

COMPORTEMENT DU BÉTON DE SABLE DUNAIRE SUR DES ÉLÉMENTS D'OSSATURE ARMÉS

I. Introduction

Le béton de sable a trouvé depuis sa conception par F.Coignet entre 1850 et 1875 beaucoup de domaines d'utilisation et selon différents procédés. Les usages concernaient aussi bien le bâtiment que les travaux publics et les ouvrages d'art. Nous citons à titre d'exemples quelques réalisations encore en service aujourd'hui :

• En C.E.I (ex U.R.S.S)

- Piscines, voûtes, pistes de luge (en béton projeté).
- Travaux de rénovation avec ferrailage de surface et couche de béton de sable des installations sportives lors des jeux olympiques de MOSCOU de 1980 (en projeté).
- Pistes et aéroports (en coulé) : cas de l'autoroute de Moscou-Toula dans sa section Serpoukov-Toula réalisé en 1988.
- Toitures à plis (en préfabriqué).

• en France

- Chaussées routières (en compacté).
- Dallages industriels (en coulé).
- Prédalles (en précontraint).
- Partie de l'aqueduc de Vannes, entre 1869 et 1872.

• en Egypte

- Phare de Port-Said.

• dans le Golfe d'Arabie

- Mur de soutènement et dalles de planchers, réalisés avec du sable de dunes.

La plupart des travaux d'étude et de réalisation avec ce matériau n'ont été effectués jusque là que sur des éléments de construction peu sensibles à la sécurité. Très peu de travaux sur des éléments porteurs du bâtiment ont été signalés dans la littérature se rapportant au béton de sable. Ceci est dû essentiellement à l'apparition et au succès dès la fin du 19^{ème} siècle du béton à gros granulats qui offre des niveaux de résistance plus élevés. Celui-ci, et malgré son coût élevé, a pris par la suite le monopole des matériaux de construction.

Une autre raison, non moins essentielle, pouvant expliquer cette carence est manifestement le peu d'informations disponibles sur le comportement du béton de sable sur des «épreuves structurelles d'essai» grandeur nature pouvant renseigner sur les charges et déformations et les déformations ultimes, l'évolution des déformations, des fissures et des flèches, etc. Ces propriétés sont en effet difficilement appréciables sur des éprouvettes de laboratoire.

Aujourd'hui avec la crise financière que traverse l'Algérie, le déficit en logements et la pénurie des graviers, il est devenu impératif de construire au moindre coût en valorisant les matériaux locaux et en les exploitant aussi bien pour la fabrication des parties porteuses que celles de remplissage et de clôture.

C'est dans ce cadre que nous présentons les résultats d'essais réalisés sur le comportement du béton de sable dunaire sur des poutres de dimensions naturelles, dans l'esprit d'apporter une modeste contribution allant dans le sens de l'encouragement de l'utilisation de ce matériau pour la confection d'éléments porteurs peu sollicités. C'est le cas par exemple des constructions peu ou pas étagées des villes du sud du pays.

2. Composants du béton de sable

• **Le Sable** : C'est le composant principal du béton de sable puisqu'il constitue son squelette. Il s'agit du sable de dunes de la région de Laghouat (400 kms au sud d'Alger), caractérisé par sa finesse et son homométrie. Le tableau 1 et la figure 1 représentent la caractérisation de

Région	Laghouat	Djelfa	Ghardaïa
Granularité (mm)	0/0.63	0/0.63	0/0.425
Grains gros (%)	néant	néant	néant
Grains moyens (%)	26	16	22
Grains fins (%)	73	83	77
% de fines	1.80	1.20	2.40
Module de finesse	1.20	1.11	1.10

Tableau 1 : Caractéristiques granulométriques

M.L. BENMALEK
Centre universitaire
de Guelma
A. BALI
Ecole nationale
polytechnique d'Alger

RÉSUMÉ

Les matériaux locaux font l'objet, en ces temps de crise financière en Algérie, de différentes études de valorisation dans la perspective de leur exploitation maximale. Parmi ces matériaux se distingue le béton de sable dunaire dont le squelette est formé de sable de dunes couvrant près de 60% du territoire national.

Des études concernant sa formulation, la détermination de ses caractéristiques mécaniques et rhéologiques ont pu être menées et ont prouvé que ce matériau pourrait remplacer avantageusement le béton traditionnel dans certains domaines de la construction. En revanche, son comportement dans des éléments de structure reste très peu connu.

Les résultats des essais expérimentaux menés sur des poutres armées grandeur nature que cet article présente, renseigne sur :

- Le comportement du matériau en flexion simple, notamment les charges et les moments ultimes, l'évolution des fissures et des déformations.

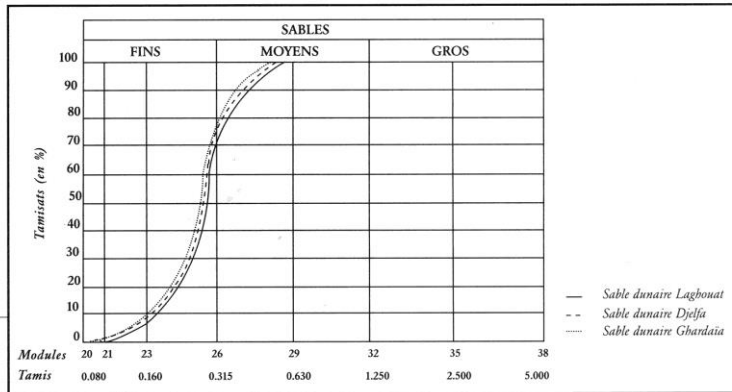
- Le comportement en cisaillement. Un ordre de grandeur de la contrainte ultime de cisaillement pouvant servir de référence a pu être établi dans cette étude.

En outre, et avant la réalisation de ces expériences, la bonne adhérence du béton de sable avec les aciers tors a été mise en évidence par l'essai d'adhérence classique.

MOTS CLÉS

béton de sable • comportement • structure • poutre • adhérence • Fissure • déformation • flexion simple • cisaillement.

Figure 1 : Courbes granulométriques



ce sable ainsi que ceux des régions de Djelfa (110 kms plus au nord) et Ghardaïa (200 kms plus au sud) et montrent que les 03 sables présentent quasiment la même granulométrie. D'un autre côté, le sable dunaire de la région de Laghouat est caractérisé par une densité apparente de 1480 kg/m³, une densité absolue de 2630 kg/m³ et une porosité de 44%. L'essai d'équivalent de sable a prouvé quant à lui que ce sable est très propre (ES à vue = 93 et ES piston = 89). Enfin, l'analyse chimique effectuée sur ce sable a permis de relever les taux suivants de matières indésirables (tableau 2).

	Résultats d'essais	Observations et conclusions
Matières organiques	Néant	Essai calorimétrique
Sulfates et sulfures	% SO ₃ = 0.91	Taux < 1% Taux modéré d'agressivité (NFP 18-301)
Chlorures	% Cl ⁻ = 0.0007	Taux < 0.65 % Pouvoir corrosif négligeable (DTU, Fascicule 65, Art 24-25)

Tableau 2 : Essais chimiques

- **Les fillers :** Les fillers utilisés sont de nature calcaire parce qu'ils créent selon Z.R.Unikowski [1] des liaisons épitaxiales avec le ciment portland lui-même constitué d'environ 80% de calcaire. Ils ont été obtenus par tamisage manuel au tamis de 80 microns de maille des restes de concassage d'une carrière abandonnée située à Djebel Dakhla, à la sortie nord de la ville de Laghouat. Ces fillers sont caractérisés par :
 - Une granulométrie très fine : Grains de 1 à 20 microns selon l'analyse sédimentométrique effectuée sur ce matériau. De ce point de vue, il s'apparente à de la farine.
 - Une composition presque pure : 97.5% en poids du matériau sont des carbonates de calcium (CaCO₃).
 - Une très faible présence d'éléments nocifs.

- Un coefficient d'absorption d'eau (K=28%) très voisin de celui des liants traditionnels : 27% pour le ciment portland et 28% pour la chaux selon Guinez et AL [2].
- **Le ciment :** Type CPA 325, de fabrication récente. Surface spécifique Blaine 3300 cm²/g et densité 2.85.

3. Composition du béton de sable dunaire

La composition adoptée est la suivante (au m³):

- ciment : 350 kg
 - sable dunaire : 1249 kg
 - filler calcaire : 300 kg
 - eau de gâchage : 281 litres.
- Soit E/(C+F) = 0.43

fc28 = 16.54 Mpa (valeur moyenne d'essai d'écrasement sur 03 éprouvettes 16x32). Affaissement au cône d'Abrams = 9.30 cm, correspondant à un béton plastique. Cette composition a été adoptée à la suite d'une étude systématique de formulations sur 18 compositions [3]. Celle recherchée devait concilier une résistance caractéristique à la compression moyenne avec une maniabilité plastique facilitant sa mise en œuvre.

4. Essais sur le béton de sable dunaire

Ils ont été réalisés dans le laboratoire de béton de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

4.1 Adhérence avec les aciers :

Nous avons voulu réaliser cet essai d'information sur l'adhérence du béton de sable avec les aciers crénelés (tors) de construction pour savoir si ces 02 matériaux peuvent travailler correctement en association et si la contrainte de rupture de la liaison entre eux définie par la relation qui suit a le même ordre de grandeur que celle obtenue habituellement avec le béton traditionnel de granulats.

$$\tau = \frac{dF/dx}{U} = \frac{1}{U} \times \frac{dF}{dx} = \frac{1}{\pi\phi} \times \frac{dF}{dx} \quad (1)$$

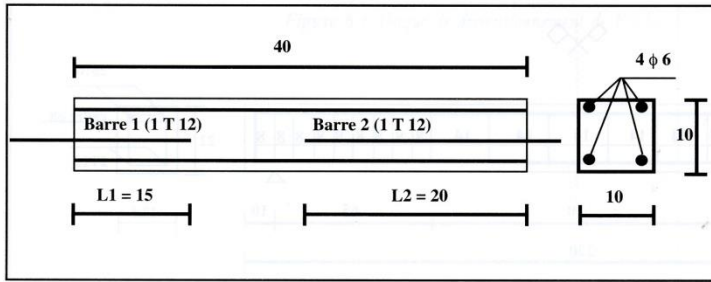


Figure 2 : Schéma d'essai

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.
 Cette contrainte peut s'écrire $\tau = \frac{1}{\pi\phi} \times \frac{F}{l}$ si elle est supposée constante sur toute la longueur d'adhérence.

Dans l'éprouvette d'essai (Figure 2), les 04 barres ont été placées pour éviter sa rupture prématurée par traction et pouvoir observer le phénomène d'adhérence. D'autre part, la barre 2 ancrée de 20 cm dans l'éprouvette sert de barre témoin.

La force de rupture moyenne d'adhérence obtenue sur 3 éprouvettes identiques a été $F=38.4KN$ correspondant à une contrainte d'adhérence moyenne calculée $\tau = 6.77 N/mm^2$. Selon H. Renaud et F. Leterre [4], la contrainte d'adhérence du béton traditionnel avec les aciers tors varie entre entre 3 et 9 N/mm^2 . De ce point de vue, il est permis de conclure aisément que le béton de sable dunaire s'accommode bien avec les aciers de construction.

4.2 Comportement en flexion :

• **Schéma de l'essai :** Le schéma adopté pour l'essai (Figure 3) permet d'éliminer l'influence de l'effort tranchant dans la zone centrale, objet de l'étude.

• **Poutre armée testée :** Elle est décrite schématiquement dans la figure 4. Les zones d'appui sont renforcées en cadres F afin d'éviter une rupture prématurée de la poutre par cisaillement.

• **Instrumentation et mesure :**

- L'évolution des flèches a été mesurée à l'aide de 02 comparateurs précis 0.01 mm près, placés au milieu de la poutre et fixés au sol au moyen de supports métalliques. La flèche mesurée est la moyenne de lecture des 02 comparateurs.

- L'évolution des déformations relatives du béton et des aciers a été mesurée à l'aide de jauges électriques reliées à un pont d'extensométrie permettant les lectures directes des déformations.

L'évolution de la déformation du béton a été suivie grâce à une jauge de 90 mm de longueur

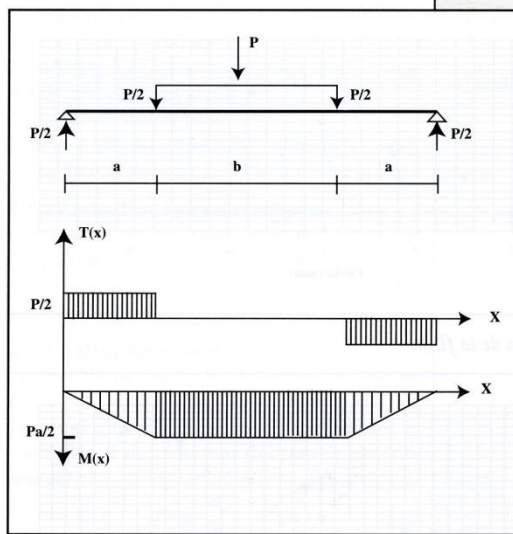


Figure 3 : Schéma d'essai et diagrammes de $T(x)$ et $M(x)$

collée au milieu de la surface supérieure de la poutre. Celle des aciers au moyen de 02 jauges de 10 mm de longueur collées au milieu des barres inférieures de traction.

• **Résultats et commentaires :**

Le tableau 3 suivant donne quelques résultats caractéristiques chiffrés.

P_f : Charge de la 1ère fissuration

M_f : Moment fléchissant correspondant

ϵ_a : Déformation relative de l'acier

ϵ_b : Déformation relative du béton de sable.

Pult (KN)	Mult (KN.m)	Flèche à l'apparition de la 1ère fissuration (mm)	P_f (KN)	M_f (KN.m)	ϵ_a (‰)	ϵ_b (‰)
52	16.90	11.60	22	7.15	1.54	0.75

• **charge et moments ultimes :**

Pour la section de la poutre d'essai adoptée (12.5x22), la charge et moment ultimes calculés suivant le schéma classique de l'article A.4.3.41 du BAEL 83 auraient été :

 Mult (calculé) = 14 KN.m

 Pult (calculé) = 43 KN

Résultats qui sont inférieurs de quelque 20% par rapport à ceux obtenus par voie expérimentale

Tableau 3 : Résultats chiffrés

Figure 4 : Poutre armée testée en flexion simple

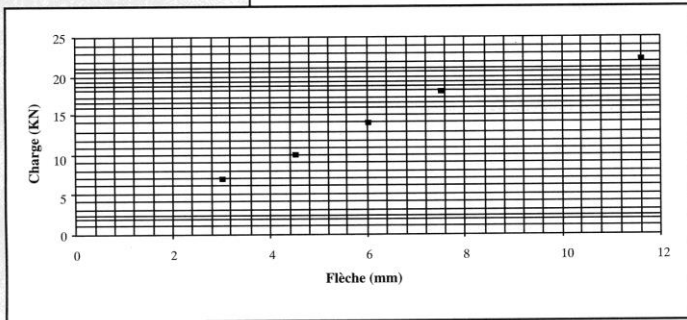
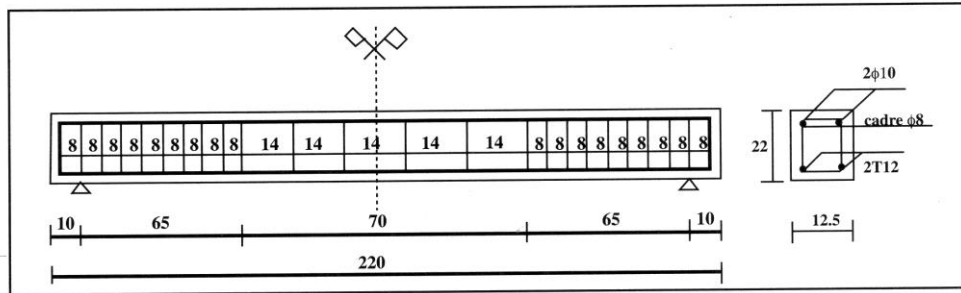


Figure 5 : Évolution de la flèche

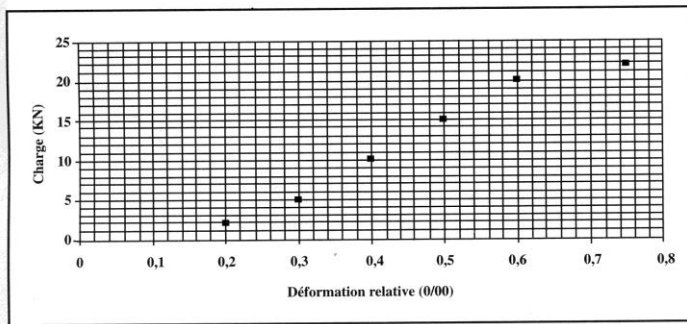


Figure 6 : Raccourcissement du béton de sable

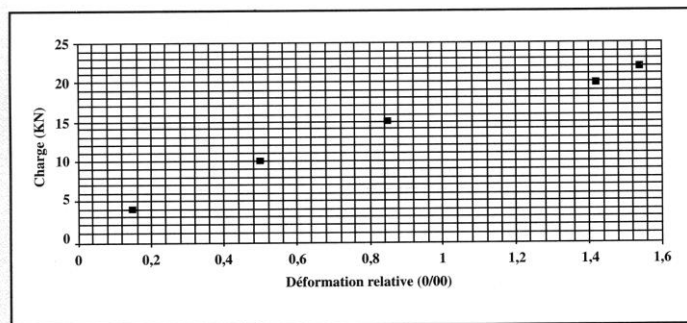


Figure 7 : Allongement de l'acier

(Tableau 3). Cette comparaison entre des valeurs calculées par le biais d'un règlement conçu pour le béton traditionnel et des valeurs obtenues expérimentalement sur un béton spécial a tendance à prouver que les formules pro-

posées par ce règlement sont largement sécuritaires pour ce type de béton.

• **flèche maximale :**

Son évolution est sensiblement proportionnelle à la charge appliquée (Figure 5). Pour une poutre en béton armé simplement appuyée, la flèche limite généralement admise est selon H. Renaud et F. Letertre [4] fonction de sa longueur et a pour valeur 1/500, ceci en l'absence de fissures.

Si une telle restriction est appliquée au cas de notre poutre, la flèche maximale serait $f_{max} = 4.40$ mm, ce qui est loin d'équivaloir la quantité mesurée pendant notre expérience et qui est $f_{max} = 11.60$ mm.

De ce point de vue, on peut penser que le béton de sable dunaire offre la sécurité exigée au béton traditionnel.

• **déformation relatives :**

Les figures 6 et 7 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 charge appliquée. Le béton de sable a atteint au moment de l'apparition de la 1ère fissuration 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 ($\epsilon_a = 1.54\%$) si l'on se réfère à la courbe de la figure 7.

• **morphologie des fissures :**

Un aspect important du comportement du béton armé réside dans la disposition des fissures. Nous reproduisons dans la figure 8 qui suit la morphologie des fissures relevées sur la poutre testée.

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.

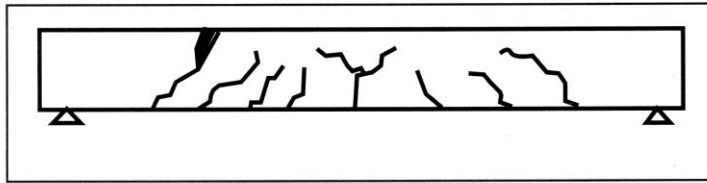
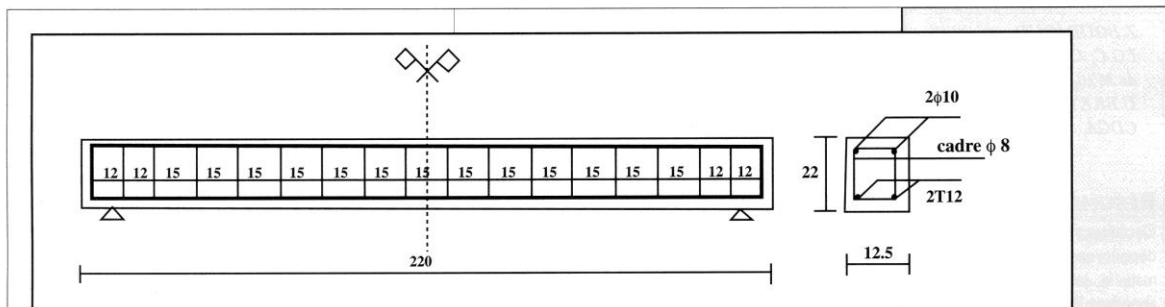


Figure 8 : Morphologie des fissures

Figure 9 : Poutre armée testée au cisaillement



4.3 Comportement au cisaillement

• Poutre armée testée : Le schéma de l'essai ainsi que l'instrumentation adoptée sont les mêmes que ceux de l'essai de flexion. Le coffrage de la poutre est également le même. Le ferrailage par contre a été adopté à la nature de l'essai (Figure 9).

• Résultats et commentaires

L'effort tranchant ultime correspondant à la rupture de la poutre testée dans la zone d'application de la charge a été de 63 KN. Cet effort engendre une contrainte de cisaillement calculée selon la formule qui suit de l'article A.5.1 du BAEL 83 de 23 bars.

$$\tau_u = \frac{Vu}{bd} \quad (2)$$

avec V_u : Effort tranchant
 b : Largeur de la section
 d : Hauteur utile de la section.

Cette valeur de la contrainte ultime de cisaillement ne pouvant à notre connaissance être techniquement mesurée, nous ne saurons la comparer à une valeur théorique. Elle peut cependant constituer un ordre de grandeur référentiel pour des travaux systématiques sur le cisaillement des poutres en béton de sable dunaire.

Cet ordre de grandeur pourrait en outre être comparé à celui obtenu sur une poutre en béton armé traditionnel ayant les mêmes caractéristiques dimensionnelles, rhéologiques et mécaniques.

5. Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

- Le béton de sable dunaire adhère très bien aux aciers de construction. La contrainte d'adhérence moyenne obtenue se situe en une très bonne position dans la gamme de celles obtenues avec les bétons traditionnels. Le béton de sable dunaire peut être armé.
- En flexion simple, le comportement du béton de sable est analogue à celui du béton traditionnel. Les prescriptions du BAEL 83 restent globalement sécuritaires. Il serait intéressant d'apprécier l'influence des paramètres du comportement dans une étude appropriée.
- En cisaillement, le manque de résultats de références dans la littérature ne nous permet pas d'émettre une conclusion définitive. La valeur de la contrainte de cisaillement obtenue pourrait constituer une étape utile pour des études systématiques futures.
- La rupture des deux poutres testées a été brutale. Elle a eu lieu dans le cas de la flexion simple dans la phase élastique de comportement, ceci tend à montrer que le matériau béton de sable dunaire a un comportement fragile ■

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Z.R.Unikowski. «Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment».Thèse de doctorat d'ingénieur. LCPC. Paris Avril 1981.
- [2] R.Guinez, G.Gluais et P.Delude. «Les bétons de sable». Ministère de l'urbanisme et du logement. Laboratoires de Bordeaux et de Blois. France 1984.
- [3] M.L. Benmalek. «Formulation des bétons de sable pour confection d'éléments de résistance. (en cours).
- [4] H. Renaud, F. Letertre. «Ouvrage en béton armé». Edition Foucher. Paris 1978.