	37	8.55	0.80	0.43	17.76	53	6.20	0.80	0.43	15.30
	-	-	-	-	-	46	7.20	0.85	0.44	12.04
	-	-	-	-	-	35	8.20	0.90	0.48	11.22
	-	-	-	-	-	30	9.50	0.95	0.51	10.00
VARIANTE 2	57	5.60	0.80	0.40	14.49	60	5.10	0.80	0.40	10.21
	50	6.60	0.74	0.40	17.48	55	5.90	0.74	0.40	14.49
	35	8.80	0.70	0.40	19.18	50	6.60	0.70	0.40	16.94
	32	9.20	0.90	0.45	12.58	47	7.00	0.90	0.45	9.18
	-	-	-	-	-	45	7.30	0.83	0.45	12.86
	-	-	-	-	-	36	8.70	0.79	0.45	14.28
	-	-	-	-	-	40	8.00	1.00	0.50	6.73
	-	-	-	-	-	27	10.00	0.93	0.50	9.18

Tableau 23: Résistances à la compression à 28 jours de toutes les compositions ayant une maniabilité plastique.

A la lecture du tableau 23, on constate que pour une même formulation, les résistances mécaniques obtenues avec les fillers calcaires sont (à maniabilités égales) supérieures à celles obtenues avec les fillers siliceux. La différence est de l'ordre de:

- . 13 % pour la première variante
- . 20 % pour la seconde variante.

L'explication réside très probablement dans la finesse et la nature des fillers.

Les fillers calcaires étant plus fins, ils assurent une meilleure compacité au mélange. Nous confirmons ainsi les conclusions que nous avons décrit au début du chapitre 5, formulées par J.J.CHAUVIN et G.GRIMALDI [19].

Par ailleurs, l'excellente affinité entre la pâte de ciment constituée d'environ 80 % de calcaire et les fillers calcaires (Z.R.UNIKOWSKI [20]) apporte au mélange une meilleure cohésion.

Du point de vue maniabilité, les compositions avec fillers calcaires sont (à résistances égales) plus maniables que celles avec fillers siliceux. La différence au cône d'Abrams équivalent est de l'ordre de:

- . 27 % pour la première variante
- . 18 % pour la seconde variante.

Il est très vraisemblable que cela soit dû au fait que les fillers calcaires sont plus avides en eau que les fillers siliceux (la capacité d'absorption d'eau des premiers est supérieure à celle des seconds).

9.4.2 Choix de la composition optimale

Avec la variante 1, la composition optimale répondant aux critères de maniabilité plastique et de résistance à la rupture par compression maximale est (tableau 23):

- . Dosage en ciment 350 kg/m³
- . Sable dunaire 1249 kg/m³
- . Eau de gâchage 281 l/m³
- . Filler calcaire 300 kg/m³

Soit: E/C = 0.80

Rc28 = 17.76 MPa

Affaissement équivalent: 8.55 cm.

Avec la variante 2, la composition répondant aux mêmes critères est (tableau 23):

- . Dosage en ciment 400 kg/m³
- . Sable dunaire 1200 kg/m³
- . Eau de gâchage 280 l/m³
- . Filler calcaire 300 kg/m³

Soit: $E/(C+F) = 0.40$

$E/C = 0.70$

$R_{c28} = 19.18 \text{ MPa}$

Affaissement équivalent: 8.80 cm.

La différence dans R_{c28} n'étant que de 7.5 % , nous avons préféré adopter la première composition (avec $C = 350 \text{ kg/m}^3$) plutôt que la seconde (avec $C = 400 \text{ kg/m}^3$). Le dosage en ciment de la première est plus habituel que celui de la seconde. En outre, il est plus économique.

Avec la composition choisie, nous avons repris les essais de maniabilité au cône d'Abrams et les essais de rupture par compression sur des éprouvettes cylindriques normalisées 16x32 (NFP 18-106).

Les résultats moyens de trois (03) essais sont:

Affaissement au cône d'Abrams: 9.3 cm

$R_{c28} : 17.02 \text{ MPa}$.

RECAPITULATIF DE LA COMPOSITION CHOISIE ET
DE SES CARACTERISTIQUES

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| • Dosage en ciment | 350 kg/m^3 |
| • Sable dunaire | 1249 kg/m^3 |
| • Eau de gâchage | 281 l/m^3 |
| • Filler calcaire | 300 kg/m^3 |

Soit: $E/C = 0.80$

$R_{c28} = 17.02 \text{ MPa}$

Affaissement au cône : 9.30 cm.

QUATRIEME PARTIE

COMPORTEMENT DU BETON DE
SABLE STRUCTUREL.

CHAPITRE 10

CARACTERISTIQUES MECANQUES ET PHYSIQUES DU BETON DE SABLE DUNAIRE.

10.1 INTRODUCTION:

Parmi les caractéristiques importantes du béton de sable dunaire adopté dans le chapitre précédent, nous avons choisi de déterminer (en plus de la résistance à la compression à 28 jours):

- les déformations relatives sous charge, afin d'apprécier:
 - . la loi de comportement contrainte-déformation,
 - . le module d'élasticité.
- l'adhérence avec les aciers, pour pouvoir apprécier la force de rupture de liaison entre le béton de sable dunaire et les aciers.

D'autres caractéristiques non moins importantes pourraient être étudiées ultérieurement et dans un autre cadre:

- . le retrait et gonflement,
- . le fluage,
- . la résistance à la rupture par traction, à 28 jours.

10.2 DEFORMATIONS RELATIVES SOUS CHARGE:

10.2.1 Loi de comportement contrainte-déformation

Elle a été déterminée au moyen d'essais de compression monoaxiale

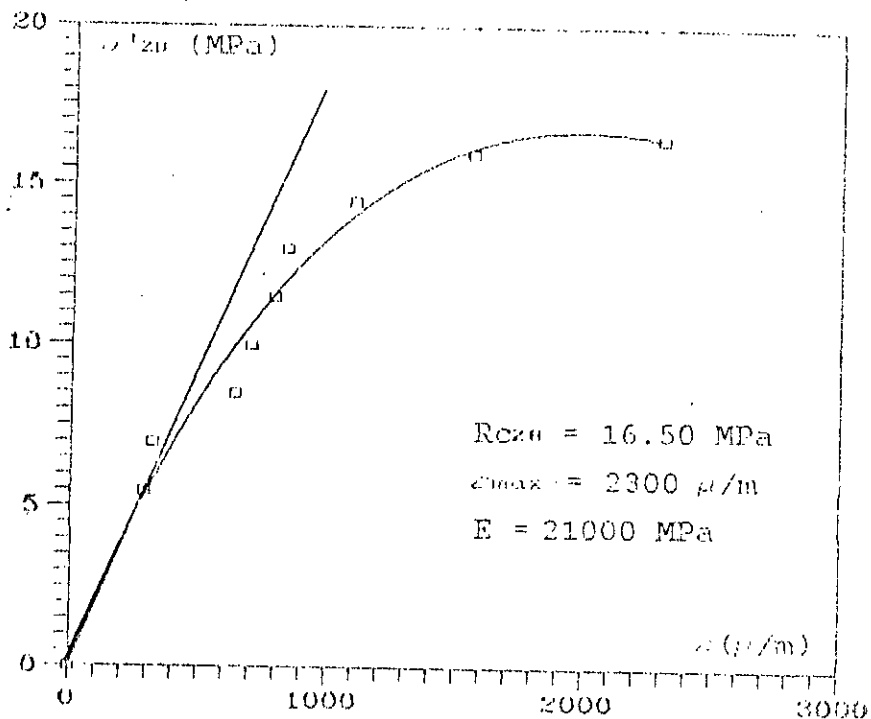


fig 31: Evolution de la déformation avec l'augmentation de la contrainte de chargement.

10.2.1.3 Conclusions:

En se référant à la courbe de la figure 31, nous pouvons constater que globalement le comportement du béton de sable dunaire est similaire à celui des bétons classiques: les phases élastique et plastique sont nettement observées.

D'un autre côté, le mode de rupture observé sur les éprouvettes testées est celui qu'on appelle communément le mode 1 ou encore la rupture en tonneau (voir illustration dans le schéma qui suit).

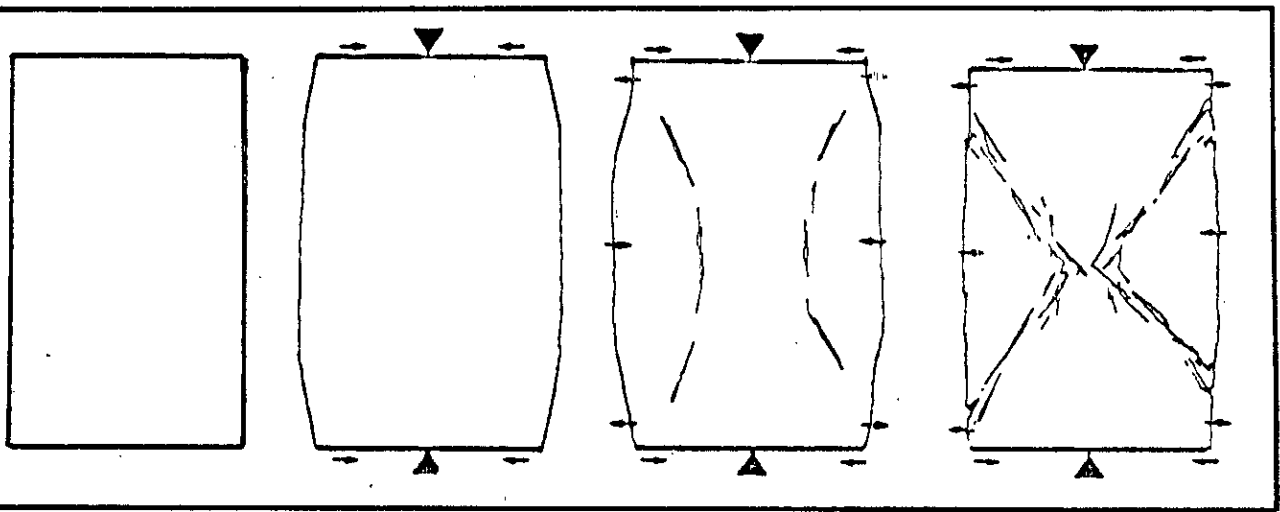


Schéma illustratif de la rupture en mode 1.

10.2.2 Module d'élasticité

Il s'agit du module tangent d'élasticité, déterminé à partir de la loi de comportement contrainte-déformation du béton.

Concernant le béton de sable dunaire étudié, celui-ci vaut:

$$E = 21.000 \text{ MPa.}$$

A titre indicatif, F.GORISSE [5] a obtenu pour ses micro-bétons les valeurs suivantes:

Micro-béton 1:

$$\left. \begin{array}{l} D_{\max} = 1.6 \text{ mm} \\ R_{c28} = 20 \text{ MPa} \end{array} \right\} \longrightarrow E = 22.000 \text{ MPa.}$$

Micro-béton 2:

$$\left. \begin{array}{l} D_{\max} = 5.0 \text{ mm} \\ R_{c28} = 20 \text{ MPa} \end{array} \right\} \longrightarrow E = 26.000 \text{ MPa.}$$

L'auteur détermine d'un autre côté le module d'élasticité d'un béton classique ($D_{\max} = 20 \text{ mm}$) ayant la même résistance à la compression à 28 jours ($R_{c28} = 20 \text{ MPa}$) et obtient $E = 30.000 \text{ MPa}$.

Ces résultats ont tendance à montrer que pour une même résistance à la compression, le module d'élasticité est plus grand pour les bétons ayant les plus gros granulats.

Cette conclusion ne saurait, à notre sens, être significative que si les matériaux comparés auraient subi une mise en oeuvre et une conservation analogues. En plus, ils devraient être coulés dans

le même type d'éprouvettes d'essai et posséder la même résistance à la compression.

10.3 ADHERENCE AVEC LES ACIERS:

10.3.1 Introduction

L'adhérence entre le béton et l'acier est une liaison étroite entre eux. Cette propriété est très importante puisque c'est grâce à elle que les efforts appliqués sur une pièce en béton armé sont transmis du béton vers l'acier, notamment dans les zones tendues de la pièce où le béton résiste très mal.

D'autre part, cette liaison empêche le glissement de l'acier par rapport au béton jusqu'à une certaine limite de la force appelée " force de liaison ".

Cette résistance à la rupture de la liaison ou à l'arrachement de la barre d'acier dépend de plusieurs facteurs, essentiellement:

- la rugosité des barres: L'effort qu'il faut appliquer à une barre lisse pour obtenir l'arrachement est inférieur à celui d'une barre de même diamètre possédant des saillies.
- le diamètre de la barre,
- la résistance du béton à la traction,
- la longueur d'ancrage de la barre.

La contrainte d'adhérence (τ) est définie comme étant le quotient de la variation par unité de longueur de l'effort axial de traction équilibré par le périmètre utile de l'armature (fig 32).

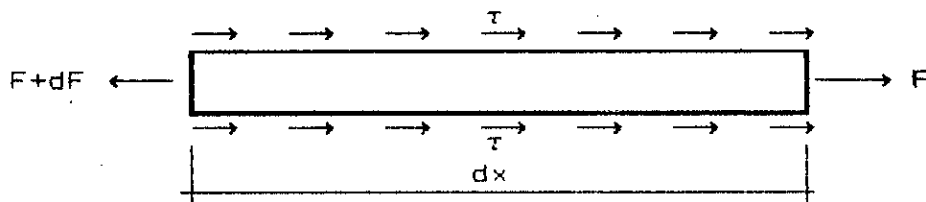


fig 32: Contrainte d'adhérence.

$$\tau = \frac{\frac{dF}{dx}}{U} = \frac{1}{U} \cdot \frac{dF}{dx} = \frac{1}{\pi\phi} \cdot \frac{dF}{dx}$$

dF: Variation par unité de longueur de l'effort de traction axial exercé sur l'armature.

dx: Élément de longueur.

U: Périmètre utile de l'armature.

ϕ : Diamètre de l'armature.

Dans le cas où la barre est enrobée sur une longueur l, la contrainte d'adhérence (supposée constante sur toute la longueur) vaudra:

$$\tau = \frac{1}{\pi\phi} \cdot \frac{F}{l}$$

L'objectif que s'est fixé notre expérience est la détermination de cette contrainte d'adhérence dans le cas du béton de sable dunaire structural.

Pour cela, nous avons fixé la longueur d'ancrage l et le diamètre de l'armature ϕ et avons fait varier la force de traction F jusqu'à la rupture de liaison entre le béton et l'acier.

La valeur obtenue est alors comparée à l'ordre de grandeur de celle habituellement adoptée pour les bétons armés classiques.

10.3.2 Détermination expérimentale de l'adhérence éprouvettes en béton de sable

Les éprouvettes utilisées, au nombre de trois (03), sont du type prismatique 10x10x40 (fig 33). Elles ont été préalablement coulées dans un coffrage en bois.

Démoulées après 24 heures, elles ont été conservées dans un bac d'eau jusqu'à la veille de l'expérimentation.

aciers

Les deux (02) barres d'acier noyées dans chaque éprouvette (fig 33) sont des tors 12 (T12). Leurs longueurs d'ancrage sont:

L₁ = 15 cm,

L₂ = 20 cm.

Cette inégalité dans les longueurs d'ancrage a été volontairement adoptée afin de pouvoir observer le glissement de la barre 1 par rapport à la barre 2 qui sert en définitive de barre témoin. Pour éviter, durant l'essai, la rupture de l'éprouvette par traction et pouvoir observer le phénomène d'adhérence, nous avons placé quatre (04) barres lisses longitudinales de diamètre 6 mm ($4\phi 6$), voir figure 33.

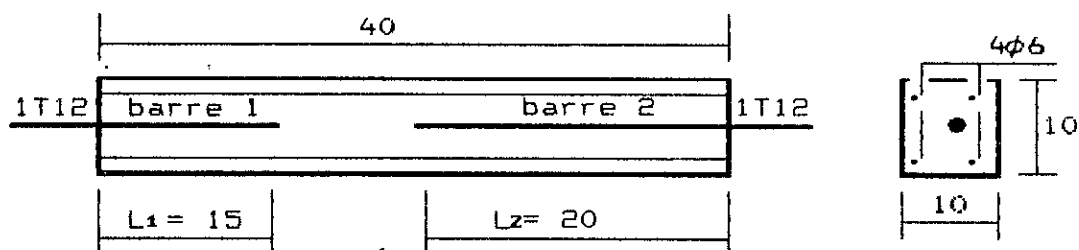


fig 33: Eprouvette d'essai.

déroulement de l'essai

L'éprouvette de béton de sable armé est maintenue verticale dans une presse de traction (50 KN de capacité et 250 mm de course du piston) par l'intermédiaire des deux (02) barres d'acier saisies dans les mors supérieur et inférieur de la presse. Celle-ci est dotée d'une sortie électrique permettant la lecture de la force de traction appliquée.

La mise en charge de la presse se fait progressivement par commande manuelle permettant d'éviter la rupture brutale de l'éprouvette.

On exerce une force de traction progressive sur les deux barres d'acier enrobées dans le bloc de béton de sable et on observe les résultats.

résultats

La force de rupture moyenne de l'adhérence ainsi que la contrainte moyenne d'adhérence qui lui correspond sont indiquées dans le tableau 24 qui suit:

	Force de rupture de l'adhérence (KN)	Contrainte d'adhérence correspondante (N/mm ²)
épreuve 1	37.2	6.54
épreuve 2	37.8	6.65
épreuve 3	40.4	7.11
MOYENNE	38.4	6.77

Tableau 24: Résultats de l'essai d'adhérence.

10.3.3 Conclusions

Ces essais d'information nous ont donné l'ordre de grandeur de la contrainte d'adhérence qui se situe autour de 6.77 N/mm².

Cette valeur est tout à fait comparable à celle des bétons classiques qui elles varient d'après H.RENAUD et F.LETERTRE [29] entre 3 et 9 N/mm², selon la variation des paramètres dont dépend la contrainte d'adhérence.

De ce point de vue, on peut conclure que le béton de sable dunaire dont nous avons adopté la composition peut être armé et peut travailler en association avec les aciers tors.

ETUDES STRUCTURELLES EN BETON DE
SABLE DUNAIRE.

11.1 INTRODUCTION:

Ce chapitre traite du comportement du béton de sable dunaire en flexion simple et en cisaillement sur des éléments de structure grandeur nature.

Ces éléments sont des poutres de dimensions 12.5x22x220 confectionnés à base de béton de sable dunaire dont la composition a été adoptée après étude menée précédemment sur 42 compositions différentes.

Il s'agit de réaliser deux (02) types d'essai d'information afin de tirer un maximum de résultats expérimentaux (détermination des flèches, des déformations, des contraintes de rupture, évolution des fissures etc...).

Ces résultats pourront être comparés à ce qui est connu habituellement sur le béton armé ayant des caractéristiques similaires.

Il ne s'agit donc pas d'une étude systématique de comportement où les paramètres d'influence sont variés et les relations entre eux sont établies.

11.2 COMPORTEMENT EN FLEXION SIMPLE:

11.2.1 Etude expérimentale

11.2.1.1 Schéma de l'essai:

Le schéma adopté pour l'essai de comportement en flexion simple est celui indiqué sur la figure 34.

Le type de chargement de la poutre a été choisi afin d'éliminer l'influence de l'effort tranchant dans la zone centrale où sa valeur est nulle (voir diagramme sur la figure 34).

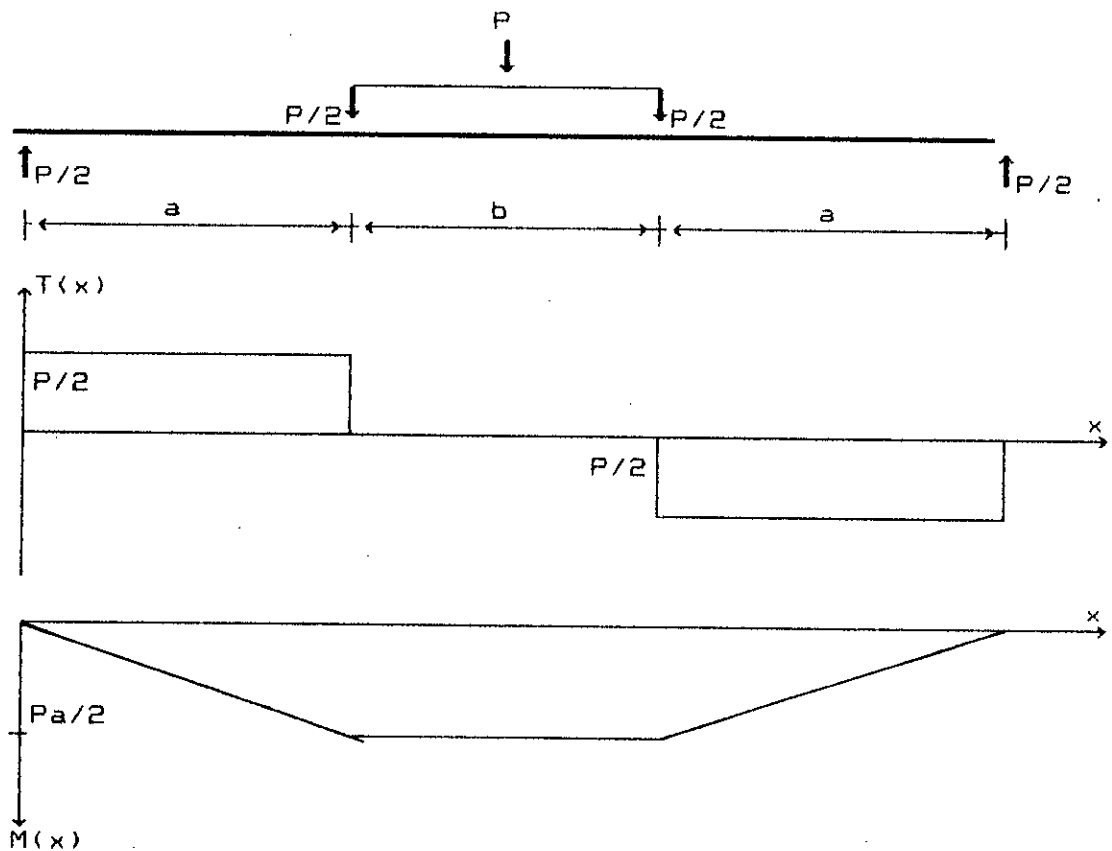


fig 34: Schéma d'essai,
diagramme des efforts tranchants,
diagramme des moments fléchissants.

11.2.1.2 Matériaux utilisés:

a) Le béton de sable

Le béton de sable utilisé est celui adopté précédemment. Nous rappelons ci-dessous sa composition au m^3 :

- . Dosage en ciment 350 kg/m³
- . Sable dunaire 1249 kg/m³
- . Filler calcaire 300 kg/m³
- . Eau de gâchage 281 l/m³

Trois (03) échantillons témoins ont été prélevés de la gâchée de coulage de la poutre. Ce sont les trois (03) éprouvettes cylindriques 16x32 ayant servi à la détermination de la loi contrainte-déformation (chapitre 10).

La résistance à la rupture moyenne par compression obtenue sur ces éprouvettes est de 16.5 Mpa.

b) Les aciers

. Les aciers longitudinaux inférieurs de résistance sont des T12. Ils ont les caractéristiques mécaniques suivantes: (source: Fiche technique de la Société Nationale de Sidérurgie, SNS).

- limite élastique: 4200 kgf/cm²
- résistance à la traction: 4850 kgf/cm²
- allongement minimum de rupture: 14%.

. Les aciers longitudinaux supérieurs de montage sont des $\phi 10$.

. Les cadres sont en $\phi 8$.

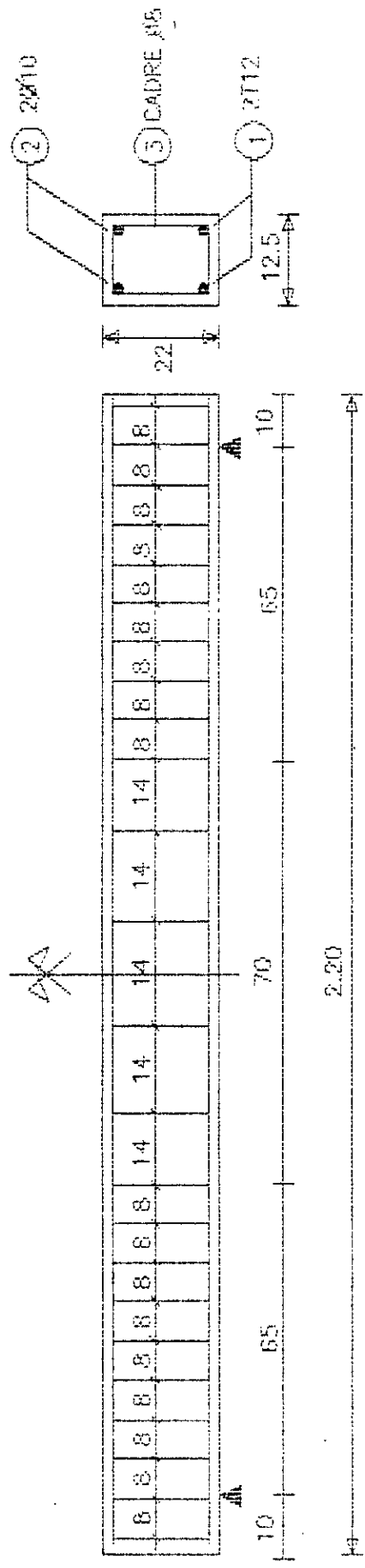
11.2.1.3 Description de la poutre testée:

La poutre testée a une longueur de 2.20m et une section 12.5x22 (voir fig 35).

Elle a été coulée dans un coffrage métallique.

Après décoffrage, elle a été conservée à l'air libre et maintenue humide par arrosage quotidien.

FIG 35:
 COFFRAGE ET FERRAILLAGE.
 ESSAI DE FLEXION SIMPLE SUR
 POUTRE EN BETON DE SABLE
 DUNAIRE



DESIGNATION	NUMERO	DIAMETRE	NOMBRE	SCHEMA
Armature inférieure longitudinale de resistance	①	T112	2	45° 2.14 45°
Armature supérieure longitudinale de montage	②	Ø110	2	2.14
cadre	③	Ø15	24	17 7

11.2.1.4 Dispositif expérimental:

Le dispositif utilisé est celui du département de génie-civil de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Il comprend:

a) appareillage

- une presse composée de:

- . Table d'essai.
- . Portique coulissant sur lequel est suspendu un palonnier.
- . Dispositif de chargement réglable grâce à un groupe hydraulique et permettant d'exercer une charge centrée sur la poutre.

- un palonnier partageant la force centrée initiale en deux (02) charges égales et symétriques.

b) instrumentation

- **La charge de rupture:**

Elle est connue par simple lecture sur le cadran de la presse. La charge augmente par paliers successifs jusqu'à la rupture.

- **Les flèches:**

Elles sont mesurées grâce à deux (02) comparateurs (précis à 0.01 mm près) placés au milieu de la poutre et fixés au sol au moyen de supports métalliques.

Le contact comparateur-poutre est établi à l'aide d'une plaque en plexiglass de manière à avoir une surface de contact lisse.

La flèche mesurée est la moyenne de lecture sur les deux (02) comparateurs.

- **Les déformations:**

Les déformations relatives du béton et des aciers ont été mesurées à l'aide de jauges électriques reliées à un pont d'extensométrie qui permet les lectures directes des déformations.

- . Pour le béton: Une jauge de longueur 90 mm, de résistance 120 Ω et de facteur de sensibilité 2.10 a été collée au milieu de la surface supérieure de la poutre car c'est la partie la plus comprimée et c'est dans cet endroit que devrait se produire la déformation maximale du béton.
- . Pour les aciers: Deux (02) jauges ont été collées aux milieux des barres inférieures de traction après

polissage de la surface de contact. Elles nous permettent de lire sur l'extensomètre les déformations des barres d'acier.

Ces jauges ont les caractéristiques suivantes:

Longueur: 10 mm.

Résistance ohmique: 120 Ω .

Facteur de sensibilité: 2.055.

11.2.2 Analyse des résultats

Nous donnons dans le tableau suivant (tableau 25) les différentes mesures effectuées à l'aide de l'instrumentation utilisée; nous tenterons par la suite de les analyser une à une.

Pult (KN)	Mult (KN.m)	Flèche au moment de la 1ère fissuration (mm)	Pf (KN)	Mf (KN.m)	ϵ_a (%)	ϵ_b (%)
52	16.90	11.60	22	7.15	1.54	0.75

Tableau 25: Résultats des mesures.

Pf: charge de la 1ère fissuration

Mf: Moment correspondant.

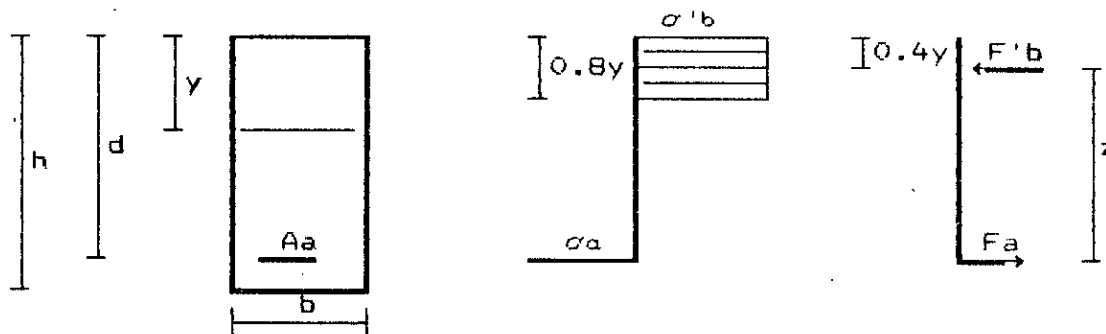
ϵ_a : déformation de l'acier

ϵ_b : déformation du béton.

12.2.2.1 Charge et moment ultimes:

Afin de relativiser les valeurs de la charge et moment ultimes mesurées expérimentalement sur la poutre d'essai, nous avons calculé au moyen du règlement BAEL 83 [30] les valeurs de ces caractéristiques à l'état limite ultime.

Le principe repose sur l'équilibre de la section et les calculs selon le schéma de la figure 36.



Section transversale

Diagramme des contraintes

fig 36: Schéma de calcul (Art A.4.3.41 BAEL 83)

- Les efforts normaux valent:

$$F'b = 0.8\gamma_x b x \sigma'b$$

$$F_a = A_x \sigma_a$$

- Le bras de levier du couple interne z vaut:

$$z = d - 0.4y$$

● L'équilibre des efforts normaux donne:

$$F_a = F_b \implies 0.8\gamma_x \sigma'b x b = A_x \sigma_a \implies y = \frac{A_x \sigma_a}{0.8\sigma'b x b}$$

$$\text{avec } \sigma'b = \frac{0.85 f_{cz8}}{1.5}$$

● L'équilibre des moments donne:

$$M_{ult} = F'b x z = 0.8\gamma_x b x \sigma'b (d - 0.4y)$$

$$M_{ult} = F_a x z = A_x \sigma_a (d - 0.4y)$$

Avec ce schéma de calcul et pour les données concernant la section de notre poutre:

$$b = 12.5 \text{ cm}$$

$$d = 19 \text{ cm}$$

$$A_x = 2T12 = 2.26 \text{ cm}^2$$

$$f_{cz8} = 16.5 \text{ MPa} = 165 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_a = 4200 \text{ kgf/cm}^2$$

Les charge et moment ultimes vaudront:

$$M_{ult} = 14 \text{ KNm}$$

$$\text{et } M_{ult} = \frac{P_{ult}}{2} \times a \implies P_{ult} = \frac{2M_{ult}}{a} = 43 \text{ KN}$$

Notons que ce calcul ne tient pas compte du moment fléchissant dû au poids propre de la poutre.

Notons également que la charge et le moment ultimes obtenus par l'expérimentation dépassent ceux calculés par le biais du BAEL 83 de quelque 20 %. Ce qui tend à prouver que les formules proposées par ce règlement sont largement sécuritaires.

11.2.2.2 Flèche maximale:

Elle est située au milieu de la portée et vaut expérimentalement 11.60 mm. Elle a été mesurée au moment de l'apparition de la première fissuration ($P_f = 22 \text{ KN}$ et $M_f = 7.15 \text{ KNm}$).

Il n'a pas été possible de suivre son évolution au delà de cette valeur à cause de la rupture de la poutre. Cette rupture est d'ue vraisemblablement à la fragilité du béton de sable.

Afin de situer cette valeur, nous faisons remarquer que H.RENAULT et F.LETERTRE [29] limitent la valeur de la flèche pour des poutres en béton armé reposant sur deux appuis à $1/500$. Ceci en l'absence de fissures.

Ce qui donnerait pour le cas de notre poutre $f_{max} = 4.40$ mm.

La figure 37 montre l'évolution de la flèche avec l'accroissement de la charge jusqu'à l'apparition de la première fissure.

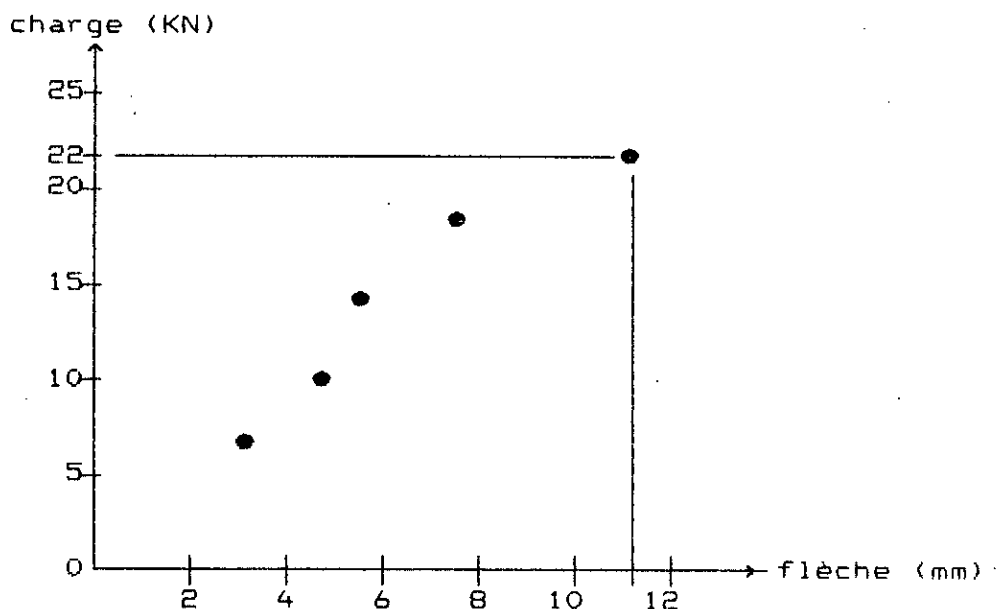


fig 37: Evolution de la flèche.

On remarque que les flèches sont sensiblement proportionnelles aux charges appliquées.

11.2.2.3 Déformations:

Les figures 38 et 39 ci-après montrent respectivement le raccourcissement du béton de sable dans la zone la plus comprimée et l'allongement de l'acier de résistance dans la zone la plus tendue, en fonction de l'accroissement de la charge appliquée.

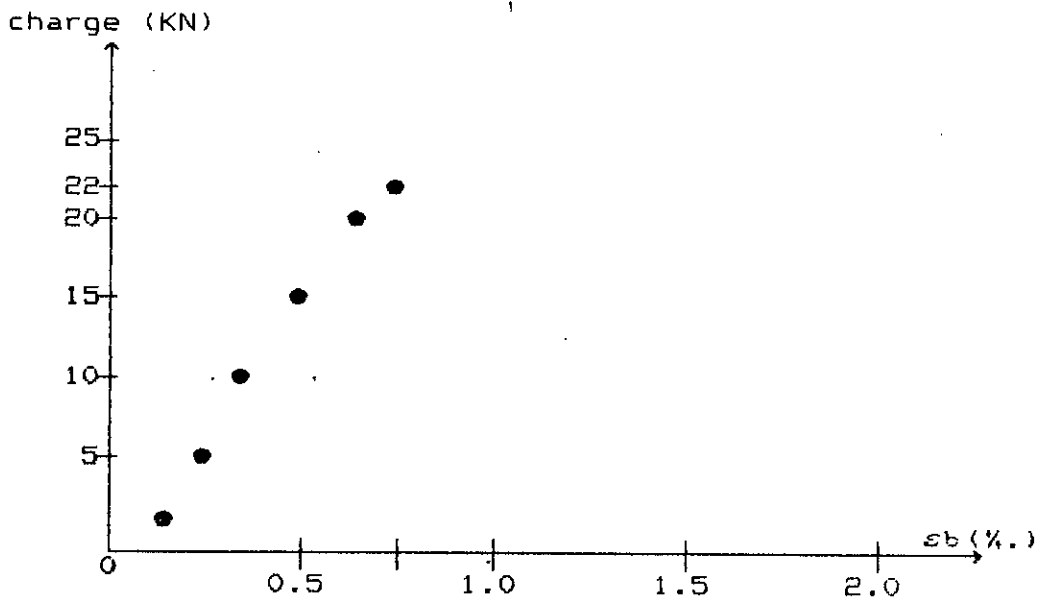


fig 38: Raccourcissement du béton de sable avec l'accroissement de la charge.

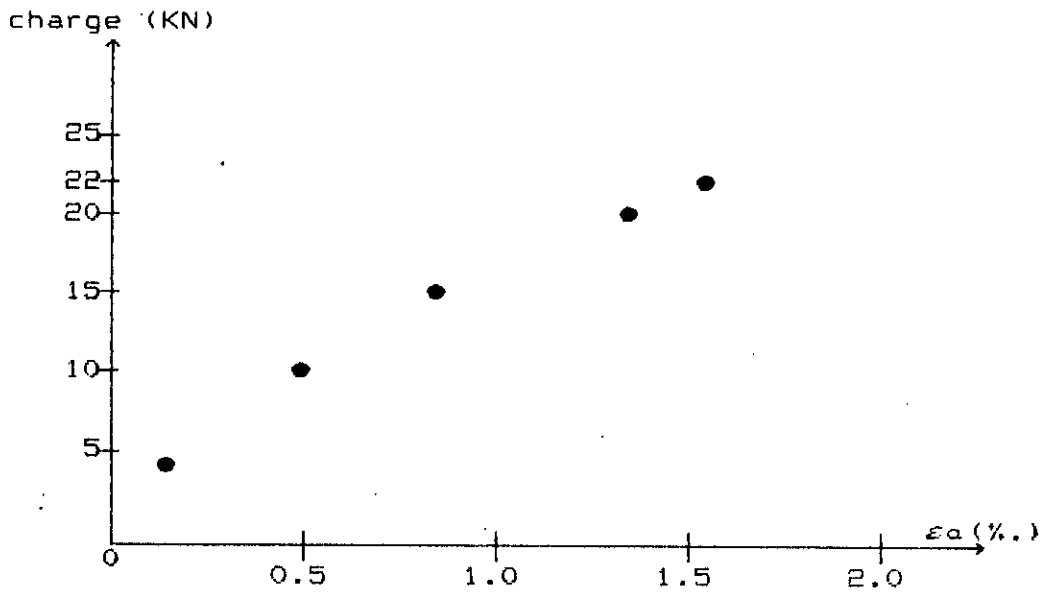


fig 39: Allongement de l'acier avec l'accroissement de la charge.

Le béton de sable a atteint au moment de l'apparition de la première fissure une déformation de 0.75%. La quasi-linéarité de son comportement et sa rupture brutale suggèrent sa fragilité. L'acier à ce moment là était encore en phase élastique si l'on se réfère à la courbe de la figure 39.

11.2.2.4 Morphologie des fissures:

Un aspect important du comportement du béton armé réside dans la disposition des fissures.

Nous reproduisons dans la figure 40 qui suit la morphologie des fissures relevées sur la poutre testée.

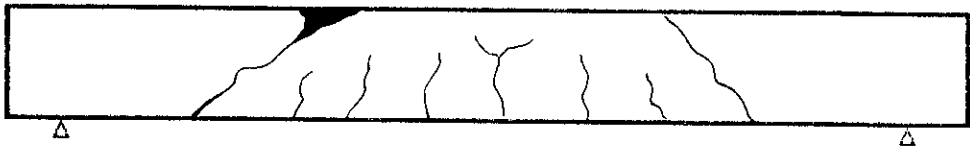


fig 40: Morphologie des fissures sur la poutre en béton de sable dunaire soumise à des efforts de flexion simple.

Les premières fissures sont apparues dans la région centrale. Elles sont verticales. Ceci montre que le béton a cessé de résister à la traction et que l'acier a pris le relais.

En augmentant la charge, des fissures inclinées sont apparues en dehors de la partie médiane. Elles ont continué à s'ouvrir jusqu'à la rupture brusque de la poutre dans la zone d'application de la charge.

11.3 COMPORTEMENT AU CISAILLEMENT:

Nous nous sommes intéressé dans cette partie du chapitre à la détermination expérimentale de l'effort tranchant ultime qui provoque la rupture de la poutre testée. La contrainte de cisaillement ultime sera quant à elle calculée selon les prescriptions du règlement BAEL 83.

Celle-ci vaut pour une section rectangulaire (Art A.5.1):

$$\tau_u = \frac{V_u}{bd}$$

où, V_u : Effort tranchant ultime
b: Largeur de la section
d: Hauteur utile de la section.

Pour cela, nous avons confectionné en béton de sable dunaire la poutre de la figure 41 ci-après.

Les matériaux, l'appareillage et l'instrumentation sont les mêmes que ceux utilisés dans l'étude du comportement en flexion simple.

L'effort tranchant ultime enregistré sur le cadran de la presse a été de 63 KN, ce qui correspond à une contrainte de cisaillement égale à 23 bars.

$$\begin{aligned} V_u &= 63 \text{ KN} \\ \tau_u &= 23 \text{ bars} \end{aligned}$$

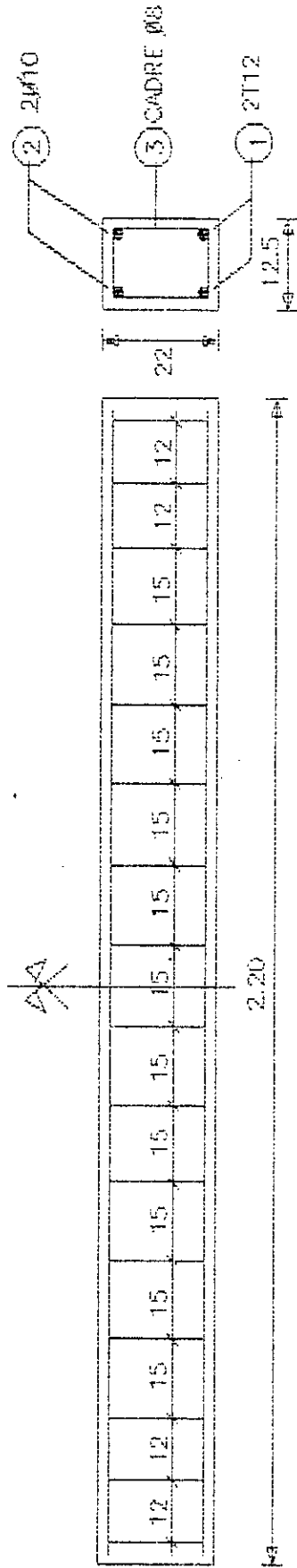
La contrainte de cisaillement ultime ne peut techniquement être mesurée directement à notre connaissance. Nous avons dû la déterminer à l'aide de l'artifice de calcul cité plus haut. Par conséquent il nous a pas été possible de comparer la valeur de cette contrainte ultime avec celle qu'aurait donné la théorie.


Toutefois cette valeur pourrait constituer un ordre de grandeur référentiel pour des travaux systématiques futurs sur le cisaillement des poutres en béton de sable dunaire armé.

En outre cet ordre de grandeur pourrait très bien être comparé avec celui obtenu sur une poutre en béton armé classique ayant les mêmes caractéristiques dimensionnelles, rhéologiques et mécaniques.

FIG 41:

COFFRAGE ET FERRAILLAGE.
 ESSAI DE CISAILEMENT SUR
 POUTRE EN BETON DE SABLE
 DUNAIRE



DESIGNATION	NUMERO	DIAMETRE	NOMBRE	SCHEMA
Armature inférieure longitudinale de resistance	①	T12	2	2.14
Armature supérieure longitudinale de montage	②	Ø10	2	2.14
cadre	③	Ø8	16	

11.4 CONCLUSIONS:

Les différents essais d'information réalisés sur les poutres en béton de sable dunaire nous permettent de tirer quelques conclusions préliminaires . Celles ci ne seront définitives que lorsque des études systématiques avec variation de différents paramètres seront effectuées.

Mais d'ores et déjà nous pouvons affirmer avec prudence que le béton de sable dunaire armé se comporte d'une manière analogue que le béton armé classique vis à vis des efforts de flexion simple.

Les valeurs ultimes (charge et moment fléchissant) obtenues sur ces poutres sont sécuritaires si l'on tient compte des prescriptions du BAEL 83. Il en est de même pour l'évolution de la flèche et de la flèche maximale.

CINQUIEME PARTIE

CONCLUSIONS GENERALES
ET PERSPECTIVES.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

12.1 CONCLUSIONS GENERALES:

L'ensemble des études que nous avons effectuées sur le béton de sable dunaire pour éléments structurels nous permettent de pouvoir répondre aux questions préalables que nous nous sommes posées.

. Sable dunaire préférentiel:

L'analyse des résultats d'essais physico-chimiques réalisés sur six (06) types de sable dunaire se trouvant dans la région centrale de l'Algérie (axe Alger-El Goléa) a fait ressortir que tous ces sables sont du type fin et presque homométrique, d'où leurs importantes porosités (plus de 40 % pour la quasi-totalité).

Une mention spéciale est à accorder de ce point de vue au sable dunaire d'El Goléa qui ne présente que 34 % de porosité. Ce taux est très acceptable et concurrence même ceux des sables pour béton traditionnel.

. Nature et finesse des fillers:

Nous pensons pouvoir confirmer, au vu de nos résultats, que les

fillers calcaires sont les mieux adaptés pour remplir les vides intergranulaires entre les grains de sable constituant le squelette du béton de sable.

Ces fillers ont d'excellentes affinités avec le ciment, lui même constitué essentiellement de calcaire.

D'un autre côté, les résistances obtenues avec les fillers calcaires sont plus importantes que celles obtenues avec les fillers siliceux. Cette différence (constatée du reste par d'autres auteurs) est très probablement liée à la nature et à la finesse des fillers.

Les fillers calcaires étant plus fins, ils assurent au mélange une meilleure compacité.

Techniquement, ces fillers sont obtenus, à ce jour, par tamisage manuel, processus lent et peu efficace. Il serait plus profitable de l'industrialiser ou à défaut de le mécaniser afin d'obtenir des quantités importantes en peu de temps.

. Formulation des bétons de sable:

Il n'existe pas de méthodologie de recherche de formulations du béton de sable. Les approches proposées par différents auteurs sont basées exclusivement sur le tâtonnement et sur les approximations successives.

L'approche que nous avons proposée, basée sur la recherche d'une compacité maximale avait pour principal objectif l'obtention d'un béton de sable ayant une résistance mécanique moyenne et une maniabilité plastique. Cet objectif a été atteint.

Cette approche, notamment par sa deuxième variante (variation du rapport E/C+F de 0.40 à 0.60) est à notre sens très judicieuse puisque les rapports utilisés sont analogues à ceux utilisés pour les bétons traditionnels (variation de E/C de 0.40 à 0.60).

. Résistance mécanique:

Des résistances mécaniques appréciables ($R_{c28} = 15$ à 20MPa) peuvent très bien être atteintes dans la fourchette $E/(C+F)=0.40$ à 0.60 . Ces résistances sont suffisantes pour l'emploi du béton de sable dunaire dans des éléments de structure.

. Mesure de la maniabilité:

L'analyse bibliographique nous a permis de constater que les moyens classiques de mesure de la maniabilité sont quelque peu inadaptés aux objectifs que nous nous sommes fixés avec le béton de sable dunaire.

Le wattmètre différentiel que nous avons mis au point paraît, tout à fait convenable du point de vue rentabilité (utilisation de très peu de matériaux) et fiabilité (reproductibilité des résultats d'essais).

D'autre part, son emploi ne nécessite pas de préparations préliminaires particulières si ce n'est l'étalonnage préalable.

Son utilisation pour des essais de recherche sur le béton de sable dunaire est donc recommandée.

. Adhérence du béton de sable avec les aciers:

Le béton de sable dunaire adhère très bien avec les aciers. La contrainte d'adhérence moyenne obtenue lors de nos essais d'information se trouve en très bonne place dans la gamme de celles obtenues avec les bétons traditionnels. Toutefois des essais systématiques doivent être réalisés pour apprécier son évolution vis à vis du changement des différents paramètres liés à l'adhérence.

. Comportement du béton de sable sur les éléments structurels:

Les essais d'information effectués sur deux (02) poutres grandeur nature nous ont permis de faire les constatations suivantes:

- En flexion simple, le comportement est analogue à celui du béton armé traditionnel. Les prescriptions du BAEL restent globalement sécuritaires.

- En cisaillement, le manque de résultats référentiels ne nous a pas permis de conclure définitivement. Il serait intéressant de confectionner des poutres en béton traditionnel et en béton de sable dunaire ayant les mêmes caractéristiques et de comparer les résultats obtenus.

12.2 PERSPECTIVES D'AVENIR:

A l'issue de ces conclusions, il nous reste à préciser dans quels domaines il y a lieu d'envisager la poursuite de ces travaux:

- Le comportement différé du béton de sable est un aspect important qu'il faudra étudier en profondeur. Sa petite granularité pourrait provoquer les phénomènes de fluage et de retrait et poser ainsi un obstacle à l'utilisation de ce matériau dans des éléments structurels.

- Le comportement en flexion et en cisaillement a été étudié ici par des essais d'information. Il conviendra de mener une étude complète avec variation des paramètres de comportement et ce, en adoptant une formulation précise. Celle que nous avons proposée pourrait constituer une base de départ.

- Les performances du béton de sable dunaire pourraient être améliorées par l'introduction d'autres ajouts: adjuvants, gravillons, fibres etc...

La structure du matériau se verra changée et les phénomènes de retrait et fluage pourraient s'avérer moins importants.

- La recherche sur d'autres éléments de structure tels les poteaux ou les dalles pourrait donner des informations complémentaires et utiles et aider à cerner encore mieux les qualités de ce matériau.

- Enfin, si les performances du béton de sable sont améliorées avec l'introduction d'autres ajouts, on pourra se permettre d'utiliser la chaux à la place du ciment (ou encore un liant mixte ciment-chaux) et obtenir ainsi un matériau vraiment local.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1]: CNAT, Centre National d'Animation des entreprises et de Traitement des informations du secteur de la construction. Colloque sur l'utilisation du BTS. Ouargla les 8,9 et 10 mars 1987.
- [2]: CNERIB, Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment. Dossier BTS.
- [3]: CNERIB. Utilisation du béton de sable et des sables de dunes stabilisés. Phases 1,2 et 3.
- [4]: J.BARON et R.LESAGE. La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier. Rapport de recherche LPC No 64, LCPC, Paris, 1976.
- [5]: F.GORISSE. Etude des micro-bétons pour modèles de structures. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics No 291. Déc 1972.
- [6]: M.KAVYRCHINE. Etudes structurelles en micro-béton. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics No 389. Déc 1980.
- [7]: P.POITEVIN. Sand concrete, yesterday and today. FIP commission on concrete. Session 19 of the New Delhi congress. 1986/3.
- [8]: ARIS.C.STAMATOPOULOS. and PANAGHIOTIS.C.KOTZIAS. Concrete without coarse aggregate. ACI journal. sept 1971.
- [9]: SABLOCRETE. Actions pilotes de développement, actions de recherche-développement, actions de coopération. Rapport d'activité. 2 avril 1990.

- [10]: J.J.CHAUVIN. Bétons de sable. Partie 2: La bibliographie soviétique. Projet de coopération Franco-Soviétique. Projet exploratoire No II-B.13. LRPC de Bordeaux, 1988.
- [11]: J.J.CHAUVIN: Le béton de sable en union soviétique. Compte rendu de mission. LRPC de Bordeaux. Sept 1990.
- [12]: B.COURET. Utilisation du béton de sable en technique routière. Mémoire d'ingénieur de génie-civil. IUT "A". Université de Bordeaux. Déc 1982.
- [13]: CEBTP, CES II. Les bétons de sable hypercompactés. Rapport de synthèse. Janvier 1986.
- [14]: LCPC, CEBTP. Synthèse des connaissances sur les bétons de sable. Aout 1986.
- [15]: G.DREUX. Nouveau guide du béton. Edition EYROLLES.
- [16]: F.GORISSE. Essais et contrôles des bétons. Edition EYROLLES.
- [17]: KH. HEAD. Manual of soil laboratory testing. Volume 1.
- [18]: Agressivité des bétons. Circulaire technique N° 83/04 du 04/12/83. Organisme de contrôle technique de construction. Ministère de l'habitat et de l'urbanisme.
- [19]: J.J.CHAUVIN et G.GRIMALDI. Les bétons de sable. Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées N° 157. sept-oct 1988. Réf 3336.
- [20]: Z.R.UNIKOWSKI. Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment. Thèse de doctorat d'ingénieur. LCPC. Paris. Avril 1981.

- [21]: Guide pour le béton de structure à base de granulats légers. American Concrete Institute. ACI committe 213. Edition KAPP et LAHURE. 1970/4.
- [22]: R.GUINEZ, G.GLUAIS et P.DELUDE. Les bétons de sable. Ministère de l'urbanisme et du logement. Laboratoires régionaux de Blois et de Bordeaux. France. 1984.
- [23]: P.DELUDE. Etude de béton de sable. CETE de Bordeaux. Décembre 1984.
- [24]: J.J.CHAUVIN. Bétons spéciaux: les bétons de sable. LRPC de Bordeaux. Février 1987.
- [25]: R.LANCHON. Cours de laboratoire: granulats, bétons et sols. 1977. Edition DESFORGES.
- [26]: A.M.NEVILLE. Properties of concrete. Third édition. ELBS and Pitman Publishing. Great Britain. 1981. 622 pages.
- [27]: F de LARRARD. Réflexions sur un nouvel essai de mesure de la consistance des bétons. Bulletin de liaison, laboratoire des ponts et chaussées N° 166. Mars-avril 1990.
- [28]: R.LHERMITE. Au pied du mur. Editions SDT BTP (France).
- [29]: H.RENAUD et F.LETERTRE. Ouvrages en béton armé. Edition FOUCHER. Paris 1978.
- [30]: BAEL 83. Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites. Oct 1983.

ANNEXES

ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE SOVIETIQUE SE RAPPORTANT AU BETON DE SABLE

1) ARTICLES DIVERS:

- REHBINDER: Nouvelle technologie des matériaux dispersés: une application de la mécanique physico-chimique-Vestrik Acad.S No 8.1968.

- USHAKOVA, BRYATSEVA, GOLDENKOVA, GLUKHOVA, MIKHAILOV: Béton de sable à base de résidus quartzeux du combinat minier d'OLENEGORSK. In, Chim, technol. Pererab. Silik. Syr'ya, Leningrad, ed.Nauba, 1975.

3- SNIP 21-75: Les constructions en béton armé ou béton précontraint. Production Lcpc. Mai 1979. Fiche 8740.

2) REVUE "BETON ET BETON ARME" (Béton I Zhelzobeton):

4- Les bétons de sable - No 5. 1975.

5- MIKHAILOV et coll: Technologie perfectionnée de production de dalles de trottoir en béton de sable - No 5. 1973

6- VERIGIN, PREOBRAZHENSKIY: Activation turbulente des liants d'un béton de sable ciment - No 5. 1973.

7- LVOVITCH, CHAKHNOVITCH, MIKHAILOV: Pieux en béton de sable - No 12. 1974.

8- VOLJENSKI et coll: Béton de sable avec adjuvant plastifiant - No 7. 1975.

9- MIKHAILOV, LVOVITCH, YASTROUBINETZKY: Influence de la technologie de fabrication et de la composition du béton de sable sur ses caractéristiques - No 10. 1977.

10- RZHEVSKIY, DUNDUK, KAN'SHIN, PETROCHENKOV: Béton de sable et de granulats provenant de matériaux de démolition - No 8. 1978.

11- SOUNIME et FOKINE: Préfabrication de pièces en béton de sable - No 2. 1980.

12- MAKEDON, KALENTCHENKO: Moulage de pièces en béton de sable par vibro-damage. No 2. 1980.

13- KRIPOUNOV et coll: Tuyaux vibro-comprimés en béton de sable - No 2. 1980.

14 ROUSSINE et BELIKOV: Résistance de poteaux en béton de sable de laitier à haute résistance - No 2. 1980.

15- TRIFONOV et KOUZNETZOV: Eléments en béton de sable précontraint travaillant en flexion - No 2. 1980.

6- ROJDESTVENSKY et SMOLIANIKOV: Capacité portante d'élément en béton de sable soumis à une flexion transversale - No 2. 1980.

7- LVOVITCH et YASTROUBINETZKY: Déformation des bétons de sable sous charge - No 2. 1980.

8- TRIFONOV et coll: Résistance d'appuis en béton de sable à armature longitudinale stabilisée thermiquement - No 6. 1980.

9- TRIFONOV et coll: Résistance des piliers en béton de sable avec armature longitudinale traitée thermiquement - No 6. 1980.

10- ZOSCHUK, KUZNETZOV: Influence de la forme et de la grosseur des grains de sable concassé sur les propriétés du béton de sable - No 7. 1981.

11- GOLDENBERG et OGANESSIANTZ: Influence d'adjuvants sur les propriétés du béton de sable - No 10. 1981.

12- BRAUDE, OSMAKOV, GOLUBENKOV: Vibro-montage de produits en béton de sable - No 3. 1982.

13- BRAUDE, OSMAKOV, GOLUBENKOV: Moulage des pièces par chocs et vibrations - No 8. 1982.

14 KRASNY et PAVLOV: Efficacité comparée des bétons de sable - No 10. 1982.

15) COMPTES RENDUS DE TRAVAUX UNIVERSITAIRES (IZVEST VYSH UCHEBN ZAVED).

15- KOSOLAPOV, SAMARIN: Etude expérimentale de la variation de la résistance à la torsion d'éprouvettes en béton de sable, préalablement soumises à la compression axiale - No 18. 1975.

16- PECHIKIN, MINAS: Augmentation par imprégnation de la résistance du béton de sable à la corrosion saline - No 6. 1979.

17- YANCHIKOV, VOSTRIKOV: Relation entre la résistance au gel d'un béton de sable routier et le rapport entre sa résistance à la flexion et sa résistance à la compression - No 1. 1978.

18- ZLATOGORSKIJ, MAILYAN: Auto-contrainte de poutres armées en béton de sable et ciment à durcissement en autoclave - No 5. 1982.



(1)

(2)

(3)

ECHANTILLON		Sable de dune LACHOUAT	Sable de dune GHARDAIA	Sable de dune DJELFA
Résidus Insolubles	Prise d'essai			
	Creuset + Précipité	29,5383	29,9534	28,9304
	Creuset vide	27,6209	28,0708	27,2295
	Poids du Résidus	1,9174	1,8826	1,7009
	% Insolubles T	95,87	94,13	85,04
Teneur en Sulfates	Creuset + Précipité	29,0047	26,6964	26,8550
	Creuset vide	28,9515	26,6560	26,8231
	Poids du Précipité	0,0532	0,0404	0,0319
	% SO ₃	0,91	0,69	0,55
	Ca SO ₄ 2H ₂ O			
pH	ti	7,06 - 16,7 °C	7,36 - 16,9 °C	7,42 - 16,9 °C
	tf	7,00 - 16,9 °C	7,00 - 16,9 °C	7,00 - 15,9 °C
Teneur en chlorure	TA _g NO ₃ /cl			
	VA _g NO ₃	0,2	0,15	0,1
	% cl -	7,09 - 10 - 4	5,5175 - 10 ⁻⁴	3,545 - 10 ⁻⁴
Teneur en sesquioxides	R ₂ O ₃			
	Al ₂ O ₃			
	Fe O ₃			
Teneur en carbonate	Vca CO ₃ pur			
	V échantillon	9,75	9,6	9,3
	% ca CO ₃	2,5	4	7
autres	Matières organiques			1,14
	Perte au feu			
	Ca ²⁺			
	CaO			

ANALYSES CHIMIQUES DE SABLES DUNAIRES.

ANNEXE 2

REPRESENTATION LACHOUAT
L'ANALYSTE. H. ZOUKRI

SECTION CHIMIE
DOSSIER:.....BENMALEK MOHAMED LARBI

ESSAIS	ECHANTILLON	FILLER CALCAIRE
	PRISE D'ESSAI	
	CREUSET+PRECIPITE	69.2166
	CREUSET VIDE	69.2048
	POIDS DU RESIDUS (P1)	0.0118
% INSOLUBLES	50 . P1	0.59
	CREUSET + PRECIPITE	69.2502
	CREUSET VIDE	69.2269
	POIDS DU PRECIPITE (P2)	0.0233
% SO ₃ ²⁻	57.133. P2	0.831
% CaSO ₄	29.162 . P2	0.6794
	CREUSET + PRECIPITE	64.5948
	CREUSET VIDE	64.5903
	POIDS DU RESIDUS(P3)	4.5 x 10 ⁻³
% R ₂ O ₃	66.666 P3	0.7499
	PHi : Ti	
	PHT	
	V Ag NO ₃	
% Nacl	0.0468 . V	
	V NaOH	0.25
% CaCO ₃	(10 - V) . 10	97.50

ANALYSES CHIMIQUES DES FILLERS CALCAIRES.

ANNEXE 3: