

COMPORTEMENT DES BÉTONS DE SABLE EN MILIEU SULFATIQUE

ROBU Ion, Professeur des Universités, UTC Bucarest Roumanie - JAUBERTHIE Raoul, Maître de Conférences, HDR, INSA Rennes, France
 Cisse Ibrahima, Professeur, Ecole Polytechnique Thiès, Sénégal - ACHOURA Djamel, Maître Assistant, Université d'Annaba, Algérie
 Correspondant : raoul.jaubert@insa-rennes.fr, Tel : 00 33 2 23 23 83 14 / Fax 00 33 2 23 23 84 66

RÉSUMÉ

Les bétons de sable sont des mortiers de résistance qui peuvent remplacer les bétons classiques de ciment dans des régions ou des pays sans gros granulats. Ce qui est le cas de certaines zones de l'Algérie ou du Sénégal dans lesquelles les carrières de roches massives sont absentes mais avec une source inépuisable de sable de dune. La valorisation de ce produit dans le bâtiment ou dans les travaux publics a donc été envisagée; cette étude s'intègre dans une collaboration internationale : Algérie, France, Roumanie et Sénégal. Après avoir établi la formulation optimale de ces bétons de sable, cet article relate plus particulièrement de leur tenue dans des milieux sulfatiques. Il s'avère que l'utilisation des bétons de sable, moyennant un certain nombre de précautions c'est-à-dire par ajout de fillers tels que basalte, silicite ou cendres de balles de riz, peut être envisagée même dans ces milieux considérés comme agressifs.

Mots Clés

Sable de dune, durabilité, corrosion sulfatique, effet pouzzolanique, ajouts actifs.

1. Introduction

Les bétons de sable qui font partie des matériaux de génie civil sont constitués principalement de sables (un ou plusieurs), de fillers, de ciment et d'eau. Ils sont destinés à remplacer les bétons classiques de ciment [1] lorsqu'il y a un déficit local ou régional de gros granulats.

Deux types d'approches de formulation des bétons de sable ont été proposés, une théorique inspirée de la formule de Caquot qui consiste à trouver la granularité optimale et une expérimentale basée sur la réalisation de gâchées successives [1 et 2]. Les bétons de sable ont le même dosage en ciment que les bétons traditionnels (250-400 kg), la compacité optimale est obtenue grâce à un ajout complémentaire de fillers. Les fillers (ou fines d'ajouts) sont donc utilisés essentiellement pour améliorer la compacité en complétant l'ossature granulaire et ainsi réduire le dosage en ciment onéreux. Les performances des bétons de sable dépendent du dosage en ciment et de celui en fillers ainsi que de la nature pouzzolanique ou non de ces derniers. Les fillers inertes peuvent, non seulement combler les vides, mais aussi provoquer des épitaxies avec les phases hydratées du ciment. Par exemple, le filler calcaire influence de façon positive par ce phénomène, la résistance des mortiers. Les poudres réactives [3] [4] telles que fumée de silice, laitiers de haut fourneau, poudres de basalte, silicites, cendres broyées de balles de riz [5-9], cendres volantes [10], tufs volcaniques, diatomites, etc., agissent par un double effet : correction granulométrique et effet pouzzolanique. Les applications actuelles des bétons de sable sont essentiellement dans le domaine routier, dans les fondations superficielles ou profondes (pieux) et en VRD (assainissement). Elles nécessitent une étude approfondie de la durabilité de ces bétons de sable. Dans ce contexte, la présente étude relate leur comportement dans des solutions sulfatiques. La concentration des solutions sulfatées utilisées dans cette étude est voisine de celle des eaux usées des réseaux d'assainissement.

2. Matériaux utilisés et mode expérimental

2.1. Type de ciment

Le type de ciment utilisé est un ciment CPJ-CEM II/A 32.5 R (V) PM CP2 de l'usine Lafarge de Saint Pierre La Cour. Il contient comme ajout des cendres volantes de Cordemais. Sa composition en oxydes est donnée dans le tableau 1 et les

caractéristiques mécaniques moyennes dans le tableau 2. Il contient en outre 4% de sulfate (exprimé en SO_3).

Tableau-1 Composition chimique élémentaire du ciment.

Insolubles	11.8	S^{2-}	<0.01
SiO_2	25.05	Cl	0.022
Al_2O_3	8.6	Perte au feu	2.2
Fe_2O_3	3.5	Non dosé	0.468
CaO	55.4	Total	100
MgO	0.9	CO_2	1
K_2O	1	CaO libre	1.2
Na_2O	0.15	Alcalins actifs	0.75
SO_3	2.7		

Tableau-2 Caractéristiques physico-mécaniques moyennes du ciment utilisé.

R compression (MPa) :	
2j	18.0
7j	33.0
28j	48.0
Début de prise (mn)	200
Stabilité (mm)	2.0
Masse volumique (g.cm^{-3})	2.99
Surface spécifique Blaine ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$)	350
Chaleur d'hydratation 12h (J.g^{-1})	140

La composition chimique de ces cendres volantes est donnée dans le tableau 3.

Tableau-3 Composition chimique élémentaire des cendres volantes.

$\text{SiO}_2 = 42-54$	$\text{CaO} = 2-7$	$\text{K}_2\text{O} = 0.5 - 5$
$\text{Al}_2\text{O}_3 = 22-32$	$\text{MgO} = 1-3$	$\text{Na}_2\text{O} = 0.5 - 5$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4-15$	$\text{SO}_3 = 0.2 - 2$	Perte au feu = 2.5 - 7

Leur granularité est comprise entre 0.5 et 200 μm et leur surface spécifique est de 3000 à 5000 $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$, la densité réelle est comprise entre 1.9 et 2.4 g.cm^{-3} , la densité absolue est comprise entre 2.65 et 2.8 g.cm^{-3} , la densité apparente (en vrac) est comprise entre 0.5 et 0.8 g.cm^{-3} .

2.2. Sables et ajouts actifs

Les échantillons de cette étude sont réalisés avec du sable de dune essentiellement quartzueux et l'échantillon témoin avec du sable normalisé (CEN EN 196-1 conforme à ISO 679).

La granulométrie du sable de dune est déterminée au granulomètre laser, elle est reportée sur la figure 1.

Figure-1 Granulométrie des sables de dune.

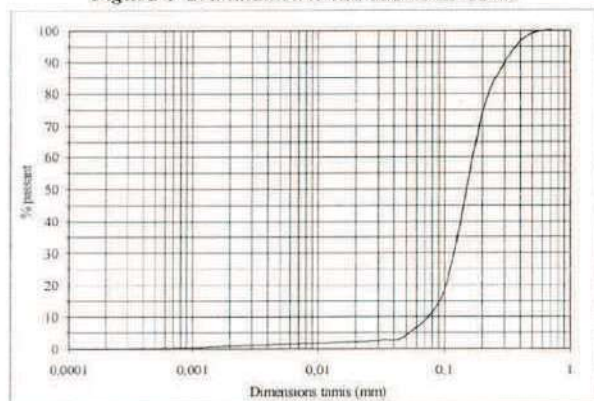
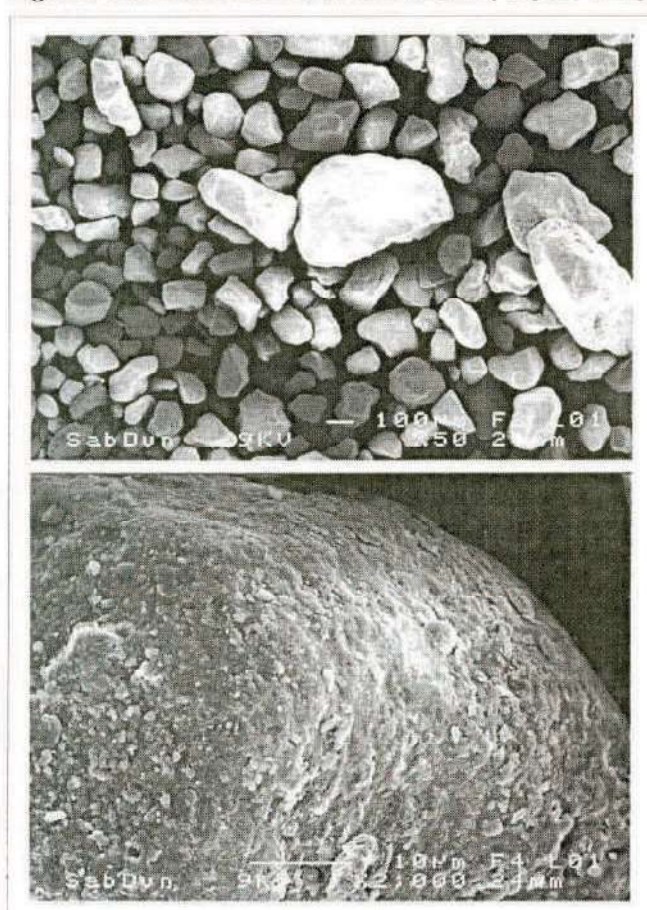


Figure-2 Observations au MEB du sable de dune (*50) et (*2000).



Les observations obtenues au MEB sont présentées par la figure 2.

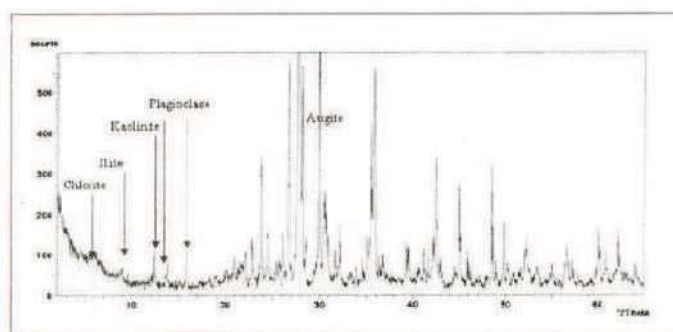
Les grains de quartz sont arrondis, émoussés et de faible écart granulométrique (autour de quelques centaines de microns, figure 1a). Cette forme est caractéristique des transports éoliens. Aucune

trace de chocs ou d'altération n'est décelable même avec des grossissements plus importants. Sur la figure 2b on peut voir que la surface arrondie est recouverte d'écailles dont la surface est de quelques 100 m² et d'épaisseur très faible. Cette formation est due à de l'argile et la couleur rouge est due à des oxydes de fer. Ceci a été vérifié par diffraction X qui a montré les raies très intenses de quartz et en très faible quantité des minéraux argileux.

Les ajouts actifs utilisés sont des poudres de basalte et de silixite ainsi que des cendres de balles de riz [4] et [7]).

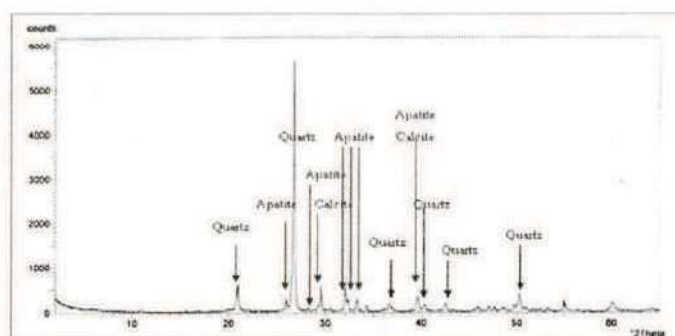
Les balles de riz et par voie de conséquence leurs cendres contiennent une ossature de silice amorphe [8] qui leur confèrent des qualités pouzzolaniques importantes. La poudre de basalte, déchet du concassage de la roche, contient des feldspaths plagioclases, de l'augite et des oxydes. L'analyse diffractométrique de ce produit est reportée figure 3. Des traces de minéraux argileux sont détectées (chlorite, kaolinite et illite) ; de façon classique on attribue ces minéraux à l'altération des plagioclases.

Figure-3 Diagramme de diffraction X de la poudre de basalte (Cu K α filtré)



Les silixites de couleur rosâtre à marron sont des rejets industriels non recyclés de la Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba. La présence de quartz, des traces d'apatite et de calcite sont observées sur la diffraction X de la figure 4.

Figure 4 : Diagramme de diffraction X de la poudre de silixite (Cu K α filtré)



En outre, ces silixites contiennent des composés amorphes ou crypto cristallins de silice sous forme d'opale et de calcédoine. En résumé, ces 2 matériaux, silixite et cendres de balles de riz, contiennent une partie amorphe qui peut leur conférer des propriétés pouzzolaniques.

Les principales caractéristiques physiques de ces matériaux sont reportées dans le tableau 4.

Tableau-4 Caractéristiques physiques du sable de dunes et des ajouts

Matériaux	Masse vol. abs. (Kg m ⁻³)	Masse vol. app. (Kg m ⁻³)	Fines <80 µm (%)	Surfaces spé (cm ² g ⁻¹)
Sable de dune	2940	1520	2.1	4390
Basalte	3260	1650	11.5	1611
Silexite	2670	1500	5.3	2990
Cendres de balles	2350	1220	80	6960

La teneur en SiO₂ de ces différents matériaux est la suivante: Sable de dune 99%, Basalte 47%, Silexite 82% et Cendres de balles de riz 79%.

Composition des bétons

La composition des bétons de sable avec ou sans ajouts est caractérisée par les différents rapports massiques reportés dans le tableau 5.

La quantité d'eau a été ajustée pour obtenir une même maniabilité pour tous les mélanges.

Tableau-5 Composition des bétons de sable avec ou sans ajouts

Série	E/C	C/(S _d -B+S+C _{br})	E/(C+S _d +B+S+C _{br})	B+S+C _{br} /S
1 Témoin	0.76	0.25	0.15	0.00
2	0.76	0.25	0.15	0.49
3	0.80	0.25	0.16	0.84
4	0.82	0.25	0.16	0.20

E: Eau ; C: Ciment ; S_d: Sable de dune ; B: Basalte; S: Silexite ; C_{br}: Cendre de balles de riz

Préparation et conservation des éprouvettes

La taille des éprouvettes retenue est 4*4*16 cm³. Les échantillons sont démoulés après 24 h et conservés à humidité saturante pendant 7 j, puis ils sont conservés en salle climatisée (50 % d'humidité relative, 20°C) jusqu'à obtention d'une masse constante. Ensuite ils sont immergés dans les solutions différentes, les échantillons conservés dans l'eau servent de témoin et ceci pendant 1 an. Les différentes solutions sulfatiques sont décimales : sulfate d'ammonium (NH₄)₂SO₄, sulfate de sodium Na₂SO₄ et acide sulfurique H₂SO₄. Les échantillons sont ensuite sortis des bains de conservation et mis à nouveau en salle sèche jusqu'à masses constantes avant d'être testés.

3. Résultats et discussions

Les principales caractéristiques mécaniques suivies dans cette étude sont les résistances à la flexion et à la compression. Les résultats de ces essais sont reportés dans les tableaux 6 et 7.

Le comportement du ciment utilisé dans un mortier normalisé (caractérisé par E/C=0.5 et C/S_n=0.33) est reporté dans le tableau 7.

Le béton de sable de dune est caractérisé par des résistances mécaniques relativement faibles. Ceci est lié à la finesse de ce sable et à sa forte teneur en minéraux argileux.

Les résistances mécaniques ont pu être améliorées par des ajouts qui agissent par deux phénomènes distincts:

- Amélioration de la compacité car plus fins que le sable,
- Effet pouzzolanique par leur teneur en silice réactive.

Tableau-6 Résistances mécaniques des différents bétons.

Série	Milieu de conservation	R. flexion (MPa)	R. compression (MPa)
1	H ₂ SO ₄	2.74	14.8
2	H ₂ SO ₄	3.60	23.4
3	H ₂ SO ₄	3.45	23.1
4	H ₂ SO ₄	3.10	24.7
1	(NH ₄) ₂ SO ₄	3.50	20.4
2	(NH ₄) ₂ SO ₄	4.80	26.6
3	(NH ₄) ₂ SO ₄	4.63	26.9
4	(NH ₄) ₂ SO ₄	3.10	31.6
1	Na ₂ SO ₄	3.32	17.4
2	Na ₂ SO ₄	4.58	21.4
3	Na ₂ SO ₄	4.12	28.5
4	Na ₂ SO ₄	3.55	33.4
1	H ₂ O	2.40	19.0
2	H ₂ O	4.12	25.4
3	H ₂ O	3.55	30.0
4	H ₂ O	3.12	33.5

Tableau-7 Résistances mécaniques du mortier normal

Série	Milieu de conservation	R. flexion (MPa)	R. compression (MPa)
5.1	(NH ₄) ₂ SO ₄	6.16	63.62
5.2	Na ₂ SO ₄	5.23	63.34
5.3	H ₂ O	5.37	57.89

Comme ajouts, nous avons utilisé un basalte finement broyé, des silexites sous produits de l'exploitation de phosphates et des cendres de balles de riz fortement siliceuses [8]. Ces différents matériaux sont facilement disponibles en Algérie et au Sénégal et d'un coût très faible (ils sont même considérés comme des déchets).

En remplaçant partiellement le sable de dune par ces poudres réactives, les augmentations de résistances sont particulièrement importantes et les dégradations sont beaucoup plus faibles quel que soit le milieu de conservation (en comparaison du béton de sable de dune sans ajout). L'effet le plus important sur l'évolution des résistances mécaniques est obtenu dans le cas des cendres de balles de riz. Ici, les deux phénomènes précédemment cités sont plus importants qu'avec les autres ajouts. La silice contenue dans les balles de riz est amorphe et par là même fortement réactive. A ceci s'ajoute une granulométrie très petite (à cause de la remontée dans les canaux de la plante en même temps que la sève) qui ne fait que accroître sa pouzzolanité.

Les faibles concentrations des solutions sulfatiques (0.1 N) voisines de celles rencontrées dans les eaux usées n'ont pas affectées de manière significative les résistances mécaniques. Des durées de conservation beaucoup plus longues (plusieurs années) correspondant à la durée de vie des éléments seraient nécessaires pour suivre l'évolution sur un cycle de durée de vie.

Seule la solution d'acide sulfurique a entraîné une baisse de résistance mais celle-ci est due à la corrosion acide et non à la corrosion sulfatique.

4. Conclusion

Le béton de sable de dune est caractérisé par des résistances mécaniques modestes. Ceci est dû à la finesse du sable et de sa teneur en impuretés argileuses. Les propriétés mécaniques de ce béton peuvent être fortement améliorées en remplaçant partiellement le sable de dune par des ajouts actifs comme les poudres de basalte et des silexites ou des cendres de balles de riz. Ces ajouts ont donc un effet double, par leur finesse ils agissent en tant que correcteur granulométrique et par leur teneur en amorphes ils agissent

en tant que matériaux pouzzolaniques. La conservation en milieu sulfatique dont la concentration en ions sulfates est de 4800 mg/l n'a pas affecté l'évolution des résistances mécaniques par rapport à la conservation dans l'eau. Seul l'acide sulfurique se différencie légèrement des autres solutions par la corrosion acide. L'utilisation des bétons de sable, moyennant un certain nombre de précautions c'est-à-dire par ajout de fillers tels que basalte, silexite ou cendres de balles de riz peut être envisagée même dans des milieux considérés comme agressifs par exemple sulfatiques.

5. Références

1. 'Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation', Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
2. G. CHANVILLARD 'la formulation des bétons de sable par une approche de compacité optimale, rapport de recherche développement, projet SABLOCRETE (1994).
3. I. ROBU, 'Hydraulic Binding Matrix', Creating with Concrete, Dundee, 6-10 Sept. ; T. Modern Concrete Materials : Binders, Additions and Admixtures, (1999), 331-339.
4. I. ROBU, 'Binding composition with fly ash', Ph. D. Thesis, Civil Engineering Institute, Bucharest, 1986.
5. I. CISSE, 'Contribution à la valorisation des matériaux locaux au Sénégal : Application aux bétons de sable', Thèse de Doctorat de Génie Civil, INSA Rennes, 1996.
6. I. CISSE, R. JAUBERTHIE, M. TEMIMI, J. P. CAMPS, 'Rice Husk Ash : a filler for sand concrete', Creating with Concrete, Dundee, 6-10 Sept. ; T. Exploiting wastes in concrete, pp. 309-317, 1999.
7. I. CISSE, M. LAQUERBE, 'Rice Husk Ash Additions', Creating with Concrete, Dundee, 6-10 Sept. ; T. Exploiting wastes in concrete, pp. 299-308, 1999.
8. S. TAMBA, 'Bétons légers à base de déchets celluloseux', Thèse de Doctorat de Génie Civil, INSA Rennes, 2001.
9. R. JAUBERTHIE, F. RENDELL, S. TAMBA, I. CISSE, 'Origin of the pozzolanic effect of rice husks', Construction and Building Materials, pp. 419-423, vol. 14/8, 2000.
10. M. TEMIMI, M. A. RAHAL, M. YAHIAOUI, R. JAUBERTHIE, 'Recycling of fly ash in the consolidation of clay soils', Resources, Conservation and Recycling, 24 (1998) 1-6.